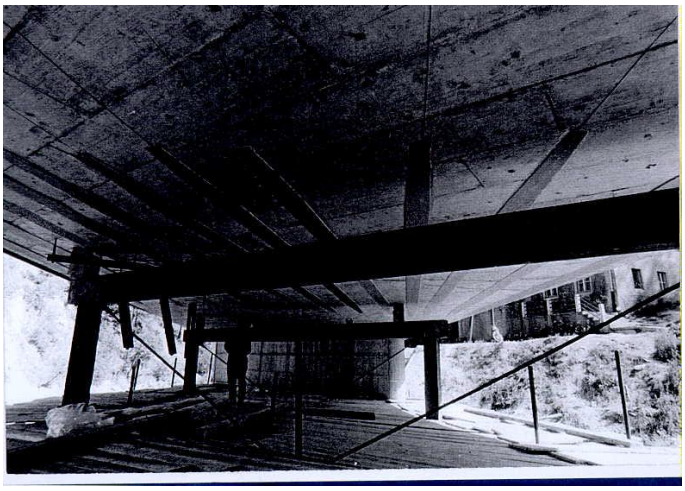
METODA STATIČNE UTRDITVE NOSILNIH GRADBENIH KONSTRUKCIJ Z LEPLJENJEM DODATNE ARMATURE

Matevž Bergant, univ.dipl.inž.grad., GRAS d.o.o.
Boštjan Gerbec, univ.dipl.inž.kem.tehn., Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.

1 NEKAJ ZGODOVINE

Metodo statičnega utrjevanja/ojačevanja armiranobetonskih (AB) konstrukcij z lepljenjem dodatne jeklene armature na površino konstrukcije so razvili sredi 60. let prejšnjega stoletja in jo prvič predstavili leta 1967 (Fleming, King). Pred tem so nosilnost konstrukcij izboljševali praviloma z povečanjem prečnega prereza ali s naknadnim zunanjim podpiranjem/napenjanjem konstrukcije s kabli. Bolj intenzivno se je metoda v praksi začela uporabljati v 70. letih. Nekdanji ZRMK Ljubljana je metodo zelo zgodaj prenesel tudi na slovenska tla. Že leta 1979 je skupina strokovnjakov (Cafnik, Boštjančič, Hočevar) sprojektirala in izvedla ojačitev prekladne konstrukcije AB mostu preko reke Meže na cesti med Dravogradom in Črno na Koroškem z lepljenjem jeklenih trakov (lamel) z epoksidnim lepilom. Dve leti kasneje so utrdili podobno poddimenzionirani most na isti cesti.



Most preko Meže, 1979

Decembra 1980 sta mag. Boštjančič in inž. Hočevar spisala raziskovalno nalogo "Ojačitev armiranobetonskih konstrukcij z dolepljanjem armature", v kateri sta strokovni javnosti predstavila takrat še dokaj neznano gradbeno metodo. 10 let kasneje je skupina avtorjev z ZRMK izdelala drugi del te raziskovalne naloge, v kateri so med drugim predstavljene uspešne aplikacije metode.

Naslovnica drugega dela raziskovalne naloge

Jekleni elementi, s katerih lepljenjem so gradbeniki utrjevali poddimenzioniorane konstrukcije, so s časom pokazali tudi nekatere svoje slabe strani :

- v agresivnem okolju, kjer dostikrat ojačujemo inženirske objekte, slabo površinsko zaščiteno jeklo kmalu po vgradnji prične korodirati. Jeklene ojačilne elemente je zato potrebno občasno očistiti in ponovno pobarvati, kar je v industriji seveda praviloma nezaželjeno. Nerjavno jeklo se zaradi zelo visoke lastne cene v opisani namen ne izplača uporabljati;

Most preko Meže, 2001

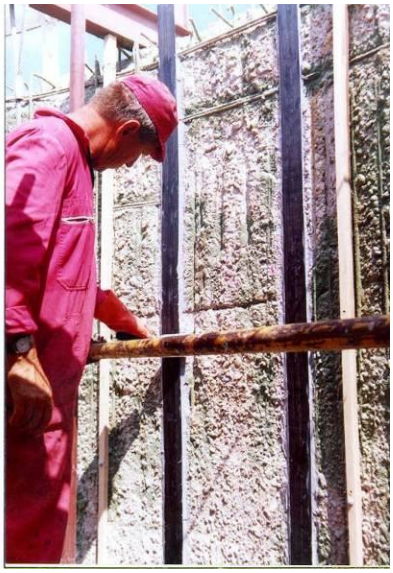
Korozijske poškodbe dodatne stremenske armature

- jekleni elementi, npr. lamele, imajo veliko maso, zato so nerodni za montažo in jih je potrebno za čas, ko epoksidno lepilo veže, dodatno pritrditi v osnovno konstrukcijo. To pomeni mnogo dodatnega dela, kar povečuje strošek sanacije;

Tako smo včasih (1988) pritrjevali lamele

- težki jekleni elementi, ki niso ustrezno pritrjeni/sidrani v osnovni beton, lahko tudi ob relativno majhnih povečanjih temperature zaradi popuščanja/mehčanja lepila odpadejo s konstrukcije;
- nosilnost jeklenih elementov je zaradi nizkih trdnosti jekla relativno majhna.

Zaradi naštetih in nekaterih drugih slabosti so tehnologi iskali možnosti za zamenjavo jekla z ustreznejšim materialom. Prvi poskusi gradbenih sanacij s kompozitnimi materiali FRP (Fibre Reinforced Polymer), sicer znanimi že v prvi polovici 20. stoletja, so potekali konec 70. let prejšnjega stoletja v Nemčiji (Wolf, Miessler). Prve aplikacije so se izvedle v začetku 80. let na Japonskem, prvi AB most v Evropi pa so utrdili z ojačitvami iz kompozita v drugi polovici tistega desetletja (Meier, Rostasy, 1987).
V naši državi so prvi kompozitne lamele nalepili strokovnjaki ZRMK (1996, hladilni stolp TE Šoštanj).



Lepljenje kompozitnih lamel, 1996

2 KAKŠNE MATERIALE UPORABLJAMO ZA DELO ?

Ker se jekleni ojačilni elementi dandanes redko uporabljajo, o jeklu pa vemo praktično vse, tega segmenta v članku ne bomo podrobneje obravnavali.

2.1 Ojačilni elementi iz kompozitnih materialov

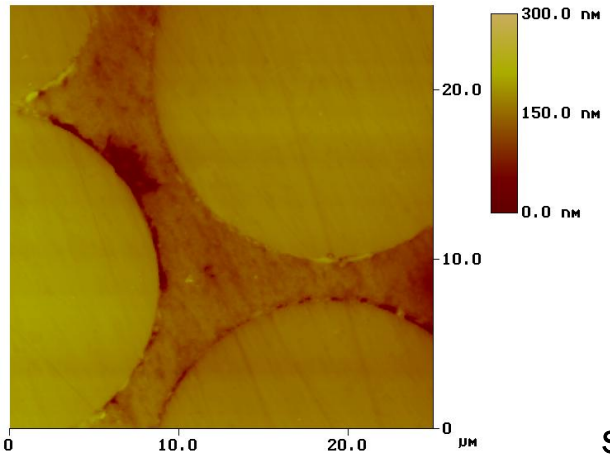
Kompoziti FRP za ojačevanje gradbenih konstrukcij so visokotehnološki izdelek. Gre praviloma za ogljikova vlakna v epoksidni matrici (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastics ali komercialno CFK), uporabljata pa se tudi materiala AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer) in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).

TABLE I. BASIC PROPERTIES OF GLASS, CARBON, AND ARAMID FRP COMPARED TO STEEL

PROPERTY	GLASS FRP	CARBON FRP	ARAMID FRP	STEEL
Tensile strength (ksi)	200-250	240-350	170-300	200-270
Modulus of elasticity (Gsi)	7-9	22-24	7-11	27-29
Elongation	0.03-0.45	0.01-0.015	0.02-0.026	0.04
Coefficient of thermal expansion (10^{-6}/°F)	5.5	0.0	-0.5	6.5
Specific gravity	2.4	1.6	1.25	7.9

(Source: American Concrete Institute)

Primerjava kompozitnih materialov z jeklom



Steklena vlakna v epoksidni matrici (GFRP)

Iz materialov tipa FRP se za potrebe gradbeništva danes izdelujejo trakovi/lamele za upogibno ojačevanje konstrukcij , večje plošče in kotniki za strižno ojačevanje, tkanine za kombinirano ojačevanje z obvijanjem konstrukcije, vrvi in podobno.
Lamele, plošče in kotniki so tovarniško izdelani elementi, ki se z lepilom lepijo na pripravljeno površino konstrukcije.

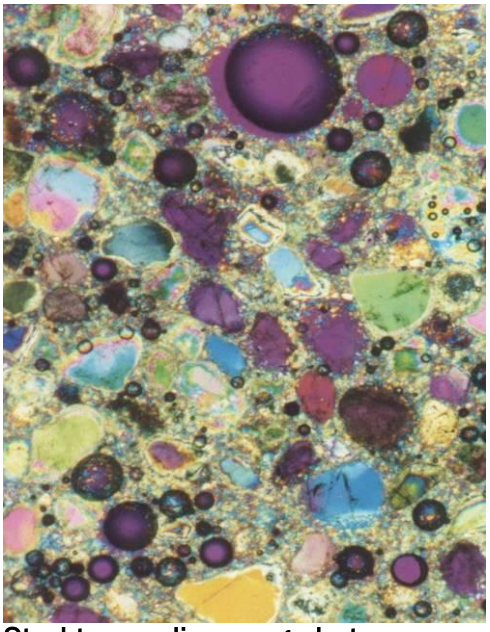
Lamele CFK (CFRP)

Tkanine so tovarniško stkane iz v eno, dve ali celo več smeri orientiranih vlaken, ki se vtisnejo v na konstrukcijo nanešeno lepilo (t.i. Dry System) ali pa se namočijo v redko lepilo in nato prilepijo na konstrukcijo (t.i. Wet System).

Montaža tkanine na AB steber

2.2 Polimerna lepila/malte

Epoksidne smole v gradbeništvu sodijo med najbolj pogosto uporabljene polimere za pripravo polimernih lepil/malt oziroma betonov (PC - POLYMER CONCRETE). V polimernih maltah (betonih) so polimerizirani monomeri edino vezivo, ki nadomestijo cementni kamen v celoti. Kot polnilo se uporabljajo različne vrste osušenih anorganskih agregatov, ki vsebujejo pod 0,5 % vlage.

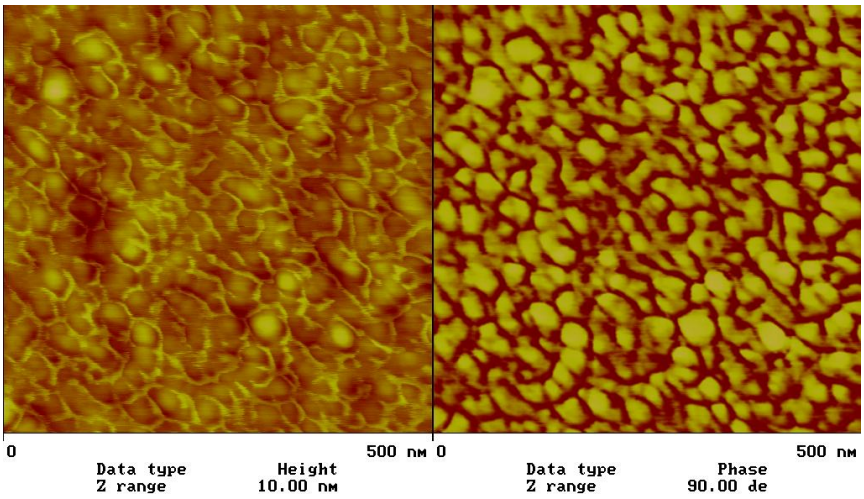


Struktura polimernega betona na osnovi epoksidnega veziva

Vse epoksidne malte/lepila imajo veliko lepilno moč, zato jih uporabljamo za lepljenje. Glede na vrsto materialov, ki jih lepimo, se med seboj razlikujejo po lastnostih epoksidnega veziva in uporabljenih polnil.

2.2.1 Veziva

S terminom epoksidni v gradbeništvu označujemo sistem tekočih smol s trdilcem, ki se po kemijski reakciji v hladnem spremeni v trden proizvod. Ima pa tudi širši pomen, saj označuje spojine, ki vsebujejo epoksidne skupine.



Struktura epoksidnega lepila

To pa so tako osnovne sestavine kot iz njih nastali proizvodi, ki so lahko trdni ali tekoči, kar je odvisno od vrste uporabljenih reagentov v procesu. Nazadnje pa tako imenujemo tudi otrdele zamrežene proizvode, ki nastanejo pri reakciji epoksidnih spojin s primarnimi amini. Edini možen način razlikovanja posamičnih epoksi proizvodov v verigi procesa je dosledno imenovanje po mednarodni IUPAC nomenklaturi, vendar pa je ta način sporazumevanja v veljavi med kemiki, ne pa tudi med gradbeniki, ki jim je proizvod namenjen. Na trgu so tako epoksidne smole na voljo s komercialnim imenovanjem, ki uporabniku ne pove dosti. Nekoliko podrobnejši pregled dokumentacije z lastnostmi proizvoda, ki jo predloži proizvajalec pri nakupu pa nam lahko razkrije nekatere podrobnosti, na podlagi katerih lahko z ustreznim kombiniranjem osnovnih surovin sestavimo proizvod, ki ga ponudimo gradbenišvu v uporabo. V glavnem so to proizvodi, ki nastajajo pri reakciji epiklorhidrina z bisfenol-A in/ali bisfenol-F komponento.
Bisfenol-A in bisfenol-F se med seboj razlikujeta v tem, da prvi nastaja pri kondenzaciji fenola z acetonom, drugi pa pri kondenzaciji s formaldehidom.
Bisfenol-A epoksidne smole in bisfenol-F epoksidne smole se med seboj razlikujejo po tem, da imajo slednje višje epoksi indekse, višje epoksi funkcionalnosti in tako nižjo viskoznost ter večjo odpornost na topila. Obe vrsti smol lahko kombiniramo v bisfenol-A/F smole s srednjo viskoznostjo okoli 6000 mPas, ki pa jo lahko nadalje nadalje znižamo z reaktivnimi topili, prav tako epoksidnimi alifatskimi ali aromatskimi diglicidil etri ter z alifatskimi ali aromatskimi monoglicidil etri, pa tudi s poliglicidil etri. Skupna

lastnost reaktivnih topil je, da vsako izmed njih hkrati poslabša določene lastnosti osnovnih smol v smislu zmanjšane reaktivnosti, mehanske odpornosti in kemijske odpornosti na posamezne vrste raztopin. V določeni kombinaciji in koncentraciji pa lahko izboljšajo prožnost sistema ob tem, da se bistveno ne poslabšajo mehanske in kemijske lastnosti.
Z reaktivnimi topili vplivamo tudi na znižanje tendence h kristalizaciji epoksidnih smol, kar nam omogoča lažjo manipulacijo.
V epoksidni sistem se lahko za zniževanje viskoznosti oziroma povečevanje obdelavnosti vnašajo tudi nereaktivna topila, ki pa izraziteje kot reaktivna topila zmanjšajo reaktivnost in odpornost na kemikalije, še bolj pa vplivajo na padec trdnosti in modul elastičnosti. Zato jih v sestavi lepil v glavnem ne uporabljamo.
Za utrjevanje epoksidnega sistema je bistveno tridimenzionalno zamreženje, ki ga dosežemo z uporabo poliaminov, ki jih v udomačeni terminologiji imenujemo trdilci .
Epoksidna smola reagira s trdilcem v smislu poliadicije amino skupine na epoksidno skupino. V uporabi so različne vrste aminskih trdilcev, od katerih zavisijo tudi končne lastnosti polimerizata: alifatski poliamin, cikloalifatski poliamin, aromatski poliamin, cikloalifatski poliamin, poliaminoamid itd.

2.2.2 Polnila

Polimerno lepilo/malta praviloma vsebuje tudi polnila in razne dodatke.
Osnovna zahteva pri izboru polnil je njihova inertnost (nereaktivnost v sistemu) in suhost. Ustrezne fizikalno mehanske karakteristike dajejo sistemu kvarčna polnila, ki sistemu povečajo trdnost in modul elastičnosti. Z izborom granulometrijske sestave uravnavamo njun padec oziroma prirast. Z večanjem specifične površine polnil povečamo adsorbcijo veziva, kar poslabša obdelavnost. Le-to izboljšamo z uporabo polnil sferične oblike (steklene mikrokroglice), ali polnil s plastovito drsno strukturo (kaolin, sljuda, talk, skrilavec, itd.). Stabilnost svežega sistema dosežemo z uporabo sredstev za preprečevanje sedimentacije, za tiksotropiranje oziroma zgoščevanje, za boljše dispergiranje oziroma omakanje polnil itd. Zaradi lastne kontrole kakovosti zmešanja sistema pred uporabo največkrat uporabljamo dvokomponentni sistem tako, da obe komponenti različno obarvamo oziroma kontrastno niansiramo. Sistem je kakovostno premešan šele takrat, ko zmešana masa izkazuje homogeno barvno strukturo vmesne barve oziroma nianse.

2.2.3 Lastnosti epoksidnih lepil s polnili

Na splošno epoksidna lepila s polnili imenujemo tudi epoksidne malte. Njihova skupna značilnost je, da jih odlikujejo visoke upogibne, natezne, strižne in tlačne trdnosti. Napetosti zaradi krčenja, ki poteče v plastičnem stanju, so zanemarljive. Malte so odporne na deionizirano vodo, razredčene kisline in baze, na nekatere alkohole in maščobe.
Osnovni sistem epoksidne malte je potrebno večkrat modificirati z različnimi aditivi odvisno od zahtev aplikacije (npr. specifične fizikalno-mehanske lastnosti in obstojnost proti kemikalijam) in pogojev pri uporabi (npr. temperatura, vlaga). Dodajajo se aditivi za boljše omočenje polnil in pigmentov, za boljšo oprijemljivost na specifične podlage, za preprečevanje vsebnosti zračnih mehurčkov, za formuliranje samorazlivne malte, za

tiksotropiranje, za izboljšanje obdelavnosti, za izbolšanje obstojnosti proti različnim kemikalijam, za zmanjšanje občutljivosti na vlago in temperaturo itd. V tem smislu proizvajalec modificira že osnovne smolne komponente, večkrat pa se aditivi dodajajo gotovim formulacijam epoksidnih malt.
Za uporabo v gradbeništvu se običajno uporabljajo hladno utrjujoče epoksidne malte. Reakcija polimerizacije je eksotermna. Zato je glede na temperaturne pogoje zelo pomemben pravilen izbor tako epoksidne kot aminske komponente (trdilca), ki odločujoče vpliva na sproščanje toplote med reakcijo, na dinamiko strjevanja, na viskoznost, na plastično krčenje malte ter kasneje tudi na končne mehanske lastnosti malte.
Pri stalni izpostavitvi strjene malte (hladno utrjujoči sistemi) na povišani temperaturi (>60°C) se trdnosti malti znižajo, kar moramo pri uporabi upoštevati.
Reološke, fizikalno mehanske lastnosti in kemijska odpornost tako zavisijo od osnovnega izbora sistema smol oz. trdilcev, uporabljenih polnil, aditivov in temperature pri strjevanju. Ker so epoksidne malte zelo parozaporne, je potrebno poznati vsebnost vlage v materialu na katerega se nanaša epoksidni sloj. Količina vlage v paroprepustnih podložnih materialih običajno ne sme presegati 3 %. Izjemoma je ta odstotek lahko večji, v kolikor difuzijski tok lahko poteka preko druge strani materiala, ki ni prekrit z epoksidno malto.

3 KAKŠNE KONSTRUKCIJE LAHKO OJAČIMO?

Metoda lepljenja dodatne armature je bila razvita predvsem za utrditev AB konstrukcij. Kasneje so inženirji ugotovili, da je z nalepljeno armature možno izboljšati nosilnost in varnost tudi jeklenim in lesenim nosilnim elementom in masivnim zidanim elementom.

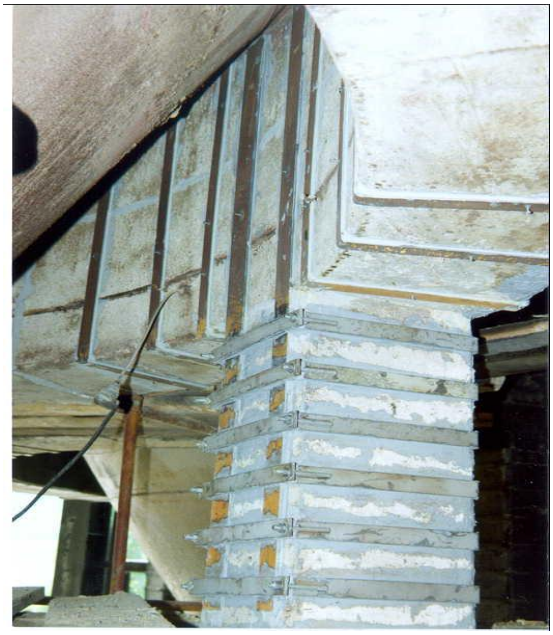
Ojačevanje jeklenega mostu

Ojačevanje lesenega lepljenega nosilca

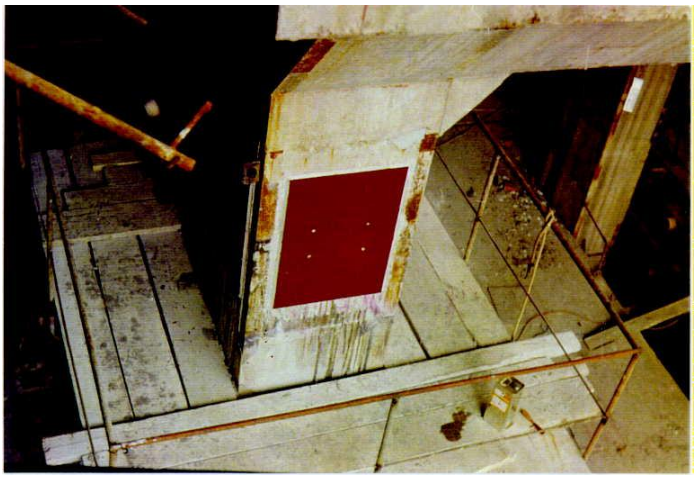
Ojačevanje zidanega dimnika

Postopek in materiali na trgu omogočajo povečanje upogibne, tlačne, natezne in strižne nosilnosti elementov, pa tudi prevzem kombiniranih napetosti.

Upogibna ojačitev AB plošče



Strižna ojačitev AB stebrov in nosilcev



Strižna ojačitev delovnega stika AB stebra

4 KAJ STORIMO V ČASU PRIPRAVE NA IZVEDBO UTRDITVE AB KONSTRUKCIJE?

AB konstrukcijo, za katero predvidevamo, da ni pravilno oziroma dovolj armirana ali pa bo morala v bodoče prenašati dodatno zunanjo obtežbo, na katero prvotno ni bila dimenzionirana, je potrebno temeljito pregledati.
V okviru pregleda konstrukcije opravimo naslednja dela:

- proučimo armaturne risbe in statični izračun, na podlagi katerih je bila konstrukcija zgrajena
- z vizualnim pregledom ocenimo splošno stanje konstrukcije (odkrivanje razpok, razslojevanja krovnih plasti betona in vidnih posledic korozije betona)
- po potrebi na podlagi meritev debeline krovne betonske plasti, globine karbonatizacije, stopnje alkalne zaščite - pH, vsebnosti kontaminentov ocenimo stopnjo korozijske ogroženosti betona in armature
- določimo fizikalno mehanske lastnosti betona, predvsem njegovo tlačno trdnost. Laboratorijsko preiščemo iz konstrukcije odvzete vzorce betona in na objektu ugotavljamo površinsko natezno trdnost (Pull Off test) in površinsko tlačno trdnost (s sklerometrom)

Pull-Off tester

Sklerometer

- določimo položaj, količino in stanje vgrajene armature (inštrumentalne, npr. profometrične meritev na objektu)
- preverimo stopnjo geometrijske nepopolnosti konstrukcije (upogibi, zvitost, izbočenost…). V primeru močnejših deformacij konstrukcije je nujno potrebno določiti obseg plastičnih deformacij vgrajene armature.

Na podlagi ocene, da je krovna plast betona konstrukcije, ki se ojačuje, neustrezna, po potrebi najprej predpišemo “ozdravitev” tega območja – odstranitev nevezanih, razpokanih, razslojenih plasti betona do zdrave podlage, protikorozijsko zaščito vgrajene armature in reprofilacijo konstrukcije do prvotnih gabaritov s kvalitetnimi cementnimi ali drugimi primernimi materiali tako, da se dodatna armature kasneje nalepi na ustrezno kvalitetno podlago.

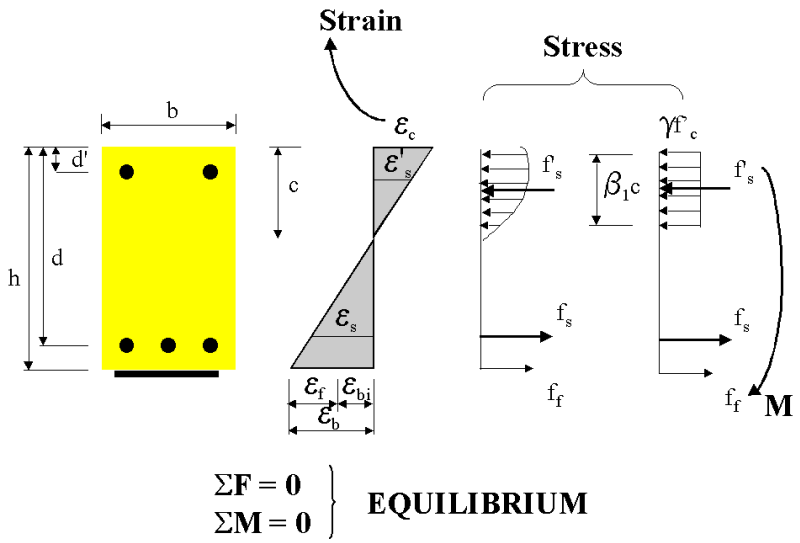
→

Popravilo površinski poškodb na betonski konstrukciji

Količino potrebne dodatne armature, s katero bomo dosegli ustrezno nosilnost konstrukcije in s tem povezano statično varnost gradbenega objekta in njegovih uporabnikov, določimo s statičnim izračunom. Ob tem upoštevamo :

- podatke o konstrukciji, ki smo jih pridobili s proučitvijo osnovne tehnične dokumentacije, s pregledom in s preiskavami konstrukcije
- podatke o obtežbi na konstrukcijo
- podatke o izbrani vrsti dodatne armature in lepila za spojitev konstrukcije in dodatne armature. Praviloma izberemo FRP dodatno armaturo, v določenih primerih pa raje uporabimo jekleno dodatno armaturo. Dodatno armaturo lepimo z epoksidmi lepili, katerih lastnosti z modificiranjem epoksidnega veziva prilagodimo razmeram pri montaži dodatne armature.

Mejno stanje nosilnosti in uporabnosti konstrukcije z dodatno armature preverimo po principih statike. Nosilnost vseh prerezov mora biti ustrezna glede na dimenzije in mehanske lastnosti prerezov in nastopajočo obtežbo.



Ravnotežje linijskega nosilca

Pri oblikovanju dodatne armature moramo upoštevati nekatere splošne principe, ki opredeljujejo optimalno geometrijo same dodatne armature (npr. razmerje širina/debelina nosilnega prereza) in lepljenega spoja (predvsem debelina nanosa lepila in sidrna dolžina dodatne armature). S pravilno izbiro dodatne armature konstrukciji lahko bistveno dvignemo nosilnost in zagotovimo tudi njeno duktilno obnašanje.
V posameznih primerih moramo predvideti tudi posebno sidranje dodatne armature v konstrukcijo, kar zagotavlja njuno medsebojno sodelovanje tudi v najbolj kritičnih pogojih.

5 KAKO PRAVILNO IZVEDEMO SANACIJO?

Vrsto materiala za ojačevanje izberemo glede na vrsto konstrukcije, ki se ojačuje. Ob tem pazimo predvsem na to, da lastnosti dodajanega materiala prilagodimo lastnostim osnovne konstrukcije. Na konstrukcije iz manj kakovostnega betona (MB <30 ozroma trdnostni razred C25/30) dodajamo jeklene ojačitve. Konstrukcije iz kakovostnega, nepoškodovanega betona lahko ojačujemo tako z jekleno kot s kompozitno dodatno armaturo.

Sam postopek izvedbe ojačevanja poteka takole :

- zmanjšamo deformacije konstrukcije, npr. s podprtjem in nadvišanjem konstrukcije za določen delež upogibov. Ta poseg je v nekaterih primerih nujen pogoj, da bo dodatna armatura prevzela svojo funkcijo
- pripravimo betonske površine konstrukcije, na katere so bo montirala dodatna armatura. Površine pripravimo/obdelamo tako, da je kasnejši stik med lepilom in betonom čim trdnejši :

⇒ suho peskanje s peskom, ki se danes skoraj ne uporablja več,
⇒ brezprašno peskanje z jeklenimi kroglicami za odstranjevanje cementne skorjice (otrdelega cementnega mleka), pri čemer poteka sprotno odsesavanje odbitega materiala z magnetnim ločevanjem in ponovno uporabo jeklenih kroglic,
⇒ mokro peskanje za odstranjevanje cementne skorjice (otrdelega cementnega mleka), pri čemer se pesek in odbiti material odstranita z vodo, nato je potrebno izsuševanje do zahtevane največje dovoljene vlažnosti,
⇒ čiščenje z vodnim curkom pod pritiskom 200-500 bar za odstranjevanje labilne in kontaminirane betonske površine za odstranjevanje cementne skorjice (otrdelega cementnega mleka), nato je potrebno izsuševanje do zahtevane največje dovoljene vlažnosti,
⇒ čiščenje z vodno paro za čiščenje zamaščene podlage, nato je potrebno izsuševanje do zahtevane največje dovoljene vlažnosti,
⇒ čiščenje s plinskim gorilnikom za odstranjevanje organskih nečistoč – maščob, olj, barv z izgorevanjem, nato je potrebno mehansko čiščenje,
⇒ rezkanje z rotacijskimi frezami za odstranjevanje globinsko (> 1 cm) kontaminiranih betonskih plasti,
⇒ brušenje za odstranjevanje cementne srajčke, ostankov mineralnih lepil, malt, premazov in lokalnih neravnin,
⇒ ščetkanje z jekleno krtačo za odstranjevanje cementne srajčke in ostankov mineralnih lepil, malt in premazov,
⇒ ročno odbijanje z dletom in kladivom
⇒ strojno odbijanje z lahkimi pnevmatskimi kladivi za lokalno odstranjevanje labilne in kontaminirane betonske površine in plasti betona večjih debelin do armaturnega jekla
⇒ obdelava s kemikalijami za odstranjevanje cementne skorjice s kislinami se uporablja izjemoma, kadar zaradi različnih okoliščin drugi posegi niso možni
⇒ velikokrat se uporablja t.i. postopek »štokanja«, ki pa ne sme biti preveč intenzivno, saj lahko povzročo nastanek mikrorazpok v krovni plasti betona

Priprava površine AB konstrukcije

- površino konstrukcije po potrebi utrdimo z nizkoviskoznim epoksidnim impregnacijskim nanosom
- pripravimo dodatno armaturo, jeklene elemente peskamo do stopnje Sa 2,5 po švedski skali razrjavenja SIS 055900 in protikorozijsko zaščitimo

- montiramo dodatno armaturo s pomočjo epoksidnega lepila in po potrebi drugih pritrdilnih elementov. V primerih, ko ojačujemo vlažne ali mokre konstrukcije, površino betona pred nanosom lepila primerno osušimo

Montaža dodatne stremenske armature

- izvedemo protipožarno zaščito območij konstrukcije, kjer je montirana dodatna armatura. Zaščita omogoči časovno omejeno delovanje lepljenih spojev tudi ob nastopu visokih temperatur.

Lepljeni spoji pridobijo končno trdnost v zelo kratkem času tako, da je utrjeno konstrukcijo možno obremeniti dokaj hitro, praviloma po dveh dnevih (epoksidno lepilo mora pridobiti večino končne trdnosti, kar je odvisno od temperature okolja in predvsem konstrukcije). Kasnejše vzdrževanje ojačane konstrukcije praviloma ni

potrebno, razen v izrazito agresivnih okoljih, kjer moramo čimbolj redno obnavljati finalno protikorozijsko zaščito jeklene dodatne armature.

Fotografije in ilustracije :

Fotoarhivi ZRMK, GI ZRMK d.o.o., GRAS d.o.o.
http://www.google.com/imghp?hl=sl&tab=wi&q=

Viri :

Ojačitev armiranobetonskih konstrukcij z dolepljenjem armature I. del,
raziskovalna naloga ZRMK,
avtorja J. Boštjančič, B. Hočevar,
december 1980

Ojačitev armiranobetonskih konstrukcij z dolepljenjem armature - II. del,
raziskovalna naloga ZRMK,
avtorji J. Boštjančič, M. Bergant, B. Hočevar, I. Janežič,
avgust 1990

Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures – ACI 440.2R-02,
American Concrete Institute,
October 2003

Arhivi ZRMK, GI ZRMK d.o.o., GRAS d.o.o.
Fotografije in ilustracije :

Arhivi ZRMK, GI ZRMK d.o.o., GRAS d.o.o.

http://www.google.com/imghp?hl=sl&tab=wi&q=