

Projekt 11884

Reparation och förstärkning av stålkonstruktioner

Inledning

Genom hela människans historia har denna byggt konstruktioner av olika slag. Från början var konstruktionerna i huvudsak bara inriktade på det mest nödvändiga för att överleva dagen till att idag omfatta till exempel transport, boende eller bara rena skrytbyggen. Även om vissa konstruktioner står väldigt länge som pyramiderna så har alla konstruktioner det gemensamma att de åldras. I många fall uppvisar även existerande anläggningar, byggnader och infrastruktur betydligt kortare livslängd än vad som från början avsågs. Anledning till detta är förutom nya brukarkrav och lastbestämmelser att nedbrytningen av material går snabbare än vad som förutsågs när konstruktionerna byggdes. I dag kan vi relativt mycket om detta och för nya konstruktioner tas de åtgärder som krävs för att en framtida hållbar infrastruktur skall erhållas. För att skapa en framtida hållbar infrastruktur måste existerande konstruktioner också i viss mån genomgå omfattande reparations- och förstärkningsåtgärder. Under en tid har fokus lagts på att åtgärda befintliga betongkonstruktioner och ett flertal metoder för att reparera och förstärka dessa finns idag tillgängliga. När det gäller stålkonstruktioner är detta inte fallet.

Vanligt för stålkonstruktioner har varit att man byter ut den aktuella ståldetaljen eller svetsar på nytt material. Nackdelen med dessa metoder är att de, mer eller mindre, förändrar själva utformningen hos den befintliga konstruktionen. Detta är speciellt till stor nackdel när det handlar om äldre konstruktioner med ett stort historiskt eller kulturellt värde. Svetsning kan också medföra att nya oönskade egenspanningar införs i konstruktionen. Dessutom är svetsbarheten hos äldre konstruktioner i stål relativt låg. I det fall man kompletterar en stålkonstruktion med nya delar så ökar man också egentyngheten hos densamma, vilket reducerar möjlig lastökningskapacitet. I vissa fall har även extern förspänning av hela konstruktioner använts - detta är dock inte vanligt.

Föreliggande projekt har studerat möjligheten till att åstadkomma en kostnadseffektiv och hållbar reparation och förstärkningsmetod för bärande stålkonstruktioner genom yttre pålimmad armering. Till yttre armering används genomgående kompositmaterial, och då i första hand kolfiber. Möjligheterna med ett förstärkningsmaterial som kolfiberkomposit vilket har en låg vikt i kombination med en hög hållfasthet är uppenbara. Detta kombinerat med att kolfiberkompositen ofta har en liten utbredning och att de är tunna gör att de kan appliceras genom t ex limning till stålkonstruktioner med ett minimum av störning ur såväl estetisk synvinkel som hänsyn till utförande. Kolfiberkompositens höga beständighet och utmärkta motståndsförmåga mot korrosion och utmattning erbjuder ytterligare fördelar när det gäller appliceringen av materialet på existerande konstruktioner i järn och stål. Tidigare försök har påvisat möjligheter att förstärka för ökad momentkapacitet, men största förstärkningseffekten kan förväntas i samband med förstärkning för utmattning eller för att överföra krafter i förband, vilket studerats i detta projekt.

Det centrala i projektet har varit att studera förstärkning av nitade stålförband samt förstärkning för att förbättra stålkonstruktioners utmattningshållfasthet.

Nitning var den vanligaste metoden att sammanfoga konstruktionsstål i Sverige fram till slutet av 1930-talet. Sedan har gradvis svets- och bultförband tagit över, så idag används inte nitning vid sammanfogning av konstruktionsstål. Att förstärka nitförband är komplicerat. I detta projekt har fiberkompositer används för att skapa en kraftöverföring mellan de nitade detaljerna. Detta ökar även då utmattningshållfastheten för förbandet. Även förbättring av utmattningkapaciteten för befintliga metallkonstruktioner annat än förband har studerats.

Utmattning definieras som försvagning på grund av upprepade belastningar. En konstruktion som upprepade gånger lastas på och avlastas kommer efter åtskilliga cykler att drabbas av utmattning och således haveri om belastning fortsätter. Utmattningen är en ackumulerings-skada, det vill säga en skada där skadan av varje belastning ackumuleras till en totalskada. Det finns ett flertal olika faktorer som påverkar utmattning i en konstruktion där de viktigaste är lastrelaterade faktorer, konstruktionens beskaffenhet samt miljön. En viktig lastrelaterad faktor är vilken last som konstruktionen utsätts för eller rättare sagt spänningsamplituden mellan största och minsta belastning. När beräkningar av spänningsamplitud skall göras, ska först identifiering av vilken typ av spänningsamplitud ske. Till de lastrelaterade förutsättningarna hör även hur många cykler som bron utsätts för.

För en konstruktions utmattningshållfasthet har dess beskaffenhet stor betydelse, det vill säga hur bron är uppbyggd. Positivt ur utmattningssynpunkt är om den är byggd så att det inte blir några större spänningskoncentrationer vilket kan uppkomma vid skarpa hörn, infästningar och vid skarvar. Dessa saker är i och för sig omöjliga att undvika och då gäller det att placera dessa på ett ställe där de utsätts för så låg belastning som möjligt.

Försök

Försöken delades upp i två serier, Nitförband och Utmattning.

Nitförband

I labbet provades fyra olika typer av provkroppar enligt figur 1 nedan. På grund av svårigheterna med att uppnå repeterbarhet med nitade förband så användes bultförband med avrundade bultskallar och muttrar för att nå repeterbarhet och i det längsta möjliga likna ett nitförband. Svårigheterna med att använda ett befintligt nitförband i förhållande till ett bultförband är framförallt att provkroppens utseende inte kan bestämmas, samt osäkerheter kring materialparametrar och utmattningshistorik. De provade provkropparna kan beskrivas enligt:

Referens bultar:

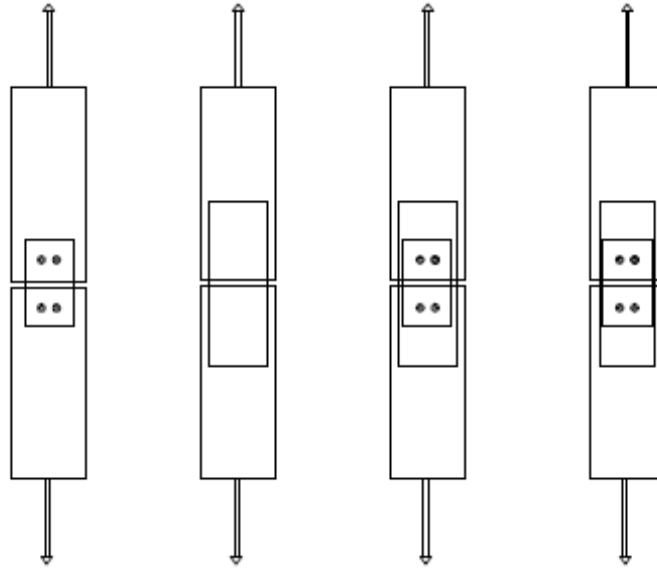
Provkroppen sätts samman med ett bultarförband bestående av fyra 8.8-bultar med diametern 16mm enligt figur ovan. Två provkroppar av denna sort provades.

Referens kolfiber:

Plåtarna sammanfogas med kolfiber vilen limmats fast med epoxi. Två provkroppar av denna modell provades.

Kolfiber och bultar:

En kombination av provkropparna ovan där kolfiber limmades över ett liknande förband som använts i ”referens bultar”. På bultförbandet har bultskallarna samt muttrarna avjämnats för att så långt som möjligt efterlikna nitarnas form, se figur 2. Områdena kring bultarna och övergång förbandsplatta/dragplåt har spacklats upp med epoxi för att undvika tvära kanter som kan ge upphov till luftfickor och spänningskoncentrationer.



Figur 1: Provkroppar för studie av nitförband.

Kolfiber och kapade bultar:

Motsvarande som prov "Kolfiber och bultar" men med skillnaden att bultarna var kapade så att de inte bidrog till kraftöverföringen. Ett exempel på avkapad bult visas i figur 2.



Figur 2: Avrundad bultskalle på avkapad bult

På provkropparna med kolfiber, limmades tio lager kolfiberväv varav två lager med fibrerna ortogonalt med längriktningen på provkroppen. De ortogonala lagren av kolfibern placerades på lagren 4 och 8 räknat från stålet och utåt. Innan limmig slipades provkropparna med sandpapper för att avlägsna eventuell rost. Kolfiberväven var 90 mm bred och förankringslängden valdes till 200 mm vilket gav en total längd av 400 mm på provkropp "Referens kolfiber" och 560 mm på övriga två. Kolfibern som användes var StoBPE 200S vilket betyder att det var en kolfiber av S-typ med 200g/m^2 vilket gjorde att den totala kolfibermängden blev 2kg/m^2 och sida. Provkropparna utsattes för rent deformationsstyrt drag. Samtliga provkroppar utrustades med folietöjningsgivare samt övervakades med fotogrammetri. Fotogrammetri är en mätmetod där förskjutningar inom mätområdet mäts genom analysering av fotografier som tas på det önskade området. Förskjutningarna kan i sin tur översättas till töjningar. Innan belastning sker har provkroppen preparerats med ett mönster inom det tänkta mätområdet. Mönster består av ett oregelbundet mönster av ljusa och mörka fält vilket ger stor kontrast mellan de olika fälten. Mätningen sker genom att foton tas före och under belastning av provkroppen.

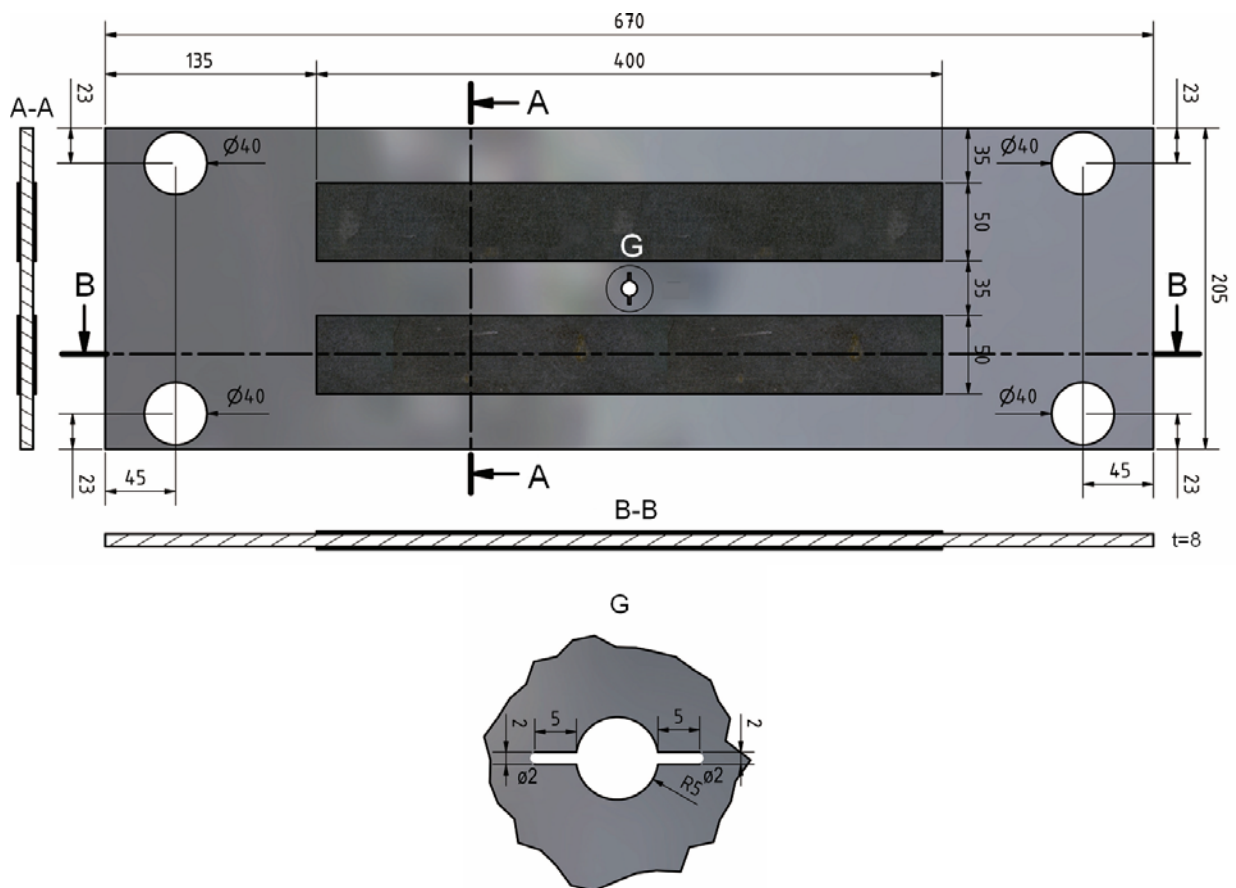
Utmattning

Provkroppar tillverkades av livet från balkar från en demonterad bro. Provkropparna skars ut och förstärktes med utanpåliggande kolfiber, dels som limmad slakarmering och dels som limmad förspänd armering. Här används begreppet armering ekvivalent med betongkonstruktioner då det handlar om att överbrygga sprickor dock orsakade av utmattning. Olika grad av förspänning samt olika kolfiberkvaliteter har studerats enligt tabell 1.

Tabell 1: Studerade parametrar

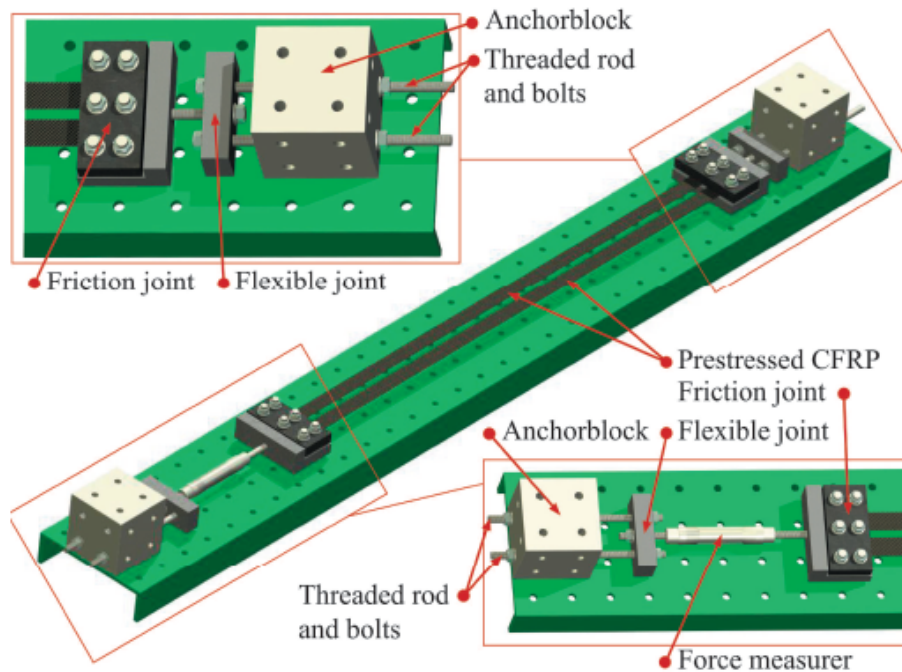
Konfiguration	Förspänning	Kolfiber	Lim
A (1)	-	-	-
B(1,2,3,4)	0 % förspänning	E	S
C (1)	0 % förspänning	M	B
D (1,2,3)	10 % förspänning	E	S
E (1)	8 % förspänning	M	B

Då försöken i huvudsak syftar till att studera olika förspänningsgrad (inklusive ingen förspänning) provades endast en provkropp utan förstärkning. Provkropparna preparerades med en försvagning för att styra och initiera en utmattningsspricka. Varje provkropp förstärktes med fyra laminat symmetriskt placerade runt försvagningen enligt figur 3.



Figur 3: Provkropp vid utmattningsförsök.

För att åstadkomma förspänning av laminaten användes en uppställning enligt figur 4.

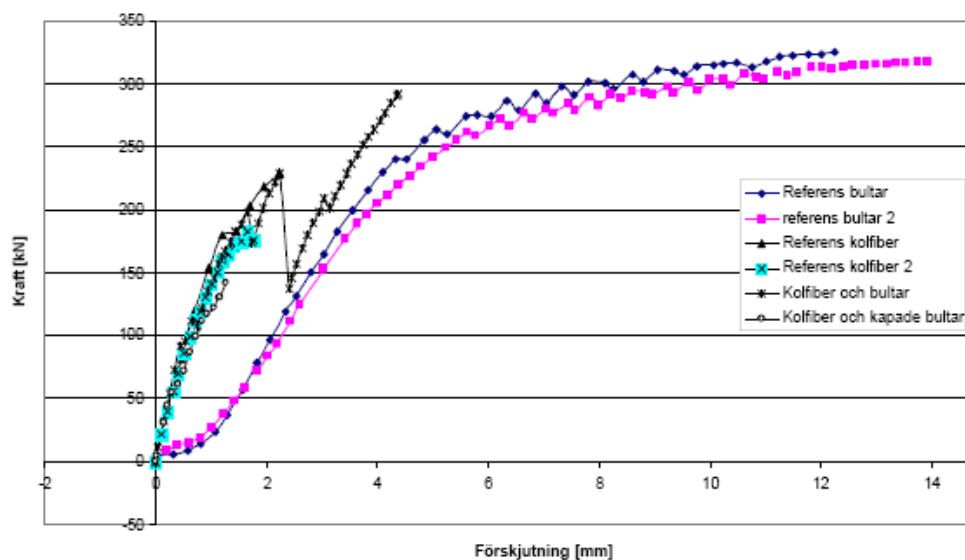


Figur 4: Limning av förspända laminat.

Efter förstärkning placerades provkropparna i belastningsutrustning där de utsattes för cyklisk belastning till dess att utmattningsbrott uppstod, eller att försöket avbröts.

Resultat

Resultaten från de provade nitförbanden verifierade förväntningarna. De ursprungliga bultförbanden är sega men inte så styva initialt. Här kan påpekas att ett intakt ursprungligen korrekt utfört nitförband initialt skulle vara styvare än bultförbandet då nitarna vid installation sväller ut i hållet. Ett åldrat nitförband kan dock visa på liknande rörelser som bultförbandet. Kolfiberförbandet visar ett styvt beteende men också relativt sprött. Lastförskjutningskurvor från de olika försöken visas i Figur 5.



Figur 5: Resultat från förstärkta nitförband.

Vidare ses att ett kombinerat bult- och kolfiberförband får en ökad styvhet initialt och att bultförbandet fortfarande fungerar efter att kolfiberförbandet har brustit. Detta innebär att kolfiberförbandet tar krafter i bruksgränstillståndet vilket förlänger förbandets utmattningskapacitet och att förbandets seghet i brottgränstillståndet finns kvar. Genom att jämföra rent kolfiberförband med ”kolfiberförband och kapade bultar” ses att bultarna påverkar kolfiberförbandets kapacitet negativt men att en betydande effekt ändå kan erhållas av förbandet. Töjningsmätningen med fotogrammetri visade på att kompositen utsattes för töjning och därmed avlastade det underliggande förbandet.

Resultaten från utmattningsförsöken återges i Tabell 2. Den oförstärkta provkroppen klarade 600 tusen lastväxlingar innan brott inträffade. Här definieras förbättringen för förstärkt provkropp som kvoten mellan antal lastväxlingar innan brott mellan förstärkt och oförstärkt provkropp.

Tabell 2: Resultat från utmattningsförsök

Konfiguration	Cykler	Förbättring	Kommentar
A1	$0,60 \cdot 10^6$	-	-
B1	$1,8 \cdot 10^6$	4,05	
B2	$2,0 \cdot 10^6$		
B3	$2,2 \cdot 10^6$		
B4	$3,8 \cdot 10^6$		
C1	$2,6 \cdot 10^6$	4,4	
D1	$18 \cdot 10^6$	>>30	Intakt efter belastning
D2	$1,5 \cdot 10^6$	5,6	Tveksamt utförande
D3	$5,3 \cdot 10^6$		
E1	$18 \cdot 10^6$	>>30	Intakt efter belastning

Förbättringen varierar mellan olika provkroppar inom samma serie. Av de förspända provkropparna hade två tveksamt förankring vilket härör från det mer komplicerade arbetsutförandet. Detta visade sig också i form av begränsad förstärkningseffekt. Provkroppar med väl genomförd förspänning gick inte sönder efter 18 miljoner belastningscykler och dessa försök avbröts. Förbättringen hos dessa provkroppar vid studerat belastning är därmed större än 30. Av de förstärkta provkropparna utan förspänning uppmättes en fyrfaldig förbättring.

Slutsatser

Under projektets genomförande har följande slutsatser kunnat dras:

- ♦ Gamla metallkonstruktioner kan förstärkas med utanpåliggande komposit
- ♦ Förstärkning av nitförband är möjlig.
- ♦ Motståndskraften mot utmattning kan förbättras genom utanpåliggande kolfiberkomposit.
- ♦ Förstärkning med kolfiber över nitförband ger ett styvt förband vilket bidrar till att utmattningshållfastheten ökar.
- ♦ Nitar påverkar kolfiberförstärkningens effekt negativt men samverkan mellan kolfiber och nit ger ett robust förband.
- ♦ Förspänning av laminat är möjligt om än komplicerat
- ♦ Förspänd kolfiberkomposit är effektivare vid studerat lastfall
- ♦ Tillväxten av utmattningssprickor kan stoppas genom användning av förspända kolfiberlaminat.
- ♦ Relativt enkla analytiska modeller kan beskriva verkligheten i viss utsträckning
- ♦ Fotogrammetri är en möjlig metod att mäta töjningar i ett förband.

Innan metoden kan användas fullt ut krävs att fullskaleförsök genomförs och förstärkningseffekten för metoden verifieras genom mätningar. Detta bör ske i samverkan med Banverket, Vägverket eller annan förvaltare med berörda konstruktioner. Mätningarna bör visa på styvhet i förstärkt del, kraftöverföring i komposit samt förändringar i töjningsfältet i anslutning till förstärkningen.

Ytterligare information

Mer information kan lämnas av projektledaren Tekn. Dr. Anders Carolin, vid Luleå tekniska universitet, som enklast nås via e-post: Anders.Carolin@ltu.se.