

Svensk sammanfattning

12963 – Lösning för hållbar rehabilitering av armerade betongväggar

1. Introduktion

Reparation och uppgradering av betongkonstruktioner har ökat kraftigt under de senaste decennierna; på grund av åldrande, förändringar i nyttjande (t.ex. konverteringar av flerbostadshus till kontorsutrymmen), fel vid dimensionering, konstruktionsfel, och exceptionella händelser såsom brand, naturkatastrofer eller explosioner. I många fall handlar det håltagning för nya öppningar som bör noggrant utvärderas eftersom att de orsakar förändringar i de strukturella beteendet. Öppningar undviks oftast i armerad betong, när det är möjligt, för att minimera ogynnsamma effekter på grund av regioner med diskontinuerlig geometri. På senare år har det funnits ett ökande intresse för att utvidga utrymmen genom att skapa öppningar i befintliga solida väggar för att t.ex. ansluta till angränsande rum. Dessa öppningar kan orsaka svagheter och kan, beroende på deras storlek, minska konstruktionens styvhet och bärighet. Det anses allmänt som att dessa effekter ofta kan försummas för "små" öppningar, medan en "stor" öppning vanligtvis förändrar det strukturella systemet betydligt. Dock finns det ingen tydlig definition i litteraturen på hur denna storlek på håltagning påverkar det strukturella beteendet. Införandet av nya öppningar har tydliga negativa effekter, som behandlas i ett flertal studier, senaste exemplen är [1-3]. Således måste effekterna av varje öppning noggrant övervägas i dimensioneringen och åtgärdas genom att ange lämplig förstärkning av detaljer runt håltagningen. Dock är den tillgängliga informationen mycket begränsad när det gäller håltagning i befintliga konstruktioner. Istället krävs ofta reparation (definierat här som åtgärder som helt eller delvis återställer konstruktionens bärförmåga). För att återställa kapaciteten hos betongväggar före håltagning, finns två metoder som vanligen tillämpas. Dessa är antingen att skapa en ram runt öppningen med förstärkta konstruktionsdelar av antingen betong eller stål [4] eller att öka tvärsnittstjockleken [5]. Numera måste ingrepp i befintliga byggnader vara minimal för att minska svårigheter på grund av begränsad användning av konstruktionen före, under och efter reparationen. Andra nackdelar med dessa traditionella metoder är att de: inte är arkitektoniskt tilltalande, kan resultera i en ökning av egenvikten hos elementen och att de är tidskrävande. Av dessa anledningar finns ett alternativ som har använts med framgång under de senaste decennierna, nämligen tillämpandet av fiberarmerade kompositer (FRP – fibre reinforced polymers) som vidhäftas mot den befintliga konstruktionen.

1.1 Tidigare studier

Ett flertal experimentella studier har undersökt beteendet hos solida betongväggar, men för den här typen av väggar med öppningar har effekterna studerats i mycket mindre omfattning. Som

tidigare nämnts kan nya öppningar komma att krävas av olika skäl, t.ex. att installera nya dörrar, fönster eller vägar för ventilation eller värmesystem. Litteratur på beteendet hos axiellt belastade väggar har nyligen granskats av Popescu et al. [6]. Där konstaterades att de flesta tester har fokuserat på beteendet hos enkelriktade väggar [7-12], dvs. väggar fastspända längs de övre och undre kanterna för att utveckla en enaxlig krökning. Det finns mycket färre tester på väggar med dubbelvägsutformning [10, 13-15], definierat här som väggar fastspända längs alla kanter för att utveckla en tvåaxlig krökning, och väggar med öppningar [1, 16-18]. För icke-seismiskt dimensionerade väggar med öppningar var Mohammed et al. [1] de första som undersökte applikationen i samband med FRP-förstärkning. Enkelriktade, betongväggar med 1/3 skala, med storlekar på öppningarna varierandes från 5% till 30% av den totala väggytan förstärktes med hjälp av CFRP (kolfiber) väv. Kolfiberväven placerades runt öppningens kanter i två olika konfigurationer och kapaciteten ökades samtidigt som huvudspänningarna vid öppningens hörn sänktes. En begränsning i studien av Mohammed et al. [1] var att det bara involverade enkelriktade väggar och beaktade inte förstärkningseffekten för väggar med dubbelvägsutformning. Detta innebär att en bättre utformning av förstärkningssystemet för dubbelvägsväggar skulle innebära förstärkning genom FRP-inneslutning (omslutningseffekt). Av denna anledning har den presenterade studien i detta projekt undersökt effektiviteten hos FRP-inneslutning med mekaniska förankringar för att öka den axiella hållfastheten hos betongväggar som försvagats i samband med håltagning.

2. Material och metod

2.1 Utformning av försöksprogram

Väggelementen var utformade i halv skala och var dimensionerade för att representera typiska husväggar, med och utan håltagning (1.8 m × 1.35 m × 0.06 m). Dessa väggelement provades sedan till brott och mer detaljer av de provade elementen är illustrerade i Fig. 1.

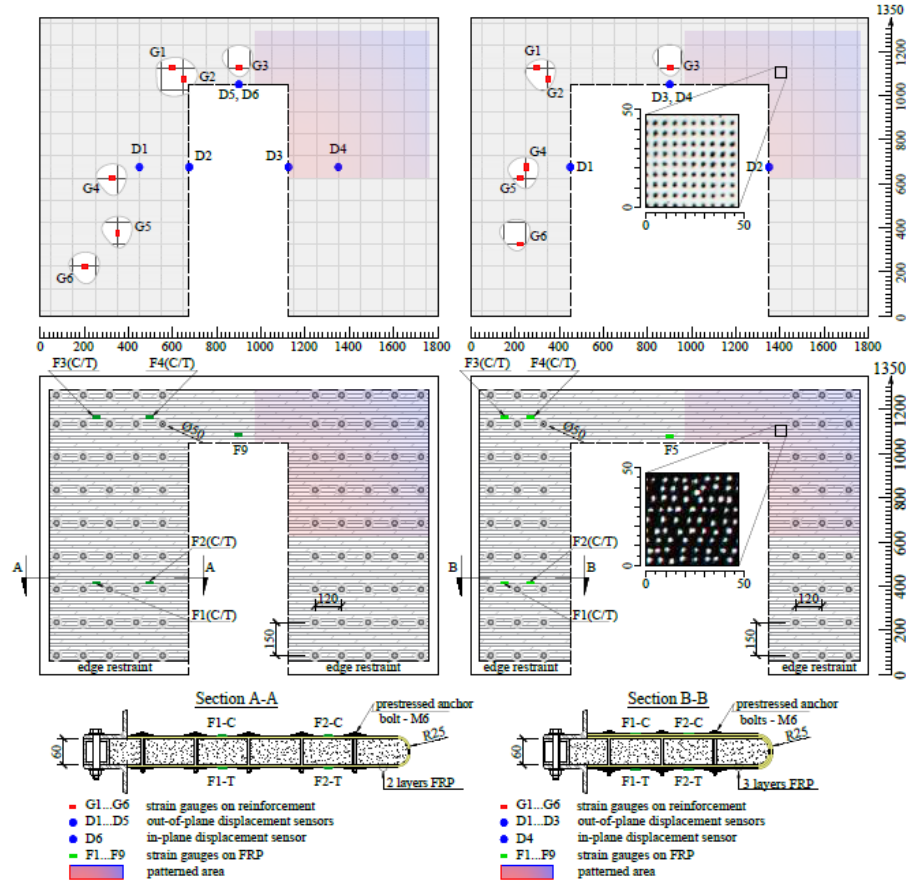


Fig. 1. Details of the tested specimens and instrumentation scheme

Väggarna testades i dubbelvägsutformning och utsattes för axiell belastning med en liten excentricitet i den veka riktningen (1/6 av vägg tjockleken), excentriciteten representerar brister på grund av tjockleksvariationer och förskjutning av elementen i byggprocessen. Försöksmatrisen kan delas in i tre steg, betecknade I-III. Tre prover belastades till brott i steg I: en solid vägg (IC), en vägg med en "liten" symmetrisk håltagning som representerar en dörröppning (IS), och en panel med en "stor" symmetrisk håltagning representerande en dubbeldörröppning (IL). Sprickmönstret vid brott visas i Figur 1b. I steg II, två prover [en med en liten öppning (II-S) och en med en stor öppning (II-L)] förspäcktes först och därefter förstärktes med FRP-systemet och testades till brott. I steg III duplicerades proverna med öppningar av varje storlek och förstärktes med FRP-systemet i osprucket tillstånd belastades sedan till brott. Alla provkroppar armerades med svetsat stål nät $\phi 5/100$ placerat centriskt i ett enda skikt. Förstärkningssystemet bestod av en ensriktad U-formad CFRP väv som fästes via epoxilim samt med mekaniska förankringar.

2.2 Försökupställning

Samtliga prover testades i en provrigg utformad för att representera de byggda randvillkoren. Testriggen var tvungen att simulera ledade anslutningar vid de övre och undre kanterna på

provkroppen medan sidokanterna simulerades som fast inspända. Fyra hydrauliska domkrafter, var och en med en maximal kapacitet på 1,4 MN, var sammankopplade i ett nätverk tillsammans för att tillämpa en jämnt fördelad excentrisk last längs väggens hela bredd. En generell visualisering av provuppställningen redovisas i Fig. 2.

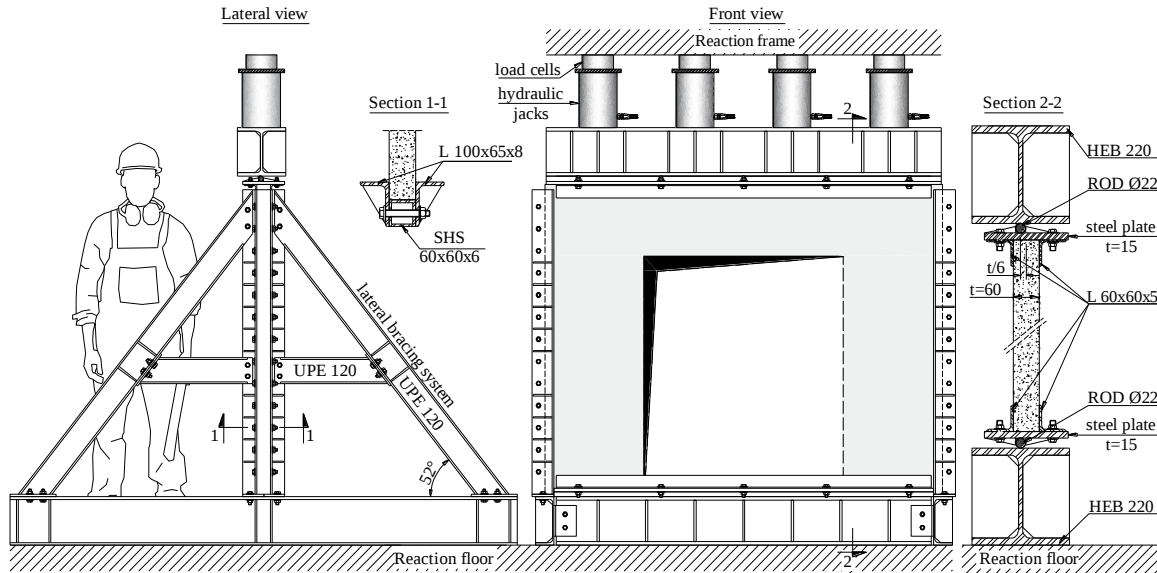


Fig. 2. Schematic view of the test setup

2.3 Materialegenskaper

För att bestämma de mekaniska egenskaperna hos den betong som använts (tryckhållfasthet och brottenergi), göts kuber och balkar med standardiserade storlekar och härdades under identiska villkor som för provkropparna. Den genomsnittliga tryckhållfastheten hos betongen (f_{cm}) blev 62,8 MPa (variationskoefficient, CoV, 3,2%). Den genomsnittliga brottenergin (G_f) uppmättes till 168 N/m (CoV, 11,9%), i enlighet med RILEM för tre-punkts böjprov baserade på fem balkar. Fem prover togs från armeringen och testades för att bestämma armeringens spännings-töjningsegenskaper. Deras genomsnittliga sträckgräns (f_y) och draghållfasthet (f_u) var 632 MPa (CoV, 0,35%) och 693 MPa (CoV, 0,40%), respektive. Kolfiberväven (CFRP) som tillämpades var av fabrikatet StoFRP IMS300C300 och limmades med ett tvåkomponentsepoxy StoPox LH (elasticitetsmodul, 2 GPa). Väven bestod av ensriktade fibrer, hög draghållfasthet (5500 MPa) och elasticitetsmodul (290 GPa) enligt leverantören.

3. Resultat och analys

3.1 Steg I: Oförstärkta väggelement

Väggarna uppförde sig som väntat, utböjning i både vertikal och horisontell riktning. Förskjutningarna var i allmänhet symmetriska, med vissa avvikelser på grund av testriggen och

slumpmässiga variationer i materialegenskaper. Last-förskjutnings diagrammet tillsammans med sprickmönster kan observeras för alla prover och återges i Fig. 3 i samband med brott. Töjningen i stålarmering och betong uppmättes också och mer information om detta återges i [19], töjningen i armeringen på utvalda belastningsnivåer redovisas i jämförelse med de förstärkta provkropparna för att utvärdera töjningsutnyttjandet (se avsnitt 3.2). Alla prover gick till brott där betongen krossades med samtidig spjälkning och buckling av armering. Sprickorna öppnades sent i belastningsskedet av den solida väggen (vid 85% av toppbelastning), och öppnades tidigare i belastningsskedet för prover med både små och stora öppningar (vid 50% och 20% av maxlasten, respektive).

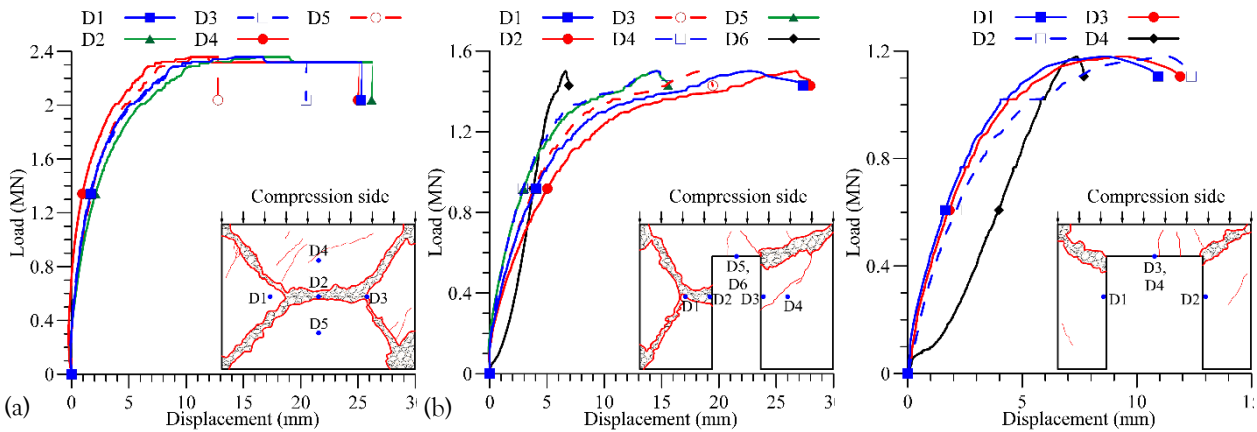


Fig. 3. Load-displacement responses for: (a) solid wall (I-C); (b) wall with a small opening (I-S) and (c) wall with a large opening

Resultaten indikerar att en 25% och 50% minskning av tvärsnittsarean (håltagning) av den solida väggen som orsakats av att införa en "liten" eller "stor" öppning minskar väggens lastbärande kapacitet med nästan 36% och 50%, respektive. Följaktligen, införandet av de små och stora öppningarna resulterade i liknande, skarpa minskningar, i beräknade duktilitetsfaktorer [19]. Dock utgör skillnaderna, i storlek mellan öppningarna, något som starkt påverkar den energiupptagande förmågan. Generellt, kan väggen utan öppning klassificeras som ett "segt element" enligt Park (1988), som har en duktilitetsfaktor mellan 3 och 6, medan väggarna med små och stora öppningar båda skulle klassificeras som element med "begränsad" seghet (duktilitetsfaktor <3). Spänningsnivåerna övervakades i stålarmeringen (töjningsgivare) för att bedöma att antagandet om att armeringen inte bidrar till den totala prestandan av väggen, i form av sprickförekomst, duktilitet och axiell hållfasthet. Hållfasthetsparametern diskuteras endast i termer av observerade töjningar: om huruvida armeringen verkligen bidrar eller inte kan inte fastställas eftersom inga kontrollprover är genomförda av provkroppar utan armering. Drag eller tryck töjningarna som utvecklades i armeringen var signifikanta vid högre belastningar, där vissa armeringsstänger passerade flytgränsen i samband med brott. Medan de vertikala stängerna belastades mer gradvis under belastningen och ingen av dessa uppnådde flytgränsen i samband med brottbelastningen. Den horisontella armeringen passerade

eller var nära att passera flytgränsen i samband med brott, dock noterades inget brott i armeringen i något av försöken.

3.2 Steg II & III: Förstärkta väggar

Figur 4 visar lastförskjutningsdiagrammen som noterats på givarposition D1 (identisk för alla prover) av både förstärkta och referensprovkroppar. Förstärkningen ökade de maximala lasterna vid brott. För de i förväg spruckna provkropparna med små och stora öppningar ökades kapaciteten med 49% och 27%, respektive. Något lägre ökningar i lastkapacitet observerades för de ospruckna provkropparna: 45% och 34% för exemplar III-S1 och III-S2 med små öppningar, respektive, och 13% respektive 26% för exemplar III-L1 och III-L2 med stora öppningar, respektive. Det verkar som att förstärkningssystemet är mest effektivt för redan spruckna väggelement. Förstärkningssystemet förändrade också den initiala styvheten av väggelementen, men mindre för de i förväg spruckna provkropparna än för de ospruckna provkropparna.

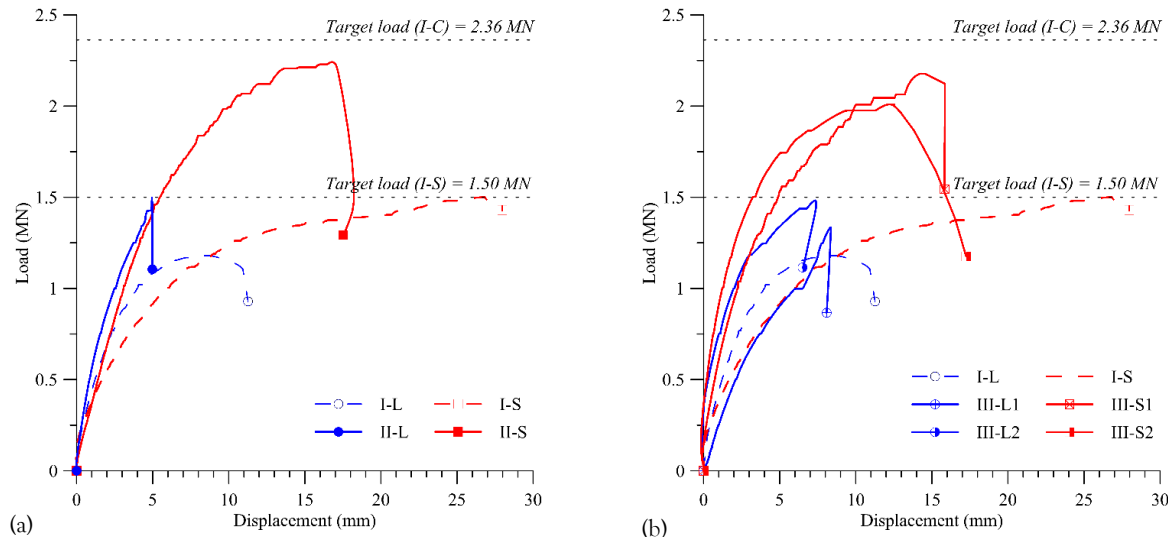


Fig. 4. Load-displacement curves for reference (stage I) specimens and: (a) pre-cracked strengthened (stage II) specimens and b) uncracked strengthened specimens (stage III)

Inga sprickor kunde ses i de belastningscykler för provkropparna som var förstärkta, anledningen till detta var att de var helt täckta av kolfiberväv. Detta i motsats till referensprovkropparna, som med ökade deformationer och sprickbildning visar tydlig sprickbildning och förvarning innan brott. För samtliga provkroppar kunde ljud höras som gav varningar inför det stundande brottet, där dessa ljud/förvarningar var avsevärt tydligare för de förstärkta provkropparna. Krossning av betong, åtföljt av vidhäftningsbrott av kolfiberväven var den huvudsakliga brottmoden för de förstärkta provkropparna. Man kan tro att förstärkningsmetoden även skulle påverka lokala prestandamått såsom krav på stålarmeringen. Således har det här valts töjningsvärden vid vissa belastningar (50%, 75% och 100% av toppbelastning) samt att dessa jämförts med vad som

uppnåddes för oförstärkta referensprovkroppar i Fig. 5 (för enkelhetens skull redovisas endast exemplar från steg III här). Sammantaget för samtliga jämförelser uppvisar provkroppar med försäkringssystemet reducerade töjningar i stålarmeringen jämfört med oförstärkta provkroppar.

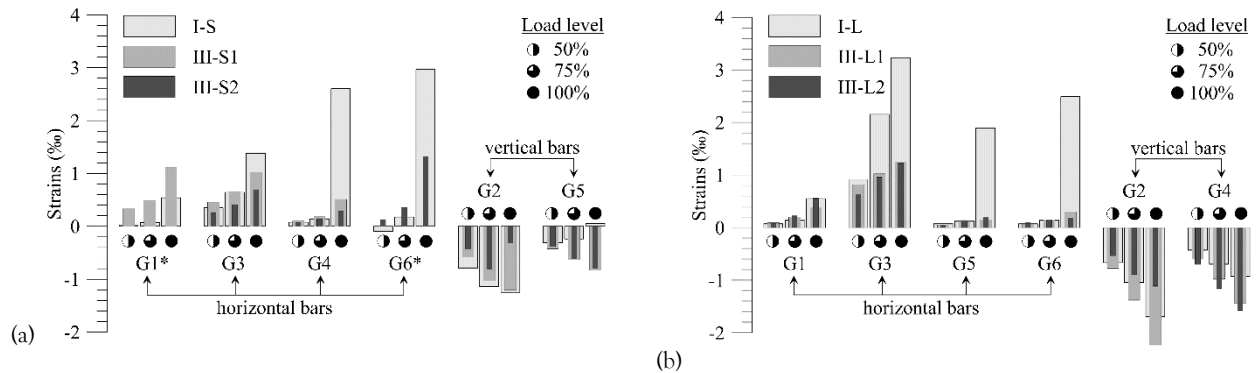


Fig. 5. Strain utilization of the steel reinforcement for reference specimens (Stage I) and uncracked strengthened specimens (Stage III): a) with a small opening (I/III-S) and b) with a large opening (I/II-L).

*Strains not recorded for strengthened specimens due to malfunction of the strain gauge

Uppmätta töjningar i de förstärkta provkropparna noterades också vid maxbelastning och mer information återfinns i [19]. I genomsnitt; töjningarna på den dragna sidan var mer än två gånger högre än töjningarna på trycksidan för provkroppar med stora öppningar och mer än sex gånger högre för prover med små öppningar. Töjningsgivaren placerad vid mittspann av strävan (F9) registrerade de högsta töjningarna, med ett maxvärde på omkring 1,89 ‰. Det bör noteras att dessa uppmätta töjningar nödvändigtvis inte påvisar de högsta värdena i provkropparna eftersom töjnings- och spänningsvägarna kan avsevärt skilja sig från de platser där givarna monterats. Av denna anledning är det mer värdefullt att kunna mäta töjningarna som sker på hela ytan istället för att endast mäta på enstaka positioner. Därför har även fotometrisk töjningsmätning genomförts som klarar av att mäta töjningar och deformationer på provkropparnas yta. De stora påfrestningar som provkroppen upplever vid maximal belastning redovisas i Fig. 6, där kan hela spänningsfältet runt hörnen vid öppningarna utläsas. Sprickorna var mer kompakta och distinkta i de oförstärkta provkropparna (Fig. 6a och e), än i de förstärkta provkropparna, där sprickorna var mer utspridda. Vidare, i alla förstärkta provkroppar tenderade de stora töjningarna att bilda en diagonal väg genom strävan, vilket indikerar att valvverkansseffekten hindras genom att införa förstärkningssystemet och att öppningen återaktiveras på grund av förstärkningen.

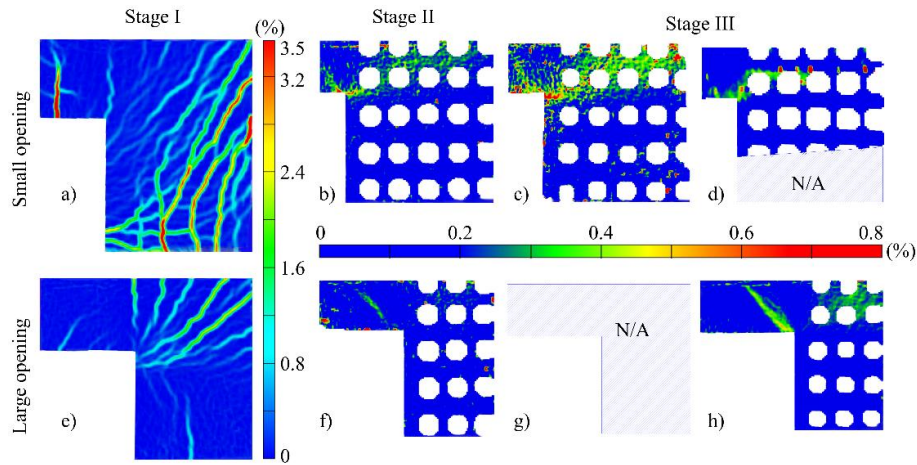


Fig. 6. Major strains detected by 3D-DIC analysis at peak loads of specimens: (a) IS; (b) II-S; (c) III-S1; (d) III-S2; (e) I-L; (f) II-L (90% of peak load); (g) III-L1 and (h) III-L2

4. Slutsatser

De huvudsakliga slutsatserna från forskningsprojektet angående effektiviteten av förstärkningssystemet, inneslutning av väggar med kolfiberväv i samband med håltagning, summeras nedan:

1. Genom att skapa nya öppningar i solida väggelement reduceras deras axiella hållfasthet. De "små" respektive "stora" öppningarna påvisade reduktioner om 36% och 50% av den axiella hållfastheten.
2. Inneslutning med hjälp av kolfiberväv, genom att utnyttja omslutningseffekten, tillsammans med mekanisk förankring ökar den axiella hållfastheten av väggelement i samband med håltagning. Förstärkningen av små och stora öppningar (vilka motsvarade 25% och 50% reduktion av elements tvärsnittsarea) medförde öknings av den axiella hållfastheten med 34-50% och 13-27%, till 85-94.8% och 56.5-63.4% jämfört med väggelement utan förstärkningssystem. Det bör dock noteras att förstärkningssystemet inte klarade av att återskapa den axiella kapaciteten hos ett solitt väggelement. I förekommen försöksserie användes en kolfiberväv som var ensriktad, hade en bi-axiell/tri-axiell väv eller lager med vertikal ensriktad väv tillämpats hade förstärkningssystemet förmodligen blivit mer effektivt.
3. Förstärkningen av väggelement kunde inte undvika en spröd brottmod, t.ex. krossbrott i betong, dock kunde buckling av armeringen och dess explosiva spjälkning undvikas vilket kunde ses i de oförstärkta väggelementen.
4. Det tredimensionella mätsystemet för fotometrisk töjningsmätning var ett ypperligt verktyg för att uppnå pålitliga resultat utan att påverka varken yta eller insida på

provkropparna. Detta mätsystem påvisade även töjningar och deformationer för mätområden som annars inte kunnat mätas på ett effektivt sätt. De observerade sprickmönstren indikerade att provkroppar med stora öppningar beter sig mer som en ram än som en vägg, där alla huvudtöjningar är orienterade mot öppningens hörn. För att kunna sätta rätt tröskelvärden för ”små” respektive ”stora” håltagningar i väggelement (med försumbara samt icke försumbara effekter) samt den optimala övergången från betongvägg till betongram vid dimensionering, behövs mer forskning och försök samt analys.

Resultaten från detta forskningsprojekt har gett bra resultat samt nya infallsvinklar för att studera betongväggar i samband med håltagningar, samt betongväggar med öppningar rent generellt. Förstärkningssystemet som utvecklats inom ramarna för detta forskningsprojekt har visat sig vara lyckosamt för att upgradera bärförmågan i samband med håltagning. Dock är tillämpandet av förstärkningssystemet fortfarande i behov av utveckling gällande dimensionering. Ickelinjär analys, både analytisk och numerisk, kan tillämpas tillsammans med en större försöksmatris för att bedöma effekter av signifikanta parametrar (t.ex. större excentricitet, asymmetrisk håltagning och/eller andra randvillkor).

Referenser

- [1] Mohammed B, Ean LW, Malek MA. One way RC wall panels with openings strengthened with CFRP. *Construction & building materials*. 2013;40:575-83.
- [2] Floruț S-C, Sas G, Popescu C, Stoian V. Tests on reinforced concrete slabs with cut-out openings strengthened with fibre-reinforced polymers. *Composites Part B: Engineering*. 2014;66C:484–93.
- [3] Todut C, Dan D, Stoian V. Numerical and experimental investigation on seismically damaged reinforced concrete wall panels retrofitted with FRP composites. *Composite Structures*. 2015;119:648-65.
- [4] Engel P, General rehabilitation techniques using steel, http://www.constructalia.com/english/renovation_with_steel/ii_general_rehabilitation_techniques_using_steel#.VMPsNP6G9Wg, 2015.01.23
- [5] Delatte N. *Failure, Distress and Repair of Concrete Structures*: Woodhead Publishing; 2009.
- [6] Popescu C, Sas G, Blanksvärd T, Täljsten B. Concrete walls weakened by openings as compression members: A review. *Engineering Structures*. 2015;89:172-90.
- [7] Pillai SU, Parthasarathy CV. Ultimate strength and design of concrete walls. *Building and Environment*. 1977;12:25-9.
- [8] Saheb M, Desayi P. Ultimate strength of RC wall panels in one-way in-plane action. *Journal of structural engineering*. 1989;115:2617-30.
- [9] Fragomeni S. *Design of Normal and High Strength Reinforced Concrete Walls*: University of Melbourne, Australia; 1995.
- [10] Doh JH. *Experimental and Theoretical Studies of Normal and High Strength Concrete Wall Panels*: Griffith University, Australia.; 2002.

- [11] Ganesan N, Indira PV, Santhakumar A. Prediction of ultimate strength of reinforced geopolymer concrete wall panels in one-way action. *Construction and Building Materials*. 2013;4891-7.
- [12] Robinson G, Palmeri A, Austin S. Design methodologies for one way spanning eccentrically loaded minimally or centrally reinforced pre-cast RC panels. *Engineering structures*. 2013;561945-56.
- [13] Swartz SE, Rosebraugh VH, Rogacki SA. A method for determining the buckling strength of concrete panels. *Experimental Mechanics*. 1974;14138-44.
- [14] Sanjayan JG. Load capacity of slender high-strength concrete walls with side supports. *ACI structural journal*. 1999;96571-6.
- [15] Saheb M, Desayi P. Ultimate Strength of R.C. Wall Panels in Two-Way In-Plane Action. *Journal of Structural Engineering*. 1990;1161384-402.
- [16] Saheb M, Desayi P. Ultimate strength of RC wall panels with openings. *Journal of structural engineering*. 1990;1161565-78.
- [17] Doh JH, Fragomeni S. Ultimate load formula for reinforced concrete wall panels with openings. *Advances in Structural Engineering*. 2006;9103-15.
- [18] Lee D-J. Experimental and theoretical study of normal and high strength concrete wall panels with openings. Australia: PhD Thesis: Griffith University; 2008.
- [19] Popescu C. FRP Strengthening of Concrete Walls with Openings. *Licentiate Thesis*. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology; 2015.