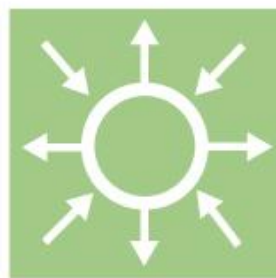
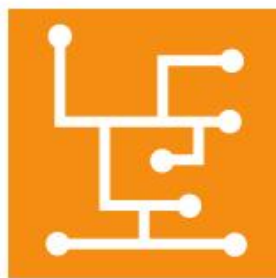


Förstärkning av damm- konstruktioner med hjälp av kompositmaterial

Elforsk rapport 10:71



Martin Hansson

Juli 2008

ELFORSK

Förord

Vattenkraftföretagen*) har via Elforsk stöttat forskning och utveckling inom det betongtekniska området sedan början av 90-talet.

Programmet är inriktat på ett kostnadseffektivt förvaltande av vattenkraftindustrins betongkonstruktioner. Syftet är att ge ett kvalificerat stöd till vattenkraftföretagen.

Målet är att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och teknik som fyller industrins behov, bl a genom att koppla resultaten till RIDAS med tillämpningsanvisningar. Målet är också att bygga kompetens. En uttalad ambition är att samarbeta med övrig industri och landets tekniska högskolor.

Programmet administreras med hjälp av en styrgrupp med följande ledamöter:

Malte Cederström, Vattenfall AB Vattenkraft

Johanna Feldtman, E.ON Vattenkraft Sverige AB

Martin Hansson, Statkraft Sverige AB

Erik Nordström, Vattenfall AB Vattenkraft

Markus Eriksson, Skellefteåkraft

Karin Persson, Fortum

Stefan Norberg, Fortum

Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen

Marcus Hautakoski, Vattenregleringsföretagen

Cristian Andersson, Elforsk AB

Stockholm augusti 2010



Cristian Andersson

Elforsk AB

*)Vattenfall AB Vattenkraft, Fortum Generation, E.ON Vattenkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Statkraft Sverige AB, Jämtkraft AB, Sollefteåforsens AB, Karlstads Energi AB, Jönköping Energi AB deltar i treårsperioden (2007-2009) av ramprogrammet "Underhåll och förnyelse av betongkonstruktioner".

Sammanfattning

Säkerheten i dammkonstruktioner är starkt beroende av ett väl fungerande underhåll och goda reparationsmetoder. En användbar reparationsmetod har visat sig vara att limma fiberkompositer (ofta kolfiberkomposit) direkt på betongkonstruktioner. De främsta förtjänsterna med kolfiberkompositer är frånvaron av korrosion, hög hållfasthet i förhållande till vikten och oftast snabb applicering av kompositen vilket i sin tur kan ge lägre totalkostnad trots relativt höga materialkostnader.

Dimensioneringsanvisningar för de vanligaste förstärkningsfallen finns i handböcker och skrifter från tillverkarna. I Vägverkets Bro 04 anges att kolfiberlaminat limmat direkt på betong får användas för förstärkning av böjmoment- och skjuvkapacitet för broar. Vid dimensionering av en förstärkning med kompositmaterial är det viktigt att tänka på den begränsade töjningskapaciteten på kompositen och samtidigt se till att ett sprött brott undviks eftersom förstärkningsmaterialet är i det närmaste idealiskt linjärelastiskt.

Långtidsbeständigheten är vidare ännu inte fullständigt dokumenterad. För en godkänd kolfiberkomposit kan man dock förvänta sig minst en livstid på minst 30 år (Täljsten, 2006) om riktlinjerna följs och att man beaktar beständighetsfrågor, speciellt vad det gäller fukt och frysning.

Användning av kompositmaterial som efterspänd bergsförankring är en lovande applikation där referensobjekt skulle vara mycket värdefulla.

Summary

The safety of dam structures is dependent on good methods to restore deteriorating and deficient structures. To strengthen concrete structures with Fibre Reinforced Polymer (FRP) has shown some advantages. FRP does not corrode, has high strength in compared to the density and fast application methods which can give a lower total cost compared to traditional repair methods. Handbooks are available for design of strengthening for bending and shear failures. In Bro 04 from the Swedish Road Administration it is accepted to use FRP to strengthen bridges. The completely linear elastic behaviour of the material and the limited strain capacity must be taken into account in the design phase to avoid brittle failure modes.

There is a lack of documentation of the long time durability of FRP:s. For well proven Carbon Fibre Reinforced Polymer systems the expected life time of at least 30 years shall be expected if environmental effects as moisture and freeze-thaw are considered.

No documentation of FRP strengthening in concrete dams was found.

Innehåll

1	Förstärkning med kompositmaterial	1
1.1	Inledning	1
2	Materialegenskaper	3
2.1	Fibrer	3
2.2	Matris	3
2.3	Komposit	4
2.4	Lim	4
3	Beständighet	5
4	Dimensionering av kolfiberförstärkning	11
4.1	Ökning av böjmomentkapacitet.....	11
5	Tillämpning på betongdammar	14
6	Referenser	15

1 Förstärkning med kompositmaterial

1.1 Inledning

Säkerheten i dammkonstruktioner är starkt beroende av ett väl fungerande underhåll. T.ex. är lamelldammar ofta slanka med tunna frontplattor och skivpelare vilket gör att sprickor uppstår då dammen utsätts för mekaniska- och temperaturlaster. I det pågående projektet "Avancerad sprickberäkning" har det konstaterats att för dammsäkerheten kan farliga sprickor uppstå för befintliga konstruktioner. Förstärkningsbehovet blir då omfattande och kostsamt.

Nya förstärkningsmetoder med fiberkompositer (FRP-kompositer, Fibre Reinforced Polymer) har använts med framgång på andra anläggningskonstruktioner, t.ex. broar. Vägverket och Banverket har utfört ett flertal förstärkningar där såväl kostnader och resultat är mer fördelaktigt än traditionella förstärkningsmetoder. Fördelarna med kompositprodukterna är mycket hög hållfasthet, möjlighet till förspänning, bra beständighet, korroderar ej, och är okänsliga för de flesta kemikalier. Produkterna är relativt enkla att applicera, och förstärkningstillämpningarna är flexibla då ett flertal olika metoder finns att tillgå. Möjligheter finns också att förstärka stålkonstruktioner, t.ex. dammluckor med pålimmade kompositmaterial.

Sedan slutet av 1980 talet utförs forskning och utveckling på förstärkta konstruktioner med FRP (Fibre Reinforced Polymer).

Idag finns det dimensioneringsanvisningar för de vanligaste typfallen som t.ex. förstärkning mot böj- och skjuvbrott.

De största fördelarna med kolfiberkompositer är framför allt (Täljsten, 2006):

- Beständigheten. Kolfiber korroderar inte och kräver inte något större underhåll.
- Materialet har hög bärförmåga i förhållande till vikten vilket ofta gör det enkelt att hantera och transportera.
- Förstärkningen blir oftast tunn vilket kan vara viktigt om utrymmet är begränsat.
- Tiden det tar att förstärka är vanligen kort vilket är en ekonomisk fördel.
- Kolfibern kan i vissa fall förspännas i samband med limningen vilket gör att man kan reducera existerande sprickor.
- Totalkostnaden kan relativt traditionella metoder vara lägre trots att materialkostnaderna är högre.

Möjliga nackdelar:

- Långtidseffekterna är inte helt kända. Kolfiber har dock använts i ca 10 år med gott resultat.
- Kolfiberprodukterna är känsliga för mekaniska skador eftersom FRP-materialen är spröda.

- Arbetsmiljön kan bli farlig om epoxilimmet inte hanteras på rekommenderat vis.
- Temperatur- och fuktkänsliga vid limningstillfället.
- Brist på erfarenhet av material och dimensionering.
- Kostnad per kg eller m² kan vara hög.

Konstruktörer som är vana att använda stålarmering bör tänka på att det rör sig om ett material som är anisotropt och därmed har olika egenskaper beroende på om det belastas längs med fibrerna eller tvärs. Denna egenskap påverkar bl.a. skjuvhållfastheten, dymningseffekten på FRP-stänger samt vidhäftningshållfastheten. Vidare kan inte FRP-material plasticeras, brottet blir sprött, vilket måste beaktas vid dimensionering av en förstärkning. Töjningarna i kompositmaterialen begränsas därför för att undvika spröda brott.

2 Materialegenskaper

Kompositmaterialen är uppbyggda av fibrer och matris som tillsammans bildar det sammansatta FRP-materialet. Vid en förstärkning limmas vanligen kompositen sedan mot den förstärkta konstruktionen. Nedan kommer en kort sammanfattning baserad på Täljsten (2006).

2.1 Fibrer

Det finns tre vanliga typer av fibrer som används till förstärkning nämligen:

- Glasfibrer
- Aramidfiber (känd som Kevlar)
- Kolfiber

Dessa fibrer är alla helt linjärelastiska upp till brott.

Glasfibrer delas in i tre grupper beroende på mekaniska/kemiska egenskaper: E-glas, S-glas och AR-glas. Glasfiber av AR-glas lämpar sig bäst till förstärkning av betong då de är mest alkaliresistenta.

Aramidfibrer har högt motstånd mot nötning och motstår både statisk och dynamisk utmattnings mycket bra. Nackdelen är att aramidfibern är känslig mot hög temperatur, hög fuktighet samt UV-ljus och måste därför skyddas.

Kolfibern har ett kolinnehåll på 80 till 95%. I grafitstrukturen är kolatomerna ordnade hexagonalt i planet. Strukturen har en hög densitet. Denna strukturella egenskap gör kolfibern anisotrop med hög styrka och E-modul i samma riktning som planen. Vinkelrätt med planen finns de svagare van der Waal-bindningar. Jämfört med glasfibern och aramidfibern är kolfibern mer beständig mot lösningsmedel, baser och svaga syror i rumstemperatur.

2.2 Matris

För att överföra krafterna mellan fibrerna, skydda dem mot omgivande miljö och nötning används en matris som utfyllnad. Matrisen har stor inverkan på mekaniska egenskaper som E-modul, bärförmåga tvärs fiberriktningen, skjuvegenskaper samt egenskaper vid tryck.

Följande tre matriser används:

- Polyester
- Vinylester
- Epoxy

Epoxy är dyrare än de två andra men har bättre mekaniska egenskaper och mycket bra beständighet.

2.3 Komposit

Beroende på vilken fiber som används kallas de för GFRP, AFRP eller CFRP. Där FRP står för Fibre Reinforced Polymers och G, A, C står för glas, aramid respektive kol. Volymen av fibrerna i förhållande till hela kompositen är i storleksordningen 50 till 70% för formpressade laminat. Kompositer som byggs upp för hand har 25 till 35% fibrer. Applikationer för byggnadskonstruktioner domineras nästan helt av kolfibern.

Kompositen kan levereras i många olika former som t.ex.:

- Väv som limmas i ett eller flera lager. Detta kan vara bra när man inte har regelbundna former. Väven kan ha fibrer i en eller flera riktningar.
- Laminatplatta som limmas på ytan
- Stång som kan fräsas ner och på så sätt integreras i konstruktionen.

Med kunskap om egenskaperna i ingående fibrer och matris samt de relativa proportionerna kan fiberkompositens egenskaper uppskattas. Typiska värden på E-modul, dragkapacitet samt dragtöjningskapacitet finns i Tabell 1 för kolfiberlaminat samt stål.

Tabell 1: Typiska egenskaper för CFRP laminat (FIB Bullentin 14, 2001 återgivet av Täljsten, 2006).

Material	Elastic Modulus, (GPa)	Tensile Strength, (MPa)	Ultimate tensile strain, (%)
Pultruded laminates			
Standard modulus	150	2700	1.8
Medium modulus	200	2200	1.1
High modulus	300	1300	0.5
Mild steel	200	400	>25, yielding 0.2

2.4 Lim

Vid limning mellan kompositmaterial och betong är det mest använda limmet ett tvåkomponentslim av epoxy. Epoxyn har flera fördelar vid applicering t.ex. goda vätningsegenskaper, möjlighet till lång bearbetningstid och slutprodukten har hög styrka, låg krypning och krympning.

Forskning pågår om cementbaserade lim.

3 Beständighet

Beständigheten hos kompositmaterialet och limningen mot betong är en osäkerhet som är svår att bedöma då forskningen inte varit tillräcklig inom detta område. Det finns dock en stor mängd forskning på beständighet vad det gäller applikationer i militär användning samt för rymdindustrin. De omständigheterna som gäller för denna forskning är vanligen inte relevant inom anläggningsområdet. Antalet artiklar indikerar dock att det pågår mycket forskning runt beständighet för kompositmaterial som armering/förstärkning av betongkonstruktioner.

De beständighetseffekter som nämns i litteraturen (bl.a. Täljsten, 2006) är:

- Fuktupptagning. Både reversibla och irreversibla effekter kan uppstå då kompositmaterialet upptar eller avger vätska. Generellt för FRP:s så innebär en högre temperatur och last en minskning av bärförmåga och styvhet.
- Krypning och relaxation. Polymermaterialet i matrisen är viskoelastisk vilket betyder att det kryper mycket i motsats till de linjärelastiska fibrerna som tar de stora lasterna. De viktigaste faktorerna som påverkar storleken på krypningen är temperatur, fukt och tid. Spänningskorrosion kan uppstå och beror troligen på ett utbyte av alkalimetalljoner i glasmaterialet och vätejoner i aggressiv vätska (främst starka baser eller syror) och effekten är större vid belastning. Främst laminat med glasfibrer har denna egenskap om den inte skyddas.
- Utmattningsområde är ett komplext och outforskat område avseende FRP-material. Kolfiberbaserade kompositer verkar dock tåla utmattningsbättre än aramid- och glasfiberbaserade kompositer.
- Fysisk åldring. Polymerer är inte i termodynamisk jämvikt och åldras därmed. Detta medför oftast bl.a. att de blir styvare, sprödare och att relaxationen minskar vid en ständig last. Fenomenet är både temperatur- och lastberoende och kan ha avgörande betydelse på långtidsegenskaperna.
- Frys- och töeffekter. Över 100 fryscykler är inte ovanligt för en betongkonstruktion i Sverige under ett år. Försök har bl.a. redovisats i Hassanzadeh (2000a och 2002). Långtidsförsök för FRP-material är dock mycket ovanliga.
- Alkalieffekt. Fiberlaminat som används för att förstärka betongkonstruktioner kommer i kontakt med alkaliskt vatten vilket speciellt bryter ned glasfibrer. GFPR har visat sig vara känslig för spänningskorrosion i alkalisk miljö. CFRP däremot är inte speciellt känsligt för alkalisk miljö.
- Termisk inkompatibilitet. Vid stora temperaturdifferenser kan skillnader i de termiska expansionskoefficienterna i kompositen respektive konstruktionen ge upphov till höga spänningar och skall därför beaktas vid dimensionering. Den

termiska koefficienten kan studeras i Tabell 2 för stål, glas-, kol- och aramidfiberkompositer.

Beroende på applikationen så kan även egenskaper vid brand och sabotage vara avgörande.

Tabell 2: Termisk expansionskoefficient för stål samt, glas-, kol- och aramidfiberkompositer. Betong har en motsvarande koefficient på 6-11e-6/°C. Återgivet i Täljsten, 2006.

	Steel bar	Steel tendon	GFRP bar	GFRP tendon	CFRP tendon	AFRP tendon
Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ /°C	11.7	11.7	9.9	9.9	0.0	-1.0

En enkel jämförelse av stål samt kompositer med aramid-, glas och kolfiber finns i Tabell 3. Denna tabell visar på kolfibers mer lämpliga egenskaper för anläggningskonstruktioner vid olika miljöbelastningar.

Tabell 3: Fiberkompositmaterial och stål påverkade av olika miljöfaktorer. (+ visar på bra beteende, = medelbra och - visar på dåligt beteende). (Karbhari, 1996 återgivet av Täljsten, 2006)

Criteria	Steel	Laminate with aramid	Laminate with carbon	Laminate with glass
Relaxation and creep	+	-	+	=
Moisture resistance	=	=	+	-
Alkali resistance	+	=	+	-
Thermal stability	=	=	+	-
Resistant against chlorides	-	=	+	=
Fatigue	=	=	+	-
Long-time	+	-	+	=

Enligt Hebling m.fl. (2006) har man historiskt använt mycket höga säkerhetsfaktorer (4-6 inom marin industri, 8-12 för tankbåtar och ledningsrör) för FRP pga. bristande beständighetsdata. Vidare ansågs följande punkter vara kritiska forskningsområden:

- Samla, validera och dokumentera tillgänglig data och göra den tillgänglig för ingenjörer.
- Lågtidstester (mer än 18 månader)
- Försök under kombinerade förhållanden (spänning, fukt, temperatur etc.)
- Utveckla täcksikt för att skydda mot aggressiv miljö och mekanisk skada.

Nkurunziza m.fl. (2005) går igenom litteratur från två årtionden om beständigheten av stänger av glasfiberkompositer (GFRP-bar). De riktlinjer som finns anses konservativa avseende beständighet. Det konstateras att den senaste generationen av glasfiberkomposit har bättre egenskaper än de tidigare men att det ännu inte visats i riktlinjerna. Ett problem är bristen på tillgänglig data och testnormer. Sprickvidden i betong är av mindre betydelse vid användande av FRP som är en icke-metal och därmed inte korroderar.

ACI-440.1R-03 tillåter maximal sprickvidd till 0.5 och 0.7 mm för inomhus respektive utomhus (återgivet i Nkurunziza m.fl., 2005).

I kommitté 440 från American Concrete Institute (ACI 440. 2R-02, 2002) finns det framtaget reduktionsfaktorer vid olika miljöer för kompositförstärkningar, se Tabell 4. Denna reduktionsfaktor skall multipliceras med draghållfastheten och maximal töjning för att få fram påverkan av miljön. Krypbrotsbenägenheten har uppskattats från försök där den relativa kryplasten efter ca 50 år i förhållande till initiala brotthållfastheten är extrapolerad till 0.3, 0.47 och 0.91 för GFRP, AFRP respektive CFRP.

Tabell 4: Reduktionsfaktor pga. miljöbetingelser. (Enligt ACI 440. 2R-02, 2002)

Exposure conditions	Fiber and resin type	Environmental-reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon/epoxy	0.95
	Glass/epoxy	0.75
	Aramid/epoxy	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.65
	Aramid/epoxy	0.75
Aggressive environment (chemical plants and waste water treatment plants)	Carbon/epoxy	0.85
	Glass/epoxy	0.50
	Aramid/epoxy	0.70

I Toutanji & Gómez (1997) testades 56 stycken betongbalkar (50x50x300 mm) i 4-punktsböjning (deformationsstyrt 0.2mm/minut) för att dra slutsatser om påverkan av cyklisk fukt- och saltpåverkan (4h i "havsvatten" och sedan 2h i 35°C och 90% RF). Hälften av provkropparna förstärktes på den dragna ytan med två olika typer av fiber, nämligen glas- och kolfiberkomposit och applicerades med tre olika epoxytyper. Epoxyn fick härda under 3 dygn innan provkropparna utsattes för vatten. Resultaten från förstärkta provkroppar jämfördes mot oförstärkta prover som förvarats i konstant rumstemperatur, 20 °C.

Resultaten kan ses i Tabell 5. I Figur 1 kan man se en utvärdering av värdena i Tabell 5 av den procentuella reduktionen av lastkapacitet vid jämförelse mellan provkroppar utsatta för klimatcykling och provkroppar som förvarats i jämt rumsklimat.

Resultaten kan sammanfattas:

- Förstärkta balkar förvarade i rumsklimat kunde ta 2.2 till 5.1 gånger den last som för oförstärkta balkar efter 75 dygn.
- Förstärkning med kolfiber gav högre lastkapacitet jämfört med glasfiber.

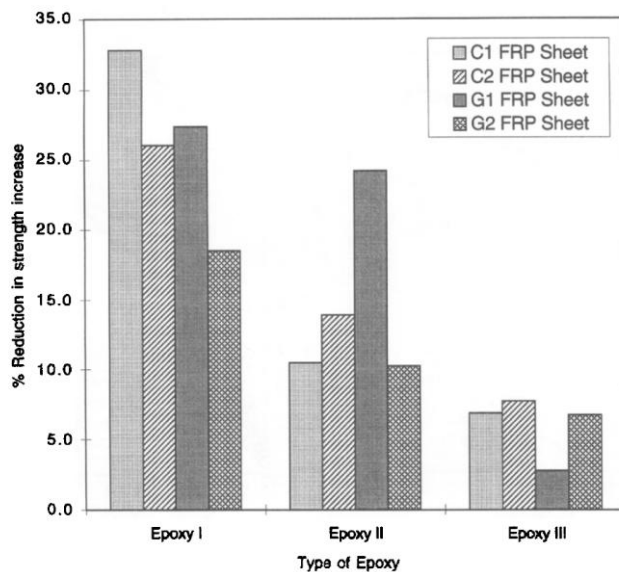
- De förstärkta balkar som utsattes för cyklisk nedsänkning i saltvatten 300 gånger (4h vått och 2h uppvärmning med varmluft) under 75 dygn klarade 2.1 till 4.4 gånger den last som för oförstärkta balkar.
- Maxlasten för de cyklade i saltvatten var oftast högre än för de i konstant klimat vilket tros bero på accelererad åldringsprocess för betong i den torra och varma delen av cyklingen (90% RF och 35 °C). Den relativa höjningen mot de oförstärkta var dock högre för de som förvarats i jämt klimat.
- Kombinationen av tvåkomponents epoxy och fibertyp var avgörande för hur förstärkningen uppförde sig vid försöket.
- De provkroppar som hade hög lastkapacitet hade generellt lägre deformationsförmåga jämfört med provkroppar med lägre kapacitet.
- Fibrernas påverkan av saltvatten kunde inte studeras då alla brotten skedde i fogen mellan betong och fibrer.

Tabell 5: Experimentella resultat. Toutanji & Gómez (1997). (000-referens, C/G kol- respektive glasfiber. Siffran anger använd epoxy vid applicering).

<i>Beam</i>	<i>Epoxy type</i>	<i>Ultimate load (kN) (room conditioning)</i>	<i>Fr*/Fr^a</i>	<i>Ultimate load (kN) (wet/dry conditioning)</i>	<i>Fr*/Fr^b</i>
000	—	2.2	—	2.7	—
C1I	I	8.0	3.7	6.7	2.5
C1II	II	8.7	4.0	9.6	3.6
C1III	III	6.8	3.1	7.8	2.9
C2I	I	9.8	4.5	8.9	3.3
C2II	II	11.3	5.1	12.0	4.4
C2III	III	7.9	3.6	9.0	3.3
G1I	I	6.3	2.9	5.5	2.1
G1II	II	6.5	3.0	6.1	2.3
G1III	III	4.8	2.2	5.8	2.1
G2I	I	7.7	3.5	7.7	2.9
G2II	II	8.9	4.1	9.9	3.7
G2III	III	8.0	3.6	9.2	3.4

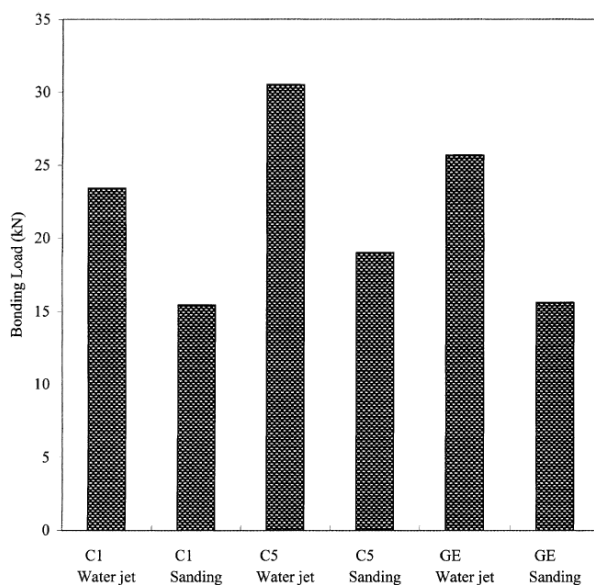
^a Fr*/Fr: ratio of ultimate load of FRP bonded beams to that of unbonded at room temperature.

^b Fr*/Fr: ratio of ultimate load of FRP bonded beams to that of unbonded under wet/dry conditions.



Figur 1: Procentuell reduktion av lastkapacitet vid en jämförelse mellan konstant klimat och våt/torr cykling. Toutanji & Gómez (1997). Utvärderat från Tabell 5.

I Toutanji & Ortiz (2001) studerades slipning och högtryckssprutning med vatten som förarbete till applicering av kompositförstärkning med kolfiber och glasfiber med samma epoxylim. Proven utsattes sedan för dragprov som visade att högtryckssprutning gav både högre brottlast och brottöjning. Detta kan bero på att ytan blir råare jämfört med slipningsbehandlingen. Draglasten vid brott kan jämföras i Figur 2. Inget brott skedde i fibrerna.



Figur 2: Brottlast vid dragning för de olika fibermaterialen (kolfiber, C1 och C5 samt glasfiber GE) och för de två olika förbehandlingsmetoderna med högtrycksvatten respektive slipning. Toutanji & Ortiz (2001)

Frost- och töförsök finns redovisade i Hassanzadeh (2000a). Betongcylindrar (ca 3x24 st.) med vct 0.5, 0.6 och 0.7 göts varav några var obehandlade vid försöken, några var täckta med kolfiber på mantelarean och resterande hade remsor av kolfiberväv med fri betong mellan. Provkropparna utsattes för fryscykler och mellanliggande vattenlagring (totalt 50 fryscykler utfördes mellan +/-20 °C). Löpande skadebedömning skedde genom att ickeförstörande provning av egensvängningar, ultraljud samt volymändring utfördes. Tryckhållfastheten och vidhäftningshållfastheten bestämdes också. Slutsatsen var att skadan berodde på betongens vattenmättnadsgrad oberoende av kolfiberbeläggning eller ej. Skadans storlek är dock beroende av vattencementtalet, vct. I vidhäftningsproverna uppkom brottet i betongen och inte i övergångszonen mellan kolfiberväv och betong. Resultaten visar att betongen i närheten av kompositen kan få frostsador och därför bör kompositen appliceras så att det inte anrikas fukt i betongkonstruktionen.

Vidhäftningsförmågan mellan kolfiberkompositväv och betong undersöktes experimentellt i Hassanzadeh (2000b). Inverkan på vidhäftning av saltlösning (6 veckor i 5% NaCl) samt ytans fuktighet (75 resp. 92%RF) vid applicering av kolfiberkompositen studerades för betonger med vct 0.5 och 0.7. Slutsatsen är att testförhållandena inte påverkade vidhäftning mellan betong och kolfiberkompositen.

Belastade (3 punktsböjning) och obelastade armerade och förstärkta betongbalkar (1.1x0.15x0.1 m) med vct 0.7 testades i Hassanzadeh (2002) under inverkan av frost i kombination med fukt. Balkarna utsattes för ca 28 frostcykler mellan +20°C och -20°C. Det visade sig att kombinationen av fukt och frysning hade en märkbar effekt på de förstärkta balkarnas nedböjning vid brottlaster. Brotten skedde i de flesta fall pga. dragbrott i betongen i ena änden av kolfiberkompositen. Det finns ingen indikation på att vidhäftningen mellan betongen och kolfiberkompositen har försämrats. Inverkan av frostens varaktighet och temperaturgradienten kunde ej bestämmas.

4 Dimensionering av kolfiberförstärkning

I första hand skall man undvika en förstärkning och om möjligt göra beräkningarna mer nyanserade men där det är oundvikligt kan fiberkompositförstärkning vara en möjlighet att utvärdera.

Dimensioneringsregler för konstruktioner med fiberkomposit i betongkonstruktioner finns inte att tillgå i Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK04. I Vägverkets Bro 2004 anges det att kolfiberlaminat limmat med epoxi direkt på betong får användas för förstärkning av böjmomentkapacitet och skjuvkapacitet. I Bro 2004 hänvisas till Täljsten (2006) för beräkningsmetoder och själva förstärkningsarbetet. För dimensionering av t.ex. kolfiberlaminat finns det riktlinjer i Täljsten (2006) och från leverantörer t.ex. STO och Sika. Dimensioneringshjälpen behandlar vanligen förstärkning av böjmoment, skjuvning och axiell belastning men även t.ex. vridning.

Vid en dimensionering av förstärkningen behövs inte bara existerande ritningar och andra dokument användas utan även kunskap avseende de ingående materialens egenskaper vid förstärkningstillfället samt belastningshistorik kan behövas.

För en betongkonstruktör är skillnaderna mot de vanliga tvärsnittskontrollerna inte stora men det tillkommer extra brottmoder då man applicerar kompositen på utsidan av den förstärkta konstruktionen. Det skall också poängteras att kompositerna är nära idealistiskt linjärelastiskt dvs. någon flytning av materialet existerar inte som hos stål. Detta måste beaktas vid dimensioneringen så att inte ett alltför sprött brott kan uppstå.

Det finns ännu inga partialkoefficienter givna i byggnormerna för kompositmaterial. I Täljsten (2006) finns det rekommendationer för hur man skall välja partialkoefficienten γ_m med hänseende på brotttyp, nivå på kontroller, vald FRP-typ samt lastens varaktighet (starkt beroende av fibertyp). I dimensioneringsanvisningar från tillverkare finns det förslag på partialkoefficienter och karakteristiska draghållfastheter samt E-moduler, se t.ex. Täljsten (2006b) och Westerberg (2006).

4.1 Ökning av böjmomentkapacitet

De viktigaste antagandena och brottmoderna vid beräkning av kapaciteten av böjmomentet då ett tvärsnitt förstärks med pålimmad komposit på den dragda sidan av tvärsnittet kommer nedan.

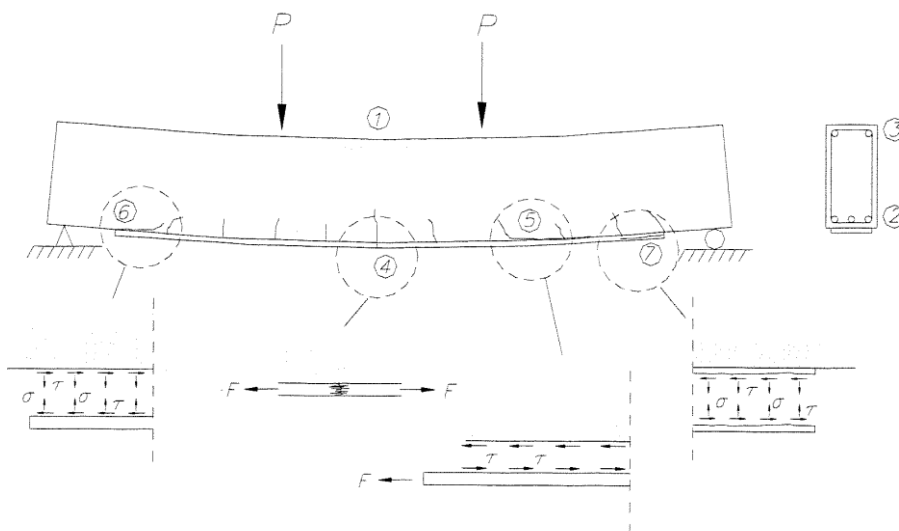
De viktigaste antaganden vid ökning av böjmomentkapaciteten:

- Plana snitt förblir plana
- Fullständig kompositverkan dvs. ingen glidning mellan kompositmaterialet och betongen

- Uppspräckt betong tar inga draglaster
- FRP uppför sig linjärelastiskt

Enligt Täljsten (2006) finns det sju brottmoder enligt Figur 3 att kontrollera för en förstärkning av böjmomentet för ett dubbelarmerat tvärsnitt (inom parentes anges brottyper):

- 1 Krossning av betong (sprött)
- 2 Flytning av dragarmeringsstålet (duktilt)
- 3 Flytning av tryckarmeringsstålet (relativt duktilt)
- 4 Brott i laminatet (sprött)
- 5 Förankringsbrott (oftast duktilt brott)
- 6 Peeling av betongen (sprött)
- 7 Delaminering av laminat (sprött)



Figur 3: Möjliga brottmoder vid böjmomentförstärkning med fiberlaminat. Täljsten (2006)

Dimensioneringsvillkoren baseras på jämviktsekvationer för tvärsnittet. Brott villkoren som används är att begränsa töjningarna för betong $\varepsilon_c < 3.5\text{‰}$ och kolfibern $\varepsilon_f < 0.6\varepsilon_{fu}$. Flytning i armeringsstål tillåts i brottgränstillståndet medan det inte är tillåtet i bruksgränstillståndet. För ett platt laminat är förankringen ofta ett problem. Det har visat sig att det finns en kritisk förankringslängd för platta laminat som är ca 250 mm. Förankringslängd över detta ger ingen extra lastkapacitet. Den maximala last som kan överföras i förankringszonen är approximativt 20% av den maximala dragkraftskapaciteten. Därför dras laminatet ut tills spänningen i laminatet underskrider dessa 20%. Om detta inte är möjligt kompletteras förankringen med mekanisk förankring (Täljsten, 2006). För inprästa laminat gäller dock andra regler.

Mer detaljerade beskrivning om dimensionering av förstärkning av moment-, skjuv-, och tryckkapaciteten finns bl.a. i Täljsten (2006), och från de båda tillverkarna STO och Sika se t.ex. Täljsten (2006b) och Westerberg (2006).

5 Tillämpning på betongdammar

Att tänka på speciellt för betongdammar är beständigheten då man ofta har ensidigt högt vattentryck, vilket ofta innebär att vatten läcker genom konstruktionen. Instängt vatten i konstruktionen kan leda till sönderfrysning och speciell omsorg skall därför läggas på att vatten som kommer in i konstruktionen också kan komma därifrån. Kraftfördelningen i ett förstärkt tvärsnitt bör beaktas med eventuella excentriciteter då man reparerar med ett tunt ytskikt på ett i många fall mycket tjockt betongtvärsnitt.

Det var inte möjligt att hitta några exempel på betongdammar som reparerats med fiberkompositmaterial. Betongpelare stående i vatten har däremot lindats, delvis under vattenlinjen, med fiberväv för att minska kloridinträngningen, Sen & Mullins (2007). Man märkte en klar minskning av korrosion men eftersom detta är utfört i Floridas varma klimat så fanns inga problem med frysning. Dammkonstruktioner utsätts vanligen inte för någon större mängd klorider om det inte fanns med vid gjutningen och ett sådant problem kan inte lösas med utvändigt fiberlaminat.

Användning av kompositmaterial som efterspänd bergsförankring är en lovande applikation där referensobjekt skulle vara mycket värdefulla.

6 Referenser

- Boverket (2004). Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 04. Karlskrona
- Hassanzadeh M. (2000a). Frostbeständighet hos kolfiberförstärkta betongkonstruktioner. Lund: Avd för Byggnadsmaterial.
- Hassanzadeh M. (2000b). Beständighet hos kompositmaterial för infrastrukturkonstruktioner. Lund: Avd. för Byggnadsmaterial, LTH.
- Hassanzadeh M. (2002). Frostbeständigheten hos armerade betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit. Lund: Avd. för Byggnadsmaterial, LTH.
- Helbling C., Abanilla M., Lee L., Karbhari V.M. (2006). Issues of variability and durability under synergistic exposure conditions related to advanced polymer composites in civil infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1102-1110.
- Nkurunziza G., Debaiky A., Cousin P., Benmokrane B. (2005). Durability of GRP bars: A critical review of the literature. *Prog. Struct. Engng Mater*, 7, 194-209.
- Sen R., Mullins G. (2007). Application of FRP composites for underwater piles repair. *Composites Part B: Engineering*, 38, 751-758.
- Toutanji H. A., Gómez W. (1997). Durability characteristics of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets. *Cement and concrete composites*, 19, 351-358.
- Toutanji H., Ortiz G. (2001). The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. *Composite Structures*, 53, 145-462.
- Täljsten B. (2006). FRP strengthening of existing concrete structures. Design guideline. Fourth edition.: Luleå University of Technology.
- Täljsten B. (2006b). Dimensioneringsanvisning för förstärkning av betongkonstruktioner med kompositmaterial. Förstärkning för ökat böjmoment: STO Scandinavia AB.
- Vägverket (2004). Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar. BRO 2004. Borlänge
- Westerberg, B. (2006). Förstärkning av momentkapacitet med pålimmade kolfiberband. Dimensioneringsanvisning. Utgåva maj 2006: Sika Sverige AB.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se