

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

ЗОРАН С. ПЕТРАШКОВИЋ

**НИСКОЦИКЛИЧНИ ЗАМОР КОД
ЈЕДНОАКСИЈАЛНОГ НАПРЕЗАЊА
ДАМПЕРА-АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ
ЕНЕРГИЈЕ СИСТЕМА ДЦ 90**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд, 2013. године

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING**

ZORAN S. PETRAŠKOVIĆ

**LOW-CYCLING FATIGUE OF A DAMPER-
SEISMIC ENERGY ABSORBER OF DC-
90 SYSTEM UNDER UNI-AXIAL STRESS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Мајци Бисерки и оцу Сави

Захвалност

Аутор овог рада захваљује се многим сарадницима и колегама који су разумели и помогли овај комплексан и дугогодишњи истраживачки процес стварања. Пре свега Проф. др Драгославу Шумарцу за прву значајну примену иновација у колубарском региону и подстицај за истраживање замора. Проф. др Љубомиру Ташкову и Проф. др Лидији Крстевској за велику подршку и сарадњу на експерименталним динамичким тестирањима. Проф. др Владимиру Гоцевском за развој нумеричког моделирања и примени на значајним енергетским објектима у Северној Америци. Такође и Проф. др Растиславу Мандићу на вредним сугестијама и предлозима око коначне систематизације рада.

Брату Жарку и ћеркама Јасминки и Драгани, посебно се захваљујем на сарадњи и подстицају.

Ментор:

Проф. др Драгослав Шумарац, дипл.инж.грађ.

Грађевински факултет Универзитета у Београду, Србија

Чланови комисије:

*1. Проф. др Драгослав Шумарац, дипл.инж.грађ. Грађевински факултет
Универзитета у Београду, Србија,*

*2. Проф. др Растислав Мандић, дипл.инж.грађ. Грађевински факултет
Универзитета у Београду, Србија и*

*3. Проф. др Љубомир Ташков, дипл.инж.грађ. ИЗИИС Институт за
сеизмичко инжињерство и инжињерску сеизмологију, Универзитет "Св.
Ћирило и Методије", Скопље, Македонија,*

Датум одбране:

НИСКОЦИКЛИЧНИ ЗАМОР КОД ЈЕДНОАКСИЈАЛНОГ НАПРЕЗАЊА ДАМПЕРА-АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ СИСТЕМА ДЦ 90

Резиме

а. Циљ истраживања

Циљ истраживања је да се на основу теорије механике лома код нискоцикличног напрезања, физичко-хемијске структуре челика од којих се израђује конструкција дампера-апсорбера сеизмичке енергије и многобројних резултата моделских истраживања и испитивања на моделима и објектима, разуме понашање, открију зависности битне за дефинисање математичког модела за практичну примену и даље иновирање уређаја за контролу хистерезисног понашања. Осим тога неопходно је изнаћи стварну зависност акумулиране дилатације у функцији броја циклуса код дампера ДЦ 90 и других елемената конструкције, јер ову област малог броја циклуса не покривају довољно тачно постојеће релације и познате истражене зависности. Понашање материјала у пластичном стању је дефинисано са три особине: **услов течења** (*yielding condition*), **закон течења** (*a flow rule*) и **закон ојачања** (*a hardening rule*) материјала. Главни циљ ове дисертације је да утврди утицај броја циклуса и акумулираних дилатација, замора у пољу малог броја циклуса, на конструисање дампера Система ДЦ 90. Ова зависност се пре свега утврђује експерименталним истраживањима на основу којих се формира нумерички модел или се коригују постојеће теоретске претпоставке.

Предмет истраживања

Услед цикличног оптерећења, при дејству земљотреса, код уграђених дампера система ДЦ 90 долази до напрезања у условима нискоцикличног

замора материјала. Напони прелазе границу течења, материјал може да издржи мали број циклуса, и врло је важно одредити број циклуса који доводи до коначног колапса дампера. Поред тога, потребно је дефинисати модел за пројектовање жељеног хистерезисног дијаграма дампера-апсорбера сеизмичке енергије система ДЦ 90 под нискоцикличним једнооксијалним напрезањем.

б. Научне методе истраживања

Основна метода истраживања је аналитичка, базирана на принципима механике лома и механике оштећења материјала. Урађен је одговарајући број експеримената како у лабораторији, тако и на терену. Примењене су и методе статистичке обраде експерименталних резултата истраживања, а коришћене су и нумеричке методе прорачуна. Експериментална истраживања обичних узорака од челика S235, у пољу малог броја циклуса (LCF-Low Cycling Fatigue), као и динамичка тестирања дампера типа Canada HQI, Canada HQ Royal, Mionica и других извршена су у лабораторијама Грађевинског факултета у Љубљани, Лабораторији Института за сеизмичко инжењерство и инжењерску сеизмологију ИЗИИС у Скопљу, Лабораторији Војнотехничког Института ВТИ у Београду и Иновационој лабораторији за сеизмичко инжењерство Систем ДЦ 90 у Београду. Експериментална истраживања у пољу максималних амплитуда дилатација у опсегу од 0.5% до 5%, упоређена су са срачунатим параметрима материјала C_1 , γ , Manson-Coffin закона $N_f = (\Delta\varepsilon/C_1)^\gamma$. Нумеричка симулација ове зависности показује врло добро поклапање са експерименталним подацима са одступањима у границама од 0.9% до 1.9%.

Радне хипотезе

Све хипотезе базиране су на претпоставкама механике лома и пропагације прслина у постеластичном нискоцикличном аксијалном напрезању, хипотезе о структури материјала, природи везе атома решетке материјала као и утицаја легирајућих хемијских елемената, као и саме конструкције

апсорбера, технологије израде и толеранција у геометрији и површинској обради, као и технологији израде конструкције апсорбера-дампера.

в. Резултати истраживања

Може се разумети да добијени резултати испитивања и нумеричке анализе боље објашњавају феномен понашања рада конструкција у пољу малог броја циклуса јер уводе елементе акумулиране дилатације и броја циклуса. Разјашњен је феномен ојачања и омекшавања и дефинисани су дијаграми зависности границе еластичности и других параметара хистерезисног понашања у пољу малог броја циклуса у зависности од просечне максималне амплитуде дилатације (0.5% до 5%) и броја циклуса напрезања (20 до 1000). Потпуно је јасно да само довољан број експеримената може дати одговор на питање понашања конструкције у пољу малог броја циклуса (LCF). Обављено је тестирање 36 модела са преко 50 програма тестирања. Постојеће теорије пластичности, посебно са аспекта спознаје закона ојачања могу се ослонити на резултате истраживања (зависности $N_f, \Delta\epsilon_{pl}, R, E$) и на добијене експерименталне дијаграме. За потребе дефинисања хистерезисног понашања добијени дијаграми дефинишу феномен ојачања, омекшавања и промена нагиба узлазне и криве ојачања. Посебно је значајна особеност хистерезисног понашања у пољу малог броја циклуса, где број циклуса N_f и укупно акумулирана пластична дилатација ($\Delta\epsilon_{pl}$), детерминишу основне параметре хистерезисног дијаграма, као што је промена границе еластичности (R) и промена нагиба криве ојачања и омекшавања (E).

г. Закључци

Литература о замору материјала на циклична напрезања је бројна. Али, релативно мали број истраживача се бави замором материјала под врло малим бројем циклуса напрезања, као што је случај у земљотресним условима. Још је мањи број истраживања, уређаја и опреме који контролишу нискоцилични замор, као што су хистерезисни метални дампера-земљотресни амортизери. У том правцу је заштићен патентима

један број нових уређаја чије се конструисање ослања или је потврђено овим истраживањима. То су патенти заштићени у САД, Аустралији и Србији (Patent in USA No.10/555,131 from 31.10.2005, patent in Australia No. AU 2003254327A1 from 2004.11.23., П 2010/0227, П 2010/0228, П 2010/0229). Добијени резултати могу бити од користи за увођење нових параметара у дефинисању пластичног понашања у пољу малог броја циклуса (LCF), посебно код комплексних програмских система као што је ANSYS и други. Потребно је извршити велики број експерименталних истраживања (за разноврсне материјале) и сачинити графичке и нумеричке подлоге (зависности $N_f, \Delta\varepsilon, R, E$) које реално дефинишу хистерезисно понашање.

На основу досадашњих истраживања утврђени су параметри који дефинишу нискоциклични замор уређаја ДЦ 90 који су дефинисани кривама ($N_f, \Delta\varepsilon_{pl}$) а у зависности од конструкцијског обликовања уређаја. Параметри којима се дефинише понашање дампера на замор у домену великих пластичних деформација при цикличном напрезању са контролом деформације (пластичности) су:

Пречник \varnothing (односно проценат редукације основног попречног пресека, искусвено и експериментално то је минимум 20% редукације површине попречног пресека),

Дужина дела са редукованим попречним пресеком "пасја кост" (одговара максимално допуштеној дилатацији од 5% до 10%, што је искусвено и експериментално одређено и потврђено за одређене врсте конструкцијског челика-материјала који се користе за те потребе),

Површинска обрада елемента "пасја кост",

Елементи за обезбеђење локалне и глобалне стабилности и клизања, посебно за фазу притиска (бетонско језгро, алуминијумски лимови, оловни прстенови),

C и γ -константе материјала и конструкције дампера и

Брзина промена деформација.

Од значаја је перформанса да обичан узорак од конструкцијског челика S235 оптерећен циклично на замор са максималном полуамплитудом дилатације од 5% издржи 12 циклуса, а дампер типа Canada HQ Royal издржи 200 циклуса, такође оптерећен на исти начин (Patent in USA No.10/555).

Кључне речи: нискоциклични замор, хистерезис, пластичност, дампер, сеизмичко инжењерство

UDK 620.1:550.34.013(043.3)

Научна област: Грађевинарство

Ужа научна област: Сеизмичко инжењерство (замор материјала)

LOW-CYCLING FATIGUE OF A DAMPER-SEISMIC ENERGY ABSORBER OF DC-90 SYSTEM UNDER UNI-AXIAL STRESS

Summary

a. The goal of research

Goal of this research, based on theory of fracture mechanics at low-cycle fatigue, physical-chemical structure of the steel material from which the structure of damper-absorber is made, as well as on numerous results of investigation and testing of models and structures, is to understand behaviour and discover the relationships important for definition of the mathematical model for practical use as well as for further innovation of the devices for control of hysteretic behaviour.

In addition, it is necessary to find the realistic dependency of the accumulated strain in function of number of the cycles of a Damper DC 90 and other elements of the structure, because the existing relationships and knowledge in the area of low number of cycles are not covered enough. Material behaviour in plastic range is defined by three characteristics: yielding condition, flow rule and hardening rule of the material. The main goal of this dissertation is to determine the influence of number of the cycles, accumulated strains as well as the low-cycling fatigue to design of the damper of the DC 90 system. First of all, this dependency could be defined by experimental testing, based on which, a numerical model could be formulated or the theoretical bases could be modified.

In case of an earthquake action, the damper DC-90 is subjected to low-cycling fatigue of material. The stress exceeds the yielding level, the material can sustain small number of cycles and it is very important to define the number of cycles which leads to final collapse of the damper. Besides that, it is necessary

to define the model for design of desirable hysteretic diagram of the damper-absorber of System DC 90 seismic energy under low-cycle uniaxial strain.

b. Scientific method of research

Basic method of research is analytical one, based on principals of fractural mechanics. A considerable number of experiments have been done in laboratory as well as in the field conditions. Statistical methods for processing of experimental data as well as numerical calculation methods were applied. Experimental testing of plain samples of steel S235, in field of low cycles' number (LCF), as well as dynamic testing of dampers, type Canada HQL, Canada HQ Royal, Mionica and others, has been done at the laboratories of Civil Engineering Faculty in Ljubljana, at the laboratory of Military-Technical Institute VTI in Belgrade and at the Innovation Laboratory for Seismic Engineering System DC 90 in Belgrade. Experimental testing in the field of maximum strain amplitudes in the range of 0.5% to 5%, was compared with the calculated parameters C_1 , γ , of Manson-Coffin law: $N_f = (\Delta\varepsilon/C_1)^\gamma$.

Numerical simulation of this relationship shows very good correlation with the experimental data with the deviation of 0.9% to 1.9%.

The working hypotheses include the basic hypotheses of fractural mechanics and cracks propagation in the post-elastic low-cycle axial stress, hypotheses on material structure, nature of atoms connection of material grid, as well as influence of alloying chemical elements and the absorber structure itself, production technology and geometry and surface processing tolerance, as well as hypotheses of technology of damper-absorber structure production.

c. Research results

It can be understood that gained results of research and numerical analysis better explain the phenomenon of structure behaviour in field of low number of cycles because they introduce the elements of accumulated strain and number of cycles. The phenomenon of hardening and softening was explained and diagrams of relationship between elasticity limits and other parameters of

hysteretic behaviour in the range of low number of cycles, depending on average maximum strain amplitude, (0.5% to 5%) and number of strain cycles (20 to 1000), were defined. It is completely clear that only sufficient number of experiments can give an answer to the question about structural behaviour in field of low number of cycles (LCF). Testing of 36 models with over 50 testing programs was conducted. The existing plasticity theories, especially from the aspect of hardening low, are based on research results (dependence $N_f, \Delta\varepsilon, R, E$) and the gained experimental diagrams. For the needs of defining the hysteretic behaviour, the gained diagrams define the phenomenon of hardening, softening and change of the slope of the hardening curve (E, E_0), by which new parameters in hysteretic response of the structure are introduced.

d. Conclusions

Literature related to cyclic strain fatigue is numerous one. But relatively little number of researchers study the fatigue of material under very low number of strain cycles, as in the case of an earthquake excitation. Even more, very few information about devices and equipment which control the low-cycle fatigue, like metal hysteretic dampers - earthquake absorbers exist. In that direction, several new devices related to above research have been patent-registered by the author of this theses. These are the patents protected in USA, Australia and Serbia (Patent in USA No.10/555,131 from 31.10.2005, patent in Australia No. AU 2003254327A1 from 2004.11.23., П 2010/0227, П 2010/0228, П 2010/0229). The gained results can be used for introduction of new parameters defining plastic behaviour in field of low cycle number (LCF), especially at complex software like ANSYS and others. It is necessary to perform a large number of experimental researches (for different materials) and to make graphical and numerical bases (dependences: $N_f, \Delta\varepsilon, R, E$), which realistically define the hysteretic behaviour.

Based on previous research, the parameters defining low-cycle fatigue of DC90 device were defined by curves ($N_f, \Delta\varepsilon_{pl}$), and in dependence of structural

shaping of the devices. The parameters which define the fatigue behaviour of dampers in high-plastic cycling range with deformation control (of plasticity) are:

Radius \emptyset (of percent reduction of basic cross section, experimentally is minimum 20%).

Length of reduced dog-bone cross-section (corresponds to the maximum allowed strain from 5% to 10%, which is experimentally proved and confirmed for certain kinds of structural steel – the material used for that purpose)

Surface processing of "dog-bone" element.

Elements for ensuring local and global stability and sliding, especially for pressure phase (concrete core, sheet-aluminium, lead rings)

C and γ – constants of dampers material and structure

Strain rate (velocity of strain changing in time)

The capability of ordinary sample made of structural steel S235, subjected to cycling fatigue with maximum semi-amplitude of strain of 5%, to hold 12 cycles, as well as the capability of the damper type Canada HQ Royal to hold 200 cycles loaded on the same way (Patent in USA No.10/555) is of particular importance.

Key words: *low-cycle fatigue, hysteresis, plasticity, damper, earthquake engineering.*

UDK 620.1:550.34.013(043.3)

Scientific field: Civil engineering

Specific scientific field: Earthquake engineering (fatigue materials)

САДРЖАЈ

ЗАХВАЛНОСТ.....	3
1 УВОД.....	1
2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ И ТЕОРИЈСКА ОСНОВА	3
2.1 УРЕЂАЈИ СИСТЕМА ДЦ 90	3
2.2 РАЗВОЈ МЕТОДА НЕЛИНЕАРНЕ АНАЛИЗЕ КОНСТРУКЦИЈА	4
2.2.1 Конститутивне везе	5
2.2.2 Еластопластични материјали	6
2.2.3 Општа својства пластичне деформације еластопластичног материјала са ојачањем	7
2.3 КОНСТРУКЦИЈЕ СА МАТЕРИЈАЛНОМ НЕЛИНЕАРНОШЋУ У ПРОГРАМУ ANSYS	8
2.4 ПОНАШАЊЕ КОНСТРУКЦИЈА У ДИНАМИЧКИМ УСЛОВИМА.....	12
2.4.1 Улога Дампера ДЦ 90 и уопште улога уређаја за пригушење.....	12
2.4.2 Портабл лако преносиви вибратор ДЦ 90	13
2.4.3 Основе динамичке анализе	14
2.4.3.1 Основне једначине динамичке равнотеже	14
2.4.3.2 Метод спектра одговора.....	16
2.4.3.3 Пригушење и резонанца	16
2.5 ХИСТЕРЕЗИСНО ПОНАШАЊЕ ЕЛАСОПЛАСТИЧНИХ МАТЕРИЈАЛА (Д. ШУМАРАЦ, 1992)	17
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА СА АНАЛИТИЧКИМ И НУМЕРИЧКИМ МОДЕЛИРАЊЕМ ...	22
3.1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА И НУМЕРИЧКА ИСТРАЖИВАЊА НИСКОЦИКЛИЧНОГ ЗАМОРА	22
3.1.1 Циклична пластичност и заморско оштећење у челичним конструкцијама које користе модел континуума механичког оштећења	22
3.1.1.1 Експериментални рад	23
3.1.1.2 Основе за нумеричко моделирање	26
3.2 УТИЦАЈ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ И ИМПЕРФЕКЦИЈА НА ЗАМОР (У. МУРАКАМИ, 2004)	30
3.3 СПЕЦИФИЧНА ИСТРАЖИВАЊА НИСКОЦИКЛИЧНОГ ЗАМОРА ДАМПЕРА - АМОРТИЗЕРА СИСТЕМА ДЦ 90	31

3.4	ОСНОВНИ ДИЈАГРАМИ И ПРИСТУП ОДРЕЂИВАЊА ХИСТЕРЕЗИСНОГ ПОНАШАЊЕ КОД МАЛОГ БРОЈА ЦИКЛУСА ТЈ. ПОНАШАЊЕ У ПОЉУ ВЕЛИКИХ ТРАЈНИХ НЕПОВРАТНИХ ДЕФОРМАЦИЈА УРЕЂАЈА ДЦ 90	34
3.5	ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ КОД ПРОЈЕКТОВАЊА КОНСТРУКЦИЈЕ ДАМПЕРА ДЦ 90	36
3.6	НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИЧКА АНАЛИЗА ЗИДАНИХ КОНСТРУКЦИЈА ОЈАЧАНИХ ДАМПЕРИМА СИСТЕМА ДЦ 90 ПО МЕТОДОЛОГИЈИ ХИДРОКВЕБЕК-КАНАДА И МЕТОДОМ ХОМОГЕНИЗАЦИЈЕ (ГОЦЕВСКИ 2007).....	40
3.7	ИСПИТИВАЊЕ ДАМПЕРА – АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ ТИПА KANADA HQ ROYAL НА ТРИ УЗОРКА	41
3.7.1	Испитивање узорка бр.1	43
3.7.2	Испитивање узорка бр.2	50
3.7.3	Испитивање узорка бр.3	55
3.7.4	Нека поређења резултата испитивања узорака.....	60
3.7.5	Формирање експерименталног и аналитичког дијаграма број циклуса-просечна акумулирана дилатација ($N_f - \Delta \epsilon_{pl}$)	62
3.8	ТЕСТИРАЊЕ ДАМПЕРА KANADA HQL У ЛАБОРАТОРИЈИ ИНОВАЦИОНОГ ЦЕНТРА СИСТЕМА ДЦ 90	62
3.9	ТЕСТИРАЊЕ ДВАНАЕСТ УЗОРАКА ДАМПЕРА ТИПА МИОНИЦА НА ГРАЂЕВИНСКОМ ФАКУЛТЕТУ У ЉУБЉАНИ	66
3.10	ТЕСТИРАЊЕ ОБИЧНОГ УЗОРАКА ОД ЧЕЛИКА S235 НА ЗАМОР	68
4	ТРИ НОВЕ ПАТЕНТНЕ ПРИЈАВЕ НОВИХ КОНСТРУКЦИЈА АМОРТИЗЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ ИЗ 2010.ГОДИНЕ.	71
4.1.1	Линијски амортизер, P -2100/0229.....	71
4.1.2	Амортизер облика српа, P -2100/0228.....	74
4.1.3	Тростепени амортизер, P -2100/0227.....	76
5	ПРИМЕНА УРЕЂАЈА НА ОБЈЕКТИМА И ИЗВРШЕНА ТЕСТИРАЊА	79
5.1	ТЕСТИРАЊЕ ОБЈЕКТА П+1 У МИОНИЦИ НА АМБИЕНТАЛНЕ И ПРИНУДНЕ ВИБРАЦИЈЕ И ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА ЗИДОВА НА ВИБРОПЛАТФОРМИ ИНСТИТУТА ИЗИС У СКОПЉУ	79
5.1.1	Моделска тестирања на виброплатформи	82
5.2	ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА ДВОСПРАТНОГ ЗИДА ОД ШУПЉЕ ОПЕКЕ СА И БЕЗ ОЈАЧАЊА У ИНСТИТУТУ ИМС ЗА ИСПИТИВАЊЕ МАТЕРИЈА СРБИЈЕ	84
5.2.1	Испитивање ојачаног зида.	85
5.3	ТЕСТИРАЊЕ РЕЗИДЕНЦИЈЕ АМБАСАДОРА ФИНСКЕ У АЛЖИРУ НА АМБИЕНТАЛНЕ И ПРИНУДНЕ ВИБРАЦИЈЕ	86
5.4	ТЕСТИРАЊЕ РЕЗИДЕНЦИЈЕ ПРЕДСЕДНИКА АЗЕРБЕЈЏАНА	86

5.5 ПРИМЕНА ДАМПЕРА НА ТРГОВИНСКОМ ЦЕНТРУ У АЗЕРБЕЈЦАНУ	87
5.6 ПРИМЕНА ДАМПЕРА КОНЕКТОРА НА ЗИДУ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ ВЕАУНАRNOIS POWERHOUSE У КАНАДИ	89
5.7 ПРИМЕНА ДАМПЕРА НА ТРАФОСТАНИЦИ У МОНТРЕАЛУ	90
5.8 ТЕСТИРАЊЕ ПЕТОЕТАЖНЕ ЗИДАНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ У БЕЧИЋИМА НА ПРИНУДНЕ ВИБРАЦИЈЕ	91
5.9 ТЕСТИРАЊЕ ШКОЛСКИХ ОБЈЕКТА У КРАЉЕВУ	94
5.10 ПРОЈЕКТИ САНАЦИЈЕ ШКОЛСКИХ ОБЈЕКТА У ПЕРНИКУ-БУГАРСКА И ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГИЈЕ	95
6 ЗАКЉУЧАК	99
7 ЛИТЕРАТУРА.....	101
8 ПОПИС ОСНОВНИХ ОЗНАКА И КРАТИЦА	104
9 СПИСАК ФОТОГРАФИЈА, ЦРТЕЖА И ТАБЕЛА.....	105
10 БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА.....	112
11 ПРИЛОГ	114
11.1 ОПШТЕ.....	114
11.2 СЕЛЕКТОВАН ПРИКАЗ ПРИМЕНЕ ИЗУМА И АСОТИМАН ДАМПЕРА	118
12 ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ.....	124
13 ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА.....	125
14 ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ	126

1 УВОД

Литература о замору материјала на циклична напрезања је бројна. Али, релативно мали број истраживача се бави замором материјала под врло малим бројем циклуса напрезања, као што је случај у земљотресним условима. Још је мањи број истраживања уређаја и опреме који контролишу нискоциклични замор, као што су хистерезисни метални дампера-земљотресни амортизери.

Услед цикличног оптерећења, при дејству земљотреса, код уграђених дампера Система ДЦ 90 долази до напрезања у условима нискоцикличног замора материјала. Напони прелазе границу течења, материјал може да издржи мали број циклуса, и врло је важно одредити број циклуса који доводи до коначног лома дампера. Поред тога потребно је дефинисати модел за пројектовање жељеног хистерезисног дијаграма дампера-апсорбера сеизмичке енергије Система ДЦ 90 под нискоцикличним једнооксијалним напрезањем.

Циљ истраживања је да се на основу теорије механике лома код нискоцикличног напрезања, физичко-хемијске структуре челика од којих се израђује конструкција дампера-апсорбера и многобројних резултата моделских истраживања и испитивања на моделима и објектима открију зависности битне за дефинисање модела за практичну инжењерску, свакодневну праксу. Осим тога неопходно је изнаћи стварну зависност акумулиране дилатације у функцији броја циклуса код Дампера ДЦ 90 и других елемената конструкције, јер ову област малог броја циклуса не покривају довољно тачно постојеће релације и познате истражене зависности.

Основни задатак је проналажење одговарајућег математичког модела који ће описати понашање дампера у условима нискоцикличног замора материјала. Модел ће се базирати на аналитичким, нумеричким и експерименталним резултатима истраживања напрезања дампера при цикличном оптерећењу. Модел треба да буде довољно поуздан али истовремено и једноставан за свакодневну инжењерску праксу.

Све хипотезе обаватају основне претпоставке механике лома и пропагације прслина у нискоцикличном аксијалном напрезању, хипотезе о структури материјала, природи везе атома решетке материјала као и утицаја легирајућих хемијских елемената, као и саме конструкције апсорбера, толеранција у геометрији и технологији израде конструкције апсорбера-дампера.

Основна метода истраживања је аналитичка, базирана на принципима механике лома и механике оштећења материјала. Урађен је одговарајући број експеримената како у лабораторији, тако и на терену. Примењене су и методе статистичке обраде експерименталних резултата истраживања, а коришћене су и нумеричке методе прорачуна.

Земљотреси су честе појаве са врло великим штетним последицама по грађане и друштво у целини. Сваки патент који доприноси изградњи отпорној на земљотресе заслужује посебну пажњу и подршку. Изучавање замора материјала код дампера, који су показали оправданост код примене у Колубарском округу и у другим земљама на четири континента, још више ће побољшати овај патент и омогућити његову ширу примену.

Остварени резултати су :

- *експериментални резултати понашања металног хистерезисног амортизера дампера којим се доводи уређај до колапса у условима нискоцикличног замора материјала;*
- *нумеричко и аналитичко моделирање резултата добијених експерименталним истраживањем за потребе пројектовања уређаја за конкретне конструкције.*

Преглед литературе и теоријске основе су приказане сажето са аспекта приказа познавања стања и теоријских основа. Главни акценат је лоциран на експериментална истраживања и нумеричко моделирање уочене појаве нискоцикличног замора дампера Система ДЦ 90.

2 Преглед литературе и теоријска основа

2.1 Уређаји Система ДЦ 90

Уређаји Система ДЦ 90 амортизери служе за регулисање хистерезисног понашања конструкција у земљотресним условима.

Акумулирање дилатација код цикличног динамичког напрезања зависи од више услова а посебно од степена површинске обраде дела уређаја под називом "пасја кост", од обезбеђења стабилности на притисак и од обезбеђења локалног избочавања, као и наравно од броја циклуса. Многобројна тестирања обављена у том правцу служе за разумевање овог феномена и прогнозирање понашања уређаја у земљотресним условима.

Без узимања у обзир свих ових феномена, немогуће је разумети динамичко понашање грађевинских конструкција у земљотресним условима.

Уређаји Система ДЦ 90 уграђују се на позицијама где се жели контрола хистерезисног понашања а за потребе регулисања одговора конструкције као целине. Мењањем крутости система мењају се и сопствене фреквенце а самим тим и динамички одговор конструкције у условима земљотреса са циљем да се избегне резонантно стање које је најопасније за стабилност једне конструкције. Развој уређаја у свету одвија се у Иновационо производним центрима компанија у сарадњи са изумитељима са факултета и других институција, специјалиста и експерата. Ипак, ограничен број истраживача покрива ову област. Компаније које својим сличним уређајима доминирају тржиштем су Mauer Sohne–Немачка, FIP Industriale-Италија, Oiles-Јапан, Mageba-Швајцарска, Alga-Италија, Agies-САД и друге. Детаљније се може видети на веб презентацијама ових компанија. Уређај Система ДЦ 90 је потпуно нова конструкција, посебно за историјске зидане објекте и слични уређаји се не налазе у програму наведених светских компанија. Литература која се користи датира од времена (1954. год.) првог дефинисања појмова замора Coffin and Manson, (10) и (11) па до данашњих дана (2) .

Рад је приказан по поглављима, где се после увода даје преглед литературе, преглед компанија које развијају сличне уређаје и преглед теоријских основа савремене динамичке анализе конструкција заснован на пластичном понашању конструкција. У трећем делу који се бави експерименталним истраживањима приказана су истраживања у свету и највећи део је третирао многобројна лична експериментална истраживања замора у пољу малог броја циклуса са анализом резултата истих. Четврто поглавље приказује три нова ауторова патента који су објављени 2012. године. Пето поглавље обухвата апликацију изума на четири континента са применом и тестирањем на разноврсним објектима. Шесто поглавље кроз закључке даје резултате и правце даљег развоја.

2.2 Развој метода нелинеарне анализе конструкција

Класична линеарна теорија конструкција се заснива на претпоставкама о инфинитезимално малим померањима и еластичним својствима тела у току деформисања, те су дефинисане линеарне везе између следећих величина:

1) Деформација и померања, 2) унутрашњих и спољашних сила и 3) напона и деформација.

Уз одговарајуће контурне услове са овим једначинама дефинише се напонско-деформацијско стање конструкције. Тим једначинама се за мањи интезитет оптерећења веома добро дефинише стање конструкција, па је ова метода добила широку инжењерску примену. Међутим са повећањем интезитета оптерећења линеарном теоријом се не може довољно тачно описати понашање стања конструкције под оптерећењем, те бар једна од три једначине постаје нелинеарна. Тако настаје нелинеарна теорија. Полазна основа савремене нелинеарне анализе конструкције представља Механика континуума. Претпоставља се да тела као дискретне структуре имају својства континуума. То омогућава да се њихово понашање под дејством механичких и термичких утицаја може изучавати на диференцијално малом елементу тела, а да се потом разматрања генерализују за цело тело односно конструкцију. На тај начин, у математичкој формулацији пробелма се добијају континуалне релације

у виду диференцијалних или интегралних једначина. По свом физичком значењу ове једначине могу да се сврстају у следеће четири категорије:

- 1) Везе померања и деформација,
- 2) Услови равнотеже-једначине кретања,
- 3) Конститутивна веза између напона и деформација и
- 4) Термодинамичке (први и други закон термодинамике).

Везама померања и деформација се описује геометрија деформације тела, независно од узрока деформације, док се условима равнотеже-једначинама кретања дефинише динамичка равнотежа унутрашњих сила (напона) и спољашњих утицаја који делују на тело. Конститутивним једначинама се дефинишу материјална својства тела и успоставља непосредна веза статичких и деформацијских величина, односно величина које се јављају у првој и другој групи поменутих једначина. Термодинамичким једначинама се дефинишу термодинамички принципи и описују термодинамичка својства тела. Са контурним и почетним условима дефинисано је напонско-деформацијско стање тела.

Поред општих претпоставки Механике континуума, као што је познато, Теорија конструкција се заснива и на посебним додатним претпоставкама, зависно од врсте конструкција. На основу тих претпоставки, које се углавном тичу кинематичке деформације попречних пресека (претпоставке Bernoulli-Naviera, Vlasova, Kirchoff-Love-a) изграђене су посебне техничке теорије конструкција (линијски носачи, танкозидни носачи, плоче и љуске). Развијен је велики број програма применом МКЕ који покривају практично сва поља линеарне и нелинеране анализе при статичким, динамичким, термичким и другим спољашњим утицајима .

2.2.1 Конститутивне везе

Овим се дефинишу материјалне особине и оне се утврђују експериментима. Основне три везе су: 1) еластичне (линеране, нелинеране, и хипо и хипер еластичне), 2) еластопластичне (са дефинисаним условом течања, законом ојачања и законом течења) и 3) вискозне (вискоеластичне и пластичне).

2.2.2 Еластопластични материјали

За материјале са еластопластичним својствима, поред веза напона и деформација у еластичној области, неопходно је дефинисати још следеће особине:

услов течења (*yielding condition*),

закон течења (*flow rule*) и

закон ојачања (*hardening rule*) материјала.

Науак и Zienkiewicz (1) (слика 1) су увели три нове инваријанте помоћу којих се познати услови течења свде на знатно једноставније облике. Услов течења се представља у следећем облику: $F(\sigma_m, \bar{\sigma}, \varphi_0) = 0$

Где су нове инваријанте: $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$, $\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2}\sigma'_{ij}\bar{\sigma}_{ij}$, $\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m\delta_{ij}$

У зависности од инваријанти, познати услови течења постају:

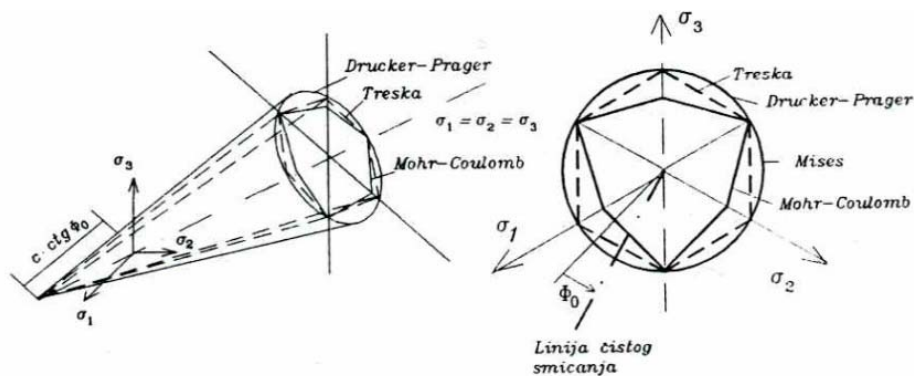
Tresca: $F = 2\bar{\sigma} \cos \varphi_0 - \sigma_Y = 0$

Huber- Von Mises: $F = \sqrt{3}\bar{\sigma} - \sigma_Y = 0$

Mohr-Coulomb: $F = \sigma_m \sin \theta + \bar{\sigma} \cos \varphi_0 - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \sin \varphi_0 \sin \theta - c \cos \theta = 0$

Drucker-Prager: $F = 3\alpha\sigma_m + \sigma - k = 0$

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3(3 - \sin \theta)}}, \quad k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3(3 - \sin \theta)}}$$



Сл. 1 Неки услови течења

На слици 1 приказане су пројекције у π равни за све четири претходно наведене површине течења. Вектори течења (изводи функција течења по напонима), могу да се прикажу у следећем општем облику:

$$a_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = C_1 \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_{ij}} + C_2 \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} + C_3 \frac{\partial J_3}{\partial \sigma_{ij}}$$

Док су коефицијенти C_i ($i=1,2,3$) приказани у следећој табели

Табела 1 Коефицијенти C_i ($i=1,2,3$)

Услови	C_1	C_2	C_3
Tresca	0	$2 \cos \varphi_0 (1 + \tan \varphi_0 \tan 3\varphi_0)$	$\frac{\sqrt{3} \sin \varphi_0}{2 \cos 3\varphi_0}$
Huber-Mises	0	$\sqrt{3}$	0
Mohr-Coulomb	0	$\cos \varphi (1 + \tan \varphi_0 \tan 3\varphi_0) + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} (\tan 3\varphi_0 - \tan \varphi_0)$	$\frac{\sqrt{3} \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \sin \varphi_0}{2\sigma^2 \cos 2\varphi_0}$
Drucker-Prager	3α	1,0	0

Sen Venan-ов услов пластичности дефинише да разлика главних напона ($\sigma_1 - \sigma_3$) треба прећи износ границе пластичности. Док према Misesu услов пластичности је да интезитет напона пређе вредност границе пластичности. Из те чињенице се види сложеност моделирања услова пластичности.

2.2.3 Општа својства пластичне деформације еластопластичног материјала са ојачањем

Једначине равнотеже, геометријске једначине повезаности међу вектором померања и тензором деформација, као и једначине нераскидивости деформација у пуној мери остају у важности при решавању проблема пластичности. Гранични услови у деформационој теорији пластичности такође остају у важности али се у теорији пластичности течења мењају.

Општа својства пластичне деформације су:

- *Пластична деформација је неповратног карактера. Та неповратност се манифестује пре свега у трајним, заосталим деформацијама.*

- У пластичној области између напона и деформација не постоји било каква једнозначна веза. Пластична деформација зависи само од програма или историје оптерећења елемента.
- Компонента еластичног дела укупне деформације се приказује путем Хуковог закона у зависности да ли је средина изотропна или анизотропна.
- Пластична деформација еластопластичног материјала са ојачањем јесте равнотежни процес, па стога, као и код еластичног материјала, деформације морају бити хомогене функције првог реда, зависне од брзине развоја напона.

2.3 Конструкције са материјалном нелинеарношћу у програму ANSYS

У програму ANSYS постоје следеће могућности моделирања:

- 1) Пластичност која не зависи од брзине деформације (*Rate-independent plasticity*), која је окарактерисана тренутним неповратним деформацијама које се појављују у материјалу.
- 2) Пластичност која зависи од брзине деформације (*Rate-dependent plasticity*), која доводи до пластичних деформација које се одвијају у неком временском интервалу. Назива се такође виско-пластичност (*viscoplasticity*).
- 3) Пужење (*Creep*) је такође нереверзибилна деформација која у материјалу узрокује пропорционалну зависност у току времена. Временски оквир пужења је уобичајено много дужи од пропорционалне пластичности.
- 4) Нелинеарана еластичност уводи нелинеарну зависност напрезања и деформација. Ове деформације су реверзибилне.
- 5) Хипереластичност је дефинисана потенцијалном енергијом деформације која карактерише еластомере и пенасте типове материјала. Све деформације су реверзибилне.

- 6) Материјали који укључују вискозну зависност од еластичне деформације, вискоеластични материјали.
- 7) Материјали са својством дробљења (*Concrete*) укључују прслину и могућност дробљења.
- 8) Бубрење (*Swelling*) се јавља код бетона, као реолошка појава промене димензије кроз време.

ANSYS програм омогућава седам опција различитих типова материјалног понашања. То су Material Behavior Option:

- Билинеарно изотропно очвршћавање (*Bi-linear Isotropic Hardening*)
- Мултилинеарно изотропно очвршћавање (*Multi-linear Isotropic Hardening*)
- Нелинеарно изотропно очвршћавање (*Nonlinear Isotropic Hardening*)
- Класично билинеарно кинематичко очвршћавање (*Classical Bilinear Kinematic Hardening*)
- Мултилинеарно кинематичко очвршћавање (*Multilinear Kinematic Hardening*)
- Нелинеарно кинематичко очвршћавање (*Nonlinear Kinematic Hardening*)
- Анизотропно (*Anisotropic*)
- Понашање по закону Drucker-Prager
- Ливено гвожђе (*Cast Iron*)
- Понашање специфицирано од корисника (*User Specified Behavior*).
Напредне технике анализа и вештине програмирања (*Advanced Analysis Techniques and Programmable Features*)

Теорија:

Теорија пластичности даје математичке релације које карактеришу еласто-пластични одговор материјала. Постоје три услова у rate-independent пластичним теоријама: **Услов течења** (yield criterion), **Закон течења** (flow rule) и **Закон ојачавања** (hardening rule).

Критеријуме течења које овај програм примењује су: Von Mises/Hill, Modifikovana von Mises и Drucker- Prager

Услов течења материјала:

Услов пластичног течења одређује ниво напона којим је течење иницирано. Код више компонентних напона, то је представљено као функција индивидуалних компоненти $f(\sigma)$, дате општом формом вектора напона (σ_e). Користе се тада solid елементи VISCO106, VISCO107, VISCO108.

Када је еквивалентан напон једнак параметру материјалног течења σ_y , материјал ће прећи у пластично стање напона. Ако је σ_e мање од σ_y , материјал је еластичан па ће важити еластичне напон-деформација релације.

Закон течења:

Закон течења (flow rule) одређује правац пластичног течења које је дато у зависности пластичног мултипликатора и функције напона у зависности од потенцијала течења. Пластичне деформације су у правцу нормале на површину течења у случају асоцијативног закона течења.

Правила ојачања:

Правило ојачања (hardening rule) описује промену на површинама течења прогресивним течењем, тако да услов (тј. стање напона) узастопног течења може бити успостављено. Расположива су два правила ојачања: изотропно ојачање и кинематичко ојачање. Код изотропног типа ојачања, површине течења се јављају око иницијалних линија и шире се до величине пластичних деформација. Код материјала са изотропним пластичним понашањем, понашање се назива изотропно ојачање. Кинематичко ојачање прихвата да површине течења заостају константно у величини па прелазе у просторне напоне са прогресивним течењем, као што је то приказано на Types of Hardening Rules (b).

Интересантно је да све ове методе не разматрају утицај броја циклуса на промену правила које дефинишу критеријум течења, поље ојачања и поље омекшавања када су у питању челични елементи. Ова дисертација има за циљ да да допринос у том правцу.

Врсте нелинеарности

Везе између деформација и померања у строгој формулацији су нелинеарне. Равнотежа између унутрашњих и спољашњих сила се успоставља на деформисаној конфигурацији тела, тако да су једначине равнотеже (кретања) нелинеарне. Конститутивне везе помоћу којих се описују материјална својства инжењерских конструкција, у општем случају, такође су нелинеарне. Дакле, све три основне групе једначина су нелинеарне. Са прве две групе ових једначина карактерише се геометријска нелинеарност, а са трећом групм материјална нелинеарност.

Међутим, за изучавање витких челичних конструкција довољно је узети у обзир само геометријску нелинеарност, јер се челик и за велику деформабилност обично понаша еластично. Али, код масивних бетонских конструкција можемо узети само материјалну нелинеарност јер се бетон понаша нееластично и за мала померања, односно деформације. За потребе геометријске нелинеарности позната је *Теорија другог реда* а за потребе материјалне нелинеарности *Теорија круто-пластичног тела*, које имају практичан значај за конструкторе.

Суштина повећања капацитета елемента амортизера у пољу цикличног напрезања а посебно у притиску је спречавање губљења локалне и глобалне стабилности у процесу притиска. Овај ефекат се најбоље види на хистерезисном дијаграму и дијаграму сила-број циклуса и јасно се уочава разлика пада силе у затегнутој и притиснутој зони. Што је та разлика мања, то значи да су додатни елементи конструкције дампера успели да овај ефекат контролишу и ублаже. Експерименталним истраживањем код слободног аксијалног напрезања на притисак добијене су криве носивости у зависности од облика и врсте попречног пресека елемента и од, наравно, дужине извијања. У конструкцији амортизера ДЦ 90 тај ефекат се манифестује највише преко максимално допуштене дилатације која се креће од 5% до 10% у односу на дужину где се она реализује и контролише. До ових вредности се дошло током стотинак разноврсних тестирања узорака у Институту ВТИ, на Грађевинском Факултету у Љубљани и у лабораторији Система ДЦ 90.

За понашање материјала у домену пластичности дају се разноврсни хистерезисни дијаграми.

2.4 Понашање конструкција у динамичким условима

Примену челичних хистерезисних дампера можемо разумети разматрајући основе динамике конструкција а посебно аспект промене крутости, пригушења и резонанце.

2.4.1 Улога Дампера ДЦ 90 и уопште улога уређаја за пригушење

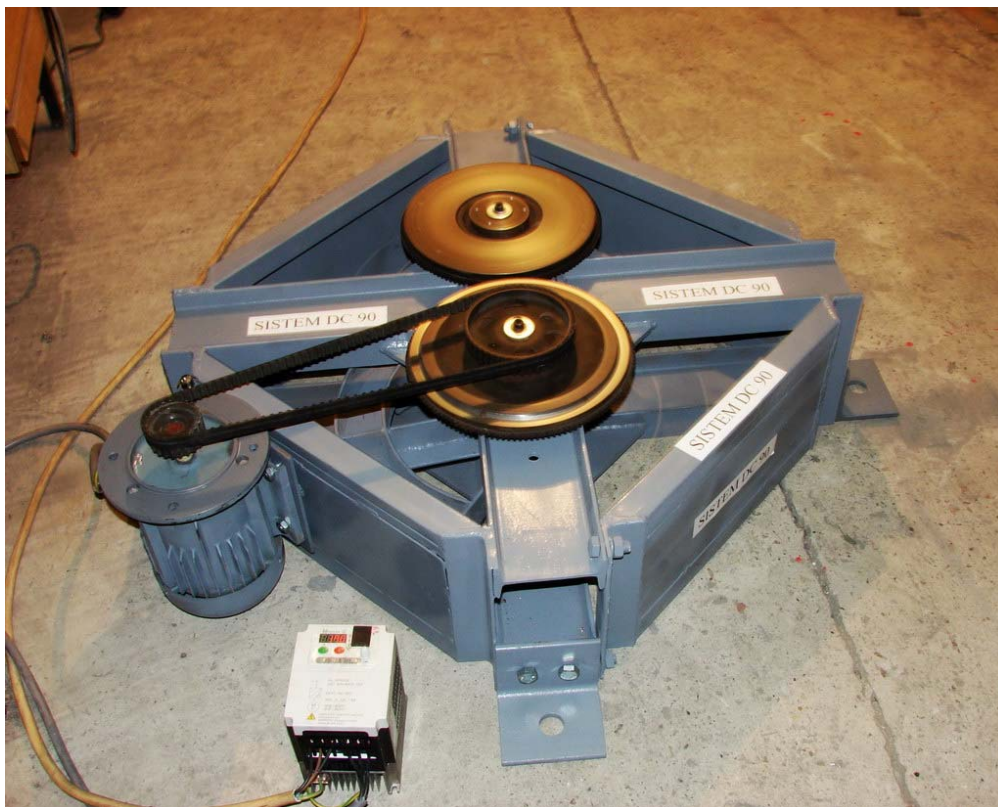
Улога дампера се објашњава кроз основна начела динамике грађевинских конструкција у сеизмичким условима. Ту се пре свега мисли на следеће појмове;

пригушење,

промена крутости у току дејства земљотреса и

резонантно стање конструкције, тј. поклапање принудних и сопствених фреквенци осциловања.

Мерења пригушења на многим објектима посебно на експерименталном објекту П+4, (Љ.Ташков, Л. Крстевска, 2011. год.) са зиданом укрупњеном конструкцијом Система ДЦ 90 показују да износ пригушења не зависи и од величине амплитуде осциловања што и показују мерења извршена на амбијенталним и принудним вибрацијама. Ова пригушења имају карактер рада структуре материјала и везе конструктивних елемената. Тако да су мала пригушења код заварених челичних конструкција а велика код дрвених конструкције где су елементи спојени ексерима, завртњевима и другим спојним средствима. Значајна хистерезисна пригушења конструкције јављају се тек у ванеластичној области у елементима конструкција или после прекорачења граничних сила у посебним уређајима-дамперима који се за те потребе уграђују у конструкције. У Иновационом Центру Систем ДЦ 90 развијен је посебан уређај за изазивање и фино фреквентно регулисање принудних сила и изазивање резонантног стања конструкција, сл.2.



Сл. 2 Вибратор ДЦ 90 у раду

2.4.2 Портабл лако преносиви вибратор ДЦ 90

Вибратор има следеће карактеристике:

Фреквенција од 0.5 Hz до 10 Hz (са фином електронском регулацијом тачности 1/10 обртаја у минути, односно ± 0.00166 Hz),

Погодан је за авионски транспорт у два пакета дим. 45x90x25 cm. Пакети су тежине по 45 kg.

Обртна оловна маса се транспортује у посебним малим пакетима са додатном тежином од по 2x40 kg.

Један руковалац у року од 24 часа може исти уградити (и са њим управљати) на било којој локацији где има потребе.

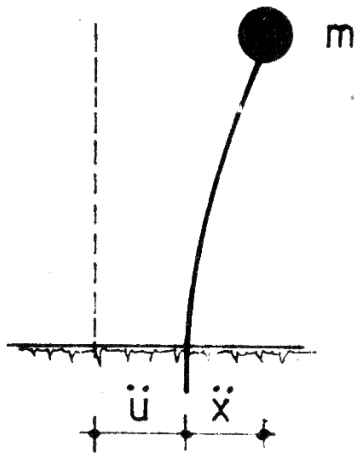
Вибратор се може користити за задавање динамичког синусног оптерећења у хоризонталној или вертикалној равни под произвољним углом нагиба у односу на осу Декартовог система

Вибратор је испитан на објектима и израђен је први прототип који се користи и који је ауторско дело Система ДЦ 90, д.о.о.

2.4.3 Основе динамичке анализе

2.4.3.1 Основне једначине динамичке равнотеже

Динамичка анализа система са једним степеном слободе масе (m) и вискозног пригушења $h \cdot \dot{x}$, даје зависност кружне фреквенце (p) за систем крутости (k) и масе (m), $p^2 = \frac{k}{m}$. Ако желимо да утичемо на динамички одговор система тада можемо мењати крутост (k) посебним уређајима. Таквом променом динамичких карактеристика принудних и сопствених осцилација може се избећи резонанца, тј. амплификација померања конструкције.



Сл. 3 Систем са једним степеном слободе

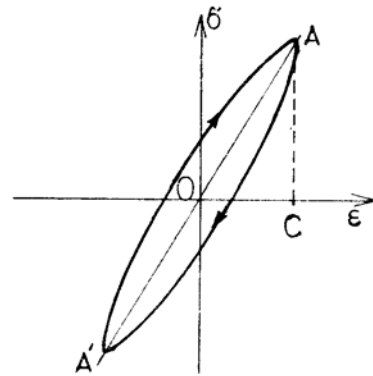
$$m \cdot (\ddot{u} + \ddot{x}) + k \cdot x = 0$$

$$m \cdot (\ddot{u} + \ddot{x}) + k \cdot x + h\dot{x} = 0$$

$$\ddot{x} + 2p\epsilon\dot{x} + p^2x + \ddot{u} = 0$$

Испред су приказане диференцијалне једначине кретања за систем са једним степеном слободе (сл.3 и сл.4).

У наставку се приказују основне релације за систем са више степени слободе (сл.5)



Сл. 4 Хистерезисни дијаграм

$$p = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$p^2 = \frac{k}{m}$$

$$\mathbf{M}(\ddot{\mathbf{x}} + \ddot{\mathbf{u}}) + \mathbf{G}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0$$

\mathbf{M} =матрица масе, \mathbf{G} =матрица пригушења и \mathbf{K} =матрица крутости система

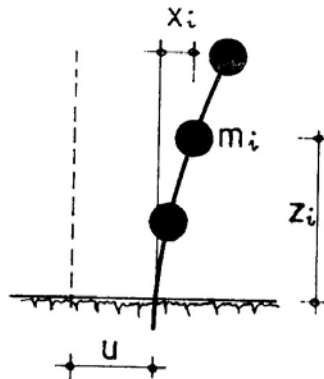
Прорачун иде у корацима по следећем поступку:

- 1) Израчунавање матрице масе \mathbf{M} и матрице крутости \mathbf{K}
- 2) Решавање фреквентне једначине $\det(p^2\mathbf{M} - \mathbf{K}) = 0 \Rightarrow p \quad i=1\dots n$ и изналажење кружних фреквенци $p \quad i=1\dots n$
- 3) Израчунавање својствених вектора (x_i) за свако (p_i)
- 4) динамичка анализа једначине за сваки степен слободe кретања

$$\ddot{q}_i + (\alpha + \beta p_i^2)q_i + p_i^2 q_i = -\vartheta_i \ddot{u}$$

Усвојена је за матрицу пригушења линеарна комбинација матрице маса и матрице крутости, $\mathbf{G}=\alpha\mathbf{M}+\beta\mathbf{K}$

- 5) Суперпозиција решења



Сл. 5. Систем са више степени слободe

Тачност динамичке анализе зависи од квалитета моделирања конструкције и избора земљотресног оптерећења (\ddot{u}). Нема гаранција да ће се десити земљотрес сличних амплитуда, фреквентног састава и времена трајања. За те

потребе раде се синтетички записи или се врши прорачун са више различитих записа.

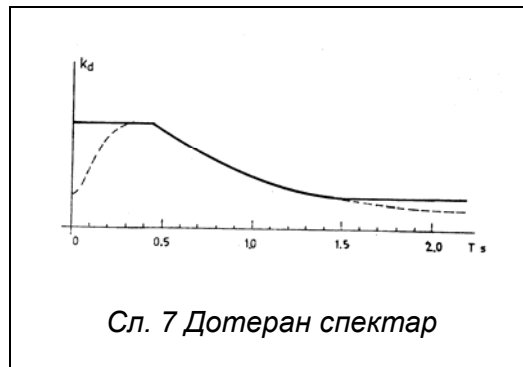
2.4.3.2 Метод спектра одговора

Посматрајмо једначину кретања система са једним степеном слободe

$$\ddot{q} + 2\rho\epsilon\dot{q} + p^2q = -\ddot{u}$$

За познати земљотресни запис, пригушење и период осциловања може се решити горња једначина. Тако можемо израчунати екстремну вредност убрзања одговора за сваку вредност периода осциловања T и пригушења осциловања ϵ . Ако ову вредност поделимо са убрзањем тла добијамо амплификацију убрзања тла за задати период осциловања T .

$$A_{mp} = \frac{|\ddot{q} + \ddot{u}|}{|\ddot{u}|}, \text{ за свако } T$$

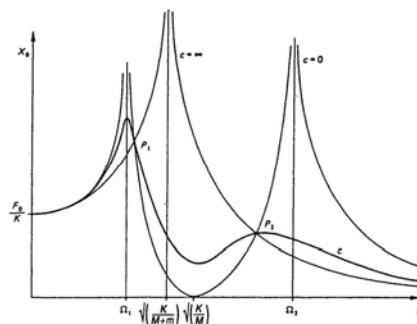


Овако добијени спектар (сл.6) описује еластични одговор конструкције. На том принципу се заснива прорачунска метода са еквивалентним замењујућим хоризонталним оптерећењем.

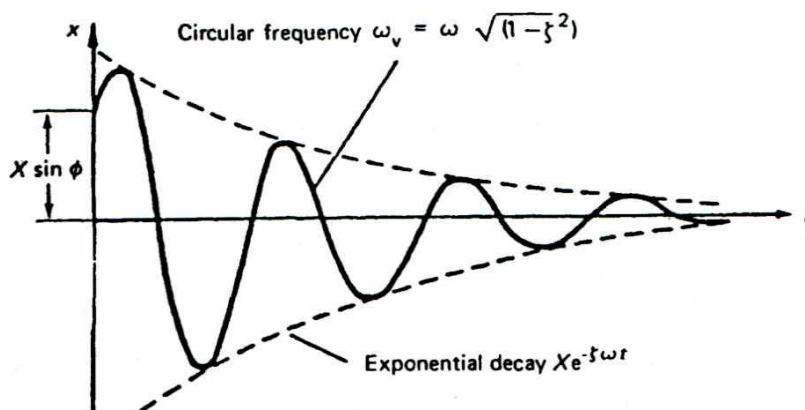
2.4.3.3 Пригушење и резонанца

Многобројним тестирањем у Лабораторији Института ИЗИИС, Скопље (Љ.Ташков, Л. Крстевска) потврђени су ефекти и значај ова два феномена.

С једне стране је дат значај фреквентног и фазног поклапања принудних и слободних осцилација сл.8.



Сл. 8 Амплификација померања у случају поклапања принудних и сопствених фреквенци.



Сл. 9 Утицај пригушења на смањене амплитуда померања.

Супротно од резонантног стања, пригушење као својство реалног материјала утиче на смањење амплитуда померања током осциловања сл.9.

Величина пригушења је везана за структуру материјала од којег је конструкција сачињена и за везе елемената од којих је иста састављена.

Интересантно је дати коефицијенте пригушења за неке материјале (алуминијум-дурал 0.00002-0.002, челик 0.001-0.01, природна гума 0.1-0.3, тврда гума 1.0, бетон 0.01-0.06). Грађевинске конструкције израђене од ових и сличних материјала имају нешто веће пригушење због учешћа међусобних веза елемената и контакта са тлом.

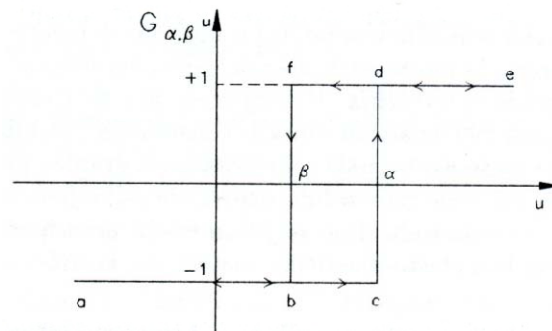
2.5 Хистерезисно понашање еластопластичних материјала (Д.Шумарац, 1992)

У разумевању овог феномена користиће се Прајзаков (*Preisach*) модел.

Прајзаков модел подразумева пресликавање функције којом је описана побуда система $u(t)$ на функцију којом је описан одговор система, $f(t)$:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} P(\alpha, \beta) G_{\alpha, \beta} u(t) d\alpha d\beta$$

$G_{\alpha, \beta}$ је основни хистерезисни оператор који представља правоугаону петљу приказану на сл.10. Параметри β и α су горња и доња вредност граница побуде за коју долази до промене знака а сама вредност оператора $G_{\alpha, \beta}$ је +1 или -1.



Сл. 10 Елементарни хистерезисни оператор представљен правоугаоном петљом.

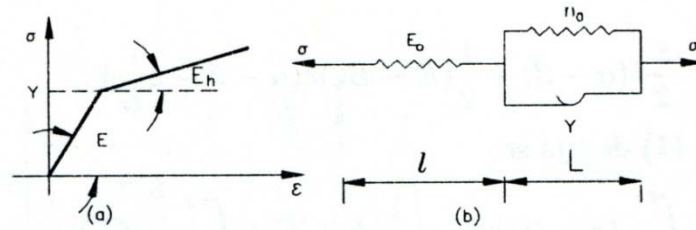
$P(\alpha, \beta)$ је Прајзакова функција.

За приказивање хистерезисног понашања челичних елемената (елемената од којих се састоји амортизер ДЦ 90) погодан је еластопластичан модел са линераним ојачањем. Модел приказује и пад границе развлачења али не узима у обзир ефекат акумулације прслина у пољу малог броја циклуса без чега је немогуће разумети хистерезисно понашање и предвидети хистерезисну криву од момента оптерећења до колапса-лома.

Нешто више о овом моделу даје се напред. Код тог модела разликују се два модула, модул еластичности (E) и модул линеарног ојачања (E_n), (сл.11). На слици 11а) је приказан дијаграм напон-деформација на слици 11б) модел материјала са карактеристикама приказаним на дијаграму а).

Прајзакова функција је дата са

$$P(\alpha, \beta) = \frac{1}{2E} \left[\delta(\alpha - \beta) + \frac{E - E_h}{E_h} \delta(\alpha - \beta - 2Y) \right]$$



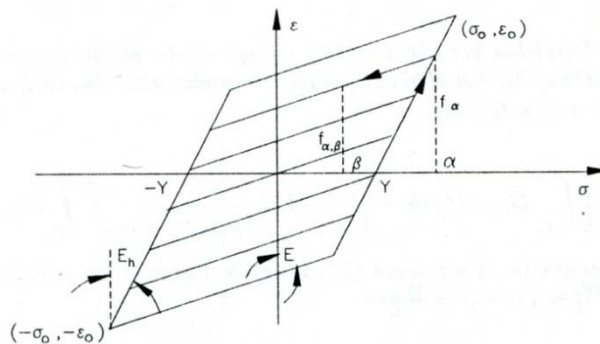
Сл. 11 Еластопластичан материјал са линеарним ојачањем

а израз за деформацију у функцији напона је :

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2E} \left[\int_{-\sigma_0}^{\sigma_0} G_{\alpha,\alpha} \sigma(t) d\alpha + \frac{E - E_h}{E_h} \int_{2Y - \sigma_0}^{\sigma_0} G_{\alpha,\alpha - 2Y} \sigma(t) d\alpha \right]$$

Први члан на десној страни претходног израза за деформацију је еластична деформација, а други представља пластичну деформацију. Систем који се састоји од коначног броја елемената датих на схеми повезаних редно, са расподелом напона течења, не равномерно, већ у зависности од акумулираног нивоа дилатација и броја циклуса у домену $Y_{max} \geq Y \geq Y_{min}$, укупна деформација је:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2E} \int_{-\sigma_0}^{\sigma_0} G_{\alpha,\alpha} \sigma(t) d\alpha + \frac{E - E_h}{E_h} \frac{1}{Y_{max} - Y_{min}} \iint_A G_{\alpha,\beta} \sigma(t) d\alpha d\beta$$



Сл. 12 Главна хистерезисна петља и неколико повратних линија, које одговарају моделу материјала датом на сл.11

Вредност одговора $\varepsilon = f\alpha$ одговара побуди $\sigma = \alpha$ дуж главне петље, од које се догађа растерећење дуж транзитне линије до вредности побуде $\sigma = \beta$ и одговарајућег одговора $\varepsilon = f\alpha, \beta$.

Први члан на десној страни горње релације је еластична деформација која може да се напише као $\sigma(t)/E$.

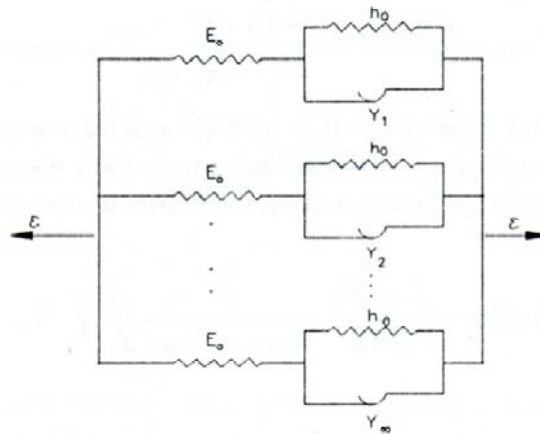
У случају када је деформација побуда, а напон одговор, Прајзакова функција постаје:

$$P(\alpha, \beta) = \frac{E}{2} \delta(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} (E - E_h) \delta\left(\alpha - \beta - 2 \frac{Y}{E}\right)$$

Сменом добија се

$$\sigma(t) = \frac{E}{2} \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} G_{\alpha, \alpha} \varepsilon(t) d\alpha - \frac{1}{2} (E - E_h) \int_{\frac{2Y}{E} - \varepsilon_0}^{\varepsilon_0} G_{\alpha, \alpha - 2 \frac{Y}{E}} \varepsilon(t) d\alpha$$

Са више оваквих елемената до момента лома добија се глобални напон течења.



Сл. 13 Паралелна веза више еластопластичних елемената са линеарним ојачањем.

На сл.13 сви елементи имају исти модуо еластичности и модуо ојачања.

Експериментална истраживања приказују одступања ових модула и промену у фазама ојачања и омекшавања.

$$\sigma(t) = \frac{E}{2} \left[\int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} G_{\alpha, \alpha} \varepsilon(t) d\alpha - \frac{1}{2} (E - E_h) \frac{1}{Y_{\max} - Y_{\min}} \iint_A G_{\alpha, \beta} \varepsilon(t) d\alpha d\beta \right]$$

Домен интеграције A у горњем изразу је трака у граничном троуглу између линија

$$\alpha - \beta = \frac{2Y_{\min}}{E} \text{ и } \alpha - \beta = \frac{2Y_{\max}}{E}$$

Дакле, без узимања ефеката пада (промене) границе развлачења у функцији акумулиране дилатације и броја циклуса није могуће дефинисати хистерезисни одговор у пољу малог броја циклуса, (D. Šumarac and Z. Petrašković, 2012).

Како експериментална истраживања приказују одступања вредности ових модула и промену у фазама ојачања и омекшавања и у зависности од броја циклуса могу се дефинисати са следећим изразима:

$$Y = Y_p - E_h \cdot \varepsilon_e + E_h \cdot \varepsilon \text{ за криву ојачања и}$$

$$Y = Y_p - E \varepsilon_e + E \varepsilon \text{ за почетну криву}$$

Где је: E -нагиб почетне криве, E_h - нагиб криве ојачања, Y_p , -граница еластичности и ε_e -дилатација на граници еластичности

Промена вредности E , E_h , Y_p добија се експерименталним путем у зависности од броја циклуса и акумулиране дилатације.

У наредном делу дају се основе замора у пољу малог броја циклуса.

3 Експериментална истраживања са аналитичким и нумеричким моделирањем

Основни задатак експерименталних истраживања је проналажење одговарајућег модела који ће описати понашање дампера у условима нискоцикличног замора материјала. Модел ће се базирати на аналитичким, нумеричким и експерименталним резултатима истраживања напрезања дампера при цикличном оптерећењу. Модел треба да буде довољно поуздан али истовремено и једноставан за свакодневну инжењерску праксу.

3.1 Експериментална и нумеричка истраживања нискоцикличног замора

3.1.1 Циклична пластичност и заморско оштећење у челичним конструкцијама које користе модел континуума механичког оштећења

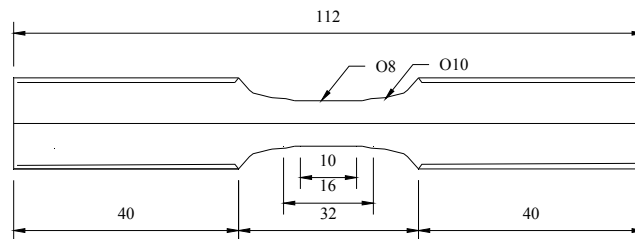
Овај део се бави експерименталном и нумеричком студијом цикличног понашања конструкцијског челика S235. Представљен је нумерички модел, заснован на експерименталном истраживању цикличне пластичности оштећења конструкцијског челика S235 услед нискоцикличног замора, комбинујући кинематично и изотропно ојачање са континуумом механичког оштећења за студију лома материјала. Модел од комплексних материјала, дефинисан са 22 параметра материјала, се користи да би симулирао еластопластично понашање материјала и развој оштећења, табела 2. Карактеристике материјала су добијене из једнооксијалних цикличних и монотоничних тестова челика S235.

У земљотресном пројектовању челичних конструкција, нееластичне деформације елемената су дозвољене када конструкција претрпи јака сеизмичка дејства. Унета енергија земљотреса се расипа кроз хистерезисно понашање пластичних зглобова, где се појављује велика пластична дилатација. У овом контексту, нискоциклични замор је блиско повезан са акумулацијом

пластичне дилатације, која води до настајања пукотина и чак до лома конструкције, Krawinkler, 1983, (31). Модел од комплексних материјала дефинисан са 22 карактеристике материјала, која комбинује динамичко и изотропно очвршћавање са механиком континуума оштећења, се користи да симулира еласто-пластично понашање материјала и развој оштећења.

3.1.1.1 Експериментални рад

Наметнута померања су контролисана екстензиомером на мерној дужини од 10mm. Амплитуде дилатације су изабране од 0.005 до 0.05 и у правцу притиска и правцу затезања. Прегревање узорка је спречено релативно малом фреквенцом дилатације оптерећења од 0.04/s (сл.14).



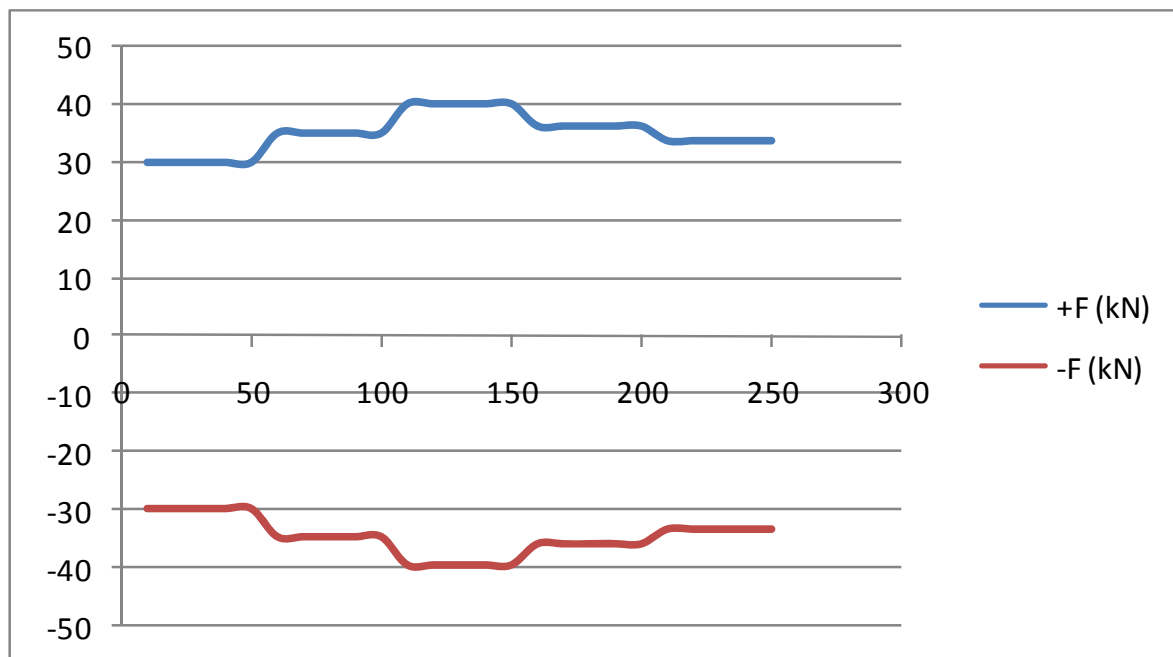
Сл. 14 Геометрија узорка тестираног на различитим амплитудама дилатације $\Delta\epsilon$ (1%, 3%, 5%)

Табела 2 Параметри материјала за S235

Кинематичко ојачање

E	σ_y	ν	γ^1	γ^1	γ^1	X_∞^1	X_∞^2	X_∞^3	m_1	m_2	m_3
kN/cm ²	kN/cm ²					kN/cm ²	kN/cm ²	kN/cm ²			
21 000	28.3	0.3	1000	100	10	8	4	1	0	0	0
Изотропно ојачање					Пропагација						
b_0	$R_{\infty,s}$	s_0	α	ζ	p_d	S_n	S_a	S	D_c		
	kN/cm ²							kN/cm ²			
12	24.7	43	0.08	35	0	600	70	15	0.11		

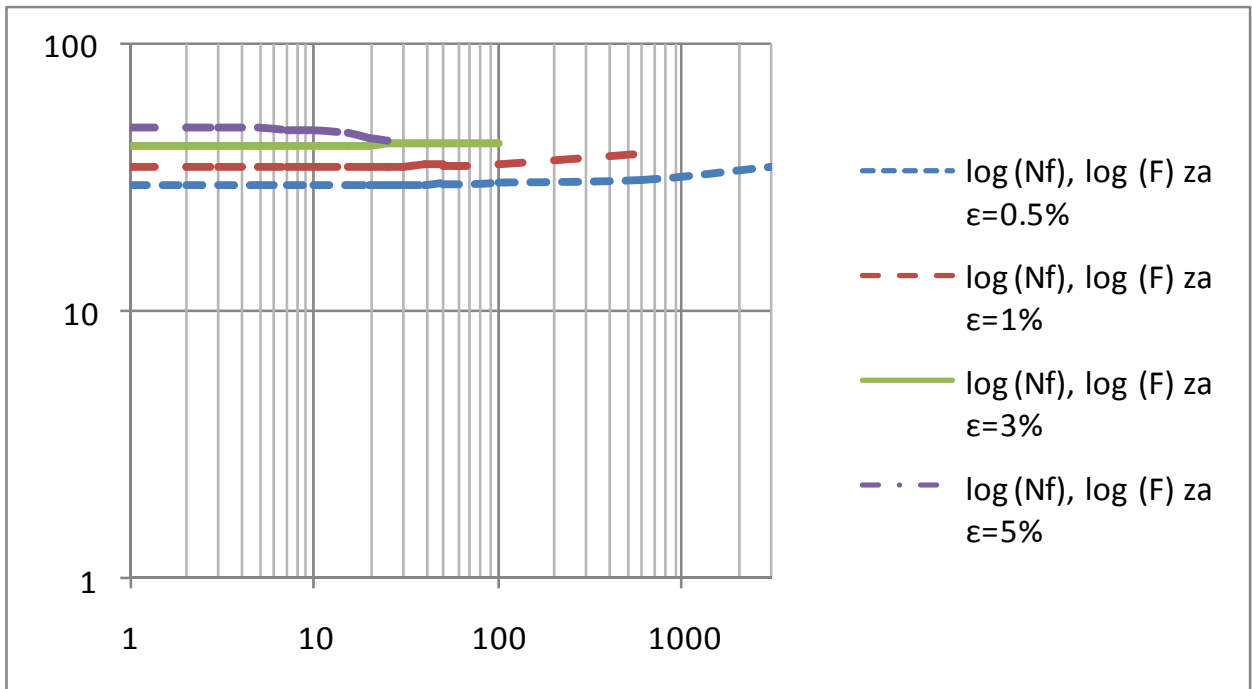
Параметри који описују изотропно очвршћавање су добијени из једнооксијалних симетричних цикличних тестова (табела 2). Експерименти показују да се изотропно очвршћавање не може добити одвојено од ефекта омекшавања оштећења. Овај феномен се може видети из сл.15, где су амплитуде напона у односу на број циклуса унете за различите историје оптерећења.



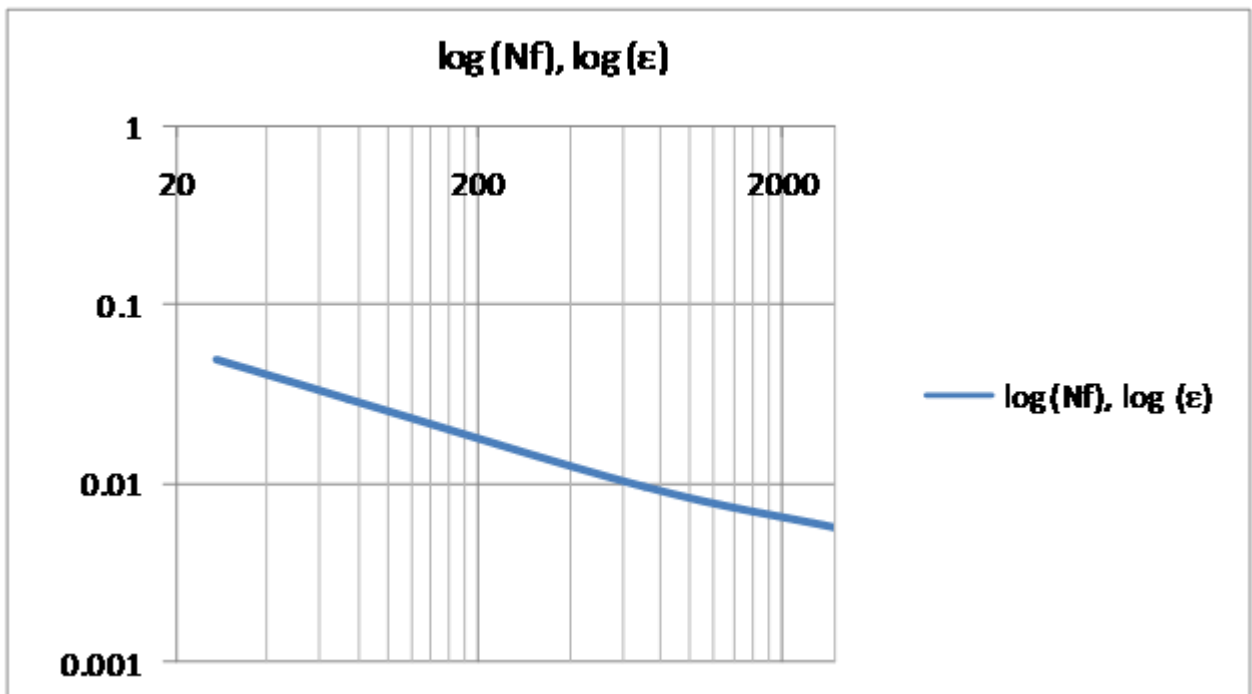
Сл. 15 Дијаграм максимална амплитуда силе-број циклуса за промену дилатација (0.5%, 1%, 1.5%, 1%, 0.5%) са приказом процеса ојачања.

На сл.15 је показан дијаграм сила-број циклуса за контролисано испитивање симетричне дилатације. Овде је амплитуда дилатације повећана од 0.005 до 0.015 и затим смањена поново на 0.005. На сваком степену дилатације узорак је подвргнут са 50 циклуса. Када је опсег дилатације повећан после стабилизације одговора материјала, појављује се додатно циклично очвршћавање. Додатно, примећена је разлика у амплитудама напона (σ^{\max} , σ^{\min}) у фази растуће и опадајуће амплитуде дилатације.

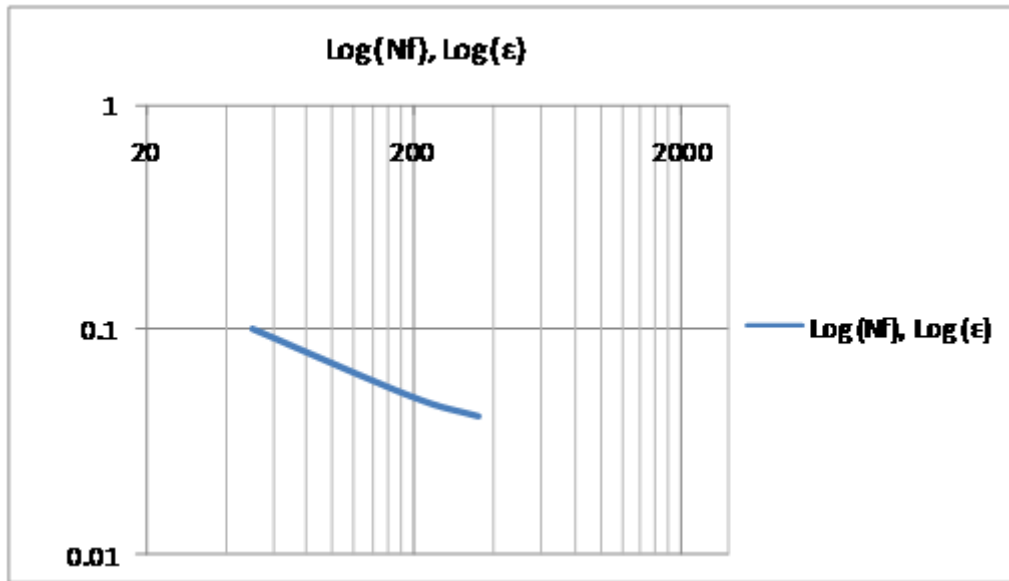
На сл.16 уочава се смањење амплитуде за велике дилатације (5%), (феномен наглог омекшања) и повећање амплитуде силе (ојачање) за мање дилатације (0.5%). На сл.17. приказан је дијаграм број циклуса-дилатација за обичан узорак S235 (који је приказан на сл.14) у логаритамској скали.



Сл. 16 Дијаграм максималних амплитуда силе F (kN) за различите максималне дилатације ϵ (0.5%, 1%, 3% и 5%) за обичан узорак S275 у односу на број циклуса



Сл. 17 Дијаграм $\log(N_f)$ - $\log(\epsilon)$ за обичан узорак S235



Сл. 18 Дијаграм $\log(N_f)$ - $\log(\epsilon)$ за Дампер ДЦ 90

Дијаграм на сл.18 приказује зависност броја циклуса (N_f) и просечне акумулиране дилатације (ϵ) за дампер ДЦ 90. Укупне акумулиране дилатације 5% за 190 циклуса су 17.8 за дампер типа Kanada HQ Royal, док за обичан узорак S275 за 27 циклуса су 2.7, што је омогућила нова патентирана конструкција дампера.

3.1.1.2 Основе за нумеричко моделирање

Конститутивне једначине

У општем случају у области великих пластичних деформација нумерички модел узима у обзир материјал и геометријску нелинеарност. Он представља спрегнут приступ у коме је напонски простор у тачки материјала погођен прогресивним оштећењем и развојем пластичне дилатације. Степен дилатације и утицај температуре на понашање материјала је занемарен. Формулација еласто-пластичног проблема у опсегу великих деформација је заснована на теорији J2 Simo, 1998, (32). Теорија претпоставља хипереластични изотропни одговор и мултипликативну декомпозицију градијента деформације F на еластични и пластични део, $F=F^e + F^p$.

Еластични део

$$\Pi^*(B_e) = (1 - D) \left[\frac{\Lambda}{2} (\sqrt{\det B_e} - 1)^2 + \mu \left(\frac{\text{tr} B_e - 3}{2} - \log(\sqrt{\det B_e}) \right) \right] \quad (1)$$

Где су Λ и μ Ламеове еластичне константе а D је варијабла оштећења дефинисана у једначини 14. Кирхофов тензор напона τ и еластични леви Кошијев тензор деформације B_e су дати са:

$$B_e = FC_{pl}^{-1}F^T$$

$$\tau = 2B_e \frac{\partial \Pi^*(B_e)}{\partial B_e} \quad (2)$$

где C_{pl}^{-1} представља инверзни пластични десни Коши-Гринов тензор деформације а F градијент деформације. Промена запремине при пластичној деформацији је занемарљива, па је $J = \det C_{pl} = 1$, Кошијев тензор напона једнак Кирхофовом тензору напона ($\sigma = \tau$).

Пластични део

$$FC_{pl}^{-1}F^T + \frac{2}{3}\lambda \cdot \text{tr}(B_e) \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

где је λ пластични множилац.

$$f(\sigma) = \tilde{\sigma}_e - (R + k) = 0, \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}_e = \sqrt{\frac{3}{2} \tilde{S} : \tilde{S}} \quad (5)$$

а S је одступник од ефективног напона и \tilde{S} је друга инваријанта тензора напона.

$$\tilde{S} = \tilde{\sigma} - \frac{1}{3} \text{tr} \tilde{\sigma} \cdot I. \quad (6)$$

Принцип једнакости дилатације тврди да се суштинске једначине за оштећење материјала могу извести као и за неоштећен материјал, где је уобичајени тензор напона, σ , замењен ефектним тензором напона: $\sigma = \frac{\tilde{\sigma}}{1-D} \cdot X$, где је D скалар који представља степен оштећења, а X је тензор напона који се користи да опише кинематичко очвршћавање. Еволуција променљивих R, D и X је дата у следећем делу.

Изотропно ојачање

У случају ситуације једнооксијалног оптерећења са контролисаном дилатацијом са константном амплитудом дилатације, може се видети да се амплитуда

напона повећава како се циклично оптерећење наставља (сл.15). Утицај ефекта меморије дилатације на одговор материјала може се видети кроз сл.15. Ако је амплитуда повећана после стабилизације одговора материјала, појављује се додатно циклично очвршћавање. Штавише присутан је ефекат меморије распона дилатације.

$$R = b_0(b_1 \cdot \dot{\lambda} + R_\infty - R) \cdot \dot{\lambda} \quad (8)$$

$$b_1 = 1 - e^{-S_0 \varepsilon_{p, \max}} \quad (9)$$

$$R_\infty = R_{\infty, S}(1 + (\alpha - 1)e^{-\xi \varepsilon_{p, \max}}) \quad (10)$$

Фактор $b_1(\varepsilon_{p, \max})$ модификује облик изотропног очвршћавања са бројем циклуса који се повећава. Овде је функција $R_\infty(\varepsilon_{p, \max})$ зависна од пластичне дилатације максималног еквивалента. Вредност $R_{\infty, S}$ је материјални параметар који ограничава очвршћавање.

$$0 \leq R \leq R_\infty \leq R_{\infty, S}.$$

Због напредовања оштећења, вредност $R_{\infty, S}$ се никада не достиже. Материјални параметри b_0 , S_0 , $R_{\infty, S}$, α и ξ су одређени из једнооксијалних цикличних испитивања са константним амплитудама напона које користе нумеричке симулације тестова.

Кинематичко ојачање

Кинематичко ојачање се дефинише тензором напона X , који означава центар површине савијања у простору напона и еволуцију (јед.12), који описује транслацију центра ове површине када се појави пластично течење. Појава опуштања средњег напона је контролисана са Оно-Ванг (1994) параметрима материјала m_n . У моделу, тензор напона је узет да буде сума три доприноса да би се побољшао опис напон-дилатација одговора:

$$X = \sum_{n=1}^3 X^{(n)}, \quad (11)$$

$$\dot{X}^{(n)} = \frac{2}{3} \gamma^{(n)} X_\infty^{(n)} (1 - D) \dot{\varepsilon}^p - \left(\frac{X_e^{(n)}}{X_\infty^{(n)}} \right)^{m_n} X^{(n)} \gamma^{(n)} \dot{\lambda} \quad (12)$$

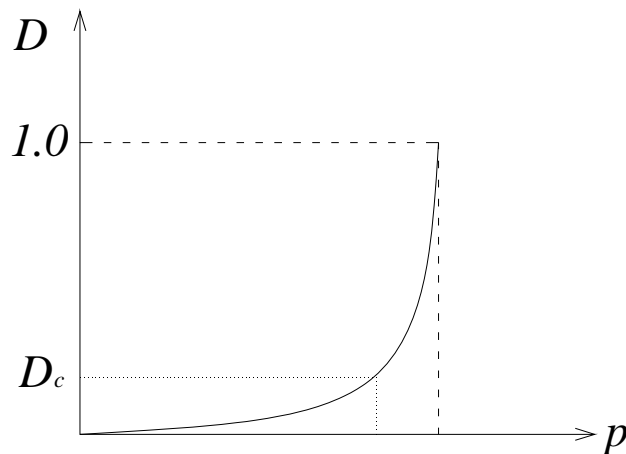
$$X_e^{(n)} = \sqrt{\frac{3}{2} X^{(n)} : X^{(n)}} \quad (13)$$

Развој оштећења

Оштећењу се не може прићи директно са мерењем. Његова квантитативна процена је повезана са дефиницијом променљиве, изабране да представља ову појаву. Оштећење је проишло из експерименталних мерења опадања крутости током цикличног оптерећења:

$$D = 1 - \tilde{E}/E, \quad (14)$$

где је E Јунгов модул, а \tilde{E} еластична крутост добијена из садашњег нагиба хистерезисне петље. Тако, знајући Јунгов модул, мерење еластичне крутости може се користити да би се одредило оштећење. На сл.19 приказана је променљива оштећења D , добијена из јед.14, у односу на акумулирану ефективну пластичну дилатацију p . За неоштећени нови материјал $D=0$. Када акумулирана ефективна пластична дилатација p достигне граничну вредност p_d , оштећење почиње да се развија до критичне вредности D_c . Параметар материјала D_c се мери директно из једнооксијалних цикличних испитивања са константним амплитудама дилатације и представља вредност где се види значајно опадање крутости, (сл.19). Зачетак микропрслине у материјалу се претпоставља у тој тачки.



Сл. 19 Нелинеарни модел акумулираног оштећења

$$\dot{p} = \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \quad (15)$$

Ако претпоставимо да оштећење почиње да се развија када се појави пластична дилатација, параметар материјала p_d је једнак нули. Параметар

материјала D_c се мери директно из једнооксијалних цикличних тестова са константним амплитудама дилатације. Експериментална мерења опадања еластичне крутости показала су се тешким за разраду. Из почетне петље хистерезиса и петље пред лом узорка, могуће је било да се установи критично оштећење D_c , док мерења између нису била довољно тачна.

$$\dot{D} = \left[\frac{Y}{S} \right] (1 + S_a \varepsilon_{p,\max} + S_n \varepsilon_{p,\max}^2) \dot{p} \alpha(p), \alpha = \begin{cases} 1, & p \geq p_d \\ 0, & p \leq p_d \end{cases} \quad (16)$$

где је Y , степен отпуштања енергије дилатације.

$$Y = \frac{\tilde{\sigma}^2 R_v}{2E(1-D)^2} \quad (17)$$

Ефективни напон се означава са σ_e и добијен је из јед. (5). Триоксијалност поља напона се објашњава параметром:

$$R_v = \frac{2}{3}(1 + \nu) + (1 - 2\nu) \left[\frac{\text{tr}\sigma}{3\tilde{\sigma}_e} \right]^2 \quad (18)$$

S , S_a и S_n су карактеристике материјала, одређене из једнооксијалних цикличних испитивања са константним амплитудама дилатације користећи нумеричке симулације тестова.

3.2 Утицај површинске обраде и имперфекција на замор (*Y. Murakami, 2004*)

Овим истраживањима је показано да је Кофин-Мансонова веза између високе дилатације, ниског циклуса и замора суштински иста као код закона раста прслине. Друго, утицај раније историје замора на степен раста мале прслине се истражује систематично користећи посебне узорке који садрже малу вештачку рупу различитих промера, тј. 40, 100 и 200 μm .

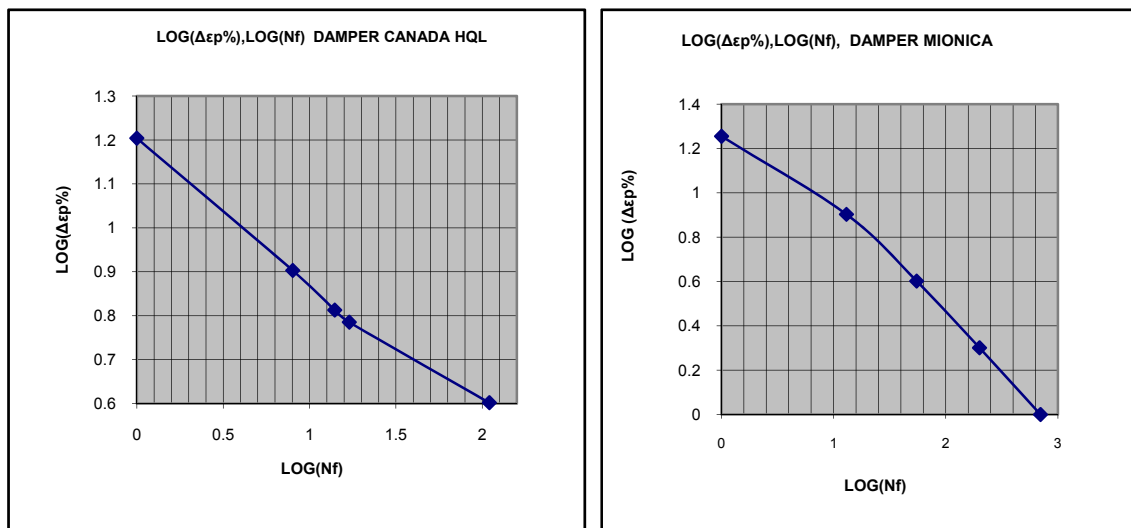
Ранија историја замора показала је да има мало утицаја на степен раста пукотине и у режиму замора високе дилатације. Треће, показаће се да се губитак дуктилности прелома после цикличног напона у испитивањима замора високе дилатације може приписати постојању малих прслина на површини.

Губитак дуктилности прелома зависи од дужине прслине - l . Ако је l већа него критична дужина $l(c)$ прслина услед замора узрокује макроскопски лом смицања у испитивању истезања које следи за цикличном дилатацијом. Са друге стране, ако је l мања од $l(c)$, површине лома истезања су типа "купа и фишек". За тестиране узорке, $l(c)$ је око 400 μm . Тако, модели оштећења услед замора који занемарују стварност оштећења услед замора као што је изражено у условима прслина не би требало да се користе за претпоставке у вези са веком трајања замора.

3.3 Специфична истраживања нискоцикличног замора ДАМПЕРА - амортизера Система ДЦ 90

Ова истраживања су рађена у склопу реализације конкретних пројеката и имају значај јер је један део узорака дампера био изложен вишеструком динамичком напрезању по амплитудама и фреквентном саставу реалног земљотресног записа. Свака грађевинска конструкција неминовно пролази фазу нискоцикличног замора под дејством јаким ударних оптерећења при земљотресу, а лаке конструкције често страдају због губитка локалне или глобалне стабилности (локално избочавање или извијање елемената конструкције). Практично је немогуће разумети понашање зграда изложених земљотресном оптерећењу без основног знања о понашању конструкцијских компоненти током процеса нискоцикличног замора, као ни стабилности конструкције током свих фаза дејства земљотреса.

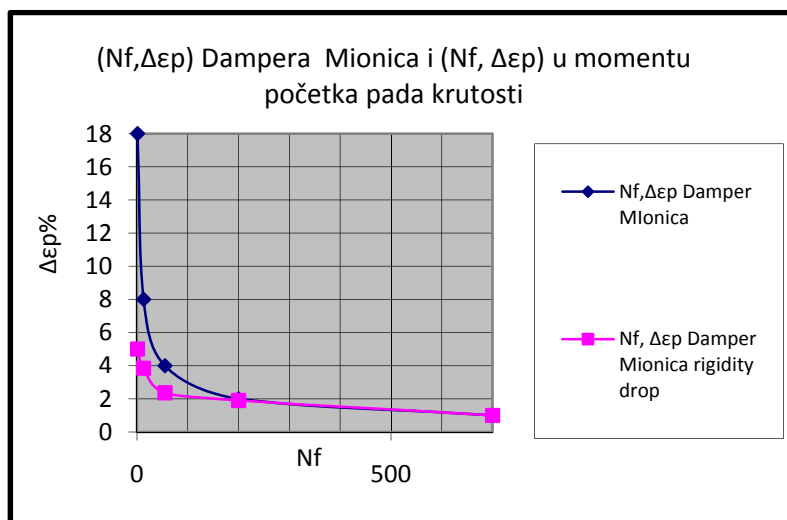
Многобројна испитивања на моделима дампера Мионица и Канада HQL дала су резултате приказане на слици 20 и слици 21.



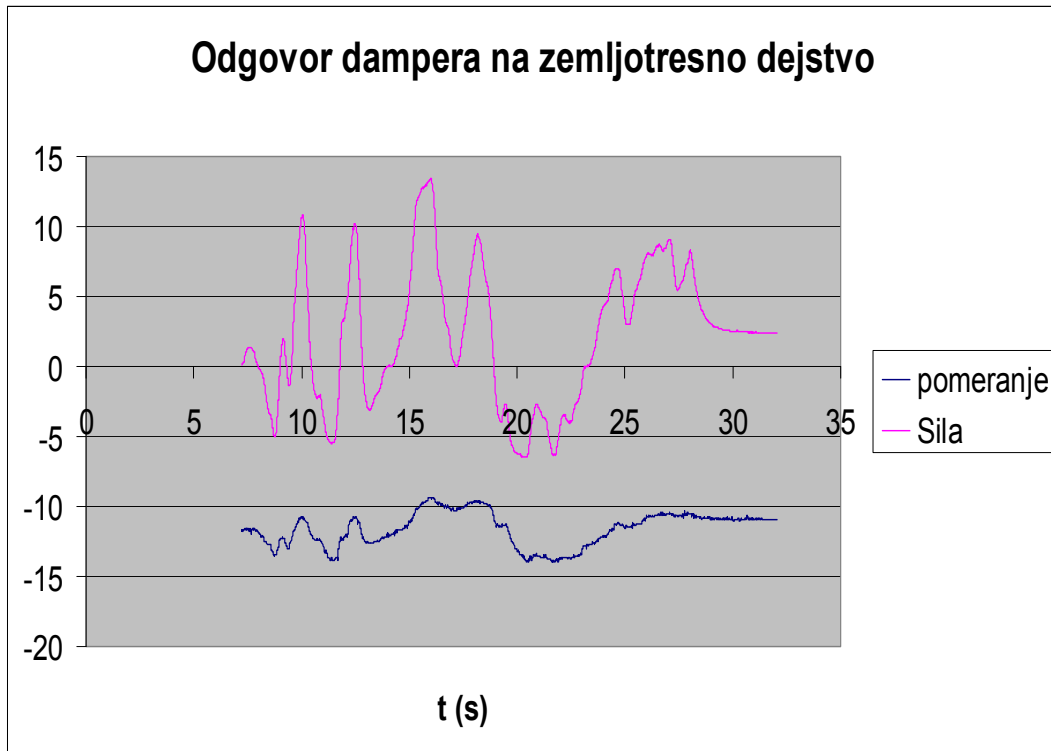
Сл. 20 Дијаграм зависности просечне акумулиране дилатације и броја циклуса у логаритамском односу **CANADA HQL**

Сл. 21 Дијаграм зависности просечне акумулиране дилатације и броја циклуса у логаритамском односу **MIONICA**.

Испитивања обављена у Иновационом Центру Система ДЦ 90, на Грађевинском факултету у Љубљани и Војнотехничком Институту ВТИ у Београду дају неопходне податке за дефинисање поља рада дампера у области малог броја циклуса.



Сл. 22 Дијаграми $(N_f, \Delta \epsilon_p)$ са приказом момента почетком омекшавања (пада силе за уста померања) у функцији просечне акумулиране дилатације

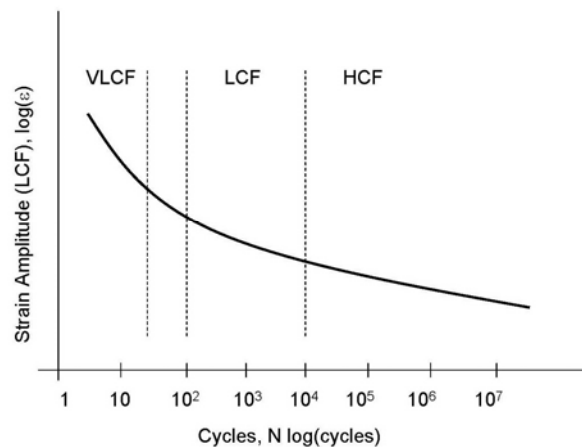


Сл. 23 Дијаграм силе и померања за оптерећење земљотресним записом

Тестирање у Љубљани (слика 68 и 69) и дијаграми (слика 22) дампера типа Мионица показују значајно омекшавање у пољу малог броја циклуса, за разлику од понашања у пољу великог броја циклуса. У пољу великог броја циклуса лом наступа нагло за разлику од поља малог броја циклуса где долази до постепеног омекшавања. Зато је ово подручје понашања са великим пластичним деформацијама посебно и специфично за проучавање. Тестирање (слика 23) Дампера Канада HQL на реалне записе земљотреса са максималном амплитудом од 8 mm показало је да је дампер после 110 синусних циклуса са амплитудом од 4mm издржао четири земљотресна записа са максималном амплитудом од 8mm. Тај тест је био неопходан да би се одредио број земљотреса који може издржати дампер. Међутим уколико се јави земљотрес чији је интезитет (нпр.) двоструко јачи од пројектованог тада се користе ефекти дампера (контрола деформације и након колапса) који су приказани на слици (слика 38).

3.4 Основни дијаграми и приступ одређивања хистерезисног понашање код малог броја циклуса тј. понашање у пољу великих трајних неповратних деформација уређаја ДЦ 90

Понашање уређаја ДЦ 90 у пољу великих трајних неповратних деформација, као и других елемената грађевинских конструкција је комплексан проблем и врло га је тешко могуће разумети без великог броја експерименталних истраживања и испитивања. На дијаграмима испод приказана су два основна дијаграма која карактеришу ову појаву. Први дијаграм (сл.24) карактерише зависност акумулиране дилатације у односу на број циклуса, а други дијаграм (сл.25.) карактерише зависност промене границе развлачења (или неки други параметар као што је коефицијент трења, коефицијент вискозног пригушења, сила атхезије и сл.) у односи на број циклуса а за различите амплитуде дилатација. Познавајући ове зависности, као и друге елементе који дефинишу стабилност у пољу напрезања притиском могуће је дефинисати хистерезисно понашање код лома у малом броју циклуса.



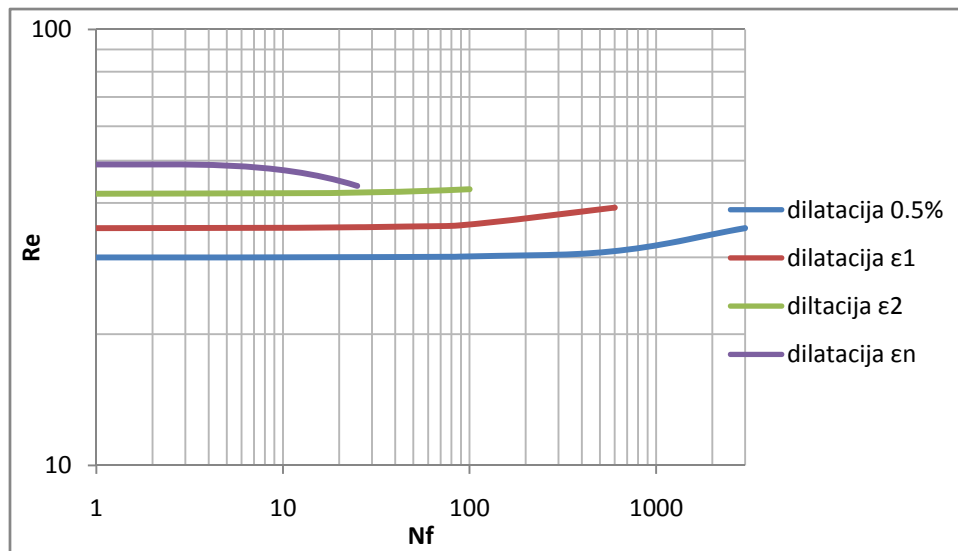
Сл. 24 Дијаграм број циклуса-акумулирана дилатација са приказом различитих поља замора материјала (VLCF, LCF, HCF)

Дефиниције замора према броју циклуса (сл.24.):

замор у пољу великог броја циклуса -high cycle fatigue (HCF), већи од 10^5

нискоциклични замор-low-cycle fatigue (LCF), између 10^2 и 10^4

замор у пољу врло малог броја циклуса-very low-cycle fatigue (VLCF), око 20 циклуса.



Сл. 25 Дијаграм зависности вредности границе развлачења или максималне силе у односу на број циклуса за различите амлитуде дилатације $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$,

Уместо границе развлачења R_e могу се посматрати неки други параметри као што су коефицијент трења, коефицијент вискозног пригушења, сила адхезије и сл.25.

Ово понашање је карактеристично за дејства земљотреса где конструкција или њени поједини делови губе интегритет већ после неколико циклуса напрезања и без његовог узимања у обзир немогуће је објаснити ову појаву.

Поступак прорачуна са узимањем ефеката акумулације дилатација

- Експерименталним путем треба добити криве приказане на сликама 24 и 25,
- Приликом сваког циклуса померања конструкције треба срачунати укупну акумулирану дилатацију која се, свакако, са сваким бројем циклуса увећава.
- За сваку тренутну ситуацију и за познате вредности ($N_f, \Delta \epsilon$) читава се одговарајућа вредност R_e .

Промена вредности R_e је врло спора и практично без промена у пољу великог броја циклуса где њен пад долази нагло. Међутим промена вредности R_e у пољу значајно акумулираних дилатација са малим бројем циклуса је велика и постепена и врло значајна. Сваки нови циклус се рачуна са новом конфигурацијом хистерезиса у зависности од величине R_e . Наравно ово је

поједностављено реолошко питање али са друге стране треба настојати да се једноставним реолошким моделима прикаже стварно и врло сложено понашање материјала под цикличним оптерећењем.

Препознавање кључних или најзначајнијих параметара је од пресудног значаја за квалитетно моделирање. Посебно је значајно ово поље за нумеричко моделирање нових конструкција. Комбинација нумеричких и експерименталних истраживања је врло захвална и корисна. Посебно са аспекта цене, квалитета (суштине проблема) и потребног времена за једна или друга истраживања (нумеричка и експериментална).

3.5 Основни параметри код пројектовања конструкције

Дампера ДЦ 90

Феномен нискоцикличног замора карактерише мали број циклуса и велике амплитуде дилатација у пластичној области. Високоциклични замор карактерише велики број циклуса, обично преко 10^5 и мале амплитуде дилатација у еластичној области.

Нискоциклични замор карактерише број циклуса који се обично креће у границама између 10^2 и 10^4 . Ниво напона се креће око границе течења у еластичном и пластичном делу. Од великог је интереса за земљотресно инжењерство разматрати понашање материјала у пољу врло малог броја циклуса, као што и говоре истраживања од Dufailly и Lemaitre (9). Број циклуса се креће од свега пар циклуса до око 100. Пластичне дилатације су врло велике као и пластични рад. Овај феномен је врло значајан за потребе конструисања металних дампера у конструкцијама изложених земљотресним утицајима. Тада се лоцира и контролише место замора материјала. Ни једна грађевинска конструкција не може опстати (у земљотресним условима) без трошења енергије у пластичној области. Уколико би се тај феномен желео избећи, са намером да конструкције раде само еластично, као последицу имали бисмо предимензионисане и скупе конструкције. Добро познавање феномена замора у малом броју циклуса је од пресудног значаја за опстанак конструкција у земљотресним условима. Замор материјала у врло малом броју циклуса оптерећења и примена на металним дамперима у земљотресном оптерећењу

се приказује преко теоријске анализе и експерименталних резултата теста и истраживањима на моделима. Manson-Coffin закон из 1955:

$$N_f = (\Delta \varepsilon_p / C)^{\gamma} \quad (1)$$

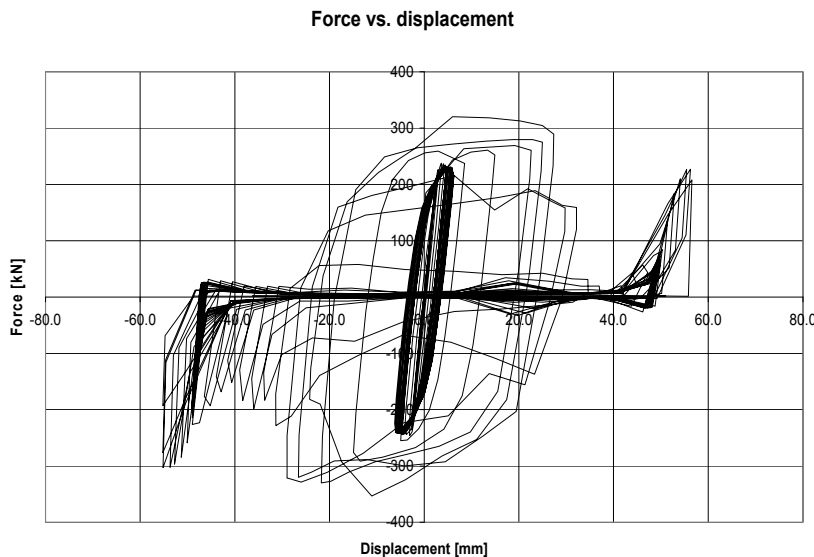
је са неколико параметра дефинисао понашање материјала на замор у односу на број циклуса. Формула (1) је дефинисана следећим параметрима:

N_f је број циклуса замора

$\Delta \varepsilon_p$ је амплитуда пластичне акумулиране дилатације и

C и γ су константе материјала.

За посебне конструкторске потребе иновирана је нова конструкција металног хистерезисног уређаја-дампера, који би контролисао велика померања и значајније силе које се јављају код мостовских конструкција. Ови типови дампера се уграђују у врху мостовских стубова и повезују главне мостовске носаче (горњег строја) са стубовима (доњег строја). Тестирање у Институту ВТИ у Београду је приказано на слици (Слика 26).



Сл. 26 Тестирање дампера типа "Bridge" $l=1000\text{mm}$ у војном Институту ВТИ у Београду,

Сл. 27 Дијаграм сила-померање за конструкцију дампера типа MOST

Из дијаграма сила-померање види се двостепени рад уређаја са ојачањима око $\pm 55\text{mm}$ и контролом деформација, (Слика 27). Такође се уочава тростепени рад дампера у еластичној области, у области контроле деформација и у пост-колапсној области са контролом деформација и силе.

Параметри којима се дефинише заморско понашање дампера у високопластичном цикличном напрезању са контролом деформације (пластичности) су:

Пречник \emptyset (односно проценат редуkcије основног попречног пресека, искуствено и експериментално то је минимум 20% редуkcије површине попречног пресека),

Дужина дела са редукованим попречним пресеком "пасја кост" (одговара максимално допуштеној дилатацији од 5% до 10%, што је искуствено и експериментално одређено и потврђено за одређене врсте конструкцијског челика-материјала који се користе за те потребе),

Површинска обрада елемента "пасја кост",

Елементи за обезбеђење локалне и глобалне стабилности и клизања, посебно за фазу притиска (бетонско језгро, алуминијумски лимови, оловни прстенови, челични лимови и сл.)

C и γ – константе материјала и конструкције дампера и

Брзина промена деформација.

Посебна чињеница да Manson-Coffine закон не дефинише адекватне односе за број циклуса мањи од 100 и специфичности конструкције дампера ДЦ 90 захтевају дефинисање параметара који могу реалније описати стварно понашање конструкције на велике ударе са малим бројем циклуса до колапса. Хистерезисна крива се дефинише са више параметра:

Вангеометријске, материјалне карактеристике везане за замор материјала у складу са законом Manson-Coffine (Замор конструкције материјала врло малим бројем циклуса динамичког напрезања)

$\Delta\varepsilon_p$ – амплитуда пластичних дилатација,

N_f – број циклуса до лома и

ε_p/t – брзина промене дилатације

Геометријско приказивање хистерезисне криве $F(\sigma, \varepsilon)$ је могуће разумети узимајући у обзир фазе рада дампера и криве које дефинишу хистерезис.

Фазе рада дампера приказане су у четири корака:

- 1) $\sigma < \sigma_y$ високоциклични замор,
- 2) $\sigma_y < \sigma < \sigma_u$ нискоциклични замор,
- 3) σ close to σ_u замор са врло малим бројем циклуса
- 4) $\varepsilon > (5-10\%)$ у овом пољу напрезања-амплитуда дилатација, дампер ради са контролисаним померања што омогућавају сигурносни прстенови и оловни прстенови.

После колапса дампера дијагонале раде у еластичној области и њихов колапс се очекује због губитка стабилности или у мањем броју случајева због замора материјала (случај спреченог избочавања и извијања или уградњом дијагонала у зидове који онемогућавају губљене стабилности, што је експериментално тестовима у Институту ИМС и доказано).

За конструисање хистерезиса са две линије (део праве линије-дуж и кружни лук, као део круга радијуса R) могуће је дефинисати хистерезисни дијаграм, $F(\sigma, \varepsilon)$ са аспекта геометрије а са аспекта материјала узима се у обзир замор материјала. Две криве се могу за потребе нумеричке анализе дефинисати следећим аналитичким релацијама:

1. $f_i(\sigma, \varepsilon) \quad \sigma = b + k \cdot \varepsilon$, (line) и $(i=1\dots n)$, где је b -одсечак на y -оси а k нагиб ка x -оси

Права линија и кружни лук

2. $f_i(\sigma, \varepsilon) \quad (\sigma - \sigma_1)^2 + (\varepsilon - \varepsilon_1)^2 = R^2 \quad (i=1\dots n)$, где је $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ -координате центра круга а R -радијус круга

Опште узевши замор материјала се дефинише Manson-Coffine законом $(\Delta\varepsilon, Nf, \varepsilon)$, узимајући у обзир историју акумулиране дилатације и ниво тренутног напрезања који је исказан тренутном дилатацијом ε , а на основу посебних експерименталних мерења. Замор материјала са врло малим бројем циклуса

од свега неколико до 20, што је карактеристично за оптерећење конструкција изложених удару земљотреса, дефинише велика акумулирана пластична деформација. То је од значаја за конструисање дампера који се уграђују у конструкције са доминантним дејством земљотреса или других екстремних оптерећења-удара (експлозије и сл.). Локална и глобална стабилност је такође истовремено значајна јер колапс витких челичних елемената врло често пре долази због губљења стабилности него због локалног лома или је међусобно повезан. Брзина промена деформација (дилатација у времену) је такође параметар који је незаобилазан за разумевање ове појаве. Да би се посебним уређајем-Дампером могло контролисати и управљати ударом, морају се одредити његове карактеристике. Карактеристике (параметри) дампера су: пречник ослабљења, тј. проценат % редуције основног попречног пресека, површинска обрада дела дампера који се замара "пасја кост", постављање елемената за обезбеђење локалне и глобалне стабилности, посебно за фазу притиска (бетонско језгро, алуминијумски и челични лимови, оловни прстенови) дужина редукованог попречног пресека дела дампера и коефицијенти материјала дампера C и γ .

3.6 Нелинеарна динамичка анализа зиданих конструкција ојачаних дамперима Система ДЦ 90 по методологији Хидроквебек-Канада и методом хомогенизације (Гоцевски 2007)

Нелинеарна динамичка анализа употребљава методу "критичних равни" где се ортотропни параметри одређују процедуром хомогенизације (Gocevski 2007). Орјентација критичне равни одређује се максиминизирањем функције лома помоћу лимитиране анализе оптимизације. Усвојена је линерна Coulomb-ова функција лома (F_1) у комбинацији са Rankin-овом функцијом лома у подручју затезања (F_2):

$$F_1 = \tau + \sigma_N \tan \varphi - C_0 = 0, \quad F_2 = \sigma_N - \sigma_0 = 0 \quad (1)$$

У формули, τ и σ_n представљају компоненту смицања и компоненту нормалног напона у равни чија оријентација је дефинисана нормалом на раван вектора n_i .
Значи:

$$\tau = \sigma_{ij} n_i s_j, \quad \sigma_n = \sigma_{ij} n_i n_j \quad (2)$$

где

$$s_i = t_i^s / \|t_i^s\|, \quad t_i^s = (\delta_{ij} - n_i n_j) \sigma_{jk} n_k \quad (3)$$

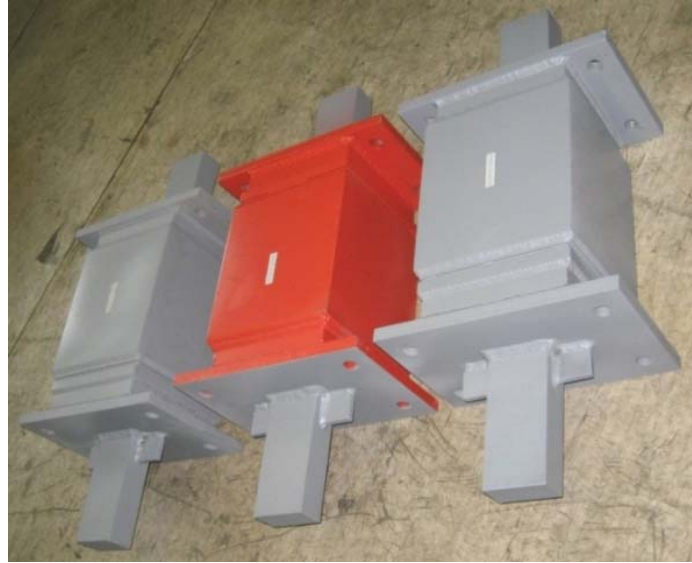
У једначини (1), параметри материјала σ_0 , φ , и c_0 дефинисани су оријентационим функцијама.

Специфичности нумеричке динамичке анализе, замора, настанка прслине, пропагације и лома

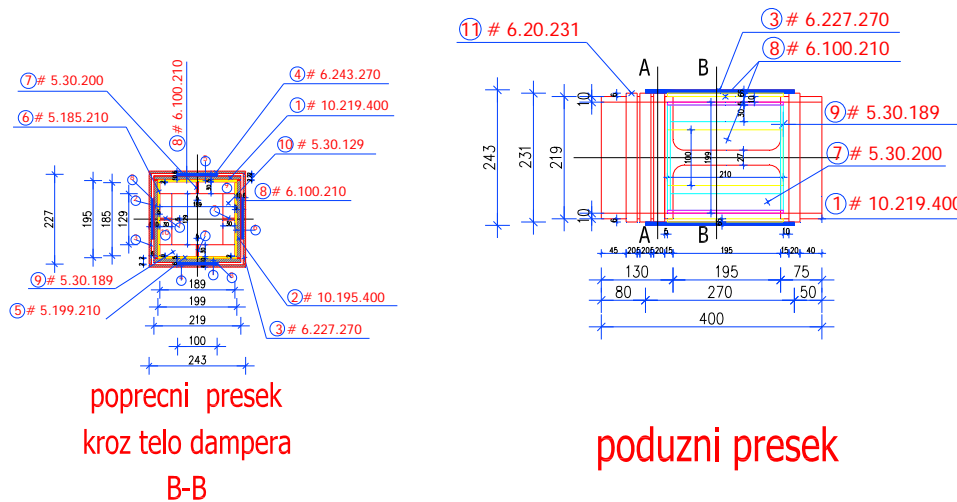
- 1) У стању притиска имамо спречено бочно померање у два правца (x, y). Слободно је померање у z правцу, али пошто се ради о једноаксијалном напрезању у фази затезања долази до контракције пресека и затварања прслина у правцу z.
- 2) У фази притиска због спреченог бочног померања све се прслине затварају и раван прслине бива оптерећена напонима притиска који изазивају силе трења.
- 3) Настанак површинских оштећења се у почетној фази успорава добром површинском обрадом где се успорава иницијализација процеса (тестови Мураками).
- 4) Феномен ојачања и омекшања се узима на бази тестова а у функцији максималне дилатације.

3.7 Испитивање дампера – апсорбера сеизмичке енергије типа Kanada HQ Royal на три узорка

Испитивања три узорка (сл.28 и сл.29) обављена су на Војнотехничком Институту ВТИ у Београду.



Сл. 28 Дампери – апсорбери сеизмичке енергије Kanada HQ Royal



Сл. 29 Радионички цртеж дампера типа Kanada HQ Royal, попречни и подужни пресек

Испитивање је вршено на кидалици сервохидрауличног система MTS, слика 30. Крајеви опитног узорка су стегнути чељустима кидалице за плоснате елементе, тако да је утицај њихових деформација на резултате мерења практично занемарљив.

Овај систем максималног опсега ± 500 kN, може да ради у контроли:

силе,

дилатације и

хода клипњаче актуатора.



Сл. 30 Сервохидраулични систем MTS

Испитивање је рађено у контроли померања клипњаче, што је у овом случају деформација опитног узорка. Унапред дефинисани режим испитивања је унет у програм PDP рачунара, а синусна промена померања остварена је помоћу генератора функције. Мерене величине (силе и ход актуатора) се са MTS уређаја преко A/D конвертора шаљу на рачунар. Испитивање је вршено са фреквенцијом од 1 Hz, а аквизиција података мерења је била 30S/s (сампла – одбирака у секунди) тако да се за један циклус оптерећења при 1 Hz региструје 30 тачака по каналу.

3.7.1 Испитивање узорка бр.1

Оптерећење је започето са по пет циклуса са амплитудама деформације од ± 1 mm, ± 2 mm, ± 3 mm и ± 4 mm, а затим је следило 1000 циклуса са амплитудом ± 5 mm.

Иако је после 183. циклуса дошло до деградације дампера, није дошло до потпуне деструкције узорка, који и даље прима оптерећење на притисак. Испитивање је прекинуто после 1020. циклуса.

Табела 3 Акумулирана дилатација за узорак бр.1

Δl_i	$ \Delta \varepsilon_i $	$n_{\text{сус}}$	$\Sigma \Delta \varepsilon_i $
mm			
±1	0.01	5	0.1
±2	0.02	5	0.2
±3	0.03	5	0.3
±4	0.04	5	0.4
±5	0.05	163	16.3
	Σ	183	17.3

$|\Delta \varepsilon_i| = \left| \frac{\Delta l_i}{l} \right|$ – акумулирана дилатација у једном полуциклусу,

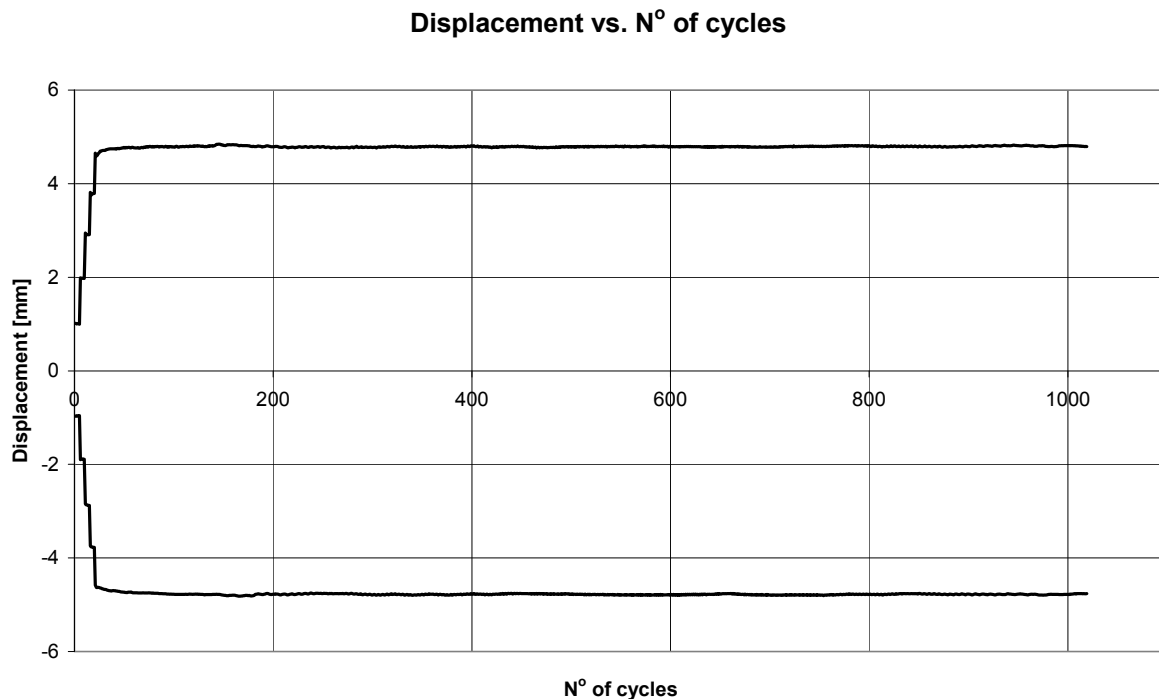
где је

Δl_i –издужење (скраћење) у једном полуциклусу,

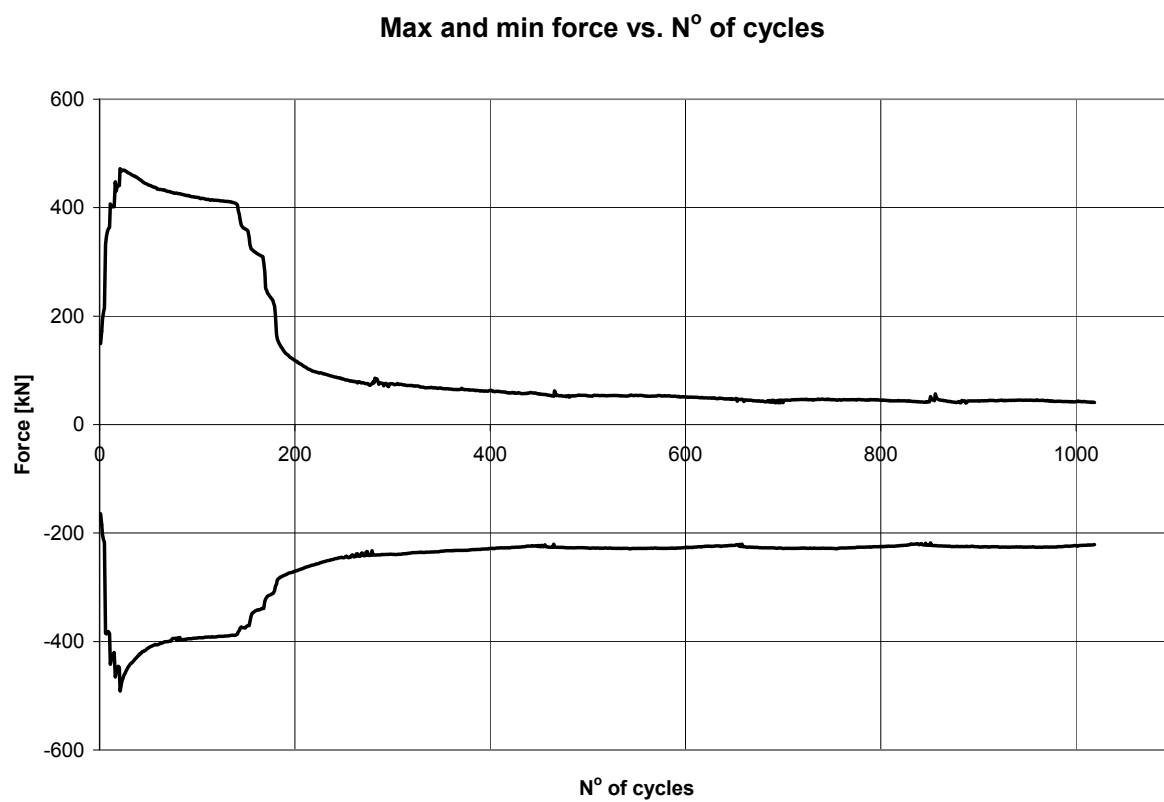
l – дужина опитног узорка где се развија дилатација је 100 mm и

$n_{\text{сус}}$ – број циклуса.

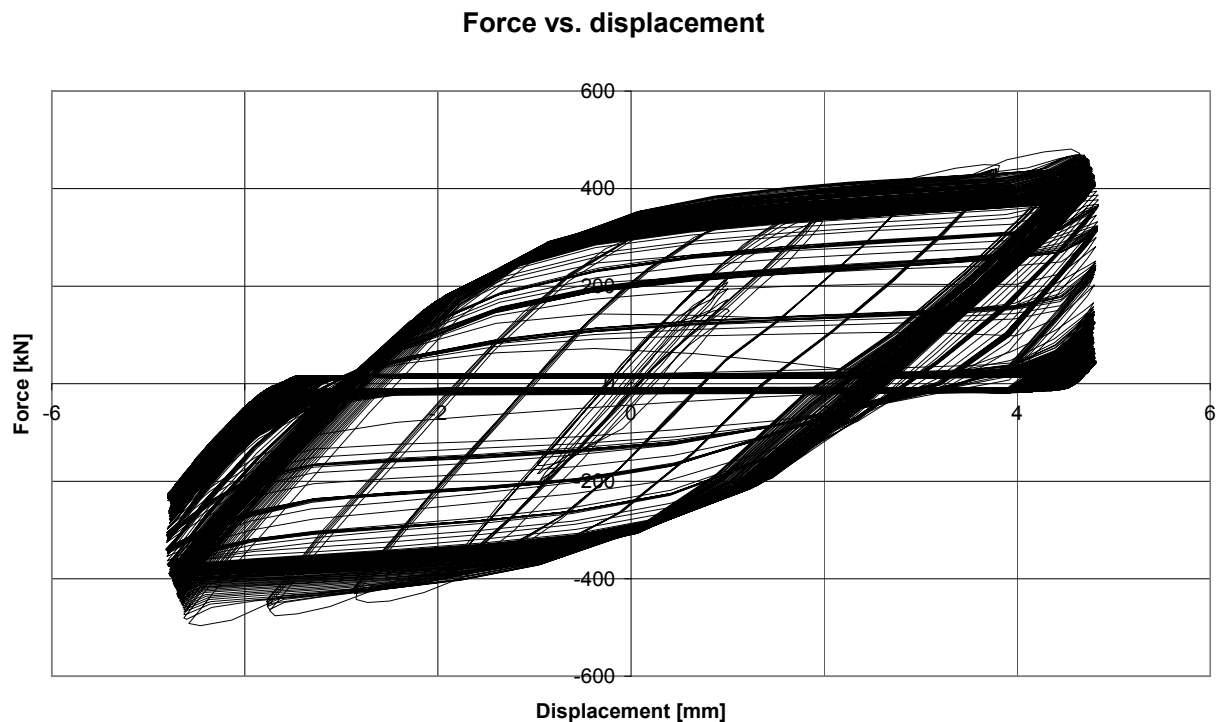
Укупна акумулирана дилатација је 17,3 у 183 циклуса оптерећења на дужини од 100 mm пасје кости дампера ДЦ 90 типа HQ Royal.



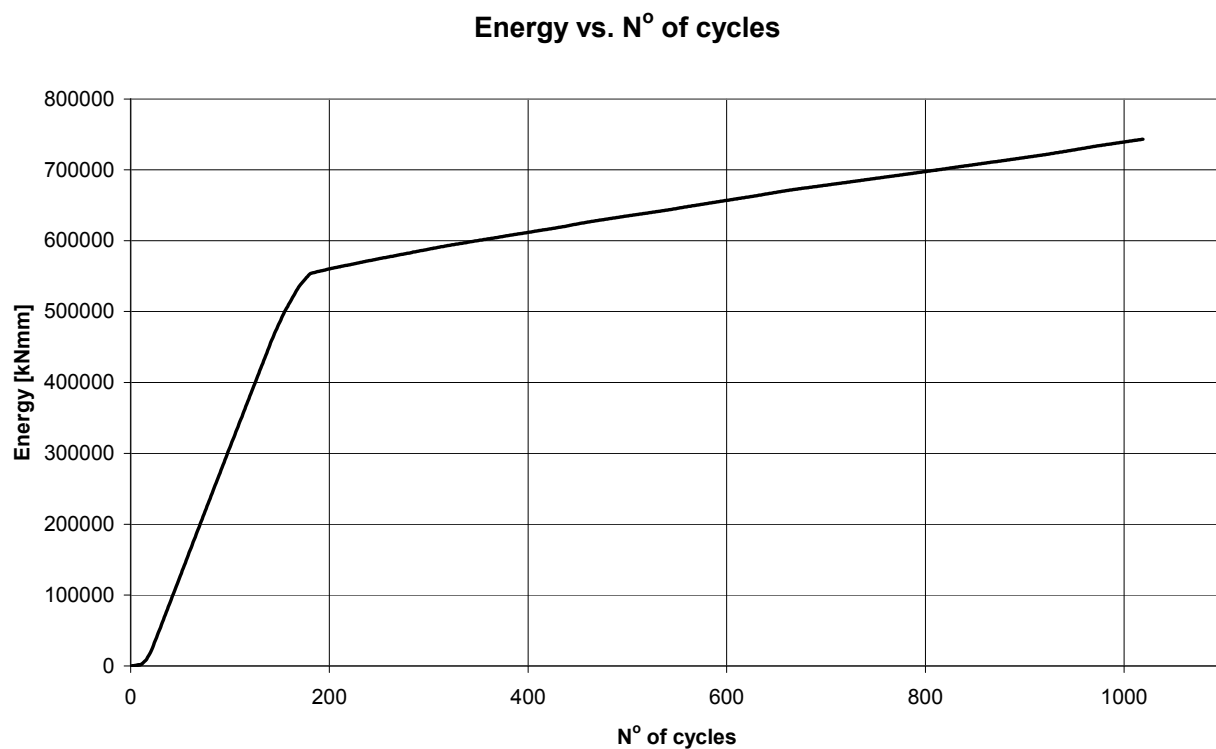
Сл. 31 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса



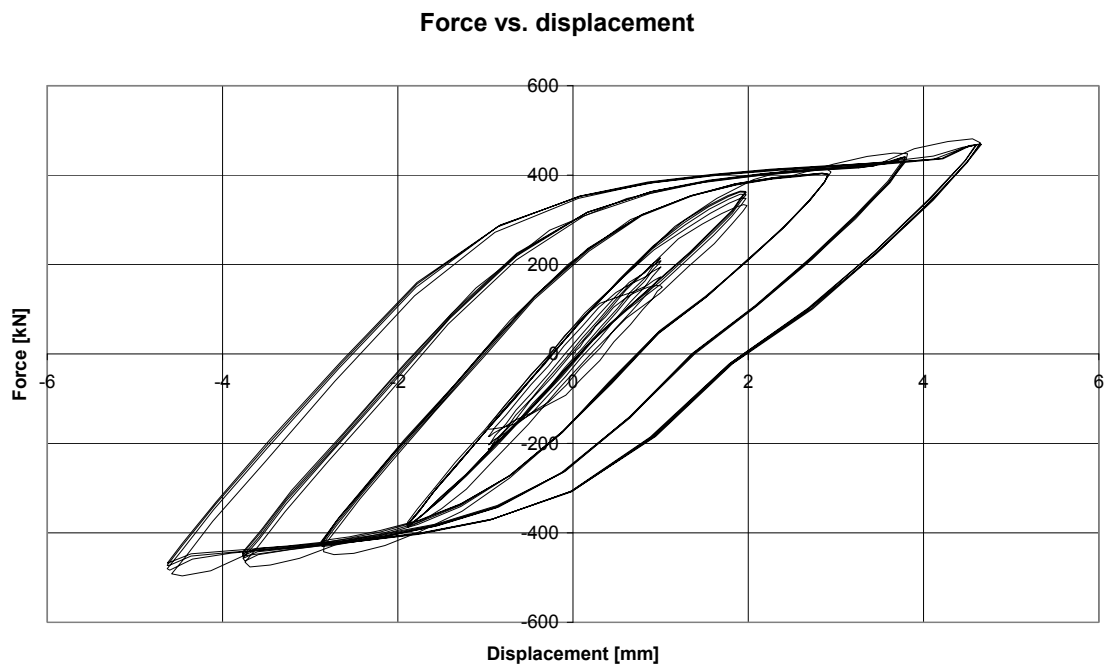
Сл. 32 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса



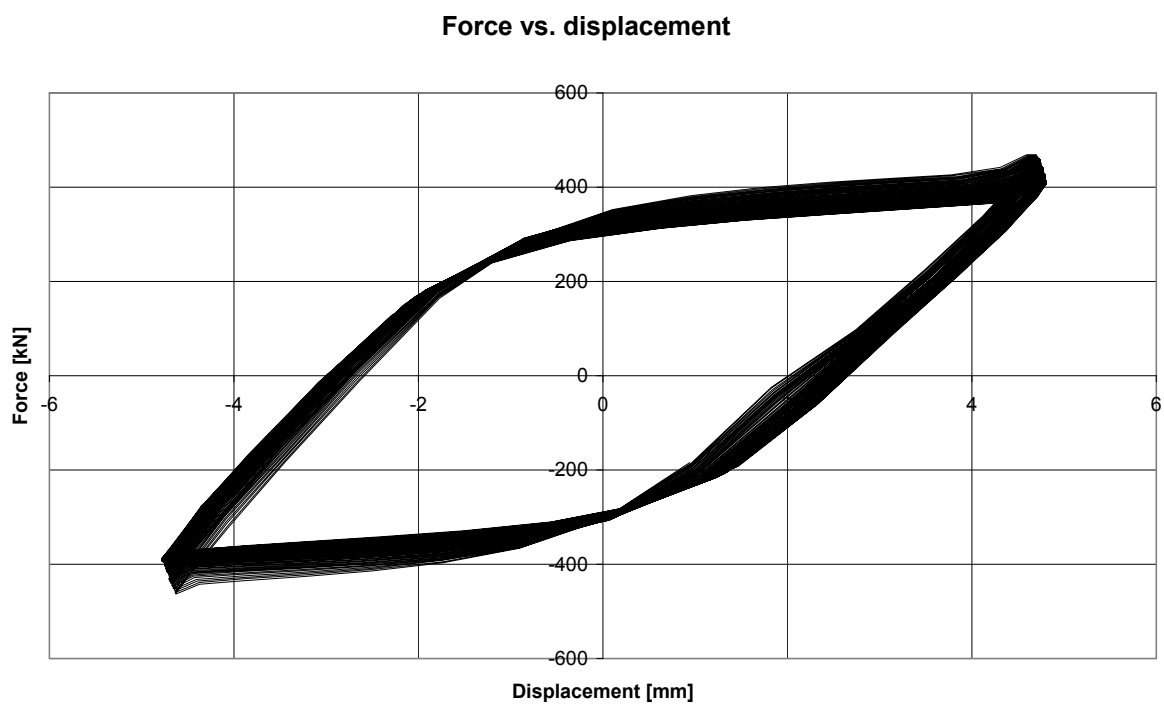
Сл. 33 Сила у функцији деформације (хистерезис), 1020 циклуса



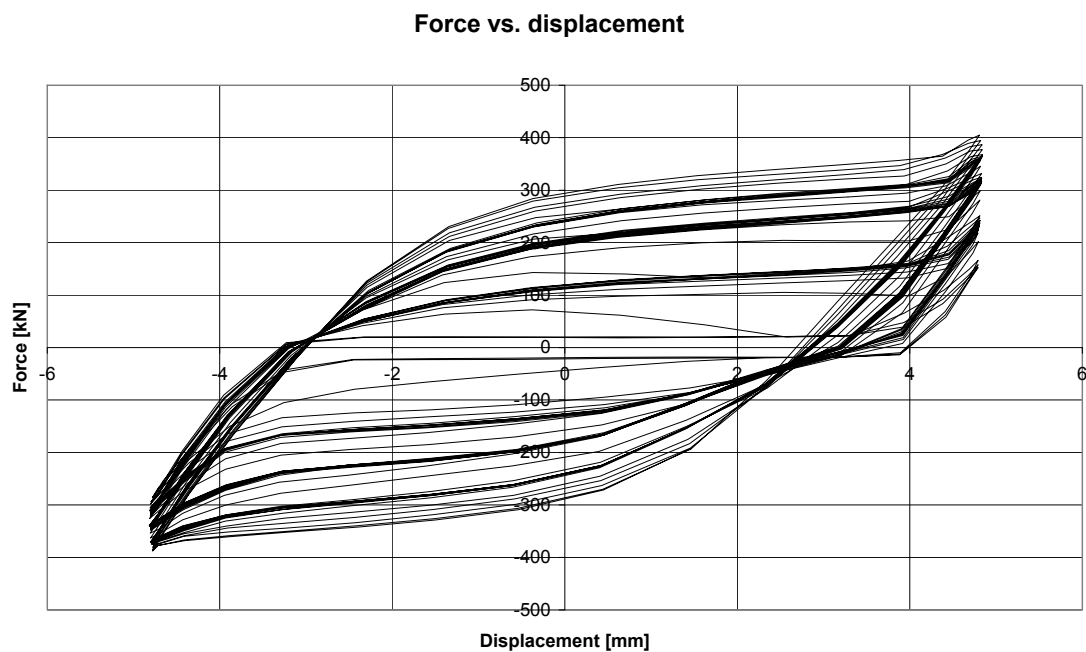
Сл. 34 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса



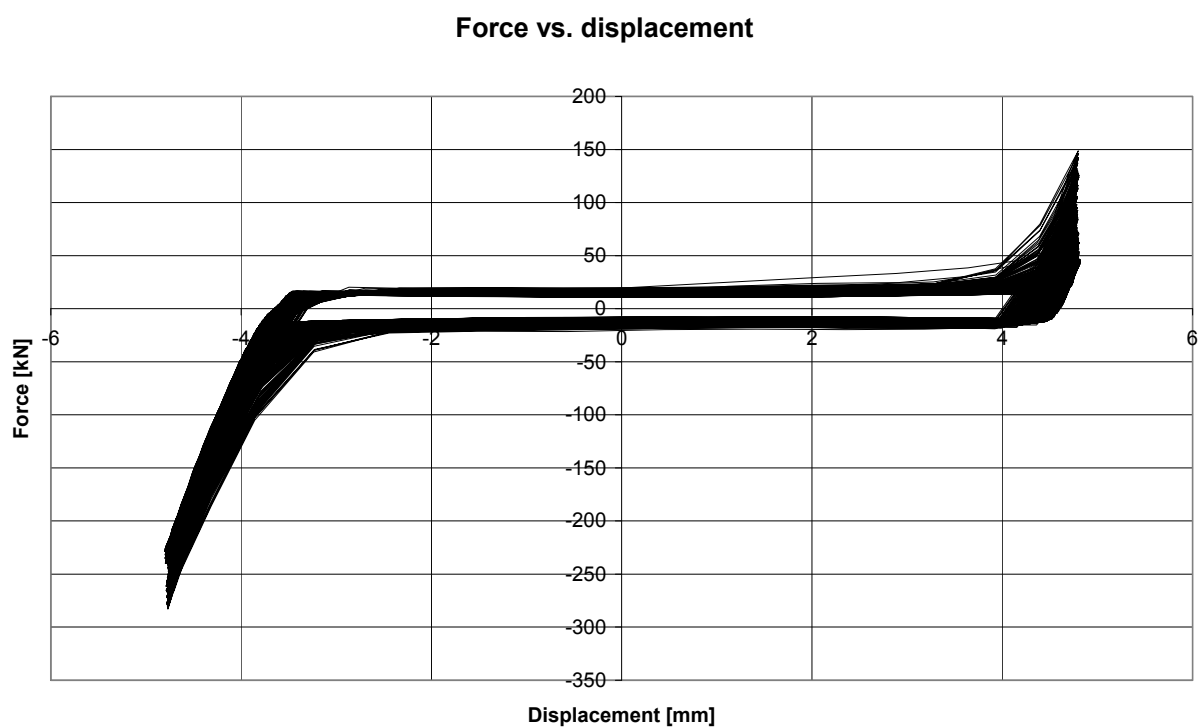
Сл. 35 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 25 циклуса,



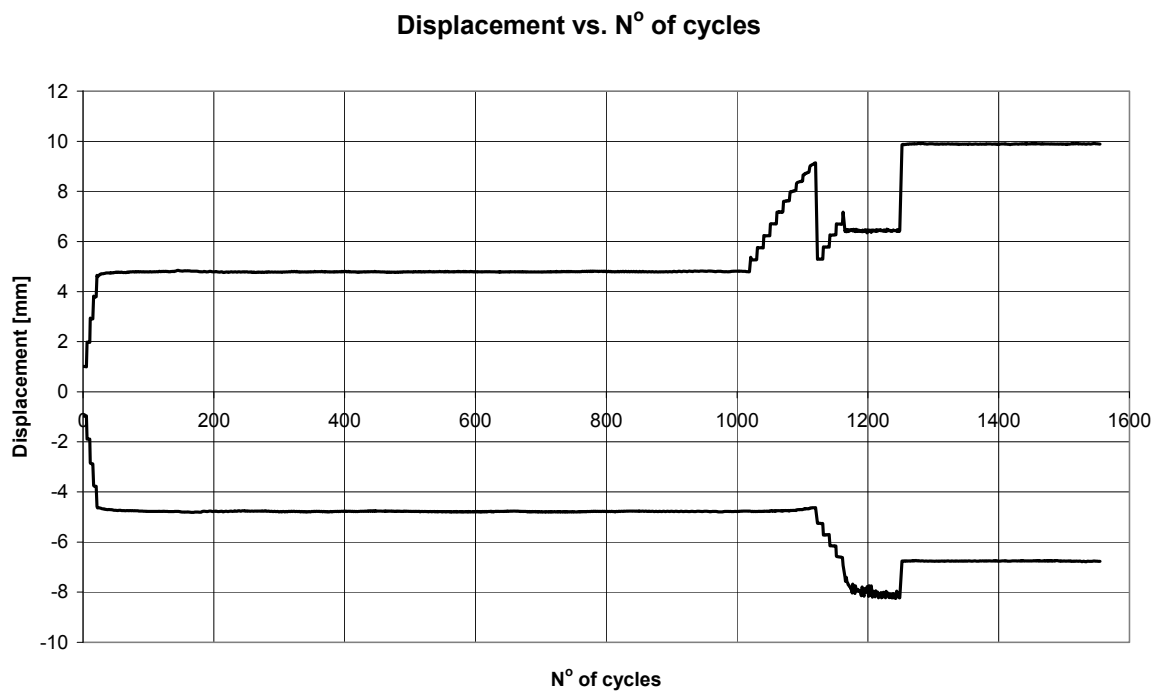
Сл. 36 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 25 до 140



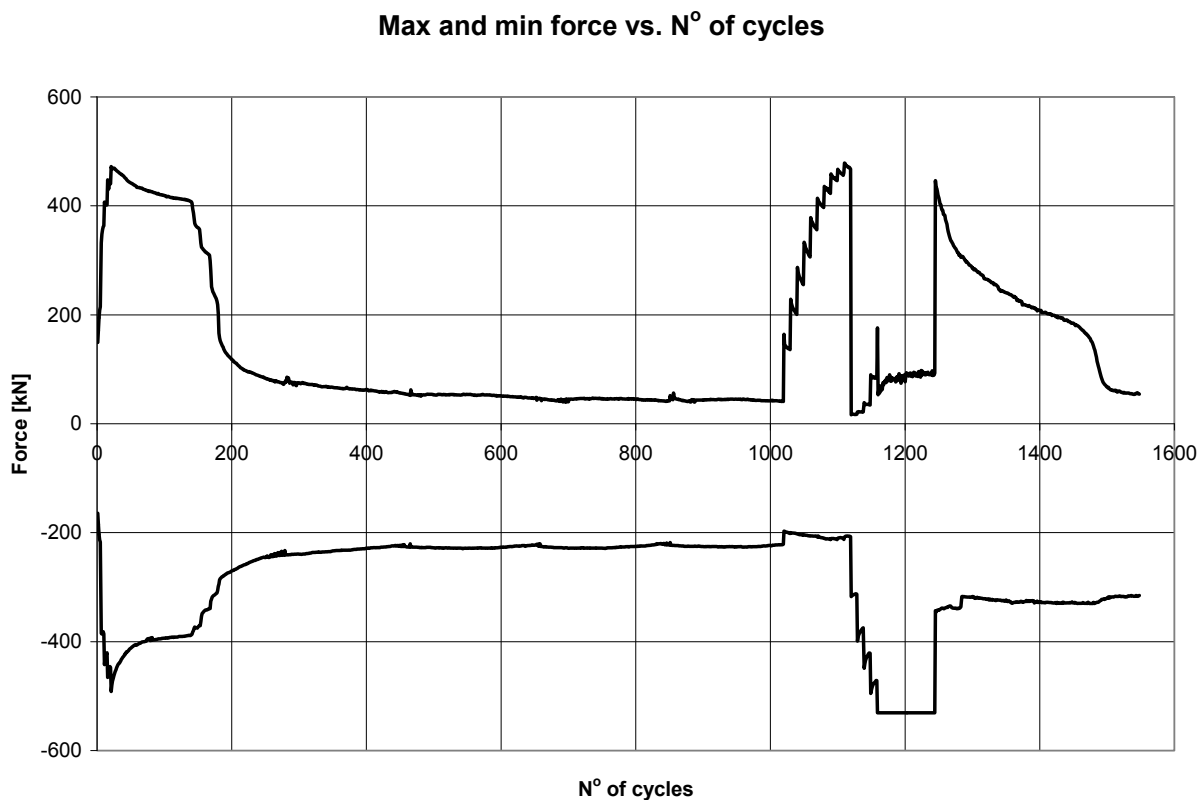
Сл. 37 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 183



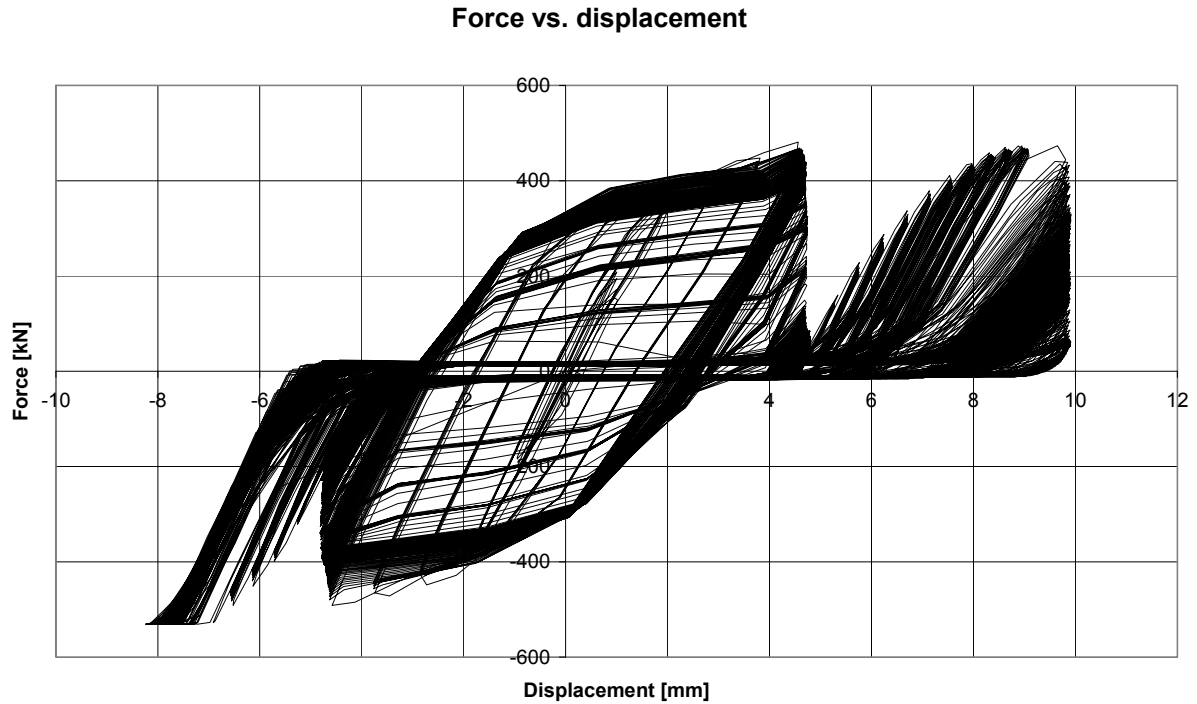
Сл. 38 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 183 до 1020



Сл. 39 Комплетна историја промене деформације



Сл. 40 Комплетна историја промене силе



Сл. 41 Хистерезис – комплетна историја

Појава уочена на дијаграму (сл.40) указује степености лом главне конструкције дампера која се састоји од четири елемента облика пасје кости. После лома уочава се врло мала носивост на затезање и скоро потпуно очување капацитета ношења на силе притска. Ово се објашњава постојањем посебних конструкцијских елемената унутар структуре дампера, који дају допунски степен сигурности прихватања сила и након 1020 циклуса цикличног напрезања.

3.7.2 Испитивање узорка бр.2

Програм теста је приказан на следећој табели 4. Програм тестирања овог узорка број 2 се разликује од програма тестирања узорка број 1 и број 3, по томе што је код овог узорка изражен већи број циклуса на полу амплитуди дилатације вредности од 0.02.

Табела 4 Акумулирана дилатација за узорак бр.2

Δl_i	$ \Delta \varepsilon_i $	$n_{\text{сyc}}$	$\Sigma \Delta \varepsilon_i $
mm			
± 2	0.02	106	4.2
± 4	0.04	140	11.2
Σ		246	15.44

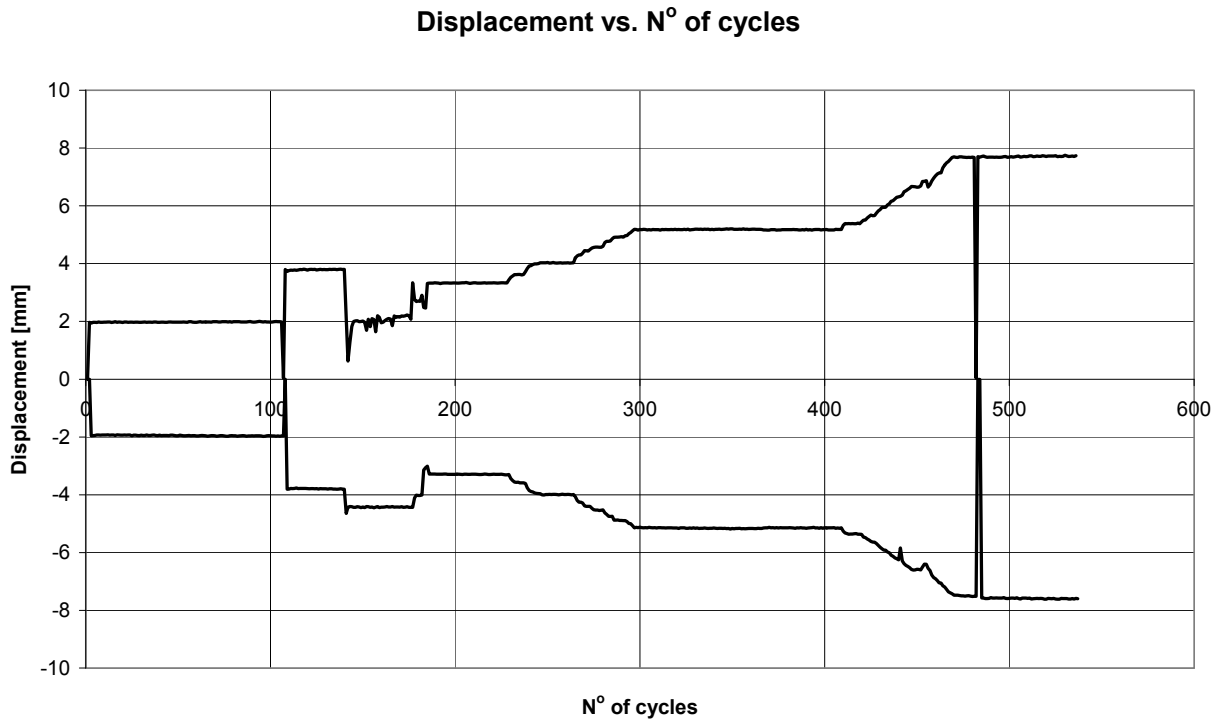
$$|\Delta \varepsilon_i| = \left| \frac{\Delta l_i}{l} \right| - \text{ акумулирана дилатација у једном полуциклусу}$$

где је

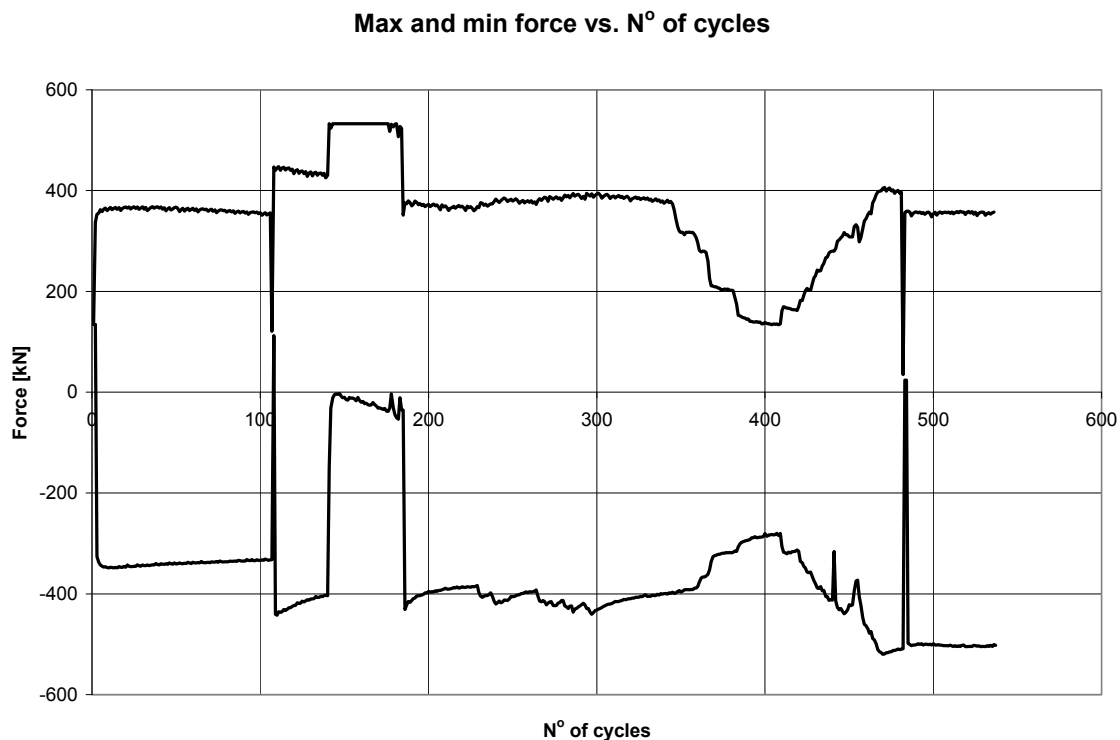
Δl_i –издужење (скраћење) у једном полуциклусу,

l – дужина опитног узорка где се развија дилатација је 100 mm и

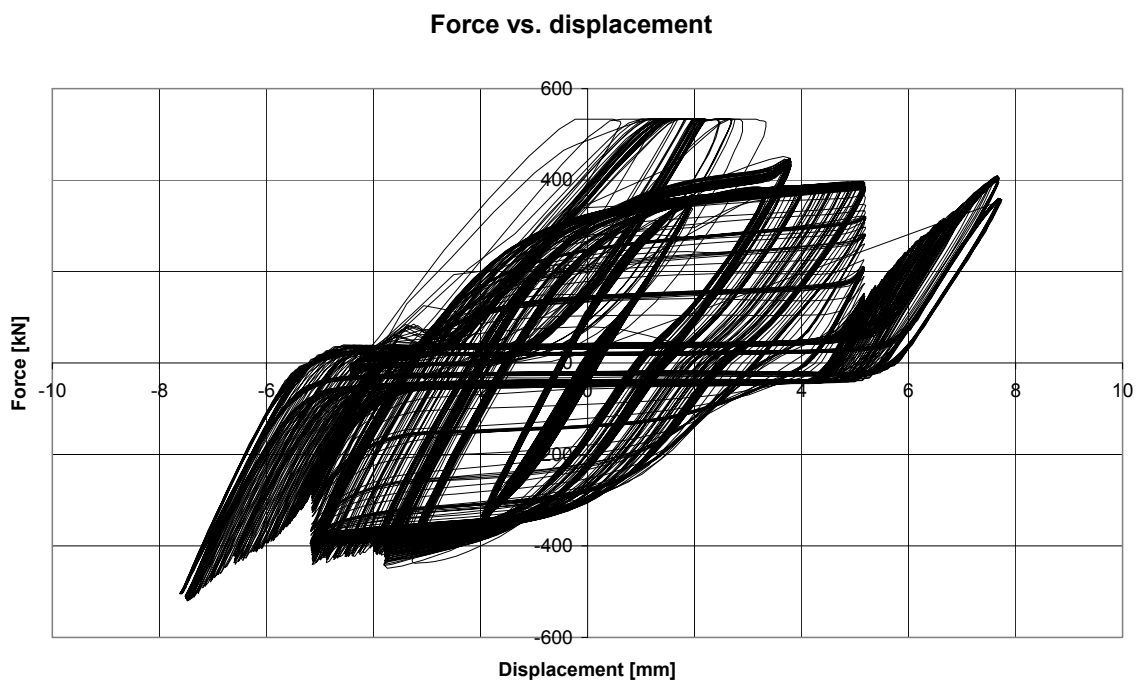
$n_{\text{сyc}}$ – број циклуса.



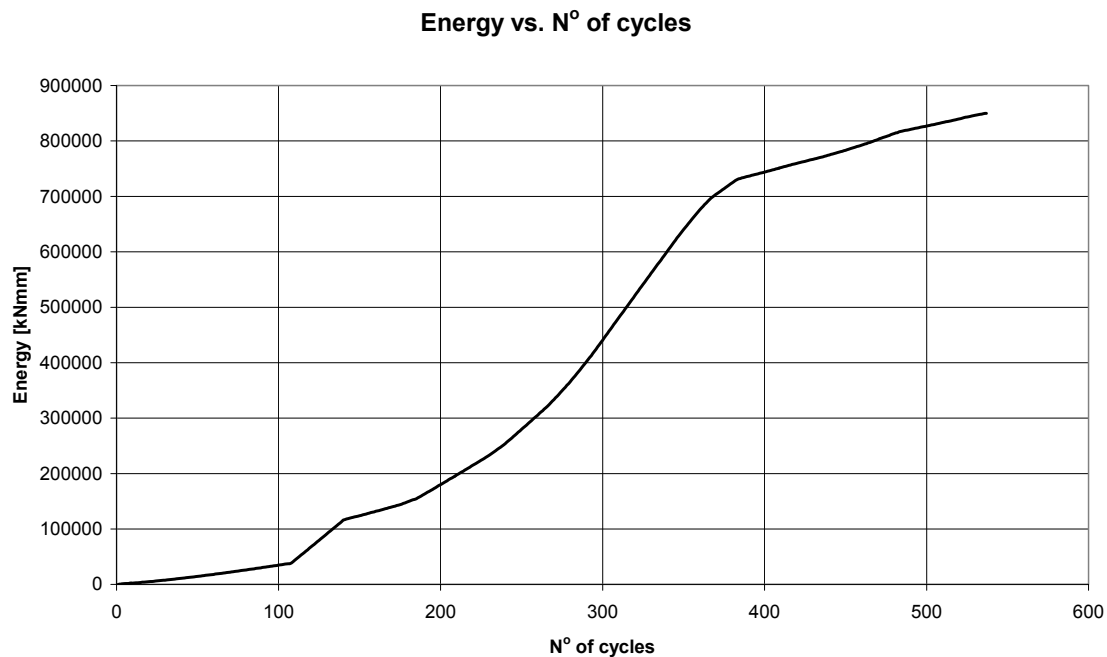
Сл. 42 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса



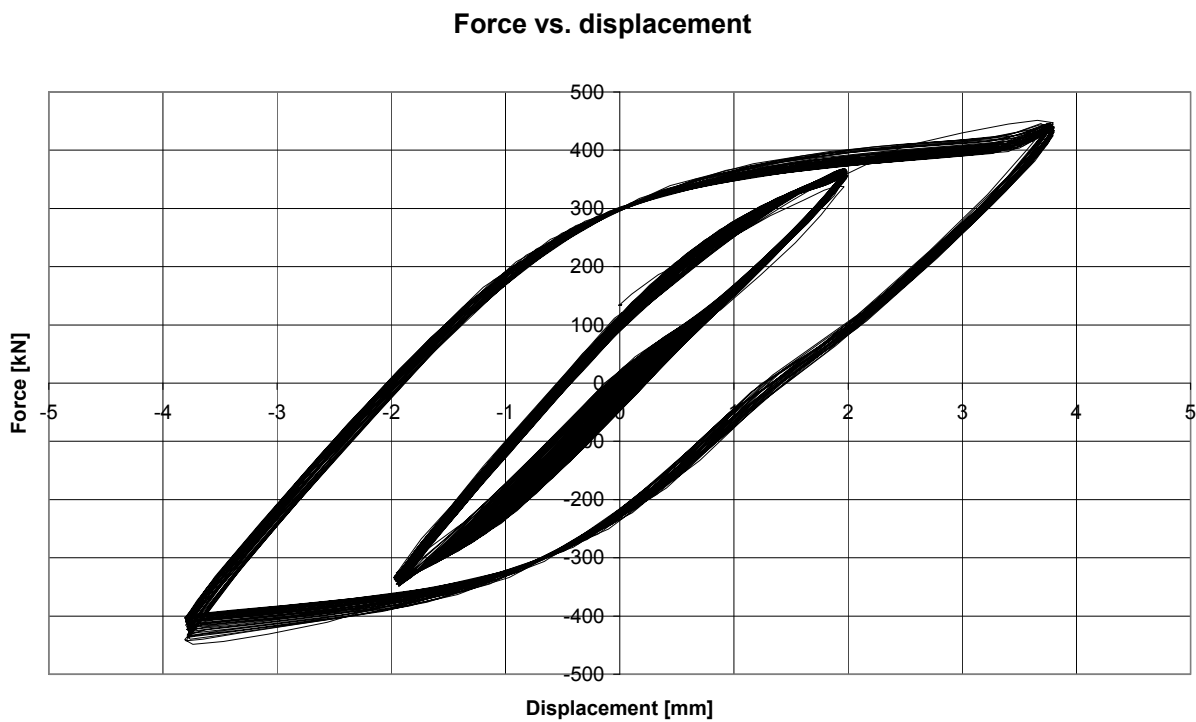
Сл. 43 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса



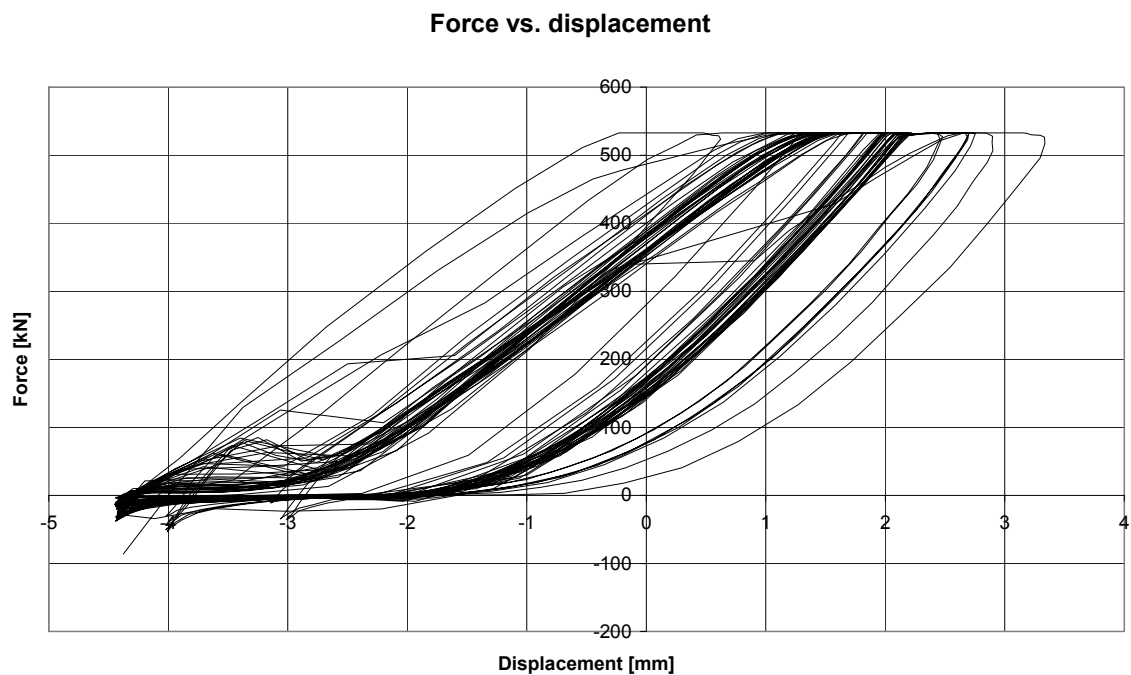
Сл. 44 Сила у функцији деформације (хистерезис), 537 циклуса



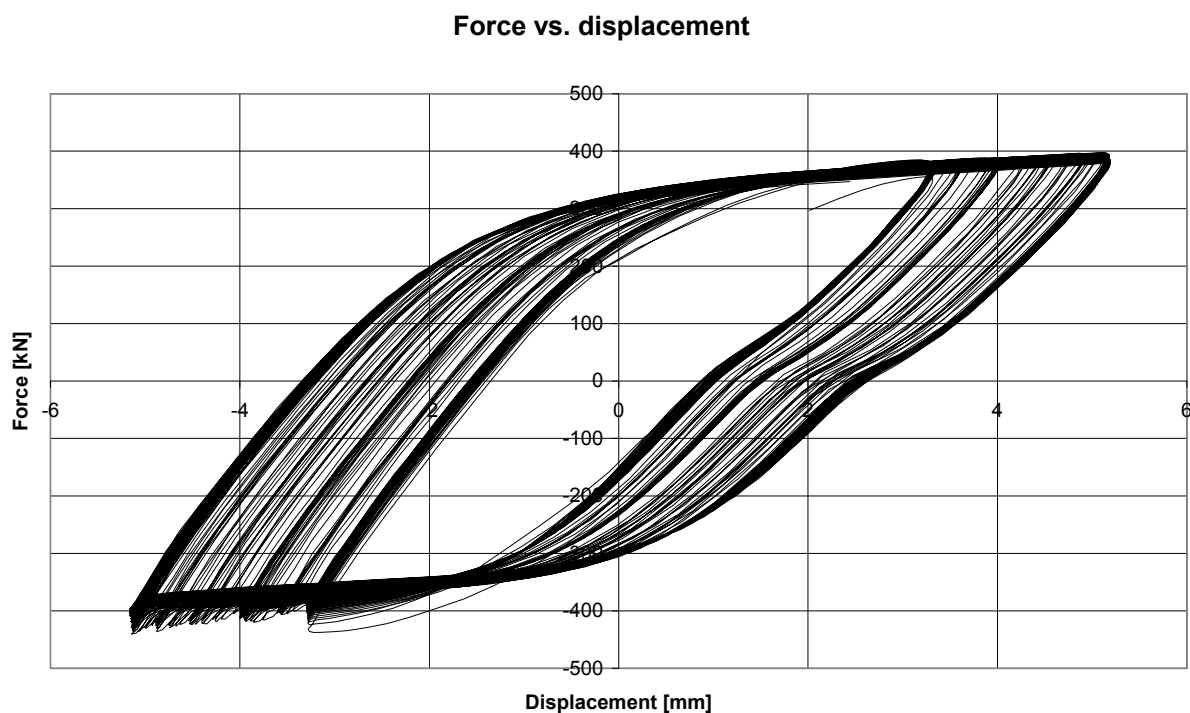
Сл. 45 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса



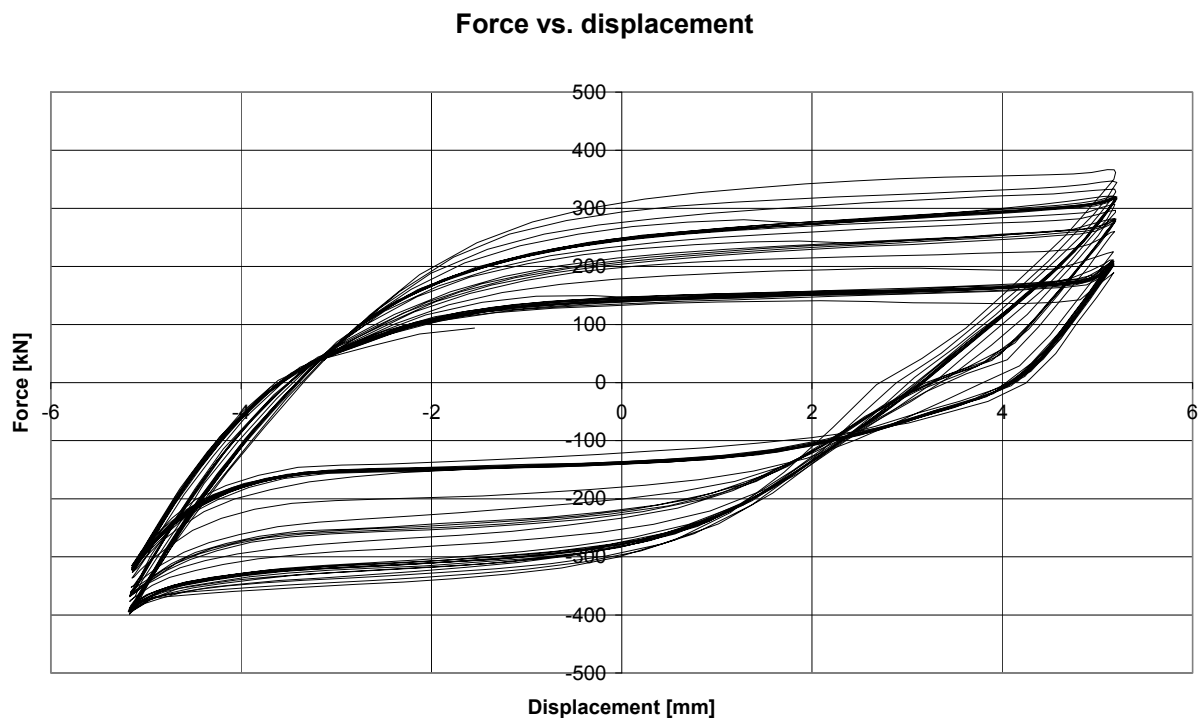
Сл. 46 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 140 циклуса



Сл. 47 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 184



Сл. 48 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 184 до 345



Сл. 49 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 345 до 382

3.7.3 Испитивање узорка бр.3

Следећа табела 5 приказује програм тестирања и акумулиране дилатације

Табела 5 Акумулирана дилатација за узорак бр.3

Δl_i	$ \Delta \varepsilon_i $	$n_{\text{сис}}$	$\Sigma \Delta \varepsilon_i $
mm			
±1	0.01	3	0.06
±2	0.02	3	0.12
±3	0.03	3	0.18
±4	0.04	3	0.24
±5	0.05	188	18.8
	Σ	200	19.4

$$|\Delta \varepsilon_i| = \left| \frac{\Delta l_i}{l} \right| - \text{ акумулирана дилатација у једном полуциклусу}$$

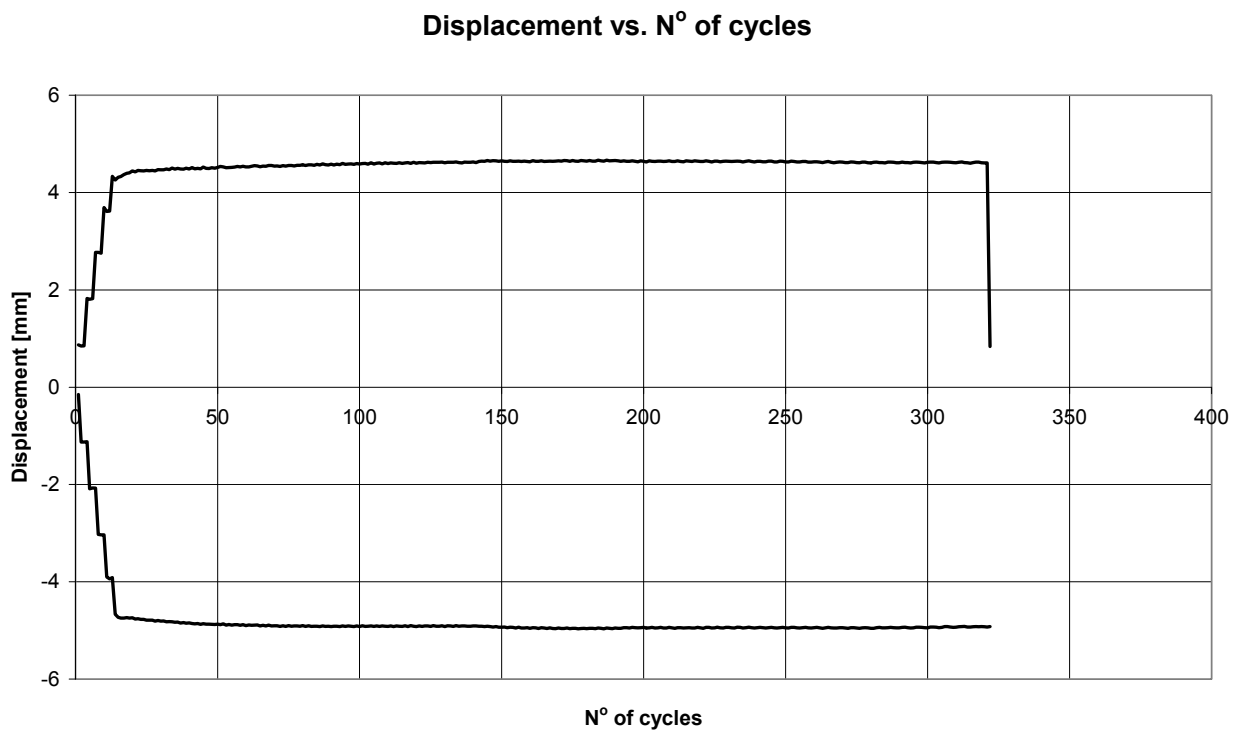
где је

Δl_i – издужење (скраћење) у једном циклусу,

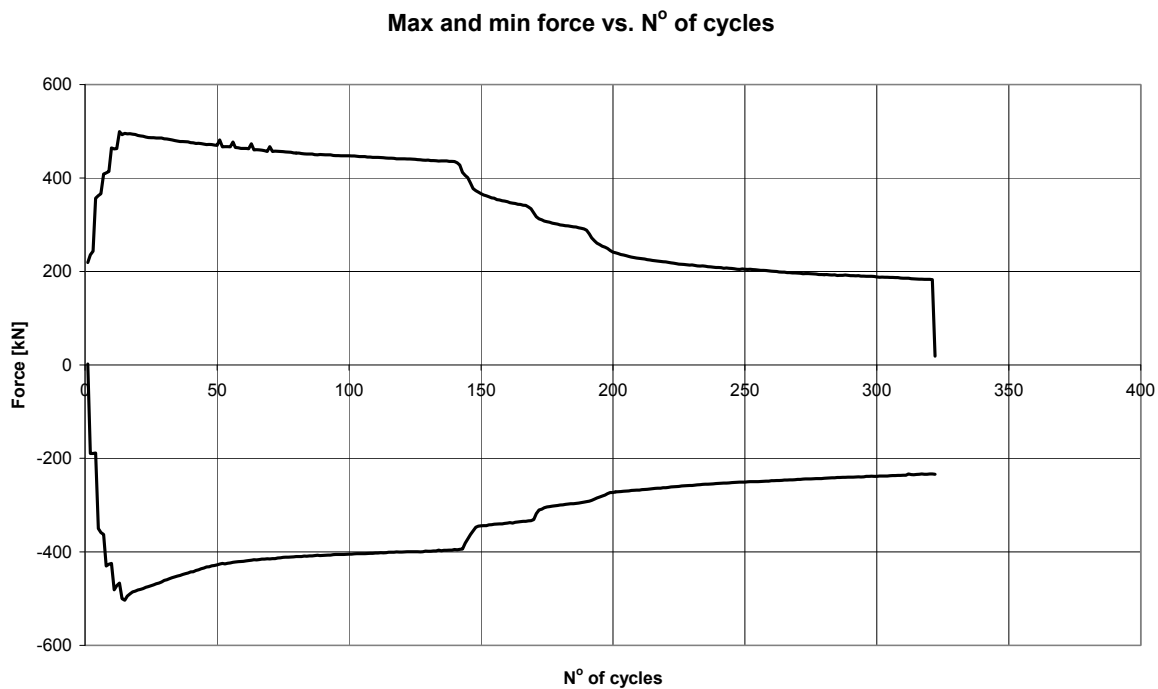
l – дужина опитног узорка где се развија дилатација је 100 mm и

$n_{\text{сус}}$ – број циклуса.

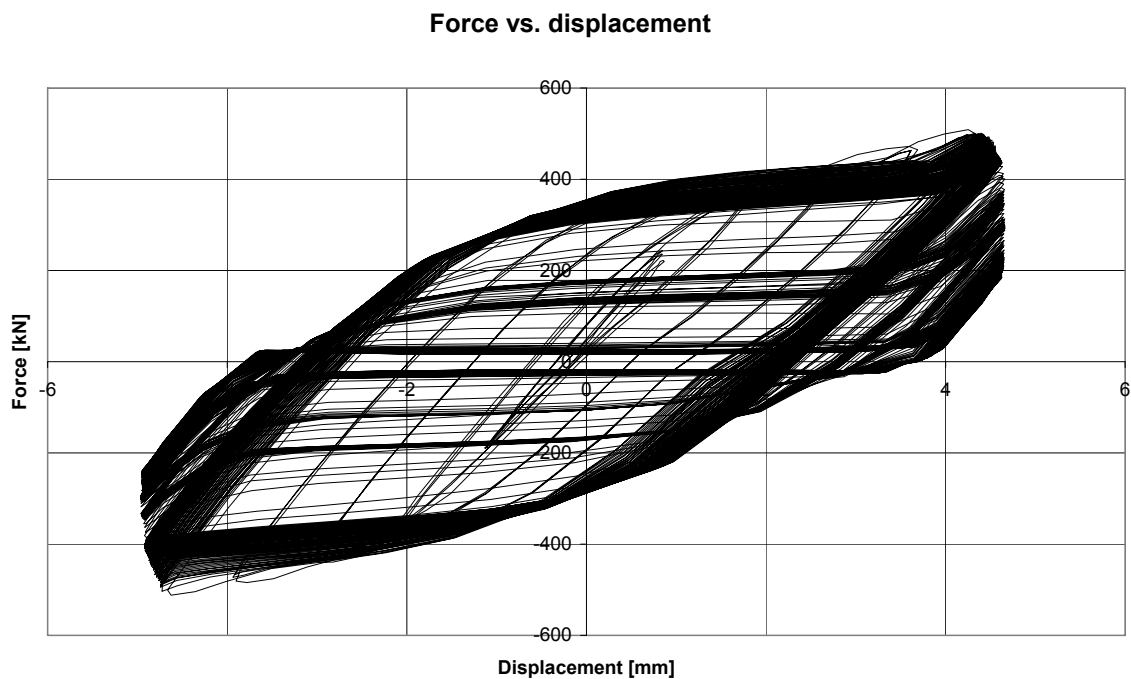
Укупна акумулирана дилатација је 19,4 у 200 циклуса оптерећења на дужини од 100 mm пасје кости дампера ДЦ 90 типа HQ Royal.



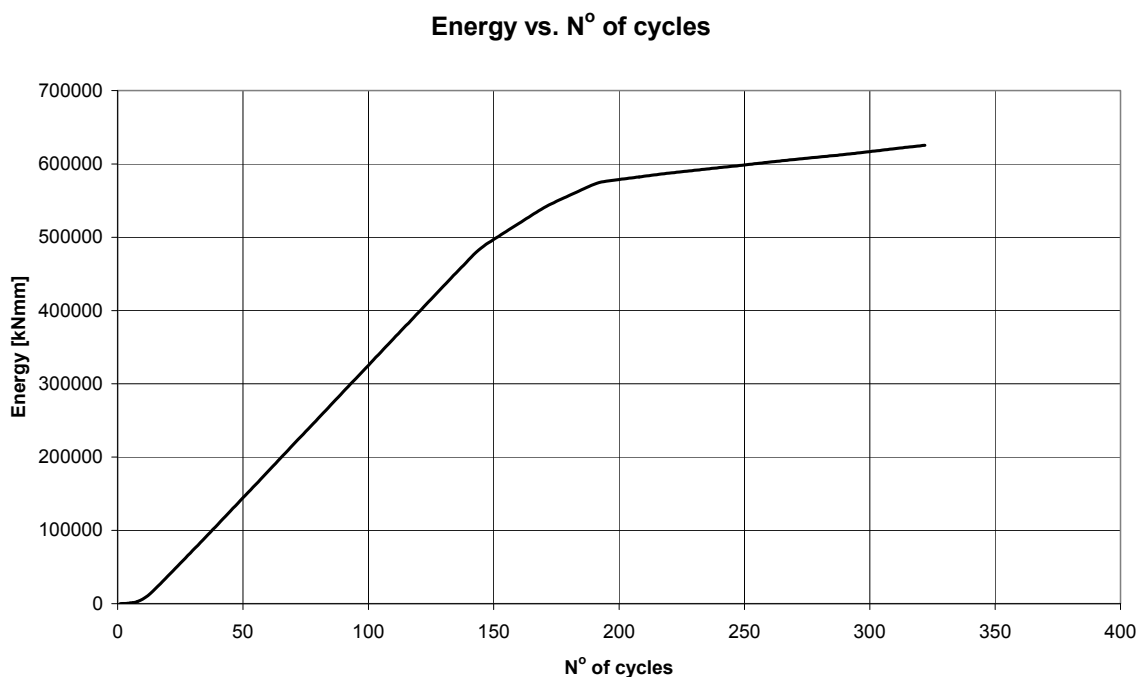
Сл. 50 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса



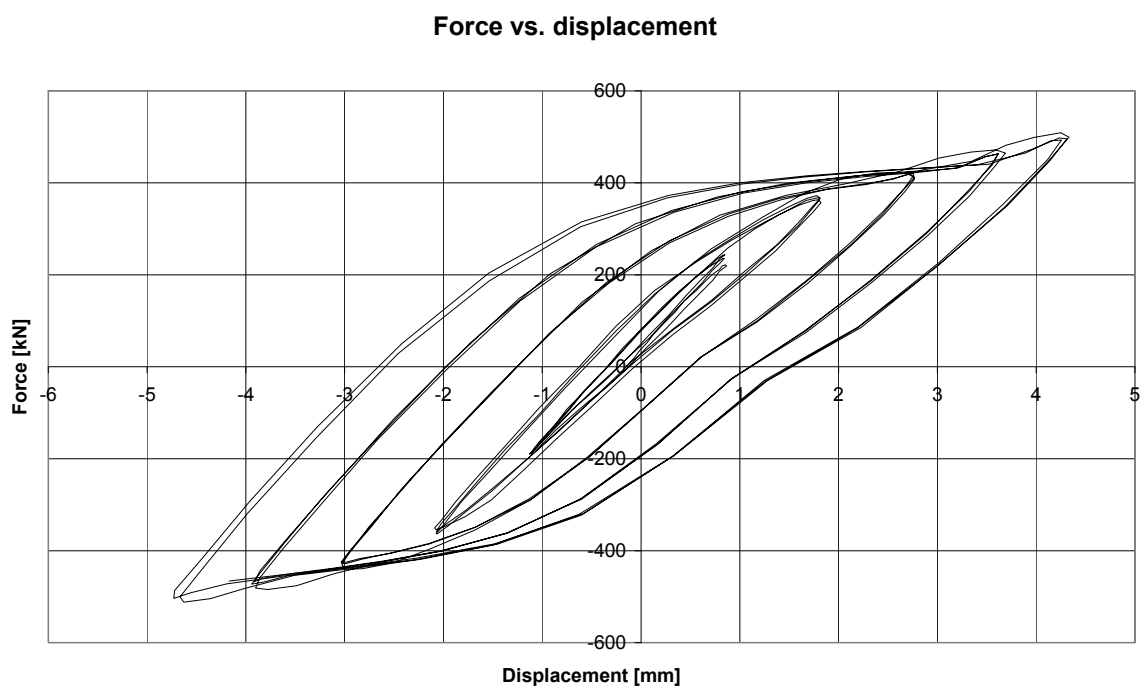
Сл. 51 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса



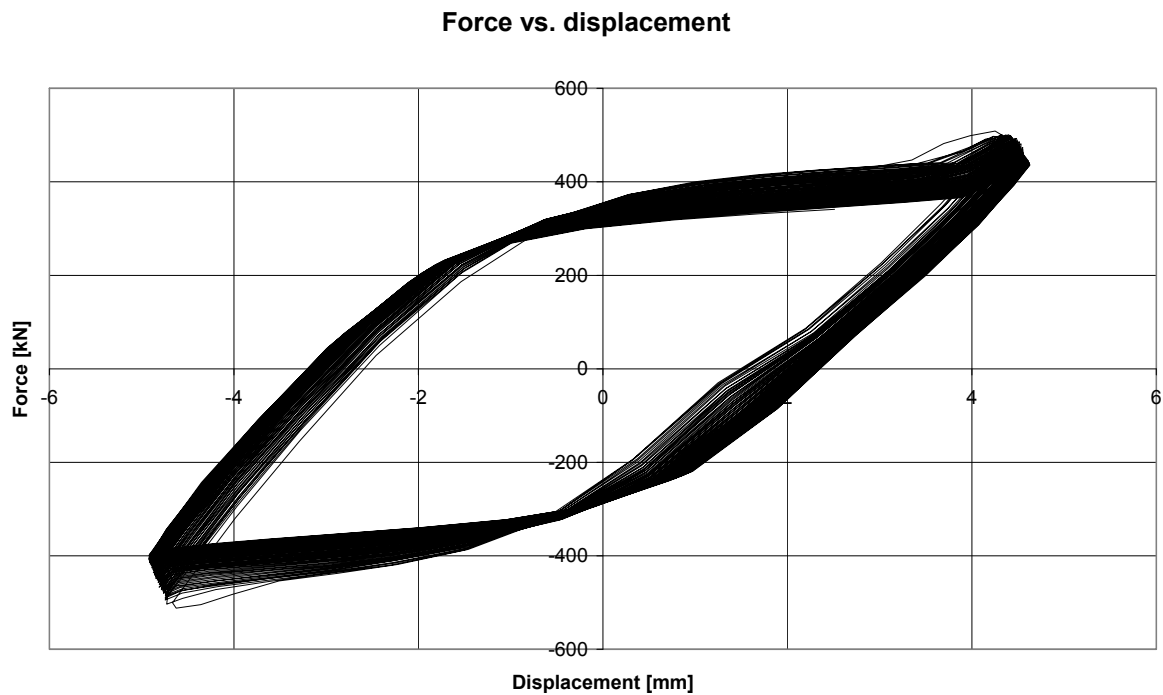
Сл. 52 Сила у функцији деформације (хистерезис), 322 циклуса



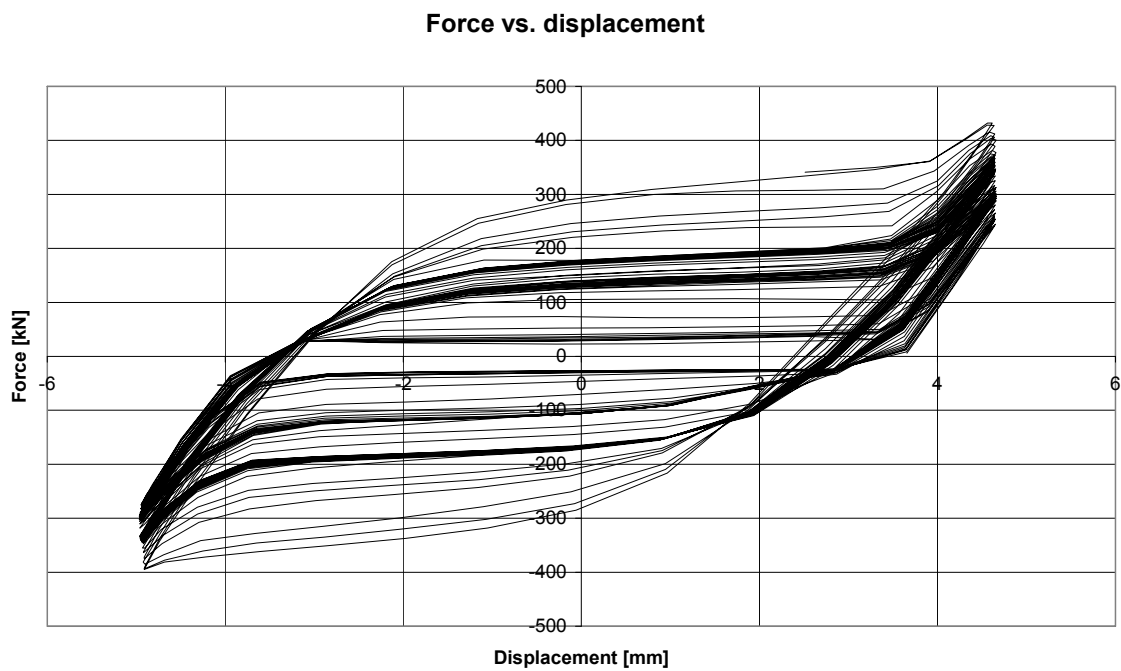
Сл. 53 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса



Сл. 54 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 15 циклуса



Сл. 55 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 15 до 140



Сл. 56 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 200

3.7.4 Нека поређења резултата испитивања узорка

Поређењем резултата испитивања узорка бр. 1 и бр. 3 види се практично поклапање резултата. Програми испитивања се незнатно разликују, слика 57, па је и историја оптерећења врло слична, слика 58, као и амортизована енергија, слика 59. Узорак бр. 2 је имао потпуно другачији програм испитивања, па се дијаграми не могу директно поредити, поготово што је у једном делу испитивања дошло до великог прекорачења оптерећења, које није могло да се региструје, праћеног великим пластичним деформацијама и деградацијом дампера. Без обзира на то, види се да је апсорбована енергија истог реда величине као и код преостала два дампера.

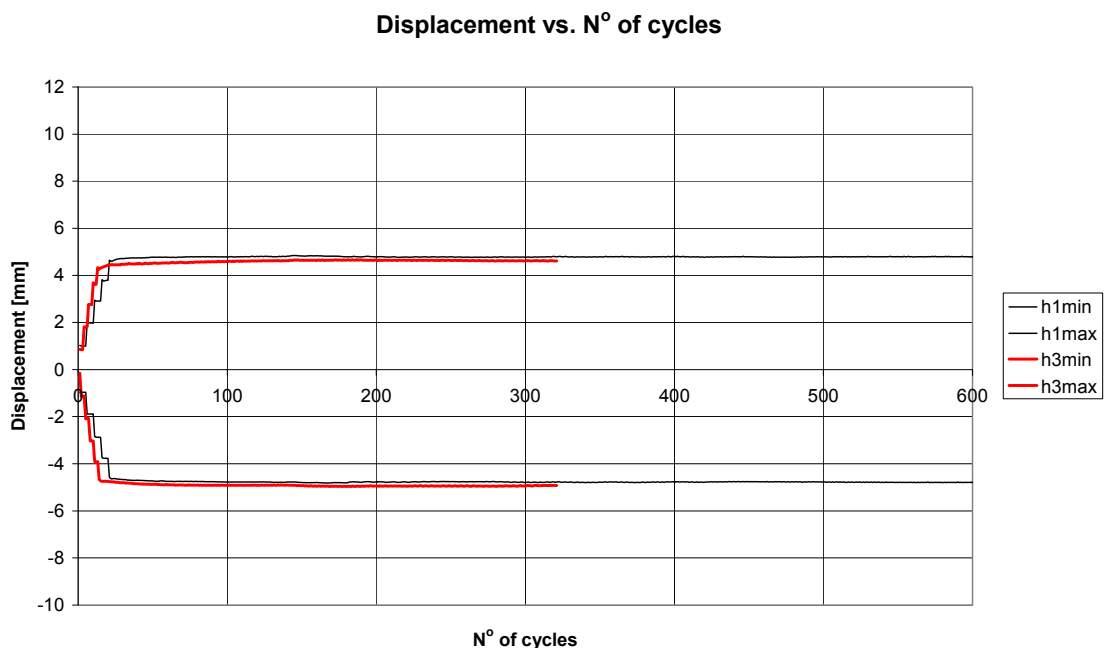
Сумарна акумулирана дилатација сва три узорка је:

узорак бр. 1: $\Sigma|\Delta\varepsilon_i| = 17,3$,

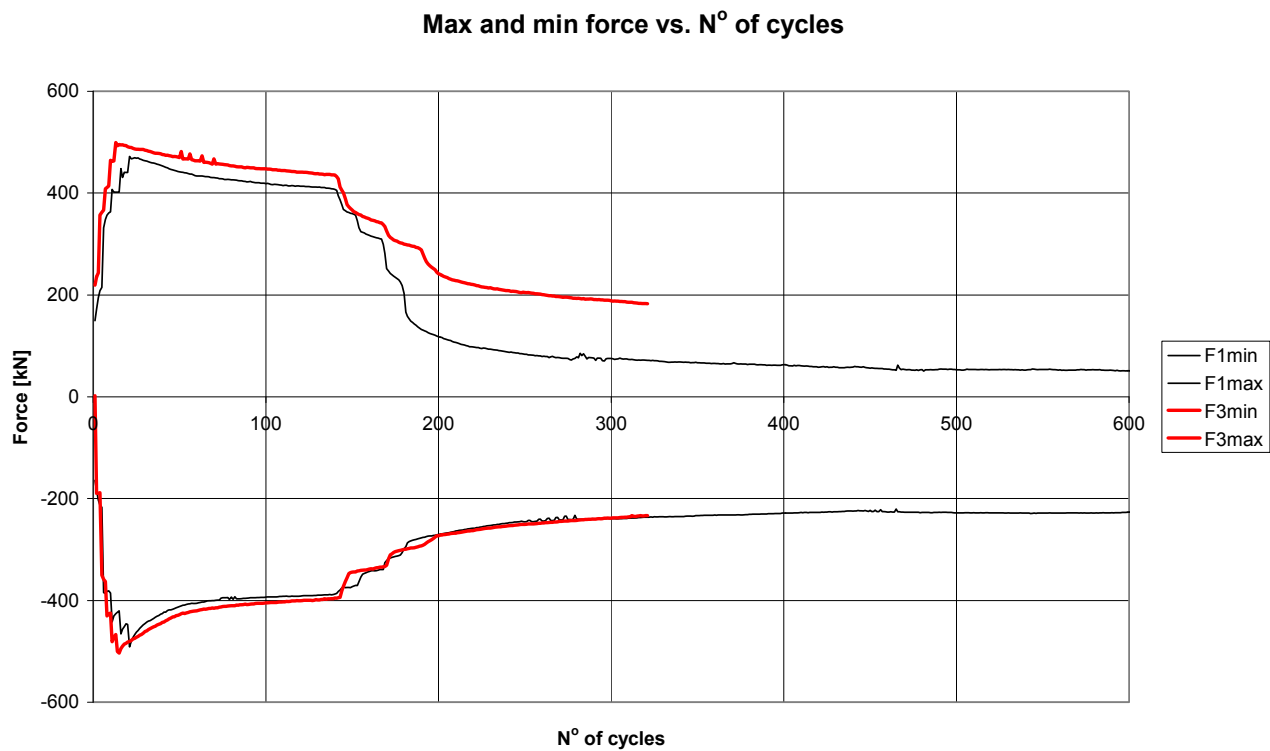
узорак бр. 2: $\Sigma|\Delta\varepsilon_i| = 15,4$ и

узорак бр. 3: $\Sigma|\Delta\varepsilon_i| = 19,4$

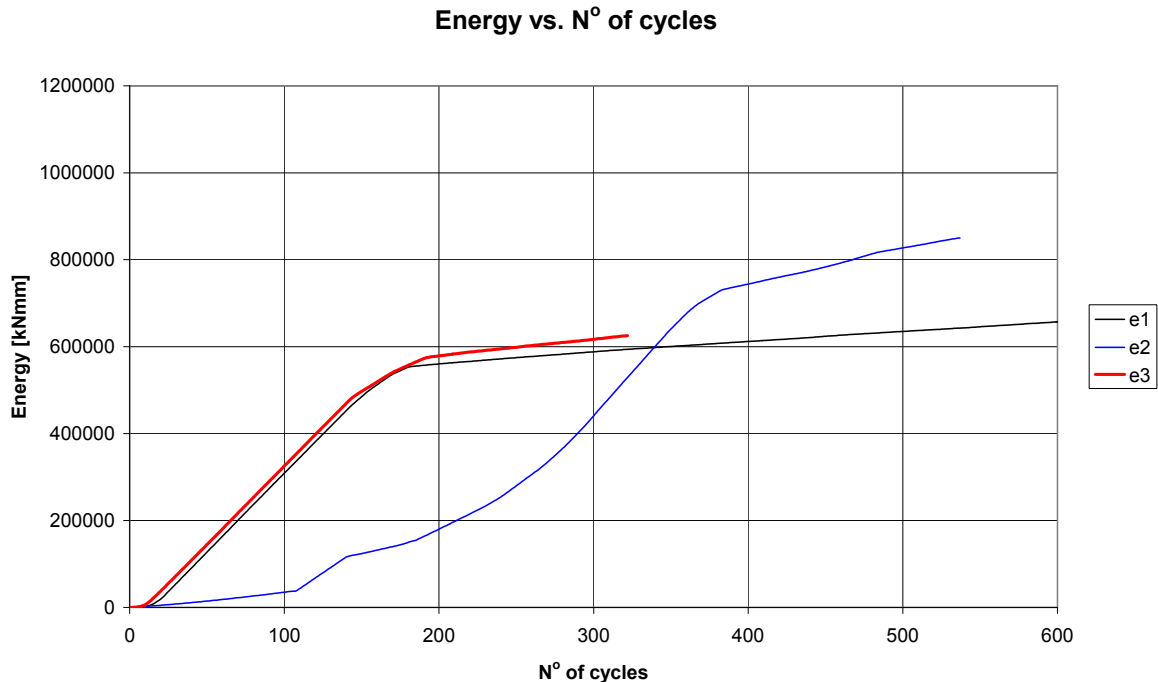
с тим што, због поменутих преоптерећења, ни дилатација, ни енергија, нису могле да се тачно срачунају у том домену.



Сл. 57 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса



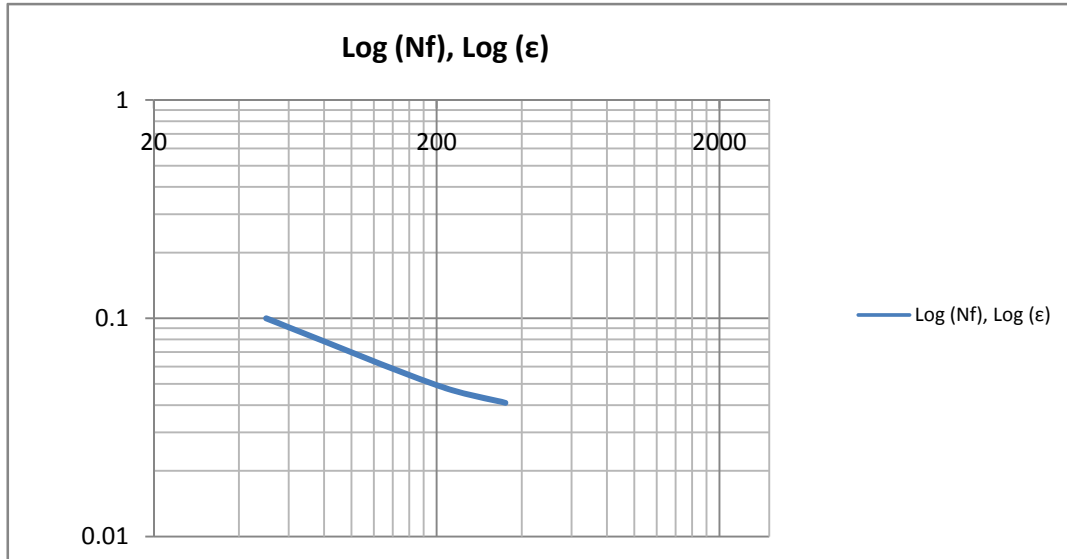
Сл. 58 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса



Сл. 59 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса

3.7.5 Формирање експерименталног и аналитичког дијаграма број циклуса-просечна акумулирана дилатација (N_f - $\Delta \epsilon_{pl}$)

На доњој слици је приказан дијаграм број циклуса (N_f) -просечна акумулирана дилатација ($\Delta \epsilon_{pl}$).



Сл.60 Дијаграм просечна акумулирана дилатација-број циклуса за дампер типа *Kanada HQ Royal*.

Дијаграм је урађен на основу теста узорака (183, 5%; 106, 2%; 140, 4%) и параметара $C_1=0.69$ и $\gamma=0.49$. Добро поклапање дијаграма експерименталног испитивања и нумеричке анализе је обављено са подацима о тесту три узорка у Институту ВТИ у Београду а за усвојене рачунске коефицијенте $C_1=0,69$ и $\gamma=0,49$.

Овај нови уређај показује значајан капацитет у пољу великих дилатација 5% са скоро 200 циклуса и укупном акумулираном дилатацијом од 19.4.

3.8 Тестирање Дампера *Kanada HQL* у лабораторији иновационог центра Система ДЦ 90

За потребе развоја уређаја за придржавање зида машинске хале хидроелектране у Канади развијен је нови тип дампера конектора и извршена су обимна експериментална истраживање и испитивања конструкције уређаја на понашање у пољу малог броја циклуса до лома. Програм тестирања се заснивао на постепеном повећавању полуамлитуде максималног померања

уређаја (1,2,3 и 4 mm). Испитивања су извршена у Иновационој лабораторији за моделска динамичка испитивања Система ДЦ 90 у Београду, сл.61 и сл.62.

Део лабораторије Систем ДЦ 90 је приказан на сликама испод



Сл. 61 Вибро платформа и актуатор са управљачким и електрохидрауличким системом.

Сл. 62 Актуатор и дампер типа Kanada HQL у току тестирања

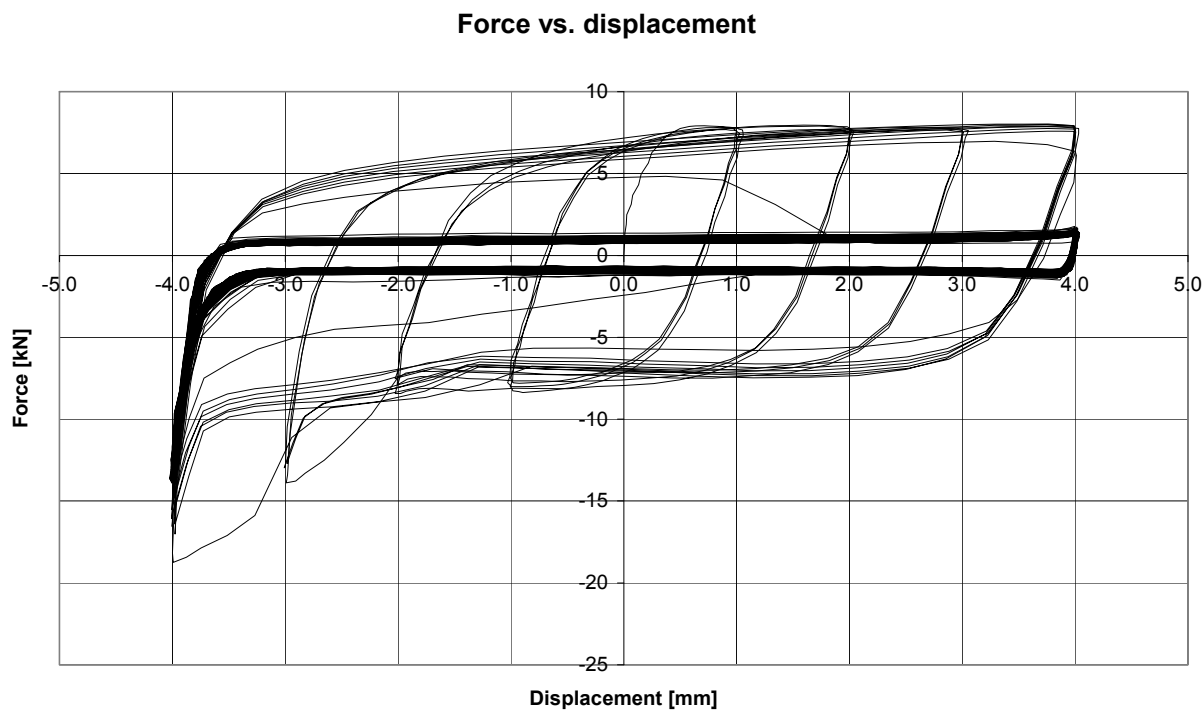
Наводе се неке могућности тестирања. Аксијално динамичко тестирање у раму актуатора са максималним силама до ± 20 kN и фреквенцом до 15 Hz, са максималним амплитудама померања ± 30 mm. Могућност произвољног динамичког напрезања $P(t)$, односно $X(t)$.

Табела 6 Карактеристике актуатора

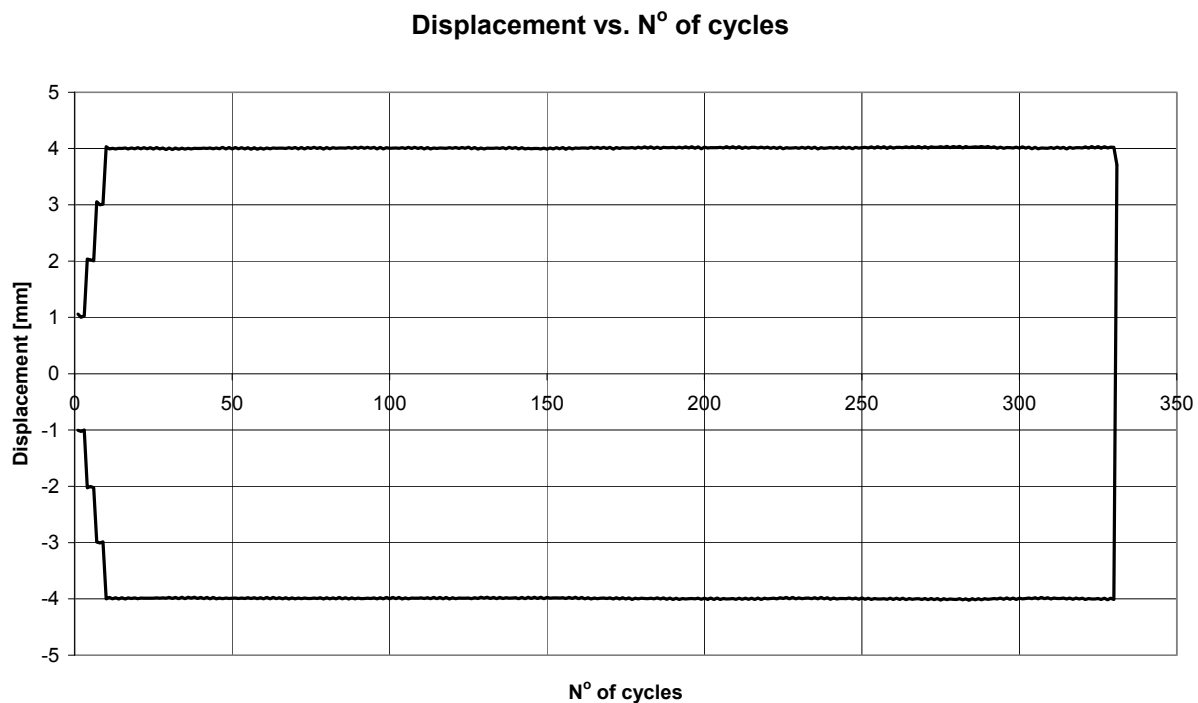
АКТУАТОР: $F=\pm 20\text{KN}$, $X=\pm 30\text{ mm}$, дијаграм (f,x), $f_{\text{max}}=15\text{Hz}$,	
Карактеристике	maksimalni pritisak: 280 bara
	cilindar: 50/28/60 ($\pm 30\text{mm}$)
	davač hoda (4 – 20 mA) – integrisan u cilindru
	pritisak u obe komore (0 – 400 bara)
	sila (4 – 20mA; za 12mA je sila = 0)

У наставку се приказује дијаграм тестирања дампера Kanada HQL.

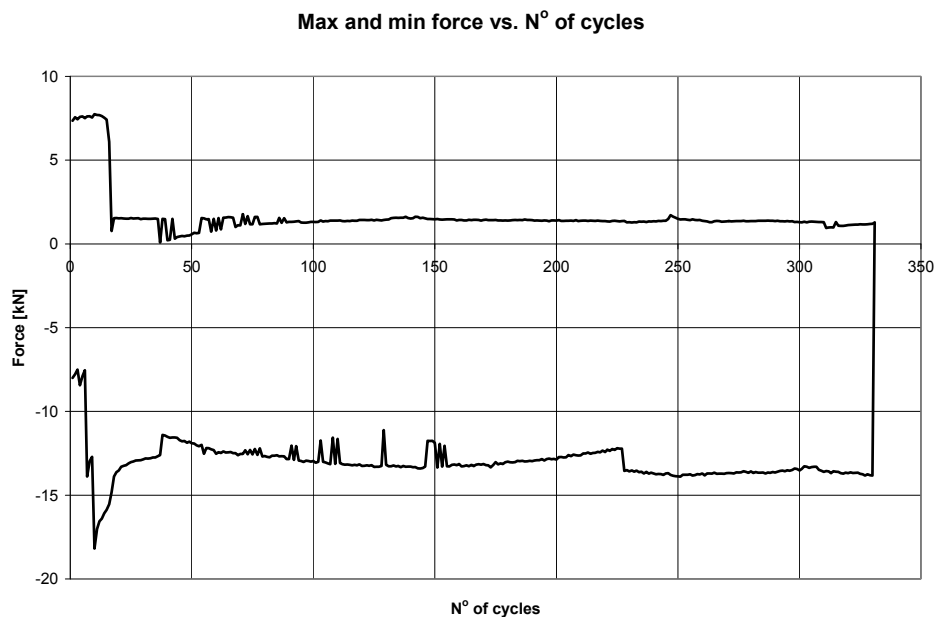
Дијаграми и резултати тестирања



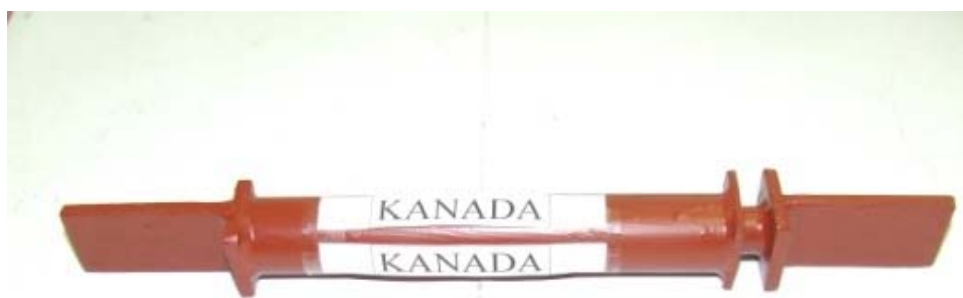
Сл. 63 Хистерезисни дијаграм дампера Kanada HQL.



Сл. 64 Дијаграм померање-број циклуса



Сл. 65 Дијаграм максимална сила-број циклуса



Сл. 66 Узорак Kanada HQL за тестирање

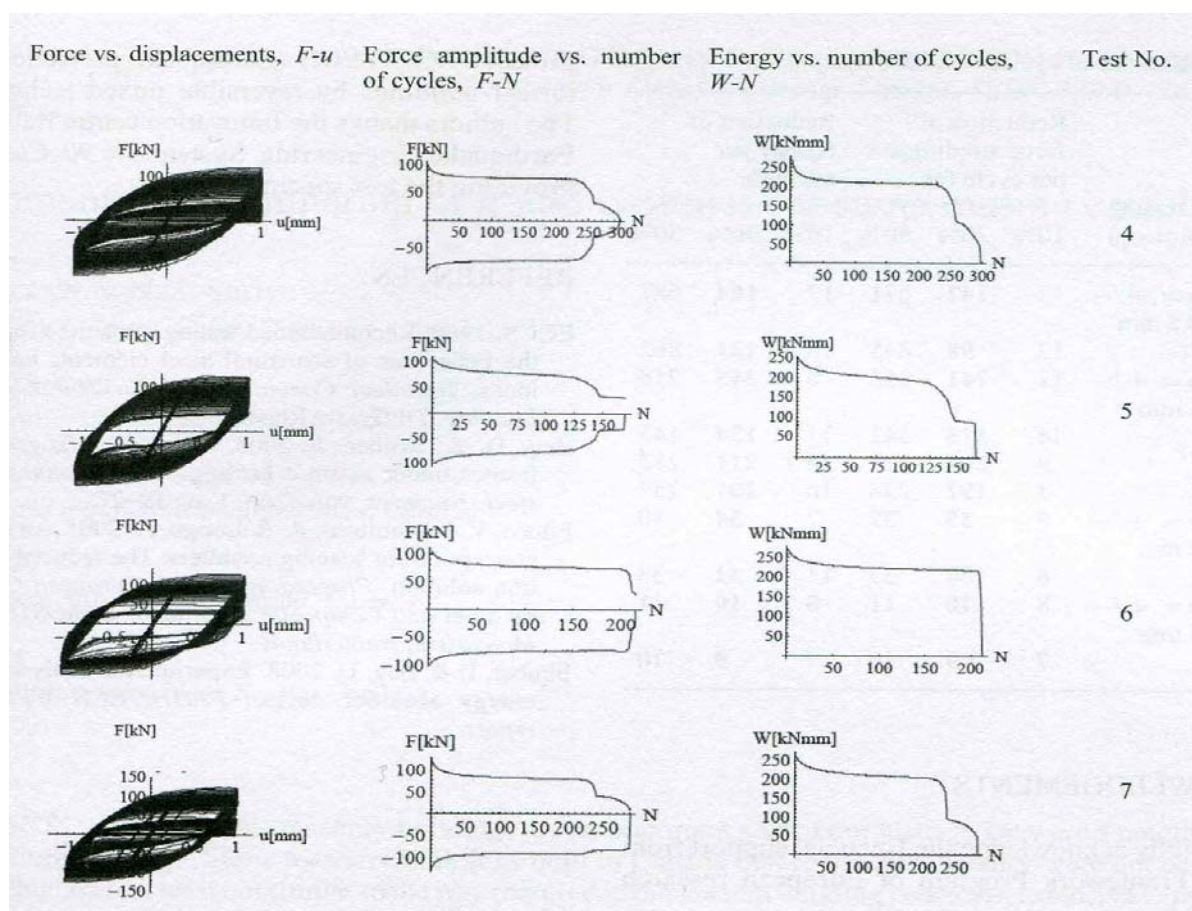


Сл. 67 Фотографије из процеса производње дампера типа Kanada HQL

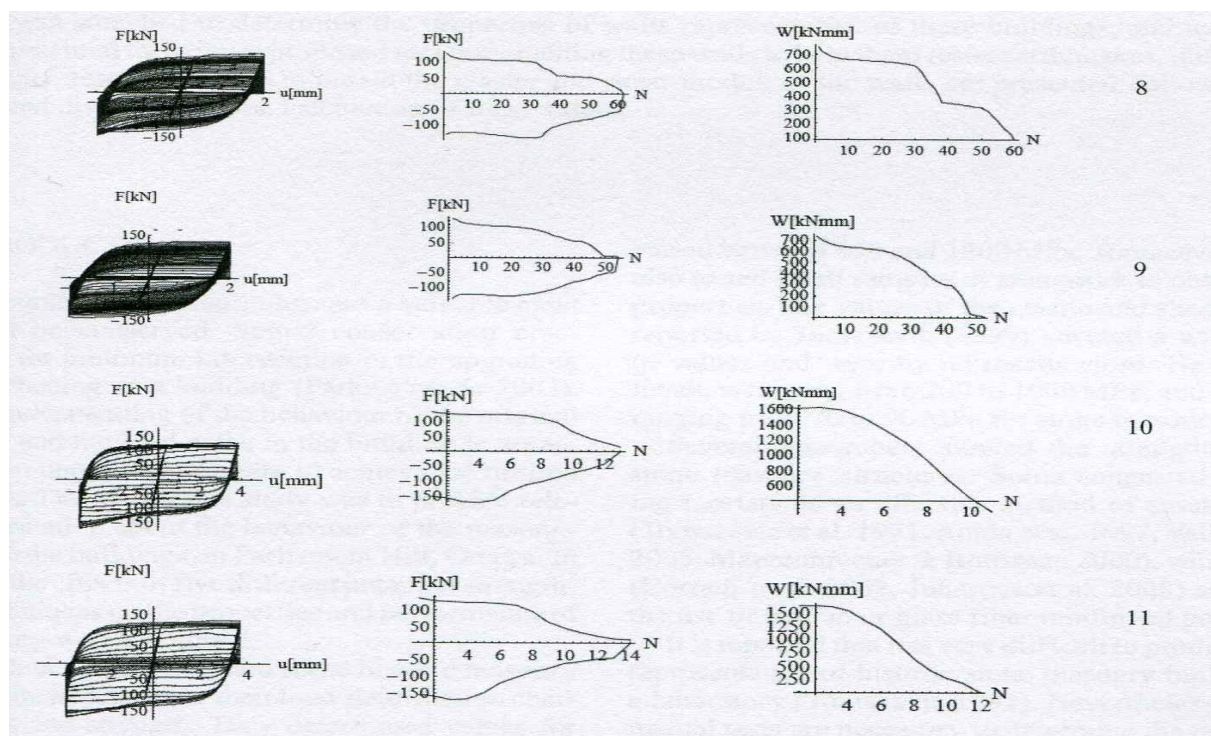
После 330 циклуса са максималном амплитудом дилатација од 4% дошло је до лома уређаја. После двадесетог циклуса дошло је до устаљеног нивоа силе притиска и затезања све до лома што је омогућила конструкција уређаја. Уређај

служи за придржавања зидова хидроелектране на земљотресна дејства управно на раван зидане конструкције.

3.9 Тестирање дванаест узорака дампера типа Мионица на Грађевинском факултету у Љубљани

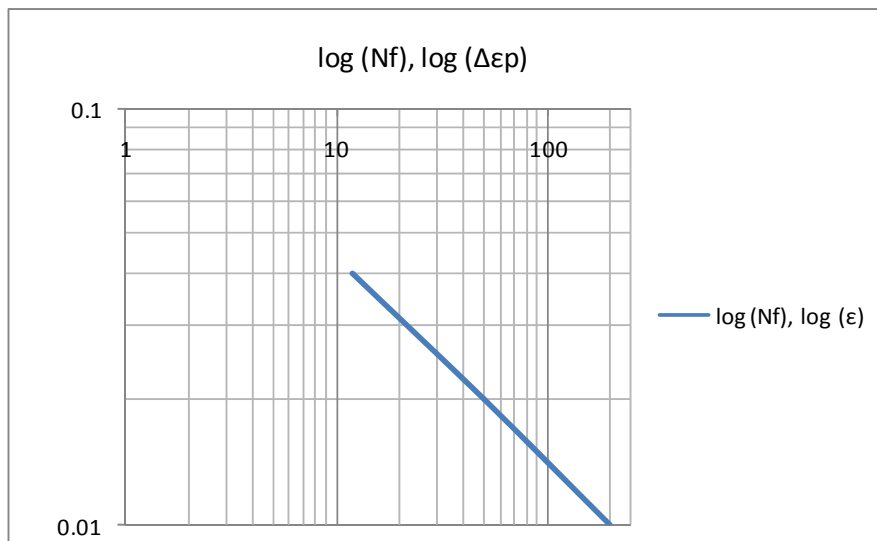


Сл. 68 Хистерезисни дијаграм, дијаграм сила-број циклуса и дијаграм енергија-број циклуса



Сл. 69 Хистерезисни дијаграм, дијаграм сила-број циклуса и дијаграм енергија-број циклуса

Тестирања модела у Љубљани, као и резултати су приказани на претходној слици. Тестирања су обављена у оквиру Евро-Медитеранског пројекта PROCHITEN у лабораторији за конструкције Грађевинско-геодетског факултета у Љубљани.



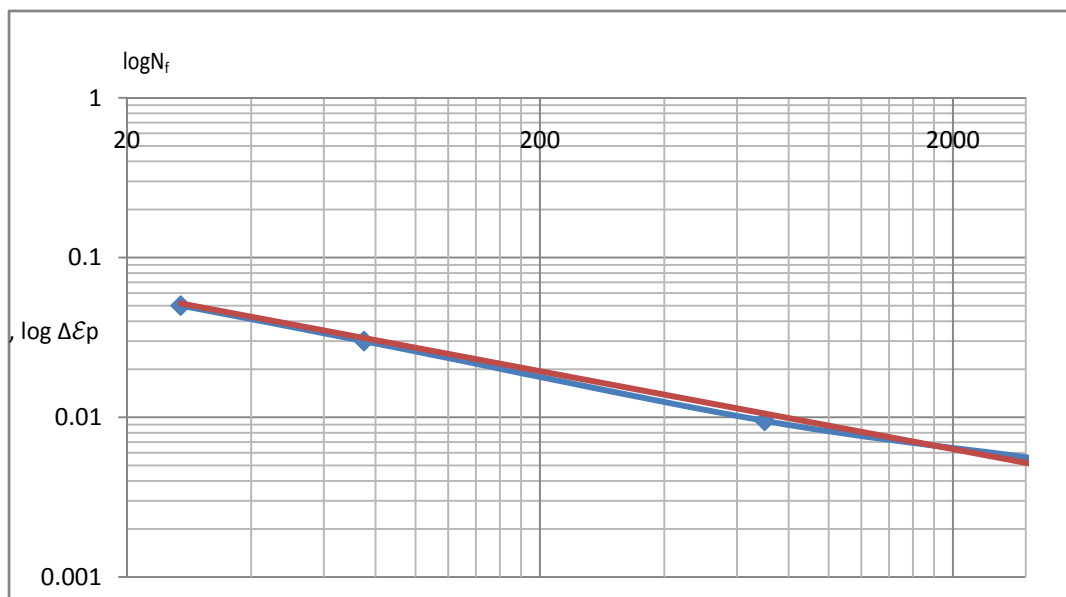
Сл. 70 Дијаграм број циклуса- просечна акумулирана дилатација за дампер типа Мионица

Поклапање експерименталног и нумеричког дијаграма је у оквиру грешке од 0.3% до 1.1%, а са рачунским коефицијентима $C_1 = 1,345$ и $\alpha = 0,49$. Тај ниво одступања дијаграма није могуће евидентирати у приказаној размери дијаграма. Сумарна акумулирана дилатација је израчуната на основу максималне полуамплитуде и броја циклуса оптерећења.

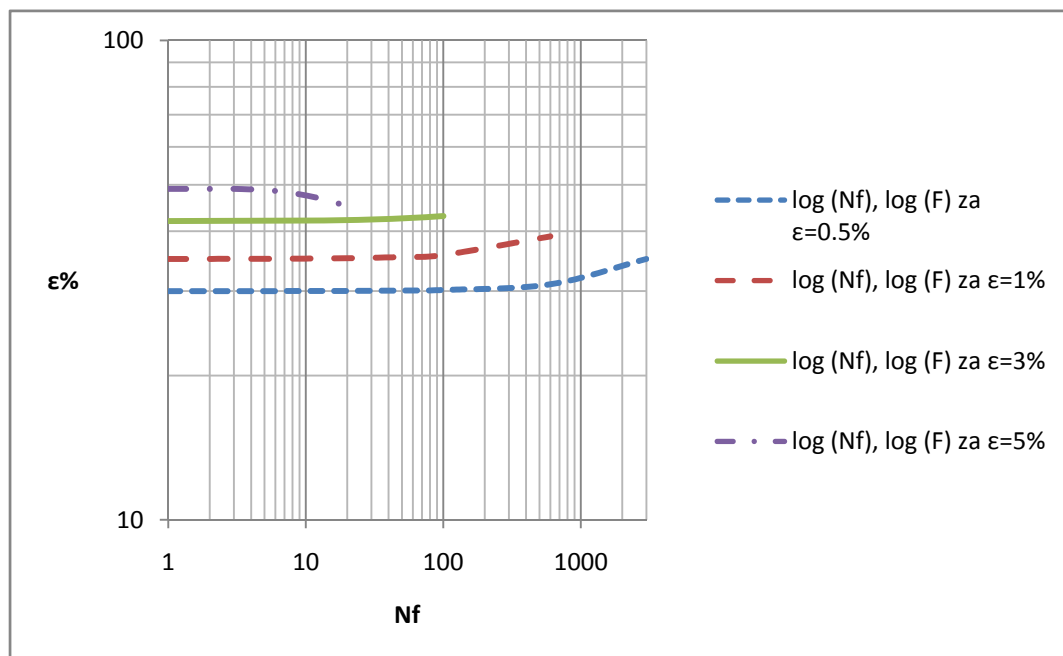
Дилатација	број циклуса	акумулирана сумарна дилатација
1%	200	4
2%	55	2.2
4%	11	0.88

3.10 Тестирање обичног узорка од челика S235 на замор

Ова тестирања представљају тестирање узорка-епрувета од конструкцијског челика квалитета S235. У земљотресном пројектовању челичних конструкција, нееластичне деформације елемената су дозвољене када конструкција претрпи јака сеизмичка дејства.



Сл. 71 Тест обичног узорка С235 на замор, $(\log N_f, \log \Delta \varepsilon_p)$ и упоредни рачунски дијаграм, $(\log N_f, \log \Delta \varepsilon_p)$ који показује врло добро поклапање



Сл. 72 Дијаграм максимална амплитуда силе-број циклуса за различите нивое дилатација

Сумарна акумулирана дилатација је израчуната на основу максималне полуамплитуде и броја циклуса оптерећења.

Дилатација	број циклуса	акумулирана сумарна дилатација
0.5%	3000	30
1%	680	13.6
3%	105	6.3
5%	27	2.7

Код цикличних напрезања са дилатацијом 0.5% јасно се уочава ефекат ојачања, док се код већих полуамплитуда дилатација 5% уочава ефекат наглог пада носивости код сваког новог циклуса. Посебно се уочава знатно мањи капацитет акумулирања пластичних деформација у односу на уређаје ДЦ 90 који су решени посебном конструкцијом и елементима за стабилност код напрезања притском. На сл.71 уочава се врло добро поклапање експерименталне и рачунске криве замора. На сл.72 приказан је дијаграм у логаритамској скали максимална амплитуда силе-број циклуса за различите нивое дилатација 0.5%, 1%, 3% и 5%. Познавањем ових основних дијаграма може се дефинисати очекивано хистерезисно понашање у динамичким условима.

4 Три нове патентне пријаве нових конструкција амортизера сеизмичке енергије из 2010.године.

У овом поглављу даје се приказ три ауторове патентне пријаве амортизера. Патентне пријаве су објављене и испитане у Заводу за интелектуалну својину Републике Србије

4.1.1 Линијски амортизер, Р -2100/0229

Амортизер је конципиран за потребе сигурности и контроле понашања грађевинских конструкција, посебно високих зграда на ударе-потресе земљотреса, ветрова и других сличних принудних вибрација. Како да својим радом контролише покретну масу и подешава је тако да пригушује осцилације објекта од ветра, и у другом степену рада, од земљотреса. Проблем који се решава је усклађивање међусобно зависних осцилација контролисане масе и самог објекта.

Линијски амортизер-амортизер сеизмичке енергије и еластичних вибрација повезује елементе грађевинских конструкција и остварује своју функцију. Ту везу чини дуктилном са контролисаном силом и померањем.

Основна карактеристика амортизера је у конструкцијском склопу елемената који се под дејством ветра деформишу еластично, а за екстремна оптерећења као што су земљотресни удари остварује пластично деформисање. Елементи раде на замор и на аксијално напрезање са регулисаном стабилношћу у свим процесима рада.

Конструкција линијског амортизера се састоји од два линијски зависно спојена уређаја: хистерезисног амортизера и еластичног уређаја.

Еластични уређај са опругом (4) величину силе остварује у зависности од јачине и величине издужења опруге (4), док се контрола померања опруге (4) остварује путем прстенова (6с,6d,6е), где је средњи прстен (6d) покретан а прстенови (6с,6е) су заваривањем спојени за главну цев (10). Покретни прстен

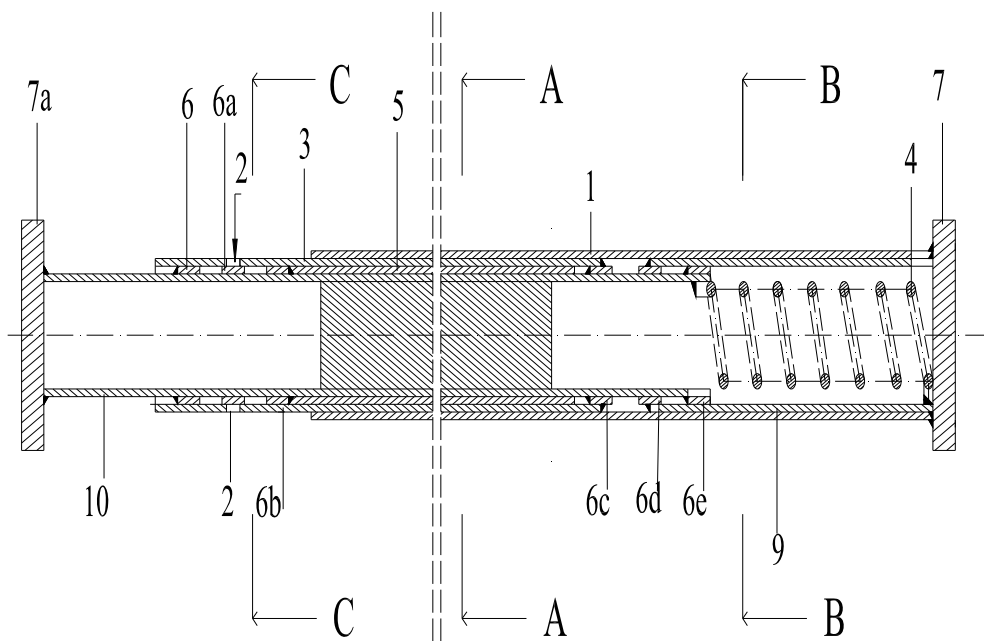
(6d) је заваривањем спојен за подужну цев (9). Подужна цев (9) је једним крајем заварена за везну плочу (7) а други крај цеви (9) је чврсто спојен са прстеном (6d).

Хистерезисни амортизер се састоји од главне цеви (10), прстенова (6,6a,6b) за контролу померања. Уметнута цев (5) служи за спречавање извијања ка спољној страни главне цеви (10). Унутар главне цеви (10) уметнута је шипка (8) за спречавање извијања ка унутрашњости цеви (10).

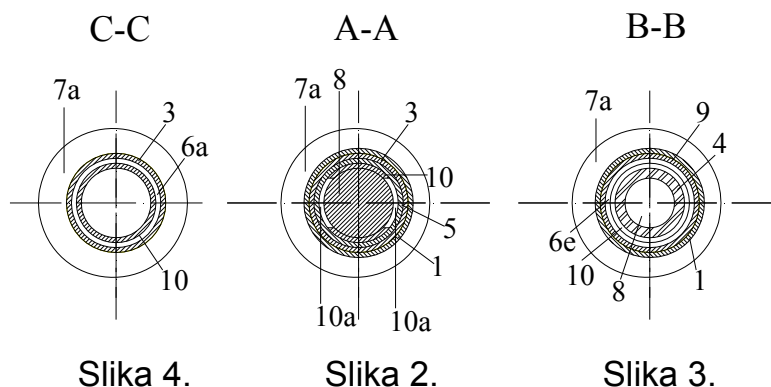
Веза линијског амортизера за елементе грађевинске конструкције остварује се посредством везних плоча (7,7a). Покретни прстен (6a) је заваривањем кроз отвор (2) спојен за обложну цев (3). Клизна цев (1) је заварена за везну плочу (7) и клизи око обложне цеви (3).

Шипка (8) и цев (5) служе да обезбеде стабилност на извијање и избочавање у току оптерећења на притисак.

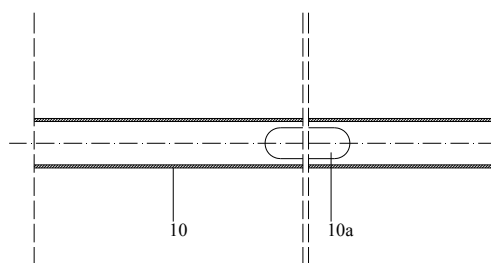
За време дејства ветра активира се и ради само еластични део уређаја, тако што настаје издужење и скраћење опруге (4). Код јаких земљотреса услед већих сила активира се и хистерезисни амортизер покретањем покретног прстена (6a) и радом у пластичној области.



Сл. 73 Представља пресек по подужној оси амортизера,



Сл. 74 Приказује попречни пресек 'А'-А' са сл.73 Слика 3 представља попречни пресек 'В-В' са сл. 73 Слика 4, представља попречни пресек 'С-С' са сл.73,



Сл. 75 Подужни пресек основне цеви 1 са сл.73

У свету постоји свега неколико решења. Такође постоје и другачије конструкције амортизера које остварују ову функцију. То су решења јапанских иноватора фирме Nippon Steel Corporatio-Unbonded Brace, италијанске фирме Fir Industriјale –fluid viscous dampers. Ова решења се заснивају на хидрауличним системима што је везано за посебне аспекте одржавања и трајности.

Немачка фирма Maurer Sohne контролу вибрација и пригушења врши комбинацијом еластичних опруга и гумених елемената. Хистерезисно понашање се обавља искључиво деформисањем гумених елемената. Веза ових елемената је паралелна.

Ови познати изумитељи, решење проблема дају на другачије оргиналније начине, али не комбинацијом еластичног и хистерезисног рада челичних елемената.

4.1.2 Амортизер облика српа, Р -2100/0228

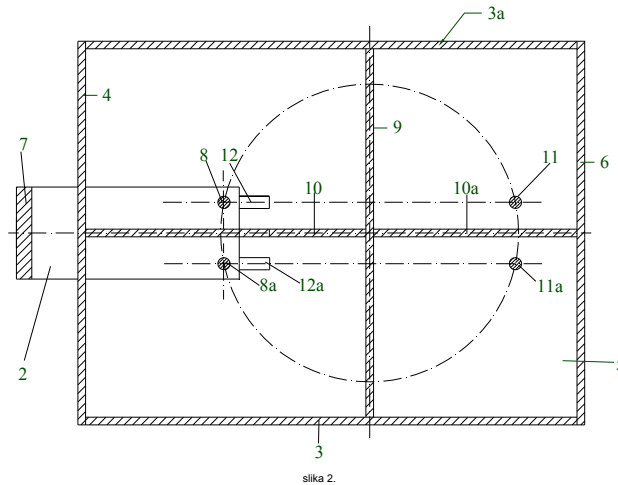
Амортизер облика српа се примењује у грађевинарству, преваходно за мостовске конструкције. Врши контролу великих померања главе мостовских стубова и придржавање греда мостовских носача. Такође се може користити за повезивање грађевинских конструкција за темељ на месту ослањања исте преко покретних клизних ослонаца. Амортизер облика српа - амортизер сеизмичке енергије повезује главу мостовског стуба са гредом и ту везу чини дуктилном са контролисаном силом и померањем. У свету постоји свега неколико решења везе глава стуба-греда. То су углавном лежишни системи покретних и непокретних ослонаца. Такође постоје и другачије конструкције амортизера које остварују ову функцију. Постојећи системи, пре свега хидраулични (Италија, Немачка, САД) решавају овај проблем. То су неопренска и слична лежишта на бази гуме. Лимитирање померања се остварује путем граничника или вискозним пригушењем кроз флуидне системе. Постоје и класична решења у армираном бетону и у наставку се фотографијама приказују ефекти и последице таквих решења.

Суштина проналаска је у конструкцијском склопу елемената који остварују контролу померања путем еластичног и пластичног деформисања. Елементи раде на замор и савијање са регулисаном стабилношћу у свим процесима рада.

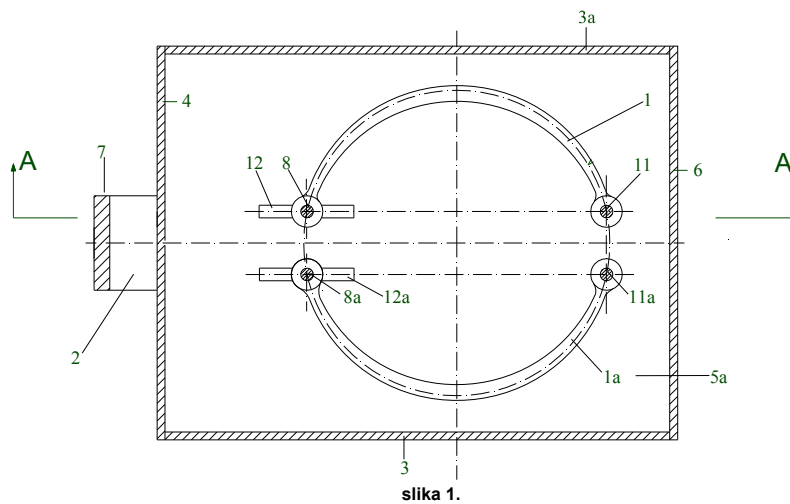
Српасти елементи (1,1а) су са једне стране повезани преко везних елемената (11,11а) а са друге стране су повезани преко спојних елемената (8,8а). Повезивање амортизера облика српа са другим деловима грађевинске конструкције (стубом и гредом) се обавља посредством плоча (6,7), док се лимитирање померања остварује преко изведених отвора (12,12а) у лимовима (5,5а). Покретни везни елементи (8,8а) су повезани са плочом (7) посредством везне плоче (2).

Српасти елементи (1,1а) су смештени између лимова (5,5а) који су са свих страна међусобно повезани лимовима (3,3а,4,6). Лимови (5,5а) су укрупњени попречним укрупњењем (9) и подужним укрупњењима (10,10а). Везне плоче (2) повезују плочу (7) са спојним елементима (8,8а). Кретање спојних елемената (8,8а) обавља се у отворима (12,12а).

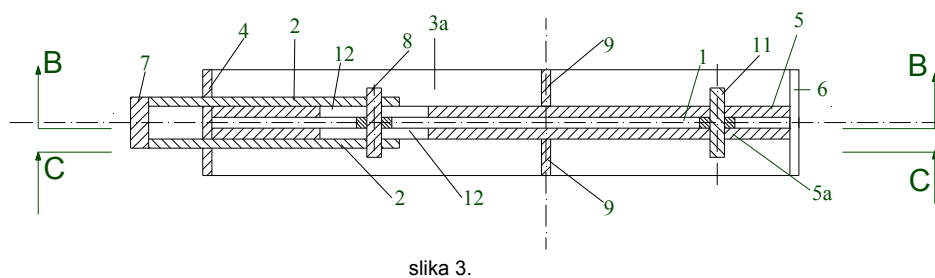
Лимови (5,5а) заједно са укрућењима (9,10,10а) обезбеђују стабилност српастих елемената (1,1а) на локално избочавање и глобално извијање и несметано функционисање у току експлоатације.



Сл. 76 Хоризонтални пресек 'C-C' са сл.79



Сл. 77 Пресек 'B-B' са сл.79



Сл. 78 Приказује пресек 'A-A', са слике 79

4.1.3 Тростепени амортизер, Р -2100/0227

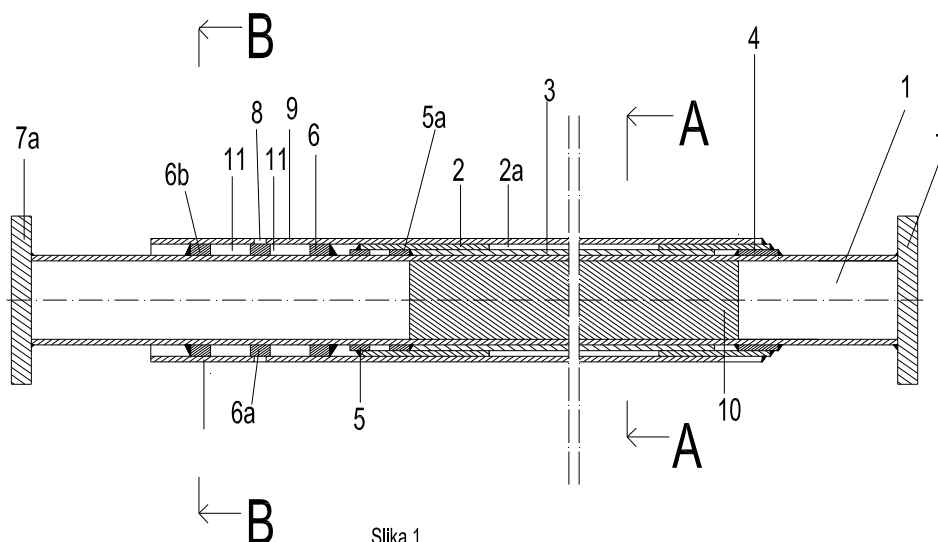
Тростепени амортизер је уређај који служи за повећање сигурности конструкција значајних објеката (нуклеарних електрана, болница и других крутих и масивних објеката), а користи се у подручјима где се могу очекивати земљотреси.

Суштина проналаска, тј. основна карактеристика амортизера је у конструкцијском склопу елемената који под дејством земљотреса остварују пластичне деформације у три контролисана степена. Елементи раде на замор на аксијално напрезање са регулисаном стабилношћу у свим процесима рада.

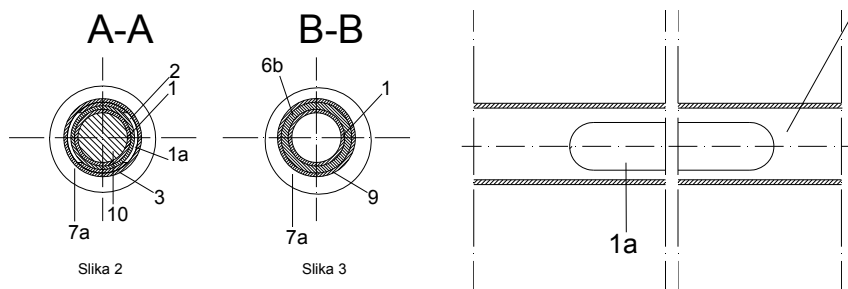
Тростепени амортизер се уграђује у конструкцију објекта са којом се повезује посредством везних плоча (7,7а). Основна цев (1) је овално ослабљена отвором (1а). Шипка (10) је уметнута у основну цев (1) преко које је постављена покривна цев (3) која спречава локално избочавање и извијање цеви (1). Цев (2), другог степена сигурности, се поставља преко покривне цеви (3). Активирањем сваког слоја цеви (1,2,9), тростепени амортизер остварује три степена сигурности а контролише силу и померање. Прстенови (4, 5а, 6 и 6b) су заварени за основну цев (1) угаоним варом. Прстен (5) је покретан у односу на основну цев (1) и заварен је само за цев (2) другог степена сигурности. У функцији ослабљења цеви (1,2) одређује се сила за сва три степена сигурности. Простор између прстенова (6а,6), као и простор између прстенова (6а,6b) попуњен је оловом (11).

Амортизер се уграђује у објекте тако што се конструкција објекта повезује са темељном конструкцијом или се дијагонално повезују међуспратне конструкције објекта.

Конструкција амортизера функционише у првом степену рада преко пластичног деформисања цеви (1) и контроле деформације путем прстенова (5а, 6). У другом степену рада активира се спољна цев (2), а контрола деформације се остварује путем прстенова (6.6b). У трећем степену рада активира се спољна цев (9).



Сл. 79 Пресек по подужној оси проналаска



Сл. 80 Попречни пресек `А-А` сл.2 Слика 3, представља попречни пресек `В-В` са сл.79

Сл. 81 Пресек по подужној оси основне цеви

Тростепени амортизер - амортизер сеизмичке енергије повезује елементе грађевинских конструкција и остварује своју функцију. Постојећа позната решења у свету не поседују вишестепену сигурност и велику осетљивост-сензитивност. Патенти Weglewski (U.S. Patent No. 5,946,866) и Patent Foster (U.S. Patent No 3,010,547) немају вишеструки систем сигурности. Први патент није хистерезисни већ ради на смицању гуме а други се примењује код монтажних кућа.

Патент Weglewski се односи само на амортизер вертикалних укрућења армиранобетонских рамовских система. Не поседује исте или сличне елементе. Не поседује исти или сличан начин повезивања. Конструкцију Weglewski одређује смицање гуме (815). Гума у вишеслојном амортизеру не постоји ни као елемент.

Kokoku-Vibracion Absorber (1992) је уређај који се користи за вибрације и не може се употребљавати за зидане конструкције. Конструкције система немају сличности или заједничке елементе или начин њиховог повезивања (страна 129 сл.11 патентне пријаве Kokoku-Vibracion Absorber).

Fukui-Brace амортизер (1998) спада у групу хидрауличних амортизера или у варијанту амортизера који раде на трење. Конструкција нема и не може имати никакве сличности или исте елементе или начин њиховог повезивања. Не треба бити посебно специјалиста да се то уочи и види (сл.4,5,19 и 20) на њиховим патентним објавама.

Nippon Stell corp.-Visko elastic Brace (1999) је амортизер-дијагонала (стр.8., сл.3 и 4). Конструкција амортизера се састоји из више слојева који спречавају извијања. Ни по елементима а ни по њиховим везама немају никакве сличности.

Такође постоје и другачије конструкције амортизера које остварују ову функцију а које због ограничености простора се не приказују. Ни једна од њих нема вишестепну сигурност а ни сличну конструкцију, што се може претрагама по интернету уочити а да се буде просечан познавалац ове области.

Kijimoto-Damping Device (1998) конструкција уређаја детаљно је приказана у документу произвођача. То је амортизер са вискозним пригушењем. Конструкција амортизера, број елемената и начин њиховог повезивања нема никакве сличности са предложеним решењем из ове патентне пријаве.

5 Примена уређаја на објектима и извршена тестирања

Дугогодишња експериментална и научна истраживања која су започета у Институту ИМС за испитивање материјала Републике Србије у Београду и први патент П 48040 из 1989. године довела су до примене уређаја на реалним грађевинским конструкцијама широм света, на четири континента (Северна Америка, Африка, Азија и Европа). Илустровани примери у наставку дају сажет приказ динамичких тестирања на амбијенталне и принудне вибрације, као и резултате моделских испитивања у лабораторијама. Редослед приказа примене и тестирања даје се хронолошки.

5.1 Тестирање објекта П+1 у Мионици на амбијенталне и принудне вибрације и тестирање модела зидова на виброплатформи Института ИЗИС у Скопљу

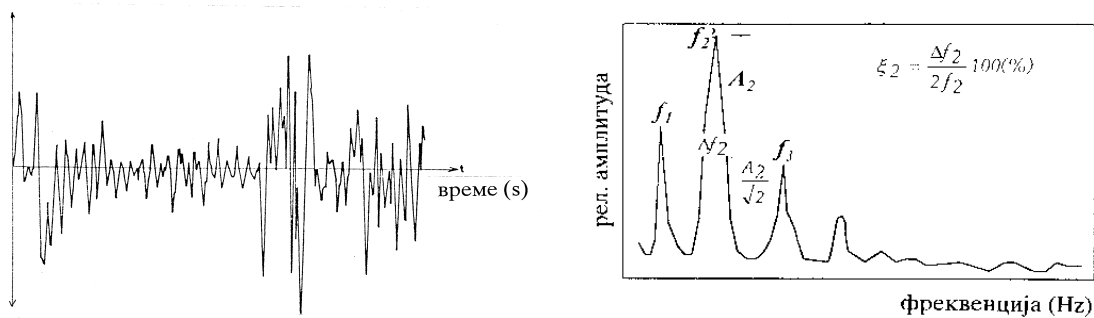
За потребе утврђивања ефеката повећања сигурности после санације 350 објеката у Колубарском округу 2003. године извршене је динамичко тестирање куће спратности П+1, власника Радована Марковића из Мионице (Сл.82).



Сл. 82 Кућа пре (лево) и после (десно) појачања Системом ДЦ 90 са дамперима

Пре појачања су обављена тестирања на амбијенталне вибрације, ради добијања динамичких карактеристика (периода и облика тонова осциловања), на бази којих се одређује стварна крутост зидане конструкције после дејства

земљотреса и након појачања конструкције објекта. Метода динамичких мерања од амбијенталних вибрација приказана је на Сл.83.

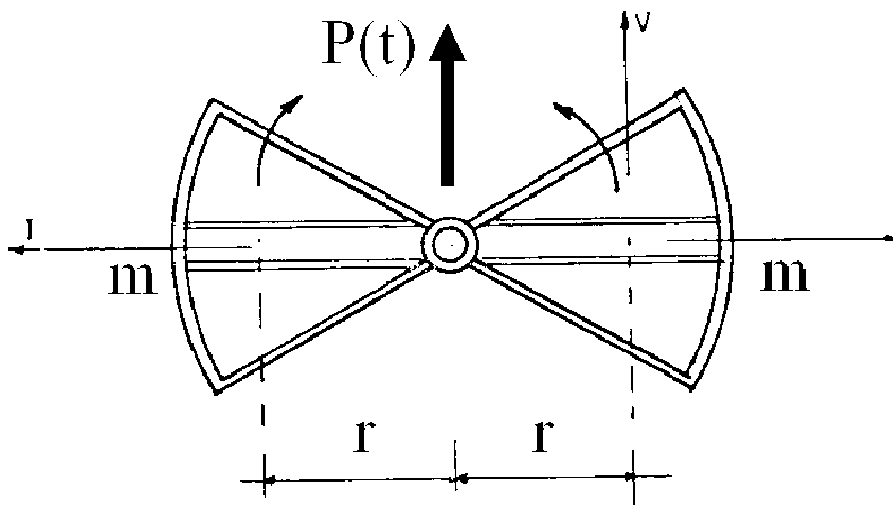


Сл. 83 Запис у реалном времену и Fourier амплитудни спектар

Сваки запис $x(t)$ може се трансформисати у фреквентном домену користећи

следећи израз:
$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

Код тестирања на принудне вибрације коришћен је вибратор који са ексцентричном масом производи динамичке силе, сл.84.

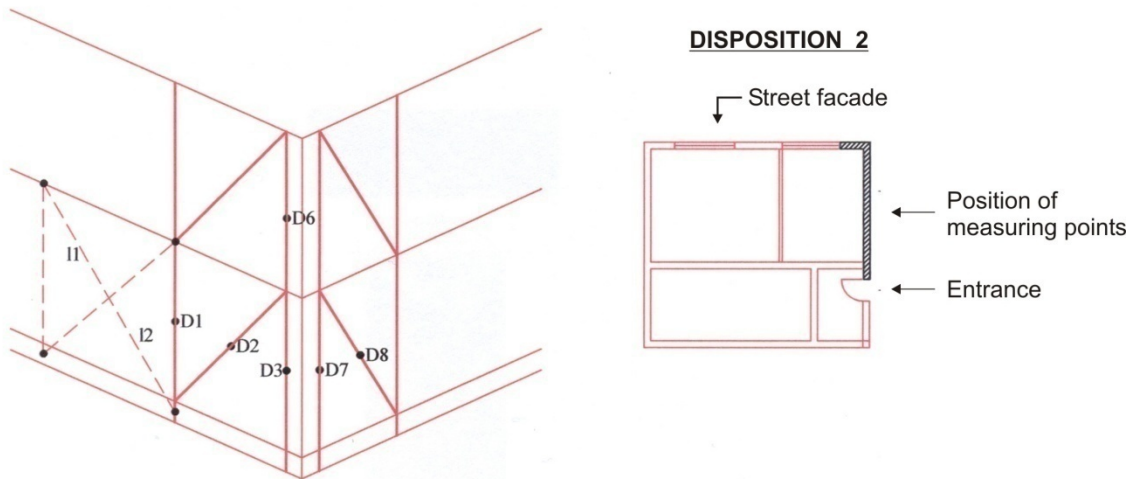


Сл. 84. Шема вибратора са масама m , на растојању r од центра осовине вибратора
Динамичке силе у времену које производи вибратор дате су следећим изразом:

$$P(t) = P_0 \sin \omega t = M r \omega^2 \sin \omega t, \quad M = 2m$$

Аквизиција података (дилатације у челичним елементима укрућења, убрзања у нивоу таваница и дилатација у зидовима преко промене дужина дијагонала) вршена је на више диспозиција, сл.85.

SCHEME OF THE WALL WITH MEASURING POINTS (CORNER)



Сл. 85. Диспозиција мерења дилатација у зидовима на углу објекта

Резултати мерења за дату диспозицију приказани су табеларно, табела 7.

Табела 7 Приказ мерених убрзања, померања и дилатација за оптерећење у трансферзалном правцу, диспозиција 2.

Test No	Direction	Frequen. Of Excitat. (Hz)	Accel. Response (g)		Diagonal displacement (mm)				Strain in steel elements of DC 90 system (ϵ_{str})					
			A1	A2	L1	L2	L3	L4	D1	D2	D3	D6	D7	D8
2	Transv.	7.8	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	5.6	2.2	5.7	5.2	6.0	10.4

У табели испод даје се приказ измерених фреквенци за три објекта, табела 8.

Табела 8. Измерене фреквенце за три објекта

Building No.	Natural frequencies(Hz)			
	Before strengthening		After strengthening	
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
1			7.0	6.4
2	6.4	5.8	7.4	6.4
3			7.8	7.2

Из сажетог извода обимних експерименталних и аналитичких истраживања (мерења су вршена на 20 тачака) може се закључити да се фреквенце оштећених објеката крећу у границама од 6 до 8 Hz. Да је ефекат повећања

крутости објекта применом технологије ДЦ 90 35%. Да су принудне силе изазвале оптерећење 0.03g, што је далеко испод сеизмичког оптерећења које се креће, уопште речено, у опсегу од 0.10 до 0.40g. То јасно указује на повећање сигурности објекта на ударе земљотреса. Да би се проценио стваран ефекат смањења ризика неопходно је извршити динамичка испитивања дампера (хистерезисно понашање) и нелинерану динамичку анализу са софистицираним софтвером и стварним мереним реолошким подацима, што је у наредним годинама истраживања и урађено на више објеката где је систем био аплициран.

5.1.1 Моделска тестирања на виброплатформи

Извршена су упоредна моделска динамичка испитивања на виброплатформи Института ИЗИС у Скопљу и то зидова са и без појачања Системом ДЦ 90. Резултати тестирања дампера ДЦ 90 приказани су у ранијим поглављима, а сада се приказују резултати динамичког тестирања на виброплатформи Института ИЗИС из Скопља, серије од девет модела зидова у размери 1:10 израђених од пуне печене опеке, шупље печене опеке и од непечене опеке. Модели су рађени са и без ојачања укрућењима ДЦ 90 и тако упоредно су теститирани. Димензије модела су 300x250x35 mm, који су урађени и тестирани фебруара 2004. године, сл. 86.



Сл. 86 Модели на виброплатформи од шупље опеке (лево), од пуне опеке (средина) и од непечене опеке (десно)

Димензије виброплатформе су 1.40 x 2.00 m, а тестирање је обављено хармонијским кретањем са максималном амплитудом кретања платформе од +10 cm. и максималним убрзањем од 10g, сагласно правилима моделског испитивања. Мерена су померања и убрзања (акцелорметри типа Куова) врха модела зидова, као и промена димензија (скраћење и повећање)

дијагонала зида (LVDT уређај са рангом померања од $\frac{1}{4}$ inch.), све до колапса прво неојачаног зида а потом у наставку тестирања и до колапса ојачаног зида.

Табела 9. Природне фреквенце три типа модела зида са и без ојачања за различита додатна гравитациона оптерећења масама од 10, 20 и 30 кг.

Type of the model	Natural frequencies of the models [Hz]					
	M ₁ = 10 kg		M ₂ = 20 kg		M ₃ = 30 kg	
	Strengt.	Nonstr.	Strength.	Nonstr.	Strength.	Nonstr.
Model 1-hollow brick-gitter	100.0	92.0	61.6	52.8	54.4	38.4
Model 2- burned brick	80.0	70.0	50.0	42.0	34.0	25.0
Model 3- dried brick	37.6	26.8	30.0	25.6	23.2	20.4

Из обимног броја резултата тестирања издвајају се запажања. Ојачани модели имају повећану крутост у односу на неојачане у вредностима од 40%, 47% и 93%. Такође, задржавају интегритет и при далеко већим померањима у односу на неојачане и тиме дисипирају далеко већу енергију. Код шупље опеке са 0.84 mm на 1.69 mm, код пуне опека са 1.25 mm на 3.94 mm и код непечене опеке са 0.32 mm на 1.26 mm. Код деструктивног теста са променљивом амплитудом оптерећења ови односи померања су још повољнији. Испитивање свих узорака је вршено у три фазе: са променљивом амплитудом, са константном амплитудом и крајњи деструктивни тест са променљивом амплитудом. Ова испитивања указују на ефекте повећања сигурности и интегритета ојачаних зиданих конструкција Системом ДЦ 90. Она су посебно била од значаја код анализа "адобе" конструкција оштећених катастрофалним земљотресом 2010. г. у Чилеу чија је магнитуда била 8.8 Рихтера.

5.2 Тестирање модела двоспратног зида од шупље опеке са и без ојачања у Институту ИМС за испитивање материјла Србије

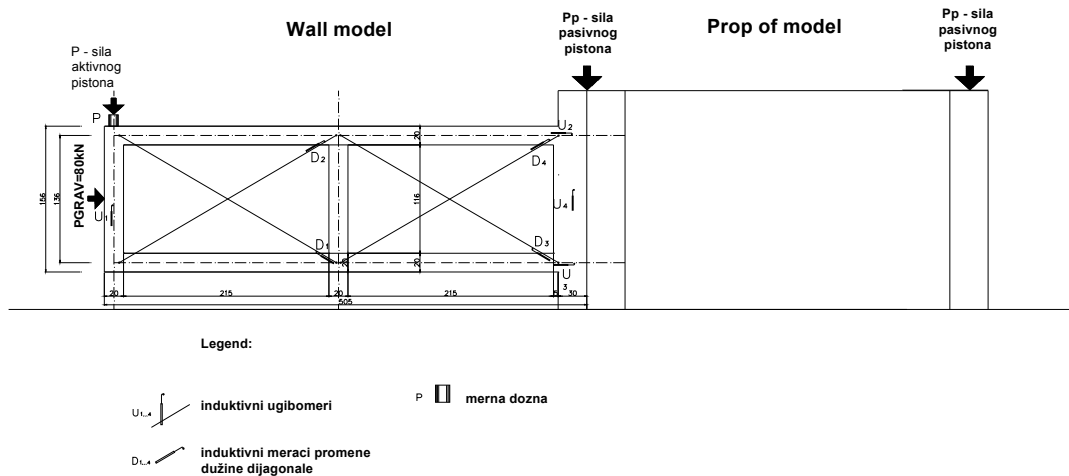
Модел је сазидан од шупљих блокова 19x19x25 см, са реалним спратним висинама од 260 см, сл. 87.



Сл. 87 Модел двоспратног зида пре ојачања (лево), после ојачања (у средини) и у фази тестирања (десно)

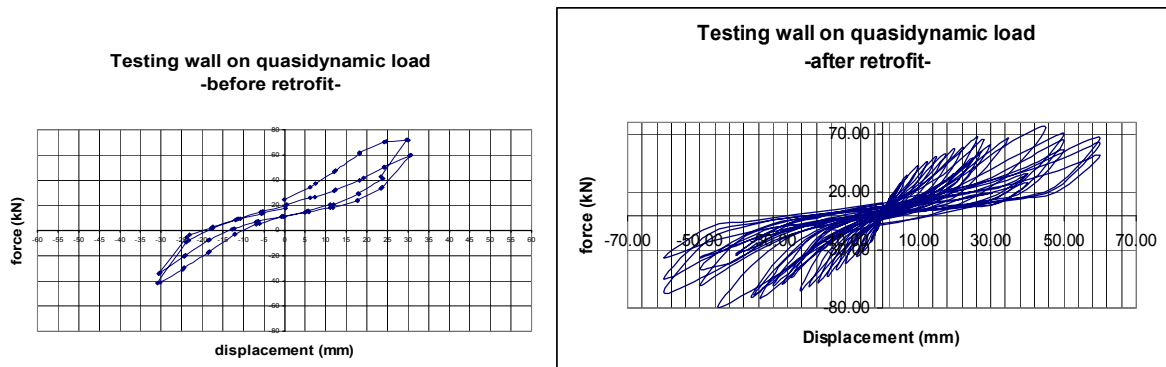
Шема тестирања је дата на сл. 88.

Disposition of model befor retrofit



Сл. 88 Шема оптерећења и тестирања двоспратног зида

На основу оптерећења на врху конзолног зида сачињени су хистерезисни дијаграми, сл. 89.



Сл. 89 Хистерезисни дијаграми зида, без (лево) и са ојачањем (десно)

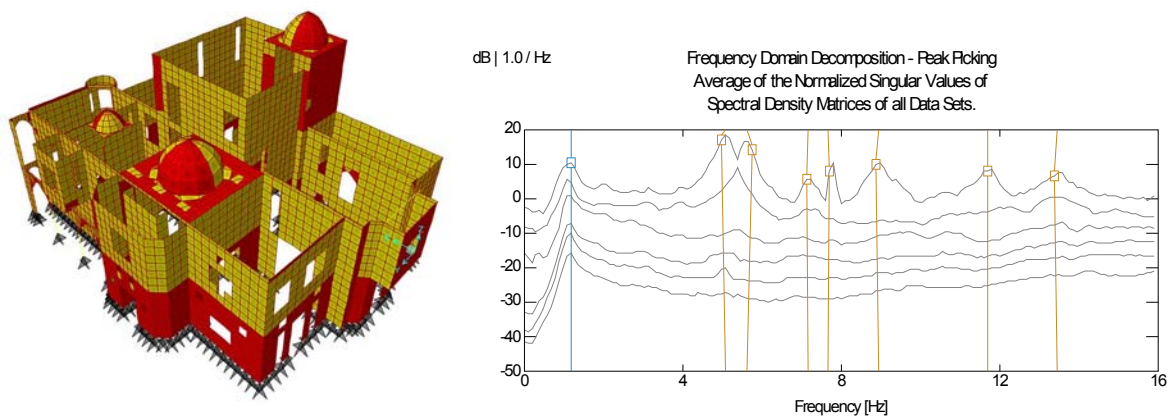
Већ после неколико циклуса, за померање врха конзоле од 10 mm појавиле су се пукотине од 8-10 mm, у правцу главних напона затезања, у пољу до уношења силе, а у пољу до укљештења уочене су прсине карактеристичне за напрезање са доминантним савијањем. Уочен је пад крутости са растом померања врха конзоле и то на следећи начин; за померање 1 mm, крутост је 18.5 kN/mm, за 6 mm, крутост је 10.0 kN/mm и за 30mm крутост је пала на 1.65 kN/mm. После појаве прсина носивост зависи од трења (вертикална сила је 50 kN и коефицијент трења око 0.5, док он варира у границама од 0.2 до 0.8 у зависности од броја циклуса и његовог смањења са замором, што је посебно поље проучавања). Тада долази и до колапса конструкције.

5.2.1 Испитивање ојачаног зида.

Почетна крутост ојачаног зида са 9.33 kN/mm пала је на 5.7 kN/mm за померање врха конзоле од 3.5 mm. Касније се повећавао пад крутости, највише због лошег сидрења. Међутим и поред тога значајан је податак да при сили на конзоли од 60 kN и померењу врха конзоле од 25 mm, констатоване су врло мале прсине од 2.5 mm. Посебно је значајно да је дијагона са дампером, која је уграђена у зид подједнако добро примала и силе затезања и силе притиска. Спречено је извијање и избочавање. Зид је постао жилавији и дуктилнији и задржао је целину и за померања врха конзоле од 45 mm.

5.3 Тестирање резиденције амбасадора Финске у Алжиру на амбијенталне и принудне вибрације

У току јесени 2005. године извршена су обимна истраживања стања резиденције и динамичка испитивања у сарадњи са Институтом ИЗИС из Скопља и Институтом GCS из Алжира а у сарадњи са Француским и Финским консултантима и експертима. Моделирање и прорачун је вршен на основу измерених стварних динамичких карактеристика и стања носивости зидова, сл. 90 и сл. 91.

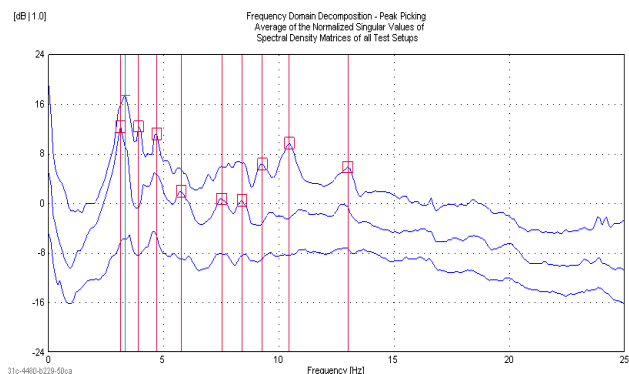


Сл. 90 Прорачунски модел резиденције , Сл. 91 Фреквентни спектар на основу мерених амбијенталних осцилација објекта

Тестирања на принудне вибрације обављена су са опремом Института GCS из Алжира и сачињен је детаљан извештај резултата и ефеката појачања објекта. Одржан је низ предавања у Институту GCS и ССТ у правцу преношења искутава ове технологије код примене на историсјким објектима.

5.4 Тестирање резиденције председника Азербејџана

На основу обимног истраживања, тестирања на амбијенталне вибрације урађена је нумеричка динамичка анализа и обављена санација овог историјског објекта, сл. 92 и сл. 93.



Сл. 92 Фасада резиденције, Сл. 93 Фреквентна крива доминантних фреквенција добијених програмом ATREMIS

Сва вертикална укрућења, због изузетног естетског и историјског значаја фасадних површина, уграђена су унутар објекта, док је сидрење вршено у нивоу подрума, сл. 94 и сл. 95.



Сл. 94 Вертикално укрућење са дампером у дну дијагонале и Сл. 95 Детаљ сидрења у нивоу подрума

У току извођења радова специјалисти Система ДЦ 90 извршили су инструктажу, обуку Азербејџанских специјалиста и трансфер технологије.

5.5 Примена дампера на трговинском центру у Азербејџану

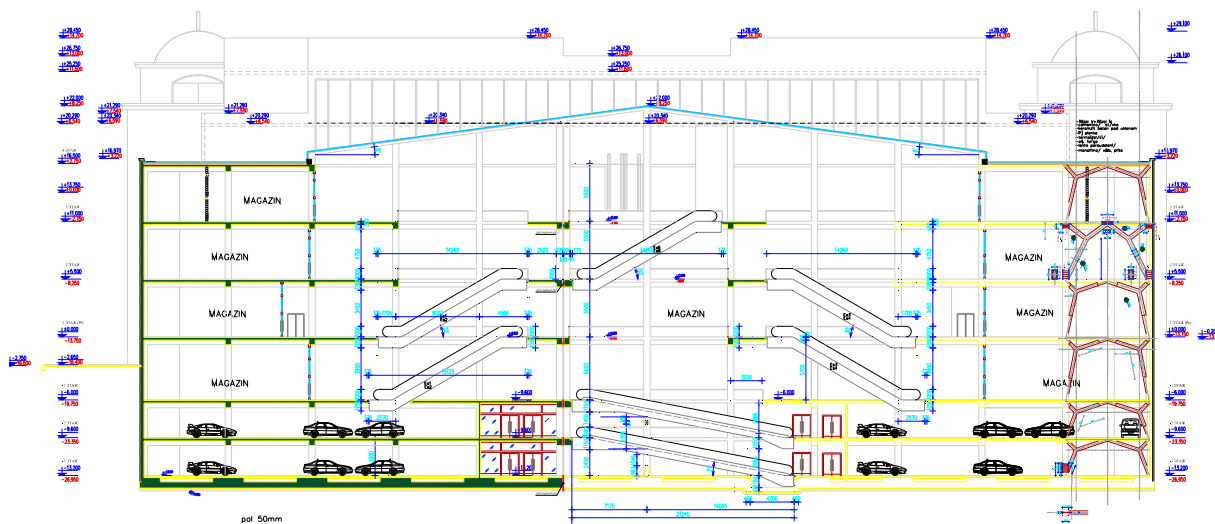
У трговинском центру који се састоји из четири ламеле и висине пет етажа, површине етаже око 1 ha, а укупне површине 6.5 ha уграђена су вертикална укрућења ДЦ 90, типа портала "По" са металним хистерезисним дамперима, пречника 300 mm. Конструкција је скелетна, безгредна са стубовима пресека

60x60 см. и армиранобетонском плочом дебљине 24 см. Врло су специфична укрућења по положају и конфигурацији, сл. 96, 97 и 98.



Сл. 96 Вертикално укрућење са дамперима у подруму и Сл. 97 Вертикално укрућење са дамперима на спрату.

Конструкција је врло мале крутости и врло деформабилна. Неопходно је омогућити кретање током земљотреса са контролом померања коришћењем хистерезисних дампера ДЦ 90.

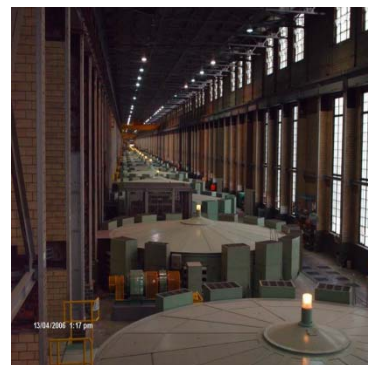


Сл. 98 Вертикални пресек са диспозицијом једног вертикалног укрућења са дамперима

Након завршетка објекта предвиђена су динамичка испитивања принудним вибрацијама.

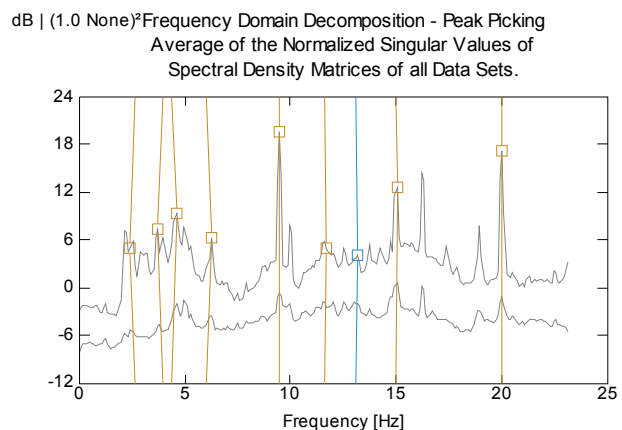
5.6 Примена дампера конектора на зиду хидроелектране Beauharnois powerhouse у Канади

За потребе Канадског наручиоца извршена су многобројна, трогодишња тестирања на моделима и објектима у циљу одабира техничког решења придржавања зида машинске хале дугог 1 km, високог 24 m и дебљине 1.20 m. Стабилност је требало обезбедити за дејство сила управно на раван зида. Тако су развијена два нова типа дампера конектора Kanada HQL и Kanada HQM сл. 99 и сл.100.



Сл. 99 Дампер конектор типа Kanada HQL и Сл. 100 Машинска хала хидроелектране са генераторима

Обављена су тестирања на виброплатформи ИЗИС, сл. 101 и тестирања самог објекта у циљу одређивања динамичких карактеристика, сл.102.

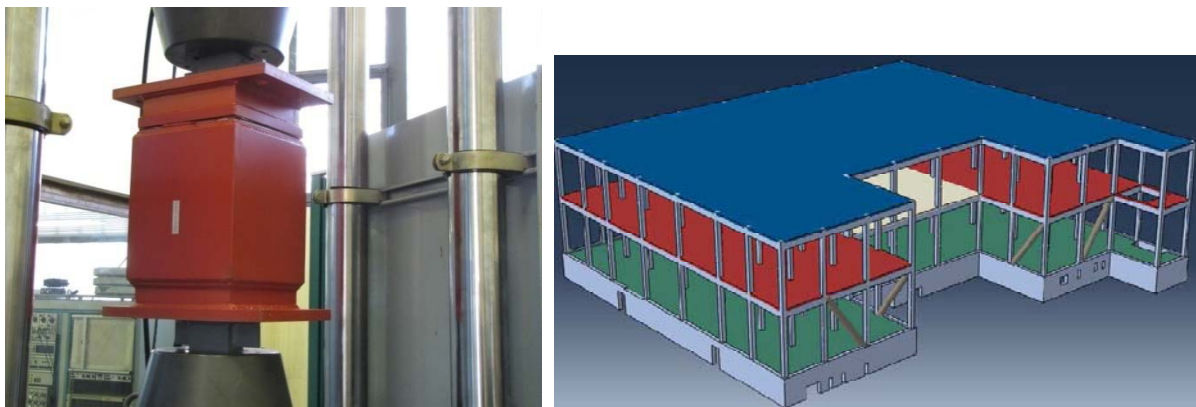


Сл. 101 Модел у размери 1:3 са уграђеним моделима дампера-конектора типа Kanada HQL пре тестирања на виброплатформи, и Сл. 102. Фреквентна крива доминантних фреквенција добијених програмом ATREMIS

Канадски партнер је развио посебан софтверски модел за програм COSMOS за нелинеарну динамичку анализу зиданих конструкција и методом хомогенизације коначних елемената прати стање понашања зида од момента појаве граничног стања, појаве прслина, пропагације истих и све до лома. Извршена су моделска тестирања на виброплатформи модела зида у размери 1:2 и размери 1:3, којим је потврђена нумеричка динамичка анализа. За те потребе развијен је и посебан модел дампера за потребе тестирања у размерама 1:2 и 1:3. Анализе које је урадио инвеститор указују да флуидни дамperi Америчких произвођача нису у могућности да реагују на потребна мала померања која захтева ова масивна зидана конструкција електране Beauharnois powerhouse.

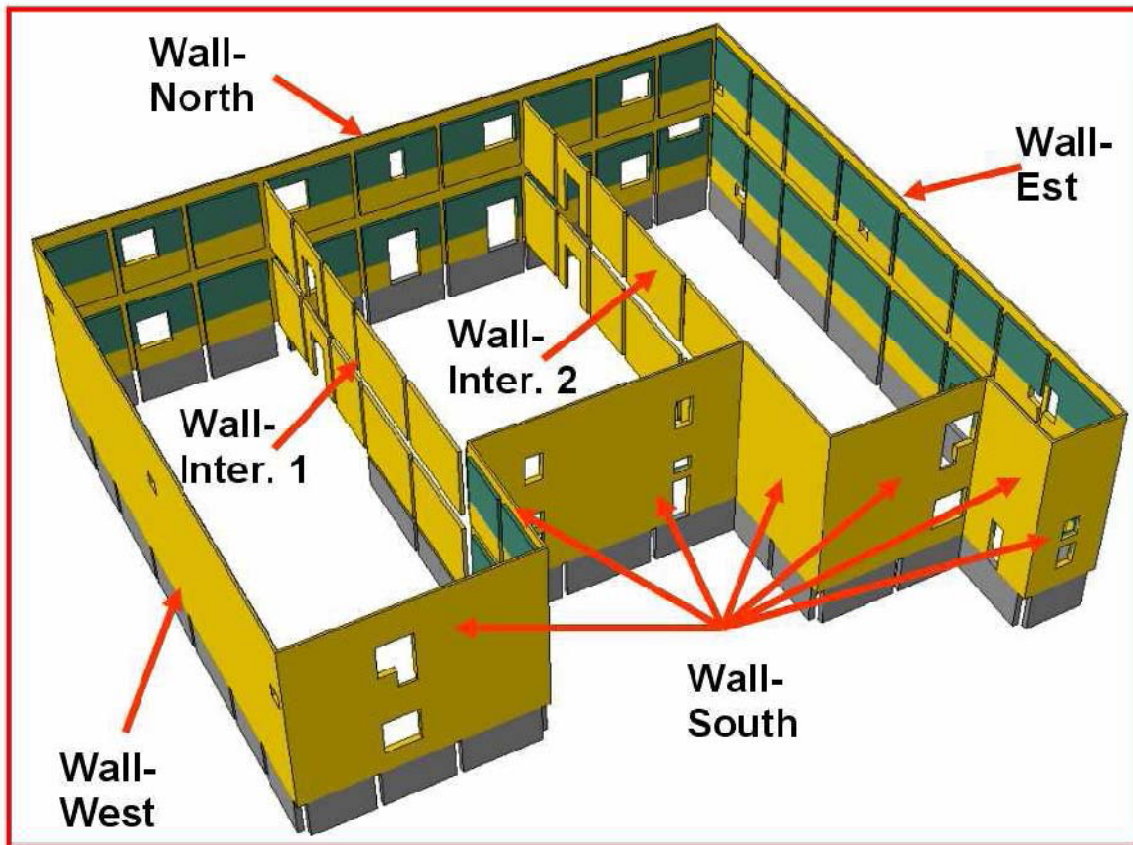
5.7 Примена дампера на трафостаници у Монреалу

Исти Канадски наручилац је вршио истраживања ојачања трафостаница и дошао до закључка о примени Система ДЦ 90 на повећању сигурности од могућих потреса. За те потребе развијен је дампер типа Kanada HQ Royal, сл. 103 и сл. 104.



Сл. 103 Дампер типа Kanada HQ Royal у фази динамичког тестирања и Сл. 104 Диспозиција вертикалних укрућења са дамперима типа Kanada HQ Royal.

На овом објекту примењени су дамperi конектори за придржавање зида на дејство сила управно на зид, сл. 105, и дамperi типа Kanada HQ Royal у косницима вертикалних укрућења, сл. 104.



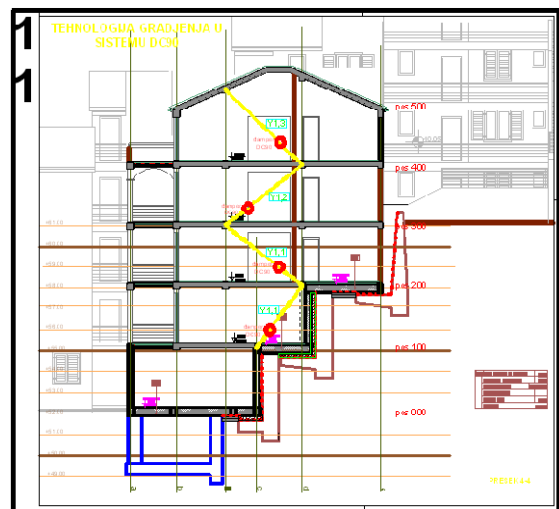
Сл. 105. Диспозиција дампера конектора типа Канада HQL за придржавање зидова на дејства управно на раван зида

Прорачун је, због економичности, вршен применом софтвера COSMOS за зидове методом хомогенизације елемената, а потом као линк коришћен за нелинеарну динамичку анализу у реалном земљотресном запису програмом SAP 2000, V12.

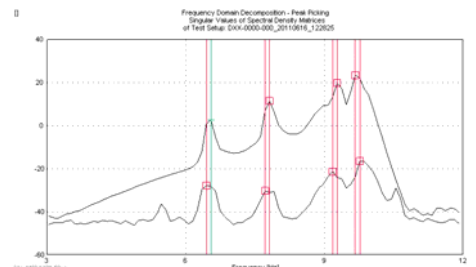
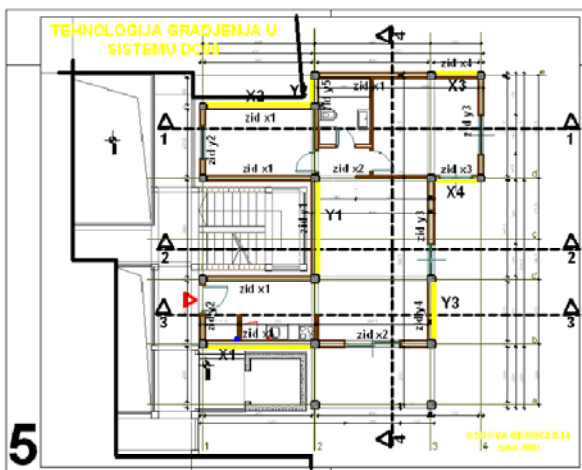
5.8 Тестирање петоетажне зидане конструкције у Бечићима на принудне вибрације

Значај овог експерименталног и аналитичког тестирања и истраживања је у томе што покушава да ревитализује примену безскелетних зиданих конструкција веће спратности у сеизмички активним регијама. Објекат је са пет бетонских међуспратних плоча лоциран на косини стене у Бечићима, саграђен је без армиранобетоског скелета, већ су зидови укрупњени косницима Система ДЦ 90 са дамперима. То прописи не дозвољавају, али смо тестовима на амбијенталне и принудне вибрације на реалном објекту потврдили нумеричку

динамичку анализу која је рађена програмом SAP 2000, V12. са неколико записа Црногорских земљотреса, Петровац, сл. 106 до сл. 108.



Сл. 106 Фасада објекта у Бечићима, Сл. 107. Вертикални пресек конструкције са дамперима и косницима



Сл. 108. Основа са положајем вертикалних укрућења, Сл. 109 Фреквентни спектар за правац x на основу принудних вибрација вибратором ДЦ 90

Коришћењем вибратора за принудне вибрација добијен је фреквентни спектар, сл.109. На основу мерених динамичких карактеристика добијена је стварна крутост објекта и извршена је корекција крутости динамичког модела.

Табела 10. Упоредна анализа мерених и прорачунских фреквенција

Resonant frequency		
(Hz)	Analytical	Experimental
y-direction	5,20	6.50
x-direction	7,07	7.50
torsion	10,18	10.00

Табела 11. Померања врха конструкције за дејство Петровачког земљотреса са максималним убрзањем тла од 0.4g.

POMERANJE PETROVAC X			POMERANJE PETROVAC Y		
1.35	cm	drift [%]	1.63	cm	drift [%]
1.11	0.24	0.08	1.32	0.31	0.11
0.67	0.44	0.15	0.75	0.57	0.20
0.14	0.53	0.18	0.08	0.67	0.23
0.01	0.13	0.04	0.0005	0.0795	0.03
	0.01	0.00		0.0005	0.00

После корекције динамичког модела уношењем измерених величина добијено је добро слагање фреквенци, облика тонова осциловања и померања, табеле 10 и 11. До момента масовне примене вишеспратних зиданих конструкција ојачаних дамперима у сеизмичким регијама потребно је иновирати норме и стандарде. Остварена тестирања и нумеричка моделирања су пут ка мењању стандарда.

5.9 Тестирање школских објеката у Краљеву

У току јесени 2010. извршена је масовна експертиза стања конструкција школских објеката после удара земљотреса и сви школски објекти су санирани технологијом ДЦ 90 са дамперима. Обављена су динамичка мерења пре и после санирања и констатовани ефекти повећања сигурности. Посебно је значајна гимназија (9000 m², масивни зидови вез вертикалних серклажа П+3) и електротехничка школа Никола Тесла (скелетни систем) у Краљеву сл. 110 и сл. 111.



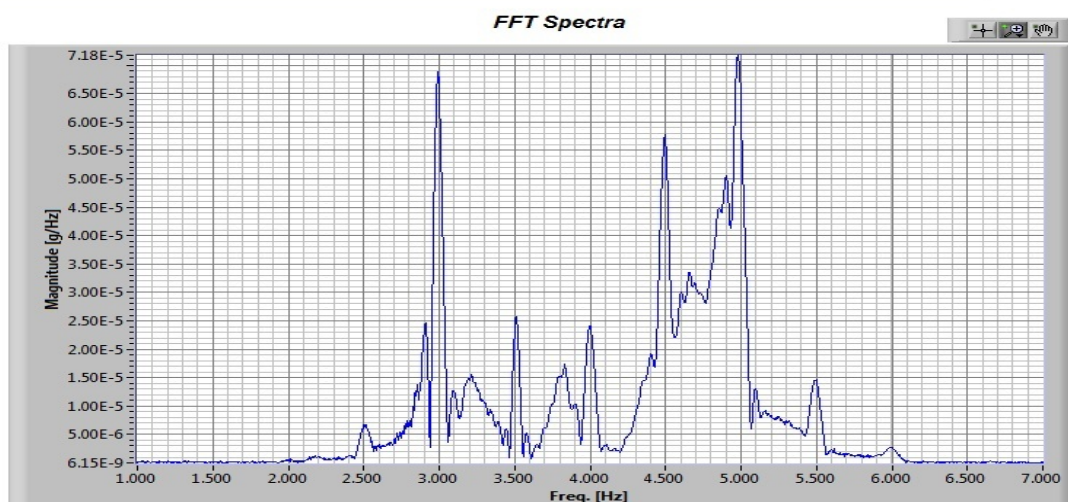
Сл. 110 Вертикално укрућење скелетног бетонског систем са новим вертикалама.

Сл. 111 Вертикално укрућење са дамперима коришћењем постојећих стубова

На сл. 112 и сл. 113 приказано је укрућење школе у пољу постојећег армиранобетонског скелета и дамperi на првом санираном школском објекту у Краљеву.



Сл. 112 Вертикално укрућење ОШ краљевачки партизани, Сл. 113. Дампер обојен на часу ликовног васпитања и различити типови дампера. Force in damper ± 1100 kN, displacement ± 5 mm. (and solid cross-section 50x80 mm.)



Сл. 114 Фреквентни спектар (max A,f), у правац за гимназију

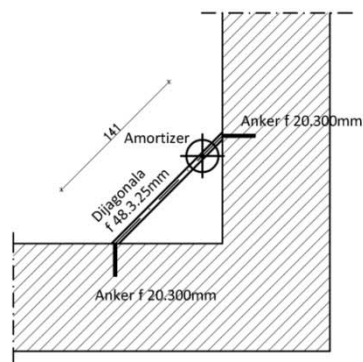
Примена технологије у Краљеву је показала високе технолошке и економске перформансе уз повећану сигурност. Тестирања су обављена од стране ИЗИС-а из Скопља и Иновационог Центра ДЦ 90.

5.10 Пројекти санације школских објеката у Пернику-Бугарска и трансфер технологије

Током 2012. године одржан је скуп активности на преношењу знања и едукацији (трансфер технологије) Бугарских специјалиста у Софији и Пернику. Овде се даје приказ цркве у Боснеку и гимназије Марије Кири.



характеристика щети



свѝрзваци стени

Црква Тодор Стратлат, с. Боснек, 1886.г.

 **SISTEM DC90, d.o.o.**
Research, Consulting, Engineering and Technology Transfer, EARETHQUAKE ENGINEERING INNOVATION CENTER
BELGRADE, www.dc90.co.rs

Сл. 115. Пројектно решење за цркву Тодор Стратлат у Боснеку, Перник

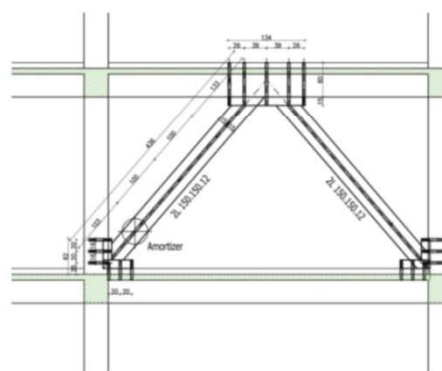
Сл. 116. Одвајање зидова

На цркви је после нелинеране динамичке анализе пројектован дијагонални елемент са дампером ДЦ 90, који придржава и контролише одвајање, масивних камених зидова дебљине 1.00 m. То је, слободно се може рећи, једино коректно

решење и начин како се може супроставити деструкцији и огромним динамичким силама које се јављају приликом одвајања зидова.



характеристика щети



DETALJ VERTIKALNOG UKRUĆENJA

ТПГ Марија Кири, 1972 г., Перник

 **SISTEM DC90, d.o.o.**
Research, Consulting, Engineering and Technology Transfer, EARETHQUAKE ENGINEERING INNOVATION CENTER
BELGRADE, www.dc90.co.rs

Сл. 117 Пројектно решење за Гимназију Марија Кири, Перник

У току процеса трансфера знања одржано је предавање на државном факултету УАСГ, презентација на факултету ВСУ, обављена су динамичка мерења и одржан је симпозијум у организацији кмета града Перника.

Свака апликација система је рађена са одређеном технолошком иновацијом и напредком у развоју технологије, уз многобројна тестирања, како на објектима тако и у лабораторијама.

6 Закључак

На основу вишегодишњих лабораторијских истраживања и испитивања, тестирања изведених објеката, развоја уређаја-дампера ДЦ 90 и анализа може се закључити следеће:

Нискоциклични замор (LCF) и релације добијене експерименталним и нумеричким анализама дефинишу односе за боље разумевање овог феномена. Број циклуса, величина акумуларне дилатације и вредност максималне дилатације детерминишу понашање елемената уређаја ДЦ 90.

Цео процес од ојачавања материјала, стабилизације и омекшавања нискоцикличног замор (LCF) је експериментално и нумерички детаљно анализиран.

Добијени резултати и дијаграми могу послужити за боље разумевање понашања уређаја ДЦ 90 и конструкција изложених јаким ударима земљотреса.

Уређај типа Canada Royal показао је капацитет од 195 циклуса са максималном амплитудом дилатација од $2 \times 5\% = 10\%$ и укупном акумулацијом дилатација од 19.5 што је неупоредиво више у односу на раније почетне конструкције уређаја и знања о феномену нискоцикличног замора (LCF).

Литература о замору материјала на циклична напрезања је бројна. Али, релативно мали број истраживача се бави замором материјала под врло малим бројем циклуса напрезања, као што је случај у земљотресним условима. Још је мањи број истраживања уређаја и опреме који контролишу нискоциклични замор, као што су хистерезисни метални дамperi-земљотресни амортизери. У том правцу је заштићен патентима један број нових уређаја чије се конструисање ослања или је потврђено овим истраживањима. То су патенти заштићени у САД, Аустралији и Србији (Patent in USA No.10/555,131 from 31.10.2005, patent in Australia No. AU 2003254327A1 FROM 2004.11.23., П 2010/0227, П 2010/0228, П 2010/0229). Добијени резултати могу бити од користи за увођење нових параметара у дефинисању пластичног понашања у пољу малог броја циклуса (LCF), посебно код комплексних програмских система као што је ANSYS и други. Потребно је извршити велики број експерименталних истраживања (за

разноврсне материјале) и сачинити графичке и нумеричке подлоге (зависности $N_f, \Delta\varepsilon, R, E$) које реално дефинишу хистерезисно понашање.

На основу досадашњих истраживања утврђени су параметри који дефинишу нискоциклични замор уређаја ДЦ 90 који су дефинисани кривама ($N_f, \Delta\varepsilon$) а у зависности од конструкцијског обликовања уређаја. Параметри којима се дефинише заморско понашање дампера у високопластичном цикличном напрезању са контролом деформације (пластичности) су:

Пречник \emptyset (односно процентат редуције основног попречног пресека, искуствено и експериментално то је минимум 20% редуције површине попречног пресека)

Дужина дела са редукованим попречним пресеком "пасја кост" (одговара максимално допуштеној дилатацији од 5% до 10%, што је искуствено и експериментално одређено и потврђено за одређене врсте конструкцијског челика-материјала који се користе за те потребе)

Површинска обрада елемента "пасја кост".

Елементи за обезбеђење локалне и глобалне стабилности и клизања, посебно за фазу притиска (бетонско језгро, алуминијумски и челични лимови, оловни прстенови),

Такође су од значаја:

C и γ – константе материјала и конструкције дампера и

Брзина промена деформација.

Од значаја је перформанса да обичан узорак од конструкцијског челика S235 оптерећен циклично на замор са максималном полуамплитудом дилатације од 5% издржи 12 циклуса а дампер типа Canada HQ Royal издржи 200 циклуса, такође оптерећен на исти начин (Patent in USA No.10/555).

Даља истраживања, како експериментална, тако и нумеричка могу ослањајући се на постојеће резултате да адекватно дефинишу хистерезисно понашање различитих материјала у пољу малог броја циклуса.

Посебно поље истраживања је стварање нових уређаја заснованих на изумима и новом стању технике, чиме ће се боље овладати контролом понашања и повећати сигурност конструкције.

7 Литература

1. G.Z. Nayak, O.C. Zeinkiewicz: "Elastoplastic Stress Analysis", *Int. J. Num. Meth. Engng.* 5, (1972), Page 113-135.
2. D. Šumarac and Z. Petrašković: "Hysteretic behavior of rectangular tube (box) sections based on Preisach model", *Archive of Applied Mechanics: Volume 82, Issue 10 (2012)*, Page 1663-1673.
3. F. Preisach, "Über die magnetische nachwirkung", *Z. Phys.* 94, (1935), Page 277-302.
4. M. Sekulović, "O nelinearој numeričkoј analizi konstrukcija", *Savremeni problemi nelinearne analize, Građevinska knjiga, Beograd*, (1992).
5. D. Šumarac, "Histerezisno ponašanje elasto-plastičnih materijala", *Savremeni problemi nelinearne analize, Građevinska knjiga, Beograd*, (1992).
6. P. Skuber, D. Beg, "Low-Cycle Fatigue of Steel Frames under Seismic Loading", *Steel Structures*, (2003).
7. C.A. L Calado, "Steel Beam to Column Connections Under low-Cycle Fatigue Experimental and Numerical Research", *Proc. Of XI Word Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico*, (1996).
8. A.A A. Umanski, "Konstrukterski priručnik", *Građevinska knjiga Beograd*, (1980).
9. J. Dufailly, and J. Lemaitre, "Modeling Very Low Cycle Fatigue", *Int. J. Damage Mechanics*, 4, pp. 153-170, (1995).
10. S.S Manson, "Behaviour of Materials under Conditions of Thermal Stresses", *N.A.C.A.. Tech. Note, 2933.*, (1954).
11. L.F. Coffin, "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses in a Ductile Metal", *Transactions of the A.S.M.E.*, 931, pp.76. (1954).
12. D. Šumarac, and D. Krajčinović, "Uvod u mehaniku loma", *Naucna knjiga, Beograd*. (1990).
13. Z Petraškovic, "Seismic Strengthening and protection of objects", *Monograph System DC 90, Innovation Centre Belgrade for Earthquake Engineering, Belgrade*, (2005).
14. Z.Petraskovic, D Šumarac, M. Anđelković, S. Miladinović, M.Trajković, "Retrofitting

- Damaged Masonry Structures by Technology DC 90", Structural integrity and life (IVK), Belgrade, Vol. 2, (2005), Page 59-71.*
15. *Patent in USA No.10/555,131 from 31.10.2005, patent in Australia No. AU 2003254327A1 FROM 2004.11.23.*
 16. *Z. Petrašković, S. Miladinović, D. Šumarac, "Technology of seismic strengthening of masonry structures by applying vertical ties and diagonals with seismic energy absorber System dc 90", International conference on earthquake engineering, Parallell Session, Topic: Retrofit of structures, p T6-9, August-september (2005).*
 17. *D. Šumarac, Z.Petraskovic, M. Maksimović, S. Miladinoić, I.Džuklevski, N. Trišović, "Seismic Retrofit of masonry structures applying vertical braces with dampers Sistem DC 90 and newly designed wall buildings", Internacionalni naučni skup, Žabljak Crna Gora, (2006), Page 373-381.*
 18. *Lj. Taskov, L. Krstevska, "The earthquake response", Institute IZIS, Skopje, Makedonia, (2005), Page 13-33.*
 19. *D. Šumarac, Z.Petraskovic, M. Maksimović, S. Miladinoić, J.Petrašković, "Structure Retrofit for residential house of Finlands Ambassador in Algier", Internacionalni naučni skup, Žabljak Crna Gora, (2006), Page 367-373.*
 20. *Z. Petraskovic, Ž. Petrašković, "From the anty-seismic dc 90 damper invention to its implementation all over four continents", Internacionalni naučni skup, Žabljak Crna Gora, (2008), Page 433-439.*
 21. *Lj. Tashkov, M. Manic, Z. Petrashkovich, R. Folich, B. Bulajich, "Experimental verification of dynamic behavior of "System DC 90" under seismic conditions", Belgrade (2003).*
 22. *Lj. Tashkov, M. Manic, " Shaking table test of a brick-masonry models in scale 1/10, strengthened by DC 90 System", Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University" Ss. Cyril and Methodius", Skopje, Republic of Macedonia, Skopje, (2004).*
 23. *Lj. Tashkov, M. Manic, Z. Petrashkovich, "Vibroplatform testing of brick- masonry models strengthened by System DC 90 in 1:10 ratio", JGDK Symposium, Vrnjacka Banja, (2004).*
 24. *F. Mazzolani, Z. Petraskovic, "Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies PROHITECH", Sixth Framework Program, Priority FP6-2002-INCO-MPC-1, WP6, Naples, (2004-2007).*

25. Z. Petraskovic, D.Sumarac, S. Miladinovic, M. Trajkovic, M. Andjelkovic, N. Trisovic, "Absorbers of seismic energy for damaged masonry structures", Alexandropoulos, ECF 16, World Association for Structure Integrity, (2006).
26. Lj. Taškov, L. Krstavka, "Experimental testing and strengthening of president palace in Alzir by DC 90 System", Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University "Ss. Cyril and Methodius", Skopje, Republic of Macedonia, Skopje, (2005).
27. Lj. Taškov, L Krstavka, Z. Petraskovic, "Experimental testing and strengthening of president palace in Baku by DC 90 System", Internacionalni naučni skup, Žabljak Crna Gora, (2008), Page, 475-481.
28. Lj. Taskov, L Krstavka, "La recherche des vibrations ambiantes", Institut IZIIS, Skopje, Macedonie, CGS, Algérie, (2003)
29. Lj. Taskov, L Krstavka, "La recherche des vibrations forcées- le séisme artificiel", Institut IZIIS, Skopje, Macedonie, CGS, Algérie, Alzir, (2003)
30. Lj. Taskov, L Krstavka, "Le rapport du contrôle d'entreprise des travaux", CTC, Ain Defla, Algérie, (2003).
31. H. Krawinkler & M.Zohrei, "Cumulative Damage Model in Steel Structures Subjecte to Earthquake Ground Motion, Computers & Structures, vol. 16, No 1-4, pp 531-541, (1983).

8 Попис основних ознака и кратица

ε -дилатација

σ -напон

E –почетни модул еластичности

E_h –модул линеарног ојачања

N_f - број циклуса замора

$\Delta\varepsilon_p$ - амплитуда пластичне акумулиране дилатације

C - константа материјала

γ - константа материјала

HCF- замор у пољу великог броја циклуса -high cycle fatigue

LCF-нискоциклични замор-low-cycle fatigue for

VLCF-замор у пољу врло малог броја циклуса-very low-cycle fatigue

FE -коначни елементи- Finite element

m - маса

k - крутост

p - кружна фреквенца

9 Списак фотографија, цртежа и табела

Списак слика

Сл. 1 Неки услови течења	6
Сл. 2 Вибратор ДЦ 90 у раду.....	13
Сл. 3 Систем са једним степеном слободе	14
Сл. 4 Хистерезисни дијаграм.....	14
Сл. 5. Систем са више степени слободе	15
Сл. 6 Спектар одговора система.....	16
Сл. 7 Дотеран спектар.....	16
Сл. 8 Амплификација померања у случају поклапања принудних и сопствених фреквенци.....	17
Сл. 9 Утицај пригушења на смањене амплитуда померања.	17
Сл. 10 Елементарни хистерезисни оператор представљен правоугаоном петљом.	18
Сл. 11 Еластопластичан материјал са линеарним ојачањем	19
Сл. 12 Главна хистерезисна петља и неколико повратних линија, које одговарају моделу материјала датом на сл.11.....	19
Сл. 13 Паралелна веза више еластопластичних елемената са линеарним ојачањем. .20	
Сл. 14 Геометрија узорка тестираног на различитим амплитудама дилатације $\Delta\epsilon$ (1%,3%,5%)	23
Сл. 15 Дијаграм максимална амплитуда силе-број циклуса за промену дилатација (0.5%, 1%, 1.5%, 1%, 0.5%) са приказом процеса ојачања.	24
Сл. 16 Дијаграм максималних амплитуда силе F (kN) за различите максималне дилатације ϵ (0.5%, 1%, 3% и 5%) за обичан узорак S275 у односу на број циклуса	25
Сл. 17 Дијаграм $\log(N_f)$ - $\log(\epsilon)$ за обичан узорак S235.....	25
Сл. 18 Дијаграм $\log(N_f)$ - $\log(\epsilon)$ за Дампер ДЦ 90	26
Сл. 19 Нелинеарни модел акумулираног оштећења	29
Сл. 20 Дијаграм зависности просечне акумулиране дилатације и броја циклуса у логаритамском однос CANADA HQL	32

Сл. 21 Дијаграм зависности просечне акумулиране дилатације и броја циклуса у логаритамском односу MIONICA	32
Сл. 22 Дијаграми ($N_f, \Delta \epsilon_r$) са приказом момента почетком омекшавања (пада силе за иста померања) у функцији просечне акумулиране дилатације	32
Сл. 23 Дијаграм силе и померања за оптерећење земљотресним записом	33
Сл. 24 Дијаграм број циклуса-акумулирана дилатација са приказом различитих поља замора материјала (VLCF, LCF, HCF)	34
Сл. 25 Дијаграм зависности вредности границе развлачења или максималне силе у односу на број циклуса за различите амлитуде дилатације $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$,	35
Сл. 26 Тестирање дампера типа "Bridge" $l=1000\text{mm}$ у војном Институту ВТИ у Београду,	37
Сл. 27 Дијаграм сила-померање за конструкцију дампера типа MOST	37
Сл. 28 Дампери – апсорбери сеизмичке енергије Kanada HQ Royal.....	42
Сл. 29 Радионички цртеж дампера типа Kanada HQ Royal, попречни и подужни пресек	42
Сл. 30 Сервохидраулични систем MTS	43
Сл. 31 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса	45
Сл. 32 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса.....	45
Сл. 33 Сила у функцији деформације (хистерезис), 1020 циклуса	46
Сл. 34 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса	46
Сл. 35 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 25 циклуса,.....	47
Сл. 36 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 25 до 140	47
Сл. 37 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 183	48
Сл. 38 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 183 до 1020	48
Сл. 39 Комплетна историја промене деформације	49
Сл. 40 Комплетна историја промене силе	49
Сл. 41 Хистерезис – комплетна историја	50
Сл. 42 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса	51
Сл. 43 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса.....	52

Сл. 44 Сила у функцији деформације (хистерезис), 537 циклуса	52
Сл. 45 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса	53
Сл. 46 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 140 циклуса.....	53
Сл. 47 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 184	54
Сл. 48 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 184 до 345	54
Сл. 49 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 345 до 382	55
Сл. 50 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса	56
Сл. 51 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса.....	57
Сл. 52 Сила у функцији деформације (хистерезис), 322 циклуса	57
Сл. 53 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса	58
Сл. 54 Сила у функцији деформације (хистерезис) у првих 15 циклуса.....	58
Сл. 55 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 15 до 140	59
Сл. 56 Сила у функцији деформације (хистерезис), циклуси 140 до 200	59
Сл. 57 Максимална/минимална деформација у функцији броја циклуса	60
Сл. 58 Максимална/минимална сила у функцији броја циклуса.....	61
Сл. 59 Апсорбована енергија у функцији броја циклуса	61
Сл.60 Дијаграм просечна акумулирана дилатација-број циклуса за дампер типа Kanada HQ Royal.	62
Сл. 61 Вибро платформа и актуатор са управљачким и електрохидрауличким системом.	63
Сл. 62 Актуатор и дампер типа Kanada HQL у току тестирања.....	63
Сл. 63 Хистерезисни дијаграм дампера Kanada HQL.	64
Сл. 64 Дијаграм померање-број циклуса	64
Сл. 65 Дијаграм максимална сила-број циклуса.....	65
Сл. 66 Узорак Kanada HQL за тестирање.....	65
Сл. 67 Фотографије из процеса производње дампера типа Kanada HQL	65
Сл. 68 Хистерезисни дијаграм, дијаграм сила-број циклуса и дијаграм енергија-број циклуса	66

Сл. 69 Хистерезисни дијаграм, дијаграм сила-број циклуса и дијаграм енергија-број циклуса	67
Сл. 70 Дијаграм број циклуса- просечна акумулирана дилатација за дампер типа Мионица	68
Сл. 71 Тест обичног узорка С235 на замор, ($\log N_f$, $\log \Delta \epsilon_p$) и упоредни рачунски дијаграм, ($\log N_f$, $\log \Delta \epsilon_p$) који показује врло добро поклапање	69
Сл. 72 Дијаграм максимална амплитуда силе-број циклуса за различите нивое дилатација.....	69
Сл. 73 Представља пресек по подужној оси амортизера,.....	72
Сл. 74 Приказује попречни пресек 'А-А' са сл.73 Слика 3 представља попречни пресек 'В-В' са сл. 73 Слика 4, представља попречни пресек 'С-С' са сл.73,	73
Сл. 75 Подужни пресек основне цеви 1 са сл.73	73
Сл. 76 Хоризонтални пресек 'С-С' са сл.79	75
Сл. 77 Пресек 'В-В ' са сл.79.....	75
Сл. 78 Приказује пресек 'А-А', са слике 79	75
Сл. 79 Пресек по подужној оси проналаска.....	77
Сл. 80 Попречни пресек 'А-А' сл.2 Слика 3, представља попречни пресек 'В-В' са сл.79	77
Сл. 81 Пресек по подужној оси основне цеви	77
Сл. 82 Кућа пре (лево) и после (десно) појачања Системом ДЦ 90 са дамперима	79
Сл. 83 Запис у реалном времену и Fourier амплитудни спектар	80
Сл. 84. Шема вибратора са масама m , на растојању r од центра осовине вибратора ..	80
Сл. 85. Диспозиција мерења дилатација у зидовима на углу објекта	81
Сл. 86 Модели на виброплатформи од шупље опеке (лево), од пуне опеке (средина) и од непечене опеке (десно).....	82
Сл. 87 Модел двоспратног зида пре ојачања (лево), после ојачања (у средини) и у фази тестирања (десно)	84
Сл. 88 Шема оптерећења и тестирања двоспратног зида	84
Сл. 89 Хистерезисни дијаграми зида, без (лево) и са ојачањем (десно).....	85

Сл. 90 Прорачунски модел резиденције , Сл. 91 Фреквентни спектар на основу мерених амбијенталних осцилација објекта.....	86
Сл. 92 Фасада резиденције, Сл. 93 Фреквентна крива доминантних фреквенција добијених програмом ATREMIS	87
Сл. 94 Вертикално укрућење са дампером у дну дијагонале и Сл. 95 Детаљ сидрења у нивоу подрума	87
Сл. 96 Вертикално укрућење са дамперима у подруму и Сл. 97 Вертикално укрућење са дамперима на спрату.	88
Сл. 98 Вертикални пресек са диспозицијом једног вертикалног укрућења са дамперима	88
Сл. 99 Дампер конектор типа Kanada HQL и Сл. 100 Машинска хала хидроелектране са генераторима	89
Сл. 101 Модел у размери 1:3 са уграђеним моделима дампера-конектора типа Kanada HQL пре тестирања на виброплатформи, и Сл. 102. Фреквентна крива доминантних фреквенција добијених програмом ATREMIS	89
Сл. 103 Дампер типа Kanada HQ Royal у фази динамичког тестирања и Сл. 104 Диспозиција вертикалних укрућења са дамперима типа Kanada HQ Royal.	90
Сл. 105. Диспозиција дампера конектора типа Kanada HQL за придржавање зидова на дејства управно на раван зида.....	91
Сл. 106 Фасада објекта у Бечићима, Сл. 107. Вертикални пресек конструкције са дамперима и косницима	92
Сл. 108. Основа са положајем вертикалних укрућења, Сл. 109 Фреквентни спектар за правац x на основу принудних вибрација вибратором ДЦ 90.....	92
Сл. 110 Вертикално укрућење скелетног бетонског систем са новим вертикалама. Сл. 111 Вертикално укрућење са дамперима коришћењем постојећих стубова.....	94
Сл. 112 Вертикално укрућење ОШ краљевачки партизани, Сл. 113. Дампер обојен на часу ликовног васпитања и различити типови дампера. Force in damper +-1100 kN, displacement +-5mm. (and solid cross-section 50x80 mm.).....	95
Сл. 114 Фреквентни спектар (max A,f), у правац за гимназију	95
Сл. 115. Пројектно решење за цркву Тодор Стратлат у Боснеку, Перник.....	96
Сл. 116. Одвајање зидова	96
Сл. 117 Пројектно решење за Гимназију Марија Кири, Перник.....	97

Сл. 118 Три нова модела дампера П-0227-0229 пре тестирања	118
Сл. 119 Исечена вертикална укрућења на подужној фасади Гимназије и Економске школе По+П+З	118
Сл. 120 Укрућења спремна за заливање ситнозрним бетоном од челичних елемената дим. 50x80 mm.	118
Сл. 121. Динамички тестови узорака опеке и малтера на смицање за три школе у Краљеву (Гимназија и Економска, ОШ Димитрије Туцовић и ОШ Јово Курсула).	119
Сл. 122 Лаки оплатни систем, Сл. 123 У Лабораторији ДЦ90 у току 3.иновационе колоније	119
Сл. 124 Иновациони Центар ДЦ 90 у Добри, Сл. 125 Серија узорака тестирана на замор	120
Сл. 126 Асортиман дампера Система ДЦ 90	121
Сл. 127 Скуп у лабораторији Института за испитивање материјала и конструкција ИМС, Београд, за време испитивања двоспратног зида ојачаног технологијом Система ДЦ 90, а поводом Министарске конференције Медитеранских земаља 2003.год. у Београду.	122
Сл. 128 Модел зида хидроелектране "Beauharnois"-Канада у размери 1:3 на вибро-платформи ИЗИИС-а у Скопљу.....	123

Списак табела

Табела 1 Коефицијенти C_i ($i=1,2,3$).....	7
Табела 2 Параметри материјала за S235	23
Табела 3 Акумулирана дилатација за узорак бр.1	44
Табела 4 Акумулирана дилатација за узорак бр.2	51
Табела 5 Акумулирана дилатација за узорак бр.3	55
Табела 6 Карактеристике актуатора.....	63
Табела 7 Приказ мерених убрзања, померања и дилатација за оптерећење у трансферзалном правцу, диспозиција 2.....	81
Табела 8. Измерене фреквенце за три објекта	81
Табела 9. Природне фреквенце три типа модела зида са и без ојачања за различита додатна гравитациона оптерећења масама од 10,20 и 30 кг.	83

Табела 10. Упоредна анализа мерених и прорачунских фреквенција.....	93
Табела 11. Померања врха конструкције за дејство Петровачког земљотреса са максималним убрзањем тла од 0.4g.....	93

10 Биографски подаци аутора

Лични подаци

Датум рођења: 28.05.1955.

Место рођења: Добра, СО Голубац, Србија

Адреса становања: Провалијска 97, Заклопача, Гроцка,

е-маил адреса: dc90@eunet.rs

Образовање

1973.г. Завршио Геодетско техничку школу у Београду као носилац Вукове дипломе.

1979.г. Дипломирао на Грађевинском факултету Универзитета у Београду на смеру за конструкције.

1982.г. Уписује постдипломске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, а 2007. полагао је и допунске испите на докторским студијама.

Радно искуство

1979.г. Запослио се у СОУР Утви, Велико Градиште где је радио на пословима пројектовања челичних конструкција, технолошке припреме, управљања пројектима и као директор ООУР.

1986.г. Ради у Пословној заједници произвођача елемената и објеката, ИМЕЛ-Београд, као руководиоца развојне службе.

1998.г. Запошљава се у Институту ИМС-Београд као истраживач до 2005. године.

2005.г. Ради као консултант у Систему ДЦ 90-Иновациони центар за сеизмичко инжењерство, Београд, и води Иновациони центар Савеза проналазача Београда.

Научно-истраживачки радови, патенти, награде и признања:

Објавио је 67 наслова радова и саопштења у домаћим и међународним часописима или саопштио их на домаћим и међународним конгресима. Има 15 патената заштићених у Србији, САД и Аустралији. Од тридесет значајнијих признања издваја се "Medaille d'or pour l'invention", Bruxelles EUREKA '97 и "Награда града Београда за 2003.г. ", Скупштина града Београда.

Пројектовао је и реализовао више значајних инжењерских објеката: неколико спортских хала (последња у Голубцу на Ђердапу). Решења новог Жежељевог моста преко Дунава у Новом Саду, као и моста преко реке Ђетиња код Ужица. Пројектовао је темеље штампарске машине за компанију Борба-Београд. Пројектовао је сеизмичко појачање конструкције резиденције Финског амбасадора у Алжиру, резиденције председника Азербејџана, пословни мол 80.000 m² у Баку, као и низ других објеката у зградарству и мостоградњи..

Члан је многобројних удружења (ДГКС, ДИВК, ДМС).

Редовни је члан од 2008. године и председник Академије изумитеља и научника Србије-САИН, Београд, од 2013. године.

Потпредседник је Управног одбора удружења грађана ЕТНО-ЕКО Госпођин вир, Београд.

Написао је две монографије и једну књигу.

11 Прилог

11.1 Опште

Скоро да је немогуће разумети понашање конструкција у потресним подручјима без познавања понашања свих материјала који је чине (бетон, челик, дрво, малтер, опека, камен и др.) која се посредством темеља (тракастих, самаца, плоча, шипова, бунара, дијафрагми и др.) ослања на тло (кохерентно или некохерентно са или без подземних вода и клизних равни), без узимања у обзир аспекта замора и механике лома.

Механика деформабилног тела дефинише односе између деформацијских величина (дилатација (ϵ), клизање (γ), померање(u), обртање(ϕ)) и напрезања у конструкцији (аксијални напони (σ и напони смицања (τ)) на основу деформацијских карактеристика конструкције у сва три правца у простору и услед дејства спољашних сила (утицаја сила и момената (P, M) и померања(u)) и сл.

Савремена истраживања разматрају и објашњавају енергију ширења прслина и J интеграл, дефинишу материјал на нивоу атома (са аспектом на везе између атома, растојање између атома, промену растојања (дилатација) и промену ротације).

Од посебног значаја су истраживања нискоцикличног замора која су обавили истраживачи у свету и то са аспекта цикличне пластичности, понашања челичних рамова на циклична оптерећења и утицаја површинске обраде и имперфекција и прслина-грешака на замор материјала. Посебно се разматрају Кофи-Мансонов закон $\Delta \epsilon_p N_f^\alpha = C_1$, Палмгрен-Минерово правило, и други резултати ранијих истраживања.

$$D(t) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i(t)}{N_i} \leq 1.0$$

Рачунају се гранични капацитети носивости елемената конструкције (где се рачуна гранична носивост елемената са граничним дилатацијама (ϵ_i) у бетону и

челику) и упоређују са граничним утицајима (M_i , N_i) који су срачунати са коефициентима преоптерећења (γ_i) у зависности да ли се ради о сопственој тежини (g), корисном оптерећењу (p) или изузетном оптерећењу (s, u).

У механици лома базира се истраживање понашања стања непосредно око прслине, енергија, пропација прслине, развој замора, док се у механици оштећења грађевинске конструкције посматрају истовремено на месту оштећења и на глобалном нивоу конструкције као целине.

Код зиданих конструкција оштећених после потреса утврђивања стања и појачање до жељеног степена сигурности је комплексно. Примењивана је технологија амбијенталних вибрација ради добијања динамичких карактеристика, периода и тонова осциловања, док се ваљаним снимањем геометрије оштећеног објекта и карактеристика материјала може срачунати маса и крутост и упоредити са крутошћу добијеном на основу динамичких параметара (периода и тонова осциловања). Испитивањем се такође одређује и коефицијент пригушења вибрација који је у зависности од врсте конструкције, врсте веза елемената конструкције и врсте тла на које је објекат фундиран. После ојачања објекта применом конструкцијског Система ДЦ 90 обавља се тест на принудне вибрације које се изазивају вибраторима постављеним у вишим етажама. Ови вибратори могу изазвати резонантно стање задавањем хармонијске силе са фреквенцијом која се поклапа са властитим фреквенцијама објекта при чему су вибрације сличне оним изазваним реалним земљотресом мањег интензитета.

У дугом временском периоду извршена су перманентна иновирања конструкције, испитивања на моделима у лабораторијама пет Института и на реалним објектима, а и обављена је примена (апликација) кроз трансфер технологије и испитивања на потресе изведених објеката изазваних вештачким земљотресом (принудне вибрације). Испитивања су обављена у Институту за испитивање материјала Србије у Београду, Војнотехничком Институту ВТИ у Београду, Институту за сеизмичко инжењерство и инжењерску сеизмиологију ИЗИИС из Скопља, Македонија, Лабораторијама Грађевинско-геодетског Института у Љубљани, Словенија, као и у државном Институту CGS у Алжиру. Без експерименталних испитивања и нумеричке анализе тешко је разумети

стварно понашање овог уређаја и конструкције као целине. Прва испитивања почела су 1989. године у Институту ИМС-у и настављена су по динамици како се обављао развој и потреба апликације Система.

Као значајнија испитивања, из великог броја испитивања, могу се навести следећа:

1. Двооксијална испитивања дампера типа X, (хистерезисни дијаграм сила-померање), ИМС, 1989.
2. Једнооксијално испитивање модела дампера типа "Ф" за зидане конструкције, (хистерезисни дијаграм сила-померање).
3. Испитивање ојачаног објекта Љубомира Лазића у Љигу на осцилације и напрезања изазвана извођењем објекта из равнотежног положаја са мерењем дилатација и динамичких карактеристика.
4. Испитивање двоспратног модела зидане конструкције са и без дампера са појавом прслина и до лома на квазидинамичка оптерећења. (хистерезисни дијаграм сила-померање са мерењем дилатација у вертикалама и дијагоналама и померања врха конзоле модела у функцији оптерећења. Континуирано праћење настанка и развоја прслина и пукотина, њихово обележавање и праћење.)
5. Испитивања на амбијантелне вибрације (микротремови) више објеката оштећених земљотресом у колубарском објекту са узимањем у обзир интеракција тло-објекат и мерењем пригушења.
6. Испитивање ојачаног објекта технологијом ДЦ 90 на вештачки потрес-принудне вибрације вибраторима ИЗИИС из Скопља у месту Мионица на објекту Радована Марковића.
7. Испитивање серије модела дампера типа Мионица на динамичка испитивања са различитом фреквенцијом и опсегом дилатација од 1% до 5% и анализом акумуларних дилатација, енергије и броја циклуса у зависности од начина динамичког оптерећивања.
8. Испитивања 24 модела различитих иновираних конструкција дампера у лабораторији факултета у Љубљани у оквиру Евромедитеранског пројекта PRONITECH.

9. Испитивање модела дампера модификованог типа Мионица + и Алжир за потребе експеримента на резиденцији финског амбасадора у Алжиру у Институту ВТИ.
10. Динамичка испитивања Института CGS из Алжира објекта резиденције Финског амбасадора у Алжиру на вештачки процес путем принудних вибрација.
11. Динамичка испитивања у Институту ВТИ серије модела дампера типа Мост за примену код мостовских конструкција
12. Динамичка испитивања модела дампера-конектора типа Kanada HQL, Kanada HQM, Kanada HQ Royal, за потребе конекције зидане конструкције за металну конструкцију машинске хале хидроелектране и трафостанице у Квебеку.
13. Динамичка испитивање нове конструкције дампера пуног пресека за потребе санације председничке резиденције у Баку-Азербејџан.
14. Динамичка испитивања објеката у Краљеву на амбијенталне и принудне вибрације (Основна Школа Димитрије Туцовић и Гимназија)
15. Динамичка испитивања објеката у Бечићима на амбијенталне и принудне вибрације (Нова зидана конструкција П+4 безгредна конструкција укрућена Системом ДЦ 90)

Осим тога развијена је технологија појачања нових зиданих конструкција у Бјељини и појачање и сеизмичко обезбеђење торња висине $H_h=40,0$ m за веслачке спортове у Азербејџану као илустрација примене Система ДЦ 90. Развијена је методологија нелинеарне динамичке анализе у програму САП 2000 са приказом дампера као линкова.

Сва обављена истраживања, испитивања и нелинеарни динамички прорачуни, као и патентирана конструкцијска решења представљају обимну грађу и њихов приказ је селектован са аспекта приказа величине доприноса иноваторству и науци. Рад је фокусиран на одабрану тему, па су испитивања и истраживања селектовано приказани по тој основи.

11.2 Селектован приказ примене изума и асортиман дампера

Из разлога сагледавања користи ових истраживања следи кратак селективан приказ примене изума широм света.

Реализовани патенти, сл.118, на објектима на четири континента (Северна Америка, Азија, Африка и Европа)



Сл. 118 Три нова модела дампера П-0227-0229 пре тестирања

Сл. 119 Исечена вертикална укрућења на подужној фасади Гимназије и Економске школе По+П+З



Сл. 120 Укрућења спремна за заливање ситнозрним бетоном од челичних елемената дим. 50x80 мм.

На слици 120 укрућења се заливају ситнозрним бетоном. Сидрење је обављено у армиранобетонске зидове посредством металних анкерних трнова који се заливају полимерном амесом-малтетом, Полимаг ХК02.



Сл. 121. Динамички тестови узорака опеке и малтера на смицање за три школе у Краљеву (Гимназија и Економска, ОШ Димитрије Туцовић и ОШ Јово Курсула).

Тестови, сл.121, имају за циљ не само да утврде динамичке карактеристике зидова школа у Краљеву већ да буду основа за проучавање понашања промена карактеристика у пољу малог броја циклуса, сл.125.

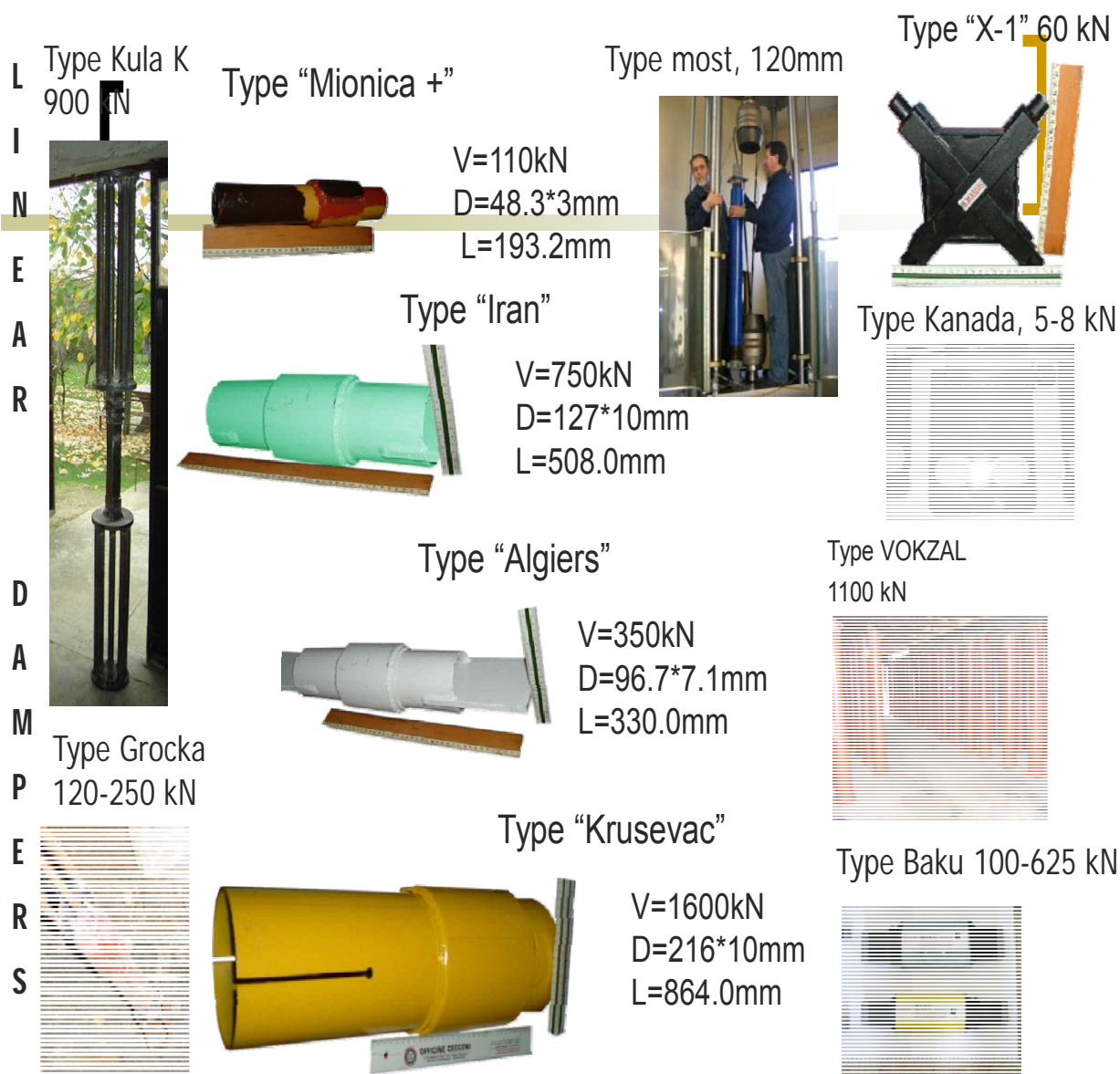


Сл. 122 Лаки оплатни систем, Сл. 123 У Лабораторији ДЦ90 у току 3.иновационе колоније



Сл. 124 Иновациони Центар ДЦ 90 у Добри, Сл. 125 Серија узорака тестирана на замор

Осим система конструкција високе сигурности у сеизмичким условима развијени су и оплатни системи , сл.122. Презентација резултата истраживања и размена искустава вршена је на иновационим колонијама, сл.123 и сл.124.



Сл. 126 Асортиман дампера Система ДЦ 90

На сл.126 презентован је један део асортимана дампера Система ДЦ 90, док се на сл.127 и сл.128 приказују лабораторијски тестови у Београду и Скопљу.



Сл. 127 Скуп у лабораторији Института за испитивање материјала и конструкција ИМС, Београд, за време испитивања двоспратног зида ојачаног технологијом Система ДЦ 90, а поводом Министарске конференције Медитеранских земаља 2003.год. у Београду.



Сл. 128 Модел зида хидроелектране "Веаиһапоис"-Канада у размери 1:3 на вибро-платформи ИЗИИС-а у Скопљу.

Прилог 1.

12 Изјава о ауторству

Потписани-а Зоран Петрашковић

број индекса 1/1982

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НИСКОЦИКЛИЧНИ ЗАМОР КОД ЈЕДНООКСИЈАЛНОГ НАПРЕЗАЊА ДАМПЕРА-АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ СИСТЕМА ДЦ 90

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта



У Београду, 1.02.0213.

Прилог 2.

13 Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Зоран Петрашковић

Број индекса: 1-1982

Студијски програм: Грађевинарство

Наслов рада: **НИСКОЦИКЛИЧНИ ЗАМОР КОД ЈЕДНООКСИЈАЛНОГ НАПРЕЗАЊА ДАМПЕРА-АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ СИСТЕМА ДЦ 90**

Ментор: *Проф Др Драгослав Шумарац, дипл.инж.грађ.*

Потписани: Зоран Петрашковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанта



У Београду, 01.02.2013.

Прилог 3.

14 Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НИСКОЦИКЛИЧНИ ЗАМОР КОД ЈЕДНООКСИЈАЛНОГ НАПРЕЗАЊА ДАМПЕРА-АПСОРБЕРА СЕИЗМИЧКЕ ЕНЕРГИЈЕ СИСТЕМА ДЦ 90

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 01.02.2013.

Потпис докторанта

