

EKSPERIMENTALNA ANALIZA DUŠILCA ZA DISIPACIJO POTRESNE ENERGIJE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF EARTQUAKE ENERGY ABSORBER DEVICE

asist. dr. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad.

pskuber@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

dbeg@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK: 624.014.2:624.042.7:624.072

Povzetek | V članku je predstavljena eksperimentalna raziskava jeklenega dušilca s komercialnim imenom DC90, ki je namenjen protipotresni zaščiti stavb. Dušilec, izdelan iz votle cevi, je narejen iz mehkega konstrukcijskega jekla. Nosilnost dušilca je določena z natezno in s tlačno osno nosilnostjo oslabiljenega prereza cevi, ki je posebej oblikovan in predstavlja jedro naprave. Duktilnost je določena z vzdolžnimi plastičnimi deformacijami jedra, kjer je lokalno izbočenje stene jedra preprečeno. Sposobnost disipacije potresne energije je odvisna od odpornosti proti nizkocikličnemu utrujanju. Dušilec je vgrajen v centrično povezje, ki ga lahko pod pogojem, da je uklonska nosilnost diagonale povezja večja od nosilnosti dušilca, uvrstimo v skupino povezij – znano pod imenom BRB (Buckling Restrained Bracing).

Kljub temu da je dušilec v preteklosti že bil testiran, patentiran kot sistem DC90 in tudi uporabljen v praksi, smo se v okviru evropskega raziskovalnega projekta PROHITECH (Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies) odločili za dodatne preiskave in naredili serijo cikličnih testov na vzorcih dušilcev. Z različnimi obremenilnimi protokoli smo ugotovili najvažnejše lastnosti, kot so obnašanje dušilca pri različnih amplitudah vzdolžnih pomikov in pri različnih hitrostih obremenjevanja ter vpliv lokalnega izbočenja pločevine.

Na osnovi analize eksperimentalnih rezultatov smo predlagali nekatere izboljšave tako glede konstrukcijskih detajlov kot tudi oblikovanja samega jedra v območju oslabiljenega prereza cevi. Na novi seriji testov smo učinkovitost izboljšav tudi eksperimentalno potrdili.

Predstavljena raziskava je jasno pokazala, da je uporaba izboljšanega dušilca omejena, in sicer na primere, kjer imamo opravka z relativno majhnimi pomiki.

Summary | Detailed experimental investigation of the steel dissipative device with a commercial name DC90 for the seismic protection of buildings is presented. The DC90 system belongs to a family of yield metal devices, made of mild steel hollow tubular sections. The strength is defined with axial load resistance in tension and compression of the weakened cross-section, acting as a dog bone system and representing the core element of the device. Ductility is governed by longitudinal plastic strain and the dissipation capability depends on the low cycle fatigue resistance, provided that local and global buckling is prevented. The device is intended to be used with concentric bracing, which belongs to the family of buckling restrained bracings (BRB). The common characteristic of BRB is buckling prevention of the compressed element.

Although the device has already been tested in the past, patented as a DC90 system and has been also used in practice, a new set of tests with different cyclic loading protocols was carried out in the framework of the European research project PROHITECH (Earthquake protection of historical buildings by reversible mixed technologies). The main aim of the experimental research was to establish the most important characteristics, such as device behaviour at different displacement amplitudes and strain rates, and local buckling resistance in compression.

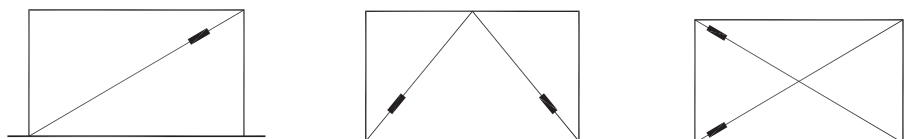
After the analysis of results some improvements were proposed related to construction details and to the shape of cut-outs in the dog bone area. The improvements in the device behaviour were confirmed by the second set of tests. The presented investigation clearly indicates that the improved device can be successfully used only in the range of small displacements.

1 • UVOD

V okviru evropskega raziskovalnega projekta PROHITECH (Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies, VI. okvirni program) smo v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani naredili obširno eksperimentalno raziskavo dušilca, ki je namenjen protipotresni ojačitvi objektov (Skuber, 2008). Uporaba dušilca kot del centričnega povezja je v svetu poznana, največkrat se uporablja za ojačitev stavb, ki imajo nosilno konstrukcijo, narejeno iz jeklenih ali iz armiranobetonskih okvirjev. Dušilec je bil razvit v podjetju Sistem DC 90 iz Beograda in bil v preteklosti že testiran in tudi že uporabljen v praksi (Petrasković, 1997). Je sestavni del jeklenega centričnega povezja, s katerim je stavba ojačana. Uporabljen je bil za ojačitev zidov opečnih in kamnitih stavb. Povezje je bilo v večini primerov vgrajeno v sam zid (slika 2).

Vemo, da so zidane stavbe veliko ranljivejše kot jeklene ali armiranobetonske. Pri ojačitvah zidanih stavb z jeklenimi povezji moramo biti še posebej pozorni na velikost pomikov. Horizontalni pomiki, ki v jeklenem povezu povzročijo samo linearne raztezke, lahko v zidovju povzročijo že resne razpoke. Še več, dušilec, vgrajen v povezje, dovoljuje še dodatne pomike.

DC90 spada v skupino dušilcev, kjer se potresna energija disipira s plastičnimi deformacijami jeklenega elementa. Dušilec je narejen iz jeklene okrogle votle cevi. Prerez cevi je na določenem mestu oslavljen tako, da je iz dveh strani izrezana ovalna luknja. Oslabljeni del cevi predstavlja jedro naprave, kjer so pri potresu dovoljene plastične deformacije. Prerezan dušilec je prikazan na sliki 3.



Slika 1 • Protipotresna ojačitev armiranobetonskih okvirjev z vertikalnim jeklenim povezjem in dušilcem

Glavna lastnost dušilca se odraža v sposobnosti disipiranja potresne energije. Pri ciklični obtežbi, ki povzroči plastifikacijo jedra, nastopi nizkociklično utrujanje materiala (Beg in Skuber, 2003). Raziskali smo tiste lastnosti, ki najbolj vplivajo na nizkociklično utrujanje

materiala. Življenjska doba dušilca in kapaciteta disipirane energije sta v prvi vrsti odvisni od štirih parametrov: nosilnost prereza jedra, velikost plastičnih deformacij, hitrost plastičnih raztezkov (Beg, 2000) in število ciklov histereznih zank.



Slika 2 • Dva primera vgradnje jeklenih povezij z dušilci v steno zidanega objekta

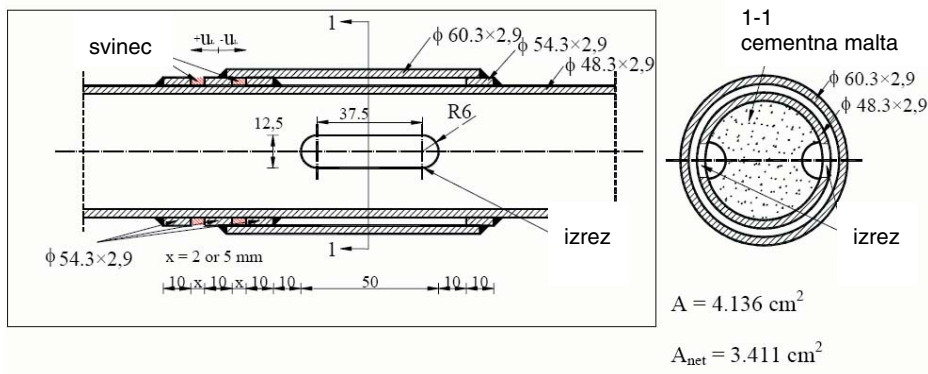
Eksperimentalni rezultati so odkrili nekatere pomanjkljivosti, ki so ključnega pomena za učinkovito uporabo. Na osnovi lastnih testov in analiz smo dušilec delno spremenili in s tem izboljšali njegovo obnašanje. Izkazalo se je, da je treba posebno skrb nameniti oblikovanju jedra, kjer igra odločilno vlogo sama oblika izreza.



Slika 3 • Originalni dušilec, prerezan na dva dela

2 • TESTI NA ORIGINALNIH DUŠILCIH

Prva serija testov je bila narejena na 12 enakih preizkušancih. Vzdolžni in prečni prerez dušilca sta prikazana na sliki 4. Sestavljen je iz dveh cevi, notranje in zunanje. Notranja cev je oslabiljena z dvema ovalnim izrezoma. V območju oslabitve je cev zapolnjena s cementno malto, ki preprečuje lokalno izbočenje pločevine navznoter. Lokalno izbočenje na zunanjo stran je preprečeno z zunanjo cevjo, vendar je vmes 2,9 mm praznega prostora. Med polnilom in cevjo ni ločilne plasti, ki bi zagotavljala neovirano drsenje med cementno malto in notranjo steno jeklene cevi. Zunanja cev je na desni strani izreza privarjena na notranjo, medtem ko je na levi strani prosta. Tako je omogočeno prosto gibanje dušilca v vzdolžni smeri do mejnega pomika ± 2 milimetra, pri nekaterih vzorcih pa ± 5 milimetrov. Pomike, ki so večji od omenjenih, preprečujejo jekleni obroči, privarjeni na notranjo cev. Jekleni obroči v primeru pretrganja jedra dušilca predstavljajo varovalko, ki preprečuje porušitev celotnega sistema. V rego med obroči je vstavljen svinec, ki blaži udarec med pločevinami. Nosilnost dušilca v nategu je enaka osni nosilnosti oslabiljenega

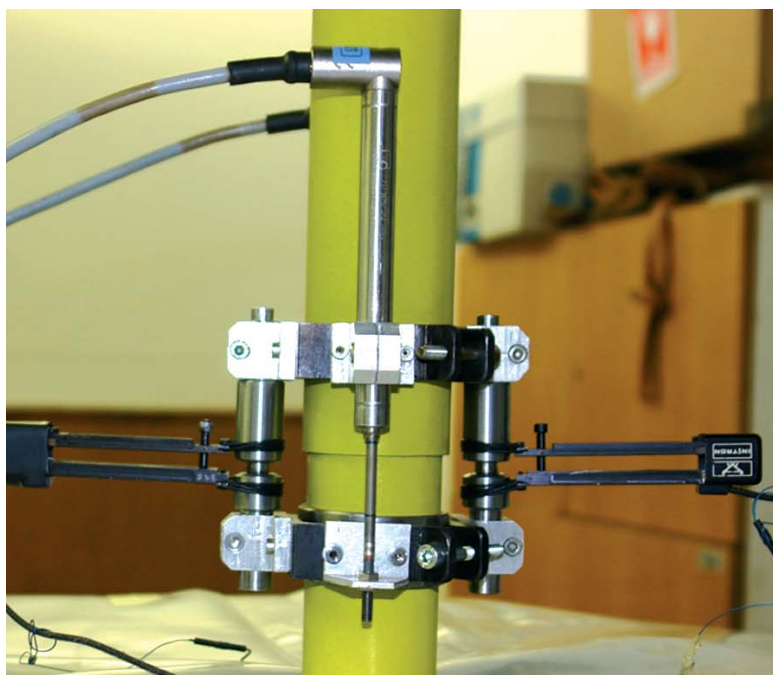


Slika 4 • Shematski prikaz originalnega dušilca za prvo serijo testov

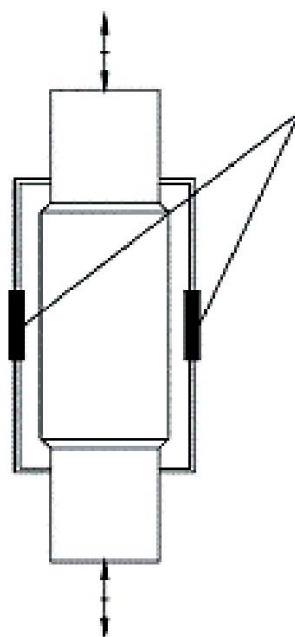
prereza, tlačna nosilnost pa je odvisna od nevarnosti lokalnega izbočenja stene notranje cevi. Največji pomik dušilca je določen z razmikom med obroči. Cevi so iz jekla S235.

Testi so bili narejeni na preizkuševalni napravi INSTRON s kapaciteto 1000 kN statične obtežbe in ± 500 kN dinamične obtežbe. Preizkušanci so na obeh straneh vpeti v čeljusti preizkuševalne naprave. Obremenitev v obliki vsiljenih pomikov je vodena preko

dveh dinamičnih ekstenziometrov, merilcev pomikov. Skupaj še z dvema dodatnima merilcema pomikov sta ekstenziometra pritrjena na preizkušanece preko posebnega pritrdilnega sistema, kot prikazuje slika 5. Tak način kontrole vodenih pomikov nam omogoča meritev neposredno v območju jedra dušilca. S tem se izognemo napaki v meritvah, ki so posledica elastičnih deformacij preizkušanca izven merilnega območja kot tudi zdrsa v čeljustih.



Slika 5 • Merilni instrumenti, pritrjeni na preizkušane



Merilci pomikov,
pritrjeni na
preizkušane

Obremenilni protokol je prikazan v preglednici 1.

Številka testa	Vrta obremenitve	Frekvenca (Hz)	Hitrost deformacij (s^{-1})
1M	Monotono natezno test		
1C	Stohastično, $u^* = \pm 0,5, 1,0, 2,0$ mm	0,1, 0,5, 1, 2, 4	0,005–0,43
2C	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	1	0,11
3C	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	4	0,43
4C	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	3	0,32
5C	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	0,025	0,003
6C	Ciklični test, $u = \pm 2$ mm	1	0,21
7C	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	0,025	0,003
8C	Ciklični test, $u = \pm 0,5$ mm	1	0,05
9C	Ciklični test, $u = \pm 0,5$ mm	4	0,21
10C	Ciklični test, $u = \pm 0,35$ mm, do 4,9 mm, po 3 cikle	0,005–0,07	0,002
11C			

* Amplituda vsiljenih pomikov pri cikličnem obremenjevanju

Preglednica 1 • Obremenilni protokol prve serije testov

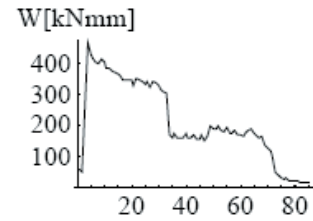
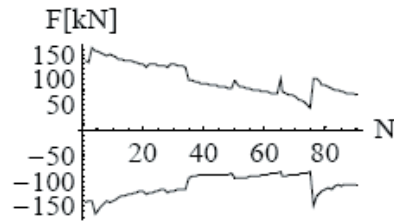
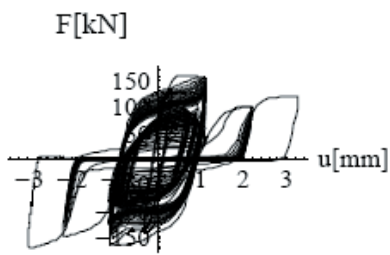
Narejenih je 11 cikličnih testov in en monotono natezni. Dva preizkušanca, 10C in 11C, imata dovoljene pomike do 5 milimetrov, ostali 2 milimetra. Ciklični testi se med seboj razlikujejo po amplitudi vsiljenih pomikov v obliki sinusne krivulje in po hitrosti obremenjevanja. Hitrost deformacij je tako regulirana preko frekvence cikličnega obremenjevanja. Pri testih 1C, 10C in 11C je amplituda pomikov spreminjajoča, pri drugih je konstantna; pri testu 1C se amplituda spreminja stohastično, pri testu 10C in 11C pa po priporočilih ECCS (ECCS, 1986). Po priporočilu se po vsakih treh ciklih s konstanto amplitudo ta poveča za dvakratnik prvotne amplitude, ki predstavlja mejo plastifikacije jadra. Preizkušanci so bili testirani do porušitve. Poleg oblike porušitve so glavni rezultat testov histerezne zanke sila–pomik ($F-u$). Vsako stotinko sekunde je odčitana sila F na bat INSTRON-a in pomik u na merilnem območju, in predstavlja povprečje vseh štirih merilcev pomika. Iz oblike porušitve in iz histereznih zank lahko ugotovimo, ali se dušilci pri cikličnem obremenjevanju obnašajo ustrezno ali ne. Testi so pokazali, da je samo pri petih cikličnih testih od enajstih prišlo do pravilne porušitve, pretrganja oslabiljenega dela cevi. Pri teh testih je doseženo večje število ciklov pred porušitvijo, histerezne zanke so simetrične in stabilne. Pri vseh ostalih testih je porušitev izven oslabiljenega prereza. Vzrokov je več: nepravilna oblika izreza oslabilitve, nekvadratna izdelava samih preizkušancev.

Histerezna zanka $F-u$

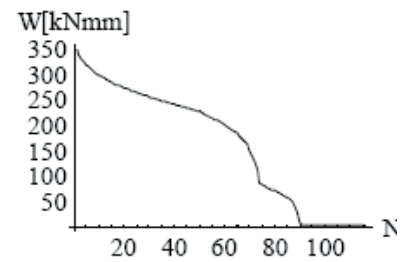
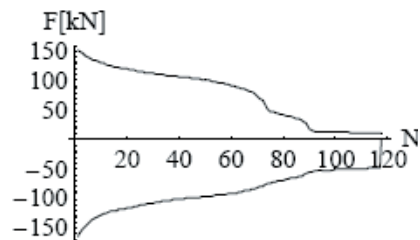
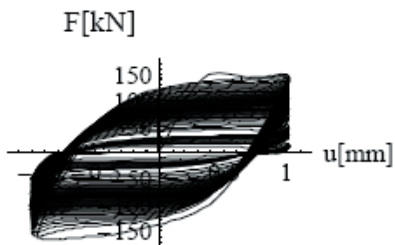
Diagram $F-N$

Diagram $W-N$

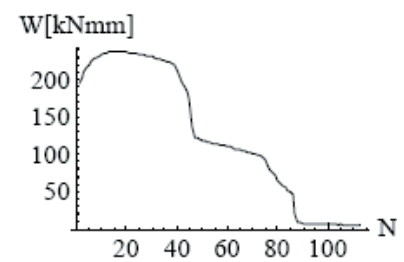
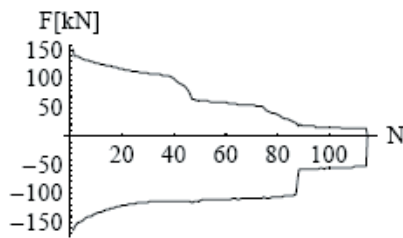
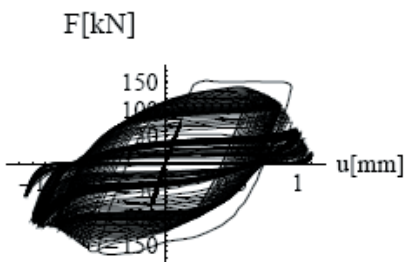
Test
števila



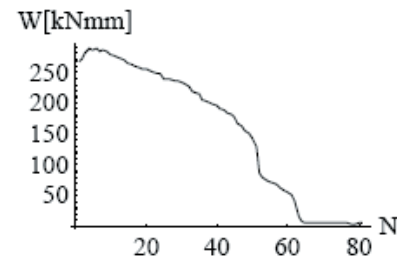
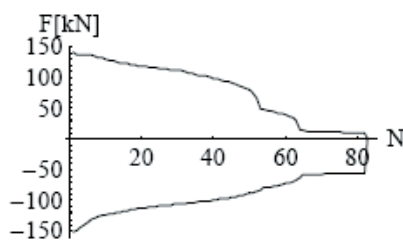
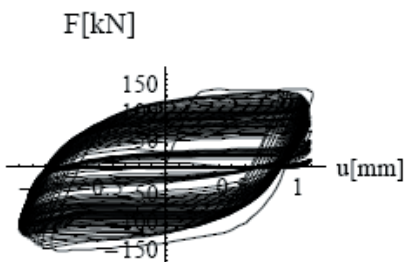
1C



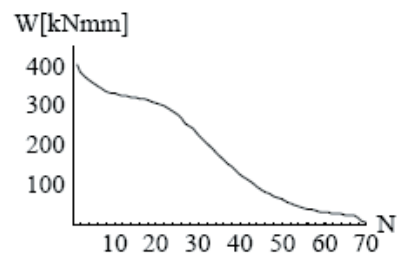
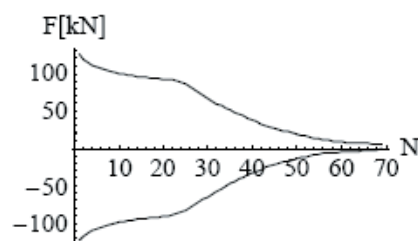
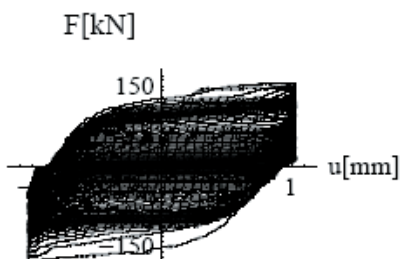
2C



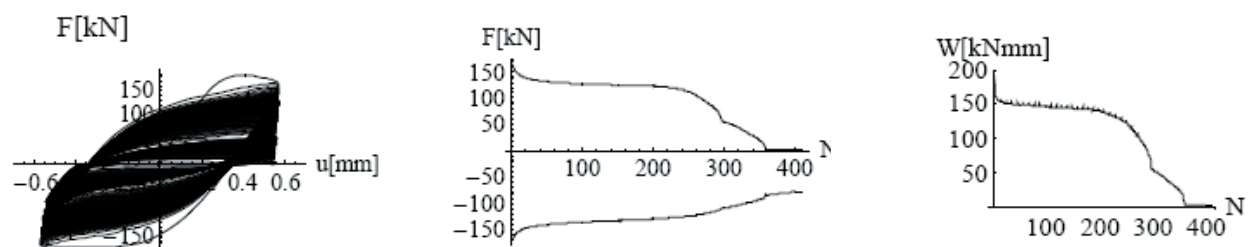
3C



4C



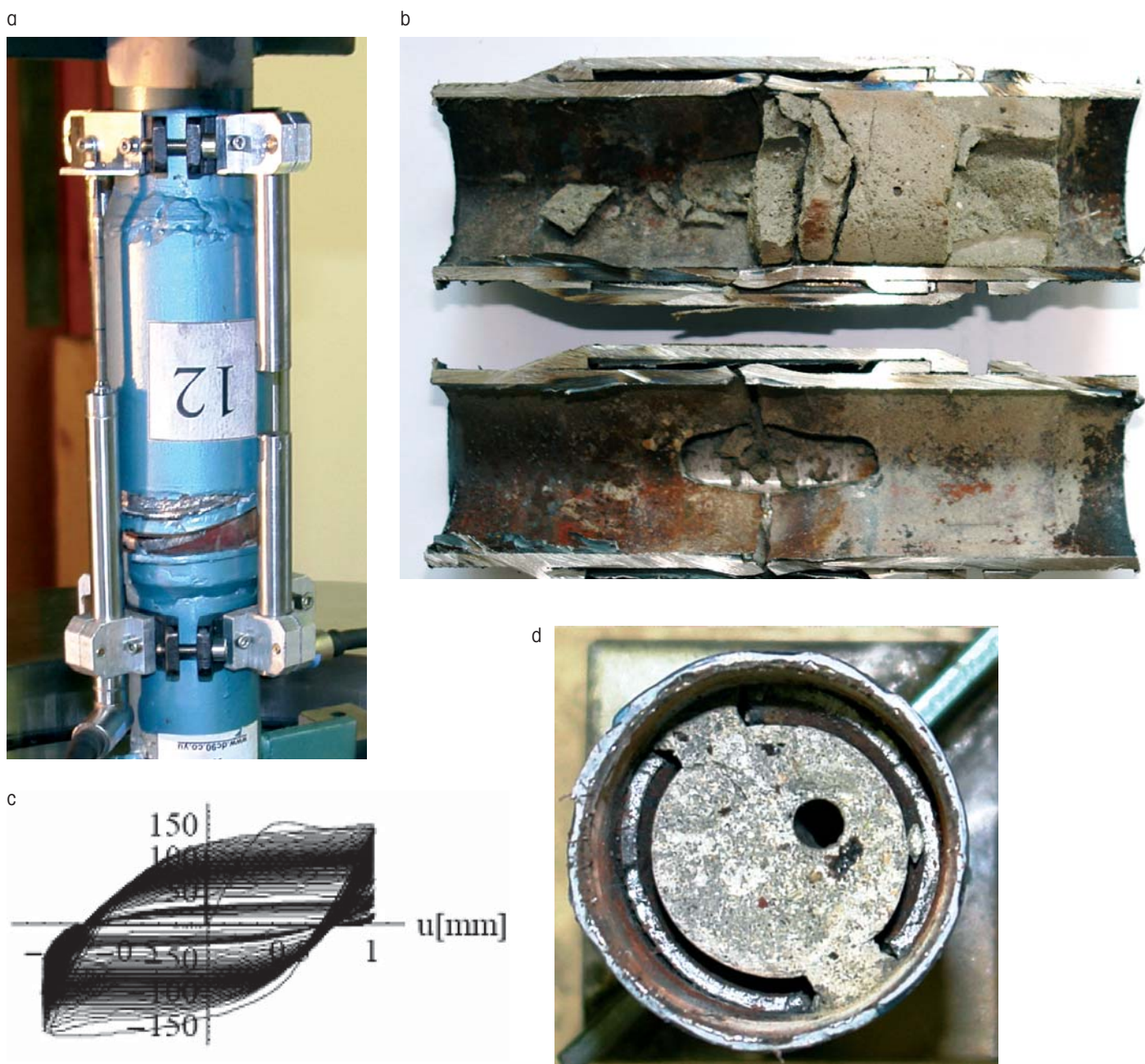
7C



8C

Legenda: F ... sila, u ... pomiki, N ... število ciklov, W ... energija

Preglednica 2 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov prve serije



Slika 6 • Ciklični test 2C s konstantno amplitudo pomika $u = \pm 1$ mm; pretrganje cevi v območju oslabiljenega prereza

V preglednici 2 so prikazani rezultati cikličnih testov; histerezne zanke, diagrami $F-N$, in diagrami $W-N$. V diagramih $F-N$ je F največja sila v posameznem ciklu N , v diagramih $W-N$ pa je W energija posameznega cikla N . Energija W je definirana kot površina pod histereznimi zankami.

Na sliki 6a je prikazan porušen preizkušanelec z oznako 2C po končanem testu. Dušilec je bil obremenjen s cikličnimi vsiljenimi pomiki s konstantno amplitudo ± 1 milimeter. Porušil se je po 71 ciklih. Oblika porušitve je pravilna; zaradi nizkocikličnega utrujanja nastane razpoka v steni cevi v območju oslabljenega prereza (glej sliko 6b). Na isti sliki vidimo močno deformirano steno notranje cevi, tik ob pretrganju. Ta je posledica lokalnega

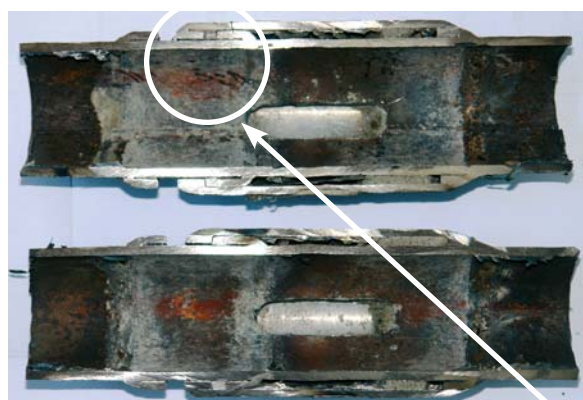
izbočenja pločevine navzven. Lokalno izbočenje navznoter je uspešno preprečeno s polnilom iz cementne malte (slika 6d). Zaradi lokalnega izbočenja pločevine se povečajo plastične deformacije, kar ima neposredni vpliv na zmanjšanje življenjske dobe materiala oz. število ciklov do porušitve. Poleg tega nosilnost dušilca z večanjem števila ciklov hitro pada, kar je razvidno iz histereznih zank sila–pomik na sliki 6c.

Na sliki 7 je porušen preizkušanelec z oznako 11C po končanem cikličnem testu z naraščajočo amplitudo pomikov. Porušitev je nastopila v 14. ciklu pri amplitudi pomikov 1,75 mm, kljub temu da je imel dušilec omogočene pomike do petih milimetrov. Še več, do porušitve ni prišlo v oslabljenem,

ampak v polnem prerezu (slika 17a). Na oslabljenem delu prereza ni opaziti razpoka (slika 17b, 17c). Med cikličnim obremenjevanjem je pri določenem pomiku prišlo do preskoka plastičnega polja deformacij iz neto v bruto prerez. Do preskoka plastičnega polja je prišlo tako zaradi izotropnega utrjevanja, ki je značilno za utrujanje materiala, kot tudi zaradi svinca v regi, ki ovira prosto gibanje dušilca v vzdolžni smeri tudi pri pomikih, ki so manjši od petih milimetrov (slika 7d). Pri počasnem obremenjevanju svinec lahko služi kot dodatni dušilec in se pri povečani obremenitvi iztisne iz rege. Pri dinamičnem, hitrejšem obremenjevanju pa se svinec upira skoraj kot togo telo in ne vrši predvidene funkcije.



a

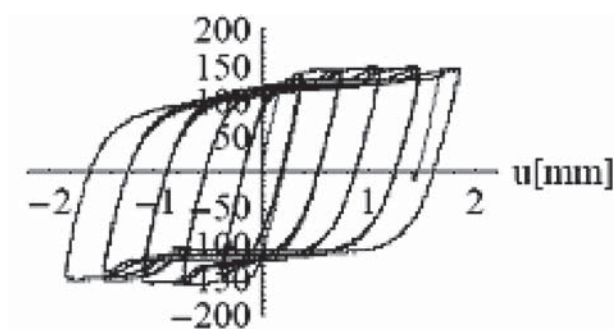


b

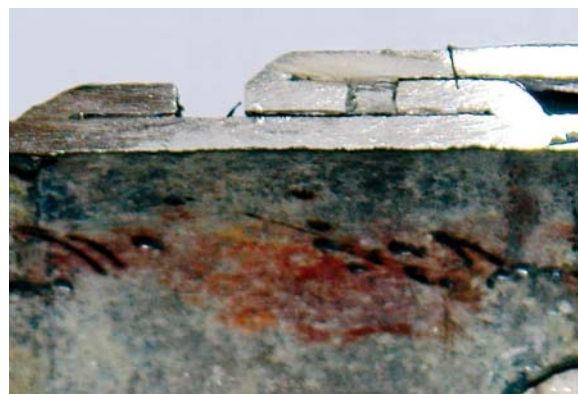
svinec v regi



c



d



e

Slika 7 • Ciklični test 11C z naraščajočo amplitudo pomika u ; pretrganje cevi izven oslabljenega prereza

Glavni razlog za preskok polja plastičnih deformacij iz neto v bruto prerez cevi je nepravilna oblika izreza oslabitve. Če razmerje med dolžino in širino izreza ni pravilno, obstaja nevarnost, da je zaradi utrjevanja materiala v plastičnem področju nosilnost neto prereza

večja od nosilnosti bruto prereza. Že z enostavnim računom natezne nosilnosti bruto $N_{pl, Rd}$ in neto $N_{net, Rd}$ prereza cevi lahko ugotovimo, da sta si obe vrednosti preveč blizu. Z enačbo (1) in (2) je izračunana nosilnost z nominalno mejo tečenja f_y in nominalno

natezno trdnostjo f_t .

$$N_{pl, Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} = 4.136 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23.5 \text{ kN / cm}^2}{1.0} = 97.2 \text{ kN} \quad (1)$$

$$N_{net,Rd} = 0.9 \cdot A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \cdot 3.411 \cdot \frac{36}{1.25} = 88.4 \text{ kN} \quad (2)$$

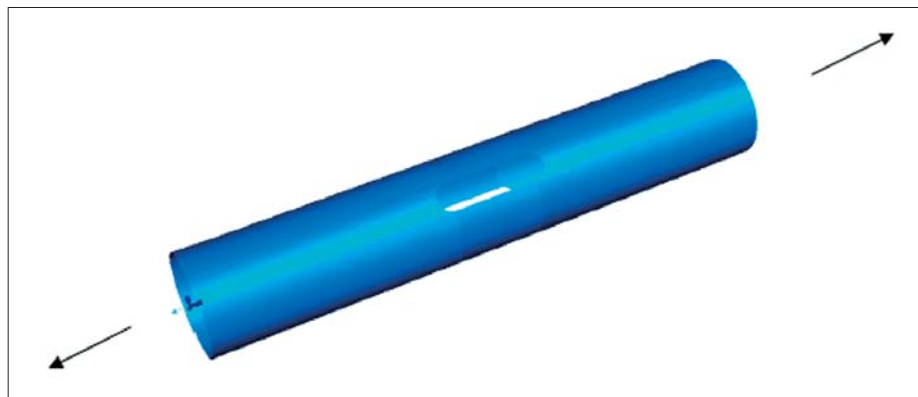
Če upoštevamo eksperimentalno določeno mejo tečenja f_y in pričakovano mejno nosilnost f_u je nosilnost bruto in neto prereza skoraj enaka:

$$N_{pl,u} = A \cdot f_y = 4.136 \text{ cm}^2 \cdot 31.5 \text{ kN / cm}^2 = 130.3 \text{ kN} \quad (3)$$

$$N_{net,Rd} = A_{net} \cdot f_u = 3.411 \text{ cm}^2 \cdot 37.8 \text{ kN / cm}^2 = 128.9 \text{ kN} \quad (4)$$

Poleg kriterija nosilnosti igra pomembno vlogo tudi dolžina oslabitve. Iz literature (Pilusso, 2005) je poznan analitični izraz za izračun potrebne dolžine oslabljenega prereza. Predlagana dolžina oslabitve ne sme biti manjša od $5,65 \sqrt{A_{net}}$. V našem primeru je dejanska dolžina oslabitve 37,5 milimetra, kar je veliko manj od priporočene vrednosti $5,65 \sqrt{341,1} = 104$ milimetre.

Vpliv oblike izreza na preskok polja plastičnih deformacij iz neto v bruto prerez je prikazan z numerično analizo. V računalniškem pro-



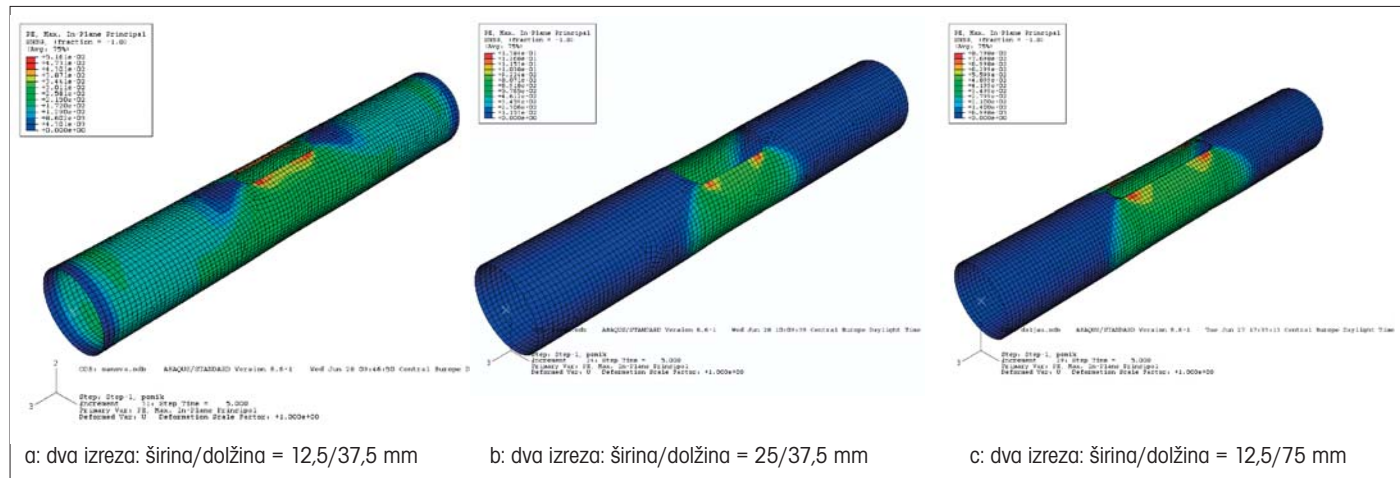
Slika 8 • Numerični model cevi dušilca z dvema izrezoma

gramu ABAQUS so modelirane cevi dušilca s tremi različnimi oblikami izreza. Stena cevi je modelirana s ploskovnimi končnimi elementi, nelinearni materialni model pa z eksperimentalno določenimi mehanskimi lastnostmi materiala, iz katerega so izdelane cevi. Model je na eni strani nepomično podprt, na drugi strani pa je obremenjen z vzdolžnim pomikom 5 milimetrov (slika 8).

Na sliki 9 vidimo polje plastičnih deformacij za tri različne oblike oslabitev cevi. V primeru izreza, ki je enak originalnim dušilcem, je

plastificirana celotna cev (slika 9a). Na sliki 9b je širina luknje dvakrat večja od prvotne. Omejitev plastifikacije v območju oslabitve dobimo, če spremenimo bodisi širino luknje (slika 9b) ali dolžino izreza (slika 9c).

Ker z rezultati ne moremo biti zadovoljni, smo se odločili za izdelavo nove serije dušilcev. Poskušali smo odpraviti čim več pomanjkljivosti in tako izboljšati obnašanje samega dušilca. Izdelana je bila nova serija preizkušancev sistema DC90.



Slika 9 • Plastične deformacije pri pomiku 5 milimetrov za tri različne oblike izreza

3 • TESTI NA NOVIH DUŠILCIH

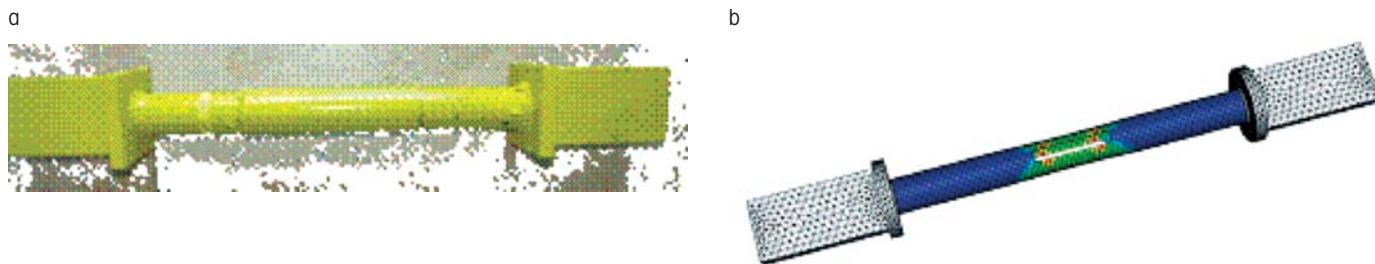
Novi izrez v steni lukenj omejuje plastifikacijo dušilca samo na območje oslabljenega prereza za razliko od originalnega dušilca, kjer se je plastificirala cev tudi v polnem, bruto prerezu (slika 10).

Lokalno izbočenje notranje cevi navzven je preprečeno z zunanjo cevjo, ki tesno ob-

jema notranjo cev brez praznega prostora, kot je to bil slučaj na prvotnih dušilcih. Polnilo iz cementne malte preprečuje lokalno izbočenje stene cevi navznoter. Med polnilom in cevjo dušilca je vgrajen ločilni sloj v obliki tanke jeklene pločevine. Med delovanjem dušilca naj bi ločilni sloj omogočil

neovirano drsenje med cevjo dušilca in polnilom.

V novih dušilcih nismo vgradili svinca zaradi omenjenih negativnih učinkov pri ciklični obtežbi. Poleg tega so novi dušilci brez reg, ki bi sicer omejevale vzdolžne pomike dušilca. To na rezultate nima nobenega vpliva, ker nas v naši raziskavi ne zanima obnašanje sistema po porušitvi neto prereza notranje cevi. Na obeh straneh je na preizkušanece privarjena dodatna pločevina,



Slika 10 • 10a Preizkušane 10b Polje plastičnih deformacij pri vzdolžnem pomiku 5 milimetrov

preko katere je dušilec vpet v napravo za preizkušanje.

Za določitev osnovnih mehanskih lastnosti materiala, iz katerih so izdelane cevi, so bili narejeni trije standardni natezni testi. Izmerjena je napetost na meji elastičnosti $f_y = 399$ MPa, natezna trdnost $f_u = 430$ MPa in deformacija

na meji porušitve $\varepsilon_{\text{porušitev}} = 0,19$. Razlika med izmerjeno napetostjo na meji tečenja in med natezno trdnostjo je mala, kar na plastifikacijo, ki mora biti omejena samo na neto prerez, ne vpliva ugodno.

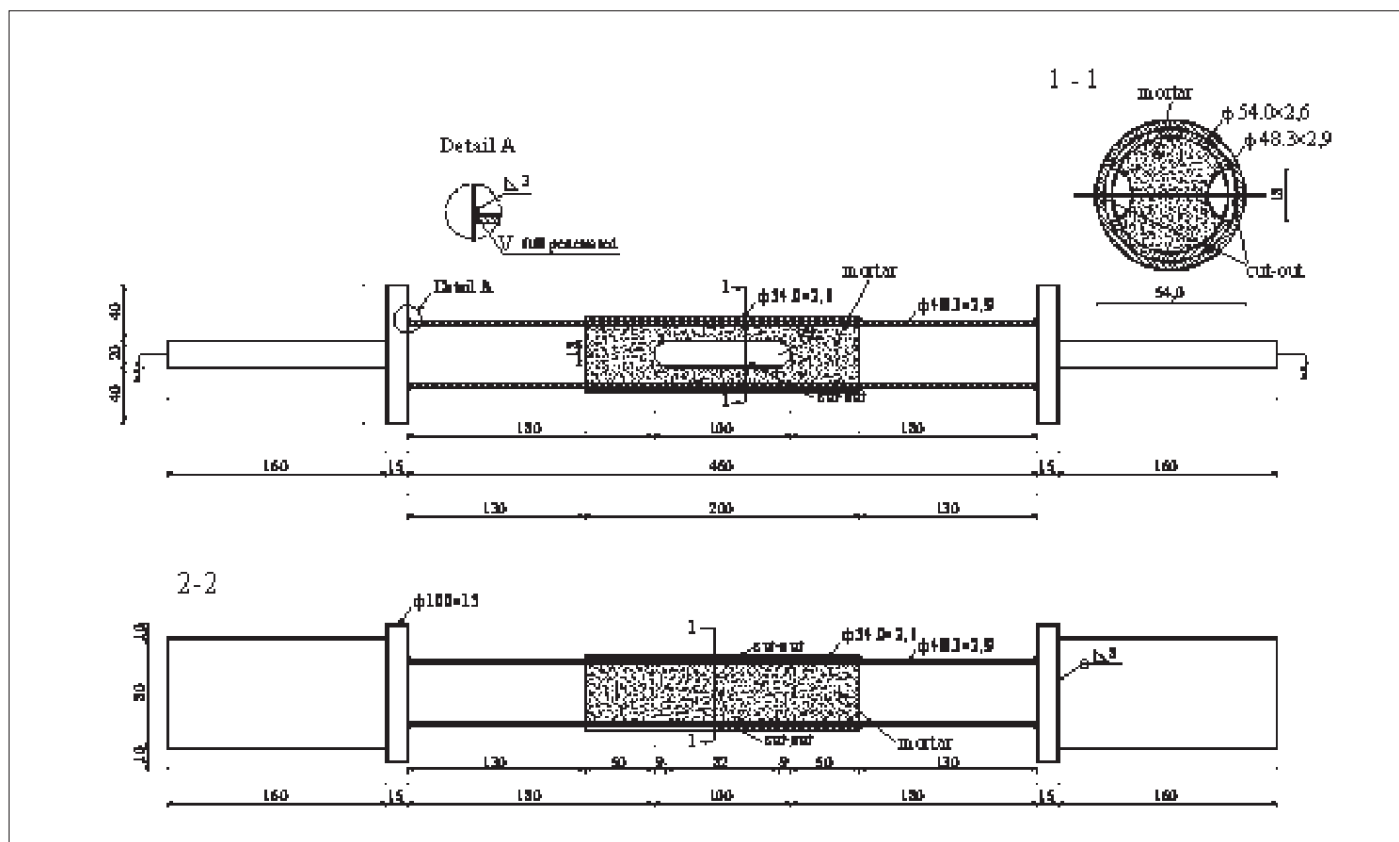
Na osnovi kemične analize je ugotovljeno, da je cev izdelana iz maloogljiknega jekla, ki se

uporablja največkrat za hladno preoblikovanje. Kemična sestava cevi $\varnothing 48,3 \times 2,9$ je prikazana v preglednici 3.

Obremenilni protokol je podoben prvi seriji, narejenih je 12 novih testov: en natezni test, ostali so ciklični z različno amplitudo in z različno frekvenco (preglednica 4).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,09	< 0,013	0,500	0,010	0,015	0,013	0,010	0,03	0,012	0,038

Preglednica 3: Kemična sestava cevi dušilca (%) druge serije testov



Slika 11 • Shematski prikaz druge serije preizkušancev

Številka testa	Vrsta obremenitve	Frekvenca (Hz)	Hitrost deformacij (s ⁻¹)
1	Monotono natezni test		
2	Ciklični test, $u^* = \pm 0,5$ mm	0,1	0,002
3		4	0,1
4	Ciklični test, $u = \pm 1$ mm	0,05	0,002
5		1	0,05
6		1	0,05
7		2	0,1
8	Ciklični test, $u = \pm 2$ mm	0,025	0,002
9		1	0,1
10	Ciklični test, $u = \pm 4$ mm	0,0125	0,002
11		0,5	0,1
12	Ciklični test, $u = \pm 0,35$ do $\pm 3,50$ mm, po tri cikle	0,01 do 0,1	0,002

*Amplituda vsiljenih pomikov pri cikličnem obremenjevanju

Preglednica 4 • Obremenilni protokol druge serije testov



a

Ciklični test številka 4, amplituda pomikov $u = \pm 1,0$ mm



b

Ciklični test številka 10, amplituda pomikov $u = \pm 4,0$ mm

Slika 12 • Porušitev vzorcev v neto prerezu cevi; a) nepoškodovano betonsko polnilo; b) porušeno betonsko polnilo in lokalno izbočenje pločevine

Amplituda vsiljenih pomikov je med 0,5 milimetra in 4 milimetri. Frekvenca ustreza hitrosti deformacij od 0,002 s⁻¹ do 0,1 s⁻¹. Pri testu številka 12 je amplituda pomikov vsake tri cikle povečana za dvakratnik pomika, ki povzroči plastifikacijo neto prereza dušilca. Pri ostalih cikličnih testih je amplituda pomikov konstantna vse do porušitve vzorca.

Pri vseh testih je prišlo do enake vrste porušitve, pretrganja v neto prerezu cevi zaradi nizkocikličnega utrujanja. Pri vzorcih, kjer je bila amplituda pomikov manjša (0,5 in 1,0 milimeter), je razpoka v steni cevi nastala brez lokalnega izbočenja pločevine. Na sliki 12a je lepo vidna razpoka v steni cevi, betonsko polnilo je nepoškodovano, pločevina ni vidno deformirana. Pri večjih pomikih pa je prišlo do nezaželenega pojava, lokalnega izbočenja pločevine. Na sliki 12b vidimo pretrganje cevi v oslabiljenem delu, pločevina je močno deformirana. Vzrok je polnilo iz cementne malte, ki se je porušilo in povzročilo lokalno izbočenje. Porušitev polnila je posledica slabega delovanja ločilnega sloja v obliki tanke pločevine med polnilom in cevjo dušilca.

V Preglednici 5 so zbrani rezultati cikličnih testov, število ciklov pri porušitvi N , za različne amplitude pomikov in hitrosti deformacij. V literaturi (Skuber, 2003) je poznanih več kriterijev za izbiro števila ciklov pri porušitvi. Izbrana sta dva, ki sta v literaturi največkrat uporabljena, nosilnost in energija. V preglednici je podano število ciklov, kjer nosilnost oz. energija pade za 10 %, 30 % in 50 % glede na vrednost v drugem ciklu obremenjevanja. Izračun je narejen na osnovi histerezniških zank sila–pomik. Za porušitev pri nizkocikličnem utrujanju materiala štejemo nastanek makrorazpoke, kateri sledi hitra porušitev prereza. Nastanek makrorazpoke lahko dovolj dobro ocenimo iz diagramov F-N in W-N, kjer je narisana največja sila v posameznem ciklu F oz. energija W v odvisnosti od števila ciklov N . Tu je energija W definirana kot površina pod histerezniškimi zankami. Če primerjamo med seboj oba kriterija, padanje nosilnosti in energije, ugotovimo, da je število ciklov do porušitve približno enako. Za vse teste je značilno, da se 10-odstotni padec nosilnosti zgodi zelo hitro, v prvih nekaj ciklih, medtem ko se 50-odstotni padec nosilnosti zgodi tik pred porušitvijo neto prereza cevi. V našem primeru za porušitev lahko predpostavimo 30-odstotno redukcijo nosilnosti ali energije.

Iz rezultatov testov, ki so podani v preglednici 4, lahko ugotovimo tudi vpliv hitrosti deformacij na nizkociklično utrujanje materiala. Pri vseh testih lahko ugotovimo, da je število

Številka testa	Amplituda pomikov (mm)	Hitrost deformacij (s^{-1})	Zmanjšanje nosilnosti na cikel za			Zmanjšanje energije na cikel za		
			10 %	30 %	50 %	10 %	30 %	50 %
2C	$u = \pm 0,5$	0,002	12	147	671	17	164	687
3C		0,1	13	98	845	18	121	862
4C	$u = \pm 1$	0,002	11	241	255	8	245	258
5C		0,05	14	115	142	17	134	145
6C		0,05	9	204	211	15	211	212
7C		0,1	7	192	238	16	201	237
8C	$u = \pm 2$	0,002	9	35	39	7	34	40
9C		0,1	6	30	37	11	32	38
10C	$u = \pm 4$	0,002	8	10	11	8	10	11
11C		0,1	7	9	10	7	9	10

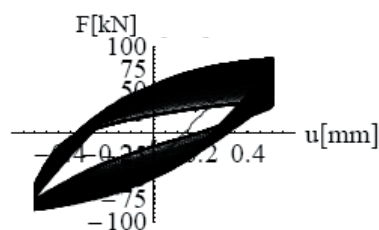
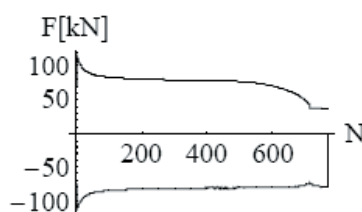
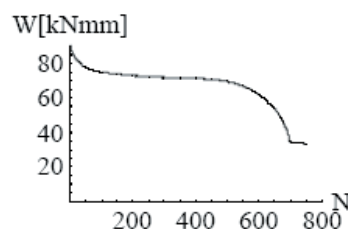
Preglednica 5 • Število ciklov do porušitve N , druge serije preizkušancev

ciklov do porušitve večje pri počasnejšem utrujanju oz. pri manjši hitrosti deformacij kot pri utrujanju z večjo hitrostjo vsiljenih pomikov. Število ciklov do 30 % redukcije nosilnosti ali energije je pri hitrosti deformacij $0,002 s^{-1}$ pri isti amplitudi pomikov največje in pri hitrosti deformacij $0,1 s^{-1}$ najmanjše. Izjema v pravilu se pojavi samo enkrat, in sicer pri amplitudi pomikov 1,0 milimeter, kjer je najmanjše

število ciklov pri hitrosti deformacij $0,05 s^{-1}$ in ne pri $0,1 s^{-1}$, kot je to slučaj pri vseh ostalih amplitudah. V vseh primerih je število ciklov do porušitve zelo veliko.

Rezultati cikličnih testov z amplitudo 0,5 milimetra (2C in 3C) so prikazani v preglednici 6 in izkazujejo dobro obnašanje dušilca. Histerezne zanke sila–pomik ($F-u$) so simetrične, kar pomeni enako obnašanje

dušilca v nategu in v tlaku. Poleg tega so zanke stabilne, kar se kaže v počasnem padanju nosilnosti z večanjem števila ciklov. Porušitev nastopi v neto prerezu brez lokalnega izbočenja pločevine. V preglednici 6 so prikazane tudi histerezne zanke pri obremenilnem protokolu, kjer je vsake tri cikle povečana amplituda vsiljenih pomikov (12C).

Histerezna zanka $F-u$ Diagram $F-N$ Diagram $W-N$ 

Test številka

2C

Legenda: F ... sila, u ... pomiki, N ... število ciklov, W ... energija

Preglednica 6 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov druge serije 2C, 3C in 12C

Nekoliko slabše obnašanje dušilca je pri amplitudi 1 milimeter in več. Porušitev je pričakovana, v neto prerezu. Zaradi slabe kvalitete polnila nastopi lokalno izbočenje pločevine in s tem večje plastične deformacije. Proces utrujanja je zaradi tega pospešen,

kar se kaže v hitrejšem padanju nosilnosti in energije z večanjem števila ciklov. Ta pojav nastopi pri testih z večjo amplitudo, 2 milimetra in več. Histerezne zanke po določenem številu ciklov postanejo nesimetrične zaradi lokalnega izbočenja stene cevi navznoter. Pri

testih 8C do 11 C sila F v tlaku nepričakovano naraste, tik preden doseže končni pomik (preglednica 7). Pojav se lepo vidi na diagramih $F-N$. Povečanje sile pripisujemo trenju, ki nastane med notranjo in zunanjo cevjo, ki sicer tesno nalegata ena na drugo.

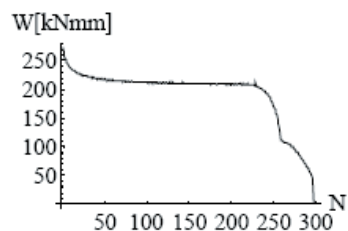
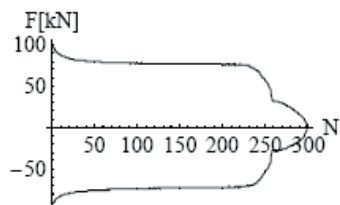
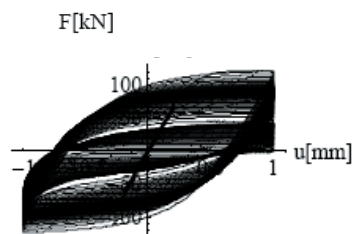
Preglednica 6 • Število ciklov do porušitve N , druge serije preizkušancev

Histerezna zanka $F-u$

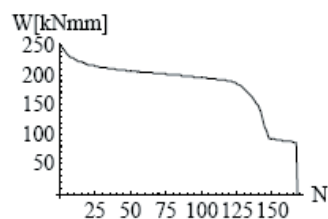
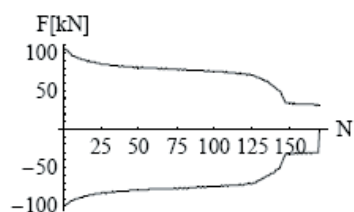
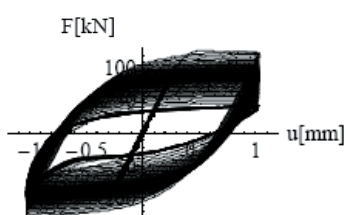
Diagram $F-N$

Diagram $W-N$

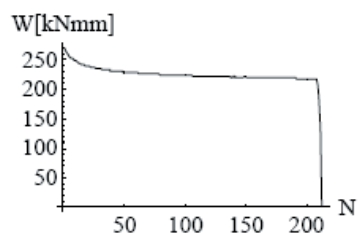
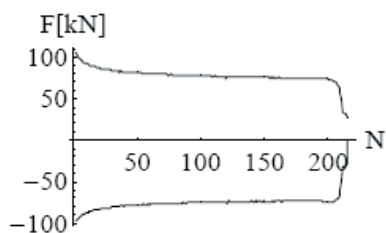
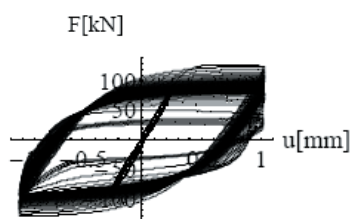
Test
števila



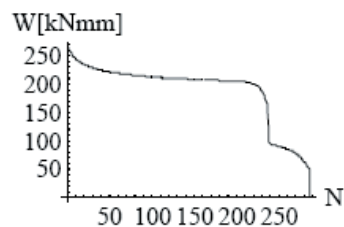
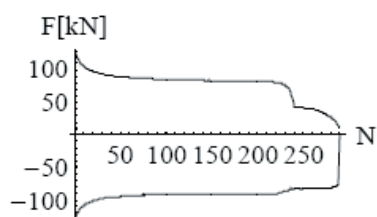
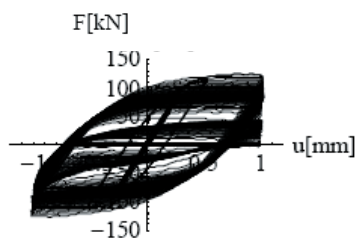
4C



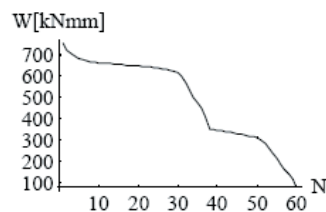
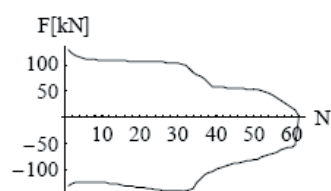
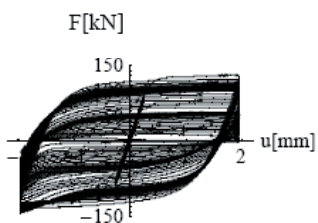
5C



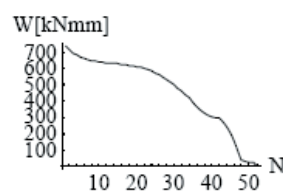
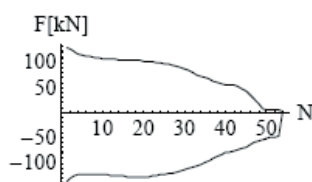
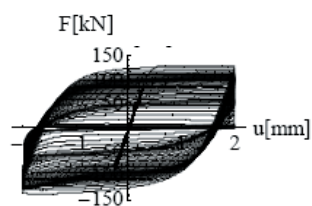
6C



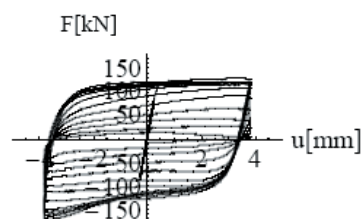
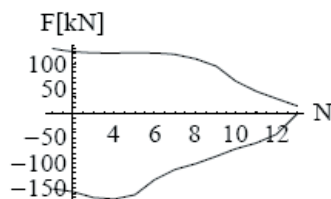
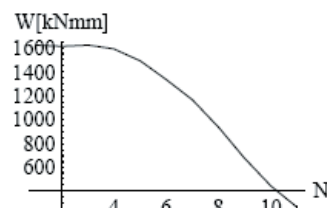
7C



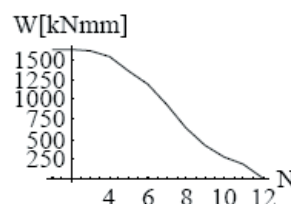
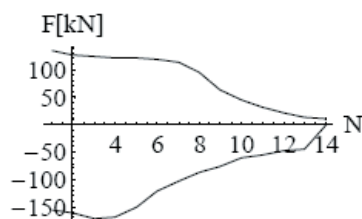
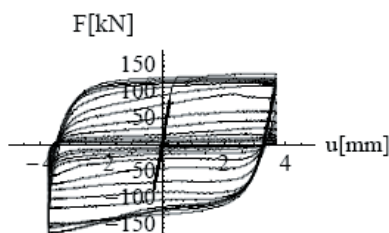
8C



9C

Histerezna zanka $F-u$ Diagram $F-N$ Diagram $W-N$ 

10C



11C

Preglednica 7 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov druge serije (od 4C do 11C)

4 • SKLEP

Naše raziskave so bile omejene zgolj na testiranje dušilca, ki je sicer sestavni del centričnega povezja. S centričnim povezjem in s tem povezanim problemom uklona tlačnih palic se nismo ukvarjali. Dušilec disipira potresno energijo na način, ki ga imenujemo nizkociklično utrujanje materiala. Jedro dušilca predstavlja oslabljeni jekleni prerez, ki je oblikovan tako, da se v primeru potresa plastificira. V članku so predstavljeni izsledki raziskav in izpostavljeni problemi, povezani s pravilnim delovanjem naprave. Na osnovi lastnih raziskav so se pokazale številne pomanjkljivosti, ki smo jih delno uspešno odpravili.

Nazorno je izpostavljen problem, povezan s pravilnim oblikovanjem oslabljenega dela prereza. Poleg neto prereza igra pomembno vlogo tudi dolžina, na kateri je prerez oslabljen. Če je ta dolžina prekratka, pride do preskoka plastifikacije iz neto v bruto prerez, kar ima lahko resne posledice za varnost objekta. Življenjska doba dušilca je v prvi vrsti odvisna od velikosti plastičnih deformacij in od števila ciklov pri dinamični obtežbi. Zaradi tega je pomembno, da je dušilec načrtovan tako, da je preprečeno lokalno izbočenje pločevine tudi pri velikih tlačnih plastičnih deformacijah.

Izvedli smo dve seriji testov, prvo na originalnih in drugo na novih, izpopolnjenih dušilcih. Testi potrjujejo, da novi dušilci izkazujejo boljše obnašanje kljub določenim problemom, ki ostajajo. Tako lahko rečemo, da je delovanje izpopolnjenih dušilcev v območju pomikov do dva milimetra ustrezno. Pri večjih pomikih se notranje betonsko polnilo poruši, posledica tega je lokalno izbočenje pločevine in s tem pospešeno nizkociklično utrujanje materiala. Ocenjujemo, da so za uporabo dušilcev v območju pomikov, večjih od dveh milimetrov, potrebne nadaljnje izboljšave, zlasti kar se tiče izbire veznega sloja med polnilom in cevjo kot tudi same izbire materiala tako za cevi dušilcev kot tudi za polnila. V vsakem primeru je uporaba predstavljenega sistema omejena, in sicer je primerna za protipotresno ojačitev togih konstrukcij.

5 • LITERATURA

- Beg, D., Plumier, A., Remec, C., Sanchez, L., Influence of strain rate, Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, (F.M. Mazzolani), E&FN SPON, pp. 343–367, 2000.
- Beg, D., Skuber, P., Low-cycle fatigue of steel frames under seismic loading, International journal of steel structures, vol. 3, št. 1, str. 19–27, 2003.
- ECCS, Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads, Technical Committee 1 – Structural Safety and Loading, TWG1.3 – Report NO 45, 1986.
- Petrašković, Z., Seizmičko pojačenje i obezbeđenja objekta System DC90, Monografija, str. 121, Beograd, 1997.
- Piluso, V., Montuori, R., Longo, A., An innovative conception for bracing members: The reduced brace section solution. Proceedings of 4th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL 2005, Maastricht, Netherlands, 2005.
- Skuber, P., Analiza nizkocikličnega utrujanja jeklenih konstrukcij na osnovi mehanike poškodb, doktorat, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2003.
- Skuber, P., Beg, D., Sinur, F., Experimental analysis of DC90 energy absorber device, PROHITECH WP7 internal report, 2008.