

IZBOLJŠAVE POTRESNEGA ODZIVA OBSTOJEČIH MOSTOV

IMPROVEMENTS OF THE SEISMIC RESPONSE OF EXISTING BRIDGES

izr. prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.

prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR)

tisak@ikpir.fgg.uni-lj.si, matej.fischinger@ikpir.fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 624.042.7

Povzetek | Prikazali smo eksperimentalne ciklične preiskave odziva AB-mostnih stebrov, ki vsebujejo pomanjkljive konstrukcijske detajle in možnosti za izboljšanje njihovega potresnega odziva. Najprej je analiziran tipičen škatlast steber, za katerega je poleg drugih pomanjkljivih detajlov značilna premajhna strižna nosilnost. Upogibni odziv stebra je bil boljši, kot je bilo pričakovano, predvsem zaradi ugodne škatlaste oblike prečnega prereza in nizke tlačne sile. Steber se je porušil v strigu, zato je bila na dva načina povečana njegova strižna nosilnost. Steber je bil utrjen z betonskim in CFRP-plaščem. Na oba načina je bila pri minimalni utrditvi uspešno povečana njegova strižna nosilnost. Betonski plašč je bil učinkovitejši pri izboljšanju duktilnosti stebra. Boljšo duktilnost stebra bi lahko zagotovili tudi s CFRP-objetjem, vendar bi bilo treba steber utrditi z večjo količino CFRP-trakov (uporabljena je bila minimalna količina CFRP-trakov). Preizkušen je bil tudi tipičen mostni steber s prerezom I-oblike, ki vsebuje zadostno količino strižne armature, vendar ta armatura ne izpolnjuje vseh zahtev standarda EC8/2 glede objekta betonskega jedra in preprečitve uklona upogibne armature. Ugotovili smo, da se lahko v takšnih stebrih zgodi krhka porušitev, ker neustrezno konstruirana in prešibka stremena ne morejo preprečiti uklona vzdolžnih armaturnih palic. Posledično je duktilnost takšnih stebrov premajhna, še zlasti glede na predpostavke, ki so bile uporabljene pri njihovem projektiranju. Preučili smo tudi možnosti za njihovo utrditev, in sicer z uporabo CFRP-plaščev. Poseben problem je predstavljalo sidranje plašča v steber. Ugotovili smo, da sidra iz ogljikovih vlaken niso učinkovita in da bolj obeta sidranje plašča s pomočjo jeklenih ploščic, pritrjenih na steber z jeklenimi vijaki.

Summary | Cyclic experiments of as-built and strengthened RC bridge columns with substandard construction details are presented in the paper. In the first part of the paper, the cyclic response of hollow box column with several substandard details is analysed. Its main deficiency was insufficient shear strength. The flexural response of as-built column was better than it was expected, due to the favourable box shape and low compression forces. The column was strengthened using concrete and CFRP wrapping. Both strengthening techniques successfully increased the shear strength of column with minimum amount of wrapping. The concrete strengthening was more efficient in improving the column ductility capacity. To improve the ductility capacity of the investigated type of column using CFRP wrapping, larger amount of CFRP strips was needed (note that the minimum amount of CFRP strips was used). In the second part of the paper, the investigations of the cyclic response of columns with I shape cross-section are presented. These columns include sufficient amount of the shear reinforcement, but the lateral reinforcement does not fulfil all the requirements of the EC8/2 standard, which are related to the confinement of concrete core and prevention of buckling of the longitudinal bars. The failure of as-built

column was brittle because of the insufficient amount of lateral reinforcement, which was not properly shaped and anchored to the concrete core, could not prevent buckling of the longitudinal bars. Considering the assumptions that were used in its design, the ductility capacity of the investigated column was found to be insufficient. The column was strengthened using CFRP wrapping. The main problem in the design of the strengthening solution was the construction of anchors, which were used to fix CFRP sheets to concrete. Anchoring using carbon fibres was not efficient. The more promising was anchoring using steel plates and steel bolts.

1 • UVOD

Sodobni principi potresnega inženirstva so doobra spremenili nekdanjo prakso projektiranja mostov na potresnih območjih. Še zlasti se je spremenilo projektiranje stebrov, ki kot ključni konstrukcijski elementi odločilno vplivajo na potresno varnost celotnega mostu. Največje spremembe lahko opazimo pri količini in načinu konstruiranja prečne armature.

V starejših mostovih so stebri vsebovali mnogo manj prečne armature, kot to zahtevajo sodobni predpisi in standardi, med njimi tudi standard Evrokod 8 – 2. del (EC8/2) (SIST EN 1998-2, 2006), ki je v Sloveniji v obvezni uporabi od leta 2008. Vzrokov za povečanje prečne armature v stebrih je več.

Standard EC8/2 zahteva, da se zagotovijo naslednje tri poglobilne funkcije prečne armature: 1) prečna armatura mora zagotoviti zadostno strižno nosilnost stebra, 2) mora je biti dovolj, da prepreči uklon vzdolžnih armaturnih palic (upogibne armature), in 3) mora zagotoviti zadostno objetje betonskega jedra. Tako preprečimo tri načine porušitve (glej sliko 1), ki so vsi neduktilni, torej krhki in trenutni,

poškodbe pa težko popravljive oziroma pogosto tudi nepopravljive.

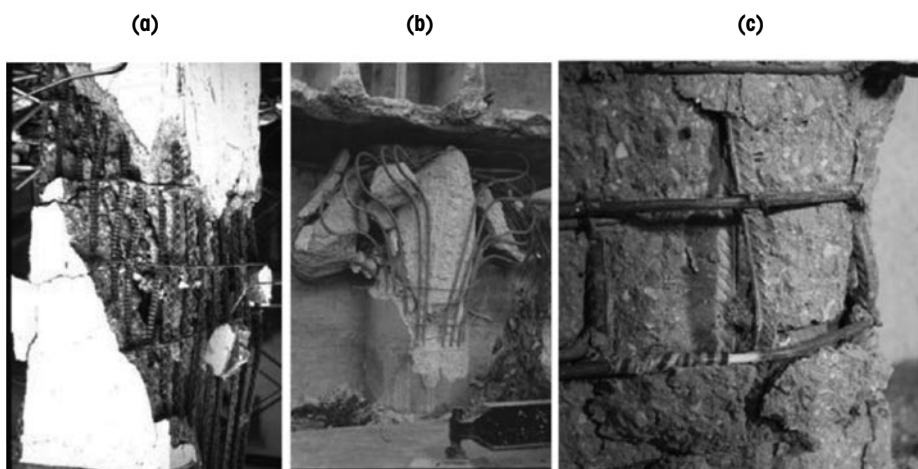
1) Po EC8/2 prvo funkcijo zagotovimo eksplicitno z metodo načrtovanja nosilnosti. Standard namreč predpisuje, da se količina potrebne strižne armature določi na osnovi največjih možnih prečnih sil, ki se lahko pojavijo v stebri, te pa določimo na osnovi dejanske upogibne nosilnosti stebrov. Zato je količina potrebne strižne armature običajno precej večja od tiste, ki bi bila določena zgolj na osnovi računskih prečnih sil. Glede na to, da so v preteklosti ravno računske prečne sile običajno določale potrebno količino strižne armature, je lahko strižna nosilnost, še zlasti kratkih stebrov, pomanjkljiva. Ker so takšni stebri običajno imeli še nekaj pomanjkljivih detajlov, smo jih eksperimentalno preizkusili, da ugotovimo, kakšen je njihov potresni odziv. Preizkusili smo značilen steber (glej 3. poglavje), ki je imel votel škatlast prerez. Rezultati preiskave so prikazani v 3. poglavju. Na osnovi ugotovljenega potresnega odziva smo preučili možne tehnike za njegovo izboljšanje

ter posamezne tudi eksperimentalno preizkusili in primerjali med sabo. Preučili smo možnost strižne utrditve s pomočjo betonskega in CFRP-plašča (angl. Carbon Fiber Reinforced Polymer). Rezultati preiskav so prikazani v 3. poglavju.

2) in 3) Preostali dve funkciji prečne armature (zagotovitev zadostnega objetja betonskega jedra in preprečitev uklona vzdolžnih armaturnih palic) zagotovimo implicitno tako, da upoštevamo konstrukcijska pravila, ki jih predpisuje EC8/2. Slednja so lahko v posameznih primerih precej ostra, zlasti če jih primerjamo s prakso v preteklosti. Običajno se je povečala minimalna predpisana količina stremen in zmanjšale dovoljene maksimalne razdalje med stremenami po višini stebra kot tudi v horizontalni ravnini prečnega prereza (glej 2. poglavje).

Z izjemo najstarejših naj bi bila večina mostov, ki so bili zgrajeni v okviru avtocestnega križa v Sloveniji, projektirana, upoštevajoč vse tri funkcije prečne armature, čeprav takrat EC8/2 ni bil uradni veljavni standard. V skladu s priporočili DARS-a in IKPIR-a so bili mostovi takrat projektirani, upoštevajoč določila predstandarda prEC8/2 (pr ENV 1998-2, 1994) iz leta 1994, kjer so vse te funkcije bile zajete. Vendar najdemo tudi konstrukcije, ko ta določila niso bila upoštevana, in sicer v primerih, kjer so bila določila EC8/2 (prEC8/2) precej ostra, še posebno tista glede zagotavljanja zadostnega objetja betonskega jedra in preprečevanja uklona vzdolžnih armaturnih palic.

Da bi ugotovili, ali so tako stroge zahteve povsem upravičene tudi na območjih srednje seizmičnosti, ki je značilna za Slovenijo, smo eksperimentalno preizkusili značilen mostni steber I-prečnega prereza. Upoštevali smo nekaj značilnih odstopanj od zahtev standarda (glej 2. in 4. poglavje), ki se predvsem nanašajo na drugi dve funkciji prečne armature (zagotavljanje objetja betonskega jedra in preprečitev uklona vzdolžnih armaturnih palic). Rezultati teh preiskav so prikazani v 4. poglavju.



Slika 1 • Možni načini krhke porušitve mostnih stebrov: a) nezadostna strižna nosilnost, b) nezadostno objetje betonskega jedra, c) uklon vzdolžnih armaturnih palic

Tako kot pri škatlastih stebrih smo tudi tukaj preučili možne načine za njihovo potresno utrditev. Še zlasti nas je zanimala primerčnost uporabe CFRP-plaščev. Poseben izziv

je predstavljalo sidranje tkanine na obstoječi prerez. Več detajlov o preučeni rešitvah je prikazanih v 4. poglavju.

Vsi eksperimenti, ki so prikazani v članku, so bili narejeni v sodelovanju z Zavodom za gradbeništvo Slovenije.

2 • PREGLED ZAHTEV STANDARDA EC8/2 IN PRIMERJAVA S PRAKSO

Potrebno strižno armaturo stebrov določimo z upoštevanjem metode načrtovanja nosilnosti. To pomeni, da na osnovi upogibne nosilnosti stebrov najprej določimo največje možne strižne sile v stebrih. Postopek je opisan v priročniku za projektante iz leta 1994 (Fajfar, 1994) oziroma v navodilih za projektiranje v skladu z EC8/2 iz leta 2010 (Isaković, 2010), zato ga tukaj ne bomo posebej razlagali. Še enkrat poudarimo le to, da so največje možne strižne sile pogosto precej večje od računskih, ki jih določimo z analizo konstrukcije in ki so bile v preteklosti upoštevane pri računu potrebne strižne nosilnosti.

Največje možne strižne sile morajo biti manjše od strižne nosilnosti stebra. Pri projektiranju novih mostov se strižna nosilnost določi v skladu s standardom Evrokod 2 (EC 2) (SIST EN 1992-1-1, 2005), ki zahteva, da se strižna nosilnost betona zanemari v vseh primerih, če je ta manjša od največje možne strižne sile. V takšnih primerih se celotna strižna sila prevzame s strižno armaturo. Standard EC8/2 predpisuje še dodatne pogoje, kjer se vrednost strižne nosilnosti, ocenjene po EC2, še dodatno zmanjša, in sicer za okoli 25 odstotkov.

Na osnovi rezultatov eksperimenta, prikazanega v 3. poglavju, smo s posebno študijo, ki je že bila predstavljena v Gradbenem vestniku (Isaković, 2006), ugotovili, da so lahko takšne zahteve standardov EC2 in EC8/2 precej konservativne. Zato smo v obravnavanih primerih za oceno strižne nosilnosti uporabili drugačna postopka – tista, ki sta predlagana v Evrokodu 8/3 (SIST EN 1998-3, 2005) oziroma UCSD-postopek (Priestley, 1997).

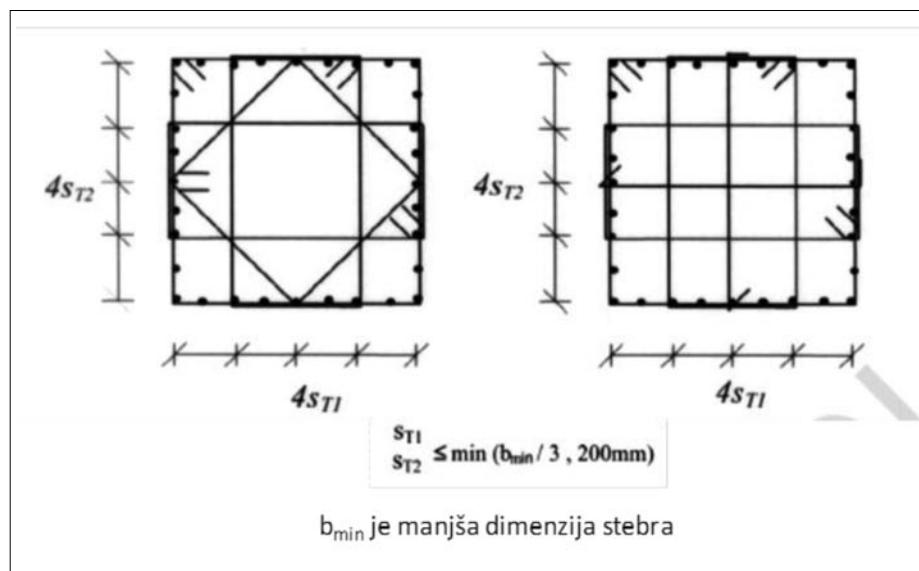
Za zagotovitev potrebnega objeta betonskega jedra in preprečitve uklona vzdolžnih armaturnih palic EC8/2 predpisuje minimalno potrebno količino prečne armature ter maksimalne razdalje med stremenami vzdolž stebra in v ravnini prereza stebrov. Vsi ti pogoji veljajo v primerih, ko tlačna sila v stebrih preseže 8 % karakteristične vrednosti največje možne tlačne sile v prerezu ($A_c \cdot f_{ck}$, kjer je A_c ploščina prereza in f_{ck} karakteristična tlačna trdnost betona). V naših mostovih je tipična vrednost

te sile v mejah 8 % do 11 % največje možne tlačne sile.

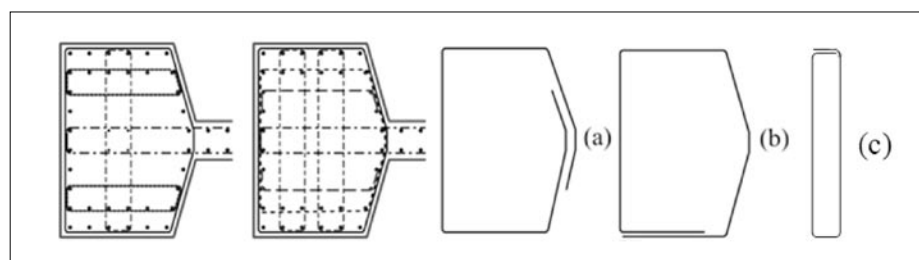
Predpisani minimalni volumski delež stremen v pravokotnih stebrih duktilnih mostov znaša $\omega_{w,min} = 0,12$ za vsako smer prereza posebej. To pomeni, da v primeru jekla S500 in betona C30/37 znaša minimalni delež stremen $\rho_w = 0,552$ %. Za primerjavo navedimo podatke, da je ta delež v stebrih I-prerezov, in sicer v vzdolžni smeri obstoječih mostov, v mejah 0,21 % do 0,40 %.

Maksimalna razdalja med stremenami je enaka manjši izmed naslednjih dveh vrednosti: šest premerov vzdolžnih armaturnih palic oziroma 1/5 manjše dimenzije betonskega prereza. V primeru vzdolžnih palic $\phi 28$ in I-stebrov z

manjšo dimenzijo pasnice 120 cm to pomeni, da je lahko prečna armatura vzdolž kritičnega območja stebra (dolžina plastičnega členka) razmaknjena največ 16 cm. Ta razdalja se lahko še dodatno zmanjša na osnovi pogoja, da mora prečna armatura preprečiti tudi uklon vzdolžnih armaturnih palic. Če so stremenami iz jekla tipa C in je razmerje med mejo tečenja in natezno trdnostjo tega jekla 1,35, znaša največja dovoljena razdalja 5,6 premera vzdolžne armature, kar pri vzdolžnih palicah $\phi 28$ pomeni 15 cm. Pri jeklih slabše kakovosti je ta razdalja še manjša. V velikem številu obstoječih mostov je razdalja med stremenami v področju plastičnih členkov stebrov 20 cm. Standard predpisuje tudi maksimalno razdaljo med stremenami v horizontalni ravnini prereza, določa pa tudi dovoljene oblike stremen, ki so prikazane na sliki 2. S slike 2 je razvidno, da so lahko vzdolžne armaturne palice, ki



Slika 2 • Oblikovanje stremen v skladu z EC8/2



Slika 3 • Tipična stremenami v stebrih s prečnim prerezom I-oblike

mestu vpetja v temelj je znašal 1,5. Upogibna armatura se je postopoma zmanjševala proti vrhu stebra. Steber je bil armiran s prečno armaturo premera $\phi 4$ mm. Palice prečne armature so bile postavljene na medsebojni razdalji 5 cm. Premer prečne armature se je proti vrhu stebra zmanjšal na $\phi 2,5$ mm. Jeklo, iz katerega je bila narejena prečna armatura, je imelo mejo tečenja 240 MPa. Prečna armatura je bila postavljena na notranji strani vzdolžne armature. Glede na tako neobičajno konstruirano armaturo pred eksperimentom ni bilo mogoče z gotovostjo analitično napovedati upogibne in strižne nosilnosti stebra.

Oсна sila v stebri je bila razmeroma nizka (512 kN). Tlačna napetost je bila približno 7 % povprečne tlačne trdnosti betona. Drugi podatki o stebri so prikazani na sliki 5.

3.3 Ciklični odziv obstoječih stebrov

Modelni steber, opisan v predhodnem poglavju, smo preizkusili ciklično v 15 fazah. Vsaka faza je imela tri polne cikle. V vsakem ciklu smo steber obremenjevali do določenega pomika/sile.

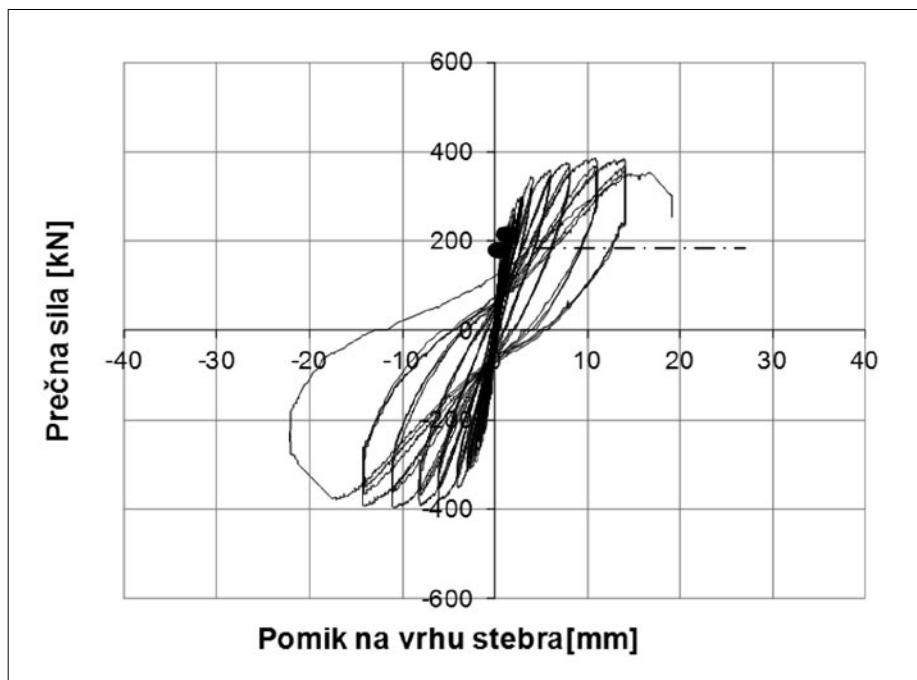
Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri, ki je registrirana med eksperimentom, je prikazana na sliki 6.

Pri sili 150 kN smo opazili prve tanke razpoke, ki so se pojavljale postopoma, najprej na mestu vpetja v temelj, potem pa tudi višje, proti vrhu stebra. Prve palice upogibne armature so stekle, ko smo na vrhu stebra dosegli pomik 2,1 mm (povprečno rotacijo stebra, ki je znašala 0,13 % višine stebra). Pri tem je bila dosežena sila 291 kN v eni smeri obremenjevanja in 269 kN v drugi. Razpoke so se pojavile na višini 55 cm od vpetja. Pri pomiku 2,5 mm (pri povprečni rotaciji, enaki 0,16 % višine stebra) na vrhu stebra so nastale upogibno-strižne razpoke pod kotom približno 45° glede na os stebra.

Sila v stebri je naraščala, dokler ni bil dosežen pomik 11 mm (povprečna rotacija enaka 0,7 % višine stebra). Maksimalna izmerjena prečna sila je pri tem znašala 394 kN. Strižne razpoke so se že močno razširile, pojavljati pa so se začele tudi navpične razpoke. Začel je odpadati krovni sloj betona.

Pri pomiku 17,6 mm (pri povprečni rotaciji stebra, enaki 1,12 % višine stebra) je nosilnost hipno padla in je bila dosežena porušitev stebra v strigu. Pri tem so se strižne razpoke močno razširile (glej sliko 7). Krovna plast betona je odpadla tudi na notranji strani prereza. Uklonile so se vzdolžne armaturene palice.

Upogibni odziv stebra navkljub številnim pomanjkljivim detajlom ni bil zelo slab. Ste-



Slika 6 • Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri



Slika 7 • Steber po zaključenem testu

ber se je sicer porušil v strigu, vendar se je pred tem zgodilo tečenje upogibne armature, kar pomeni, da je razpolagal z določeno duktilnostjo. Če upoštevamo, da je večji del upogibne armature stekel pri pomiku 5 mm, lahko rečemo, da je razpoložljiva duktilnost za pomike znašala $\mu_p = 17,6 / 5 = 3,5$. Pri tem je še posebno treba poudariti, da je takšna duktilnost bila dosežena predvsem zaradi

zelo ugodne oblike prečnega prereza stebra in majhne tlačne sile v stebri. Škatlasti prerezi namreč razpolagajo s široko tlačno cono, kar v primerjavi s prerezi drugih, manj ugodnih oblik (glej 4. poglavje) pomeni, da so tlačne napetosti manjše. Zato se v takšnih stebrih zmanjša nevarnost razpada betonskega jedra oziroma steber zaradi ugodne oblike prečnega prereza že sam po sebi brez posebne prečne armature razpolaga z določeno duktilnostjo. Standard EC8/2 v takšnih primerih ne zahteva posebne armature za objetje, vendar v vsakem primeru zahteva, da so stremena postavljena na zunanji strani vzdolžnih armaturnih palic. Poudarimo še to, da v primeru manj ugodnih oblik prečnih prerezov, kot je npr. I-prerez, lahko pričakujemo precej manjšo razpoložljivo duktilnost (glej 4. poglavje).

Duktilnost je seveda odvisna tudi od osnih sil v stebri. Nizka osna sila prav tako ugodno vpliva na razpoložljivo duktilnost stebra, saj steber ne obremenjuje z velikimi tlačnimi napetostmi. Zato tudi standard EC8/2 v primeru nizkih osnih sil ne zahteva posebne armature za objetje betonskega prereza.

3.4 Opis utrditve stebra

Steber, opisan v predhodnem poglavju, smo utrdili tako, da je njegova strižna nosilnost zadoščala zahtevam potresne obtežbe na lokacijah, kjer so mostovi s podobnimi stebri. Ker zahteve niso drastično presegle razpoložljive strižne nosilnosti, je bila potrebna

razmeroma šibka utrditev. Analizirali smo dva načina utrditve: a) z betonskim plaščem in b) CFRP-plaščem.

Načrtovanje potresne utrditve je bila precej zahtevna naloga, saj je bilo na preprost način mogoče izvesti utrditev le na znanji strani stebra. Posebni ukrepi na notranji strani stebra bi bili zelo zahtevni. Zato je bilo treba določiti ravno pravnjo količino objetta stebra, saj bi prevelika količina objetta na zunanji strani lahko škodila odzivu stebra na notranji strani. Z objettjem prereza se namreč poveča največja možna tlačna deformacija v betonu, kar lahko ima za posledico povečanje globine tlačne cone v prerezu oziroma večje tlačne deformacije na notranji neutrjeni strani stebra. To lahko povzroči odpadanje krovne plasti

betona na notranji strani stebra in nato uklon palic vzdolžne armature. Zato je bilo treba zagotoviti takšno objetje, ki zagotavlja potrebno strižno nosilnost, ki ni premočna, in seveda takšno, ki jo je mogoče izvesti.

Strižno nosilnost obstoječih stebrov smo ocenili tako, kot je opisano v (Isaković, 2006). Razliko med obstoječo in potrebno strižno nosilnostjo stebra smo zagotovili tako, kot je prikazano na slikah 8 in 9 (na sliki 8 je prikazano betonsko objetje, na sliki 9 pa objetje s CFRP-trakovi). Prikazana sta modelna stebra v merilu 1 : 4.

Betonski plašč je bil debeline 2 cm (kar ustreza 8 cm v prototipu) in je bil armiran z upogibno armaturo iz palic $\phi 3,4$ mm ($\phi 14$ v prototipu), postavljenih na razdalji 2,5 cm

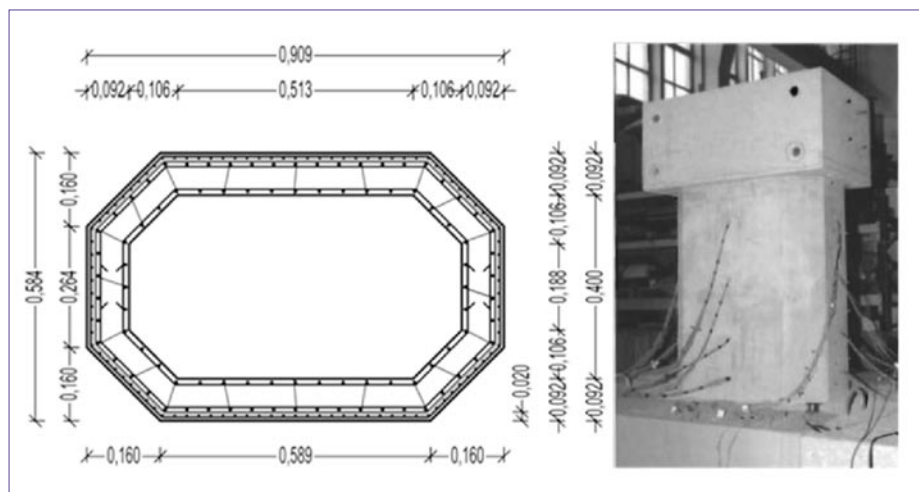
(10 cm v prototipu). Prečna armatura je bila prav tako izvedena s palicami $\phi 3,4$ mm ($\phi 14$ v prototipu) na razdalji 2,5 cm (10 cm v prototipu). Izmerjena cilindrična tlačna trdnost betona je znašala 60 MPa, jeklo je bilo kakovosti S240.

Utrditev s CFRP-plaščem je bila opravljena v obliki trakov, zato da smo lahko ob enem analizirali tudi maksimalno razdaljo med trakovi, ki še zagotavlja zadostno strižno nosilnost. Trakovi so bili široki 7,5 cm (kar ustreza 30 cm v prototipu) in postavljeni na medosni razdalji 10 cm (40 cm v prototipu). Vsak izmed trakov je vseboval le eno plast tkanine, ki je bila preklopljena na dolžini 20 cm. Ogljikova vlakna so bila postavljena le v vodoravni smeri, saj nismo želeli povečevati upogibne nosilnosti stebra. Povečanje upogibne nosilnosti stebra bi namreč pomenilo povečanje potresnih zahtev v obstoječih temeljih, za katere utrditev ni bila načrtovana.

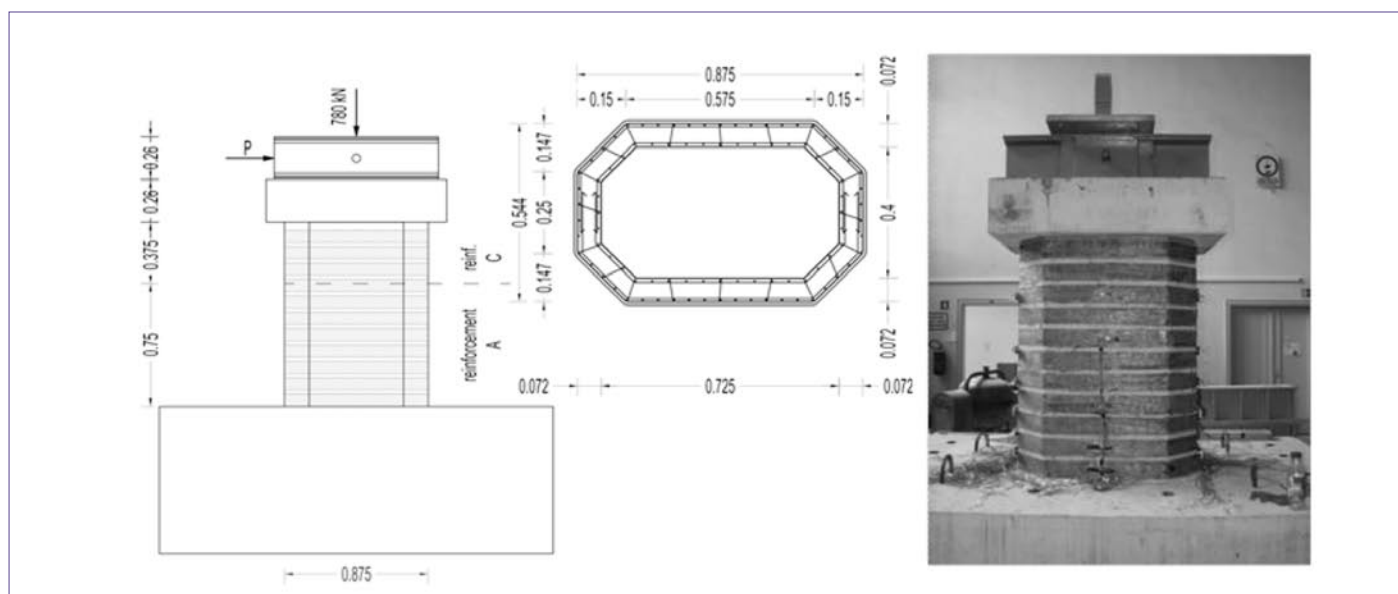
3.5 Ciklični preizkus in ciklični odziv utrjenih stebrov

Oba utrjena stebra smo preizkusili ciklično po podobni proceduri, kot smo preizkusili neutrjeni stebel (glej poglavje 3.3). Globalni odziv (zveza med silo v stebri in pomikom na vrhu stebra) obeh utrjenih stebrov je prikazan na sliki 10, poškodbe preizkušancev po končanih testih pa na sliki 11.

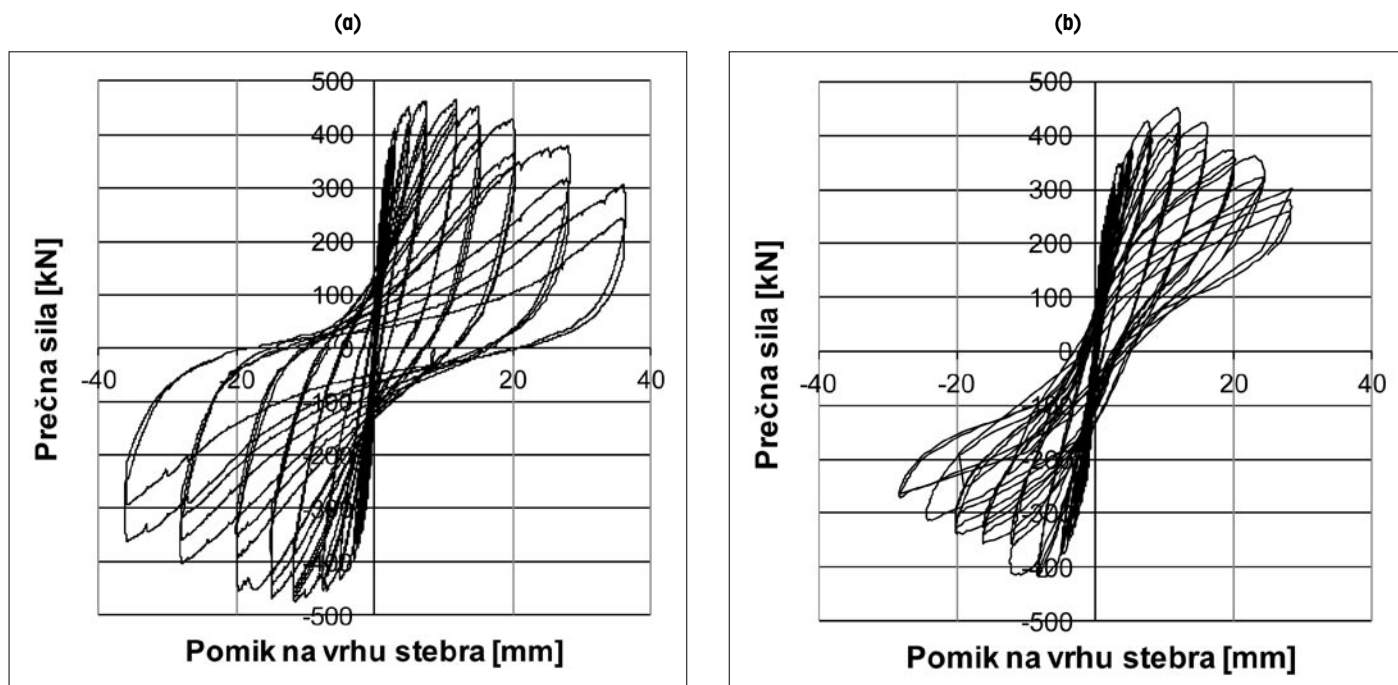
Generalno gledano, sta se oba stebra obnašala podobno. Oba načina utrditve sta zagotovila zadostno strižno nosilnost, saj je v obeh stebrih bila preprečena strižna porušitev. Tudi ciklično obnašanje in tip porušitev sta bila



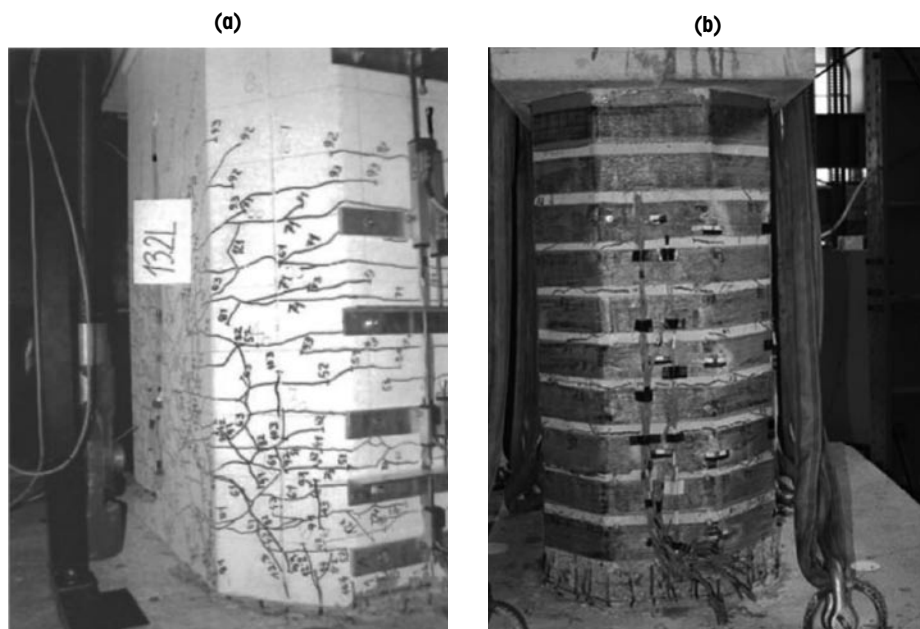
Slika 8 • Utrditev stebra z betonskim plaščem



Slika 9 • Utrditev stebra s CFRP-trakovi



Slika 10 • Zveza med silo v stebru in pomikom na vrhu stebra: a) steber, utrjen z betonskim plaščem, b) steber, utrjen s CFRP-plaščem



Slika 11 • Poškodbe utrjenih stebrov: (a) steber, utrjen z betonskim plaščem, (b) steber, utrjen s CFRP-plaščem

podobna. Najprej je začela odpadati krovna plast betona na zunanji in notranji strani stebra, potem so se palice upogibne armature začele uklanjati in se nato postopoma pretrgale. V posameznih primerih je bila porušena sprejemnost med palico in betonom, zato je prišlo do izvleka palic, predvsem tistih, ki so bile preklapljene blizu vpetja stebra v temelj. V

obeh primerih utrditve se je ob temelju pojavila izrazita vodoravna razpoka, ki se je vedno bolj odpirala, potem ko so palice vzdolžne armature izgubljale svojo nosilnost.

Ne glede na podobno obnašanje je bilo objetje z betonskim plaščem bolj učinkovito, saj je omogočilo večje sipanje energije (glej histerezi na sliki 10). V primeru betonskega

objetja so se palice vzdolžne armature zaradi dodatne plasti betona začele uklanjati kasneje kot v primeru CFRP-trakov, kjer se je to zgodilo takoj zatem, ko je odpadla krovna plast med plaščem in jedrom stebra. Zato je nosilnost v primeru betonskega plašča padala počasneje kot pri utrditvi s CFRP-trakovi.

To je razvidno tudi s slike 10, kjer vidimo, da je v obeh primerih bila dosežena podobna upogibna nosilnost (470 kN v primeru betonske utrditve in 450 kN v primeru CFRP-utrditve), vendar je v primeru utrditve s CFRP-trakovi upogibna nosilnost padla hitreje oziroma so se palice vzdolžne armature hitreje poškodovale in izgubile svojo nosilnost. Pri tej analizi je treba poudariti, da je bila v primeru utrditve s CFRP-plaščem upogibna armatura v stebru pred eksperimentom že nekoliko zarjavela in se ji je zaradi tega verjetno nekoliko zmanjšala duktilnost. Tudi to je lahko pospešilo uklon in trganje vzdolžnih armaturnih palic in posledično hitrejši padec nosilnosti stebra.

Če primerjamo odziv utrjenih stebrov z ne-utrjenim, lahko rečemo, da so se potem, ko je bila izboljšana strižna nosilnost stebra, aktivirali drugi mehanizmi porušitve, ki so bili posledica drugih pomanjkljivih konstrukcijskih detajlov v stebru. Nastopila sta uklon palic vzdolžne armature (ta v originalnem stebru sploh ni bila podrta) in izvlek posameznih palic, ki so bile preklapljene v področju največjih obremenitev v bližini vpetja v temelj.

3.6 Sklepi

Z eksperimenti je bilo pokazano, da lahko strižno nosilnost stebrov učinkovito povečamo z betonskimi ali CFRP-plašči. Na primeru tipičnega škatlastega stebra s premajhno strižno nosilnostjo smo eksperimentalno preverili učinkovitost teh dveh načinov utrditve. Generalno gledano, lahko rečemo, da je v obeh primerih mehanizem porušitve bil bistveno drugačen kot pri neutrnjenem stebru, ki se je strižno porušil. Potem ko je z utrditvijo bila povečana strižna nosilnost stebra, so se aktivirali drugi načini porušitve, ki so bili po-

sledica drugih konstrukcijskih pomanjkljivosti v stebru.

Minimalna utrditev s CFRP-trakovi je sicer povečala strižno nosilnost stebra, vendar ni mogla preprečiti uklona vzdolžnih armaturnih palic, ki jim je v originalnem stebru podpora zagotavljala le krovna plast betona. CFRP-plašč ni mogel preprečiti niti izvleka posameznih armaturnih palic, ki so bile preklapljene na področju največjih upogibnih obremenitev. Zaradi tega se duktilnost stebra ni izboljšala. Če bi poleg strižne nosilnosti želeli povečati tudi duktilnost stebra, bi morali v spodnjem

delu stebra zagotoviti več plasti CFRP-trakov. V obravnavanem primeru je betonski plašč zagotovil boljši ciklični odziv stebra. Mehanizem porušitve je bil sicer podoben kot pri CFRP-utrditvi, vendar je bil betonski plašč zaradi dodatne plasti betona učinkovitejši, saj je uklon vzdolžne armature nastopil nekoliko kasneje kot v primeru CFRP-trakov. Tako je bila poleg strižne nosilnosti nekoliko povečana duktilnost stebra (duktilnost za pomike je znašala približno $\mu_d = 5,6$). Boljši odziv je dosežen tudi zaradi tega, ker vzdolžna armatura ni bila zarjavela.

4 • STEBRI S PREČNIM PREREZOM I-OBLIKE, KI IMAJO POMANJKLJIVO PREČNO ARMATURO ZA OBJETJE IN PREPREČEVANJE UKLONA UPOGIBNE ARMATURE

4.1 Opis eksperimentalnih preiskav obstoječih I-stebrov

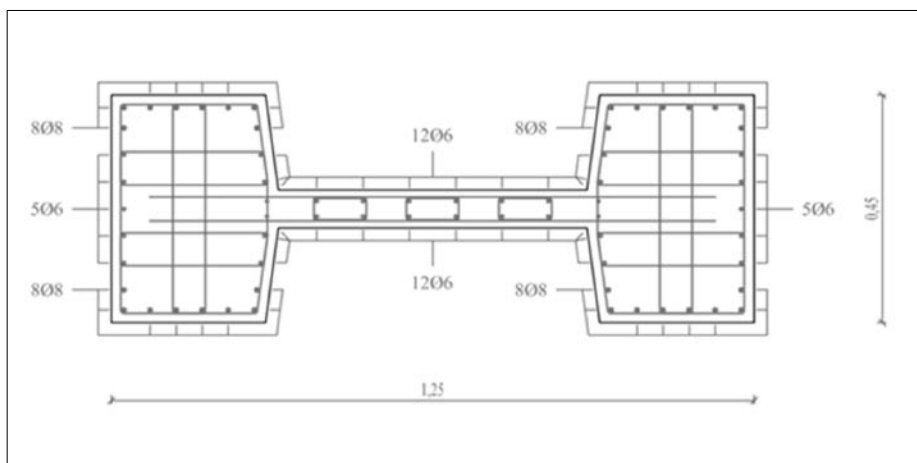
Veliko novejših mostov je podprtih s stebri I-prereza. Nekateri med njimi vsebujejo konstrukcijske detajle, ki nekoliko odstopajo od zahtev standarda EC8/2. Zato smo (v sodelovanju z ZAG-om) preizkusili ciklično obnašanje takšnih stebrov.

Značilni steber smo preizkusili v merilu 1 : 4. Višina preizkušanca je znašala 2,9 m. Steber smo obremenjevali s horizontalno silo na višini 2,5 m, kar ustreza povprečni višini tipičnega mostnega stebra 10 m. V modelnem stebru so bili upoštevani vsi konstrukcijski detajli, značilni za prototipni steber (glej 2. poglavje). Prečni prerez preizkušanca je prikazan na sliki 12.

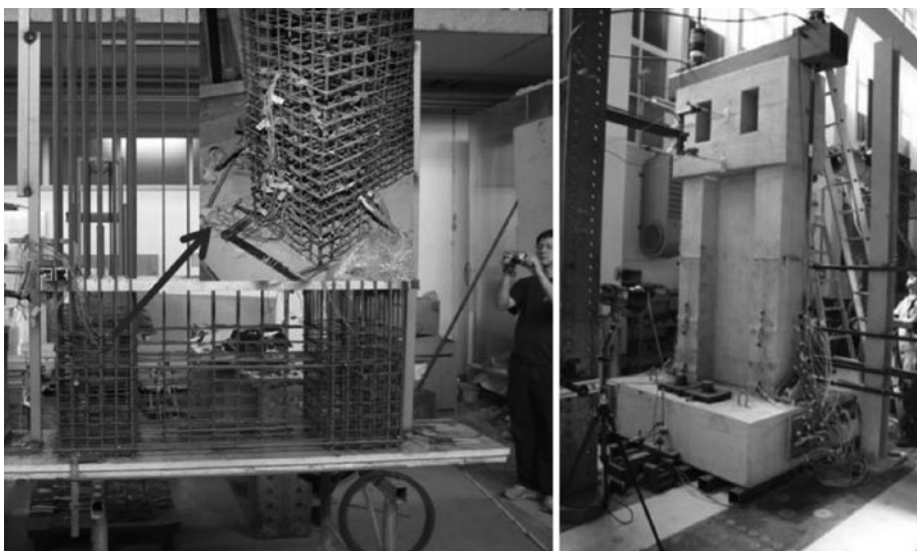
Projektirni trdnostni razred betona je bil C30/37. Izmerjena tlačna trdnost na kocki je bila 36 MPa. Vzdolžna armatura je bila kakovosti S500 ($f_{yk} = 500$ MPa). Za vzdolžno armaturo smo uporabili palice premerov $\phi 6$ (kar ustreza palicam $\phi 24$ v prototipu) in $\phi 8$ (palice $\phi 32$ v prototipu). Izmerjeni meji tečenja sta znašali 607 MPa za palice $\phi 6$ in 628 MPa za palice $\phi 8$. Deformacija, pri kateri so se palice pretrgale, je znašala 3,2 % za palice $\phi 6$ in 9 % za palice $\phi 8$.

Ker za izvedbo prečne armature nismo imeli na voljo rebraste armature ustreznega premera, smo namesto te uporabili gladko armaturo S240 ($f_{yk} = 240$ MPa) premera $\phi 4,2$ mm. S takšno armaturo smo zagotovili enak volumski delež stremen kot v izhodiščni konstrukciji, in sicer 0,037 (glej 2. poglavje).

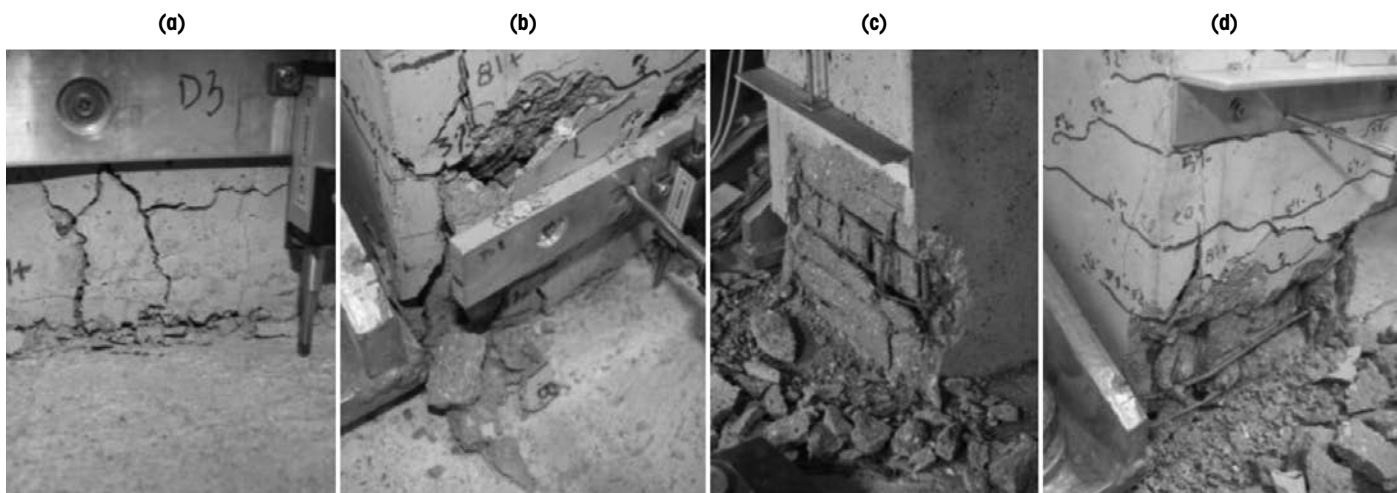
Količina stremen, ki smo jo zagotovili v preizkušancu, je zagotavljala zadostno strižno



Slika 12 • Prečni prerez preizkušanca



Slika 13 • Priprava armature preizkušanca in preizkušaneec pred testom



Slika 14 • a) Zaščitna plast je začela odpadati pri pomiku 50 mm, b) dokončno je odpadla pri pomiku 80 mm, b) potem so se uklonile vzdolžne palice na strani stebra, kjer so bila preklapljena stremena, c) nato še na nasprotni strani

nosilnost, saj je bila določena z metodo načrtovanja nosilnosti. Zato ni bilo nobene nevarnosti, da se steber poruši v strigu, kar je kasneje potrdil tudi eksperiment.

Stremena – tako kot v prototipnem stebru – niso povsem zadoščala drugim zahtevam standarda EC8/2 glede objetja betonskega prereza in preprečitve uklona vzdolžne armature (glej 2. poglavje). Količina prečne armature je bila približno trikrat manjša od minimalno predpisane armature za objetje, tudi če zanemarimo pomembno dejstvo, da so stremena bila neustrezno oblikovana. Stremena niso bila sidrana v betonsko jedro, ampak samo preklapljena na strani krajše stranice pasnice (glej slike 3b in 3c).

Glede na premajhno količino stremen za objetje tudi pogoj o maksimalni dovoljeni razdalji v ravnini prereza med podprtimi palicami vzdolžne armature ni bil izpolnjen. Največja razdalja med podprtimi palicami vzdolžne armature je znašala približno 10 cm, kar ustreza razdalji 40 cm v prototipu. Stremena so bila postavljena na medsebojni razdalji 5 cm vzdolž celotne višine stebra, kar ustreza razdalji 20 cm v prototipnem stebru.

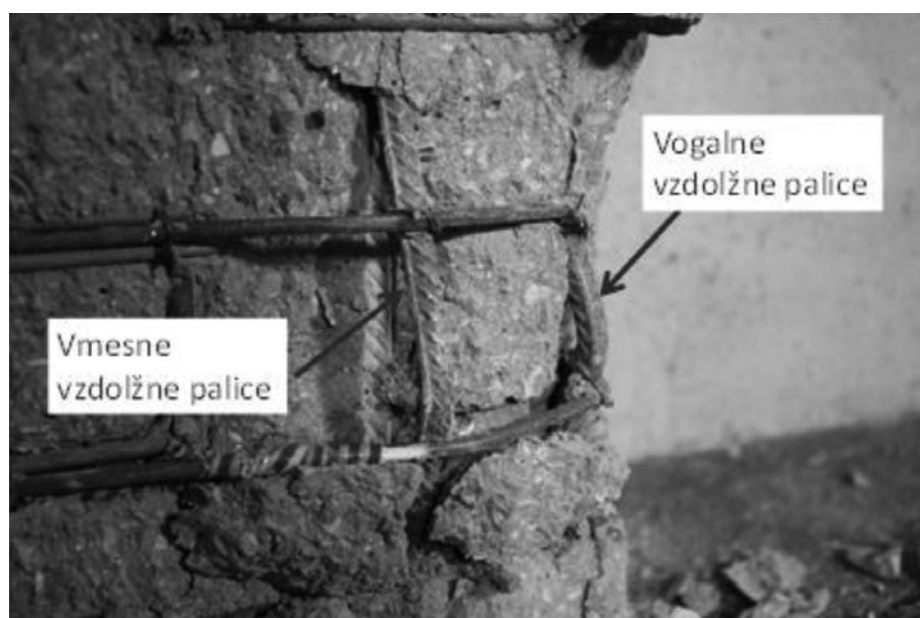
Steber smo preizkušali v smeri stranice dolžine 45 cm. To ustreza obremenitvam mostu v njegovi vzdolžni smeri. Model stebra je bil med preiskavo v pokončnem položaju (glej sliko 13). Preiskava je potekala v devetih fazah. V vsaki fazi smo izvedli po tri cikle z enako amplitudo. Predvideli smo sistem obremenjevanja, ki smo ga v začetnih fazah (pred tečenjem armature) kontrolirali s silo, v preostalih fazah pa s pomiki.

4.2 Ciklični odziv obstoječih stebrov

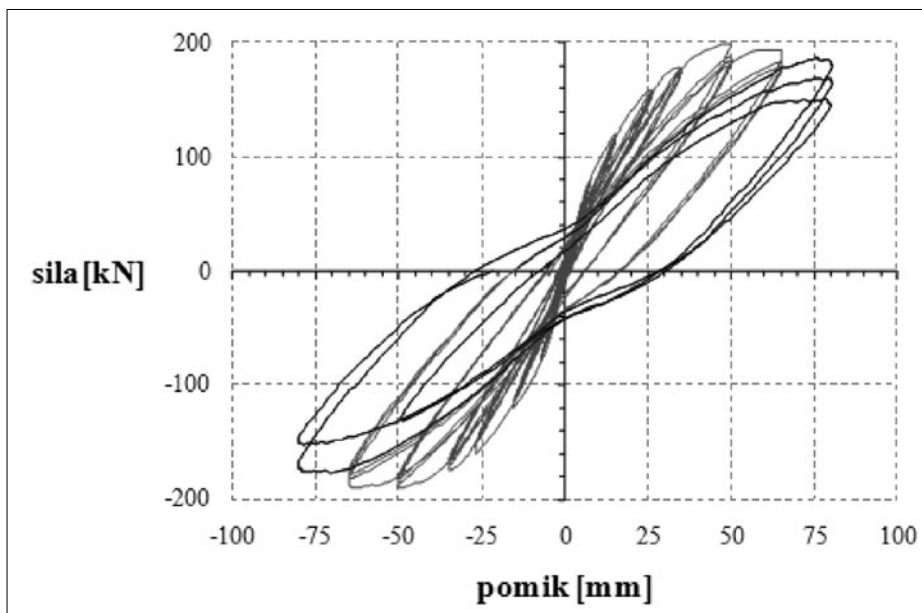
V prvih šestih fazah eksperimenta ni bilo zaznati večjih poškodb, le tanjše upogibne razpoke v območju največjih upogibnih obremenitev, ki so se enakomerno širile od dna proti vrhu stebra. Pri pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, enaki 1,4 % višine stebra) je prišlo do tečenja armaturnih palic in prvih večjih razpok na dnu stebra. V naslednji fazi je bila dosežena maksimalna upogibna nosilnost stebra pri horizontalni sili ca. 200 kN in pomiku 50 mm (povprečni rotaciji stebra enaki 2 % višine stebra). Potem se je nosilnost začela zmanjševati, poškodbe pa so postajale vedno večje. Začela je odpadati zaščitna plast (slika 14a), ki je popolnoma odpadla

pri pomiku 80 mm (povprečni rotaciji, enaki 3,2 % višine stebra) na višini 2,5 m od vpetja stebra v temelj (glej sliko 14b). Temu je sledil uklon palic vzdolžne armature. Na sliki 14c je prikazan uklon vzdolžnih palic na strani stebra, kjer so bila preklapljena stremena, na sliki 14d pa na nasprotni strani, kjer je bil obseg poškodb manjši. V tretjem ciklu zadnje faze smo preizkus prekinili, saj je bil steber že tako poškodovan, da je zaradi narave poškodb obstajala nevarnost, da se hipno poruši.

Na strani, kjer so bila preklapljena stremena, je bilo več vzrokov, zaradi katerih so se vzdolžne armaturne palice uklonile. Prvi vzrok so neustrezno oblikovana stremena, ki niso bila sidrana s kljukami v betonsko jedro. V trenutku, ko je



Slika 15 • Detajli uklona vzdolžnih armaturnih palic po zaključenem eksperimentu



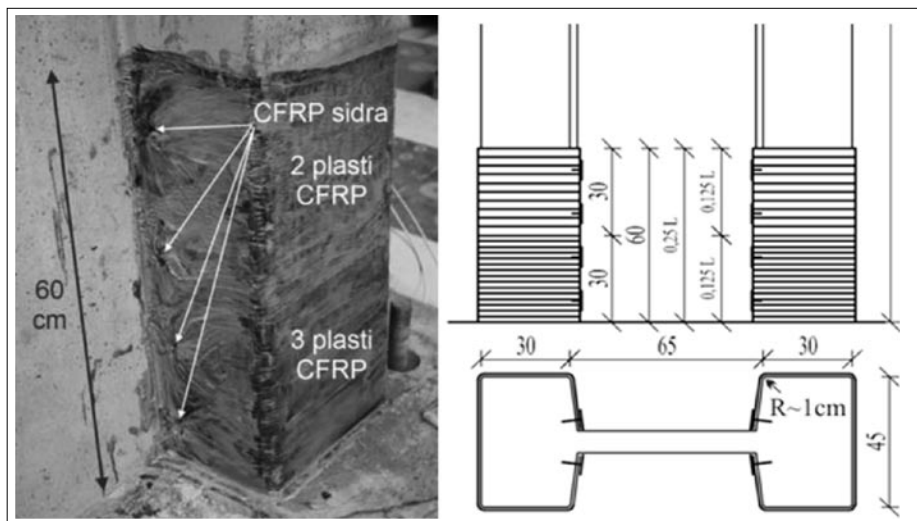
Slika 16 • Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri

odpadla zaščitna plast betona, se je njihova učinkovitost glede preprečitve uklona vzdolžnih armaturnih palic občutno zmanjšala, saj so se stremena začela odpirati.

Neustrezno oblikovana stremena niso bila edini vzrok, zaradi katerega so se uklanjale vzdolžne palice. Opazili smo, da so se te uklanjale na dva različna načina. Palice so se v vogalih stremen uklonile med dvema sosednjima stremenoma, vmesne palice pa kar med štirimi zaporednimi stremenoma (glej sliko 15). Glede na prvi način uklona lahko sklepamo, da je bila vertikalna razdalja med stremenoma (vzdolž stebra) prevelika. To je bilo tudi pričakovano, saj je bila večja od tiste, ki je predpisana v standardu. Drugi način uklona pa kaže na to, da je količina stremen premajhna oziroma da so obstoječa stremena neučinkovita. Da je bila količina stremen premajhna, lahko sklepamo tudi po uklonu upogibnih armaturnih palic na strani stebra, kjer so stremena zvezno potekala (niso bila preklopljena).

Zveza med pomikom na vrhu stebra in prečno silo v stebri, ki je bila registrirana med eksperimentom, je prikazana na sliki 16. Dosežen je bil maksimalni pomik 80 mm (povprečna rotacija stebra je enaka 3,2 % višine stebra), pri katerem se je nosilnost hipno zmanjševala in je v tretji ponovitvi cikla padla na 80 % tiste, zabeležene v prvem ciklu. Treba je poudariti, da padec sile v tretjem ciklu, ni nastal zaradi zmanjšane togosti stebra pri ponovitvah cikla, ampak zaradi vedno večjih poškodb upogibnih palic.

S slike 16 lahko sklepamo, da je tečenje upogibne armature nastopilo pri pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, ki je znašala 1,4 % višine stebra), tako kot je tudi bilo ugotovljeno z opazovanjem stebra med eksperimentom. Dosežena je razmeroma majhna duktilnost za pomike, ki znaša $\mu_D = 80 \text{ mm} / 35 \text{ mm} = 2,3$. Če upoštevamo dejstvo, da je takšna duktilnost določena brez kakršnihkoli varnostnih faktorjev, lahko sklepamo, da za mostove, v katerih stebri vsebujejo podobno količino in podobno oblikovano prečno armaturo, ne bi smeli upoštevati faktorja obnašanja $q = 3,5$, ki ga običajno upoštevamo pri projektiranju grednih mostov. Še zlasti ne zaradi tega, ker je bila porušitev stebra v osnovi krhka, saj je



Slika 17 • Utrditve I-stebra s CFRP-plaščem

nosilnost zelo hitro padala, porušitev pa nastopila pri pomiku, ki je bil le 1,6-krat večji od tistega, pri katerem je zabeležena maksimalna nosilnost ($80 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 1,6$).

Preizkus je potrdil še eno dejstvo, in sicer da mora biti armatura na potresnih območjih narejena iz kakovostnega jekla, za katero je značilna velika deformacija, pri kateri se palice pretrgajo (jeklo tipa C). Vzdolžne palice v stojini, ki sicer niso odločilno vplivale na nosilnost stebra, vendar so vseeno imele določen vpliv na njegov odziv, so se vse pretrgale, saj je maksimalna natezna deformacija jekla, iz katerega so bile narejene, bila le 3,2 %. Če bi bile tudi palice v pasnicah iz enakega jekla kot tiste v stojini, bi porušitev stebra nastopila še veliko prej, duktilnost pa bi bila veliko manjša.

4.3 Utrditve stebra in ciklični odziv utrjenega stebra

Tako kot v primeru škatlastih stebrov smo analizirali tudi možne načine utrditve I-stebra. Glavni cilj utrditve je bil preprečiti uklon palic vzdolžne armature, kar bi povečalo tudi duktilnost stebra.

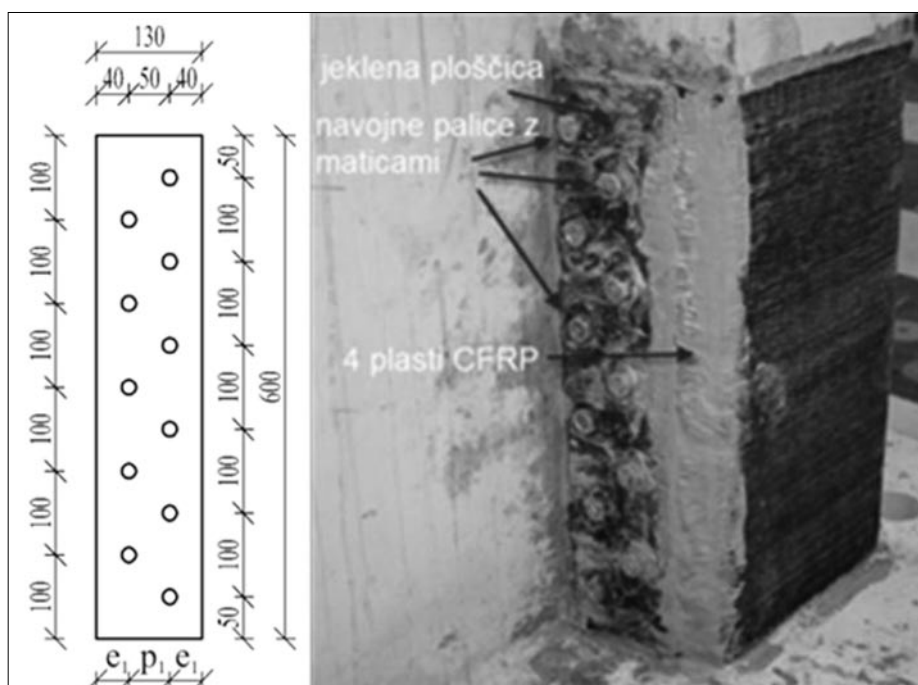
Zanimala nas je predvsem možnost utrditve I-stebra s CFRP-plaščem, ker je izvedba takšne utrditve nekoliko preprostejša in hitrejša od drugih možnosti (jekleni ali betonski plašči). Zaradi oblike stebra pa izvedba utrditve ni bila tako enostavna kot pri škatlastem stebri, kjer smo prerez enostavno ovili s CFRP-trakovi. Zaradi I-oblike prereza smo lahko ovili le pasnice stebra (glej sliko 17), pa še te le delno. Da bi plašč zagotovili potrebno učinkovitost, smo ga morali na primeren način sidrati, in sicer na mestu stika pasnice in stojine prereza (glej sliko 17).

V prvi različici smo CFRP-plašč sidrali s pomočjo sider iz ogljikovih vlaken (glej sliko 17). To različico smo preizkusili kar na poškodovanem stebri, ki smo ga porušili v predhodnem preizkusu (glej predhodno poglavje). Steber smo najprej sanirali z uporabo sanacijske malte in ga nato ovili s CFRP-plaščem do višine 60 cm, tj. do dvakratne pričakovane višine plastičnega členka, in sicer na prvi polovici s tremi plastmi, na drugi pa z dvema plastema CFRP-*t*kanine. Glede na to, da je bil steber praktično porušen, poškodbe pa takšne, da jih je bilo zelo težko sanirati, ni bilo pričakovati, da bo sanacija zelo veliko izboljšala odziv stebra. Zato razpoke ob vpetju stebra nismo injektirali, prav tako nismo ravnali uklonjenih palic ali stikovali (npr. z varjenjem) odprtih stremen. Glede na to, da smo načrtovali tudi utrditev nepoškodovanega stebra in dodaten ciklični preizkus tega stebra, je bil glavni cilj preizkusa utrjenega, prehodno poškodovanega stebra predvsem preveriti učinkovitost sider iz ogljikovih vlaken. Uporabili smo štiri sidra na medsebojni razdalji približno 12 cm.

Ugotovili smo, da s takšnimi sidri ne moremo zagotoviti želene učinkovitosti plašča. Pri večjih upogibnih obremenitvah so se namreč pojavile upogibne razpoke v plastični matrici zaradi razmeroma velikih upogibnih deformacij. Ena izmed razpok je nastala tik pod sidrom na mestu največjih obremenitev. Zato spodnji del plašča ni bil več učinkovito sidran v steber in se je posledično zelo hitro odlepil od stebra. Na mestu največjih obremenitev ni bilo več učinkovitega objetja.

V predhodno opisanem preizkusu smo ugotovili, da je treba plašč bolj zvezno sidrati v steber. Zato smo pri utrditvi nepoškodovanega stebra spremenili detajl sidranja. Namesto sider iz ogljikovih vlaken smo uporabili jeklene ploščice, ki smo jih na steber pritrdili z jeklenimi vijaki (glej sliko 18). Na višini 60 cm smo pasnice stebra utrdili s štiriplastnim CFRP-plaščem. Načrtovali smo enak preizkus kot pri neutrjenem stebri.

Preizkus je potekal po načrtih, vse dokler ni bila dosežena meja tečenja v vzdolžnih palicah pri doseženem pomiku 35 mm (povprečni rotaciji stebra, ki je znašala 1,4 % višine stebra). Meritve so pokazale, da plastifikacija ni bila koncentrirana le v prerezu ob vpetju stebra, kar je kazalo na učinkovitost plašča. V naslednjem ciklu pri pomiku 50 mm (pri povprečni rotaciji stebra, enaki 2 % višine stebra) se je zaradi okvare na batu zgodilo nenadzorovano hipno povečanje pomika na vrhu stebra, kar je povzročilo porušitev stebra



Slika 18 • Detajl sidranja z jekleno ploščico, pritrjeno z jeklenimi vijaki

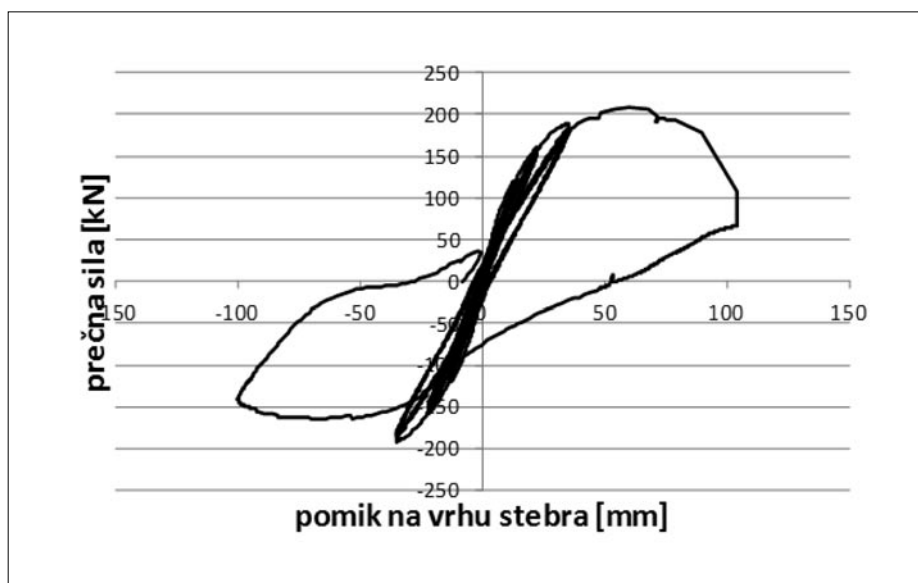
(slika 19). V trenutku so se potrgale praktično vse natezne palice, medtem ko sta tlačna cona in plašč ostala nepoškodovana. Po tem lahko sklepamo, da je bil uporabljeni način sidranja učinkovit. To bomo preizkusili s ponovitvijo ponesrečenega eksperimenta. Priprave za novi preizkus že potekajo.

4.4 Sklepi

Eksperimentalno smo preizkusili ciklično obnašanje mostnega stebra s prečnim pre-

rezom I-oblike, ki je imel prečno armaturo, ki je zagotavljala zadostno strižno nosilnost, vendar ni izpolnjevala vseh zahtev standarda EC8/2 glede objetja betonskega jedra in preprečitve uklona vzdolžnih armaturnih palic.

Pri cikličnem obremenjevanju se je steber porušil zaradi uklona vzdolžnih (upogibnih) armaturnih palic. Uklon je nastopil zaradi neustrezno oblikovanih stremen, ki niso bila pravilno sidrana v betonsko jedro, in zaradi premajhne količine stremen. Razpoložljiva



Slika 19 • Zveza med silo v stebri in pomikom na vrhu stebra

duktilnost za pomike je znašala komaj 2,3, pomik, pri katerem se je zgodila porušitev stebra, pa je bil le 1,6-krat večji od tistega, pri katerem je bila registrirana maksimalna nosilnost stebra. Uklon vzdolžnih armaturnih palic je povzročil zelo hiter padec nosilnosti, poškodbe stebra pa je bilo zelo težko sanirati, saj je bila porušitev stebra v osnovi krhka. Raziskava je potrdila, da lahko v stebrih s prečnim prerezom I-oblike, ki je zaradi majhne tlačne cone neugodna, dosežemo duktilno obnašanje le z zadostno količino pravilno oblikovanih stremen, ki so ustrezno sidrana v betonsko jedro s kljukami. V nasprotnem

primeru stremena zelo hitro izgubijo svojo funkcijo, takoj zatem ko odpade zaščitna plast betona, saj se začnejo razpirati. Posledično ne morejo več preprečiti uklona vzdolžne upogibne armature.

Glede na rezultate eksperimenta lahko sklepamo, da mostov s podobno konstruiranimi stebri ne bi smeli projektirati s predpostavko o duktilnem obnašanju mostu oziroma poštevatvi faktor obnašanja $q = 3.5$, saj je razpoložljiva duktilnost pod predpostavljeno vrednostjo.

Analizirali smo tudi možne načine utrditve takšnega stebra. Preverjali smo možnost

utrditve s CFRP-plašči, ki smo jih ovili okoli pasnic stebra in sidrali v steber na dva načina: s sidri iz ogljikovih vlaken in z jekleno ploščico, pritrjeno z jeklenimi vijaki. Prva rešitev se je izkazala za neprimerno. Druga rešitev žal ni bila v popolnosti preizkušena, saj se je zaradi okvare na batu modelni steber nepričakovano porušil. Pri tem sta pritrditvev CFRP-plašča na steber in sam plašč ostala nepoškodovana, kar kaže na to, da je bilo zagotovljeno učinkovito sidranje. V načrtu je ponovitev preizkusa, s katerim bomo to ponovno preverili.

4 • ZAHVALA

Vsi opisani eksperimenti so bili narejeni na ZAG-u. Še zlasti se zahvaljujema kolegoma mag. Alojzu Bevcu in dr. Urošu Bohincu, s katerima sva zelo tesno sodelovala pri opisanih raziskavah.

Del prikazanih raziskav je opravljen v sklopu doktorskih nalog dr. Jake Zevnika in Zlatka

Vidriha, ki sta poleg analitičnega opravila tudi veliko pripravjalnega dela na preizkušancih. Njuno delo je financiralo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije.

Raziskave škatlastih stebrov je delno financiral Dars. Podjetje Sika, d. o. o., Slovenija je

doniralo ves material, uporabljen za izvedbo utrditve s CFRP-plašči, in je tudi opravilo vsa dela, ki so bila povezana z namestitvijo teh plaščev.

V pripravi in analizi preizkušancev je sodeloval tudi študent Damjan Jamnik v okviru svojega diplomskega dela. Vsem se lepo zahvaljujema.

5 • LITERATURA

Bevc, L., Tomažević, M., Fischinger, M., Isaković, T., Bohinc, U., Zevnik, J., Študije in modelne preiskave potresne ranljivosti in predlogi utrditve za stebre viadukta Ravbarkomanda in sorodno konstruirane premostitvene objekte: razširjeni povzetek študije, Zavod za gradbeništvo Slovenije: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 2006.

Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T., EUROCODE 8/2, projektiranje konstrukcij v potresnih območjih – mostovi: preliminarni priročnik, Ljubljana: FAGG, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 1994.

Isaković, T., in Fischinger, M., Strižna nosilnost ciklično obremenjenih mostnih stebrov, Gradbeni vestnik, letnik 55, št. 11, str. 276–287, november 2006.

Isaković, T., Evrokodi: gradivo za izobraževalni tečaj o Evrokodih, projektiranje potresno odpornih mostov po pravilih iz Evrokoda 8/2, navodila in komentar izbranih določil, Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2010.

Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, 1997.

Pr ENV 1998-2, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 2. del: Mostovi, prENV 1998-2:1994, 1994.

SIST EN 1992-1-1– Evrokod 2, Projektiranje betonskih konstrukcij, 1-1. del, Splošna pravila in pravila za stavbe, SIST EN 1992-1-1:2005, maj 2005.

SIST EN 1998-2, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 2. del: Mostovi, SIST EN 1998-2:2006, maj 2006.

SIST EN 1998-3, Evrokod 8, Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih, 3. del, Ocena in prenova stavb, SIST EN 1998-3:2005, oktober 2005.