

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Sadar, Ž., 2016. Disipativni elementi v potresno odpornih jeklenih konstrukcijah. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Može, P.): 38 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5989/>

Datum arhiviranja: 4-10-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Sadar, Ž., 2016. Disipativni elementi v potresno odpornih jeklenih konstrukcijah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Može, P.): 38 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5989/>

Archiving Date: 4-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

ŽAN SADAR

**DISIPATIVNI ELEMENTI V POTRESNO ODPORNIH
JEKLENIH KONSTRUKCIJAH**

Diplomska naloga št.: 277/B-GR

**DISSIPATIVE ELEMENTS IN SEISMIC RESISTANT
STREL STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 277/B-GR

Mentor:

doc. dr. Primož Može

Ljubljana, 22. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Žan Sadar, vpisna številka 26110448, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Disipativni elementi za potresno odpornost jeklenih okvirov.

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 14.9.2016

Žan Sadar

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: 624.014.2:624.042.7(043.2)
Avtor: Žan Sadar
Mentor: doc. dr. Primož Može
Naslov: Disipativni elementi v potresno odpornih jeklenih konstrukcijah
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 38 str., 31 sl., 5 preg.
Ključne besede: disipativni elementi, potresna odpornost, jekleni okviri, oslabljeni prerez nosilca, spoj z zatičem, spoj na mestu diskontinuitete nosilca, spoj s čepom, U-spoj

Izvleček:

Pri projektiranju jeklenih okvirov je potrebno velik del pozornosti nameniti potresnemu projektiranju, saj so v preteklosti hudi potresi povzročili veliko škode na takšnih sistemih. Skozi čas so bili zato razviti različni disipativni sistemi, s katerimi bi se izognili hujšim poškodbam nosilne konstrukcije v primeru potresa. Uvod diplomske naloge predstavi osnovne tipe disipativnih elementov, v nadaljevanju pa so podrobneje opisane lastnosti, obnašanje in smernice za projektiranje treh izmed najefektivnejših sistemov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2:624.042.7(043.2)
Author: Žan Sadar
Supervisor: assist. prof. Primož Može, Ph.D.
Title: Dissipative elements in seismic resistant steel structures
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 38 p., 31 fig., 5 tab.
Keywords: dissipative devices, seismic resistance, steel frames, reduced beam section, pin connection, connection on discontinuity of beam, U-connection

Abstract:

In design of steel frames a huge focus is on seismic design since earthquakes caused a lot of damage on such systems. Through time different dissipative devices were developed to avoid fatal injuries. This graduation thesis presents some of them and more specifically discusses behaviour and design guidelines for three of the most effective systems.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, doc. dr. Primožu Možetu, za strokovne nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Iskreno se zahvaljujem tudi mami Saši, očetu Tomažu in sestri Pini za vso podporo, ki mi jo izkazujete v dobrih in slabih trenutkih.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|-------------|--|----|
| 1 | UVOD | 1 |
| 2 | INOVATIVNI DISIPACIJSKI SISTEMI | 8 |
| 2.1 | Disipacija energije v nosilcu | 8 |
| 2.1.1 | Splošno | 8 |
| 2.1.2 | Sistem z oslabljenim prerezom | 8 |
| 2.1.3 | Sistem z zatičem | 9 |
| 2.1.4 | Testi | 11 |
| 2.2 | Disipacija energije v spoju na mestu diskontinuitete nosilca | 13 |
| 2.2.1 | Splošno | 13 |
| 2.2.2 | Testi | 14 |
| 2.3 | Disipacija energije v spoju s čepom in U-spoju | 17 |
| 2.3.1 | Splošno | 17 |
| 2.3.2 | Spoj s čepom | 18 |
| 2.3.3 | U-spoj | 18 |
| 2.3.4 | Testi | 19 |
| 3 | PROJEKTIRANJE | 21 |
| 3.1 | Projektiranje disipativnega nosilca | 21 |
| 3.1.1 | Prvo dimenzioniranje | 21 |
| 3.1.2 | Linearno elastična analiza | 23 |
| 3.2 | Projektiranje disipativnega spoja na mestu diskontinuitete nosilca | 26 |
| 3.2.1 | Predhodno projektiranje | 26 |
| 3.2.2 | Projektiranje varoval na upogib | 28 |
| 3.2.3 | Elastična upogibna togost | 30 |
| 3.2.4 | Projektiranje varoval na strig | 30 |
| 3.2.5 | Projektiranje nedisipativnih elementov | 31 |
| 3.3 | Projektiranje disipativnega spoja s čepom | 32 |
| 3.3.1 | Mehanske lastnosti spojev z INERD čepom | 32 |
| 3.3.2 | Predlagane spremembe standarda SIST EN 1998 | 33 |
| 3.3.3 | Postopek projektiranja | 34 |
| 4 | ZAKLJUČEK | 36 |
| VIRI | | 37 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Priporočila za projektiranje oslabljenih prerezov | 9 |
| Preglednica 2: Primerjava lastnosti jeklenih okvirov in okvira z INDER spojem | 18 |
| Preglednica 3: Primerjava INDERD spoja s čepom in U-spoja | 20 |
| Preglednica 4: Izračun sil in pomikov v INERD spoju s čepom | 32 |
| Preglednica 5: Originalni tekst SIST EN 1998 in predlog modifikacij teksta | 33 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Tipi ojačitev spoja | 1 |
| Slika 2: Primer spoja, v katerem pride do plastičnih deformacij..... | 2 |
| Slika 3: Primer spoja, kjer se energija disipira s trenjem in detajl uporabe takšnega spoja | 3 |
| Slika 4: Primer spoja z uporabo kovin s spominom | 3 |
| Slika 5: Primer strižne stene | 4 |
| Slika 6: Primer izoliranega ležišča | 5 |
| Slika 7: Primer diagonale s preprečenim uklonom in prečni prerez elementa | 5 |
| Slika 8: Primeri uporabe sistemov, ki se sami povrnejo v navpično lego v spojih..... | 6 |
| Slika 9: Primer tekočinskega nosilca..... | 6 |
| Slika 10: Primera nihajočih mas | 7 |
| Slika 11: Primera FUSEIS1 nosilca, z oslabljenim delom prereza in z zatičem | 8 |
| Slika 12: Primera oslabljenih nosilcev in ojačitev spoja | 9 |
| Slika 13: Primer FUSEIS zatiča | 10 |
| Slika 14: Shema sistema s pravokotnim FUSEIS zatičem in okroglim FUSEIS zatičem..... | 10 |
| Slika 15: Shema sistema z FUSEIS1 nosilcem..... | 12 |
| Slika 16: Pojav plastifikacije na testiranih oslabljenih FUSEIS1 elementih: I prerez, pravotkoni votli prerez, okrogli votli prerez | 12 |
| Slika 17: Detajl pojava plastifikacije na testiranih oslabljenih FUSEIS1 elementih: I prerez, pravotkoni votli prerez, okrogli votli prerez..... | 12 |
| Slika 18: FUSEIS zatič pred testiranjem in po testiranju | 13 |
| Slika 19: Shema FUSEIS2 varovala s privijačenimi elementi in privijačenimi elementi..... | 13 |
| Slika 20: Primer FUSEIS2 nosilca s privijačenimi elementi..... | 14 |
| Slika 21: Prikaz proste dolžine L_0 | 15 |
| Slika 22: Primer histerezne zanke in prikaz parametrov enega cikla | 16 |
| Slika 23: Primer INDERD spoja s čepom | 18 |
| Slika 24: Shema sistema z U-pločevino in primer spoja z INDERD U-pločevino | 19 |
| Slika 25: Skica INERD spoja s čepom | 19 |
| Slika 26: Skica U-pločevine | 20 |
| Slika 27: Prikaz sistema ter notranje sil in momentov v stebrih in nosilcih..... | 21 |
| Slika 28: Skica določitve polj končnih elementov oslabljenega nosilca | 23 |
| Slika 29: Načina zagotovitve nastanka plastičnega členka stran od spoja | 26 |
| Slika 30: Shema notranjih sil spoja | 29 |
| Slika 31: Shema poteka deformacij in napetosti v spoju | 30 |

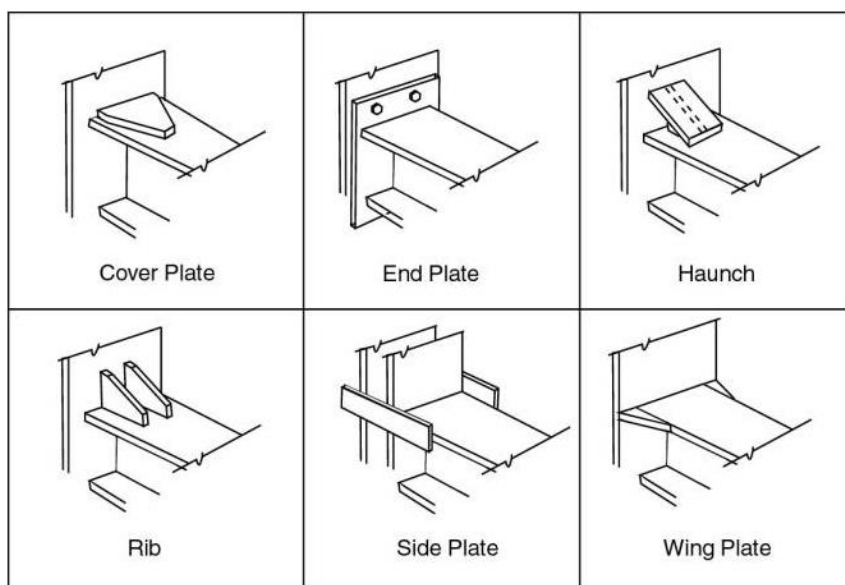
1 UVOD

Jekleni momenti okvirji imajo visoko duktilnost, ki izvira iz materialnih lastnosti konstrukcijskega jekla in ustrezne statične zasnove okvira, zaradi česar so ena izmed najpogosteje uporabljenih nosilnih konstrukcij na potresnih območjih. Sestavljajo jih stebri in nosilci, ki so povezani z vijačenimi ali varjenimi spoji. Neustrezna analiza ter izdelava spojev sta se v preteklosti izkazala za šibko točko takšnih sistemov pri potresnih obremenitvah.

V hudem potresu 17. januarja 1994 v Northridgeu, v bližini Los Angelesa, je bilo huje poškodovanih več kot 100 jeklenih okvirjev. Ugotovljeno je bilo, da se je večino porušitev oz. poškodb zgodilo zaradi pojava razpok na zvarih. Podobnosti med porušnimi mehanizmi zvarov so pokazale, da bi z določenimi izboljšavami v fazi projektiranja lahko preprečili številne porušitve. To je vodilo v razvoj potresno odpornih spojev jeklenih okvirjev.

Kot sta dokazala Mazzolani & Piluso (1994) in v skladu s pravili projektiranja protipotresnih konstrukcij (SIST EN 1998-1) se moramo v potrebi po optimizaciji disipativne kapacitete okvirjev in globalne duktilnosti konstrukcij izogniti razvoju lokalnih porušnih mehanizmov. Potrebno je upoštevati globalne mehanizme, ki vodijo v razvoj maksimalnega števila plastičnih členkov pred porušitvijo konstrukcije in zagotoviti, da do pojava plastičnih členkov pride v prečkah, ne v stebrih ter na tak način izkoristiti nosilnost konstrukcije v neelastičnem območju. Za doseg tega je v prvi vrsti potrebno zagotoviti močne stebre in šibke prečke. Dobra praksa je zagotavljanje plastičnih členkov v prečkah, spoje pa zasnovati kot polno nosilne z upoštevanjem dodatne nosilnosti prečke.

V želji po izogitvi disipacije energije v spojih in posledično premiku plastičnega členka ter plastičnih deformacij globlje v nosilec, so bile sčasoma razvite nove metode projektiranja. V splošnem gre za dve strategiji za izboljšanje potresnega obnašanja: ojačanje spoja ali oslabitev prečke. Oba pristopa preprečujeta zgodnjo porušitev na mestu spojev. Skozi čas so znanstveniki prišli do različnih rešitev, ki so se tudi po eksperimentalnih testih izkazale za zadovoljive: oslabljeni presek nosilca (angl. Reduced Beam Section), privarjene ali privijačene pločevine na pasnici nosilca, privarjena vuta, privijačene ojačitve, rebri nosilec, stranske ojačitvene pločevine (Iwankiw, 2004).



Slika 1: Tipi ojačitev spoja (Vir: <http://www.sacsteel.org/connections/AppA.html>)

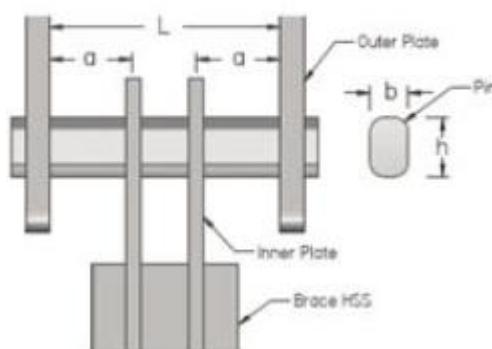
Osnovna ideja potresnega projektiranja je, da nosilne konstrukcije po hujših potresih ne bi utrpele večjih posledic. Z različnimi disipativnimi sistemi lahko omogočimo, da do nepovratnih poškodb oz.

porušitve pride na želenem mestu in to ne vpliva na nosilne elemente. Vendar je v takšnih primerih poleg zadostitvam glede nosilnosti, togosti, duktilnosti, sposobnosti disipiranja energije, pomembna še ena lastnost – zamenljivost. V obdobju po potresih v Northridgeu 1994 in Kobeju 1995 je bilo na tem področju opravljeno veliko raziskav, ki so ponudile določene rešitve.

Tipi spojev, kjer se plastične deformacije zgodijo v spojih

Ena izmed protipotresnih rešitev je, da spoje projektiramo tako, da v njih dovoljujemo plastične deformacije. To dosežemo z inovativnimi oblikami, primerno razporeditvijo vijakov ter zvarov, vključitvijo čepov ali zatičev. Takrat so torej disipativna območja v spoju in zagotoviti moramo, da imajo vsi priključeni elementi zadostno nosilnost, da dovoljujejo razvoj cikličnega tečenja v spoju.

SIST EN 1998 dovoljuje pojav plastičnih členkov v spojih v primeru delno nosilnega in/ali delno togega spoja, pri čemer morajo biti omogočeni zasuki vsaj 0,035 rad za DCH (konstrukcije z visoko stopnjo duktilnosti) oz. 0,025 rad za DCM (konstrukcije s srednjo stopnjo duktilnosti).

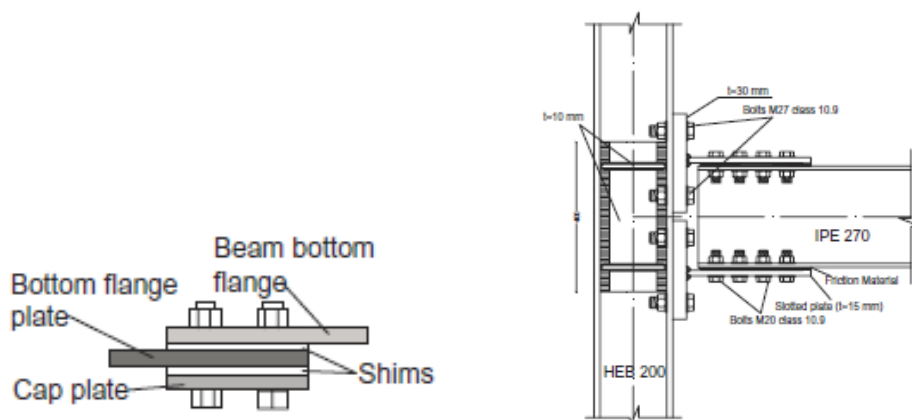


Slika 2: Primer spoja, v katerem pride do plastičnih deformacij (Tirca idr., 2012)

Spoji, kjer se energija disipira preko trenja

Možna je tudi izvedba spojev, kjer se energija disipira preko trenja. Takšni sistemi delujejo po principu drsenja dveh teles enega ob drugem, pri čemer se disipira energija. Eden takšnih načinov je uporaba drsečih vijakov, ki delujejo kot disipativni elementi v primeru potresne obremenitve. Najefektivnejša je uporaba drsečih vijakov v K ali X povezjih. Kljub temu, da trenjski disipatorji v takšni obliki niso zasnovani, da bi se povrnili v začetno lego pa k temu težijo elementi, ki so ostali v elastičnem območju, predvsem stebri.

Slabosti uporabe takšnih spojev so predvsem v možnem poslabšanju trenjskih lastnosti spoja zaradi dolgotrajnega kontakta, pritiskanja ene kovine ob drugo.



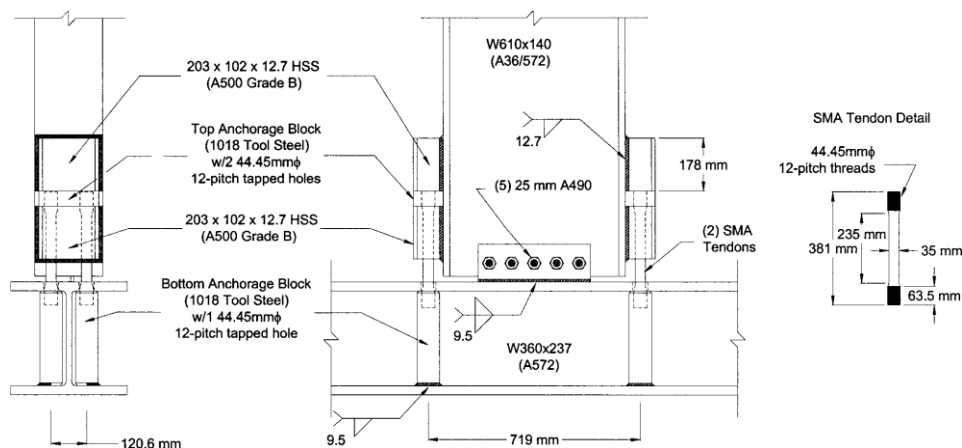
Slika 3: Primer spoja, kjer se energija disipira s trenjem (levo) (Khoo idr., 2012) in detajl uporabe takšnega spoja (desno) (Latour idr., 2005)

Uporaba kovin s spominom

Kovine s spominom so vrsta kovin, ki imajo unikatne lastnosti, kot so nenavaden odnos med Youngovim modulom ter temperaturo, spomin prvotne oblike, psevdoelastičnost in dobre dušilne karakteristike. Njihova kristalna struktura omogoča, da se po deformiranju lahko ob določeni temperaturi povrnejo v prvotno obliko.

V primeru, da ima takšna kovina stabilno histerezno obnašanje, zadostno duktilnost in je sposobna disipirati veliko energije, jih lahko uporabimo v spojih pri protipotresnem projektiranju. Imajo zelo visoko deformacijsko kapaciteto, zato se lahko pri velikih zasukih energija disipira preko njihovih vezi in ne preko plastičnih mehanizmov stebrov ter prečk. Najpogostejša je uporaba NiTi kovine, ki je zlitina niklja in titana.

Vendar imajo tudi slabosti, saj so preizkusi pokazali, da njihova povrnitev v prvotno obliko ni povsem popolna. Ob visokih temperaturah se že neobremenjene kovine ne povrnejo v popolno prvotno obliko, obremenjene pa dosegajo še slabše rezultate. Ob povrnitvi v prvotno stanje ima sicer kovina ponovno enake lastnosti kot na začetku, torej je zopet sposobna prevzeti enake obremenitve. Poleg problema popolne povrnitve v prvotno stanje sta slabosti takšnih kovin tudi njihova razmeroma visoka cena in pa povezovanje s konstrukcijo, kajti pri varjenju kovin s spominom lahko nastane krhko območje v bližini zvarov. (Ocel idr., 2004)



Slika 4: Primer spoja z uporabo kovin s spominom (Ocel idr., 2004)

Strižne stene iz mehkega jekla ali aluminija

Strižno steno sestavljajo horizontalni mejni elementi, vertikalni mejni elementi in polnilna pločevina, ki je iz mehkega jekla ali aluminija. V samem delovanju so podobni navpičnemu polnostenskem nosilcu, saj mejni srebri delujejo kot pasnica nosilca, medetažne prečke kot ojačitve, polnilo pa kot stojina nosilca. Mejni elementi so projektirani tako, da omogočajo razvoj nategov po diagonali pločevine in dosego meje tečenja v polnilni pločevini, preko česar poteka disipacija energije. Do nategov po diagonali pride, ko se pločevine uklonijo v strigu.

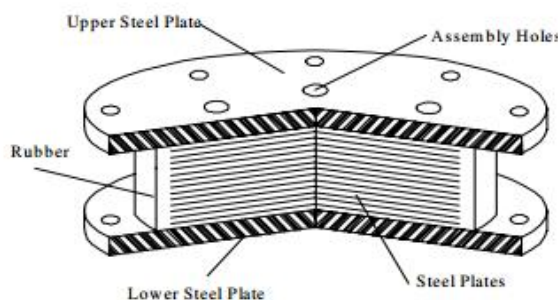
Strižne stene so lahki elementi, ki ne povečujejo teže konstrukcije, zagotavljajo visoko duktilnost in disipirajo energijo. Slabosti jeklenih strižnih sten pa so nizka togost v primerjavi s sorodnimi betonski strižnimi stenami in sorazmerno nepoznavanje oz. neraziskanost takšnih sistemov, kar se kaže v višjih stroških izdelave ter namestitve.



Slika 5: Primer strižne stene (<http://www.nyase.com/lalive.php>)

Protipotresna izolacija temeljev

Eden od protipotresnih ukrepov je tudi izolacija ležišč, ki temelji na principu prekinjenosti povezave med konstrukcijo ter temelji, zaradi česar se zmanjšujejo vplivi pospeškov tal. Takšen sistem sestavljajo ležišča, ki dovoljujejo horizontalno gibanje, dušilec, ki kontrolira pomike in elementi, ki zagotavljajo togost v primeru prečnih obremenitev. Najpogosteje uporabljeni so gumijasti ležaji, ki jih tvorijo plasti gume in jeklenih pločevin. S tem zagotovimo zadostno togost v vertikalni in gibljivost v horizontalni smeri. Preko vertikalne togosti je kontrolirana nosilnost konstrukcije, preko horizontalne gibljivosti pa se potresni sunki pretvorijo v blago gibanje. (Torunbalci idr., 2004)



Slika 6: Primer izoliranega ležišča (Torunbalci, 2004)

Diagonale s preprečenim uklonom (angl. Buckling Restrained Braces)

Sistemi diagonal s preprečenim uklonom so nadgradnja okvirov s centričnim povezjem. Brez dodatnih stroškov dosežemo učinkovitejšo rešitev, s katero se izognemo slabi uklonski odpornosti, ki jo imajo običajni okviri s centričnim povezjem. Doseženi sta večja duktilnost in konsistentno obnašanje v primeru ponovitev seizmičnih obremenitev.

Okvire, ki vključujejo diagonale s preprečenim uklonom sestavljata dve ključni komponenti: jekleno jedro, ki nudi odpor osnim napetostim in zunanji jekleni del z betonskim polnilom, ki nudi odpor uklonskim napetostim. Razvijejo se približno enake tlačne in natezne osne napetosti, torej imata tudi osno in natezno tečenje podobno obnašanje. Takšni sistemi prinašajo dodatno dušenje preko stabilnega tečenja jeklenega jedra, preko česar se disipira veliko količina energije.

Pri projektiranju je najpomembnejša primerna določitev velikosti jeklenega jedra, saj zaradi preveliko jekla lahko ne bi prišlo do plastifikacije diagonal, s premajhno količino pa ne bi zadostili zahtevam togosti. (Hussain idr., 2006)

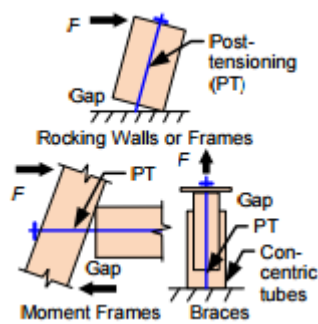


Slika 7: Primer diagonale s preprečenim uklonom (levo) in prečni prerez elementa (desno) (Hussain idr., 2006)

Sistemi, ki se samo povrnejo v navpično lego (angl. self-centering)

Kot pove že samo ime, se takšni sistemi po končani obremenitvi nepoškodovani povrnejo v svojo prvotno navpično lego. Temeljijo na nelinearnem elastičnem mehanizmu odpiranja ter zapiranja odprtine in koncentrirajo poškodbe v zamenljivih elementih, ki disipirajo energijo, pri čemer ne pride do poškodb na nosilni konstrukciji.

V spoju med prečko in stebrom je odprtina, skozi katero potekajo kabli. Ob delovanju potresnih sil, se odprtina na račun delovanja kablov zapre in obe pasnici prečke sta v tlaku. Ko se zunanje obremenitve sprostijo, pa se odprtina ponovno odpre in konstrukcija se povrne v svojo prvotno lego. (Chancellor idr., 2014)



Slika 8: Primeri uporabe sistemov, ki se sami povrnejo v navpično lego v spojih (Chancellor idr., 2014)

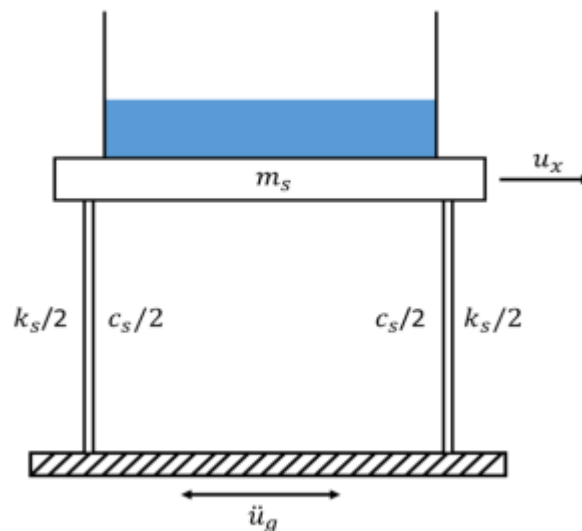
Dušilci

Dušilci so pasivni disipativni sistemi, ki disipirajo del energije in tako reducirajo disipativne potrebe primarnih konstrukcijskih elementov. Odzivajo se na določeno akcijo v konstrukciji, bodisi pomik, hitrost ali pospešek. V splošnem gre za to, da takšni sistemi spremenijo dinamične lastnosti konstrukcije, ki jih predstavlja enačba gibanja:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t)$$

Kovinski dušilci disipirajo energijo preko tečenja in neelastičnih deformacij materiala. Njihova slabost je, da se pri potresnih obremenitvah poškodujejo ali uničijo, zato je v takšnih primerih potrebna zamenjava.

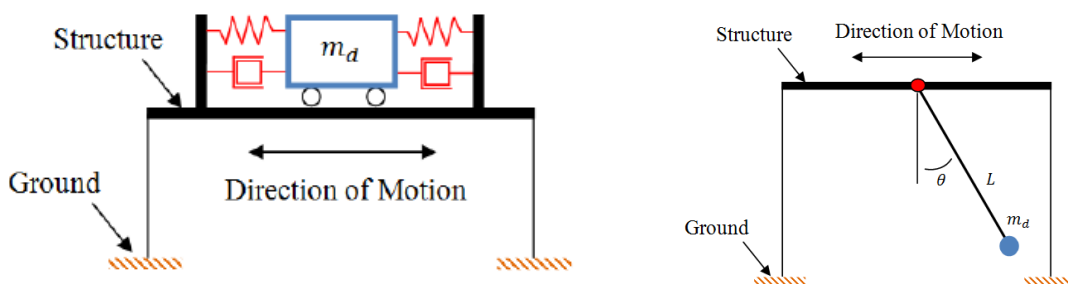
Tekočinski dušilci vsebujejo veliko maso tekočine (običajno vodo), ki absorbira dinamične vibracije. Energija se disipira preko pretakanja tekočine. Stroški postavitve in vzdrževanja takšnih sistemov so nizki, možna je preprosta vključitev v že obstoječe objekte in v nujnih primerih so lahko zaloge vode, ki vsebujejo, uporabljene tudi v druge namene (npr. gašenje požara). Vendar pa so takšni sistemi izredno zahtevni za analizo, saj je obnašanje vode popolnoma nelinearno, zapletena je določitev optimalnega mehanizma in zahtevajo veliko prostora.



Slika 9: Primer tekočinskega nosilca (Chang, 2015)

Viskozne dušilce sestavljata bat in polnilo, kot npr. silikon ali podobna olja. Bat ima številne majhne odprtine, skozi katere se lahko polnilo pretaka iz ene strani na drugo, kar povzroči premikanje bata, ki s svojim gibanjem disipira energijo. Takšni dušilci so sposobni prenesti velike sile in pomike, ne prinašajo dodatne togosti sistemu in jih lahko obravnavamo z linearno analizo. Obstaja pa nevarnost uhajanja tekočine.

Nihajoče mase so dušilci, ki se odzivajo na pospešek. Tvorijo jih vzmet, dušilec in masa, ki so naravnani na določeno frekvenco blizu resonančni. Ob vibraciji sistema se vzbudi delovanje nihajoče mase, ki preko dušilnika absorbira kinetično energijo. Med potresom se namreč nihajoča masa giba v nasprotni smeri konstrukcije in preko vztrajnostnih sil reducira gibanje konstrukcije. Prednosti takšnega sistema so preprostost pri projektiranju ter izvedbi, odzivnost tudi na majhne dražljaje, možnost uporabe tako na novih sistemih, kot tudi nadgradnja že obstoječih in ne zahtevajo veliko vzdrževanja. Vendar pa imajo tudi določene slabosti, saj potrebujemo veliko prostora za postavitev ter delovanje, njihovo delovanje pa je v največji meri odvisno od primerne nastavitve, ki je zelo zahtevna.



Slika 10: Primera nihajočih mas (Chu idr., 2005)

2 INOVATIVNI DISIPACIJSKI SISTEMI

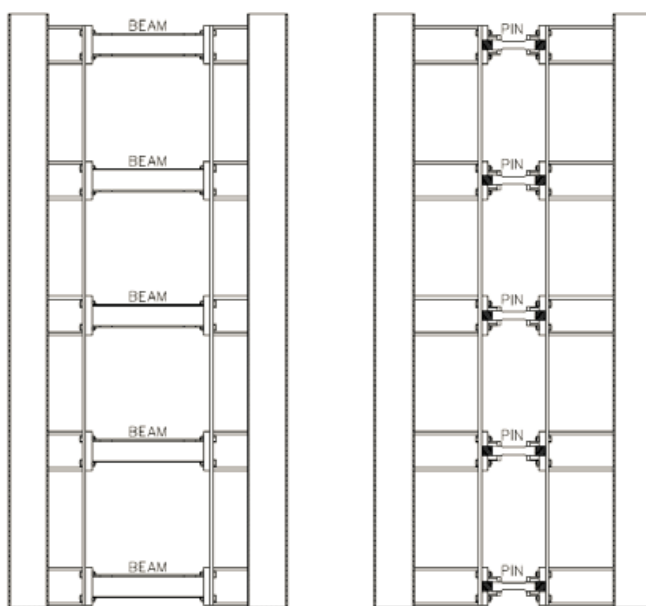
V tem poglavju sledi opis treh tipov disipativnih sistemov, ki so bili zasnovani v okviru evropskih raziskav FUSEIS in INERD. Predstavljene so lastnosti in obnašanje takšnih elementov.

2.1 Disipacija energije v nosilcu

2.1.1 Splošno

V sklopu projekta FUSEIS (Vayas idr., 2013) so razvili dva inovativna sistema, ki dobro disipirata energijo in koncentrirata poškodbe v elementih, ki delujejo po principu varovalke in se jih v primeru poškodb lahko zamenja. Prvi od teh sistemov je FUSEIS 1, ki spominja na strižno steno, vendar z določenimi prednostmi pri disipaciji energije skozi plastično deformiranje nosilca.

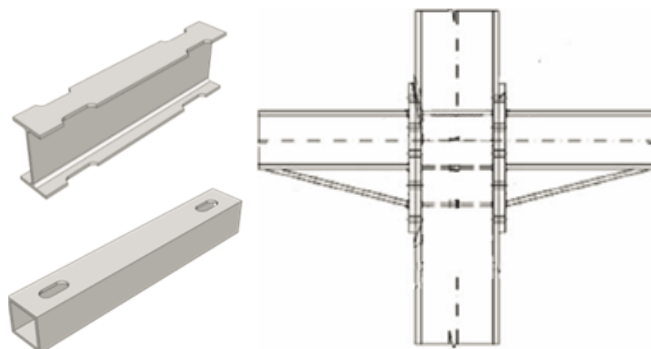
Tvorita ga dva stebra na majhni medsebojni razdalji, toga povezana s številnimi nosilci, ki potekajo od enega do drugega stebra. Sistem prenaša prečne obremenitve kot vertikalno obrnjen Vierendeelov nosilec, v glavnem preko kombinacije upogibne in strižne nosilnosti nosilca ter osnih sil na steber. Razviti sta bili dve različici: sistem 1-1, pri katerem so disipativni elementi oslavljeni deli nosilca (RBS) in 1-2, kjer se disipacija energije izvrši v zatičih. Nosilci imajo lahko zaprt (RHS) ali odprt (I, H) prerez, vendar so nekoliko primernejši zaprti prerezi, zaradi njihove večje upogibne in torzijske nosilnosti ter togosti.



Slika 11: Primeri FUSEIS1 nosilca, z oslavljenim delom prereza (levo) in z zatičem (desno) (Vayas idr., 2013)

2.1.2 Sistem z oslavljenim prerezom

V tem primeru so disipativni elementi FUSEIS nosilci, ki imajo pasnico proti koncu nosilca reducirano in s tem omogočijo formacijo plastičnega členka v tem območju. Območje spoja lahko ojačamo z dodatnimi pločevinami.



Slika 12: Primeri oslabljenih nosilcev (levo) in ojačitev spoja (desno) (Vayas idr., 2013)

Raziskave so pokazale, da se takšen sistem obnaša kot navpični Vierendeelov nosilec, ki nudi odpor prečnim obremenitvam. Če upoštevamo členke v središčih nosilcev in stebrov, lahko notranje sile in momente v elastičnem stanju izračunamo iz statike. Strižna sila zaradi momenta $M_{pl,Rd}$ na koncih nosilcev je torej:

$$V_{etaže} = \frac{2 \cdot \sum M_{pl,RBS,Rd}}{h_{etaže}} \cdot \frac{L}{l_{RBS}}$$

Kjer so:

$M_{pl,RBS,Rd} = W_{pl,RBS} \cdot f_y$ je plastična projektna upogibna nosilnost oslabljenega dela nosilca

$h_{etaže}$ je višina nadstropja

l_{RBS} je razdalja med oslabljenimi deli nosilca

L je medosna razdalja nosilca

FEMA 350 in EC8 vsebujeta priporočila za projektiranje oslabljenih elementov.

Preglednica 1: Priporočila za projektiranje oslabljenih prereзов (SIST EN 1998-1 2005, str. 63, FEMA350, str.3-42)

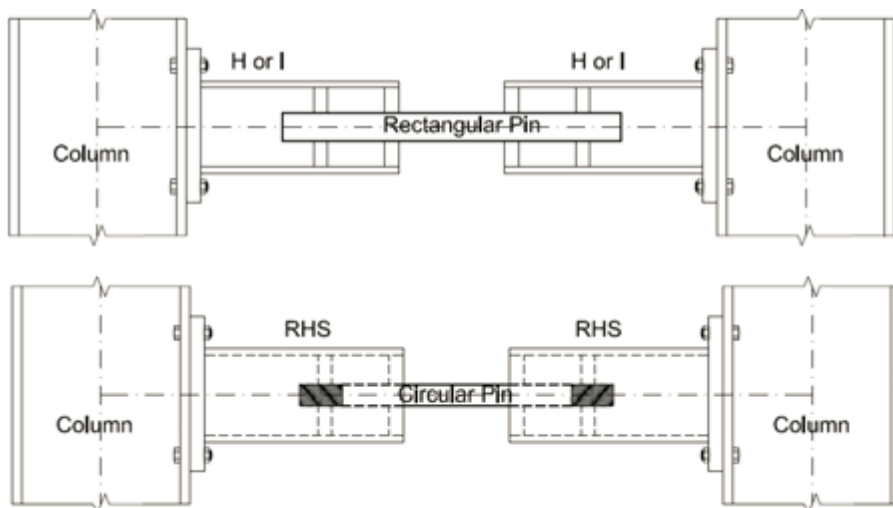
| SIST EN 1998-3 | FEMA 350/351 | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---|---|
| $a = 0,6 * b_f$ | $a = 0,5 - 0,7 * b_f$ | <p>Diagrama oslabljenih prereзов za SIST EN 1998-3 in FEMA 350/351. Na levi strani je prikazano prerezo nosilca s prečnimi rezi v sredini, označenimi s 'g'. Na desni strani je prikazano prerezo nosilca s prečnimi rezi v sredini, označenimi s '2g'.</p> | <p>Diagrama oslabljenih prereзов za SIST EN 1998-3 in FEMA 350/351. Na levi strani je prikazano prerezo nosilca s prečnimi rezi v sredini, označenimi s 'g'. Na desni strani je prikazano prerezo nosilca s prečnimi rezi v sredini, označenimi s '2g'.</p> |
| $b = 0,75 * d_b$ | $b = 0,65 - 0,85 * d_b$ | | |
| $g \leq 0,25 * b_f$ | $c \leq 0,25 * b_f$ | | |
| $r = \frac{4g^2 + b^2}{8g}$ | $r = \frac{4c^2 + b^2}{8c}$ | | |

2.1.3 Sistem z zatičem

Pri drugem tipu FUSEIS1 sistema pa inovativni sistem tvorijo zatič in dva zamenljiva nosilca. Disipacija energije se izvršuje v zatičih, ki so lahko okrogli v primeru votlih nosilcev ali pravokotni v primeru I oz. H nosilcev. V želji po tvorbi plastičnega členka stran od kontakta med zatičem in nosilcem so lastnosti zatičev oslABLJENE v sredini.



Slika 13: Primer FUSEIS zatiča (Vayas idr., 2013)



Slika 14: Shema sistema s pravokotnim FUSEIS zatičem (zgoraj) in okroglim FUSEIS zatičem (spodaj) (Vayas idr., 2013)

Poglavitna razlika v primerjavi s sistemom 1-1 je v tem, da nosilec ne poteka kontinuirano od stebra do stebra, temveč je v sredini prerezan in povezan z zatičem, ki v tem primeru predstavlja varovalo. Popravilo takšnega sistema je še preprostejše, saj moramo zamenjati zgolj zatič. Za olajšanje zamenjave so zatiči z nosilci povezani z inverznimi vijaki.

Obnašanje zatičev se nekoliko razlikuje od prejšnjega primera, zato se je drugačen tudi izračun strižne sile, ki jo dobimo preko globalnih medetažnih zasukov:

$$V_{etaže} = \sum N_{pl} \cdot \frac{L}{h_{etaže}} \cdot \theta_{gl} \cdot \left(\frac{L}{L_p} - 1\right)$$

Kjer so:

N_{pl} je osna sila, ki v zatiču nadomesti upogibni moment

L je medosna razdalja med FUSEIS nosilca

$h_{etaže}$ je višina etaže

θ_{gl} so medetažni zasuki

L_p je dolžina zatičev

Zasuk zatiča pa je z globalnim zasukom povezan preko razmerja med skupno dolžino in dolžino zatiča:

$$\theta_p = \frac{L}{L_p} \cdot \theta_{gl}$$

2.1.4 Testi

Testi na elementih in materialih

Večina preizkušanih varoval je dosegla visoko duktilnost pri cikličnem obremenjevanju, kljub nekaterim razpokam in vplivom nestabilnosti.

Za nadaljnje analize so bili rezultati preizkusov pretvorjeni v nedimenzionalno obliko, saj na ta način lahko dosežemo boljšo primerjavo rezultatov različnih varoval in lažjo uporabo v »software« programih.

To pomeni, da smo akcije in deformacije delili s pripadajočimi plastičnimi vrednostmi, določenimi preko meje tečenja materiala. Plastični moment horizontalno obremenjenega varovala na mestu oslabilne in na koncu varovala torej izračunamo sledeče:

$$M_{pl,RBS} = W_{pl,RBS} \cdot f_y$$

$$M_{pl} = M_{pl,RBS} \cdot \frac{L}{L_{RBS}}$$

Kjer $W_{pl,RBS}$ predstavlja plastični odpornostni moment reduciranega prereza, f_y je meja tečenja preizkušanca, določena preko testov materiala, L_{RBS} osna razdalja med oslabljenimi RBS območji in L razdalja med stebroma.

Upoštevajoč, da je varovalo pritrjen nosilec na obeh straneh, z vertikalnimi pomiki na enem koncu, veljajo naslednje enačbe:

$$M = \frac{6 \cdot EI \cdot u}{L^2}$$

$$g = \frac{u}{L}$$

$$g = \frac{M \cdot L}{6 \cdot EI}$$

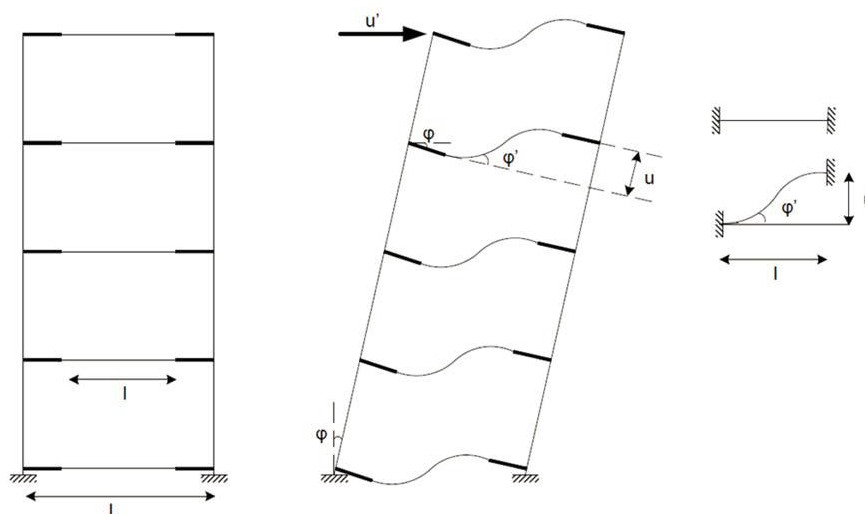
Kjer je EI upogibna togost nosilca, u pa vertikalni pomik nosilca.

Plastični zasuk varovala g_{pl} , torej lahko izrazimo kot:

$$g_{pl} = \frac{M_{pl,RBS} \cdot L^2}{6 \cdot EI \cdot L_{RBS}}$$

S testi smo izmerili vrednosti horizontalne sile V in pomika u , kar nam omogoča določitev enačbe notranjega momenta:

$$M = V \cdot \frac{L_{RBS}}{2}$$



Slika 15: Shema sistema z FUSEIS1 nosilcem (Vayas idr., 2013)

Testi na okvirih z vgrajenim disipativnim sistemom (FUSEIS1)

Obnašanje FUSEIS1 elementov v okvirih je bilo dognano preko raziskav na okvirih, ki vključujejo takšne elemente. Do plastifikacije je prišlo zgolj v varovalih, medtem ko so stebri ostali v elastičnem in posledično nepoškodovani.

Tečenje v nosilcih se je pojavilo na mestu oslabitve v obliki pasje kosti (ang. dog-bone). Prvotne poškodbe so se pojavile na krivinah oslabitve, ob povečevanju deformacij pa je prišlo tudi do skrčka po višini nosilca. Vsi okviri so dosegli medetažne pomike med 2% in 4%. V splošnem so se preizkušanci z votlimi prerezi izkazali za primernejše od IPE profilov, predvsem zaradi dodatne nosilnosti, ki jo nudijo stojine. Najboljše rezultate so dali okrogli votli preizkušanci (CHS), saj širjenje plastifikacije poteka učinkoviteje po celotnem obsegu prereza. Pojav plastičnih območij vseh treh tipov preizkušancev je prikazan na spodnjih slikah.



Slika 16: Pojav plastifikacije na testiranih oslabiljenih FUSEIS1 elementih: I prerez (levo), pravotkoni votli prerez (v sredini), okrogli votli prerez (desno) (Vayas idr., 2013)



Slika 17: Detajl pojava plastifikacije na testiranih oslabiljenih FUSEIS1 elementih: I prerez (levo), pravotkoni votli prerez (v sredini), okrogli votli prerez (desno) (Vayas idr., 2013)

Preizkušanci z zatičem so sprva delovali kot nosilec v upogibu, nato pa se je nosilnost prenesla na celotno napetostno polje in pri velikih deformacijah so se pojavili plastični členki. Prve razpoke so se pojavile na koncu oslabiljenega območja, takoj po nenadnem krhkem zlomu. To pomeni, da je v tem območju prišlo do lokalne koncentracije napetosti, kar je vidno tudi iz spodnjih slik. Krajši zatiči so se porušili hitreje kot daljši, kar je razumljivo, saj so bili njihovi zasuki večji.

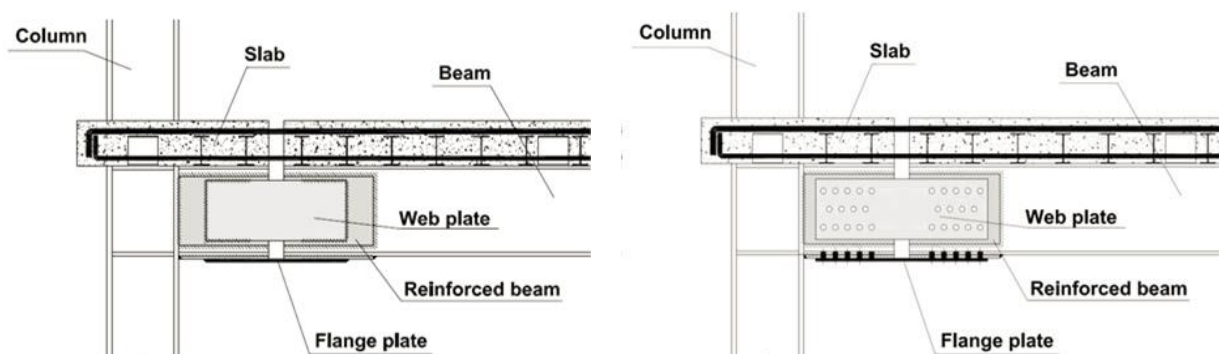


Slika 18: FUSEIS zatič pred testiranjem (levo) in po testiranju (desno) (Vayas idr., 2013)

2.2 Disipacija energije v spoju na mestu diskontinuitete nosilca

2.2.1 Splošno

V sklopu projekta FUSEIS so razvili še en sistem varovala, ki so ga poimenovali FUSEIS2. Izvaja se ga v bližini spoja nosilec-steber pri sovprežnem nosilcu jeklo-beton. Gre za sistem, kjer potek jeklenega nosilca in betonskega dela sovprežne plošče proti koncu prekinemo, varovalo pa namestimo na mestu te diskontinuitete. Tvorita ga dve jekleni pločevini privarjeni ali privijačeni na stojino nosilca in ena jeklena pločevina privarjena ali privijačena na spodnjo pasnico nosilca, kot je prikazano na spodnjih slikah.



Slika 19: Shema FUSEIS2 varovala s privarjenimi elementi (levo) in privijačenimi elementi (desno) (Vayas idr., 2013)



Slika 20: Primer FUSEIS2 nosilca s privijačenimi elementi (Vayas idr., 2013)

V tem delu nosilca želimo doseči pojav plastičnega členka in formacijo porušnega mehanizma zaradi neelastičnih zasukov in posledično koncentracijo velike količine disipirane energije na tem mestu. S tem preprečimo širjenje poškodb na nosilce in stebre. Osnovna ideja je torej kombinacija togega vozlišča z detajlom, kjer se tvori plastični členek in je lahko zamenljiv po hudih poškodbah. Takšne spoje naredimo v prerezu na koncu nosilca na določeni razdalji od stika med nosilcem in stebrom, s čimer se izognemo porušitvam v zvarih spoja.

Vzdolžna armatura sovprežne plošče predstavlja del prereza varovala, vendar pa v primeru poškodb ni zamenljiva, torej v njej ne sme priti do tečenja. Zavrtilo tega mora biti izbrana takšna količina in pozicija armature, da ostane v elastičnem območju. Armaturo se izbere tako, da plastična nevtralna os varovala leži v težišču vzdolžne armature, zaradi česar v njej pride do majhnih deformacij in posledično majhnih napetosti.

Sovprežno obnašanje je zagotovljeno z mozniki, ki jih predstavljajo IPE100 profili, privarjeni na zgornjo pasnico nosilca. Projektirani so tako, da vzdržijo vzdolžne strižne sile večje od plastičnega strižnega toka.

Zaradi možnosti širjenja plastičnih deformacij na nezamenljive dele IPE nosilca v bližini varovala je potrebno to območje dodatno ojačati z jeklenimi pločevinami privarjenimi na stojino in spodnjo pasnico. Zagotoviti moramo, da je njihov plastični upogibni moment večji od maksimalnega momenta na varovalu. Od velikosti momenta na varovalu je odvisna tudi dolžina teh ojačitvenih pločevin.

Pomembno pa je tudi, da so varovala dokaj preprosto zamenljiva z novimi, kar pomeni, da obstaja možnost zamenjave poškodovanih območij v primeru hujših potresov.

2.2.2 Testi

2.2.2.1 Parametri

Za oceno cikličnega obnašanja jeklenih komponent FEMA-350 predlaga večje število testov na vzorcih z različnimi parametri. Zato se vključi dva nedimenzionalna parametra, ki vplivata na obnašanja varoval: rotacijska kapaciteta in vitkost.

Rotacijska kapaciteta

Pojav plastičnega členka mora ostati znotraj varovala in poškodbe se ne smejo razširiti na nedisipativna območja, zato morajo biti varovalni elementi zasnovani tako, da so šibkejši od ostalih.

Vpelje se parameter, ki povezuje nosilnost varovala s plastično nosilnostjo prečnega prereza sovprežnega nosilca. Razmerju med njima pravimo rotacijska kapaciteta in ga označimo z α .

$$\alpha = \frac{M_{\max, \text{varovalu}}}{M_{\text{pl, nosilec}}}$$

Kjer sta:

$M_{\max, \text{varovalu}}$ je maksimalni moment na varovalu

$M_{\text{pl, nosilec}}$ je plastična upogibna nosilnost sovprežnega prereza nosilca

V izogib krhki porušitvi zaradi striga so pločevine na stojini projektirane tako, da vzdržijo večjo strižno silo kot je statistično dopustna sila zaradi razvoja maksimalnega momenta varovala. Upogibna nosilnost varovala je torej kontrolirana s širino in debelino pločevine na pasnici.

Vitkost

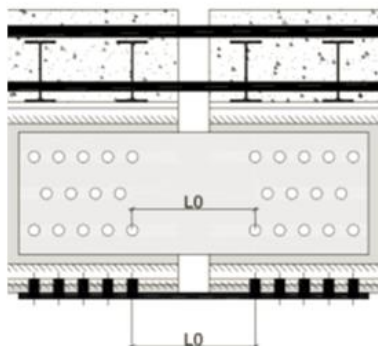
Drugi parameter, ki se ga v preizkusih spreminja je geometrijska vitkost pločevine na pasnici λ . Za doseg velikih zasukov varovala mora pasnica prenesti upogib zaradi visokih rotacij ob pojavu negativnega upogibnega momenta. Vitkost pločevine na pasnici se določi kot:

$$\lambda = \frac{L_0}{t_f}$$

Kjer sta:

L_0 je prosta dolžina

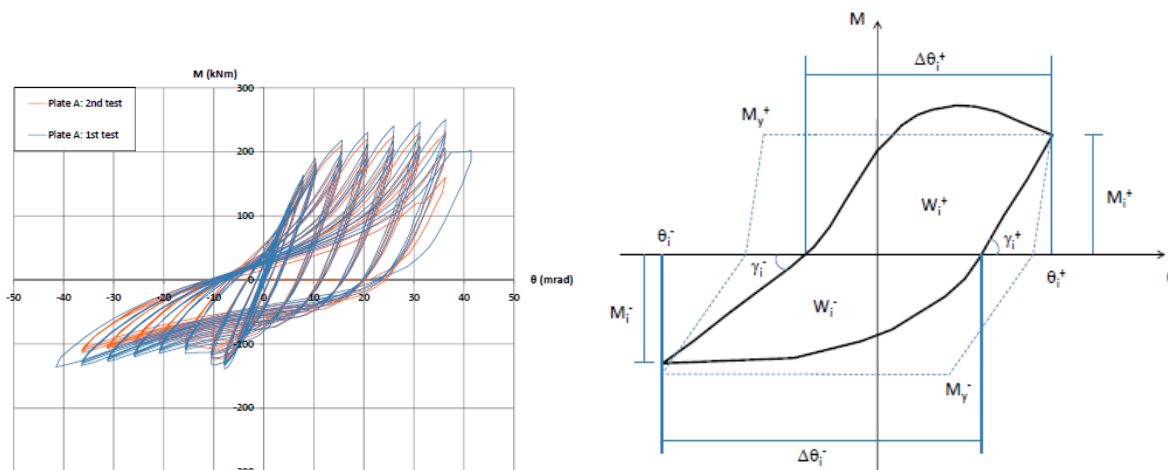
t_f je debelina pločevine na pasnici



Slika 21: Prikaz proste dolžine L_0 (Vayas idr., 2013)

2.2.2.2 Analiza rezultatov

Rezultat eksperimentalnih testov so diagrami $M-\theta$ (moment-zasuk). Lahko se določi elastične lastnosti, kot so elastični moment M_y , začetno elastično togost K in zasuk θ . Analiza rezultatov preizkusov pa poteka s pomočjo brezdimenzijskih razmerij, ki predstavljajo odnos med dobljenimi rezultati in elastičnimi lastnostmi.



Slika 22: Primer histerezne zanke (levo) in prikaz parametrov enega cikla (desno) (Vayas idr., 2013)

Nosilnost

Povečanje in zmanjšanje nosilnosti med različnimi cikli preizkusov se analizira s pomočjo razmerja nosilnosti, za pozitivne in negativne polcikle:

$$\varepsilon_i^+ = \frac{M_i^+}{M_y^+}$$

$$\varepsilon_i^- = \frac{M_i^-}{M_y^-}$$

Kjer sta:

M_y je mejni elastični moment

M_i je izmerjeni moment na koncu cikla

V primeru pozitivnega upogiba to razmerje z naraščanjem števila ciklov ostajalo približno enako, njegova vrednost naraste celo do 1,5, medtem ko pri negativnem upogibu pride do nenadnega znižanja razmerja ob pojavu uklona.

Togost

Spreminjanje (izboljšanje in slabšanje) togosti med različnimi cikli se preverja z razmerjem ξ :

$$\xi_i^+ = \frac{\tan \gamma_i^+}{K_e^+}$$

$$\xi_i^- = \frac{\tan \gamma_i^-}{K_e^-}$$

Kjer sta:

γ_i je naklon krivulje na diagramu M- θ na koncu cikla

K_e je elastična togost

Tako pri negativnem kot pozitivnem upogibu je bilo obnašanje podobno. Pri preizkušancih z višjim α se je s številom preizkusov togost manj spreminjala, torej lahko trdimo, da ob nižjem α hitreje pride do zmanjševanja togosti varovala. Pomemben parameter pri analiziranju togosti je elastična togost K_e , ki

vpliva na deformabilnost konstrukcije in raznos notranjih sil. Ugotovljeno je bilo, da K_e ni v veliki meri odvisen od lastnosti pločevine na pasnici, temveč bolj od ostalih elementov varovala kot so pločevine na stojini in armaturne palice. Pri večjih cikličnih obremenjevanja je togost padala predvsem na račun zmanjševanja togosti nezamenljivih delov, armaturnih palic. S tem so se povečevale razpoke na betonski plošči. Kljub vsemu ni šlo za hujše poškodbe.

Duktilnost

S koeficientom polne duktilnosti se določi rezerve plastičnih deformacij, ki jih varovalo lahko prenese.

$$\mu_i^+ = \frac{\Delta\theta_i^+}{\theta_y^+}$$
$$\mu_i^- = \frac{\Delta\theta_i^-}{\theta_y^-}$$

Kjer sta:

θ_y je mejni elastični zasuk

θ_i je zasuk na koncu cikla

Vsi preizkušanci so bili sposobni doseči rotacije vsaj 35 mrad, kar je minimalna zahteva SIST EN 1998-1. Duktilnost se je povečevala dokler ni bil dosežen maksimalen zasuk. Višja duktilnost je bila dosežena pri negativnem upogibu kot pri pozitivnem. Z zmanjševanjem koeficienta α^- se je zmanjševala tudi duktilnost.

Večjo duktilnost so dosegli preizkušanci obremenjeni z negativnim upogibnim momentom, saj je preko izbočenja prej dosežena meja elastičnosti. Posledično imajo večje območje nelinearnosti do dosega maksimalne rotacije, torej boljje izkoristijo svoje plastične rezerve.

Disipacija energije

Varovala z višjim α so bila sposobna prenesti večjo število plastičnih ciklov. Ugotovljeno je bilo, da so imeli preizkušanci z nižjim α večja poslabšanja pločevin varoval, torej je bila dosežena nižja kapaciteta disipacije energije. Na drugi strani pa so varovala z višjo rotacijsko kapaciteto bila sposobna disipirati več energije, a so se hkrati pojavile večje poškodbe na nezamenljivih delih.

V splošnem lahko trdimo, da smo s pravilno izbiro α zmožni kontrolirati izbočenje varovala in vse posledice, vključno z nosilnostjo in disipacijskimi karakteristikami. Varovala so pokazala stabilno histerezno obnašanje in zavarovala nezamenljive elemente pred poškodbami, pri čemer so pomagale tudi dodatne ojačitvene jeklene pločevine.

2.3 Disipacija energije v spoju s čepom in U-spoju

2.3.1 Splošno

Inovativne disipativne rešitve so iskali tudi pri projektu INERD (Plumier idr., 2006), kjer so razvili dva tipa spojev, uporabnih pri jeklenih okvirih s povezji. V obeh sistemih so neelastične deformacije omejene na vnaprej določena območja, s čimer zagotovimo, da osnovna konstrukcija ostane v elastičnem območju. Tako diagonale zavarujemo pred uklonom in poškodbe omejimo na zelene predele, ki so preprosto zamenljivi v primeru posledic močnih potresov.

Potresno odporni jekleni okviri so dimenzionirani na določeno stopnjo nosilnosti, togosti in duktilnosti. Z nosilnostjo zagotovimo, da se konstrukcija v primeru potresov varno obnaša, s togostjo omejimo poškodbe v primeru šibkejših ali zmernih potresov, duktilnost pa je potrebna za disipacijo

potresne energije in s tem zmanjšanje potresnih učinkov. Jekleni okviri imajo določene prednosti in slabosti, predvsem v primeru močnejših potresov pa se posledice kažejo na poškodbah povezja, stebrov in nosilcev.

Preglednica 2: Primerjava lastnosti jeklenih okvirov in okvira z INDER spojem

| | Momenti okviri (MRF) | Okviri s centričnim povezjem (CBF) | Okviri z ekscentričnim povezjem (EBF) | CBF ali EBF okviri z INERD spoji |
|----------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| Togost | Nizka | Visoka | Srednja | Visoka |
| Duktilnost | Visoka | Nizka | Srednja | Visoka |
| Nosilnost | Kot je zahtevana | Kot je zahtevana | Kot je zahtevana | Kot je zahtevana |
| Disipacije energije | Na koncu nosilcev | V povezju | Seizmični členi | Spoji |

Z razvitimi INERD povezavami pa diagonale zavarujemo pred uklonom, dosežemo aktivacijo celotne kapacitete povezij in omejimo neelastično dogajanje na majhne predele, ki so lahko in dokaj poceni zamenljivi. S tem močno reduciramo celotne stroške pri dosegu enake stopnje obnašanja.

2.3.2 Spoj s čepom

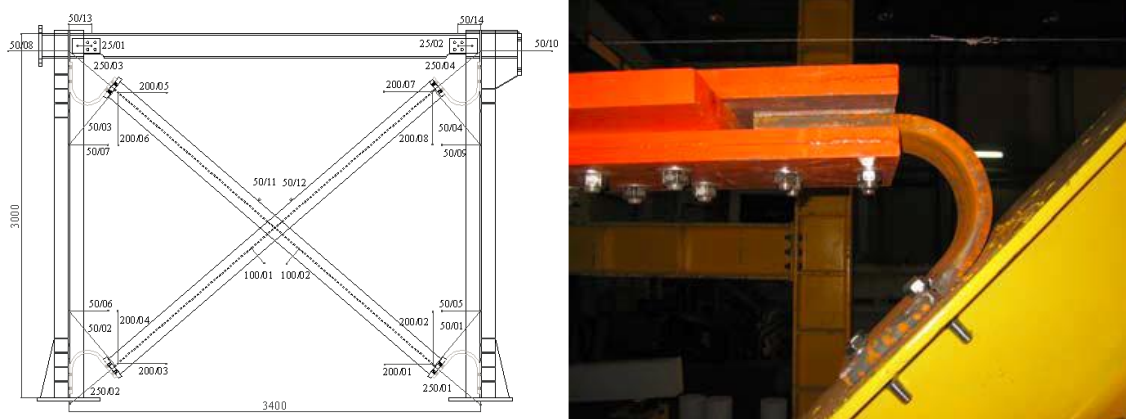
Prvi tip je spoj s čepom, ki ga sestavljata dve zunanji pločevini z luknjo, privarjeni ali privijačeni na steber ali nosilec, dve notranji pločevini z luknjo za čep, privarjeni na povezje in čep, ki povezuje pločevini med seboj. Pri takšnem sistemu čep prevzema neelastične upogibne deformacije in disipira energijo na račun določene razdalje med pločevinama.



Slika 23: Primer INDERD spoja s čepom (Plumier idr., 2013)

2.3.3 U-spoj

Drugi razviti tip pa je U-spoj, ki ga tvorita ena ali dve pločevini, ukrivljeni v obliki črke U, ki povezujeta povezje s konstrukcijo. V njiju nastane disipacija energije in na tem mestu dovoljujemo plastične deformacije.



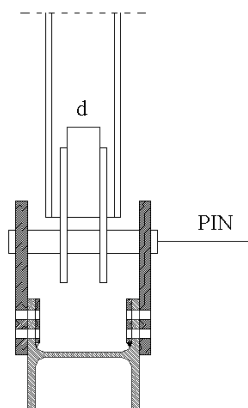
Slika 24: Shema sistema z U-pločevino (levo) in primer spoja z INDERD U-pločevino (desno) (Plumier idr., 2013)

2.3.4 Testi

2.3.4.1 Parametri

Parametra, ki se ju spreminja in analizira pri spojih s čepom sta:

- razdalja med pločevinama z odprtino (50 mm ali 70mm)
- oblika (okrogla ali pravokotna).



Slika 25: Skica INERD spoja s čepom (Plumier idr., 2013)

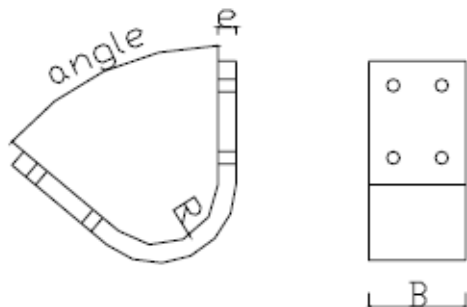
Nekoliko boljše rezultate v smislu disipacije energije so bili v primeru pravokotnih čepov, predvsem zaradi boljših vztrajnostnih lastnosti v primerjavi z okroglimi. Obratni rezultati pa so bili v smislu utrujanja – obnašanje okroglih je boljše od obnašanja pravokotnih čepov. Vpliv utrujanja se pri okroglih čepih povečuje z zmanjševanjem razdalje med pločevinama, pri pravokotnih pa se povečuje s povečevanjem razdalje med pločevinama.

V primeru enake razdalje med pločevinama so okrogli čepi dosegli boljši odziv od pravokotnih, saj lahko prenašajo višjo silo. Pri manjših ciklih so se za boljše izkazali pravokotni prerezi, vendar so se na račun manjših torzijskih vplivov v primeru večjih deformacij ponovno bolje izkazali okrogli prerezi.

Parametri, ki se jih spreminja in analizira pri U-povezavah so:

- radij R

- dolžina pločevine B
- debelina e
- pozicija (smer obremenitve)



Slika 26: Skica U-pločevine (Plumier idr., 2013)

Za najprimernejše so se izkazali primeri, ko je bil U-element obtežen paralelno na povezano pločevino. Disipativno obnašanje se sicer nekoliko izboljšuje z zmanjševanjem debeline in povečevanjem radija, a je bilo v splošnem najboljše obnašanje zaznано ob čim večji možni debelini in čim manjšem radiju, saj oboje vodi v izboljšanje upogibne togosti sistema.

2.3.4.2 Primerjava med sistemoma

Sistemi s čepi so se izkazali za boljše kot sistemi z U-pločevinami, saj je za dosego enakega pomika potrebna višja sila, imajo večjo nosilnost, disipirajo večjo količino energije, preprostejši sta montaža ter demontaža in so tudi primernejši z varnostnega vidika, saj ob porušitvi čepa diagonala ne odpove, kar se je zgodilo pri porušitvi U-pločevine.

Zdi se, da je najboljša izbira disipativne povezave za centrična povezja sistem s čepom pravokotnega prereza in velik razdaljo med pločevinami z odprtino.

Preglednica 3: Primerjava INDERD spoja s čepom in U-spoja

| | Sila ob enakem pomiku | Nosilnost | Dovoljene deformacije | Količina disipirane energije | Montaža in demontaža |
|---------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Spoj s čepom | Višja | Višja | Nižje | Višja | Preprostejša |
| U-spoj | Nižja | Nižja | Višje | Nižja | Zahtevnejša |

3 PROJEKTIRANJE

3.1 Projektiranje disipativnega nosilca

3.1.1 Prvo dimenzioniranje

(1) FUSEIS1 sistem deluje kot vertikalni Vierendeelov nosilec. Če upoštevamo členke v središčih nosilcev in stebrov, lahko notranje sile in momente v elastičnem stanju izračunamo iz statike:

Stebri

$$N_c = \frac{M_{ov}}{L}$$

$$V_c = \frac{V_{etaže}}{2}$$

$$M_c = V_c \cdot \frac{h}{2} = \frac{V_{etaže} \cdot h}{4}$$

Nosilci

$$M_b = 2 \cdot M_c = \frac{V_{etaže}}{2}$$

$$V_b = \frac{M_b}{L/2} = V_{etaže} \cdot \frac{h}{L}$$

Kjer so:

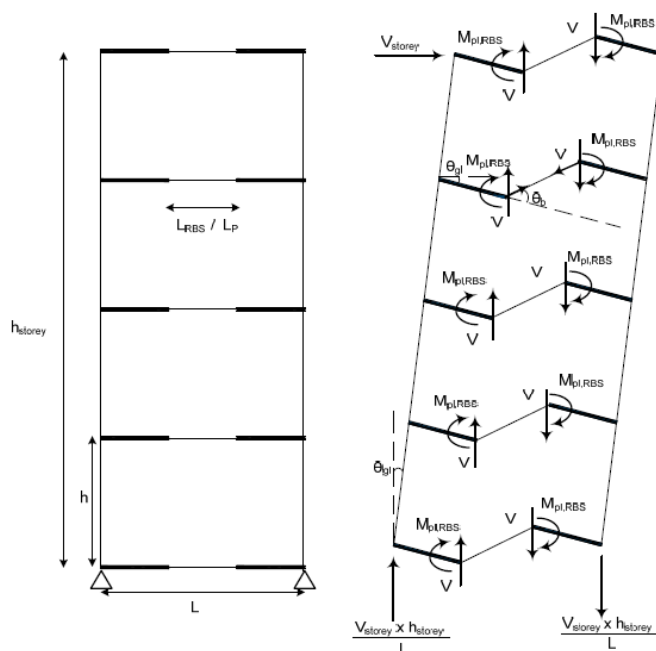
M_{ov} je moment prevračitve okvira

$V_{etaže}$ je strižna sila v etaži

L je osna razdalja med stebri

h je osna razdalja med FUSEIS nosilci

Zgornje enačbe kažejo, da strižne sile in momenti stebrov ter nosilcev ostanejo konstantni, medtem ko se osna sila v stebri linearno spreminja po višini.



Slika 27: Prikaz sistema (levo) ter notranje sile in momentov v stebrih in nosilcih (desno) (Vayas idr., 2013)

(2) Etažno silo ob doseženem mejnem stanju nosilcev kot disipativnih elementov zapišemo kot:

$$V_{etaže} = \frac{2 \cdot \sum M_{b,Rd}}{h_{etaže}}$$

Kjer sta:

$M_{b,Rd}$ je projektna upogibna nosilnost FUSEIS nosilcev

$h_{etaže}$ je etažna višina

(3) Ob upoštevanju oslabljenih prerezov na razdalji l_{RBS} , zapišemo etažno silo:

$$V_{etaže} = \frac{2 \cdot \sum M_{pl,RBS,Rd}}{h_{etaže}} \cdot \frac{L}{l_{RBS}}$$

Kjer so:

$M_{pl,RBS,Rd} = W_{pl,RBS} \cdot f_y$ je projektna upogibna nosilnost oslabljenega območja nosilca

l_{RBS} je osna razdalja med oslabljenimi nosilci

L je osna razdalja med stebroma

(4) Celotno strižno silo označimo kot V_b , torej število potrebnih FUSEIS sistemov določimo kot:

$$m = \frac{V_b}{V_{etaže}}$$

Za m število sistemov morajo stebri prenesti osno silo vsaj:

$$N_{c,Ed} = \frac{M_{ov}}{m \cdot L}$$

(5) Prečnih prerezov, tako nosilcev kot stebrov, ne smemo določiti le iz kriterija nosilnosti, vendar moramo deformacije preveriti tudi v skladu z vplivi teorije drugega reda oz. povečanja momentov na račun osnih sil, ki zaradi zamaknjene konstrukcije povečajo momente. Kontrolirati moramo razmerje med gravitacijsko obtežbo in elastično kritično silo, ki ne sme biti večje od 0,1, ob neupoštevanju vplivov drugega reda oz. večje od 0,3 v vsakem primeru. Ocena razmerja po Horneju:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h_{etaže}}$$

Kjer so:

P_{tot} je skupna gravitacijska obtežba v etaži in nad etažo, ki jo upoštevamo v potresnem projektnem stanju

d_r je projektni medetažni pomik (razlika med zgornjim in spodnjim pomikom)

V_{tot} je celotna prečna sila v etaži zaradi potresa

$h_{etaže}$ je etažna višina

Alternativno lahko določimo koeficient θ preko faktorja povečanja projektne obtežbe, s katerim se doseže elastična kritična obtežba pri globalni uklonski obliki:

$$\theta = \frac{q}{\alpha_{cr}}$$

(6) Ob globalnih medetažnih zasukih okvira θ_{gl} med potresno obremenitvijo pa disipativni elementi dosežejo večje rotacije, ki jih določimo kot:

$$\theta_p = \frac{l}{l_n} \cdot \theta_{gl}$$

Kjer so:

θ_p je plastična rotacija varovala

l je osna razdalja med stebri

l_n je osna razdalja med plastičnimi členki – neto dolžina varovala

(7) V primeru FUSEIS 1-2, kjer je l_n mnogo manjši od l , lahko upoštevamo kar rotacije zatiča.

3.1.2 Linearno elastična analiza

(1) Za projektiranje stavb s FUSEIS1 sistemi moramo upoštevati SIST EN 1993 in SIST EN 1998. Dodatna pravila pa zagotavljajo, da bo do plastifikacije prišlo na želenih mestih, torej varovalnih nosilcih ali zatičih. Najpomembnejše je, da zagotovimo, da so varovalni elementi zmožni disipirati energijo.

(2) Osnovna metoda za določanje potresnih vplivov na okvir je modalna analiza s spektri odziva, ki uporablja linearno elastičen model konstrukcije in projektni spekter. Nelinearne analize in testi so pokazali, da je najvišji možni faktor obnašanja q enak 5.

(3) Projektne zahteve nam predstavljajo omejitve pomikov etaž, saj so rotacijske kapacitete disipativnih elementov razmeroma majhne. Projektne pomike etaž d_s zato določimo konzervativno in v izračunu upoštevamo redukcijski faktor q_Ω :

$$d_s = q_u \cdot q_\Omega \cdot d_e$$

Kjer so:

d_s je pomik neke točke konstrukcije zaradi potresne obtežbe

d_e je pomik iste točke konstrukcije, določen pri linearni analizi glede na projektni spekter odziva

q_u je faktor obnašanja, ki ga lahko vzamemo kar enakega faktorju duktilnosti μ_d , če velja $T_1 > T_C$

q_Ω je faktor obnašanja, ki ga lahko vzamemo kar enakega rotacijski kapaciteti FUSEIS nosilca/zatiča

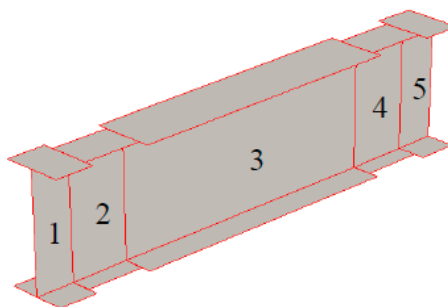
(3) Pri nelinearni analizi kot merodajne pomike zaradi potresnih obremenitev upoštevamo kar takšne pomike, kot smo jih dobili pri analizi. Za projektiranje elementov pa moramo upoštevati faktor prereza Ω in faktor materiala γ_{ov} .

(4) Uporabi se prostorski 3D model, pri čemer je potrebno upoštevati sledeče smernice:

a) FUSEIS elementi naj bodo nadomeščeni z ustreznimi končnimi elementi

b) Toga območja morajo biti zagotovljena od središča stebrov navzven, da izločimo neobstoječe gibljivosti nosilca

c) Dolžina nosilca naj bo razdeljena na 5 območjih, dolžina zatičev pa naj bo razdeljena na 3 območja



Slika 28: Skica določitve polj končnih elementov oslabljenega nosilca (Vayas idr., 2013)

- č) Preostali konstruktivni elementi naj bodo nadomeščeni z običajnimi ustreznimi končnimi elementi.
d) Spoj nosilec-steber naj bo prikazan kot tog, delno tog ali členkast, odvisno od detajlov povezave.

Kontrola disipativnih elementov

Disipativni elementi, nosilci ali zatiči, naj bodo preverjeni, da prenesejo notranje sile in momente, ki so določeni iz analize konstrukcije.

- (1) Preveriti je potrebno kapaciteto momentov:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,RBS,Rd}} \leq 1,0$$

Kjer sta:

M_{Ed} je projektni upogibni moment

$M_{pl,RBS,Rd}$ je plastična upogibna nosilnost oslabiljenega dela nosilca

- (2) Preveriti je potrebno odpornost na strig:

$$\frac{V_{CD,Ed}}{V_{b,pl,Rd}} \leq 1$$

Kjer sta:

$V_{CD,Ed} = \frac{2 \cdot M_{pl,RBS,Rd}}{l_{RBS}}$ je projektna obremenitev v strigu

$V_{b,pl,Rd}$ je plastična strižna nosilnost nosilca

- (3) Strig vpliva tudi na določitev $M_{pl,RBS,Rd}$ v primeru kadar velja:

$$\frac{V_{CD,Ed}}{V_{b,pl,Rd}} > 0,5$$

Iz kombinacije zgornjih dveh enačb ugotovimo, da moramo vpliv striga upoštevati, kadar velja:

$$l_{RBS} < \frac{4 \cdot M_{pl,RBS,Rd}}{V_{b,Rd}} = \frac{4 \cdot W_{pl,RBS}}{A_v / \sqrt{3}}$$

Da se izognemo interakciji med strižno silo in momentom, morajo biti pasnice tako reducirane, da je zadoščeno zgornji enačbi.

- (4) Preveriti moramo nosilnost na koncu nosilca:

$$\frac{M_{CD,Ed}}{M_{b,pl,Rd}} \leq 1,0$$

Kjer sta:

$M_{CD,Ed} = \frac{l_b}{l_{RBS}} M_{pl,RBS,Rd}$ je projektna kapaciteta upogibnega momenta

$M_{b,pl,Rd}$ je plastična upogibna nosilnost nosilca

- (5) Kontrole za bočno zvrnitev elementov, ki vsebujejo plastične členke ni potrebno opraviti, saj imajo FUSEIS nosilci v splošnem majhno dolžino.

Kontrola spojev

(1) Upogibna nosilnost

$$M_{CD,con,Ed} = \max\{M_1, M_2\}$$

Kjer sta:

$$M_1 = 1,1 \cdot \gamma_{ov} \frac{l_b}{l_{RBS}} M_{pl,RBS,Rd}$$

$$M_2 = 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot M_{u,b}$$

Kjer so:

$$M_{u,b} = W_{pl,b} \cdot f_u$$

$$\gamma_{ov} = \frac{f_{y,act}}{f_y} \text{ ali } \gamma_{ov} = 1,25$$

l_b je neto dolžina nosilca

l_{RBS} je osna razdalja med oslavljenimi območji

$f_{y,act}$ je dejanska meja tečenja nosilca

f_u je mejna nosilnost nosilca

$W_{pl,b}$ je plastični odpornostni moment na koncu nosilca

(2) Strižna sila

$$V_{CD,con,Ed} = 1,1 \cdot \gamma_{ov} \frac{2 \cdot M_{pl,RBS,Rd}}{l_{RBS}}$$

(3) Kadar oslabitev ni in območje spojev ojačamo z dodatnimi pločevinami, mora ojačano območje in spoj imeti moment enak:

$$M_{con,CD} = \frac{l_b}{l_{net}} \cdot M_{u,b}$$

Kjer so:

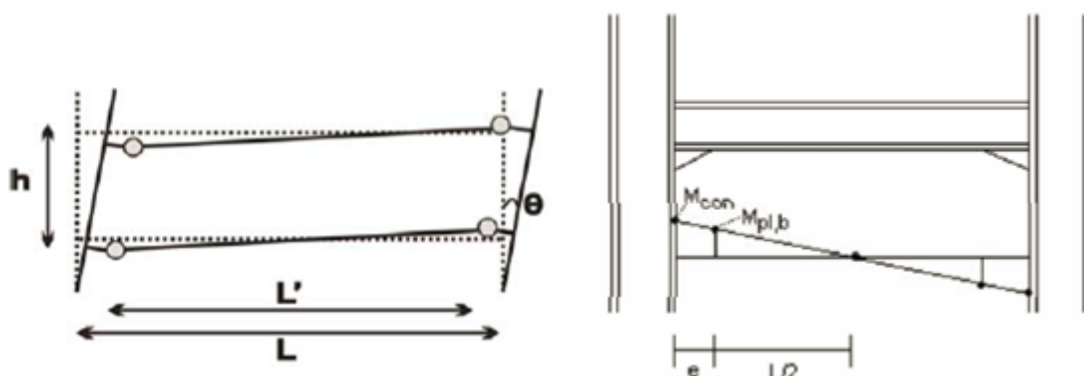
l_{net} je neto neojačana dolžina nosilca

$$M_{u,b} = W_{pl,b} \cdot f_u$$

Projektno strižno silo spoja lahko izračunamo kot:

$$V_{con,CD} = \frac{2 \cdot M_{con,CD}}{l_b}$$

(4) Oba načina sta bila eksperimentalno potrjena za učinkovita in zagotavljata nastanek plastičnega člena stran od spoja.



Slika 29: Načina zagotovitve nastanka plastičnega členka stran od spoja (Vayas idr., 2013)

Kontrola nedisipativnih elementov

(1) FUSEIS stebri in nosilci (1-2) morajo prenesti naslednje vplive:

$$N_{CD,Ed} = N_{Ed,G} + 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot N_{Ed,E}$$

$$M_{CD,Ed} = M_{Ed,G} + 1,1 + \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot M_{Ed,E}$$

$$V_{CD,Ed} = V_{Ed,G} + 1,1 + \gamma_{ov} \cdot \Omega \cdot V_{Ed,E}$$

Kjer so:

$N_{Ed,G}$ so osne sile v stebru zaradi nepotresnih vplivov vključenih v potresnih vplivih

$N_{Ed,E}$ so osne sile v stebru zaradi potresnih vplivov

$$\gamma_{ov} = 1,25$$

$\Omega = \min \Omega_i = \min \left\{ \frac{M_{pl,RBS,Rd,i}}{M_{Ed,i}} \right\}$ je minimalna vrednost relevantnih razmerij za vse FUSEIS nosilce v

stavbi

3.2 Projektiranje disipativnega spoja na mestu diskontinuitete nosilca

Disipacija energije in posledično poškodbe se lahko zgodijo le zaradi neelastičnega obnašanja zamenljivih delov. Za zagotovitev nepoškodovanosti nezamenljivih delov, morajo biti ti dimenzionirani tako, da ostanejo v območju elastičnosti.

Projektiranje konstrukcij z uporabo varovalnih elementov poteka po iterativnem postopku do ugotovitve optimalne rešitve. Dimenzioniranje elementov z upoštevanjem potresne nevarnosti je zelo kompleksno, saj ne moremo natančno določiti notranjih sil. Resnična nevarnost dogajanja je v veliki meri odvisna od mehanskih karakteristik elementov. Najprimernejši način za izračun maksimalnega momenta je zato rezultat iterativnega postopka.

3.2.1 Predhodno projektiranje

(1) Najprej je potrebno določiti sovprežni prerez nosilca. Varovalo v glavnem nudi odpor potresnim silam, zato dimenzije nosilca določimo samo glede na mejno stanje za kombinacijo osnovnih obtežb. Dimenzije sovprežnega nosilca tako določimo za gravitacijsko obtežbo glede na pozitivni upogibni moment na sredini razpona.

(2) Z dobljenim $M_{pl,Rd,nosilec}$ lahko preko faktorja α izračunamo nosilnost varovala $M_{Rd,varovalo}$. Vrednost α izberemo glede na želeni faktor obnašanja q in zahteve glede disipacije energije izberemo. Priporočena vrednost tega koeficienta zavzema vrednosti med 0,50 in 0,80. Z izbiro višjih vrednosti

sicer zagotavljamo večjo nosilnost, disipacijo energije in togost, vendar z nižjimi vrednostmi učinkoviteje preprečujemo širjenje poškodb na nezamenljive dele konstrukcije:

$$M_{pl,Rd,var ovalo} = \alpha \cdot M_{pl,Rd,nosilec}$$

(3) Varovalne elemente klasificiramo po pravilih razvrščanja vozlišč, ki so določena v EN 1993-1-8. Klasifikacija je možna na dva načina: po nosilnosti in po togosti. Spremenljivke, ki so v standardu definirane za vozlišča moramo dosledno prevesti na spremenljivke za varovala.

Po nosilnosti

Spoje lahko razvrstimo v tri različne skupine: polno nosilni, delno nosilni in nominalno členkasti. Varovala, ki so postavljena blizu konca povezave, lahko uvrstimo med polno nosilna, če je zadoščeno enačbama:

$$M_{max,var ovalo} > M_{pl,nosilec}$$
$$M_{max,var ovalo} > 2M_{pl,stebr}$$

Kjer je $M_{pl,nosilec}$ projektna plastična upogibna nosilnost nosilca in $M_{pl,stebr}$ projektna plastična upogibna nosilnost stebra.

Varovalo klasificiramo kot nominalno členkasto, če njegova projektna upogibna nosilnost ne presega 0,25-kratnika projektne upogibne nosilnosti, zahtevane za klasifikacijo polno nosilnega vozlišča. Vozlišče, ki ne izpolnjuje zahtev za polno nosilna ali nominalno členkasta vozlišča se razvrsti kot delno nosilno vozlišče.

Po teh zahtevah večina varoval sodi v kategorijo delno nosilnih vozlišč.

Po togosti

Glede na standard EN 1993-1-8 spoje glede na togost razvrstimo po njihovi začetni rotacijski togosti v tri različna območja – togo, delno togo in nominalno členkasto.

Glede na njihovo začetno togost $K_{fuse,ini}$ vozlišče uvrstimo med toge ali nominalno členkaste, če veljata enačbi:

$$K_{var ovali,ini} \geq 25 \frac{E_a I_{nosilec}}{L_{nosilec}}$$
$$K_{var ovalo,ini} \leq 0,5 \frac{E_a I_{nosilec}}{L_{nosilec}}$$

Kjer so:

E_a je elastični modul jeklenega nosilca

$I_{nosilec}$ je vztrajnostni moment nosilca

$L_{nosilec}$ je razpon nosilca (razdalja med osmi sosednjih stebrov)

Enačba zgornje meje ni veljavna za okvire, pri katerih sistem povezja prispeva k redukciji horizontalnega pomika za več kot 80%, saj takrat uporabljamo drugačen pogoj.

V tem primeru lahko varovalo klasificiramo kot togo, če dodatno velja sledeča enačba za vsako etažo:

$$\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1$$

Kjer sta:

K_b srednja vrednost razmerja I_b/L_c za vse nosilce na vrhu obravnavane etaže

K_c srednja vrednost razmerja I_c/L_c za vse stebre v obravnavani etaži

Pri nosilcu moramo upoštevati tudi sovprežno obnašanje, zato je potrebno dimenzionirati še po pravilih SIST EN 1994-1-1. V skladu s tem moramo prečni prerez nosilca uskladiti z jeklenim prečnim

prerezom in upoštevati reološke vplive. Vpliv lezenja upoštevamo preko modularnega razmerja η_L , ki je definirano kot:

$$\eta_L = \frac{E_a}{E_{cm}} (1 + \psi_L \varphi_t)$$

Kjer so:

E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona za kratkotrajno obtežbo v skladu s SIST EN 1992-1-1

ψ_L koeficient tečenja $\varphi(t, t_0)$ v skladu s SIST EN 1992-1-1, vzamemo vrednost 1,9

φ_t koeficient tečenja $\varphi(t, t_0)$ v skladu s SIST EN 1992-1-1

3.2.2 Projektiranje varoval na upogib

(1) Upogibno obnašanje varoval je asimetrično, kar pomeni, da moramo izračunati $M_{Rd, varoval}^+$ in $M_{Rd, varoval}^-$.

(2) Upogibno obnašanje varovala nadzorujemo preko geometrijske vitkosti, ki je podana z enačbo:

$$\lambda = \frac{L_0}{t_{varoval}}$$

Kjer sta:

L_0 je prosta upogibna dolžina varovala

$t_{varoval}$ je debelina predvidene pločevine

(3) Prosta dolžina L_0 je določena z vodoravno razdaljo med vijaki na vsaki strani varovala za privijačene sisteme ali med zvari na vsaki strani varovala za privarjene sisteme.

(4) Upoštevajoč plastični raznos sil lahko zanemarimo doprinos pločevin na pasnici pri določanju upogibne odpornosti.

Pločevina na pasnici

(1) Glede na moment varovala izberemo dimenzije pločevine na pasnici in ob tem predpostavimo, da plastična nevtralna os leži v težišču armature, ki jo zato pri tem zanemarimo:

$$R_{f, varoval} = \frac{M_{Rd, varoval}}{z}$$

$$A_{f, varoval} = \frac{R_{f, varoval}}{f_{yd}}$$

Kjer so:

$M_{Rd, varoval}$ je pozitivni upogibni moment varovala

f_{yd} je projektna meja tečenja jekla določena s SIST EN 1993-1-1

z je ročica med pločevino na pasnici in težiščem armature

(3) Negativni upogibni moment $M_{Rd, varoval}^-$ določimo preko elasto-plastične analize prečnega prereza s pomočjo enačbe:

$$\sigma_{mod,b}(\varepsilon) = \min \{ \sigma_r(\varepsilon), \sigma_b(\varepsilon) \}$$

Kjer sta:

$\sigma_b(\varepsilon)$ je odnos med napetostjo in deformacijo, določen s pomočjo nateznih preizkusov v skladu s SIST EN 1993-1-5

$$\sigma_b(\varepsilon) = \frac{f_{yd}}{\lambda_f \cdot \sqrt{2\varepsilon}} \text{ je upogibni odnos med napetostjo in deformacijo}$$

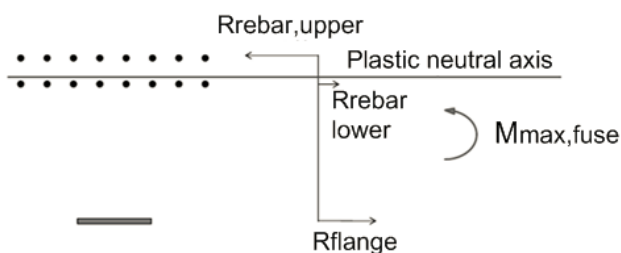
Vzdolžna ojačitve

(1) Ob poznanem prerezu pasnice je z iterativnim postopkom možna določitev potrebne ploščine armature, ki bo zagotavljala, da bo pozicija plastične nevtralne osi na predpostavljenem mestu. Predlagani količini zgornje in spodnje armature za prvo oceno iterativnega postopka sta:

$$A_{zg.armature} = 5 \cdot A_{pasnice} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{sd}}$$

$$A_{sp.armature} = 2 \cdot A_{zg.armature}$$

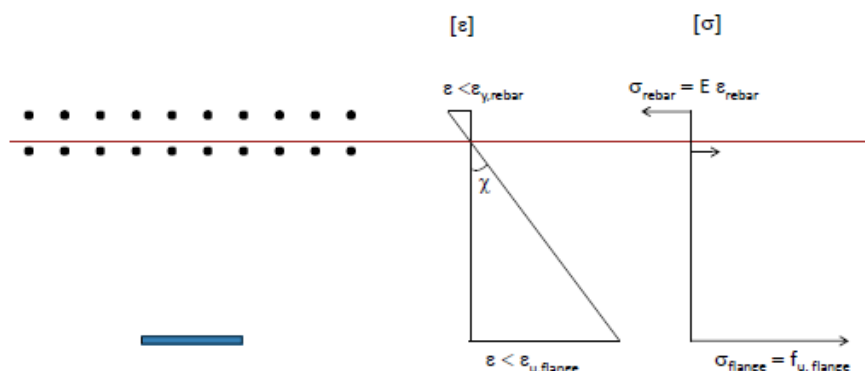
(2) Uporabimo predlagani model za izračun dejanskega momenta varovala. Čeprav to ne drži popolnoma, upoštevamo dejstvo, da ravni odseki ostanejo ravni in tako dobimo linearen potek napetosti po višini. Moment varovala $M_{max,varovala}$ določimo iz sheme (spodnja shema velja za pozitivni upogibni moment, medtem ko za negativni upogibni moment veljajo obratne smeri sil in momentov):



Slika 30: Shema notranjih sil spoja (Vayas idr., 2013)

Odpornostne sile R_i posameznih elementov varovala zdaj lahko izračunamo. Sili $R_{armature}$ sta postavljeni zelo blizu plastični nevtralni osi in jih izračunamo s površino in napetostmi na armaturo kot odziv na razvoj maksimalne sile pasnice, ki je določena kot $R = \sigma_{flange} \cdot A$. Kjer je A prečni prerez elementa, σ_{flange} pa napetost na elementu ob določeni deformaciji. Za določitev pozitivnega upogibnega momenta vzamemo maksimalno napetost $\sigma_{max,flange}^+$, mejna natezna napetost jekla pasnice je $f_{u,flange}$. Za negativni upogibni moment je nekoliko kompleksnejša določitev $\sigma_{buckling,flange}$, ki pa si jo olajšamo tako, da za maksimalno upogibno napetost pasnice vzamemo kar maksimalno napetost pri negativnem upogibnem momentu $\sigma_{max,flange}^-$.

Za zagotovitev možnega razvoja takšnih napetosti tako pri pozitivnih kot tudi negativnih upogibnih momentih je potrebno določiti pozicijo plastične nevtralne osi preko ravnotežnih enačb $\sum_i R_i = 0$. Dodatno moramo preveriti položaj plastične nevtralne osi, saj deformacije na mestu pasnice ne smejo preseči maksimalnih dovoljenih $\varepsilon_{u,flange}$. Nato lahko izračunamo želene napetosti po osnovni enačbi $\sigma = E\varepsilon$.



Slika 31: Shema poteka deformacij in napetosti v spoju (Espinha, 2011)

Vendar po takšnem principu pridemo do odpornostnih sil, ki se razlikujejo od tistih, s katerimi smo določili plastično nevtralno os. Zato moramo iterativno ponavljati postopek, dokler niso izpolnjeni ravnotežni pogoji. Ko enkrat dosežemo ravnotežno stanje, lahko moment izračunamo po drugi ravnotežni enačbi:

$$M_{\max, \text{varoval}} = \sum_i R_i z_i$$

Kjer je z_i ročica i -tega elementa.

3.2.3 Elastična upogibna togost

(1) Upogibna togost varovala je določena kot količnik $M_{y, \text{varoval}}$ s plastičnim zasukom varovala θ_p . To velja tako za pozitivni kot negativni upogibni moment.

(2) Plastični moment dobimo preko elastične analize, pri čemer moramo upoštevati, da pride do plastifikacije pasnice. Projektna meja tečenja f_{yd} pasnice naj bo uporabljena za pozitivni upogibni moment in projektna meja tečenja ob upogibu $f_{yd,b}$ za negativni upogibni moment:

$$f_{yd,b} = \min \{ f_{yd} \cdot \sigma_b(\varepsilon_y) \}$$

(3) Plastične rotacije θ_y določimo preko enačbe $\chi_y = L_0 \theta_y$.

3.2.4 Projektiranje varoval na strig

(1) Privzamemo, da celotno strižno odpornost varovala nudijo pločevine na stojini.

(2) Glede na moment varovala lahko s pomočjo ravnotežnih enačb in ob predpostavki konstantnosti strižne sile po dolžini nosilca izračunamo maksimalno strižno silo:

$$V_{Ed,M} = \frac{M_{\text{varoval}, Rd}^+ - M_{\text{varoval}, Rd}^-}{d}, \text{ kjer je } d \text{ razdalja med varovali.}$$

Po SIST EN 1998-1 določim projektno strižno silo kot $V_{Ed} = V_{Ed,M} + V_{Ed,G}$.

Z dobljeno strižno silo dimenzioniramo stojino, ki mora prenesti celoten strig:

$$A_w = \frac{V_{Ed} \cdot \sqrt{3}}{f_{yd}}$$

(3) Preveriti moramo tudi, da stojina prenese vplive lokalnega izbočenja v strigu po SIST EN 1993-1-5:

$$V_{b,Rd} = \frac{\chi_w h_w t_w f_{y,w}}{\sqrt{3}}$$

Kjer so:

h_w je višina pločevine na stojini

t_w je debelina pločevine na stojini

$f_{y,w}$ je napetost tečenja jeklene pločevine

χ_w je uklonski redukcijski faktor

Vrednost χ_w je enaka 1,0, dokler velja pogoj:

$$\frac{h_w}{t_w} < \frac{72}{\eta} \sqrt{\frac{235}{f_{y,w}}}$$

Kjer je η parameter, čigar vrednost je v Evrokodih predlagana kot 1,2.

3.2.5 Projektiranje nedisipativnih elementov

(1) Spoj med varovalom in jeklenim nosilcem mora biti tog in polno nosilen. Glede na SIST EN 1998-1 izračunamo projektno silo, ki deluje na nedisipativne predele spoja kot:

$$F_{Ed} = 1,1 \cdot \gamma_{ov} \cdot A \cdot f_u$$

Kjer so:

A je natezno nosilno območje pasnice, kjer moramo upoštevati neto prečni prerez za vijaçene spoje varoval in bruto prečni prerez za varjene spoje varoval

γ_{ov} je faktor dodatne nosilnosti, glede na SIST EN 1998-1; priporočena vrednost je 1,25

f_u je mejna natezna nosilnost jekla varovala, glede na SIST EN 1993-1-1.

(2) Preveriti je potrebno še vse zahteve, ki jih podaja SIST EN 1993-1-8.

Vijaçeni spoji

Kljub temu, da vijaki sodijo med zamenljive dele, lahko nepovratne deformacije vijakov povzročijo težave pri menjavi varoval, zato želimo, da njihove deformacije ostanejo elastične in jih upoštevamo kot nedisipativne elemente. Torej je potrebno zadostiti enačbi:

$$F_{v,Rd} > \frac{F_{Ed}}{n}$$

Kjer so:

$F_{v,Rd}$ je projektna strižna nosilnost veznega sredstva, glede na SIST EN 1993-1-8

F_{Ed} je projektna sila na nedisipativne elemente

n je število vijakov, ki prenašajo strižno silo

(3) Vijaki morajo prednapeti in projektirani tako, da se obnašajo kot tip B, glede na SIST EN 1993-1-8

Varjeni spoji

(1) Izogniti se moramo krhki porušitvi zvarov, ki povezujejo varovalo z nosilcem, zato morajo zagotavljati, da se maksimalne napetosti razvite na varovalu varno prenesejo na nosilec. Zadoščeno mora biti enačbi:

$$F_{w,Rd} > F_{Ed}$$

Kjer sta:

$F_{w,rd}$ je projektna nosilnost zvara, glede na SIST EN 1993-1-8

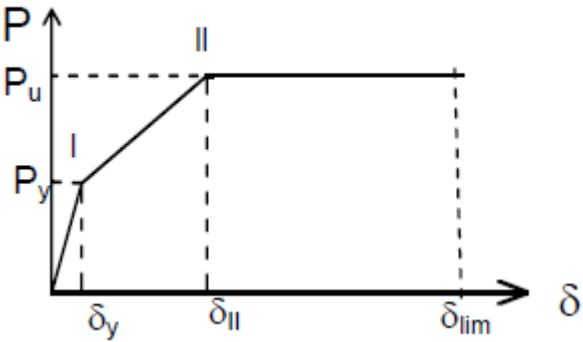
F_{Ed} je projektna sila na nedisipativne elemente

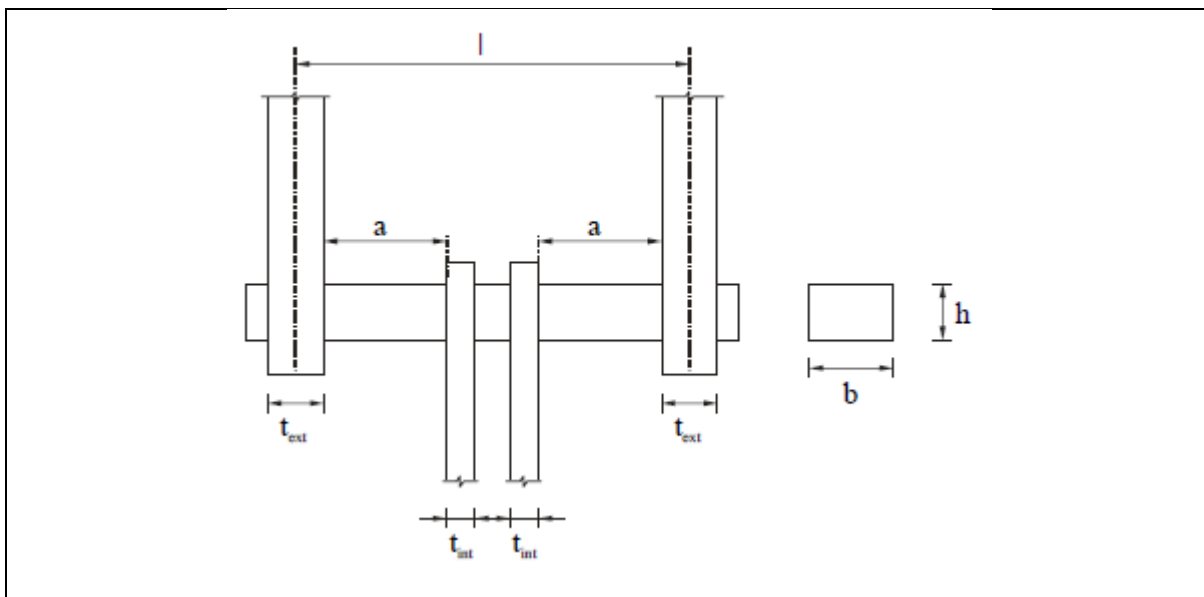
3.3 Projektiranje disipativnega spoja s čepom

3.3.1 Mehanske lastnosti spojev z INERD čepom

Mehanske lastnosti čepa pri INERD spoju lahko opišemo z grafom sila-pomik. Relevantne vrednosti sile in pomika so podane v spodnji tabeli.

Preglednica 4: Izračun sil in pomikov v INERD spoju s čepom

| | Pločevini z odprtino v | Sila | Pomik |
|---|---|--|--|
| Točka I (tečenje y) | Tlaku | $P_{y,Rk} = \frac{2 \cdot M_p}{(a/1,1)}$ | $\delta_y = 1,5 \cdot \frac{M_p}{E \cdot I} \cdot l^2 \cdot \frac{a}{6} \cdot (3 - 4\alpha)$ |
| Točka II (mejni u) | Tlaku | $P_{u,Rk} = \frac{4 \cdot M_p}{(a/1,1)}$ | $\delta_{II} = 0,2 \cdot a$ |
| Točki I in II | Nategu | 90% zgornjih vrednosti za P_y in P_u | |
| Dodatna nosilnost za kontrole | | 30% več kot P_u | |
| Deformacijska kapaciteta |  <p>$\delta_{lim} = 0,8 \cdot a$</p> | | |
| $M_p = W_{pl} \cdot f_y$ $\alpha = \frac{a}{l}$ l = dolžina čepa a = dolžina med notranjimi in zunanji pločevinami z odprtino f_y = napetost tečenja čepa W_{pl} = plastični odpornostni moment prečnega prereza čepa I = vztrajnostni moment prečnega prereza čepa E = elastični modul materiala čepa | | | |



3.3.2 Predlagane spremembe standarda SIST EN 1998

Takšni okviri s povezji morajo biti dimenzionirani v skladu z osnovnimi pravili, ki jih podaja SIST EN 1998. Pri tem pa upoštevamo še, da disipacija energije poteka v čepih in ne v povezjih. Spodnja tabela podaja predloge modificiranih pravil Evrokoda.

Preglednica 5: Originalni tekst SIST EN 1998 in predlog modifikacij teksta

| Odstavek | Originalni tekst EC8 | Predlog modifikacij teksta |
|--|---|---|
| 6.7.1 Osnovne zahteve | (1)P Okvire s centričnimi povezji je potrebno projektirati tako, da plastifikacija nateznih diagonal nastopi pred porušitvijo spojev in pred plastifikacijo ali nestabilnostjo nosilcev in stebrov | Dodati bi bilo potrebno zahteve, da: <ul style="list-style-type: none"> - plastifikacija čepa nastane pred tlačno porušitvijo diagonal in pred plastifikacijo in nestabilnostjo - porušitev spoja nastane pred nestabilnostjo diagonal - je plastifikacija čepa omejena na mejno stanje porušitve - imajo ostali elementi spoja ustrezno nosilnost glede na čep |
| | (2)P Diagonalni elementi povezij morajo biti razporejeni tako, da ima konstrukcija pri spreminjanju smeri delovanja vodoravne obtežbe podobne deformacijske lastnosti v vseh nadstropjih in v vseh zavetrovalnih smereh | Dodati bi bilo potrebno, da opisane zahteve veljajo za diagonale elementov povezij in njihovih spojev. |
| 6.7.2 Analiza | (2)P Pri potresnih vplivih je pri elastični globalni analizi diagonale povezij treba upoštevati na enega od naslednjih načinov: <ul style="list-style-type: none"> - v okvirih z diagonalnimi povezji je treba upoštevati samo natezne diagonale | Dodati bi bilo potrebno, da je v okvirih z diagonalnimi povezji pri potresnih vplivih upoštevati tako natezne kot tudi tlačne diagonale. |
| 6.7.4 Nosilci in stebri | (1) ... | Vključiti bi bilo potrebno še: Ω je |

| | | |
|--|--|--|
| | | minimalna vrednost $\Omega_1 = \frac{P_{u,Rd,i}}{N_{Ed,i}}$ za vse spoje diagonal okvirov s centričnimi povezji; kjer je $P_{u,Rd,i}$ mejna trdnost spoja s čepom |
|--|--|--|

3.3.3 Postopek projektiranja

Za praktično uporabo so predlagani sledeči koraki:

(1) Izbira dimenzij čepa, glede na zahteve:

$$\begin{aligned} \text{a. } \delta_{lim} &= 0,8a \geq \frac{D \cdot H \cdot \cos \alpha}{2} \\ \text{b. } P_{y,Rd} &= \frac{P_{y,Rk}}{\gamma_{Mser}} \geq N_{E,ser} \\ \text{c. } P_{u,Rd} &= \frac{P_{u,Rk}}{\gamma_{M0}} \geq N_{Ed} \end{aligned}$$

Kjer so:

δ_{lim} je deformacijska kapaciteta spoja s čepom

a je prosta razdalja med notranjimi in zunanji pločevinami z odprtino

D je razmerje etažnega pomika proti višini etaže

H je višina etaže

φ je kot naklona diagonale

$P_{y,Rk}$, $P_{u,Rk}$ sta plastična in mejna nosilnost spoja

γ_{m0} je delni varnostni faktor nosilnosti (=1,0)

γ_{mser} je delni varnostni faktor nosilnosti (=1,0)

N_{Ed} je projektna sila v diagonali

$N_{E,ser} = \frac{N_{Ed}}{\nu}$ je projektna sila v diagonali pri mejnem stanju porušitve

ν je redukcijski faktor, ki upošteva nižjo povratno dobo potresne akcije z dosegom mejnih poškodb

(2) Preverjanje dimenzij povezij

$$P_{u,Rk} \leq N_{b,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Kjer je:

$N_{b,Rd}$ je uklonska nosilnost diagonale

(3) Dimenzioniranje pločevin, spojev

Vsi povezovalni elementi (pločevine, spoji) morajo biti preverjeni na projektno silo:

$$P_{Ed} = 1,3P_{u,Rk}$$

Palice z odprtino

- Oslabljeni prerez: $P_{Ed} \leq N_{t,net,Rd}$
- Polni prerez: $P_{Ed} \leq N_{t,Rd}$
- Nosilnost na bočni pritisk: $P_{Ed} \leq F_{b,Rd}$

- Debelina pločevin naj dodatno zadošča zahtevam:

$$t_{ext} \geq 0,75h$$

$$t_{int} \geq 0,5t_{ext}$$

$$a \geq h$$

Kjer so:

h je višina čepa

t_{ext} je debelina zunanjih pločevin

t_{int} je debelina notranjih pločevin

a je prosta dolžina med zunanjimi in notranjimi pločevinami

- kvaliteta jekla pločevin mora biti enaka ali višja kvaliteti jekla čepov

Vijaki

- Nosilnost na bočni pritisk: $P_{Ed} \leq F_{b,Rd}$
- Nosilnost v strigu: $P_{Ed} \leq F_{V,Rd}$

Zvari

- Nosilnost v strigu

4 ZAKLJUČEK

Po hudih potresih v 90. letih 20. stoletja so različni avtorji iskali rešitve za povečanje potresne odpornosti jeklenih okvirov. Sčasoma so bili razviti različni disipativni elementi, ki predstavljajo prihodnost projektiranja jeklenih okvirov z obzirom na potresno odpornost.

V okviru diplomske naloge sem spoznal osnovne sisteme, ki zagotavljajo odpornost konstrukcij pri potresnih obremenitvah in podrobneje predstavil inovativne rešitve na področju disipacije energije v nosilcu, disipacije energije v spoju na mestu diskontinuitete nosilca in disipacije energije v spoju s čepom ter U-spoju. Njihove lastnosti so zadovoljive v pogledu nosilnosti, duktilnosti, togosti ter disipacije energije, hkrati pa omogočajo dokaj preprosto montažo in demontažo, torej so dosegli zadovoljive rezultate tudi v smislu zamenljivosti.

Z razvojem disipativnih sistemov je bil dosežen pomemben korak k zagotavljanju varnosti pri protipotresni gradnji. Sedaj je naloga profesorjev in mladih inženirjev, da se s takšnimi rešitvami bolje spoznajo in jih učinkovito implicirajo v prakso, doseženi učinki pa bodo posledično prinesli tudi zadovoljstvo uporabnikov.

VIRI

Butterworth, J., Clifton, C. Performance of Hierarchical Friction Dissipating Joints in Moment Resisting Steel Frames. 2000. Auckland, Nova Zelandija. 12th World Conference on Earthquake Engineering.

Chancellor, N., Eatherton, M., Roke, D., Akbaş, T. 2014. Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures for the City of Tomorrow. Buildings 4, 3: 520-548

Chang, Y. 2015. Analytical and Experimental Investigations of Modified Tuned Liquid Dampers (MTLDs). Magistrska naloga. Toronto, University of Toronto, Department of Civil Engineering.

Chu, S., Soong, T., Reinhorn, A. 2005. Active, Hybrid and Semi-Active Structural Control: A Design and Implementation Handbook. 294 str.

Espinha, M. 2011. Hysteretic Behaviour of Dissipative Welded Devices for Earthquake Resistant Steel Frames. Doktorska disertacija. Lizbona, Universidade Technica de Lisboa, Instituto Superior Tecnico.

FEMA-350: 2000. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Building

Hussain, S., Van Benschoten, P., Al Satari, M., Lin, S. 2006. Buckling Restrained Braced Frame (BRBF) Structures: Analysis, Design and Approvals Issues. Long Beach, Združene države Amerike. 75th SEAOC Annual Convention.

Iwankiw, N. 2004. Seismic design enhancements and the reduced beam section detail for steel moment frames. V: Practice Periodical on Structural Design and Construction Vol.9 (2). ASCE.

Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G. 2012. Friction T-stub joints under cyclic loads: Experimental behavior. 2012. Behaviour of Steel Structure in Seismic Areas: 269-274

Khoo, H., Clifton, G., Butterworth, J., MacRae, G. 2012. Shim and bolt size effects on Asymmetric Friction Connection. Behaviour of Steel Structure in Seismic Areas: 227-233

Mazzolani, F. M., Piluso V. 1993. ECCS Manual on Design of Steel Structures in Seismic Zones. European Convention for Constructional Steelwork Publications. 278 str.

Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R., Hess, G., Krumme, R., Hayes, J., Sweeney, S. 2004. Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys. Journal of Structural Engineering 130, 5: 732-740

Plumier, A., Doneux, C., Castiglioni C., Brescianini, J., Crespi, A., Dell'Anna, S., Lazzarotto, L., Calado, L., Ferreira, J., Feligioni, S., Bursi, O., Ferrario, F., Somavilla, M., Vayas, I., Thanopoulos, P., Demarco, T. 2006. Two Innovations for Earthquake Resistant Design The INDERD project. Bruselj, Research for Fund for Coal and Steel.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila potresni vplivi in pravila za stavbe. 192 str.

SIST EN 1993-1-1: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe

SIST EN 1993-1-8: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8. del: Projektiranje spojev – Nacionalni dodatek

Tirca, L., Caprarelli, C., Danila, N. 2012. Seismic simulation and design of low-rise CBF building with and without dissipative connections using OpenSees. *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*: 365-371

Torunbalci, N. 2004. *Seismic Isolation and Energy Dissipating Systems in Earthquake Resistant Design*. Vancouver, Kanada. 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Vayas, I., Karydakis, Ph., Dimakogianni, D., Dougka, G., Castiglioni, C. A., Kanyilmaz, A., Calado, L., Proença, J.M., Espinha, M., Hoffmeister, B., Rauert, T., Kalteziotis, D. 2013. Dissipative devices for seismic-resistance steel frames. Bruselj, Research Fund for Coal and Steel.