

G.3. METODE POPRAVKA I POJAČANJA ZIDOVA

3.1. Odabir građevinskih materijala tijekom obnove povijesnih građevina

Zagrebački donjogradski ustroj nije odstupao od trenda primjene vapnenih materijala. Na pročeljima, ali i unutrašnjosti rabile su se mineralne žbuke, dok je opeka povezivana vapnenim mortom koji se sastoji od mineralnoga veziva, pijeska i vode. Kod povijesnih se žbuka i mortova kao vezivo upotrebljavalo zračno vapno (gašeno ili hidratizirano). Danas se građevno vapno dijeli u dvije glavne skupine prema normi [HRN EN 459-1], kao što je prikazano u tablici G.3.

Općenito, vapno je naziv za živo vapno ili kalcijev oksid (CaO) koji se dobiva pečenjem vapnenca ili kalcijevo-ga karbonata (CaCO_3) na temperaturama između dvije navedene vrijednosti 900 i 1200°C. Gašenjem živoga vapna s vrlo malo vode dobiva se hidratizirano vapno [Forsyth 2008] koje se danas u građevinarstvu najčešće primjenjuje za izradu mortova za zidanje i žbukanje. Gašeno se pak vapno dobiva gašenjem živoga vapna s većim udjelima vode ili otapanjem hidratiziranoga vapna u vodi, a upotrebljava se za unutarnje bojanje i dezinfekciju mineralnih podloga. Gašeno ili zračno vezano vapno nema sposobnost vezanja pod vodom, već je za to potreban ugljični dioksid iz zraka. Nakon stvrdnjavanja zračno vapno ostaje hidrofilno i slabo topivo, zbog čega dobro veže s novim slojevima morta prilikom djelomičnih popravaka. Iako se gašeno vapno ne može rabiti u svim uvjetima, ta je vrsta vapna najprimjerena za obnovu povijesnih građevina zbog visoke propusnosti i lake obradivosti.

Tablica G.3. Podjela vapna prema [HRN EN 459-1]

ZRAČNA VAPNA	Kalcitno vapno (CL)
	Dolomitno vapno (DL)
HIDRAULIČNA VAPNA	Prirodno hidraulično vapno (NHL)
	Formulirano vapno (FL)
	Hidraulično vapno (HL)

Sirovina za hidraulično vapno sastoji se od karbonatne i glinovite (silikatne) komponente, pa zbog kalcinacije dolazi do spajanja oksida kao kod proizvodnje cementa. Udio oksida zaslužan je za proces karbonatizacije, dok silikati i aluminati tvore reakcije s vodom i zaslužni su za hidraulična svojstva. Hidraulično je vapno specifično po tome što stvrdnjava pod vodom [Torney i Snow 2014]. Žbuke i mortovi od tog materijala imaju manju propusnost vode, veću čvrstoću i veću otpornost oštećenjima uzrokovanih kristalizacijom soli [Feilden 2003]. U hidraulična vapna ubraja se prirodno hidraulično vapno (NHL), formulirano vapno (FL) i umjetno hidraulično vapno (HL). NHL je čisto vapno, bez ikakvih primjesa, koje se proizvodi kalcinacijom vapnenca uz dodatak gline. Takva vrsta vapna ima sposobnost vezivanja i očvršćivanja na zraku i pod vodom, pri čemu njegova hidraulična svojstva ovise samo o kemijskom sastavu sirovine iz koje je dobiveno. FL je mješavina zračnoga vapna, najčešće kalcitnoga (CL), i/ili NHL-a uz dodatak hidrauličnoga ili pucolanskoga materijala, pa stoga također ima sposobnost očvršćivanja na zraku i pod vodom. HL je vapno s dodatkom cementa, troske visoke peći, letećega pepela, vapnenačkoga filera ili ostalih prikladnih materijala. Ima hidraulična svojstva, a karbonatizacija pridonosi procesu očvršćivanja. Osnovnu sirovinu hidrauličnoga vapna, koje je najčešće u upotrebi, čini hidratizirano vapno s dodacima pucolanskoga porijekla. Ispitivanjem povijesnih mortova pokazalo se da su najzastupljeniji pucolani vulkansoga podrijetla te glina i opekarska prašina [Ademović i Kurtović 2018; Moropoulou *et al.* 2005]. Pucolani su silikatni ili silikatno aluminijski materijali koji sami po sebi imaju mala ili nikakva cementna svojstva, ali koji će, u fino usitnjenom obliku uz prisutnost vlage, kemijski reagirati s kalcijevim hidroksidom čime se dobivaju spojevi koji imaju cementna svojstva. Jednostavnije rečeno, pucolani su fini praškasti materijali koji se mogu dodati vapnenim ili cementnim mortovima kako bi im se povećala trajnost i, u slučaju vapnenih mortova, osiguralo očvršćivanje [Gibbons 1997].

Otkrićem portland cementa vapno pada u drugi plan. Zbog povećane čvrstoće i kratkoga vremena vezivanja portland cement se odmah nakon otkrića počeo intenzivno rabiti kao vezivo. Međutim, ubrzo se uočilo da cement nije pravilan odabir za popravak i pojačanje povijesnih zidanih građevina. Budući da su, kao što je već istaknuto, povijesne građevine uglavnom građene zidanim elemenatima povezanim mortovima na bazi vapna, kao glavni problem korištenja cementnih mortova u obnovi povijesnih građevina ističe se njihova nekompatibilnost u pogledu poroznosti, fleksibilnosti i čvrstoće [Forsyth 2008].

Iako su sve građevine izložene djelovanju vlage, kod povijesnih građevina poseban je problem kapilarna vlaga. Međutim, zbog ravnoteže između svojstava opeke, morta i žbuke kod povijesnih se građevina vlaga ravnomjerno upija u zid. Poroznost vapnenih materijala omogućava slobodnu evaporaciju zarobljene vlage, što doprinosi trajnosti. Upravo stoga treba imati na umu da primjena nepropusnih materijala u obnovi, poput onih

na bazi cementa, može znatno degradirati svojstva građevine. Smanjena propusnost cementnih materijala negativno se odražava na trajnost građevine, jer se voda zadržana na površini slijeva niz zid i kapilarnim putem kroz pukotine upija u tijelo zida. Međutim, zbog primjene nepropusnih materijala akumulirana vlaga neće slobodno evaporirati na površinu, što dovodi do porasta koncentracije topivih soli u zidu, to jest znatnijega iscvjetavanja, odnosno kristalizacije soli u područjima u kojima su upotrijebljeni tradicionalni materijali. Posljedično dolazi do znatnih oštećenja izvornih materijala koji nisu mijenjani tijekom obnove.

Nadalje, većina starijih građevina nema monolitne temelje, zbog čega dolazi do nejednolikoga slijeganja tijekom vremena, posebno ako građevine nisu izgrađene na čvrstoj stijeni. Važno je stoga da mort u sljubnicama može preuzeti određene pomake, kako zbog djelomičnoga slijeganja temelja, tako i zbog volumnih promjena uzrokovanih temperaturnim promjenama. Cementni mortovi, za razliku od vapnenih mortova, imaju visok modul elastičnosti, zbog čega se ne mogu prilagoditi deformacijama ziđa. Također, velika tlačna čvrstoća cementnih mortova, koja se inače navodi kao njihova glavna odlika, postaje još jednom manom kad se rabe u obnovi povijesnih građevina, budući da je i do nekoliko puta veća od čvrstoće vapnenih mortova, koja iznosi svega nekoliko MPa. Zbog tih se razlika u tlačnim čvrstoćama stvaraju dodatna naprezanja na granicama staroga i novog materijala koja mogu dovesti do stvaranja pukotina koje zatim postaju nova mjesta ulaska štetnih tvari u strukturu ziđa, što u konačnici dovodi do daljnje degradacije same građevine [Pacheco-Torgal et al. 2012]. Zahtjev za kompatibilnošću postojećih i sanacijskih materijala dovodi do sve češće uporabe vapna kao veziva kod sanacije povijesnih građevina.

Iz svega navedenoga slijedi da je osnovna premisa u obnovi povijesnih građevina primjena materijala svojstava sličnih materijalima upotrijebljenima tijekom gradnje. U konačnici, svaki bi postupak na povijesnoj građevini morao biti reverzibilan.

3.2. Zamjena znatno oštećenih zidova

Zbog potresa se mogu pojaviti znatna oštećenja zida koja zahtijevaju da se dio zida potpuno ukloni i ponovno izvede. U takvim slučajevima važno je odmah izvesti privremeno podupiranje međukatnih konstrukcija i zidova koji se nalaze iznad onih dijelova zida koji se trebaju ukloniti.

Metode popravka pukotina ovise o vrsti i širini pukotina [HRN EN 1998-3]. Ako je širina pukotina razmjerno mala, manja od 10 mm, i ako je debljina zida razmjerno mala, pukotine se smiju zatvoriti mortom. Iste se pukotine kod debljih zidova zatvaraju injektiranjem (vidjeti poglavlje 3.5). Popravak pukotina širine veće od 10 mm najčešće obuhvaća rekonstrukciju, odnosno djelomično prezidavanje dijela zida.

Otpornost zidova na vertikalno raspucavanje može se znatno poboljšati ugradnjom spiralno oblikovanih sidara ili polimerne armature maloga promjera u horizontalne sljubnice. Za popravak dijagonalnih pukotina može se uz navedene tehnike upotrijebiti ovijanje jednoga ili oba lica ziđa odgovarajućom oblogom (vidjeti poglavlja 3.10 i 3.11).

3.2.1. Ponovno zidanje dijela zida

Lokalna metodologija uklanjanja i ponovne izgradnje (tal. *"scuci-cuci"*) ima za cilj obnavljanje kontinuiteta zida uzduž linijskih pukotina (zamjena oštećenih elemenata novima, ponovno uspostavljanje konstrukcijskoga kontinuiteta) i obnavljanje teško oštećenih dijelova ziđa [Niker Project 2010]. Poželjna je uporaba materijala koji su oblikom, dimenzijama, krutošću i čvrstoćom slični onima u izvornom zidu. Treba osigurati odgovarajuće veze, kako bi se dobilo monolitno ponašanje. Učinkovitost intervencije strogo je povezana s povratom prethodnih svojstava ziđa.

Načini izvođenja razlikuju se ovisno o stupnju oštećenja i tipologiji zida. Ako je oštećenje razmjerno malo i zahvaća samo jedan sloj zida, intervencija se može izvesti samo na zahvaćenoj strani. Ako oštećenje prolazi kroz veći dio zida, intervenciju treba izvesti postupnom zamjenom zidnih elemenata samo s jedne strane ili djelovanjem na obje strane koordinirano u slučaju veće debljine ziđa.

Općenito, u ovim se zahvatima rabe kvalitetni zidni elementi i mort, s posebnom pozornošću posvećenom kompatibilnosti novoga dijela s ostatkom zidane konstrukcije. Ponekad, ako su stari zidani elementi još uvijek u dobrom stanju, izvorni se materijal može ponovno upotrijebiti.

Tehnologija izvedbe

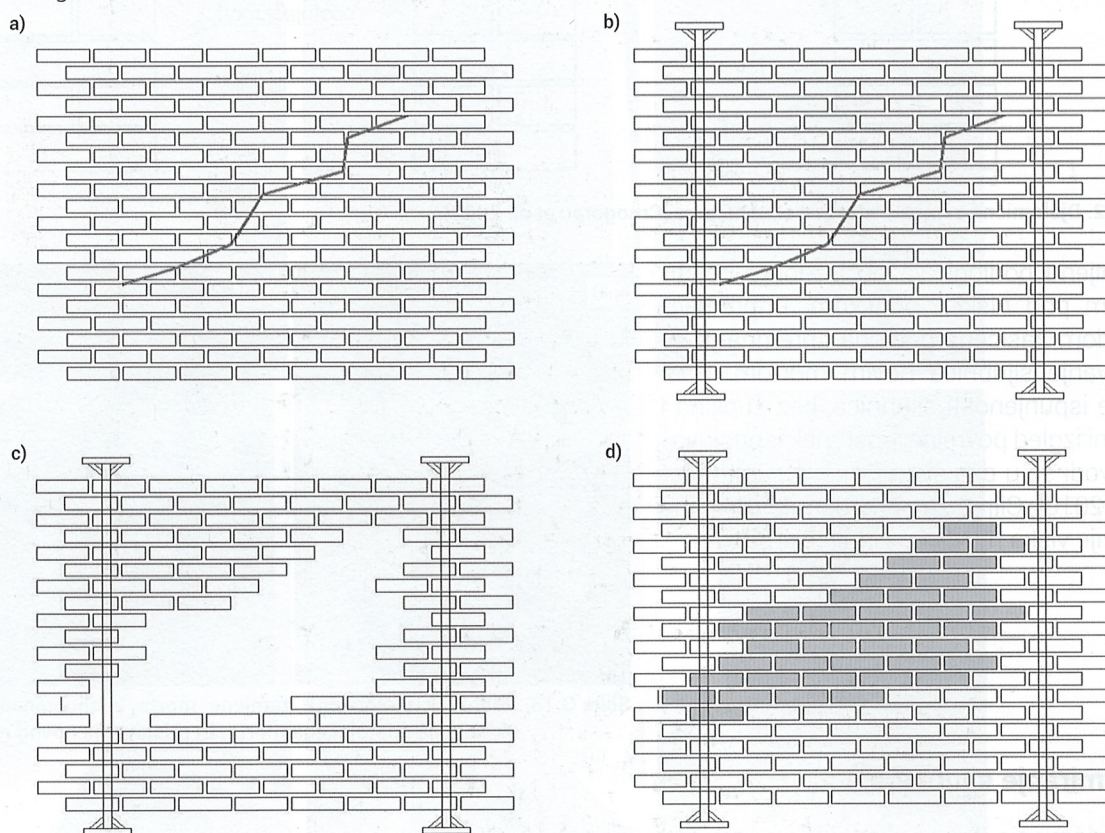
Prije intervencije treba odrediti stupanj oštećenja zidnih elemenata, vrstu zidnih elemenata i morta te raspored zidanja kako bi se zajamčila kompatibilnost novoga i postojećega dijela. Posebnu pozornost treba posvetiti žbuci koja mora biti kompatibilna s mehaničkim, kemijskim i fizičkim karakteristikama ziđa. Treba napraviti redoslijed zamjene zidnih elemenata podjelom zida u dijelove u kojima se može raditi naizmjenično. Zidne elemente koji su znatno oštećeni, kao i one koji mogu prenijeti silu na područja na kojima se provodi zamjena, treba poduprijeti radi ograničenja daljnjega širenja oštećenja (slika G.11).

Uklanjanje se provodi čišćenjem morta iz sljubnica i uklanjanjem zidnih elemenata bez udaranja i vibracija; kod starih zidova uklanjanje se može izvršiti ručnim izvlačenjem. Kod zidova veće debljine potpora se osigurava hidrauličnim dizalicama na području koje treba zamijeniti. Istodobno, provodi se ugradnja novih elemenata odozdo prema gore.

Prije uklanjanja podupirača preporuča se provjera novih sljubnica kako bi se izbjeglo slijeganje zbog skupljanja morta i progresivnoga napredovanja opterećenja. Preporuka je da se sljubnice izvode manje debljine, čime se ograničava volumen morta te postupno povećava razina opterećenja novoga dijela, čime se omogućava raspodjela naprezanja slična kao tijekom gradnje.

3.2.2. Potpuno preslagivanje zida

U slučaju teško oštećenih zidova ili dijelova zidova koje nije moguće popraviti ili pojačati pristupa se pažljivom rušenju i rekonstrukciji takvih zidova. Tijekom obnove važno je rabiti materijale koji su u skladu s izvornim materijalima. U slučaju zidanja, dimenzije zidnih elemenata trebaju biti što bliže izvornim dimenzijama. Ako to nije moguće, treba upotrijebiti čeličnu armaturu za povezivanje ugrađujući je u zid na jednakim razmacima kako bi se osigurala dobra povezanost između novoga i staroga dijela konstrukcije. Za povezivanje se mogu upotrijebiti i čelične zatege na priključnim mjestima ili se kritična mjesta mogu obložiti armiranim anorganskim oblogama.



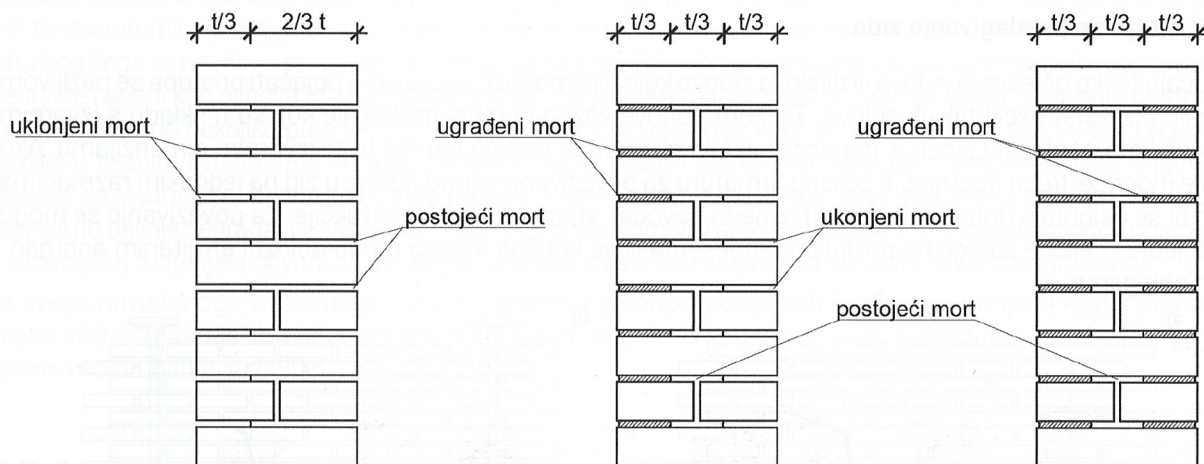
Slika G.11. Ponovno zidanje dijela zida (shematski prikaz redoslijeda radova): a) oštećenje u zidu; b) postavljanje podupirača; c) uklanjanje dijela zida; d) ugradnja novih elemenata

3.3. Djelomična zamjena morta u sljubnicama

Sastoji se od djelomičnoga uklanjanja oštećenoga morta u sljubnicama i zamjene novim mortom. Tehnika je u skladu s tradicionalnim postupcima održavanja ili popravka zidanih konstrukcija, a cilj je metode poboljšanje mehaničkih karakteristika ziđa. Primjenjuje se samo ako su oštećenja lokalizirana u mortu. Metodom je moguće povećati otpornost zidanih konstrukcija na djelovanje vertikalnih i horizontalnih opterećenja [Tomazević 1999]. Prije odluke o primjeni tehnike treba pregledom građevine utvrditi tipologiju ziđa (broj slojeva zida, debljinu zidova, način povezivanja, vrste spojeva) te fizička, kemijska i mehanička svojstva komponenta (zidnih elemenata, morta) i sl.

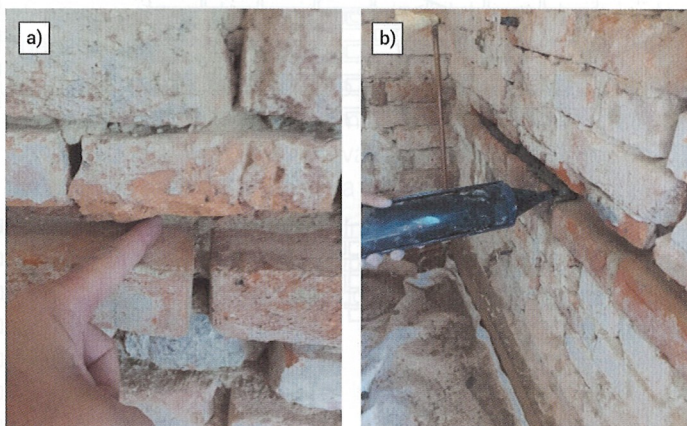
Tehnologija izvedbe

Postupak započinje uklanjanjem postojeće žbuke i morta iz sljubnica. Postojeći mort uklanja se do $1/3$ širine zida iz sljubnica, po potrebi s jedne ili obje strane zida (slika G.2 i slika G.13a). Ako je moguće uklanjanje, treba raditi tradicionalnim, a ne električnim alatima kako bi se izbjegle vibracije i njihov negativan utjecaj na žide [Tomažević 1999]. Posebnu pozornost treba posvetiti potpunom uklanjanju izvornoga morta iz sljubnica. Jedino se potpunim uklanjanjem može osigurati kvalitetna veza između novoga morta i postojećih zidnih elemenata. Ako je zamjena morta potrebna s obje strane zida, postupak se izvodi prvo s jedne strane, a onda druge strane zida radi sprečavanja vertikalne nestabilnosti.



Slika G.12. Djelomična zamjena morta u sljubnicama [Crnogorac et al. 2020]

Pripremljenu podlogu važno je dobro očistiti vodom pod niskim pritiskom. Pripremljena i vodom zasićena podloga spremna je za ispunjavanje sljubnica novim mortom. Radi potpune ispunjenosti sljubnica, bez šupljina i uz željeni izgled površine, postupak ispunjavanja provodi se u dva sloja (slika G.13b) [Niker Project 2010]. Cilj je završne obrade površine uklanjanje viška morta sa zidnih elemenata.



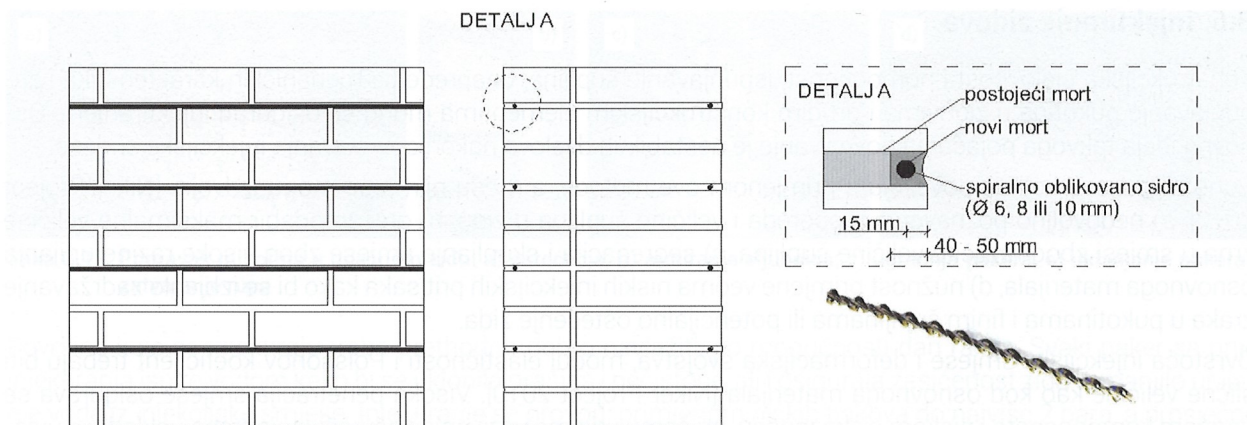
Slika G.13. Postupak djelomične zamjene morta u sljubnicama: a) uklanjanje postojećega morta; b) utiskivanje novog morta

3.4. Armiranje sljubnica

Za ograničavanje širine pukotina, pri popravku zidanih građevina u horizontalne se sljubnice ugrađuju spiralno oblikovana sidra. Spiralno oblikovana sidra izrađuju se od duktilnih i trajnih metala, poput nehrđajućega čelika ili vlaknima armiranih polimera (engl. *fibre reinforced polymers* – FRP). Metoda se primjenjuje za povezivanje oštećenih dijelova zida, povećanje nosivosti nadvoja, osiguranje parapetnih zidova i povezivanje unutarnjih i vanjskih zidova. Zbog dobre adhezije spiralno oblikovanih sidara s mortom, ona preuzimaju vlačna i posmična naprezanja, čime se povećava nosivost zida i ograničava širenje pukotina [Niker Project 2010]. Smatra se umjereno invazivnom metodom s obzirom na to da je u mnogim slučajevima moguće uklanjanje morta i spiralno oblikovanoga sidra iz sljubnice. Preporuča se kombinirati metodu s injektiranjem zidnih elemenata.

Tehnologija izvedbe

Postupak započinje uklanjanjem žbuke na mjestima na kojima postoji vidljiva pukotina. Horizontalne sljubnice čiste se do dubine od 4 do 5 cm (slika G.14). Sljubnice se potom čiste od prašine zrakom pod pritiskom te vodom kako bi se uklonile sve nečistoće. Na taj se način osigurava prionjivost i zaštita armature od korozije. Spiralno oblikovana sidra izrezuju se na potrebu duljinu, pri čemu treba voditi računa da se postavljaju tako da s obje strane pukotine imaju duljinu od najmanje 50 cm. Promjer spiralno oblikovanoga sidra odabire se u skladu s proračunom (vidjeti poglavlje 6.5).



Slika G.14. Armiranje sljubnica spiralno oblikovanim sidrima



Slika G.15. Primjena spiralno oblikovanih sidara u sljubnicama: a) utvrđivanje smjera pukotine; b) uklanjanje morta iz sljubnica; c) izvođenje prvoga sloja morta; d) utiskivanje spiralno oblikovanoga sidra; e) izvođenje drugoga sloja morta; f) raspored armiranih sljubnica u zidu

U sljubnice se unosi sloj morta na bazi hidrauličnoga vapna ili pucolanskoga cementa debljine do 2 cm. Spiralno oblikovana sidra postavljaju se u prvi sloj morta, a razmak na koji se ugrađuju određuje se u skladu s proračunom (vidjeti poglavlje 6.5). Prilikom ugradnje sidra treba obratiti pozornost da ostane prostor od najmanje 15 mm dubine u sljubnici kako bi bilo dovoljno mjesta za postavljanje drugoga sloja morta. Nakon izvršenoga "šivanja" pukotina, kako bi se dodatno konsolidirao zid, preporuča se injektiranjem zapuniti unutrašnjost zida na mjestima nastanka pukotina. Postupak se provodi u skladu s opisom metode u poglavlju 3.5.

3.5. Injektiranje zidova

Konstruktivska cjelovitost i homogenost, ispunjavanje šupljina, unapređenje mehaničkih karakteristika i zapunjavanje pukotina u zidovima i drugim konstrukcijskim elementima mogu se osigurati injektiranjem. Osnovna ideja takvoga pojačanja povezivanje je nestabilnih dijelova nakon očvršćivanja injekcijske smjese.

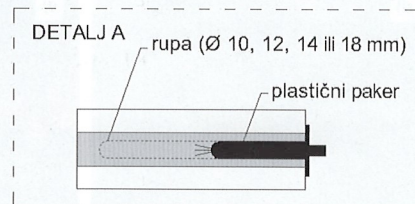
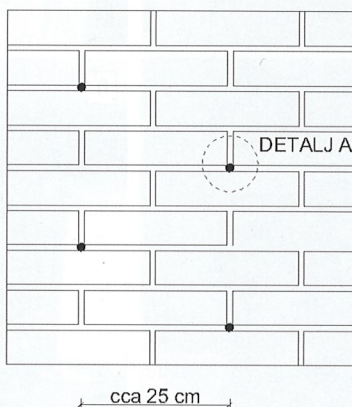
Puno je izazova koji se povezuju s primjenom ove metode, a među njima se mogu izdvojiti [Niker Project 2010]: a) nedovoljno poznavanje rasporeda i veličine šupljina u zidu, b) otežan odabir maksimalne veličine zrna u smjesi zbog različite veličine šupljina, c) segregacija i skupljanje smjese zbog visoke razine upijanja osnovnoga materijala, d) nužnost primjene veoma niskih injekcijskih pritisaka kako bi se izbjeglo zadržavanje zraka u pukotinama i finim šupljinama ili potencijalno oštećenje zida.

Čvrstoća injekcijske smjese i deformacijska svojstva, modul elastičnosti i Poissonov koeficijent trebaju biti slične veličine kao kod osnovnoga materijala [Niker Project 2010]. Visoka penetracija smjese osigurava se finoćom komponenata i niskom viskoznošću, pri čemu vrijeme vezivanja i očvršćivanja treba uskladiti s uvjetima izvođenja uz istodobno nisku razinu skupljanja i bubrenja, netopljivost u vodi i otvorenost za difuziju vodene pare. U načelu se injekcijske smjese dijele na anorganske smjese i smjese na bazi sintetičkih smola. Međutim, općenita je preporuka da se kod zidanih građevina ne upotrebljavaju smjese na bazi sintetičkih smola te se one u nastavku ne razmatraju.

Anorganske smjese mogu biti na bazi cementa ili vapna. Smjese na bazi cementa upotrebljavaju se kad su zahtijevana visoka mehanička svojstva, a ne postoji problem kompatibilnosti injekcijske smjese i osnovnoga materijala konstrukcije. Za izradu se najčešće rabi portland cement uz vodocementni (v/c) omjer jednak 0,8 do 1,2. Takve mješavine dosežu visoke tlačne čvrstoće, i do 40 MPa. Treba imati na umu da uporaba injekcijskih smjesa superiornijih svojstava od osnovnoga materijala dovodi do stvaranja diskontinuiteta i znatnih mehaničkih razlika između konsolidiranih i ostalih dijelova. Kod obnove zidanih građevina preporuča se primjena smjesa na bazi hidrauličnoga vapna koje imaju svojstva slična postojećemu mortu. Bez cementna, vapneno-pucolanska hidraulična vezi-va omogućavaju pripremu fluidnih injekcijskih smjesa za zide kompatibilnih s osnovnim materijalom.

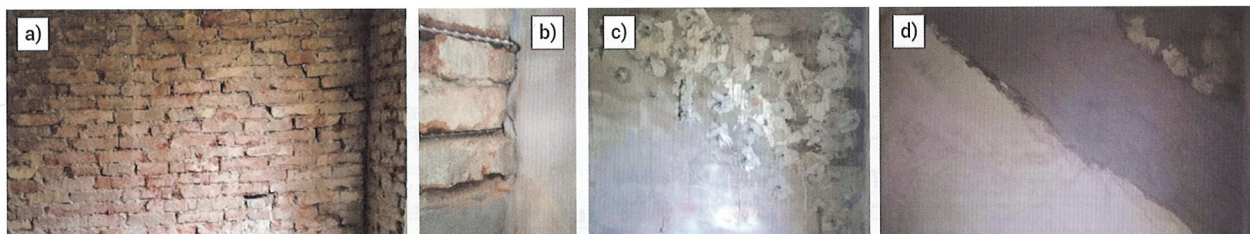
Tehnologija izvedbe

Injektiranje se provodi kroz takozvane pakere koji se ugrađuju u sljubnice jednoliko po cijeloj površini zida. Preporučena međusobna udaljenosti između pakera iznosi najviše 20 do 30 cm, po visini i širini zidnoga elementa. Svaki se susjedni red zamakne u odnosu na prethodni za 10 do 15 cm kako bi se dobio pravilan raster i veća pokrivenost površine koja se injektira (slika G.16). Ako se izvodi lokalno injektiranje pukotine, pakeri se ugrađuju u



Slika G.16. Položaj pakera za konsolidaciju zidane konstrukcije

sljubnice uzduž pukotine vodeći računa da je udaljenost pakera od pukotine usklađena sa širinom zida te vrstom zidnoga elementa. Rupa za prihvat pakera izvodi se bušenjem, a veličina svrdla odabire se ovisno o vrsti pakera i debljini sljubnice. Promjer je Φ 10, 12, 14 ili 18 mm. Rupe se buše u najmanjoj dubini od 2/3 debljine zida [Sorić 2016]. Nakon bušenja pripremljene se rupe ispuhuju zrakom pod pritiskom. Odabir pakera utječe na tehnologiju izvođenja, a najčešće se radi o plastičnim pakerima s lamelama i nepovratnim ventilom. Ta vrsta pakera pojednostavnjuje izvođenje budući da paker ne treba dodatno učvrstiti za podlogu, već se veza s podlogom ostvaruje trenjem između lamela i plašta rupe. Također, zbog nepovratnoga ventila sav se injektirani materijal zadržava unutar zida bez potrebe za postavljanjem pokrovnih čepića kakvi su potrebni kod pro- točnih pakera. Ako se za injektiranje upotrebljavaju plastične cjevčice, učvršćuju se mortom za površinu zida. Prije početka injektiranja treba provesti djelomičnu zamjenu morta u sljubnicama, a prema potrebi i armiranje (vidjeti poglavlja 3.3 i 3.4, slika G.17). Umjesto djelomične zamjene morta u sljubnicama može se izvesti izravnavajući sloj morta koji ujedno služi kao zaštita od procurivanja injekcijske smjese izvan ravnine zida (slika G.18), čime se smanjuje potrošnja materijala. Utrošak smjese bitno ovisi o morfologiji i karakteristikama zida.



Slika G.17. Popravak pukotina u opečnom zidu: a) oštećenje; b) armiranje sljubnica; c) ugradnja pakera; d) uklanjanje pakera i zatvaranje rupa

Površine koje se injektiraju treba prethodno dobro navlažiti, po mogućnosti dan ranije. Svaki paker se prije injektiranja ispire vodom kako bi se uklonila prašina i nečistoće, ali i osigurala zasićenost zida i smanjilo upijanje vode iz injekcijske smjese. Injektiranje se provodi primjenom niskih tlakova do najviše 2 bara, a prosječne vrijednosti 1 bar, odozdo prema gore. Prelazak na sljedeći paker provodi se u trenutku kad na susjednom pakeru dođe do istjecanja injekcijske smjere, što je ujedno i kontrola ispunjenosti. Nakon očvršćivanja injekcijske smjese višak pakera izvan zidne ravnine treba odrezati te zatvoriti rupe mortom.



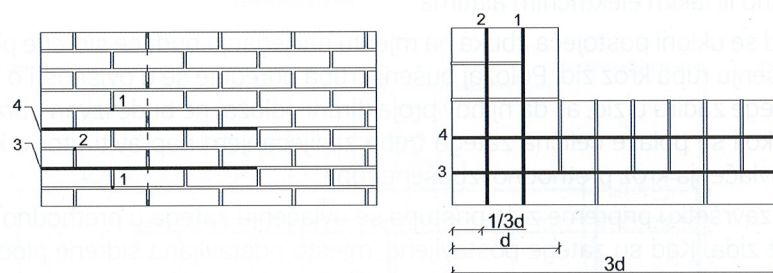
Slika G.18. Primjer injektiranja pukotina u zidanoj konstrukciji

3.6. Povezivanje zidova prošivima

Prošivi podrazumijevaju postupak sidrenja spiralno oblikovanih sidara unutar zidova radi njihova povezivanja u cjelinu. Tako postavljene šipke sudjeluju u prijenosu naprezanja pri budućim deformacijama zida. Ovisno o načinu uporabe, imaju funkciju "šivanja" odvojenih elemenata radi lokaliziranoga pojačanja kutnih područja ili pojačanja cijeloga konstrukcijskog elementa. Tom je metodom moguće uspostaviti povezanost elemenata u kritičnim područjima. Promjer, raspored, dubina i nagib spiralno oblikovanih sidra moraju se proračunati u fazi projektiranja.

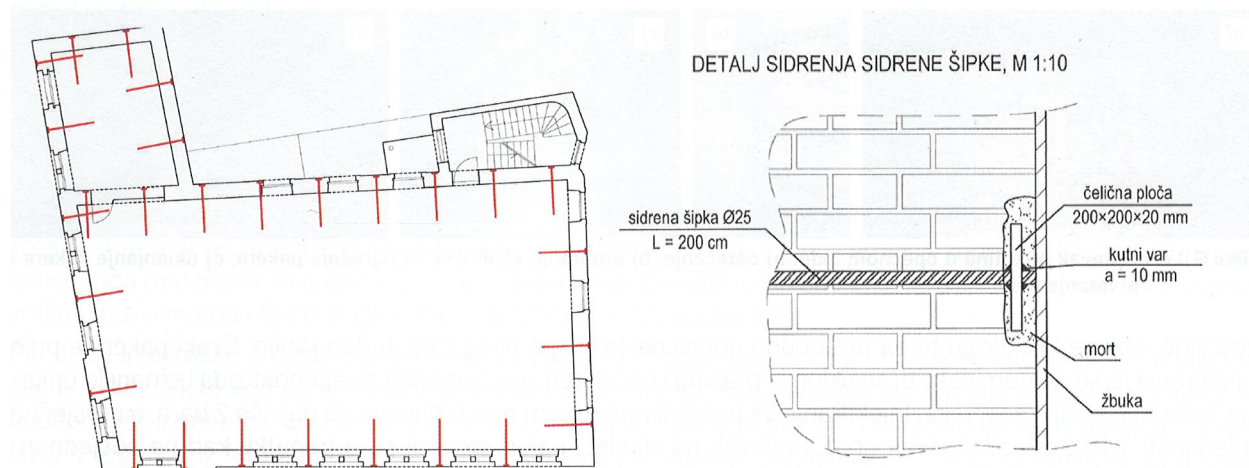
Tehnologija izvedbe

Ako se prošivi rabe za ponovno povezivanje zidova, treba uzduž pukotine na međusobnim vertikalnim razmacima do 25 cm izbušiti rupe. Promjeri rupa koje se buše trebaju biti veći od promjera spiralno oblikovanih sidara koja se utiskuju u prethodno pripremljene rupe. Primjerice, za spiralno oblikovano sidro promjera $\Phi 8$ mm rupa se buši svrdlom veličine $\Phi 10$ mm u najmanjoj dubini



Slika G.19. Povezivanje susjednih zidova spiralno oblikovanim sidrima

od $2/3$ debljine zida i pod kutom od 30 do 45 stupnjeva u odnosu na ravninu zida ako se radi o šivanju pukotina ili horizontalno, u slučaju povezivanja susjednih zidova (slika G.19). Spiralno oblikovana sidra u rupe se utiskuju lakim ručnim alatom s vibracijom. Duljina sidra mora biti jednaka duljini izbušene rupe. Važno je osigurati da je spiralno oblikovano sidro u potpunosti utisnuto. Kad su spiralno oblikovana sidra utisnuta u rupu postavlja se plastični paker i ugrađuje visokofluidni mort na bazi vapneno-pucolanskoga hidrauličnog veziva. Paker se potom uklanja, a rupe zatvaraju mortom na bazi hidrauličnoga vapna ili sličnim materijalom. Primjer opisane tehnologije za spajanje pojačane stropne konstrukcije s obodnim zidovima prikazan je na slici G.20.



Slika G.20. Spajanje pojačane stropne konstrukcije sidrenim šipkama s obodnim zidovima

3.7. Povezivanje zidova čeličnim zategama

Zatege su većim dijelom linijski čelični konstrukcijski elementi koji se tradicionalno rabe radi konstrukcijsko-ga povezivanja i pojačavanja zidanih konstrukcija. Omogućavaju učinkovito povezivanje susjednih zidova pomažući u stvaranju takozvanoga učinka kutije. Radi se o pogodnom načinu povećanja statičko-dinamičke otpornosti građevine.

Razlikuju se dvije vrste zatega: aktivne i pasivne. Aktivne zatege imaju za cilj nametnuti konstrukcijsko povezivanje konstrukcije, dok su pasivne rezerva u slučaju dodatnih djelovanja na konstrukciju. Također, mogu biti dio hitnih intervencija na građevini nakon izvanrednih događaja poput potresa.

Postavljaju se unutar zidova ili izvan njih. U prvom slučaju treba pripremiti rupe u zidu i umetnuti zatege u njega, a u drugom se slučaju postavljanju uz zidove ili smještaju u manje utore kako bi se sakrili od pogleda. Pri tome treba voditi računa o maksimalnoj udaljenosti mjesta sidrenja. Iskustveno se za zidove dobre kvalitete preporuča sidrišta postaviti na udaljenosti koja ne prelazi 10 puta debljinu zida, a najviše iznosi 5 m. Kod zidova loše kvalitete ta udaljenosti ne bi trebala prelaziti 5 do 6 puta debljinu zida. Preporuča se dodatno učvrstiti mjesta sidrenja injekcijskim smjesama na bazi vapneno-pucolanskoga hidrauličnog veziva u širini minimalno $1,5 \Phi$ zatega na svaku stranu.

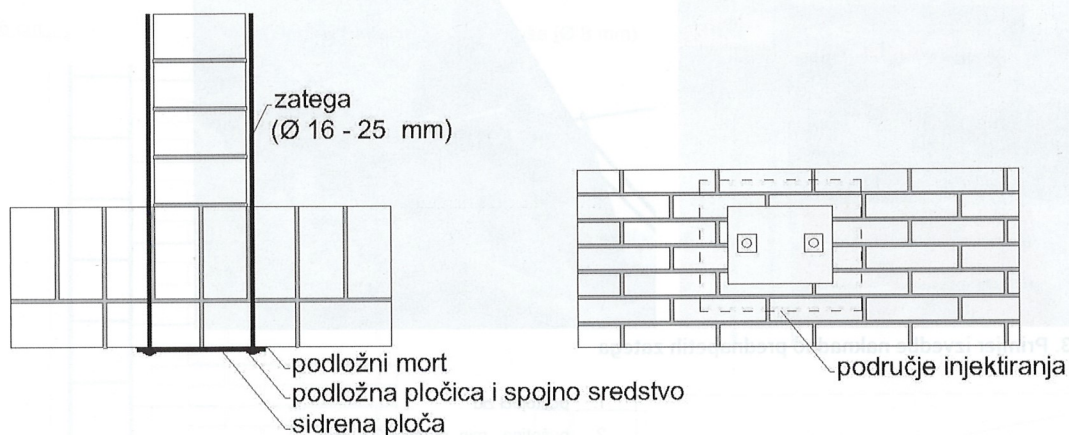
Učinkovita primjena zatega moguća je u sustavima u kojima postoji problem lokalne nestabilnosti poput rotacija, translacija ili prekomjerne deformacije. U navedenim slučajevima najčešće govorimo o privremenim radovima. Utežati se mogu svi nosivi zidovi, kao i pregradni, ako nisu tanji od 25 cm.

Tehnologija izvedbe

Povezivanje zidova čeličnim zategama najčešće se izvodi na mjestima sudara dvaju zidova (slika G.21). Postupak započinje uklanjanjem postojeće žbuke na mjestu buduće sidrene ploče te na mjestima prolaska čelične zatega uzduž zida (slučaj kad se zatega nalazi izvan zida). Žbuka se na predviđenim mjestima uklanja ručno ili lakim električnim alatima.

Kad se ukloni postojeća žbuka na mjestu nalijeganja buduće sidrene ploče na koju se sidri zatega pristupa se bušenju rupa kroz zid. Položaj bušenja rupa određuje se u ovisnosti o širini zida, uzimajući u obzir da čelične zatege zadiru u zid, ali da njihov projektirani položaj ne bude izvan obrađene površine gotovoga zida. Na zidu uz koji se polaže čelična zatega treba zasijecanjem napraviti utor u koji je moguće smjestiti zategu nakon provlačenja kroz prethodno izbušene rupe.

Po završetku pripreme zida pristupa se uvlačenju zatega u prethodno izbušene rupe te pripremljeni utor uzduž zida. Kad su zatege postavljene, mjesto postavljanja sidrene ploče izravna se mortom da se osigura nalijeganje sidrene ploče u punoj površini. Po očvršćivanju morta postavlja se sidrena ploča te se zatege pri težu postavljanjem podložnih pločica i matica. Zatege su najčešće napravljene od armaturnog čelika $\Phi 16$ do 25 mm, ovisno o veličini proračunske sile u zategi, s odgovarajućom podložnom pločicom od čelika. Važno je da su svi čelični dijelovi zaštićeni od korozije i obavijeni mortom u ležištu. Zatege se uvijek postavljaju s obje strane zida, to jest simetrično u odnosu na os zida u visini stropnih konstrukcija.



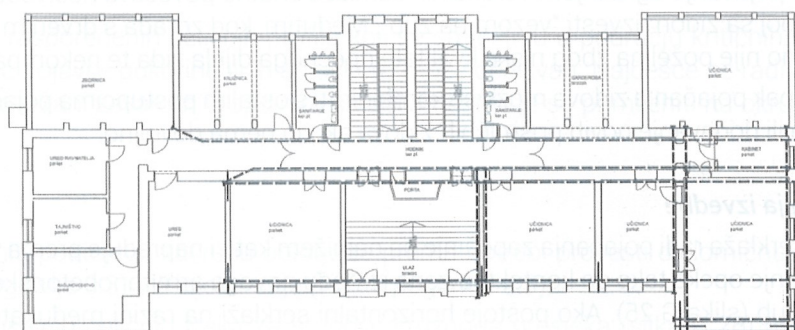
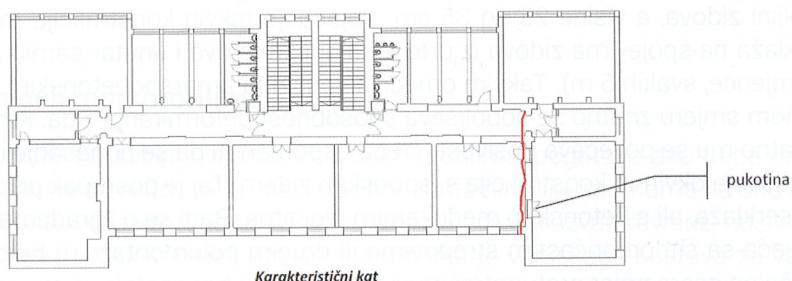
Slika G.21. Detalj izvedbe čeličnih zatega za povezivanje zidova

Područje ležišta zatega naknadno se injektira (vidjeti poglavlje 3.5) radi prijenosa sile zatezanja na veću površinu zida putem podložnih pločica. Važno je na mjestima sudara zatega predvidjeti mimoilaženje zatega za širinu ili pola širine podložne čelične sidrene ploče. Primjer popravka odvajanja desnoga krila zgrade od središnjega bloka pritezanjem čeličnim zategama prikazan je na slici G.22.

Naknadno prednapete zatega

Ugradnja prvih naknadno prednapetih zatega na području Hrvatske započela je još krajem 70-ih godina prošloga stoljeća kad se između ostaloga upotrebljavala i za sanaciju potresom oštećenih građevina. Zatege se sastoje od čeličnoga namještenog užeta koje je zaštićeno u HDPE cijevi čime je osigurana zaštita od korozije (slika G.23 i slika G.24). Nakon bušenja prodora kroz poprečni zid najmanjega promjera 32 mm pristupa se izvedbi utora u postojećim zidovima za ugradnju zatega i sidrenih ploča. Glavne sastavnice područja usidrenja su klinovi, sidrena glava, element prijenosa sile i stožasti tuljak. Prije ugradnje zatega izvodi se podloga sidrene ploče obično betonom C30/37 te se zatim zatega prednapinje. Svi čelični elementi sidrišta moraju biti zaštićeni od korozije. Zaštita svih čeličnih dijelova izvodi se slojem cementne smjese za injektiranje. Slika G.23 i slika G.24 prikazuju primjer izvedbe naknadno prednapetih zatega i detalj izvedbe.

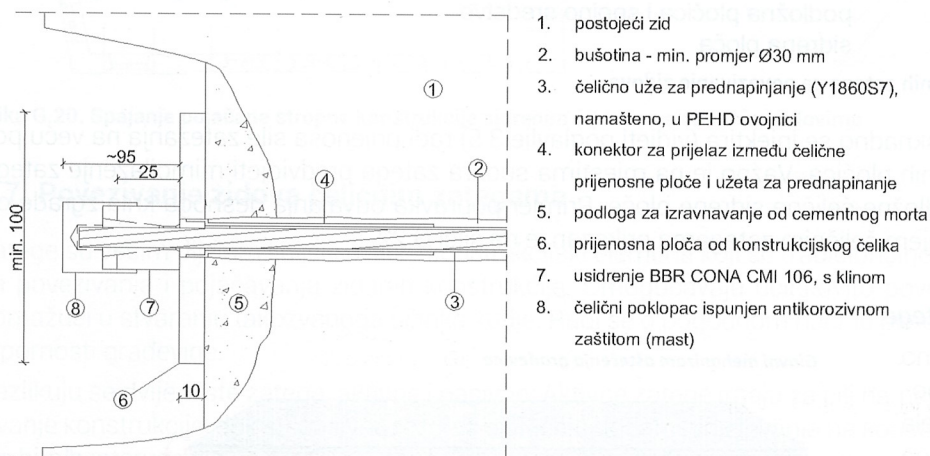
Glavni mehanizam oštećenja građevine



Slika G.22. Popravak oštećenoga desnog krila južnoga aneksa pritezanjem čeličnim zategama na osnovnu zgradu



Slika G.23. Primjer izvedbe naknadno prednapetih zatega



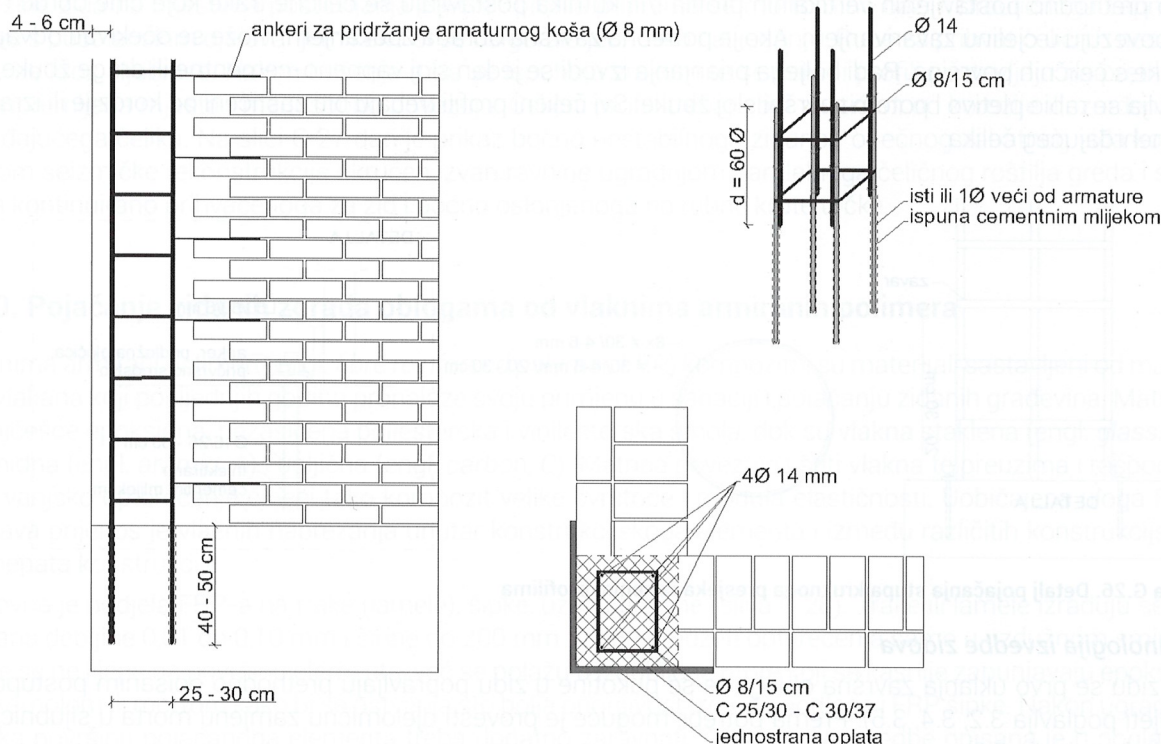
Slika G.24. Detalj izvedbe naknadno prednapetih zatega

3.8. Povezivanje susjednih zidova izvedbom serklaža

Mnoge zgrade u Zagrebu izgrađene su od masivnoga zida opeke punoga formata i morta. Kod vrlo starih zgrada međukatne su se konstrukcije izvodile kao drveni fleksibilni sustavi, dok je kasnije uvedena izvedba krutih međukatnih konstrukcija uz uporabu horizontalnih serklaža iznad nosivih zidova debljine jednake debljini zidova, a visine 25 do 35 cm. Pojačanje takvih konstrukcija može se postići izvedbom vertikalnih serklaža na spojevima zidova iz ortogonalnih smjerova i unutar samih zidova, ako su ti zidovi velike duljine (primjerice, svakih 5 m). Takvim omeđivanjem zida armiranobetonskim elementima u horizontalnom i vertikalnom smjeru znatno se poboljšava sposobnost deformiranja zida. Krhki i neduktilni zid postaje duktilnijim i znatno mu se povećava nosivost. Treba napomenuti da se ponašanje omeđenih zidova znatno razlikuje od ponašanja okvirnih konstrukcija s ispunskim zidom. Taj je postupak prikladan za zidane zgrade bez vertikalnih serklaža, ali s betonskim međukatnim pločama. Radi se o zgradama iz sredine i druge polovice prošloga stoljeća sa sitnorebričastim stropovima ili drugim polumontažnim betonskim stropnim sustavom koji ima značajan nesrazmjer protupotresnoga kapaciteta u horizontalnim ravninama u usporedbi s nosivošću zidova. Takvo pojačanje ugradnjom vertikalnih serklaža znatno povećava nosivost posmičnih zidova. Tehnološki je bitno spoj sa zidom izvesti "vezom na zub". Međutim, kod zgrada s drvenim grednicima ta tehnika pojačanja načelno nije poželjna zbog niske kvalitete opečnoga dijela zida te nekompatibilnosti materijala i sustava. Taj postupak pojačanja zidova može se kombinirati s ostalim postupcima pojačanja, kao što su izvedba obloga zidova ili dodavanje novih posmičnih zidova ako ih nema dovoljno.

Tehnologija izvedbe

Izvedba serklaža radi pojačanja započinje na najnižem katu i napreduje prema vrhu zgrade te obično obuhvaća uklanjanje opeke tako da kontaktna zona između novoga armiranobetonskog serklaža i postojećih zidova bude na zub (slika G.25). Ako postoje horizontalni serklaži na razini međukatnih konstrukcija, treba ukloniti postojeći beton i ostaviti samo armaturu. Dio zida u katu iznad također treba ukloniti kako bi se armatura vertikalnih serklaža prikladno nastavljala i usidrla u zid iznad. Poželjno je na mjestu novoga vertikalnog serklaža izvesti novu temeljnu stopu koja će sidrima biti povezana s postojećim temeljnim sustavom. Slijedi postavljanje armature i oplata na slobodnim krajevima budućega serklaža, a površina se zida čisti i navlažuje vodom.



Slika G.25. Detalj izvedbe novih vertikalnih serklaža

Pri projektiranju treba uzeti u obzir da vertikalni serklaži ne smiju biti širi od postojećeg zida i da se u njih treba ugraditi dovoljna količina armature za preuzimanje vlačnih sila od momenata te poprečne sile zida. Također, serklaži trebaju biti raspoređeni tako da je omjer duljine i visine zida između dva serklaža manji od 2:1. Postojeći horizontalni serklaži najčešće se ne pojačavaju, no ako je potrebno, izvodi se popravak oštećenja (primjerice, iznad otvora). Ugradnja betona u vertikalne serklaže izvodi se s gornje međukatne konstrukcije. Betoniranje spojeva vertikalnih i horizontalnih serklaža radi se u zadnjoj fazi popravka i pojačanja toga kata. Prvo se popravljaju pukotine, a zatim slijedi bilo kakav potrební popravak onih mjesta na kojima je došlo do drobljenja ili loma.

3.9. Pojačanje zidova ovijanjem čeličnim profilima

Pojačanje opečnih zidova i stupova može se izvesti ovijanjem čeličnim profilima, pogotovo ako treba hitno napraviti pojačanje. Čelični profili moraju se povezati sa serklažima i horizontalnim dijafragmama na dnu i na vrhu zida/stupa. Na taj način postiže se povećanje osne nosivosti, savojne nosivosti izvan ravnine, nosivosti okomito na ravninu te povezivanje s horizontalnim dijafragmama. Prednost je vanjskoga sustava za vezivanje reverzibilnost i to što je dio onih zaštitnih intervencija kojima nije cilj mijenjati postojeći nosivi sustav i izvorno ponašanje konstrukcije.

Sustav se sastoji od prikladno raspoređenih čeličnih profila koji se smještaju u području kritičnih presjeka, to jest na mjesta gdje su se već pojavile pukotine ili ih se uskoro može očekivati. Najčešće se radi o ravnim profilima koji su međusobno povezani zavarom ili spojnim sredstvima. Može se primijeniti na okruglim, ali i na pravokutnim presjecima.

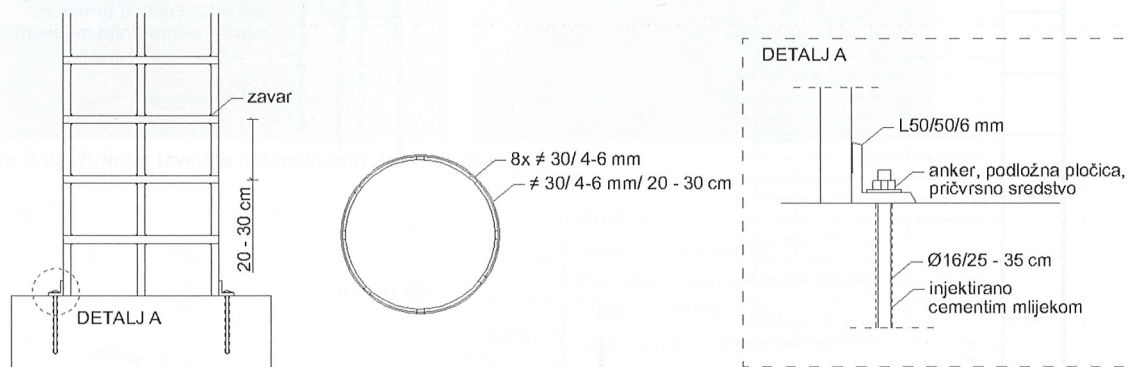
Tehnologija izvedbe stupova

Prije ovijanja stupa treba ukloniti postojeću završnu oblogu te prema potrebi provesti djelomičnu zamjenu morta u sljubnicama (vidjeti poglavlje 3.3) i/ili injektiranje (vidjeti poglavlje 3.5).

Na mjestima postavljanja vertikalnih čeličnih traka za stupove kružnoga presjeka (slika G.26) podloga se prije ovijanja čeličnim profilima priprema mortom na bazi hidrauličnoga vapna ili pucolanskoga cementa. Za stupove pravokutnog presjeka umjesto vertikalnih čeličnih traka postavljaju se kutnici.

Postavljeni čelični profili sidre se u temelj stupa i stropnu konstrukciju, a duljina sidrenja određuje se proračunom. Mjesta sidrenja pripremaju se bušenjem rupa. Nakon bušenja rupe se ispuhuju zrakom pod pritiskom. Vertikalne čelične trake sidre se u temelj stupa i stropnu ploču sredstvom za kemijsko sidrenje i spojnim priborom (sidro, podložna pločica i matica).

Oko prethodno postavljenih vertikalnih profila i/ili kutnika postavljaju se čelične trake koje čine obroč i koje se povezuju u cjelinu zavarivanjem. Ako je potrebna završna obrada žbukanjem, može se očekivati odvajanje žbuke s čeličnih površina. Radi boljega prijanjanja izvodi se jedan sloj vapneno-cementne ili druge žbuke, postavlja se rabić pletivo i potom završni sloj žbuke. Svi čelični profili trebaju biti zaštićeni od korozije ili izrađeni od nehrđajućeg čelika.



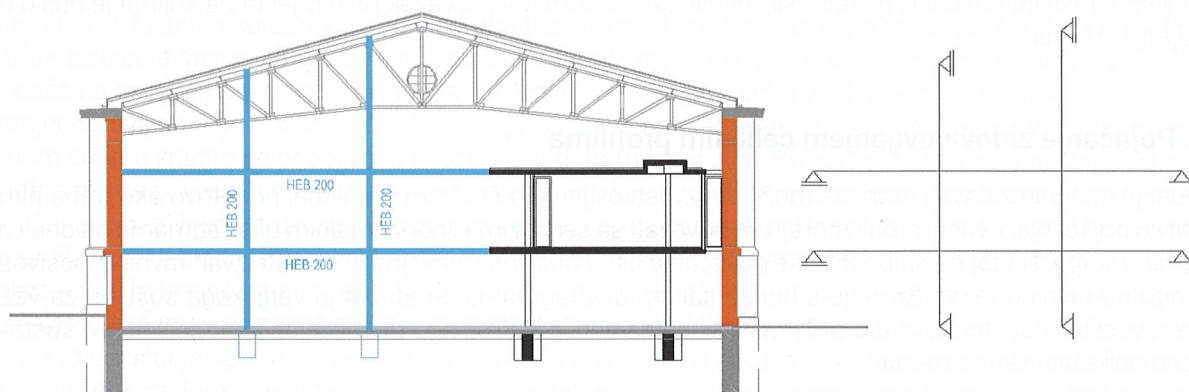
Slika G.26. Detalj pojačanja stupa kružnoga presjeka čeličnim profilima

Tehnologija izvedbe zidova

Na zidu se prvo uklanja završna obloga te se pukotine u zidu popravljaju prethodno opisanim postupcima (vidjeti poglavlja 3.2, 3.4, 3.5). Prema potrebi, moguće je provesti djelomičnu zamjenu morta u sljubnicama (vidjeti poglavlje 3.3).

Čelični se profili sidre u temelje samce u dnu zidnoga elementa te povezuju s međukatnim ili krovnim (ako se radi o zadnjemu katu) konstrukcijama na svakom kraju primjenom prikladnih sidara ili pasica, ovisno o slučaju. Priprema i izvođenje temelja prikazani su u poglavlju 3.11.1.

Čelični se presjeci oblikuju na različite načine, ovisno o slučaju. Postavljaju se po cijeloj visini samo jednoga ili oba lica zida te se povezuju međusobno ili s podlogom vijcima kroz zid i pričvršćuju podložnim pločicama ili rozetama i maticama na suprotnoj strani zida. Prije postavljanja čeličnih presjeka poželjno je u njima prethodno izbušiti rupe za povezivanje.



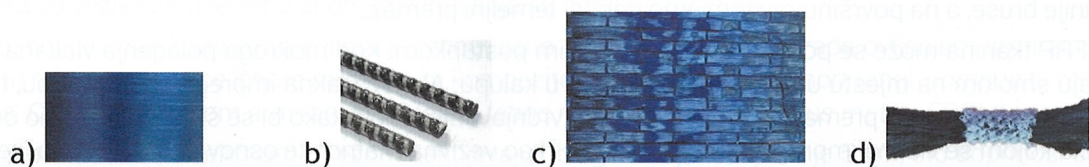
Slika G.27. Ukrućivanje zida izvan ravnine čeličnom konstrukcijom

Površina zida na mjestima postavljanja čeličnih profila priprema se mortom na bazi hidrauličnoga vapna ili veziva s pucolanskim djelovanjem kako bi se osiguralo jednoliko nalijeganje. Rupe za prihvat čeličnih nosača buše se kroz sljubnice. Nakon bušenja rupe se ispuhaju zrakom te se čelični profili postavljaju na prethodno pripremljena mjesta i međusobno povezuju. Čelični profili trebaju biti zaštićeni od korozije ili izrađeni od nehrđajućega čelika. Na slici G.27 dan je prikaz bočno nestabilnoga zidanog opečnog zabatnog zida koji je tijekom seizmičke rekonstrukcije ukrućen izvan ravnine ugradnjom paralelnoga čeličnog roštilja greda i stupova kontinuirano prihvaćenoga za zid i bočno oslonjenoga na rubne krute točke.

3.10. Pojačanje zidanih zgrada oblogama od vlaknima armiranih polimera

Vlaknima armirani polimeri (engl. *fibre reinforced polymer, FRP*) kompozitni su materijali sastavljeni od matrice i vlakana koji posljednjih godina pronalaze svoju primjenu u sanaciji i pojačanju zidanih građevina. Matrica je najčešće epoksidna, nezasićena poliesterska i vinilesterska smola, dok su vlakna staklena (engl. *glass, G*), aramidna (engl. *aramid, A*) i ugljična (engl. *carbon, C*). Matrica povezuje i štiti vlakna te preuzima i raspodjeljuje vanjsko opterećenje čineći tako kompozit velike čvrstoće i modula elastičnosti. Uobičajena uloga FRP sustava prijenos je vlačnih naprezanja unutar konstrukcijskoga elementa i između različitih konstrukcijskih elemenata konstrukcije.

Osnovna je podjela FRP-a na trake (lamele), šipke, užad i tkanine (slika G.28). Trake ili lamele izrađuju se od vlakana debljine 0,01 do 0,10 mm i širine do 200 mm. Mogu preuzeti opterećenja samo u uzdužnom smjeru. Šipke se ne lijepe na površinu elementa, već se polažu u izdubljene utore koji se kasnije zapunjavaju epoksidnom smolom ili mortom kako bi se ostvarila što bolja prionjivost između podloge i FRP šipke. Nakon ugradnje šipaka površinu pojačanoga elementa treba dodatno zaravnati. Tehnologija izvedbe opisana je u poglavlju armiranje sljubnica (vidjeti poglavlje 3.4). Užad se upotrebljava za međusobno povezivanje i sidrenje mreža i tkanina na licima zida. Ugrađuje se u prethodno izbušene otvore i preklapa širenjem niti i fiksiranjem ljepilom po licu zida. Tkanine mogu biti od aramidnih, staklenih ili ugljičnih vlakana debljine do 0,10 mm i najčešće širine 200 do 1000 mm. Na mjestu ugradnje impregniraju se polimernom smolom koja služi i kao vezivo i kao sredstvo za lijepljenje na podlogu. Budući da se mogu ugraditi u debljini postojećih slojeva, FRP tkanine se najviše rabe kod pojačanja zidanih građevina radi povećanja nosivosti zidova i protiv udarnih opterećenja.



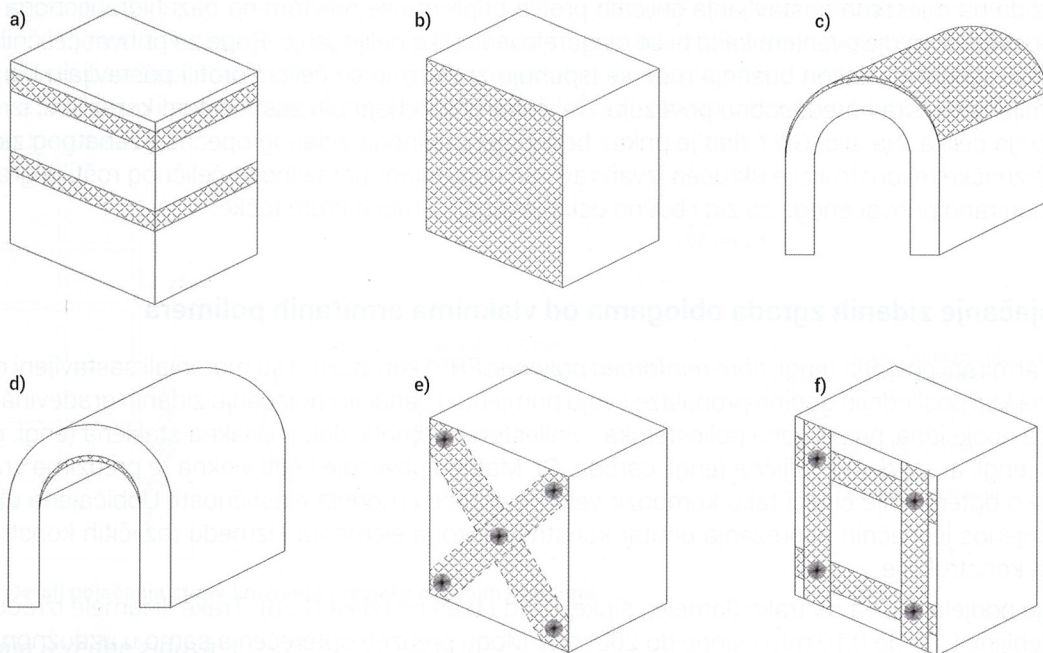
Slika G.28. Podjela FRP sustava: a) trake (lamele); b) šipke; c) tkanina; d) užad

FRP sustavi posebno su prikladni za omatanje zgrada na podnim i krovim područjima te za povezivanje zidova lijepljenjem tkanina samo s vanjske strane ili obostrano (slika G.29 a). Zatim, doprinose povećanju kapaciteta nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu postavljanjem tkanine ili šipaka u vertikalnom smjeru segmentno ili po cijeloj površini (slika G.29 b). Kod zidanih lukova dovoljno je pojačati samo intrados ili ekstrados FRP tkaninama, dok je za svodove preporuka pojačanje s obje strane (slika G.29 c i slika G.29 d). Kod posmičnoga sloma klizanjem FRP tkanina se postavlja dijagonalno preko klizne plohe uz dodatno vertikalno postavljene trake na rubovima zida (slika G.29 e). Zid se također može pojačati horizontalnim i vertikalnim trakama (slika G.29 f). FRP tkanine se uz to rabe za ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti te pojačavanje i povezivanje pregradnih zidova i zidova ispune.

FRP sustavi imaju mnogo prednosti, poput visoke vlačne čvrstoće, male vlastite težine, jednostavne primjene i dobre otpornosti na koroziju, što ih čini vrlo atraktivnim materijalom. Ipak, postoje određena ograničenja koja mogu negativno utjecati na njihovu primjenu. Primjerice, učinkovitost FRP-a drastično se umanjuje zbog djelovanja visokih temperatura, ne mogu se aplicirati na vlažne površine i pri niskim temperaturama, a posebice treba istaknuti njihovo neduktilno ponašanje (linearno elastično ponašanje do sloma). Dodatno, radi se o nereverzibilnoj metodi budući da se lamele i tkanine lijepe epoksidnom smolom neposredno na zidove.

Tehnologija izvedbe

Priprema površine započinje uklanjanjem oštećenih dijelova do zdrave, kompaktne i čvrste podloge kako ne bi došlo do odvajanja sustava pojačanja. Treba ukloniti oštećeni mort iz sljubnica, posebno područja gdje je zabilježena eflorescencija, prašina ili plijesan. Prije nanošenja sustava provodi se na mjestima gdje je to potrebno zamjena morta u sljubnicama (vidjeti poglavlje 3.3) te konsolidacija u slučaju rastresenoga zida i/ili pukotina (vidjeti poglavlje 3.5).



Slika G.29. Mogućnosti primjene FRP sustava za pojačanje zidanih konstrukcija

Površina mora biti suha, čista, bez mrlja i masti te ravna i mehanički dovoljno čvrsta. Površina se priprema ručnim i/ili mehaničkim alatima i vodom pod niskim pritiskom. Nikako se ne preporuča primjena pjeskarenja s abrazivima. Nakon tretiranja vodenim mlazom treba pričekati da se površina osuši prije ugradnje FRP sustava te zrakom ukloniti prašinu s površina. Površinu treba zaštititi do postavljanja FRP sustava da ne bi došlo do taloženja nečistoća na površinu prijanjanja. Preporuča se sustav FRP nanijeti u roku od 72 sata od pripreme površine. Temperatura površine ne smije biti manja od 5°C. Površinska vlažnost podloge ne smije prelaziti 4 %, dok temperatura pri izvođenju mora biti barem 10°C. Kod površinskih oštećenja, oštećenja treba sanirati mortom kako bi površina bila ravna. Nakon očvršćivanja mase za izravnavanje grubi se rubovi ili gleterske linije bruse, a na površinu ravnomjerno nanosi temeljni premaz.

Sustav FRP tkanina može se polagati suhim ili mokrim postupkom. Kod mokroga polaganja vlakana se impregniraju smolom na mjestu ugradnje ili po potrebi u kalupu. Ako se vlakna impregniraju u kalupu, tada se prethodno kalup namaže premazom koji sprečava stvrdnjavanje smole kako bi se što lakše odvojio od kalupa. Smola kojom se vlakna impregniraju ujedno služi i kao vezivna matrica te osnovno sredstvo za lijepljenje na podlogu. Na taj se način FRP sustavi umrežavaju i očvršćuju na mjestu ugradnje. FRP tkanina impregnirana smolom direktno se nanosi na temeljni premaz kako bi se ostvarila bolja prionjivost. Pri odabiru sustava ojačanoga u dva smjera ili više njih treba uzeti u obzir da je prilikom postavljanja potrebno isključivo rabiti zasićene smole. Nakon ugradnje tkanina površinu treba posipati kvarcnim pijeskom.

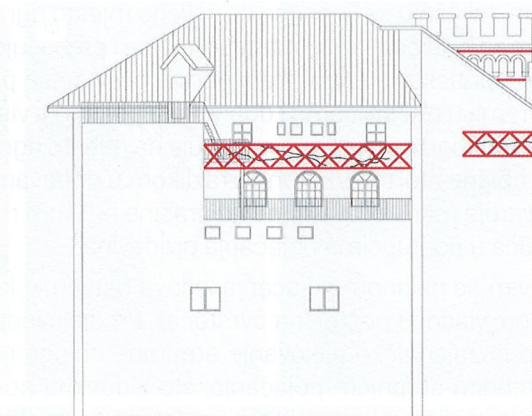
FRP sustavi za suhu montažu lijepe se na površinu konstantnim pritiskom po cijeloj površini. Odabir adhezijskoga sredstva kojim će se učvrstiti na površinu od velike je važnosti; ono utječe na ostvarivanje kvalitetne veze FRP-a i podloge koja se pojačava kako bi se izvršio pravilan prijenos opterećenja između elemenata. Pri odabiru ljepila posebnu pozornost treba posvetiti kompatibilnosti ljepila i FRP-a. Na svježe nanoseni temeljni premaz postavlja se tkanina koja se valjkom utiskuje u podlogu. Dodatna smola nanosi se valjkom sve do potpune zasićenosti tkanine. Nakon postavljanja prvoga sloja može se istim postupkom nastaviti ugradnja traka, sloj po sloj do željene debljine. Nakon ugradnje tkanina površina se posipa kvarcnim pijeskom.

Sustav za pojačanje se pomoću FRP užadi povezuje s podlogom. Postupak sidrenja zahtijeva pripremu mjesta sidrenja bušenjem te ispuhivanjem, nakon čega se FRP užad reže na prikladnu duljinu uzimajući u obzir dubinu sidrenja i dio koji se širi na površini зида. Dio užadi koji se sidri u zid impregnira se u epoksidnoj smoli te se površina zasićuje kvarcnim pijeskom. Nakon 24 sata, kad smola očvrsne, užad je spremna za primjenu. Nakon što je sustav pojačanja očvrsnuo, u pripremljene rupe injektira se smjesa za kemijsko sidrenje. Kruti dio pripremljene užadi utiskuje se u rupu, dok se površinski dio poput lepeze širi po površini зида i obrađuje dvokomponentnom epoksidnom smjesom. Površina se zaštićuje kvarcnim pijeskom.

Nakon izvedbe FRP sustav treba zaštititi neovisno o tome je li izveden s unutarnje ili s vanjske strane objekta. FRP spada u UV nestabilne materijale koji nisu otporni na požar [3] te u slučaju djelovanja visokih temperatura nezaštićeni FRP sustav u potpunosti gubi svoja svojstva. Nadalje, može doći do pojave gorućih kapajućih čestica, ali i pojave toksičnoga dima. Također, FRP sustav može doprinijeti širenju požara, pa je protupožarna zaštita FRP sustava, posebice u zgradama, od ključne važnosti. Danas se najčešće upotrebljavaju vatrootporne gipskartonske ploče koje zadovoljavaju estetske uvjete, a uz to se jednostavno postavljaju. Kao alternativa oblaganju može se primijeniti sustav bojanja vatrootpornim bojama i protupožarnim premazima.

Zaštita se postiže nanošenjem akrilne ili poliuretanske boje unutar 72 sata od apliciranja sustava, dok je smola još uvijek ljepljiva na dodir. Ako se zaštita radi naknadno, kad je smola već otvrdnula, treba površinu prvo dobro očetkati kako bi se osigurala prionjivost boje na podlogu. Obično se rabe bijela ili blijedo siva boja koje upijaju znatno manju količinu topline. Primjer pojačanja zida FRP trakama na mjestu horizontalnih pukotina prikazan je na slici G.30, dok se primjer proračuna daje u poglavlju 6.4. Preporuke za projektiranje i izvođenje sustava vanjskih pojačanja primjenom FRP sustava za zidane konstrukcije mogu se naći u sklopu dokumenata:

- a) ACI 440.2R-08: "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", 2008 [ACI 440.2R-08],
- b) ISIS Design Manual No. 4: "FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures" [ISIS Canada Corporation 2008],
- c) CNR-DT 200R1/2013 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, 2013 [CNR-DT 200R1].



Slika G.30. Pojačanje zida FRP trakama na mjestu horizontalnih pukotina

3.11. Pojačanje zidanih zgrada ovijanjem armiranim oblogama

Sve veća potreba za naknadnim pojačanjem postojećih građevina ovijanjem doprinosi kontinuiranom razvoju metoda za pojačanje. Među prvim metodama svakako je bilo pojačanje zidanih zgrada oblogama od vlakni armiranih polimera. Međutim, zbog upotrebe polimernih (organskih) ljepila, FRP kompoziti nisu kompatibilni sa zidanim podlogama i spadaju u nereverzibilne metode. Radi bolje kompatibilnosti s podlogom organska su veziva zamijenjena anorganskima koja se armiraju mrežom.

Tri su osnovne vrste kompozita kojima je omogućeno pojačanje zidanih zgrada ovijanjem armiranim oblogama: a) mlazni mort s čeličnom mrežom, b) kompozitom armirani mlazni mort (engl. *composite reinforced mortars*, CRM), c) tekstilom armirani mort (engl. *fabric reinforced cementitious matrix*, FRCM).

Tradicionalni sustavi s čeličnom mrežom zahtijevaju obloge debljine najmanje 5 cm, što doprinosi dodatnoj težini konstrukcije. Istodobno, radi se o sustavu niske kompatibilnosti sa zidanom konstrukcijom uz značajan rizik od razvoja korozije čelične armature.

Kompozitom armirani mort čini sličan sustav pojačanja u kojem je čelična mreža zamijenjena mrežom od staklenih vlakana potpuno impregniranih u epoksidnoj smoli kako bi se dobila dvodimenzionalna kruta mreža. Primjenjuje se učvršćivanjem mreže na površinu zida pomoću L-sidra, a zatim se mort nanosi prskanjem. Otvor mreže veći je u odnosu na FRCM mreže i iznosi najmanje 3 cm, dok je debljina matrice do 5 cm.

U FRCM kompozitima tekstilna armatura izrađena je od različitih vlakana visoke čvrstoće, poput ugljičnih, staklenih, bazaltnih i drugih, dok je matrica na bazi hidrauličnoga vapna ili pucolanskih cemenata, a može se upotrijebiti i geopolimerna matrica. Radi bolje adhezije s matricom vlakna su obično impregnirana organskim premazima, što dodatno doprinosi i trajnosti vlakana. FRCM kompoziti omogućavaju jednaku razinu pojačanja kao prethodni sustavi uz znatno manje debljine obloge. Uobičajeno se FRCM izvodi u debljini do 1,5 cm.

3.11.1. Pojačanje zidanih zgrada armiranobetonskim oblogama

Taj tip pojačanja zida uglavnom se primjenjuje u slučajevima djelovanja značajnih horizontalnih opterećenja. Metoda se sastoji u pojačanju elemenata konstrukcije pomoću mlaznoga ili torkret betona u kombinaciji s prethodno postavljenom armaturom s jedne ili obje strane zida [HRN EN 1998-3]. Obloga je armirana zavarenim mrežama ili čeličnim šipkama, a dva sloja obloge postavljene na suprotnim licima zida povezuju se kroz zid poprečnim sponama. Obloge postavljene samo na jednom licu sa zidom se povezuju utorima ili sidrima. Debljina torkreta uobičajeno je 5 do 6 cm, a može biti i do 8 cm za deblje masivne zidove.

Zbog jednostavne izvedbe i iznimne učinkovitosti metoda se upotrebljava širom svijeta za pojačanje zidanih konstrukcija kod kojih je dopušteno povećanje presjeka. Cilj je tehnike povezati različite slojeve zida, to jest stvoriti novi presjek. Ideja je imati deblji presjek kako bi se povećale tlačna, vlačna i posmična čvrstoća te duktilnost. Postoje dva postupka nanošenja mlaznoga betona: suhi i mokri postupak. Kod suhog postupka komponente (cement i agregat) unose pomoću mlaznice te se kroz drugu cijev dodaje i raspršuje voda pod priti-

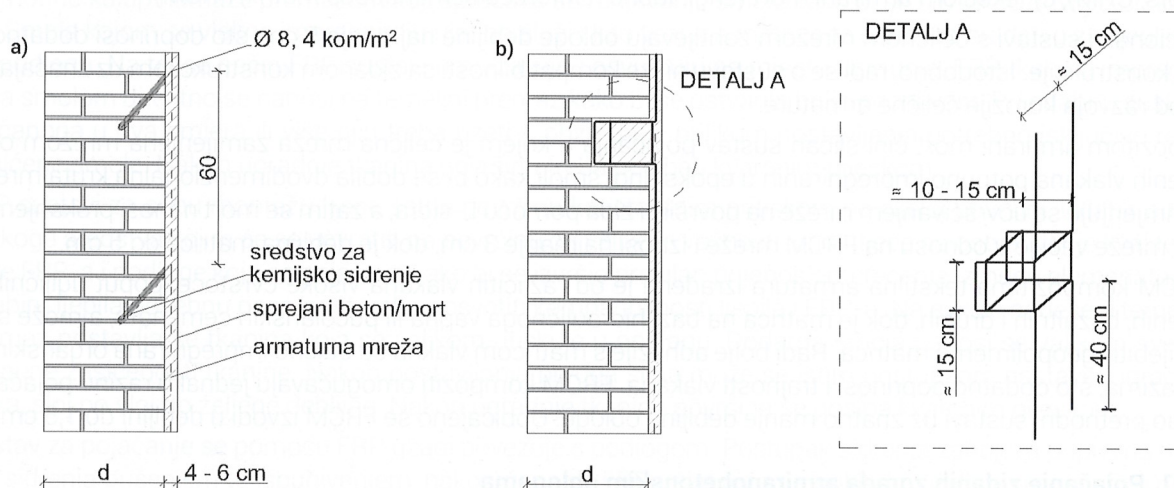
skom, miješaju se i nanose na željeno mjesto ugradnje. Suha smjesa priprema se na klasičan način u mješalicama za običan beton, transportira se i prebacuje u posudu iz koje pomoću posebnoga uređaja gravitacijom ili pod pritiskom ulazi u transportne cijevi te se priprema za uporabu. Kod mokroga postupka mješavina se priprema u mješalicama i doprema u posudu s visokim pritiskom iz koje se gura u cijevi pomoću kompresora koji transportira i na kraju nabacuje na mjesto ugradnje. Za izradu torkreta upotrebljavaju se isti materijali kao i za obične mortove/betone s razlikom u dodavanju ubrzivača vezivanja. Torkret izveden mokrim postupkom ostvaruje manji odskok, manje prašine prilikom rada i bolju adheziju s podlogom, te se uobičajeno rabi i preporuča u postupcima pojačanja građevina.

Takvim se načinom pojačanja zidova ostvaruje kompozit s poboljšanim mehaničkim svojstvima (povećana tlačna, vlačna i posmična čvrstoća). Pri djelovanju opterećenja na tako izvedeni kompozitni element osigurano je zajedničko djelovanje armirane obloge i postojećega zida. Debljina obloge predviđa se u skladu s potrebnim stupnjem pojačanja, što zidovima povećava težinu, pa su proračunski postupci složeniji, jer se vrše iteracijama krutosti i težine dok se ne postigne zadovoljavajući rezultat, što često zahtijeva i pojačanje temelja.

Tehnologija izvedbe

Prije postavljanja armaturne mreže treba ukloniti žbuku. Mort se uklanja iz sljubnica u dubini od 10 do 15 mm, a eventualne pukotine u zidu injektiraju. Sve oštećene površine moraju se ukloniti. Površinu zida treba očistiti, navlažiti vodom i poprskati cementnim mlijekom. Ponekad se zahtijeva i mjestimično hrapavljenje spojnih površina kako bi se ostvarila bolja veza s mortom.

Nakon toga se nanosi prvi sloj cementnoga morta u debljini od 20 do 30 mm i tlačne čvrstoće 20 do 30 MPa. Torkretiranje se izvodi od dna prema vrhu, a otpadni se materijal ne smije ponovno upotrijebiti, već se odmah uklanja. Slojevi torketa se oblikuju prelaskom mlaznice pod pritiskom do debljine predviđene projektom. Potom se postavlja armaturna mreža s jedne ili obje strane zida i povezuje čeličnim sidrima ili sponama koje su prethodno ugrađene u postojeći zid (slika G.31 a). Kod jednostrane obloge, kako bi se osiguralo zajedničko djelovanje zida i armiranobetonske obloge, umjesto sidara može se izvesti i posmični trn u zidu (slika G.31 b). Sidra su čelične šipke minimalnoga promjera $\Phi 6$ do 8 mm koje se postavljaju u količini od 4 do 6 komada po m^2 površine zida. Postavljaju se u prethodno pripremljene rupe i učvršćuju sredstvom za kemijsko sidrenje. Nakon povezivanja armaturne mreže sa sidrima izvodi se drugi sloj betona tako da ukupna debljina ne prelazi 60 do 80 mm (slika G.32). Primjer izvođenja prikazan je na slici G.32, a detalji proračuna prikazani su u poglavlju 6.2



Slika G.31. Detalj sidrenja armaturne mreže: a) sidrima; b) posmični trn

Prilikom izvođenja radova vrlo je važna vještina i iskustvo radnika u pravilnoj uporabi opreme i izvedbi mlaznoga betona. Prije uporabe radnici trebaju provjeriti crijeva pod pritiskom kao i sve spojeve i ispravnost svih dijelova kompletne opreme. Prilikom torkretiranja mlaznica se mora držati usmjerena na podlogu i na udaljenosti od 60 do 100 cm. Kontrola je kvalitete proizvodnje torkreta neophodna. Učestalost ispitivanja svojstava torkreta posebno se propisuje programom kontrole kvalitete koji je sastavni dio projekta.



Slika G.32. Primjer pojačanja zidova torkretiranjem: a) postavljena armatura; b) sidrenje i povezivanje s Q mrežom; c) prvi sloj torkreta; d) drugi sloj torkreta

Proširenje temelja

Opisuje se primjer proširenja temelja radi sidrenja nove betonske obloge kojom se povezuje konstrukcija (slike G.33 i G.34).

Pojačanje temelja započinje iskopom u nagibu 1:3 ručnim alatima ili strojem u cijeloj duljini temelja koji se pojačava. Širina iskopa u dnu rova treba biti 30 do 40 cm veća od novoga temelja. Nakon iskopa treba ukloniti žbuku sa zida u području izvedbe pojačanja. Nakon uklanjanja žbuku treba odvesti na odlagalište i očistiti područje iskopa radi izvedbe podložnoga betona. U širini novoga temelja izvodi se podložni beton (C12/15 i drugi) debljine do 10 cm.

Radi povezivanja s postojećim temeljem buše se rupe pod kutom od 45 stupnjeva za postavljanje sidara. Promjer rupe treba biti veći od promjera čeličnoga sidra kako bi se osigurao spoj kemijskom vezom. Dubina bušenja rupe za postavljanje čeličnoga sidra najčešće se izvodi do 2/3 širine postojećega temelja. Nakon pripreme rupe se ispuhuju zrakom te se čelična sidra ugrađuju u rupu i povezuju sredstvom za kemijsko sidrenje. Duljina sidra izvan temelja treba biti dostatna za povezivanje s armaturnim košem novoga temelja.

Armaturni koš postavlja se na podložni beton i povezuje sa sidrima u postojećem temelju. Raspored sidara za povezivanje najčešće se izvodi u razmaku od 30 cm. Ako se sidra izvode u dva ili više redova, svaki sljedeći red izvodi se s izmakom od 15 cm u odnosu na prethodni. Prije betoniranja temelja postavlja se prvi red Q mreže za torkret pričvršćene za nosivi zid s najmanje 4 sidra po m² i povezuje s armaturom novoga temelja. Nakon postavljanja armaturne mreže postavlja se jednostrana drvena oplata i provodi betoniranje novoga temelja (C25/30 ili više, D_{max} = 16 mm, S4). Nakon betoniranja postavljena se drvena oplata uklanja te se nastavlja s izolaterskim radovima.

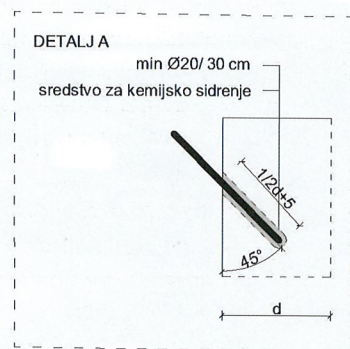
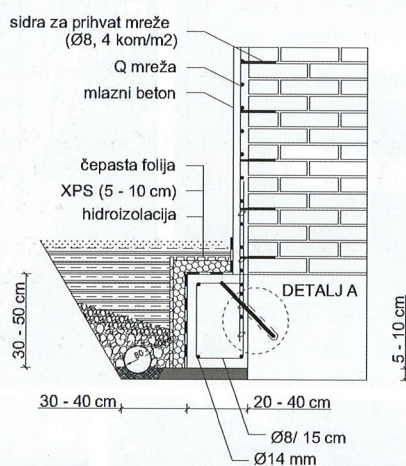
Na bočnu površinu novih temelja postavlja se novi sloj hidroizolacije. Hidroizolacijska traka ugrađuje se na bočnu stranu temelja postupkom zavarivanja otvorenim plamenom. Hidroizolacijska se traka zagrijava na poleđini otvorenim plamenom dok se ne otopi PE sloj i bitumenska masa, uz konstantno odmatanje. Hidroizolacijska se traka treba uporabom valjka ili teške četke čvrsto pritisnuti na podlogu kako bi se izbjeglo zahvaćanje zraka. Ugrađena hidroizolacijska traka treba imati dovoljne bočne (100 mm) i čeone preklape (150 mm). Na postavljenu hidroizolaciju postavljaju se XPS ploče od podnožja u debljini od 10 cm. XPS ploče lijepe se pomoću bitumenskoga hladnog ljepljiva metodom potpunoga pokrivnoga prekrivanja. Na XPS ploče postavlja se čepasta folija za zaštitu od nasipnoga materijala.

Ako treba, u iskopane se kanale polažu drenažni sloj granulacije 16/32 mm i geotekstil, a na njega drenažne PVC cijevi (Φ80 - 160 mm ili sl) u nagibu. Drenažna cijev polaže se na udaljenosti od 0,5 m od zidova objekta, na dubini temelja, u kanal koji mora biti nešto dublji od krajnjega donjeg ruba temelja. Preporuča se da nagib kanala bude oko 2 % kako bi se osigurao neometan protok vode. Nakon toga se sve umota u geotekstilnu tkaninu; njezini rubovi moraju biti povezani preklapanjem.

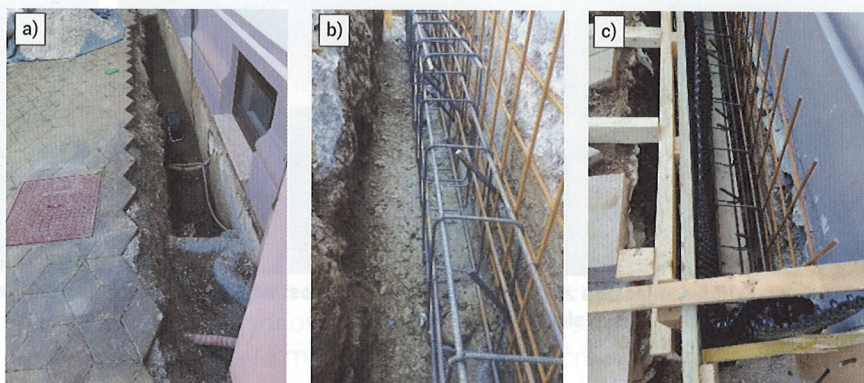
Cijev se potom zatrpa separiranim kamenom granulacijom 32/64 mm te šljunkovitim materijalom. Na sve uglove građevine postavljaju se otvori – revizijski ili za čišćenje. Voda iz drenažne cijevi spaja se na postojeću oborinsku odvodnju.

Zatrpavanje se vrši u slojevima od 30 cm uz sva potrebna strojna zbijanja nasipnoga materijala ili materijala iz iskopa te treba postići zbijenost uređenoga završnog sloja od 60 N/mm² mjereno kružnom pločom $\Phi 300$ mm kako bi se spriječilo slijeganje terena uz konstrukciju.

Potrebno je naglasiti da je Italija u skladu s odlukom Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale od 12. listopada 2007. godine ovaj način pojačanja proglasila invazivnim i u suprotnosti s načelima očuvanja postojećih zidanih građevina te se on više ne primjenjuje u obnovi kulturne baštine. Iako zbog svoje ireverzibilnosti s pravom proglašena nepoželjnom u obnovi spomeničke baštine, ovo do danas ostaje jedna od najčešće upotrebljivanih metoda pojačanja zidanih zidova, kamenih i opečnih. Ispravno izvedena, s dostatnim sidrenjem u osnovni zid i uredno izvedenim zaštitnim slojevima, torkretna obloga znatno povećava otpornost građevine na potresno opterećenje. Stoga se u svakodnevnoj primjeni ova metoda može rabiti, posebno kod stambenih zgrada veće katnosti i bez konzervatorske zaštite.



Slika G.33. Detalj proširenja temelja za sidrenje armaturne mreže nove betonske obloge



Slika G.34. Primjere izrade proširenja temelja na obiteljskoj kući u Zagrebu tijekom potresne obnove

3.11.2. Pojačanje zidanih zgrada tkaninom armiranim mortom

Negativna iskustva s FRP-om, uglavnom vezana uz epoksidnu matricu, utjecala su na razvoj materijala u kojima se organska matrica zamjenjuje anorganskim materijalom. Drugu generaciju kompozita za vanjsko pojačanje konstrukcija čine tkaninom armirane cementne matrice (engl. *fabric reinforced cementitious matrix, FRCM*) s jedne ili s obje strane zida i usidrene u zidove [HRN EN 1998-3, 2011]. U literaturi je FRCM poznat i pod nazivom tekstilom armirani beton (engl. *textile reinforced concrete, TRC*) ili tekstilom armirani mort (engl. *textile reinforced mortar, TRM*). U tekstu će se ta vrsta pojačanja opisivati kraticom FRCM.

FRCM čine mreže sačinjene od snopova vlakana u najmanje 2, najčešće međusobno okomita, smjera i anorganske matrice, a veza matrice i vlakana ostvaruje se mehaničkim uklinjavanjem, odnosno "impregnacijom" morta kroz otvore u mreži vlakana. U FRCM kompozitnim sustavima, u odnosu na FRP, rabe se tkanine s većim oknima mreže. "Zatvorene" tkanine, poput onih kod FRP-a, nisu prikladne za ovu namjenu, jer anorganska matrica ne može "impregnirati" vlakna. Otvorena struktura FRCM mreža osigurava veće područje prionjivosti potrebno da se osigura kompozitno djelovanje matrice i mreže. Zbog brzine izvedbe, ova je vrsta materijala posebno pogodna za primjenu kod potresom oštećenih zidanih građevina.

Mreže su proizvedene od ugljičnih, alkalnootpornih staklenih, bazaltnih, polimernih (uglavnom PBO) i hibridnih vlakana. Vlakna su impregnirana smolom radi unapređenja veze s matricom, produljene trajnosti i odgovarajućega prijenosa opterećenja. Funkcija mreže preuzimanje je vlačnih naprezanja, dok je uloga matrice obavijanje i zaštita mreže te prijenos opterećenja s podložnoga zida na vlakna. Prijenos naprezanja postiže se vezom podloge i vlakana te mehaničkim uklinjavanjem matrice i mreže. Sastav matrice ključan je za ponašanje FRCM sustava. Matrica (mort) može biti na bazi hidrauličnoga vapna ili pucolanskoga cementa. Pijesak, frakcije do 0,5 mm, rabi se radi bolje prionjivosti tkanine i matrice, a matrica je uglavnom mikroarmirana sitnim polimernim vlaknima radi smanjenoga plastičnog skupljanja. Važno je osigurati postupni gubitak obradivosti kako bi se omogućilo višeslojno armiranje.

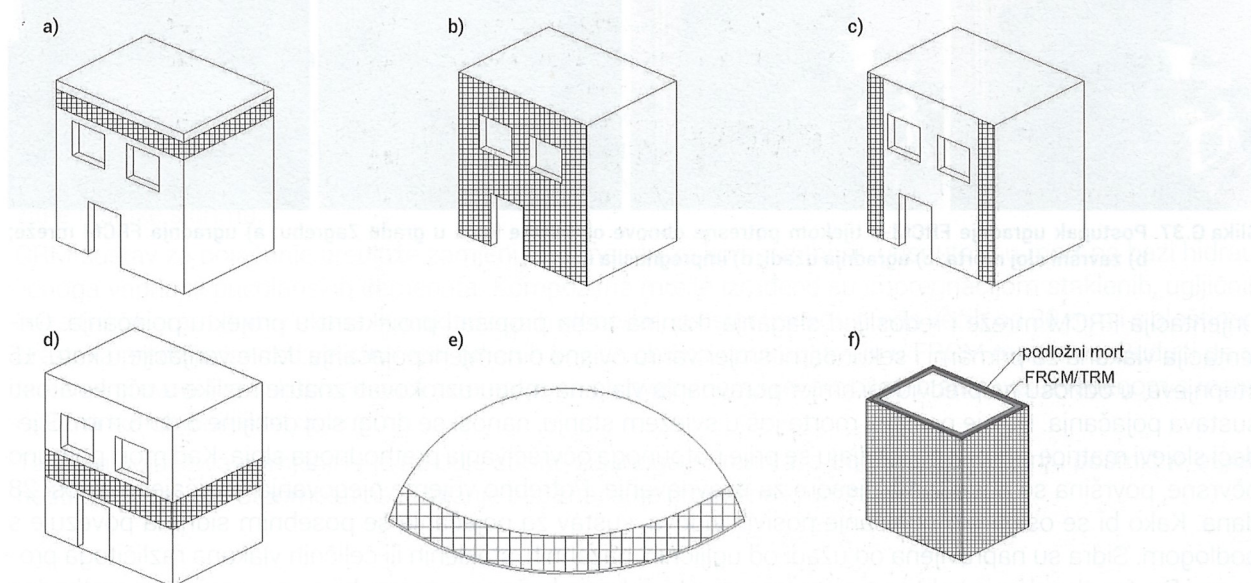
Osnovni cilj pojačanja zidanih zgrada FRCM-om povećanje je nosivosti zidova, ali i cjelokupne nosivosti konstrukcije. Primjena FRCM-a radi vanjskoga pojačanja treba svoju primjenu naći prije svega u područjima vlačnih naprezanja, dok se ne preporuča očekivati preuzimanje tlačnih naprezanja zbog lokalnih nestabilnosti. Kad se upotrebljava kod povijesnih građevina, potreban je pravilan odabir sustava uzimajući u obzir konzervatorska načela. Naime, primjenjivo rješenje mora osigurati potpunu kompatibilnost, trajnost i reverzibilnost. Najčešća primjena uključuje slučajeve prikazane na slici G.35.

U slučaju omatanja zgrada na krovnim područjima radi sprečavanja prevrtanja FRCM se postavlja kao obuhvaćajući gornji pojas (slika G.35a). Otpornost na prevrtanje postiže se horizontalnim vlaknima u FRCM sustavu. Posebnu pozornost treba obratiti na uglove koje treba zaobliti kako bi se smanjila koncentracija naprezanja u vlaknima. Povećanje kapaciteta nosivosti zidova na savijanje okomito na ravninu postiže se postavljanjem FRCM-a na vlačnoj strani, a aktiviraju se vlakna postavljena u vertikalnom smjeru (slika G.35b). Povećanje kapaciteta nosivosti zidova u ravnini postiže se postavljanjem FRCM-a u područja najvećega naprezanja ili po cijelome zidu (slika G.35c). Sustav pojačanja mora biti odgovarajuće sidren na krajevima (gore i dolje). Ako je moguće, oblaganje treba izvesti s obje strane, a u protivnome se izvodi s jedne strane. Pojačanje veznih greda i nadvoja provodi se postavljanjem horizontalnih FRCM mreža jer se savojno pojačanje postiže aktivacijom horizontalnih vlakana i najbolje se ostvaruje postavljanjem FRCM-a u donju i gornju zonu vezne grede (slika G.35 d). Posmično pojačanje, s druge strane, zahtijeva vertikalno postavljena vlakna u cijeloj visini vezne grede. Stoga oblaganje cijeloga područja vezne grede doprinosi cjelovitom pojačanju. Kad je oblaganje vanjsko i kontinuirano uzduž cijeloga oboda građevine, ujedno ima funkciju povezivanja zidova. Povećanje kapaciteta nosivosti lukova, svodova i kupola postavljanjem FRCM tkanina na intrados ili esktrados prikazano je na slici G.35 e. Treba imati na umu da ova vrsta pojačanja nije učinkovita u kontroliranju oštećenja zbog drobljenja ziđa ili posmičnoga otkazivanja lukova. Ovijanje stupova radi poboljšanja tlačne čvrstoće i duktilnosti uobičajeno se provodi oblaganjem elementa po obodu (slika G.35f).

Ponašanje elemenata pojačanih FRCM sustavima značajno ovisi o kvaliteti podloge i pravilnoj pripremi površine podloge. Neodgovarajuće pripremljena površina može rezultirati odvajanjem FRCM sustava prije postizanja projektiranih opterećenja. Preporuke za projektiranje i izvođenje sustava vanjskih pojačanja primjenom FRCM sustava za zidane konstrukcije mogu se naći u sklopu dokumenata:

- ACI 549.4R-13 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, American Concrete Institute, 2013 [ACI Committee 549],
- AC434-13 Acceptance Criteria For Masonry And Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, International Code Council Evaluation Services (ICC-ES) [ICC Evaluation Service 2011],
- CNR-DT 215/2018 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for strengthening Existing Structures, 2020 [CNR-DT 215/2018].

Više detalja o proračunu pojačanja ziđa primjenom FRCM-a dano je u poglavlju 6.4.

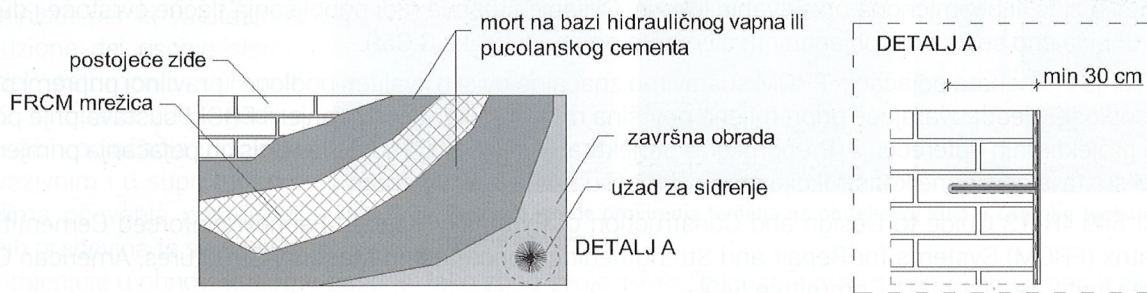


Slika G.35. Mogućnosti primjene FRCM sustava za pojačanje zidanih konstrukcija [Thanasis Triantafyllou, 2016]

Tehnologija izvedbe

Prije izvođenje sustava pojačanja treba otkloniti sva oštećenja. U području na kojem se izvodi pojačanje vrši se uklanjanje žbuke lakim ručnim alatima. Ako se radi o lokalnim pojačanjima, poput sanacije pukotina, žbuka se uklanja u širini od najmanje 60 do 90 cm od pukotine. Nakon uklanjanja žbuke pristupa se lokalnom popravku oštećenja, primjerice injektiranju pukotina i konsolidaciji зида primjenom metode opisane u poglavlju 3.5. Zahtjevi za pripremu površine ovise o odabranom sustavu FRCM-a. Međutim, mogu uključivati: a) pjeskarenje, hrapavljenje, brušenje ili abraziju površine vodom pod pritiskom, b) uklanjanje viška morta iz sljubnica, c) nanošenje temeljnoga sloja ili drugih oblika pripreme površine. Površina mora biti bez prašine i drugih oblika onečišćenja kako ne bi došlo do nenamjernoga oštećenja podloge. Ako treba, materijal matrice sustava može se upotrijebiti za zaglađivanje površine radi uklanjanja diskontinuiteta površine prije nanošenja sloja potrebnoga za ugradnju mreže. Za ispunjavanje šupljina i popravak podloge mogu se upotrijebiti posebna punila ili mortovi, s uobičajenim debljinama do približno 12 mm.

FRCM sustavi ugrađuju se ručno pomoću matrice i mreže sa suhim vlaknima. Postupak se sastoji od nanošenja matrice na bazi hidrauličnog vapna ili pucolanskoga cementa i mreže izravno na element koji se pojačava (slike G.36 i G.37). Mort treba biti duktilan, a prednost imaju mikroarmirani mortovi/žbuke [HRN EN 1998-3]. Matrica se prvo nanosi ravnomjerno na sve pripremljene površine na koje se postavlja sustav u debljini od 5 do 6 mm. Dok je mort još svjež, mreža od staklenih ili bazaltnih vlakana jednolikim se pritiskom utiskuje u svježi mort. Važno je osigurati minimalni preklop mreže od 30 cm. Odgovarajuće utiskivanje mreže u mort od presudnoga je značenja za učinkovitost ove tehnike. Zbog toga treba mrežu lagano utisnuti valjkom ili sličnim alatom da bi se osigurala njegova potpuna impregnacija te istisnule eventualne šupljine u matrici.



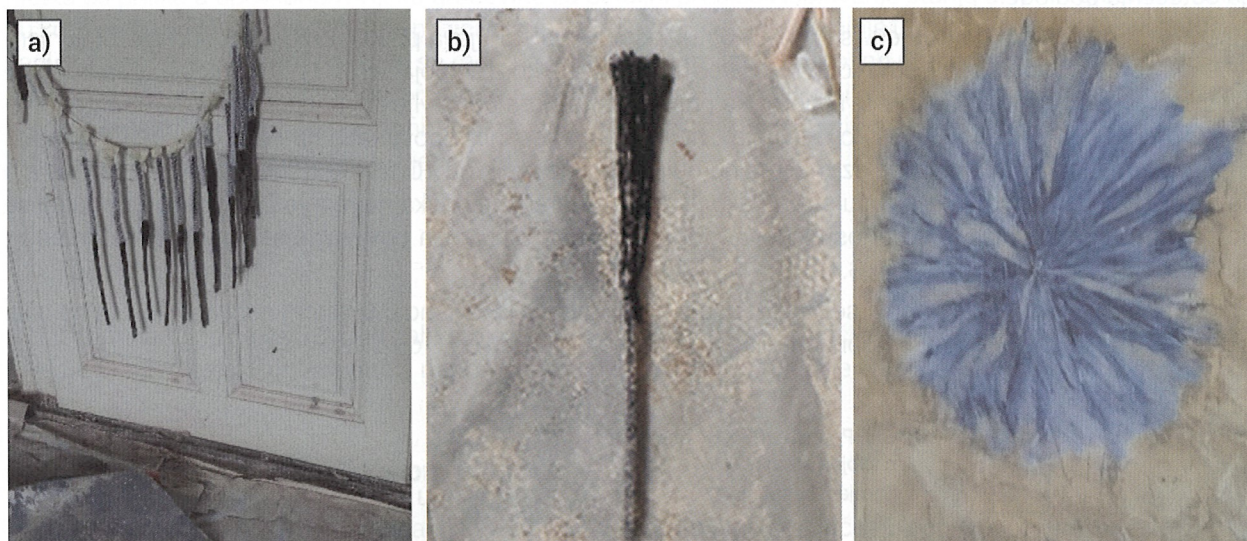
Slika G.36. Pojačanje nosivoga zida primjenom FRCM-a na djelovanja u ravnini i izvan nje; detalj sidrenja



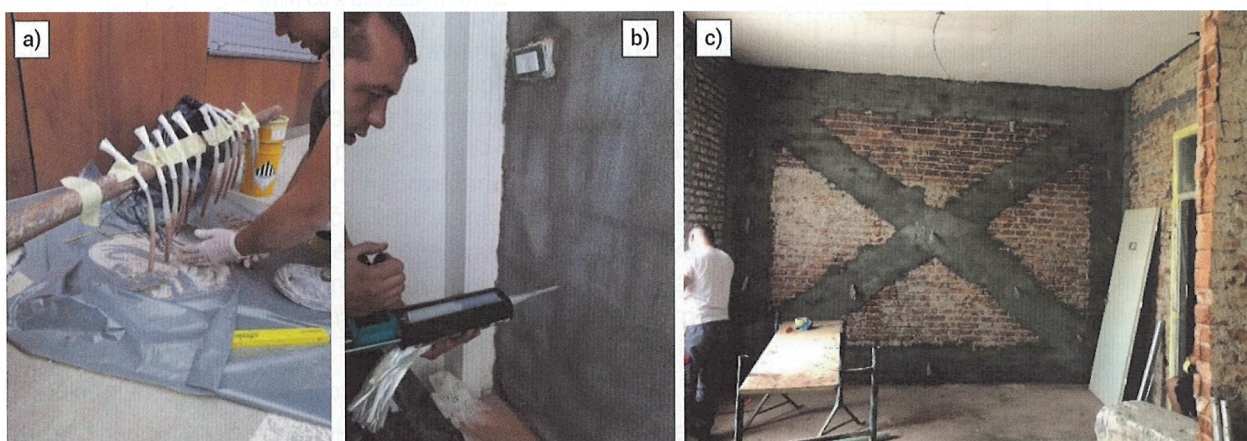
Slika G.37. Postupak ugradnje FRCM-a tijekom potresne obnove obiteljske kuće u gradu Zagrebu: a) ugradnja FRCM mreže; b) završni sloj morta; c) ugradnja užadi; d) impregnacija užadi

Orijentacija FRCM mreže i redoslijed slaganja tkanina treba propisati projektant u projektu pojačanja. Orijentacija vlakana za primarni i sekundarni smjer varira ovisno o namjeni pojačanja. Male varijacije u kutu, ± 5 stupnjeva, u odnosu na predviđeni smjer poravnanja vlakana mogu uzrokovati znatne razlike u učinkovitosti sustava pojačanja. Dok je prvi sloj morta još u svježem stanju, nanosi se drugi sloj debljine 5 do 6 mm. Sljedeći slojevi matrice i mreže postavljaju se prije potpunoga očvršćivanja prethodnoga sloja. Kad mort potpuno očvrstne, površina se obrađuje smjesom za izravnavanje. Potrebno vrijeme njegovanja uobičajeno iznosi 28 dana. Kako bi se osiguralo pojačanje nosivih zidova, sustav za pojačanje se posebnim sidrima povezuje s podlogom. Sidra su napravljena od užadi od ugljičnih, bazaltnih, staklenih ili čeličnih vlakana različitoga promjera. Postupak sidrenja zahtijeva pripremu mjesta sidrenja bušenjem te ispuhivanjem prašine iz prethodno izbušenih rupa. Nakon toga se užad reže na prikladnu duljinu, uzimajući u obzir dubinu sidrenja (minimalno 30 cm) i dio koji se širi na površini зида. Dio užadi koji se sidri u zid impregnira se u epoksidnoj smoli te se površina zasićuje kvarcnim pijeskom. Nakon 24 sata, kad smola očvrstne, užad je spremna za primjenu.

Nakon što sustav pojačanja očvrstne, u pripremljene se rupe injektira sredstvo za kemijsko sidrenje. Kruti dio pripremljene užadi utiskuje se u rupu dok se površinski dio, duljine oko 25 cm, poput lepeze širi po površini zida i obrađuje impregnacijom na bazi epoksidne smole (slike G.38 i G.39). Površina se zasićuje kvarcnim pijeskom. Raspored i broj "sidara" propisuje se projektom. Uobičajeno se izvodi do 4 mjesta po m² površine koja se pojačava.



Slika G.38. Užad od ugljičnih vlakana za sidrenje FRCM sustava: a) sušenje užadi nakon pripreme; b) gotovo uže za sidrenje; c) izgled sidra nakon ugradnje u zid



Slika G.39. Primjer: a) izrade FRP užadi za sidrenje; b) nanošenja sredstva za kemijsko sidrenje; c) položaj FRP užadi na mjestu pojačanja

3.11.3. Pojačanje zidanih zgrada kompozitom armiranim mortom

Kompozitom armirani mort (engl. *composite reinforced mortar, CRM*) sastoji se od kompozitne rešetke ugrađene u anorgansku matricu, a primjenjuje se kao vanjska vezana armatura zida. Kompozitna rešetka podnosi vlačna naprezanja, dok je anorganska matrica odgovorna za prijenos naprezanja između podloge i kompozitne rešetke sidrima.

CRM sustav za pojačanje predlaže zamjenu čelične mreže kompozitom, utisnutom u mort na bazi hidrauličnoga vapna ili pucolanskih cemenata. Kompozitne mreže izrađene su impregnacijom staklenih, ugljičnih, bazaltnih ili aramidnih vlakana. Karakterizira ih slobodan prostor između pređa većih od 30 mm i s ploštinom presjeka pređe jedan red veličine veći od onih koji se obično upotrebljavaju u FRCM mrežama. Budući da se sidrenje provodi kroz sljubnice, radi se o potpuno neinvazivnom i reverzibilnom sustavu, izvedenom s materijalima kompatibilnima izvornima.

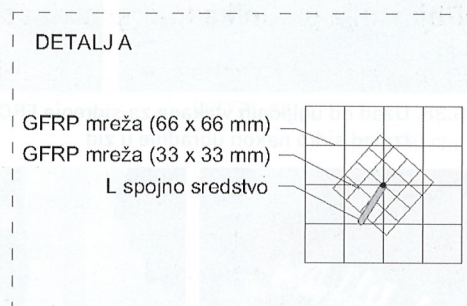
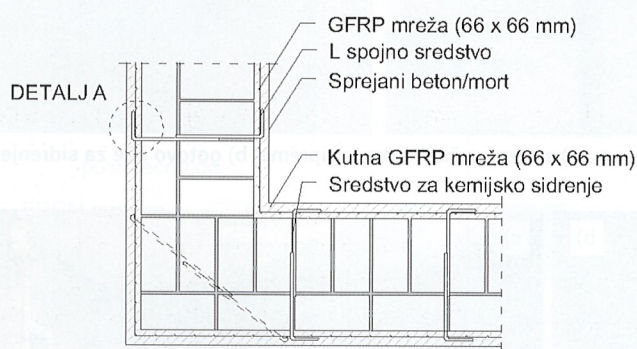
Ta vrsta pojačanja primjenjiva je na obje strane zidanoga elementa, a doprinosi povećanju posmične otpornosti u ravnini, ali i otpornosti na savijanje bez značajne promjene krutosti elementa.

Tehnologija izvedbe

Prije izvođenja sustava pojačanja treba otkloniti sva oštećenja. U području na kojemu se izvodi pojačanje uklanja se žbuka i pristupa lokalnom popravku oštećenja, primjerice djelomičnom zamjenom morta u sljubnicama (vidjeti poglavlje 3.3), i/ili injektiranju zida (vidjeti poglavlje 3.5). Površina se potom ispire vodom pod niskim pritiskom. Površina mora biti bez prašine i drugih oblika onečišćenja kako ne bi došlo do nenamjernoga oštećenja podloge.

Mreža se s podlogom povezuje L-sidrima. Postupak sidrenja zahtijeva pripremu mjesta sidrenja bušenjem te ispuhivanjem. Uobičajeno se izvodi 4 sidra po m² površine koja se pojačava. U pripremljene rupe utiskuje se sredstvo za kemijsko sidrenje te L sidro. Na pripremljena sidra postavlja se mreža i povezuje dodatnim sidrima prema detalju (slika G.40). Povezivanje dviju strana pojačanih zidova također se ostvaruje umetanjem L elemenata u pripremljene rupe uz minimalnu duljinu preklapanja od 10 cm. Kod debelih zidova ne moraju se nužno provesti povezivanja dviju strana ako je dubina sidrenja jednaka najmanje 2/3 debljine zida koji se pojačava. U slučaju loše povezanosti zidova mogu se dodati L kuke za povezivanje zidova koje su na slici prikazane crtkanom linijom (slika G.40).

Nakon postavljanja mreže nanosi se torkret u jednom ili dva sloja, ovisno o ukupnoj debljini. Mort je na bazi hidrauličnoga vapna ili sličan. Ukupna debljina morta može varirati od 3 do 5 cm.



Slika G.40. Detalj sidrenja CRM sustava

G.4. METODE POPRAVKA I POJAČANJA DRVENIH STROPNIH KONSTRUKCIJA

Postupak protupotresnoga projektiranja popravka ili pojačanja drvenih stropnih konstrukcija najbolje je započeti pregledom i ocjenom stanja postojeće konstrukcije. Takve intervencije na stropnim konstrukcijama rijetka su prilika u uporabnom vijeku građevine za detaljni pregled i ispitivanje stanja drvenih grednika. Česte su kritične pozicije za drvene grede pozicije ispod "mokrih" prostorija (kuhinja i kupaonica) te ležajevi greda uz vanjske zidove. S obzirom na to da se radi o opasnosti od truljenja, odnosno prekomjerne vlage u drvu, ispitivanje se uobičajeno provodi vlagomjerom ili, alternativno, ultrazvukom ili rezistografom. Nakon utvrđivanja stanja greda može se pristupiti planiranju zahvata. Konstrukcijski zahvati na drvenim stropnim konstrukcijama općenito se mogu podijeliti u sljedeće skupine:

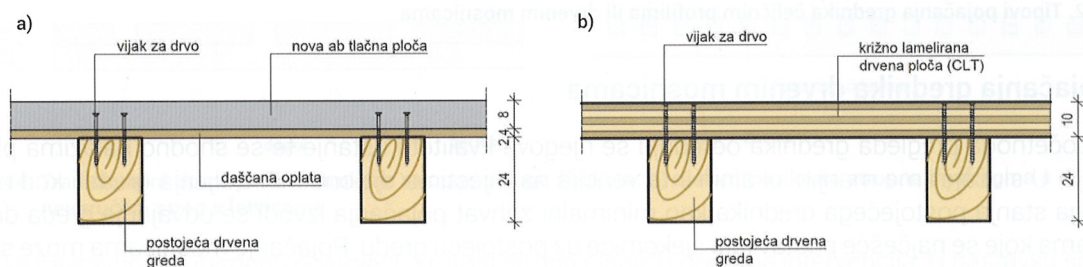
- pojačanja grednika,
- povezivanje stropa sa zidovima,
- lokalne intervencije.

S obzirom na to da se veći dio tih zahvata međusobno preklapa po tehničkim rješenjima i funkciji, u nastavku se daje pregled osnovnih zahvata s napomenama oko ugradnje i funkcije.

4.1. Pojačanja grednika tlačnom pločom

Danas najučestaliji tip ovoga pojačanja izvedba je armiranobetonske tlačne ploče uobičajene debljine 6 do 8 cm, ovisno o rasponu, dimenzijama greda i vanjskom opterećenju (slika G.41 a). Iako se radi o ireverzibilnom tipu konstrukcije, što je čini manje primjenjivom za pojedinačno zaštićene građevine, takva ploča u spregnutoj kombinaciji s drvenim grednikom značajno je povećanje nosivosti stropa na vertikalna opterećenja, ali i istaknuto kruta dijafragma u svojoj ravnini, jako bitna u protupotresnoj otpornosti cijele građevine. Sprezanje se uobičajeno izvodi tipskim vijcima za sprezanje drvo-beton, najčešće strane proizvodnje s europskim tehničkim dopuštenjem. Prednost je toga tipa spajala u eksperimentalno dobivenim vrijednostima koeficijenta popustljivosti ugrađenima u proračunske metode dane tehničkim dopuštenjem. U globalnom kontekstu cijele građevine radi se o minimalnom povećanju mase, budući da je masa spregnute konstrukcije i novih slojeva poda približno jednaka zatečenome stanju s nasipom šute koja se prethodno uklanja. Od ostalih napomena valja istaknuti nužnost privremenoga podupiranja grednika u fazi betoniranja radi ostvarivanja pune vrijednosti sprezanja. U ploče se najčešće postavlja jedna armaturna mreža na sredini visine, na distancerima, te pripadajuća armatura sidrenja za spajanje ploče s okolnim zidovima. Redoslijed je zahvata izvođenja spregnute ploče drvo-beton:

1. uklanjanje postojećih slojeva poda uključujući šutu,
2. pregled drvenoga grednika s eventualnim lokalnim intervencijama sanacije ležajeva ili zamjene pojedinih trulih dijelova,
3. postava PVC folije na daščanu oplatu,
4. ugradnja vijaka za sprezanje,
5. postava armature i sidrenih šipaka,
6. betoniranje uz prethodno podupiranje (najmanje u trećinskim točkama raspona),
7. uklanjanje podupora nakon 28 dana.



Slika G.41. Dva osnovna tipa pojačanja grednika tlačnom pločom: a) armiranobetonska ploča; b) križno lamelirana drvena ploča (CLT)

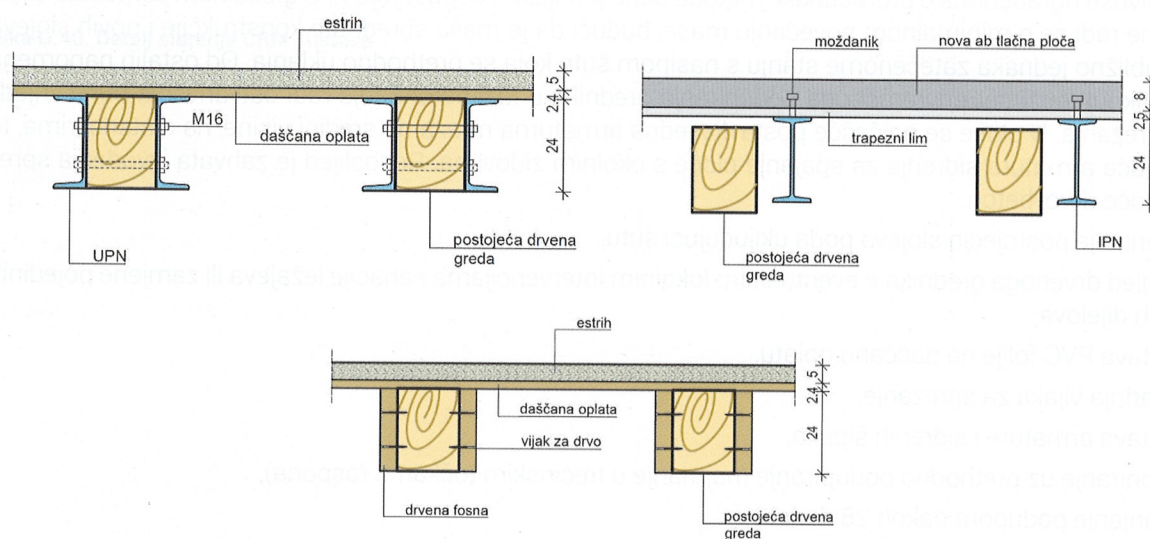
Mogući je nedostatak armiranobetonske varijante tlačne ploče nedostatan ispitana trajnost toga sustava, posebno zbog negativnoga utjecaja paronepropusne betonske obloge s gornje strane koja sprečava prirodno isušivanje greda tijekom uporabe i zbog koje može doći do početka truljenja.

Kao reverzibilna varijanta armiranobetonske tlačne ploče navodi se križno lamelirana drvena ploča (engl. *cross laminated timber, CLT*) koja je u zadnje vrijeme u svijetu postala široko rasprostranjen građevinski proizvod, iako u Hrvatskoj još nije u široj primjeni (slika G.41 b). Osim reverzibilnosti, što je čini prikladnijom za ugradnju u zaštićenim kulturno-povijesnim građevinama, prednost je toga tipa spregnute stropne konstrukcije suha i brza montaža, visoka vatrootpornost te drvo kao ekološki prihvatljiv materijal. Budući da su zbog ograničenja u proizvodnji i transportu ploče proizvode ograničene širine, za prijenos posmične sile na uzdužnim spojevima ploča te radi stvaranja krute dijafragme u ravnini potrebno je dodatno međusobno spajanje ploča vijcima ili drugim tipskim okovom. Krutost u ravnini takvoga sustava dodatno se može osigurati perforiranim čeličnim trakama koje se postavljaju s gornje strane ploče, najčešće u stabilne dijagonalne poligone. Nedostatak je toga sustava još uvijek znatno viša cijena materijala u odnosu na armiranobetonsku ploču, ali i teža manipulacija, posebno prilikom ugradnje u postojećim zgradama u kojima je unos ploča moguć samo kroz prozore ili druge otvore na pročeljima.

4.2. Pojačanja grednika čeličnim profilima

Taj tip pojačanja čeličnim profilima upotrebljava se u specifičnim situacijama, primjerice kod povećanja vertikalnoga opterećenja najčešće uzrokovanog prenamjenom prostorija ili kod inicijalno iznimno lošega stanja postojećeg drvenog grednika koji nije moguće ili nije isplativo demontirati. Na slici G.42 prikazana su neka od rješenja koja su najčešće u primjeni prilikom takvih rekonstrukcija, od jednostranoga ili obostranoga udvajanja drvenih greda do ugradnje paralelnoga sustava čeličnih greda koje mogu u potpunosti preuzeti vertikalno opterećenje s mogućnošću dodatne ugradnje tlačne armiranobetonske ploče najčešće na trapeznim limovima kao izgubljenom oplatom.

Kod montaže čeličnih greda posebna se pozornost mora pridati prethodnoj pripremi ležajeva, budući da opeka ili drugi zidni elementi ne mogu neposredno prihvatiti ležajnu reakciju čeličnih nosača zbog znatnih natezanja lokalnoga pritiska. Stoga se najčešće svaki ležaj priprema i ravna uporabom ležajnih mortova koji vertikalnu reakciju proširuju na prihvatljivu širinu zidanoga zida. Ako se na čeličnim nosačima izvodi dodatna tlačna armiranobetonska ploča, poželjno ju je prilikom betoniranja privremeno poduprijeti.



Slika G.42. Tipovi pojačanja grednika čeličnim profilima ili drvenim mosnicama

4.3. Pojačanja grednika drvenim mosnicama

Nakon početnoga pregleda grednika određuju se njegova kvaliteta i stanje te se shodno nalazima planira i pojačanje. U slučajevima manjih lokalnih intervencija na mjestima djelomičnih truljenja greda i kod općenito lošijega stanja postojećega grednika kao minimalni zahvat pojačanja izvodi se udvajanje greda drvenim mosnicama koje se najčešće postavljaju sjekomice uz postojeću gredu. Pojačanje mosnicama može se izvesti u punoj duljini grede ili samo lokalno na potrebnom mjestu oslabljenja osnovne grede. Ako se želi povećati statička visina postojećih greda, mosnica se može ugrađivati i položeno iznad grede. Spajanje se izvodi čavlima ili vijcima za drvo manjega promjera.

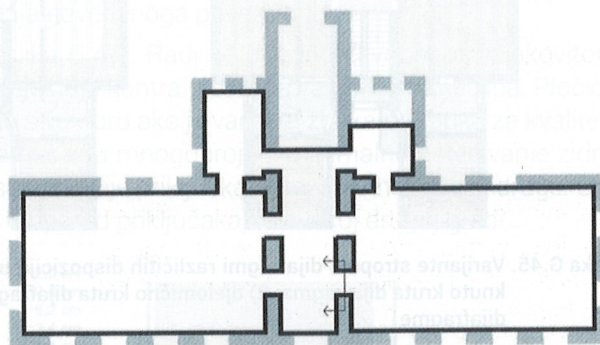
4.4. Ostali tipovi pojačanja grednika

Od ostalih tipova pojačanja grednika koja se rjeđe rabe ili su u istraživačkoj fazi navodi se fleksijsko pojačanje greda FRP šipkama ulijepljenima s donje strane grede te lijepljenjem FRP traka na donju plohu drvene grede. Zajednički je nedostatak oba sustava osjetljivost na požar te nedovoljno ispitana trajnost lijepljenoga spoja.

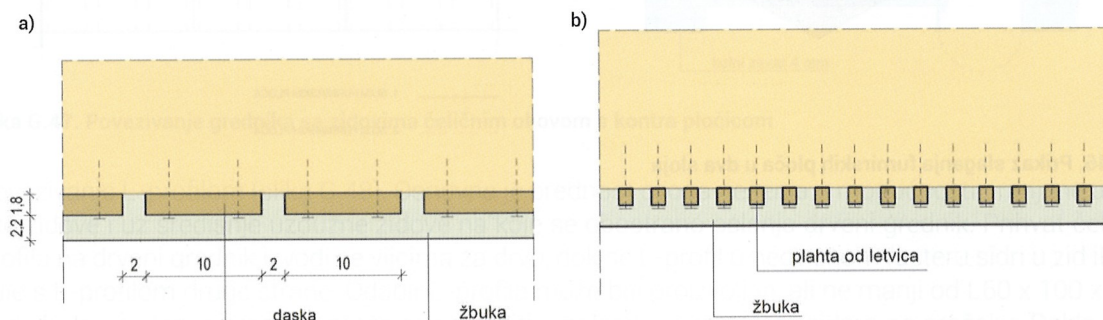
4.5. Plošno ukrućivanje postojećih grednika

Kao važna mjera kod popravka i pojačanja zidanih zgrada s drvenim grednicima ističe se plošno ukrućivanje stropova. Navedena mjera značajno pospješuje zajednički rad zidova zbog horizontalnih dinamičkih opterećenja, što je preduvjet za uredno i kontrolirano ponašanje konstrukcije, odnosno postizanje globalnoga ponašanja uz minimalan broj lokalnih mehanizama otkazivanja.

Ako se planiraju zahvati s gornje strane drvenoga grednika, svakako je najučinkovitiji sustav plošno-ga ukrućivanja pojačanje grednika tlačnom pločom, armiranobetonskom ili drvenom. Osim stvaranja krute dijafragme unutar jedne prostorije, posebnu pozornost treba pridati spojnim trakama između postojećih prostorija kako bi dijafragma funkcionirala na razini cijele etaže (slika G.43). Kod armiranobetonske stropne ploče to se postiže dodatnom armaturom spojnih traka, dok u varijanti drvenih križno lameliranih ploča treba posebnim okovom ili drugim čeličnim elementima osigurati prijenos navedenih horizontalnih utjecaja. Osim s gornje strane, plošno se ukrućivanje može provesti i s donje strane postojećega drvenog grednika, pod stropom. Time se znatno smanjuju ukupni zahvati na zgradi budući da se podovi ne diraju, odnosno može se ostaviti namještaj u prostoriji bez iseljavanja. U tom je slučaju prije planiranja najprikladnijega načina plošnoga ukrućivanja stropa potrebno poznavati sastav svih slojeva podnih i stropnih obloga te načine njihova pričvršćenja. To je iznimno važno zbog procjene postojeće krutosti stropa u svojoj ravnini, koja može biti vrlo različita, pa prema tome i zahtijevati drugačiji pristup i planiranje dodatnih intervencija. Navedeno se prikazuje na primjeru stropne žbuke koja se tradicionalno postavlja većinom na dva osnovna načina. Prvi je način žbukanje na prethodno postavljenu trstiku na daščanoj oplati koja je sastavljena od niza dasaka (slika G.44 a). Takva daščana oplata već posjeduje znatnu krutost u svojoj ravnini i za ostvarivanje traženoga učinka dijafragme potreban je eventualno jedan dodatni ukrućujući sloj ili čak samo rubni kontinuirani element za prihvat rubnih zatežućih sila dijafragme. Drugi je, također tradicionalan, način postave žbuke postava na nizu tankih letvica dimenzija 10×15 mm postavljenih na razmaku 15 mm i pojedinačno pričvršćenih s po jednim čavlom (slika G.44 b). Takav sloj letvica nema nikakvu plošnu krutost i za postizanje traženoga učinka potrebna su dva ukrućujuća sloja.



Slika G.43. Primjer spajanja armiranobetonskih tlačnih ploča pojedinih prostorija na mjestima vrata radi zajedničkoga funkcioniranja dijafragme na razini cijele etaže

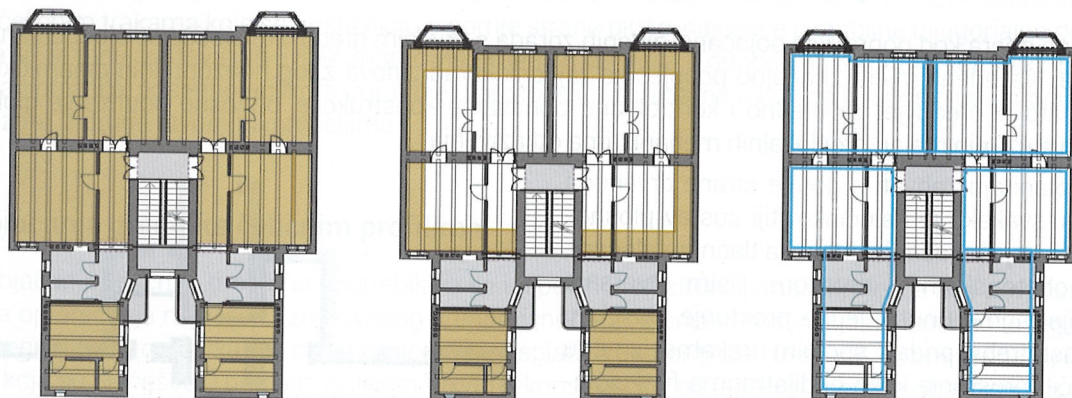


Slika G.44. Tradicionalni tipovi podkonstrukcije stropne obloge žbukom: a) djelomično kruta stropna dijafragma s dasakama, b) neukrućeni strop s letvicama

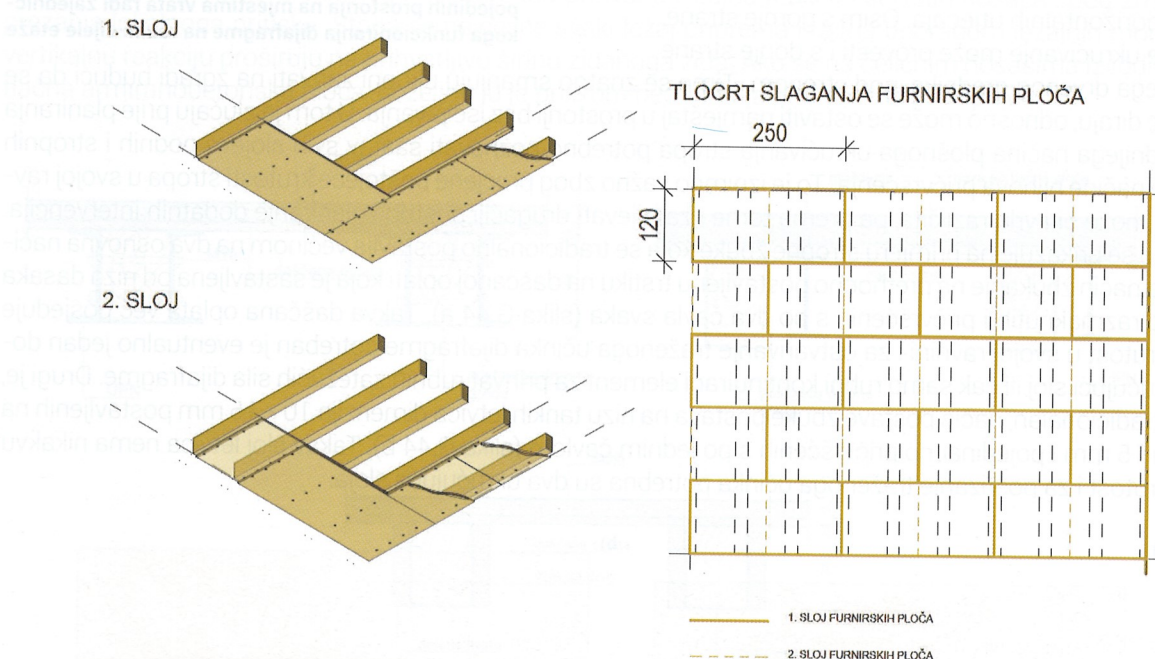
Stoga se nastavno na utvrđenu postojeću krutost stropa planira i dodatna intervencija. U nastavku se navode tri varijante plošnoga ukrućivanja drvenih grednika s donje strane, odnosno pod stropom (slika G.45):

1. Istaknuto kruta dijafragma s dva nova ukrućujuća sloja. Radi se o dva sloja drvenih furnirskih ploča ("blažujki") postavljenih međusobno okomito bez preklapanja spojeva (slika G.46). U slučaju postojanja već jednog sloja dasaka uredno pričvršćenih s po dva čavla moguće je dodati i samo jedan sloj furnirskih ploča ili dasaka. Za dodatnu krutost u obzir dolaze i dodatne dijagonale od perforiranih čeličnih traka pričvršćenih na furnirske ploče s donje strane.

2. Djelomično kruta dijafragma s rubnim ukrućujućim pojasom koji čine dva sloja furnirskih ploča s međusobno razmaknutim spojevima. Ova djelomično kruta dijafragma može se učinkovito upotrijebiti u slučajevima tlocrta manjih dimenzija i ako postoji očita početna krutost ostvarena postojećim slojevima poda.
3. Ukrućivanje rubova već postojeće dijafragme montažom čeličnih profila za prihvatanje rubnih vlačnih sila dijafragme. U ovoj varijanti prikladan bi bio L profil koji se može jednostavno smjestiti u ugao stropa i prekriti žbukom. Za potpuni učinak ovoga načina ukrućivanja bilo bi poželjno čelične profile na pozicijama okomitih zidova spojiti i tako ostvariti kontinuitet elementa.



Slika G.45. Varijante stropnih dijafragma različitih dispozicija u odnosu na već postojeću krutost slojeva poda i stropa: 1) istaknuto kruta dijafragma; 2) djelomično kruta dijafragma s ukrućujućim pojasom; 3) ukrućivanje rubova već postojeće dijafragme

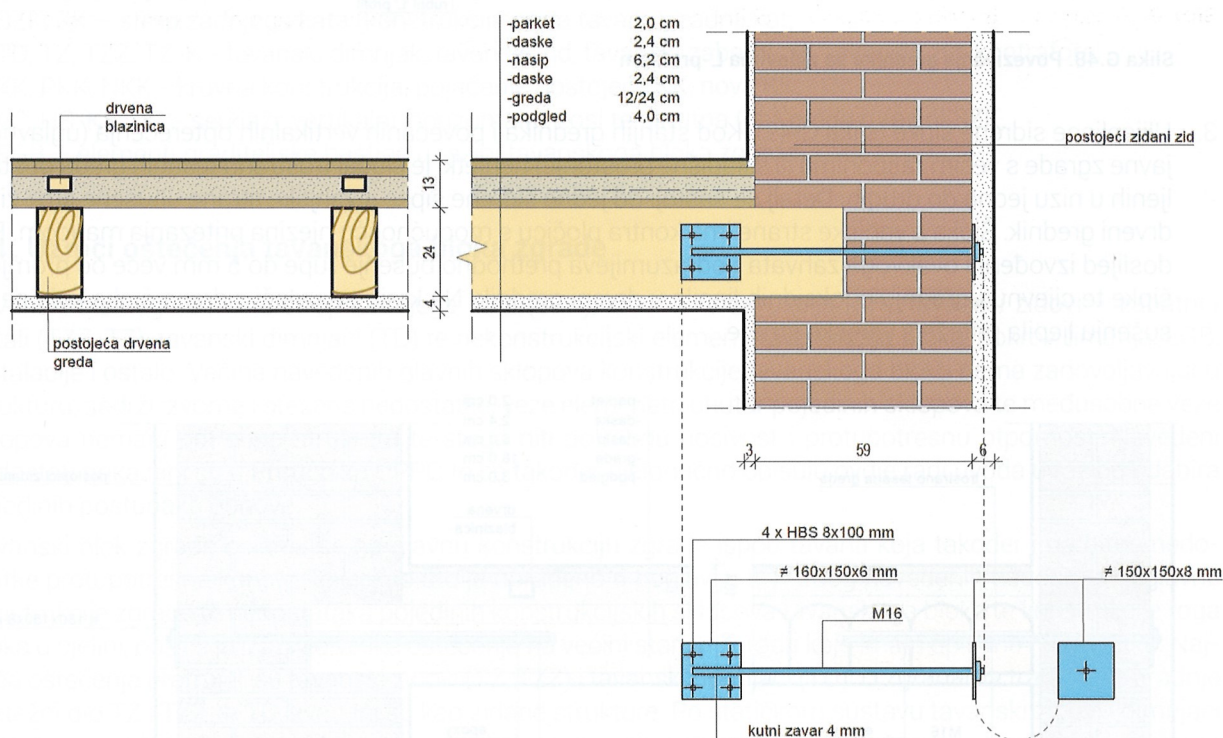


Slika G.46. Prikaz slaganja furnirskih ploča u dva sloja

4.6. Povezivanje grednika sa zidovima

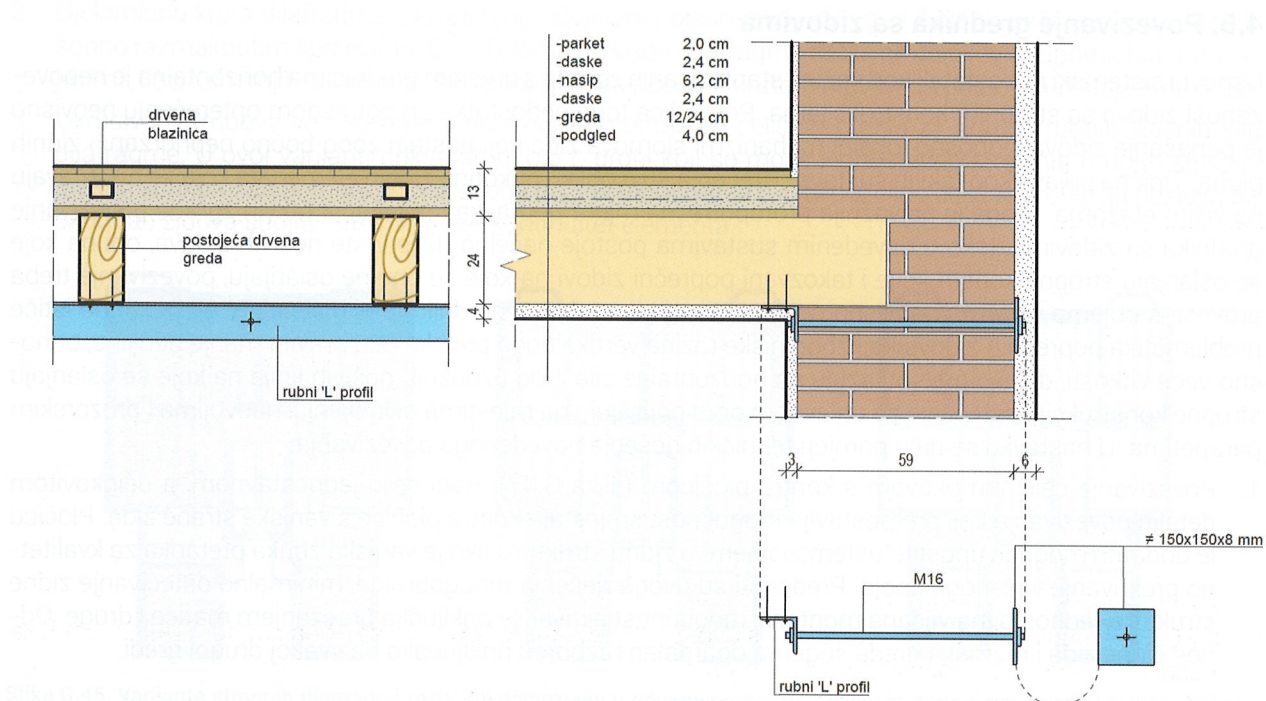
Osnovni sistemski nedostatak kod većine starih zidanih zgrada s drvenim grednicima horizontalna je nepovezanost zidova sa stropnim konstrukcijama. Posljedica toga nedostatka pri potresnom opterećenju neovisno je ponašanje zidova, odnosno lokalni mehanizmi slomova zida koji nastaju zbog bočno nepridrženih zidnih ploha. Tipična pojava kod takvih sustava oštećenja su u obliku pukotina zidnih elemenata koje se povećavaju na višim etažama. Stoga je najvažnija protupotresna mjera popravka i pojačanja takvih zgrada povezivanje grednika sa zidovima. Iako u navedenim sustavima postoje načelno dvije vrste nosivih zidova, oni na koje se oslanjaju stropne konstrukcije i takozvani poprečni zidovi na koje se one ne oslanjaju, povezivanje treba provesti s objema vrstama neovisno o tome oslanja li se drveni grednik na njih ili ne. Tu se posebno ističe problematika poprečnih zidova koji zbog niske razine vertikalnoga pritiska te u pravilu manje debljine, odnosno veće vitkosti, daleko prije otkazuju na horizontalne sile. Kod uzdužnih nosivih linija na koje se oslanjaju stropne konstrukcije oštećenja se uglavnom prvo pojavljuju na mjestima oslabljenja: nadvojima i prozorskim parapetima. U nastavku se daju primjeri tehničkih rješenja navedenoga povezivanja:

1. Povezivanje čeličnim okovom s kontra pločicom (slika G.47). Radi se o jednostavnom, a učinkovitom detalju povezivanja koji pretpostavlja mogućnost smještaja kontra pločice s vanjske strane zida. Pločicu je dodatno moguće upustiti "uštemavanjem" u zidnu strukturu ako je vanjska žbuka pretanka za kvalitetno prekrivanje vijčanoga spoja. Prednosti su ovoga rješenja mnogobrojne: minimalno oštećivanje zidne strukture, jednostavna vijčana montaža, mogućnost aktivacije priključka pritezanjem matice i druge. Odnos širine zida i razmaka greda sugerira optimalan raspored priključaka na svakoj drugoj gredi.



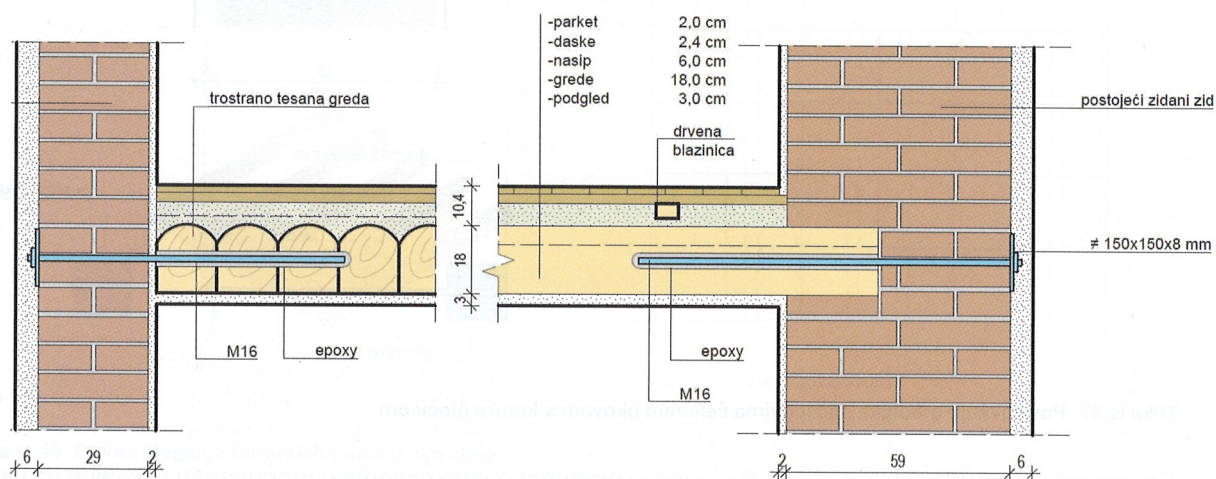
Slika G.47. Povezivanje grednika sa zidovima čeličnim okovom s kontra pločicom

2. Povezivanje L-profilom (slika G.48). Osnovna je prednost ovoga rješenja u mogućnosti primjene uz vanjske zidove i uz središnje uzdužne zidove na koje se obostrano oslanja drveni grednik. Prihvat čeličnoga profila na drveni grednik izvodi se vijcima za drvo, dok se L-profil u neovisnom rasteru sidri u zid ili povezuje s L-profilom druge strane. Odabir L-profila može biti proizvoljan, ali ne manji od L60 x 100 x 8 mm, budući da ne ulazi u prostor i može se uskladiti s prikladnim rasterom sidara na pročelju. Dakle, ako se odabere veći razmak sidara (često s namjerom što manjih intervencija na uličnim pročeljima), L-profil će biti raznokrak s horizontalno položenim širim krakom. Ovaj tip priključka ima dodatnu značajnu funkciju, a to je ukrućivanje rubova stropne ili podne dijafragme. Svojim kontinuitetom profil preuzima glavna vlačna naprezanja rubnih linija dijafragme. Potrebno je stoga dodatno predvidjeti montažne nastavke za prijenos uzdužnih sila.



Slika G.48. Povezivanje grednika sa zidovima L-profilom

3. Ulijepljene sidrene šipke (slika G.49). Kod starijih grednika i povećanih vertikalnih opterećenja (uglavnom javne zgrade s većim rasponima ili skladišne prostorije) nerijetki je slučaj trostrano tesanih greda postavljenih u nizu jedna do drugih. Detalj se sastoji od jedne sidrene šipke s vanjske strane ubušene kroz zid u drveni grednik. Šipka s vanjske strane ima kontra pločicu s mogućnošću njezina pritezanja maticom. Redoslijed izvođenja ovakvoga zahvata podrazumijeva prethodno bušenje rupe do 5 mm veće od promjera šipke te cijevnu ugradnju epoksidnih ljepila u drveni grednik. Na kraju se uvlači sidrena šipka koja se po sušenju ljepila priteže s vanjske strane.



Slika G.49. Povezivanje grednika sa zidovima ulijepljenim šipkama