

Sammanfattande beskrivning

av projektet

Reparation och förstärkning av betongkonstruktioner – Miljövänlig förstärkning med hjälp av kolfiberkomposit

Projektet

Det aktuella projektet har genomförts vid Luleå tekniska universitet (LTU). Detta projekt har delfinansierat en doktorandstudie från Licentiat examen, 2007, till Doktorsexamen, 2009. Projektet i sin helhet påbörjades som ett examensarbete 2002 och doktorandstudierna påbörjades 2004. Projektet i sin helhet behandlar förstärkning av befintliga betongkonstruktioner med hjälp av kolfibernet som fästs på betongytan med mineralbaserade bindemedel, t.ex. polymermodifierade cementbruk.

Vid initieringsfasen av detta projekt fanns extremt få publikationer inom detta område. Under studierna inom detta projekt har det internationella intresset för denna förstärkningsmetod vuxit sig mycket stark. För närvarande finns det, förutom Sverige, tre andra länder i Europa som aktivt arbetar med att utveckla denna typ av förstärkningsmetod, nämligen Tyskland, Grekland och Italien. Det förstärkningssystem som utarbetats vid LTU har god konkurrensförmåga i jämförelse med de andra europeiska systemen. Detta har bland annat yttrat sig genom priser för bästa konferensbidrag i USA och en silvermedalj av forskningsinstitutet EMPA i Schweiz. Nedan följer en kort sammanfattning av projektet.

Bakgrund

Samhället har för närvarande investerat åtskilliga miljarder i den befintliga infrastrukturen; så som järnvägsbroar, vägbroar, tunnlar, dammar, fastigheter etc. Dessa konstruktioner kan vara bristfälliga på grund av t.ex. ökade laster, ändringar i det statiska systemet, nedbrytning, håltagningar, fel i utförande- eller projekteringsfasen. Istället för att byta ut dessa konstruktioner skulle dessa kunna repareras och/eller förstärkas och på så sätt skulle ansemliga summor pengar kunna sparas.

Förstärkning av betongkonstruktioner genom att fästa kolfiber (CFRP) med epoxilimmer mot betongytan har genomförts vid LTU sedan 1990-talet. Denna typ av betongförstärkning har visat sig vara mycket bra när det kommer till att öka bärförmågan hos betongkonstruktionen. Genom att använda ett epoxilim fås en mycket god vidhäftning mot betongunderlaget. Kolfibermaterialen i sig har mycket hög hållfasthet, är lätta att hantera och är beständiga i de flesta miljöer. Fastän de epoxibaserade förstärkningssystemen uppvisar mycket god förmåga att höja bärförmågan hos betongkonstruktionerna så har användningen av epoxilimmer i detta hänseende vissa nackdelar. Dessa nackdelar omfattar arbetsmiljö, diffusionstäthet, termiskkompatibilitet samt temperatur vid applicering. När det gäller arbetsmiljön så är arbetet med hårdplaster belagda med restriktioner då handhavandet med dessa limmer kan framkalla allergiska reaktioner. Epoxilimmerna skapar även en diffusionstät yta vilket kan leda till problem vid upprepade nedfrysnings- och upptvinningscykler. Epoxilimmerna har även en viss termiskt inkompatibilitet med betong samt kräver vanligtvis en minsta omgivande temperatur på 10°C vid appliceringen vilket begränsar användningen av dessa limmer.

Det är alltså av intresse att undersöka om epoxilimmerna kan bytas ut mot ett bindemedel som har liknande fördelar som epoxi men saknar nackdelarna. Ett alternativ till epoxilimmerna skulle vara att använda cementbaserat bruk med egenskaper som liknar betongunderlaget. Cementbaserat bruk har inga större restriktioner gällande arbetsmiljö, dessa skapar inte en diffusionstät yta, har egenskaper som liknar betongens samt kan appliceras vid lägre temperaturer. Genom att kombinera ett cementbaserat bruk med fiberkompositer så utvecklas ett förstärkningssystem som är kompatibelt med underliggande betongkonstruktion.

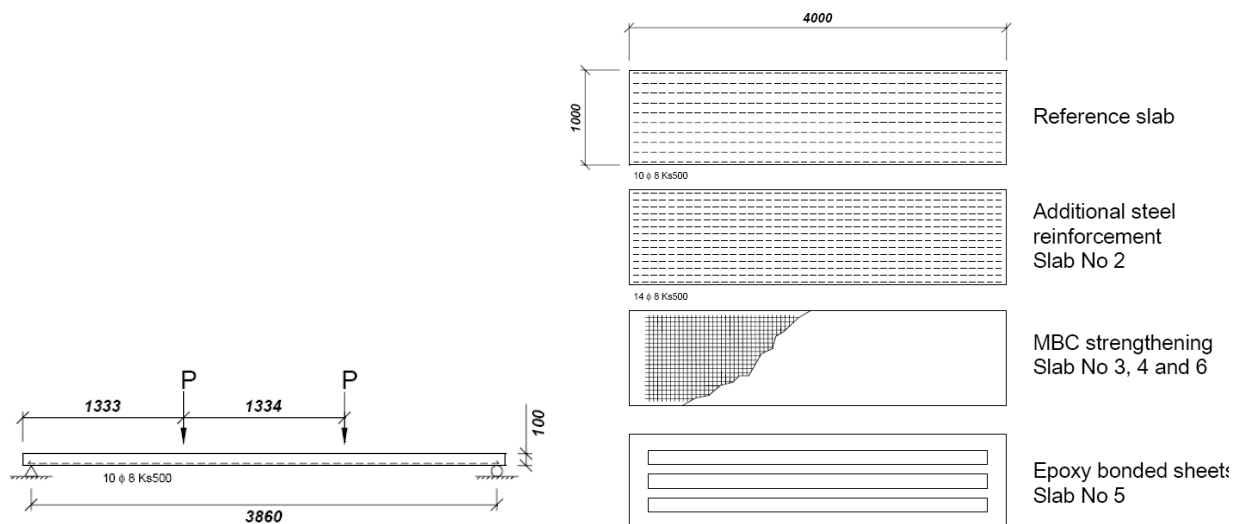
Syfte

Projektets syfte har i grund och botten utgått från att ta fram ett förstärkningssystem som utnyttjar cementbaserade bindemedel tillsammans med fiberkompositer. Detta förstärkningssystem skulle ha konkurrenskraftiga egenskaper vid jämförelse med de epoxibaserade förstärkningssystemen. Huvudsyftet med detta projekt bestod i att utveckla ett förstärkningssystem med cementbaserade bindemedel för tillämpningar inom förstärkning i böjning och tvärkraft. Detta projekt skulle även generera beräkningsmodeller för att analytiskt uppskatta bärförmågan samt även undersöka möjliga appliceringsmetoder för förstärkningssystemet på storskaliga objekt.

Genomförande

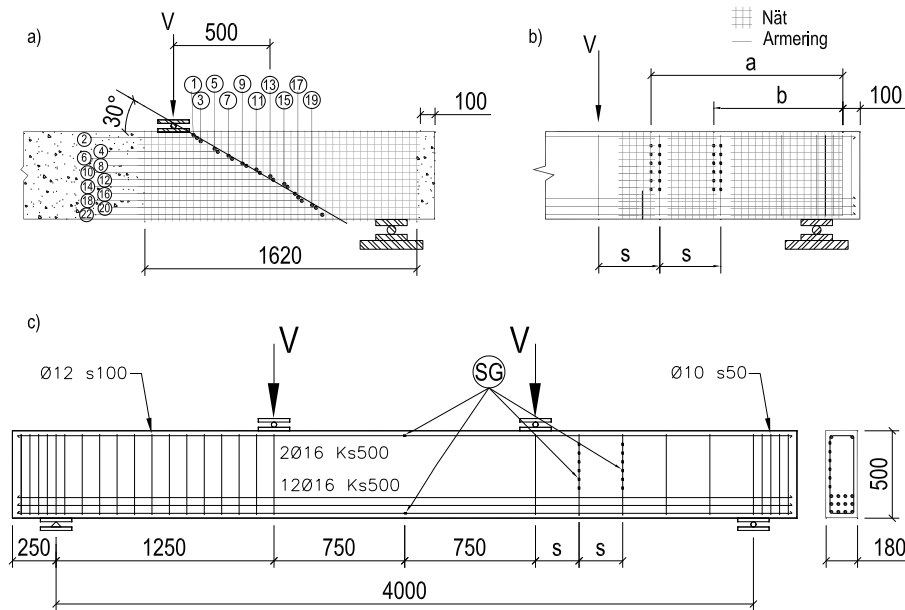
Projektet innehåller en kartläggning av möjliga utformningar av förstärkningssystem som använder cementbaserade bindemedel och fiberkompositer. Denna kartläggning omfattar en litteraturstudie av befintliga förstärkningssystem samt en jämförelse dessa emellan. De vanligaste typerna av fiberkomposit som används i dessa förstärkningssystem är antingen en textil bestående av vävda glas eller kolfiber eller ett nät där fibrerna är impregnerade i en matris. De vanligaste matriserna består av vinylester eller epoxi. Det aktuella förstärkningssystemet i detta projekt består av ett cementbaserat bindemedel och ett kolfibernet. Förstärkningssystemet är benämnt som Mineral Based Composites (MBC).

MBC förstärkningssystemet har undersökts som förstärkning av betongkonstruktioner i både tvärkraft och böjning. Försöksserien i böjning genomfördes på armerade betongplattor som utsattes för fyrpunktsböjning vilket är visat i Figur 1. Denna försöksserie undersökte förstärkningseffekten hos MBC förstärkta plattor. De varierade parametrarna var mängden kolfiber samt att en provkropp var förstärkt med ett kolfibernet där ytan hade belagts med sand för att öka interaktionen mellan det cementbaserade bindemedlet. Som jämförelse hade även en provkropp förstärkts med epoxilimmad kolfiberväv. En av provkropparna utan förstärkning agerade som referensbalk. Även en andra provkropp var utan förstärkning, denna hade extra böjarmering för att jämföra resultaten av förstärkning kontra extra armeringsinnehåll. Resultaten från denna del av studien är redovisade i efterföljande avsnitt.



Figur 1. Försöksuppställning och provkroppar förstärkta i böjning.

De balkar som förstärktes i tvärkraft hade ett rektangulärt tvärsnitt och utsattes för fyrapunktsböjning, geometri och försöksuppställning är redovisade i Figur 2. Dessa provkroppar hade mycket böjarmering samt var utformade så att ett av skjuvspannen innehöll mycket tvärkraftsarmering medan det andra innehöll ingen eller en mindre mängd tvärkraftsarmering. Anledningen till denna utformning av tvärkraftsarmeringen var för att endast ett tvärkraftsspänn skulle förstärkas, nämligen det med ingen eller mindre mängd armering. De parametrar som varierades i denna studie var fibermängd i kolfiberneten, olika styvheter på de cementbaserade bindemedlen samt mängden tvärkraftsarmering. Dessa provkroppar innehöll också ett större mätprogram där töjningar i böjarmering och tvärkraftsarmering uppmättes med töjningsgivare samt även töjningar i kolfibernetet för de förstärkta balkarna. Utöver mätningen med töjningsgivare användes även fotometrisk töjningsmätning på ytan där de största tvärkrafterna verkar. Genom att ha en sådan omfattande töjningsmätning kunde töjningarna uppmätas i armeringen inuti betongbalken, i kolfibernetet inuti förstärkningen samt på ytan av balken eller förstärkningen. Denna mätning utfördes från lastinitieringen fram till brott och därför kunde töjningsutvecklingen uppmätas genom hela pålastningen av balken fram till brottlast.



Figur 2. (a) Töjningsgivare (SG) placerade vid en antagen spricklutning om 30°. (b) Töjningsgivare monterade på vertikala kolfiberlängder i nätet samt tvärkraftsarmering. (c) Försöksuppställning, balkgeometri och armeringsinnehåll samt placering av töjningsgivare på tvärkraftsarmering.

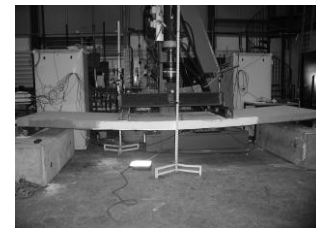
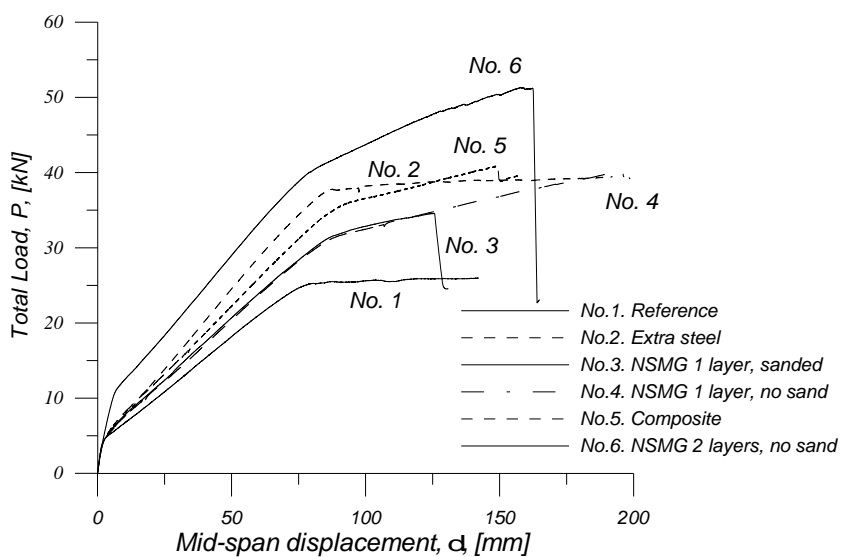
Utöver de experimentella försöken så genomfördes även en studie om det var möjligt att analytiskt uppskatta bärförmågan hos förstärkta provkroppar i böjning och tvärkraft baserade på existerande teorier. Uppskattningen av bärförmågan i böjning genomfördes med en traditionell plant tvärsnitt förfarande medan uppskattningen av bärförmågan i tvärkraft studerades baserad på tre olika förfaranden; traditionell 45° fackverks teori, fackverk med varierande vinkel samt tryckfältsteori.

Resultat

Från kartläggningen av möjliga material i ett cementbaserat förstärkningssystem samt litteraturstudien av existerande system så framkom det att MBC system framtaget inom ramarna för detta projekt hade bäst egenskaper när det gäller förstärkningseffekt. En tydlig tendens för denna typ av förstärkningssystem är att en större verkningsgrad uppnås då fibrerna är impregnerade i en matris. Detta härrör till att det cementbaserade bindemedlet har problem med att väta och penetrera torra fibrer, om däremot fibrerna redan är impregnerade så uppstår en mekanisk förankring av fibrerna i det cementbaserade bindemedlet.

Resultaten från försöksserien av provkropparna förstärkta i böjning är redovisade i Figur 3. MBC systemet fungerar mycket väl och höjer bärförmågan (provkropp No.4) i jämförelse med den oförstärkta referensbalken (provkropp No.1). Provkroppar No.3 och No.4 hade ett lager med kolfibernät vilket motsvarar en fiberarea om 21 mm²/m i den dragna riktningen. Jämförs MBC system (provkropp No.4) med det epoxibaserade systemet (provkropp No.5) så ses att båda dessa provkroppar uppnår liknande bärförmåga. Notera dock att det epoxibaserade systemet hade en fiberarea motsvarande 62 mm²/m. Detta betyder att MBC systemet uppnår samma bärförmåga men med ca 1/3 av fibermängden. Anledningen till detta härrör till brottmoderna. MBC systemet gick till brott genom att de dragna fibrerna gick av medan det epoxibaserade systemet gick till brott genom att kolfiberväven lossnade från undersidan av

balken. Detta betyder att brottmoderna skiljer sig åt, MBC systemet går till brott genom att de dragna fibrerna går av medan de epoxibaserade systemet går till brott genom att kolfiberväven lossnar från underlaget. Om fibermängden i MBC systemet ökas till det dubbla, dvs. $42 \text{ mm}^2/\text{m}$ (provkropp No.6), så ökas bärförmågan och därmed förstärkningseffekten markant med 11 kN. Brottmoden för den sistnämnda provkroppen är fortfarande brott i de dragna fibrerna. Om ytan på kolfibernetet behandlas genom att limma fast sand för att öka interaktionen mellan det cementbaserade bindemedlet och nätet så uppnås en negativ effekt. Genom att binda sand på nätet så fås en lägre bärförmåga jämfört med ett obehandlat nät (provkropp No.3 och No.4). Typiska brottmoder är visade i Figur 3.



Experimental set-up



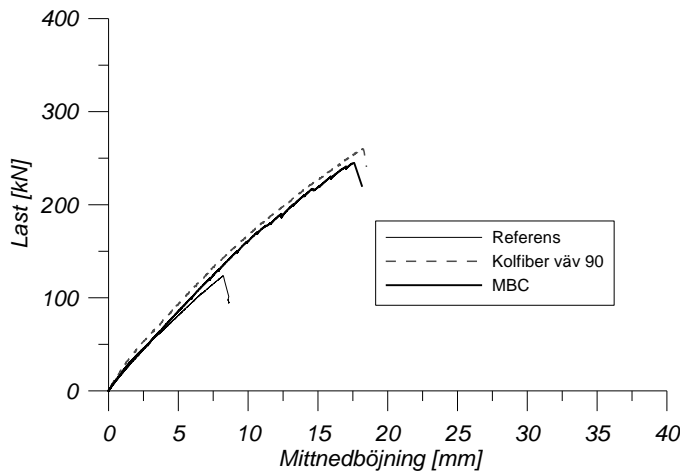
Failure mode for slab No.3, fibre rupture and partial debonding of mortar



Failure mode for slab No.5, breakage of fibre and debonding of the sheet

Figur 3. Last och mittnedböjning samt typiska brottmoder för MBC förstärkningssystemet.

Provkropparna som förstärktes i tvärkraft uppvisar tydliga resultat på att en ökning av fibermängden ger en ökning av bärförmågan. Till vilken utsträckning denna ökning av fibermängden även ger en ökning av bärförmågan finns inte redovisat inom detta projekt, pga. nuvarande begränsningar i tillverkningen av nätet. Det bör dock nämnas att det är möjligt att tillverka nät med högre mängd fiber men att detta inte var möjligt under tidsramarna för detta projekt. Genom att öka styvheten hos det cementbaserade bindemedlet uppnåddes en ökning av spricklasten. Liknande bärförmåga och förstärkningseffekt fås vid jämförelse mellan MBC systemet med en fibermängd på $154 \text{ g}/\text{m}^2$ och det epoxibaserade systemet med en fibermängd på $200 \text{ g}/\text{m}^2$, se Figur 4. Även här så skiljer sig brottmoderna åt, det epoxibaserade systemet lossnade från underlaget vid brottlasten medan MBC systemet gick till brott genom att de vertikala fiberlängderna gick av. Dessa typer av brottmoder liknar de fall som förekom i böjförstärkningen beskrivet i stycket ovan.

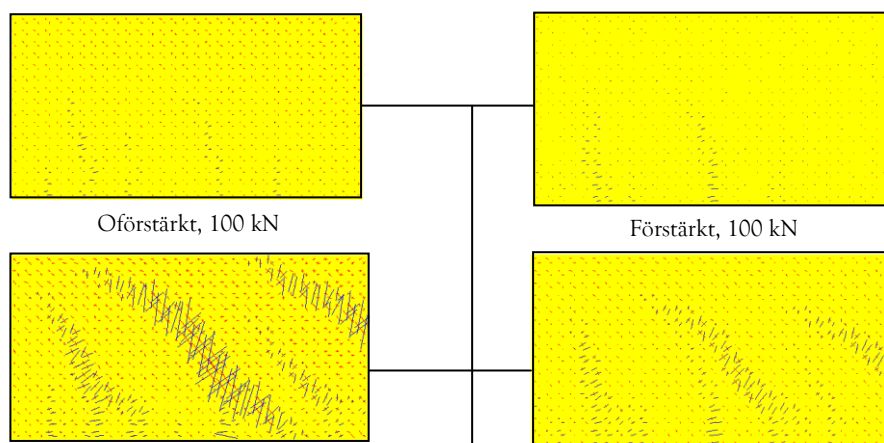


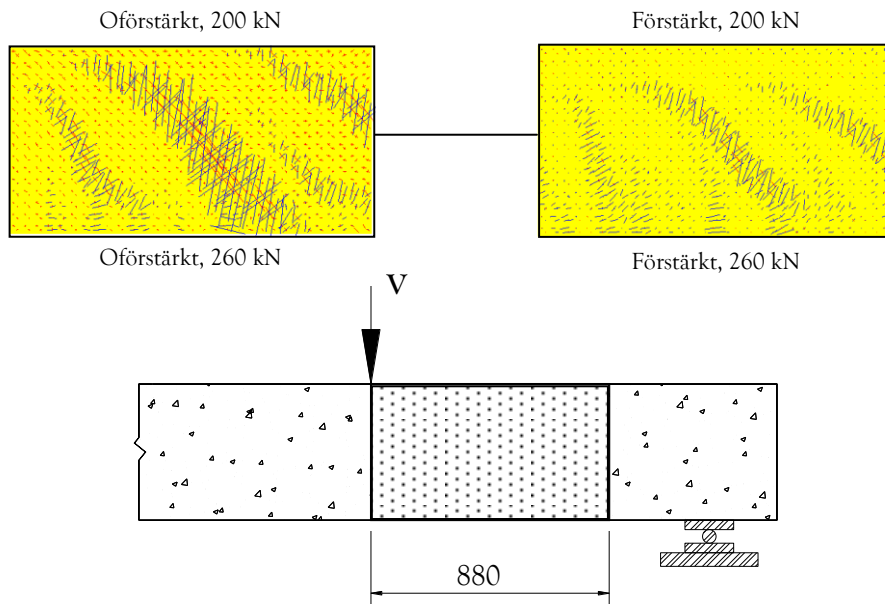
Figur 4. Last och mittnedböjning för balk förstärkt med MBC systemet samt det epoxibaserade systemet.

Den fotometriska töjningsmätningen gav intressanta resultat i form av töjningsfördelningen över tvärkraftsspännat. Figur 5 visar huvudtöjningarna över tvärkraftsspännat med ökande last för provkroppar med tvärkraftsarmering (bygel avstånd $s=300$ mm) med och utan MBC förstärkning. Här är det tydligt att MBC förstärkning minskar huvudtöjningarna och även tvärkraftsprickorna även då lasten ökas. Töjningsutvecklingen i tvärkraftsarmeringen påvisar också lägre töjningar hos MBC förstärkta provkroppar jämfört med oförstärkta, se Figur 6, detta gäller även för provkroppar med högre betongkvalité och mer tvärkraftsarmering. I Figur 6 b är det även visat att MBC förstärkningen bidrar till att minska töjningarna under initial belastning och motverkar utvecklingen av mikrosprickor.

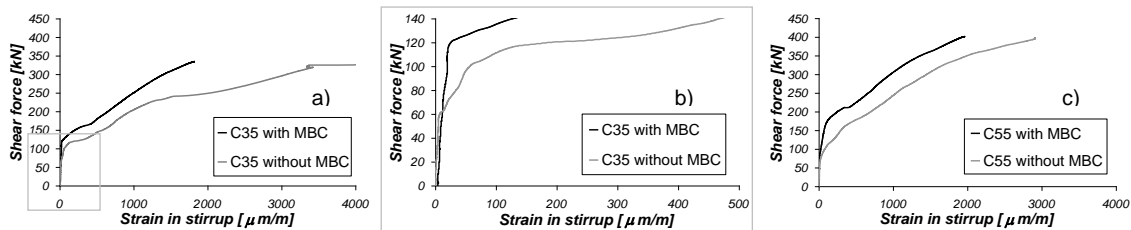
Töjningsutvecklingen uppmätt av töjningsgivarna i kolfibernet är visad i Figur 7, tillsammans med utvecklingen av tvärkraftsprickor. Töjningarna är redovisade för olika laststeg. Töjningsfördelningen är visad längs med höjden av provkroppen. Lokalt höga töjningar förekommer invid sprickpropageringar och spricköppningar. Dessa lokala höga töjningar indikerar på en god vidhäftning och kompositverkan mellan det cementbaserade bindemedlet och kolfibernet.

De beräkningsmodeller som utvärderats inom detta projekt visar att det är fullt möjligt att analytiskt beräkna bärförmågan både för förstärkning i böjning och i tvärkraft baserat på existerande beräkningsmodeller.

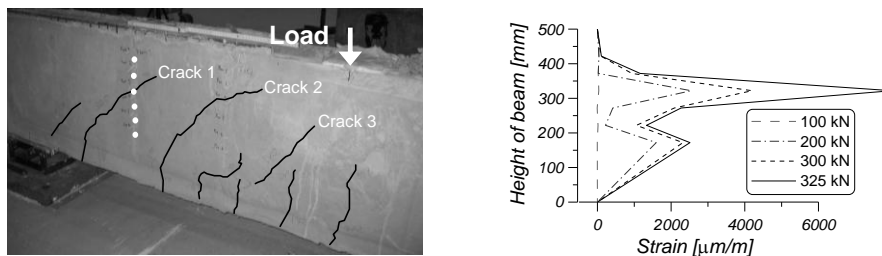




Figur 5. Fotometrisk töjningsmätning för förstärkt och oförstärkt betongbalk med ett inre avstånd på tvärkraftsarmeringen på 350 mm.



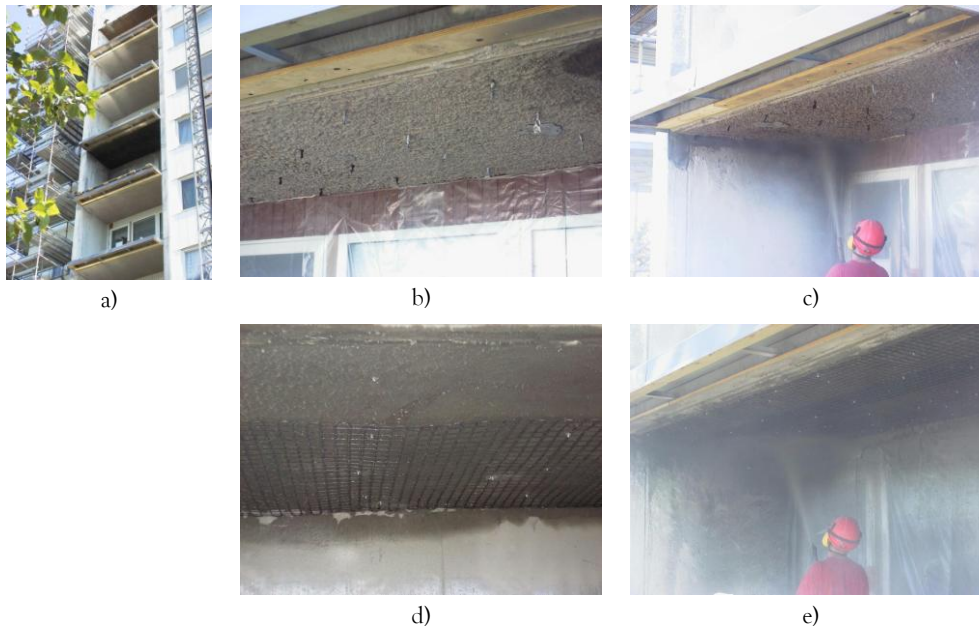
Figur 6. Töjningar uppmätta i byglarna med och utan MBC förstärkning för provkroppar med (a) betongkvalitet motsvarande 35 MPa och ett bygel avstånd på $s=350$ mm där (b) är förstoring av initiella töjningar i föregående bild. (c) betongkvalitet motsvarande 55 MPa och ett bygelavstånd på $s=250$ mm.



Figur 7. Till vänster, propagering av tvärkraftssprickor, vita punkter markerar töjningsgivare på kolfibernet. Till höger, töjningar uppmätta i verticala kolfiberlängder i nätet placerade vid 680 mm från last nedföringen.

Praktiska tillämpningar

Förstärkningssystemet kan appliceras i 4-5 steg. Först måste ytan på konstruktionen som ska förstärkas bearbetas för att ta bort skadad och dålig betong. Ytan kan bearbetas genom sandblästring för att ta bort cementhuden. Sedan monteras distanser som sedan nätet monteras fast i, före monteringen av nätet så sprutas det första lagret med det cementbaserade bindemedlet. Nätet monteras sedan fast i distanserna och det sista lagret bindemedel sprutas. En praktisk tillämpning av MBC systemet är visad i Figur 8, där en balkong blir förstärkt på undersidan.



Figur 8. In-situ förstärkning. (a) Balkong som ska förstärkas, (b) Oförstärkt undersida av balkong med monteringsdistanser, (c) Första lagret bruk sprutas, (d) kolfibernet appliceras på monteringsdistanser, (e) Sista lagret bruk sprutas.

Slutsatser och fortsättning

Det genomförda projektet har uppvisat en ovanligt lyckad utveckling och forskning. MBC systemet har en bra arbetsmiljö, är lätt monteras, kan appliceras på fuktiga ytor och är diffusionsöppen. Alla resultat från både förstärkning i böjning och tvärkraft visar på att bärförmågan höjs i jämförelse med oförstärkta provkroppar. Det är även visat att MBC systemet minskar tvärkraftsprickor och sänker töjningar i tvärkraftsarmeringen vid förstärkning i tvärkraft. MBC system uppnår liknande förstärkningseffekt som epoxibaserade förstärkningssystem. Bärigheten för MBC-förstärkta konstruktioner kan även beräknas med analytiska modeller som baseras i existerande modeller för böjning och tvärkraft.

Några osäkerheter som inte behandlats inom detta projekt och som skulle kunna undersökas i framtida forskning skulle kunna vara effekter av krympning, så som kantlyftning och krympsprickor. MBC systemets beteende vid brandbelastning skulle också kunna behöva undersökas bättre tillsammans med långtidsegenskaperna.

Det finns även en stor potential att vidareutveckla materialen i MBC systemet. Kolfibernet skulle kunna göras med mer fibrer samt istället för att göra ett nät med kolfiber i två riktningar så skulle ett nät med kolfiber i fler riktningar kunna utvecklas. Det sistnämnda skulle speciellt kunna tillämpas på konstruktioner som är biaxiellt belastade. Utöver nätet så skulle även det cementbaserade bindemedlet kunna vidareutvecklas genom att blanda in små fibrer av t.ex. typen polyvinylalkohol (PVA). Dessa PVA fibrer har höghållfasthet och liknande elasticitetsmodul som hos betong och har en stor spricköverbryggande förmåga. Denna spricköverbryggande förmåga skulle kunna reducera höga töjnings- och spänningskoncentrationer i nätet invid öppnande sprickor och på så sätt jämt fördela spänningarna i nätet.

Andra framtida forskningsområden skulle kunna bedrivas inom tillämpningar som kvarvarande formar, konstruktioner med komplexa geometrier samt förstärkning av pelare. Med applikationen kvarvarande formar menas att MBC systemet skulle gutas på plats och då med

ett cementbaserat produkt med hög kvalité samt armerad med en fiberkomposit som inte rostar. På detta sätt skulle betongkonstruktionen få en yta med hög kvalité som klarar av att motstå högre miljöbelastningar och nedbrytning. Med komplexa geometrier menas tunna skalkonstruktioner så som rundvalv och fasad där man med vanlig stålarmring inte klarar förutsättningarna samt att konstruktionen blir lättare med användningen av kompositmaterial. Förstärkning och reparation av pelare genom omslutning skulle även kunna vara ett framtida tillämpningsområde.

Björn Täljsten
Luleå 20090520

Publikationer i samband med projektet

Journal papers

- 2009 Blanksvärd T., Täljsten B. and Carolin A., (2008), "Shear Strengthening of Concrete Structures with the use of mineral based composites (MBC)", Journal of Composites for Construction, Vol 13, No. 25, March/April 2007, pp120-128
- 2008 Blanksvärd T. and Täljsten B., (2008), "Strengthening of Concrete Structures with cement based bonded composites", Journal of Nordic Concrete Research, Vol 2, No. 38, pp 133-153
- 2007 Täljsten B. and Blanksvärd T., (2007), "Mineral-Based Bonding of Carbon FRP to Strengthen Concrete Structures", Journal of Composites for Construction, Vol 11, No. 2, March/April 2007, pp120-128

Inskickade

- Blanksvärd T. and Täljsten B., (2009), "Shear design of concrete structures strengthened with mineral based composites", Submitted to the ACI Structural Journal
- Orosz K., Blanksvärd T., Täljsten B. and Fischer G., (2009) "From material level to structural use of mineral based composites – An overview", Submitted to Journal of Materials and Structures

Konferensbidrag

- Blanksvärd T., Carolin A. and Täljsten B., (2008), "Shear crack propagation in MBC strengthened concrete beams". Proceeding of the fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Zurich, Switzerland, 22-24 July 2008, CD-Publication and extended abstracts.
- Blanksvärd T. and Täljsten B., (2008), "CFRP and mineral based bonding agents to strengthen concrete structures". Proceeding of the 20th Symposium on Nordic Concrete Research and Development, Bålsta, Sweden, 8-11 June 2008, pp 189-190.
- Täljsten B., Blanksvärd T. and Carolin A., (2007), "Mineral based bonding of CFRP to strengthen concrete structures", Int. Conf. in Wroclaw, Poland, October 2007, ISBN 978-83-7125-161-0, pp 331-339
- Blanksvärd T., Carolin A., Täljsten B. and Rosell E., (2006), "Mineral based bonding of CFRP to strengthen concrete structures", Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, 16-19 July 2006, CD-Publication and extended abstracts.
- Täljsten B., Orosz K. and Blanksvärd T. (2006), "Strengthening of Concrete Beams in Shear with Mineral Based Composites Laboratory tests and theory". Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Miami, Florida, USA, 13-15 December 2006, pp 609-612. Best Paper on Conference.
- Johansson T. and Täljsten B., (2005), "End Peeling of Mineral Based CFRP Strengthened Concrete Structures- A Parametric Study", in proceedings of BBFS – International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, Hong Kong, China, 7-9 December, 2005.
- Täljsten B. and Johansson T., (2005), "Mineral Based Bonding of CFRP to strengthen Concrete Structures", in proceedings of ICCRRR 2005 – International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 21-23 November.
- Täljsten B. and Johansson T., (2005), "Mineral Based Bonding of CFRP to Strengthen Concrete Structures", Proceedings of the Nordic Concrete Research Meeting, Sandefjord, Norway, 13

Rapporter

- Blanksvärd T. (2006). *Mechanical properties of different geometries of CFRP grid: tensile evaluation of material properties*. Research report 2006:06, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering
- Johansson T. (2005) *Förstärkning av fönsterram: en förstudie av trätvärsnitt förstärkta med kolfiberkompositstavar*. Technical report 2005:14, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering

Johansson T. (2005) *Strengthening of concrete structures by Mineral Based Composites*. Research report 2005:10, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering. ISSN 1402-1528 / ISRN LT