

# Svensk sammanfattning

## 13246 – Rehabiliteringsmetoder för håltagning i armerade betongväggar

### 1. Introduktion

Renovering och reparation av byggnader med betongstommar har ökat markant de senaste årtionden, mestadels beroende på att dessa börjar bli ålderstigna och att brukandet och kraven förändras över tid. Andra orsaker till renovering och reparation är projekterings- eller utförandefel samt extrema belastningar som t.ex. vibrationer, sättningar, explosioner etc. I vissa fall förekommer även behov av att uppgradera konstruktionen genom att förstärka bärande element för att uppnå högre bärförmåga. Åtgärder i samband med renoveringar och reparation beror på bakomliggande behov. En vanlig åtgärd är håltagning i betong, en sådan åtgärd kan förändra det strukturella verkningssättet och en sådan åtgärd måste därför tillståndsbedömmas ordentligt. Öppningar eller hål i betongkonstruktioner undviks om möjligt för att minska på de negativa effekter som följer med diskontinuitetsregioner. Men om byggnaden redan är byggd och behovet finns att öka öppna ytor mellan rum, förändra verksamheten genom att nya öppna upp för nya passager, större fönsterpartier i bärande element etc., behövs mer drastiska åtgärder för att säkerställa strukturell integritet. De här typerna av håltagning kan således medföra en nedsatt bärförmåga och kan beroende på storlek innebära en reduktion av konstruktionens styvhet. Traditionellt sett har två metoder tillämpats för att förstärka eller reparera betongväggar i samband med håltagning. Den ena metoden går ut på att skapa en ram runt öppningen av armerad betong eller en stål. Den andra metoden innebär att tvärsnittet ökas genom att öka tjockleken på väggen. Dessa metoder är innebär ofta rätt stor påverkan på själva konstruktionen och på brukare eller verksamhet. I dagsläget behövs metoder som innebär liten påverkan på konstruktionen och verksamhet. Ett sätt som innebär relativt liten påverkan omfattar tillämpningen av FRP (fibre reinforced polymers) som fästs på den befintliga betongytan med antingen epoxilim eller polymermodifierat och/eller fiberförstärkt bruk, även kallat FRCM (fibre reinforced cementitious mortars). Dessa teknologier har lyckosamt tillämpats tidigare för att reparera eller förstärka i samband med jordbävningar [1-3]. Eftersom att dessa metoder utformats för att ta upp laterala laster kan de, i många fall, inte tillämpas för att reparera för gravitationsbelastade väggelement. Mer forskning behövs därför för att undersöka effekterna hos reaktionerna för väggelement belastade med vertikala krafter. Fallen där gravitationslaster styr dimensionering hos konstruktioner omfattar byggnader i icke-seismiska regions och är därför i fokus i detta projekt.

### 2. Syfte och mål

Det huvudsakliga syftet i detta projekt var att utveckla metoder och system för att reparera eller förstärka betongväggar i samband med håltagning.

Två nya förstärkningssystem är redovisade inom detta projekt; 1) Förstärkning med epoxilimad kolfiber (CFRP) och 2) förstärkning med polymermodifierat bruk (FRCM) och FRP-nät/textil. De tre huvudsakliga målen för projektet omfattade:

1. Utveckling och genomförande att laboratoriestudier för att undersöka det strukturella beteendet hos betongväggar med håltagning och utvärdera bidragen från de olika förstärkningssystemen.
2. Genomföra en parameterstudie med ickelinjära finita element modeller (FEM), i system, på en typisk husbyggnad.
3. Härleda teoretiska modeller för att uppskatta kapacitetsbidraget från CFRP förstärkta betongväggar med håltagning.

### 3. Laboratorieförsök

#### 3.1 Provkroppar och utformning

Provkropparna utformades som väggelement i halv skala (1.8 m × 1.35 m × 0.06 m) baserade på typiska väggelement i husbyggnader, dessa provkroppar tillverkades med och utan håltagning. Samtliga provkroppar tillverkades som solida element med konstant tjocklek och ingen isolering. Armeringen bestod av svetsade armeringsnät med  $\phi 5/100$  mm i båda riktningar och placerades centrisk i väggelementet i ett lager. Provkropparna prefabricerades på Bröderna Hedmans Cementgjuteri AB under kontrollerade härdningsförhållanden.

Provmatrisen kan delas in i fyra delar, här benämnda som I-IV. Tre provkroppar belastades till brott i steg I; en provkropp utan håltagning, en provkropp med en liten symmetriskt placerad håltagning (motsvarande t.ex. en dörr om 450 × 1050 mm) och en liknande provkropp fast med större håltagning (motsvarande t.ex. två

dörrar 900 × 1050 mm). Dessa provkroppar agerade som referensvärden som sedan jämfördes mot de förstärkta provkropparna. I steg II, som bestod av två provkroppar motsvarande en med liten öppning och en med stor öppning, belastades provkropparna först till spricklasten. Sedan förstärktes dessa provkroppar med det epoxilimmade förstärkningssystemet för att sedan belastas till brott. I steg III, som bestod av två provkroppar i likhet med steg II, förstärktes dessa innan de belastades och efter förstärkningen belastades dessa till brott. I steg IV, som bestod av fem provkroppar, byttes förstärkningssystemet ut mot de FRCM baserade systemen. Dessa provkroppar provades utan förbelastning och två olika FRCM system provades på provkroppar med de två olika öppningsstorlekarna. I steg IV belastades provkropparna med deformationsstyrd belastning, till skillnad mot provkropparna i steg I-III som belastning med laststyrd belastning. Av denna anledning utgjorde en av provkropparna som oförstärkt referensvärde.

### 3.2 Epoxilimmat förstärkningssystem

Det ena förstärkningssystemet bestod av U-lindad kolfiberväv (CFRP) som täckte hela väggens yta och erfordrade mekanisk förankring för att utnyttja omslutningseffekten. Före appliceringen av kolfiberväven borrades flertalet 8 mm hål genom hela väggen på förutbestämda positioner, dessa hål erfordrades för att den mekaniska förankringen skulle fungera. Förberedelsen av betongytan följde gängse arbetsmoment för epoxilimmad kolfiberväv. Två olika mängder kolfiberväv applicerades, beroende på håltagningens omfattning, genom att tillämpa två respektive tre lager 0.17 mm tjock väv. Den större håltagningen hade den större mängden, tre lager, kolfiberväv (StoFRP Sheet IMS300 C300). Epoxilimmet bestod av StoPox LH. Efter att limmet härdat, ca 7 dygn, monterades den mekaniska förankringen i de förborrade hålen och förankringsbultarna efterspändes till 75% av draghållfastheten (ca 8.7 kN per bult). Eventuell bristande vidhäftning kvalitetskontrollerades med en IR värmekamera (FLIR T620bx), inga brister i utföranden kunde detekteras.

### 3.3 FRCM baserade förstärkningssystem

Det andra förstärkningssystemet har ett annat vidhäftningsmaterial, istället för epoxy tillämpas polymermodifierade bruk (FRCM). Förstärkningssystemet består av två lager med bruk och mellan dessa lager appliceras fibernät. Förstärkningen sker på båda sidor om väggen. Två olika FRCM system tillämpades i den laborativa studien. Det första systemet tillämpar ett tvåriktat kolfibernet (C-FRCM) och det andra systemet tillämpar ett ensriktat nät av PBO (Poly-p- Phenylene Benzobisoxazole) placerad i två ortogonala riktningar (PBO-FRCM). Appliceringen av dessa förstärkningssystem ställer höga krav på utförandet och förberedelserna av betongunderlaget. Först måste all cementskiva avlägsnas, vilket gjordes genom vattenbilning (ca 200 MPa vattentryck). Sedan fuktades betongunderlaget för att förhindra vattentransport från FRCM bruken till underlaget. Dessa åtgärder bör genomföras för att förhindra kantresning och sprickbildning i förstärkningssystemen. Förstärkningssystemen härdade sedan i 15°C och 50% RH under minst 28 dygn innan provning.

### 3.4 Försöksuppställning

Provkropparna (väggelementen) utsattes för vertikal belastning, motsvarande gravitationsriktning, med en excentricitet i den veka riktningen. Excentriciteten motsvarade 1/6 av vägg tjockleken och representerar eventuella imperfektioner, t.ex. variationer i tjockleken eller missplacering under produktion. Försöksuppställningen var utformad för att representera randvillkoren som förekommer i det byggda tillståndet. Belastningen utgjordes av fyra hydraulcylindrar i ett nätverk för att ge jämt fördelad last längs med väggen övre sida. Försöksuppställningen är redovisad i figur 1. I försöksuppställning ingick ett relativt omfattande mätprogram för att bedöma väggelementens beteende under de olika belastningsskedena. Mätningen omfattade, lägesgivare för att mäta förskjutningar och deformationer, töjningsgivare för att mäta töjning i betong, armering och fiberkomposit. Utöver dessa traditionella mätteknologier ingick även fullfältsmätning genom att tillämpa optiskmätning, s.k. tredimensionell digital image correlation (3D-DIC). Detta är en beröringsfri optisk mätteknologi som baseras på att flertalet foton tas på provkroppens yta i icke-deformerat tillstånd och sedan under de olika belastningsskedena, på detta sätt kan deformationer och töjningar i och ut ur planet mätas.



Figur 1. Försöksuppställning

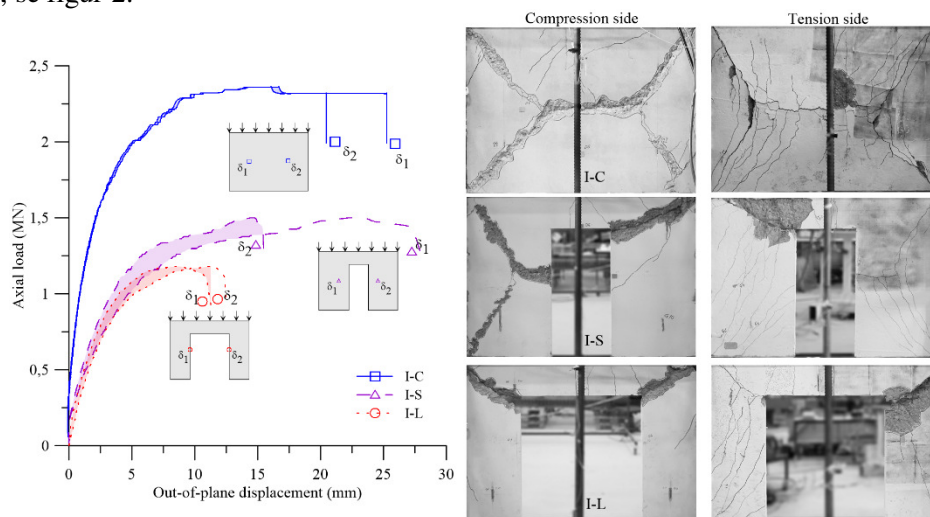
### 3.5 Materialegenskaper

Betongen som tillämpades hade en uppmätt tryckhållfasthet motsvarande ca 62 MPa och sträck- och brottgränsen för stålarmeringen var 632 MPa respektive 693 MPa. Materialegenskaperna för FRP materialen är tagna från materialleverantörerna och för kolfiberväven var draghållfastheten 5500 MPa och elasticitetsmodulen 290 GPa. För FRCM förstärkningssystemen hade C-FRCM nätet en draghållfasthet om 4700 MPa och en elasticitetsmodul om 240 GPa och PBO-FRCM näten en draghållfasthet om 5800 MPa och elasticitetsmodul om 270 GPa.

## 4. Resultat från försök

### 4.1 Steg I: Icke-förstärkta provkroppar

Väggelementen uppförde sig som förväntat under belastningen med rådande randvillkor, med utböjningar i både horisontell och vertikal riktning. Deformationerna var i regel symmetriska, med vissa avvikelser beroende på testrigg och slumpmässiga variationer i materialegenskaperna. Samtliga provkroppar gick till brott genom att betongen krossades samt buckling av armering och där tillhörande spjälkning av täckande betongskikt. Synliga sprickor uppkom relativt sent under belastningen, ca 85% av brottlast, för solida väggelement samt tidigare för väggelement med liten (50% av brottlast) respektive stor öppning (20% av brottlast). Effekterna av storleken på öppningarna kan tydligt ses i last-deformationskurvorna och sprickbildning, se figur 2.



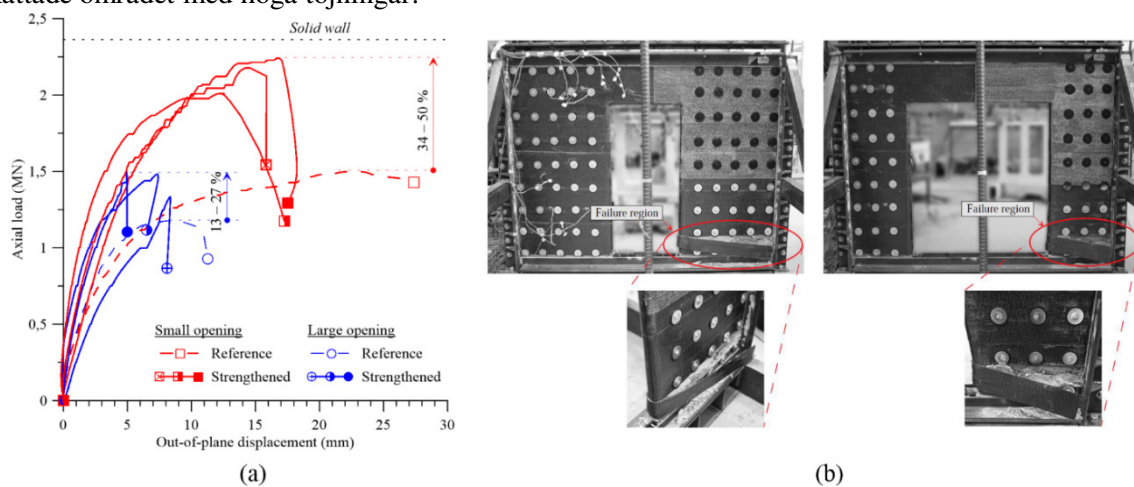
Figur 2. Last-deformationsbeteende och uppsprickning av tre oförstärkta referensprovkroppar

Resultaten indikerar på att en reduktion av tvärsnittsarean, 25% (liten öppning) och 50% (stor öppning), reducerar bärförmågan med nästan 36% och 50% för liten respektive stor öppning. Införandet av liten respektive stor öppning resulterade i liknande reduktioner i beräknade duktilitetsfaktorer. Det bör dock noteras att skillnaderna i öppningsstorlekar även tydligt påverkade energidissipationen. Generellt skulle en vägg med ingen öppning kunna klassificeras som ett "duktilt element" enligt [4], med en duktilitetsfaktor mellan 3 och 6. Medan väggelement med liten respektive stor öppning skulle klassificeras som element med "begränsad duktilitet" då duktilitetsfaktorerna var mindre än 3.

#### 4.2 Steg II & III: Provkroppar förstärka med U-lindad kolfiberväv (CFRP)

Figur 3 visar last-deformationskurvorna för samtliga provkroppar samt förstärkningseffekten jämfört med ickeförstärkta provkroppar med håltagning. Förstärkningen ökade maxlasten vid brott för förspräckta provkroppar med liten (49%) respektive stor (27%) öppning. Något lägre förstärkningseffekter kunde noteras för provkroppar som inte förspräcktes: 45% och 34% för provkroppar III-S1 och III-S2 (liten öppning) samt 13% och 26% för provkroppar II-L1 och III-L2 (stor öppning). Förstärkningssystemet verkar således vara mer effektivt på förspräckta provkroppar. Förstärkningen ändrade även den initiala styvheten hos elementen, dock mindre för de förspräckta provkropparna jämfört med icke spräckta provkroppar.

Under belastningen av de förstärkta provkropparna kunde inga sprickor noteras okulärt eftersom att förstärkningssystemet täckte hela väggens yta. Vid brottlasten krossades betongen och sedermera delaminerade kolfiberväven från ytan. Vid utformningen av försöksprogrammet misstänktes att förstärkningssystemet skulle påverka det lokala beteenden, speciellt hos armeringen. Mätresultaten påvisade att förstärkningssystemet reducerade töjningarna i armeringen jämfört med icke förstärkta provkroppar. Vid brottlasten redovisade töjningsgivaren i bågen, mellan öppning och vägsida, de högsta töjningsnivåerna om ca 1.89‰. Det bör dock noteras att dessa värden är uppmätta givartöjningar och nödvändigtvis inte behöver reflektera de högsta töjningarna i tvärsnittet eftersom att givarplaceringen baserades på det teoretiskt uppskattade området med höga töjningar.

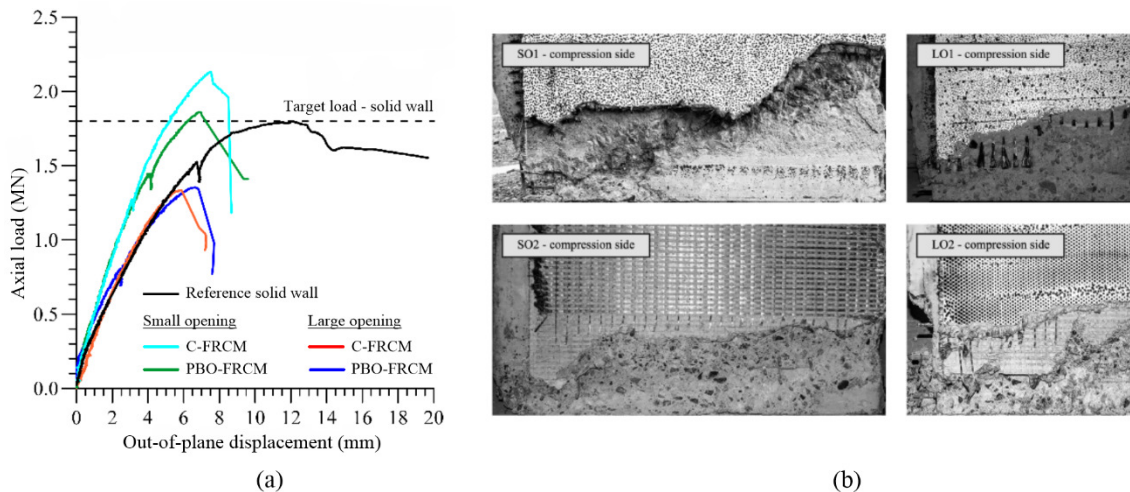


Figur 3. Provkroppar förstärkta med CFRP-system: (a) Last-deformationsbeteende för kapacitetsökning i samband med förstärkning, och (b) Typiska brottmoder

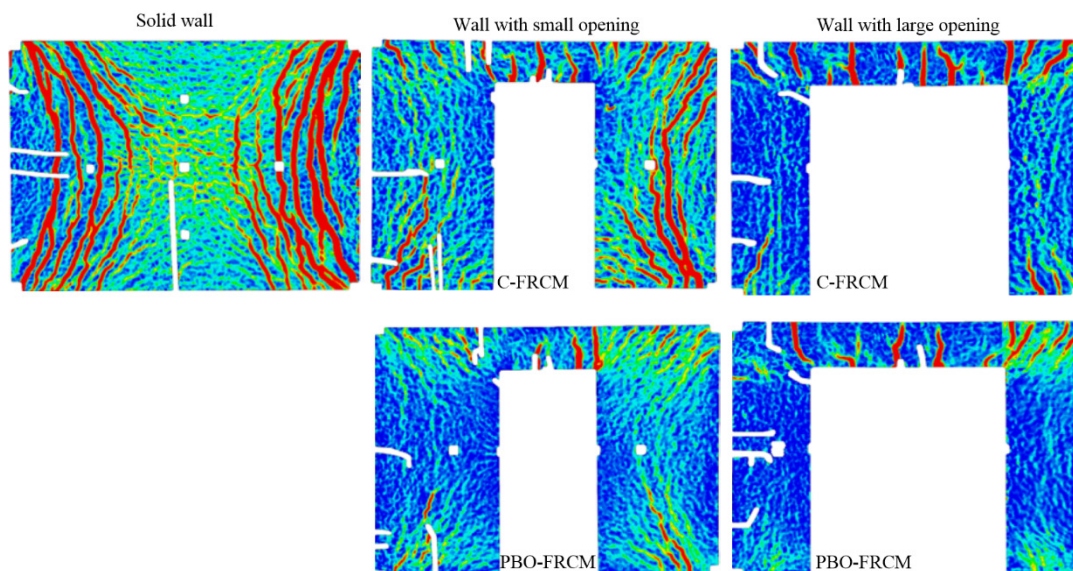
#### 4.3 Steg IV: Provkroppar förstärkta med FRCM-system

Figur 4a visar last-deformationsbeteendet samt brottmoder för provkroppar förstärkta med FRCM systemen. Vid jämförelse med referensprovkropp ökade bärförmågan för provkroppar med C-FRCM systemet med 85% (liten öppning) och 61% (stor öppning). Samma ökning för PBO-FRCM systemet motsvarades av 48% (liten öppning) och 50% (stor öppning). FRCM systemen ökade både styvheten i- och ut ur planet för provkropparna jämfört med referens. Styvheten ut ur planet reparerades för samtliga provkroppar medan styvheten i planet endast reparerades för provkroppar med liten öppning.

Samtliga förstärkta provkroppar med öppningar gick till brott med att betongen krossades vid sidan av en av öppningarna alldeles ovan kontaktytan med reaktionsstödet. FRCM systemen lossnade i närhet av den krossade zonen. Efter slutförd provning avlägsnades FRCM systemen i denna zon och då kunde omfattningen av den krossade zonen skönjas, se figur 4b. För PBO-FRCM förstärkta provkropparna kunde finare sprickbildning noteras i jämförelse med de C-FRCM förstärkta provkropparna, vilket redovisas i figur 5. Den uppmätta töjningsutvecklingen i fibrerna för FRCM systemen liknade töjningsutvecklingen i armeringen, fast töjningsnivåerna i fibrerna var lägre. Vid jämförelse av töjningsnivåerna mellan fibrerna i PBO-FRCM systemet mot C-FRCM systemet, uppvisade PBO fibrerna något högre nivåer, denna skillnad påverkade dock inte töjningen i armeringen. De uppmätta töjningarna i C-FRCM fibrerna (4‰) och PBO-FRCM fibrerna (10‰) var lägre än de töjningsnivåer som fås vid vidhäftningsbrott från enaxiellt skjuvdragprov vid tidigare provning [5]. Detta indikerar på att fibrerna hade god vidhäftning mot de polymermodifierade brukna i samband med brottbelastningen av väggelementen.



Figur 4. Provkroppar förstärkta med FRCM-system: (a) Last-deformationsbeteende i samband med förstärkta provkroppar i jämförelse med referensprovkropp utan håltagning, och (b) brottmoder för förstärkta provkroppar



Figur 5. Sprickmönster mätt med 3D-DIC optiskt mätsystem

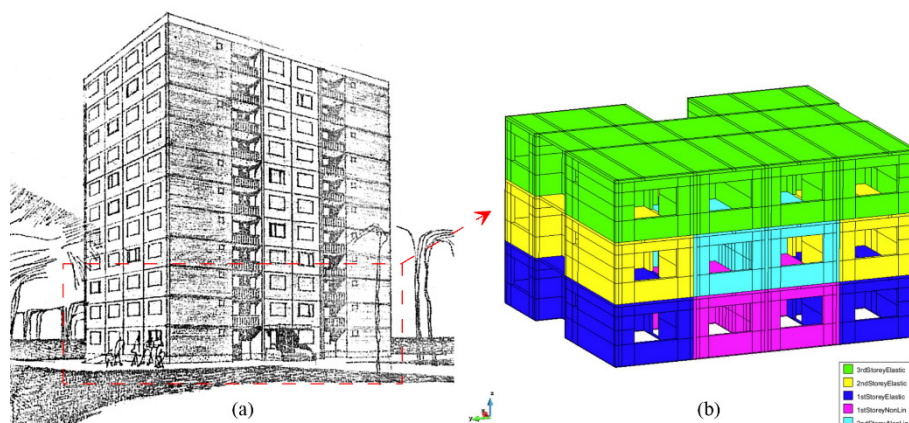
## 5. Parameterstudie genom tillämpning av icke-linjär FEM

### 5.1 Generell beskrivning

I föregående sektioner har beteendet för enskilda väggelement analyserats med och utan håltagning samt med och utan förstärkningssystem. Eftersom att en byggnad består av bl.a. flertalet samverkande väggelement är det därför viktigt att analysera hur en hel byggnad påverkas i samband med håltagning, både lokalt och globalt beteende. Av denna anledning genomfördes en 3D FE-analys på en typisk betongbyggnad i flera våningar. Syftet med denna analys var att undersöka ytterlighetsscenariot och identifiera optimala förstärkningsåtgärder. FE-modellen beaktar icke-linjära samband för material och geometrier och byggdes i olika steg. Först validerades modellen mot resultaten från den experimentella studien och utökades sedan att omfatta en sammansatt byggnad där storleken på håltagningen varierades tillsammans med olika våningsplan. FE-modellen modellerades i programmet ATENA (Cervenka Consulting Ltd 2015) och följde rekommendationerna för modellering av betongkonstruktioner i plastiska domäner [6]. Den analyserade byggnaden är ett befintligt 11 våningshus, se figur 6. Det strukturella systemet består av ett integrerat väggsystem där lastbärande väggar går i både longitudinell och transversell riktning.

Parameterstudien genomfördes på olika storlekar på håltagning genom att öppningarna varierades från  $0.9 \times 2.1$  m till  $4.4 \times 2.1$  m. Håltagningarna infördes i solida, platsbyggda, lastbärande väggar på första och andra våningen. Resultaten från FE-analysen användes för att kvantifiera inverkan av håltagningen på dels bruksgränstillståndet och brottgränstillståndet hos byggnaden och dess konstruktionsdelar. Bruksgränskriteriet avgränsades till att omfatta nedböjning och sprickvidd för en pålagd last om  $5.0 \text{ kN/m}^2$  under antagandet om

kontorsverksamhet. Brottgränskriteriet avgränsades till att omfatta flytning av stålarmring och tryckhållfasthet i betong (krossbrott), varpå brotlasten övre gräns varierar beroende på dessa kriterier. Slutligen analyseras behoven av åtgärder och möjlig reparation och/eller förstärkning.



Figur 6. Analyserad betongkonstruktion: (a) enligt ritning; (b) FE-modell

## 5.2 Resultat

Bruksgränskriteriet kopplat till sprickvidd var det gränssättande tillståndet för samtliga storlekar och utformningar på håltagningarna. Den axiella lastfördelningen, beroende på håltagningens utformning, mellan vertikala väggelement kvantifierades baserat på förändringar i reaktionskrafterna vid botten. Det kunde noteras att reaktionskraften från vägg med håltagning minskar i och med att håltagningens storlek ökar. Samtidigt ökar lasten på närliggande vägg. T.ex. om håltagningen motsvarar  $4.4 \times 2.1$  m kommer reaktionskraften i väggen att minska med 38% jämfört med om det inte funnits någon håltagning och samtidigt ökar reaktionskraften i närliggande väggar att öka med ca 60%. Detta indikerar på att håltagning tillsammans med förändringen i väggens axiella styvhet medför att lasterna omfördelas proportionellt till närliggande konstruktionselement. Alltså bör, i sådana fall, även grundläggningen kontrolleras i samband med håltagning, detta ligger dock utanför målen med detta projekt.

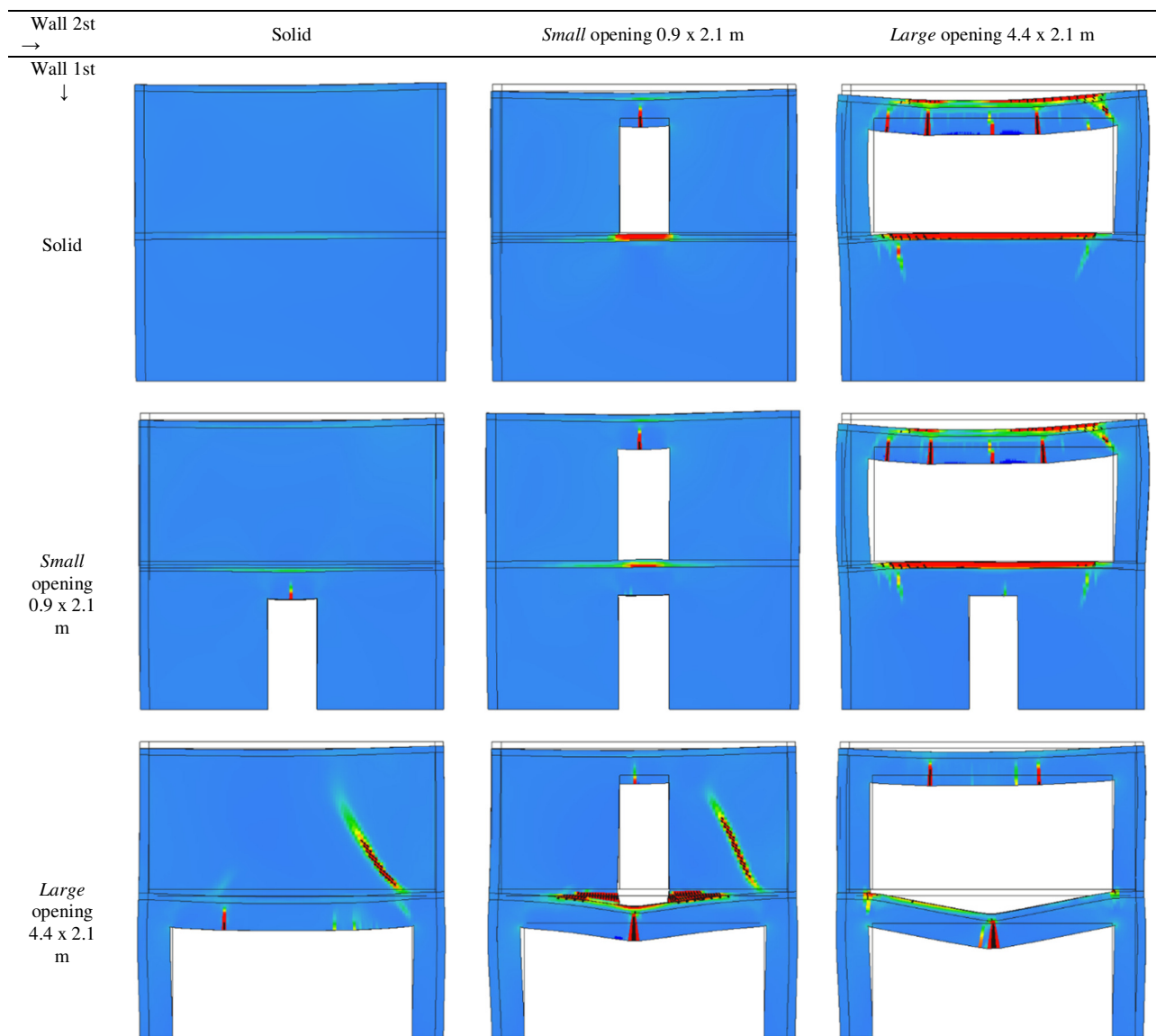
Vägg med håltagning uppvisar därmed inte nödvändigt signifikanta öknings i spricköppning eller nedböjningar. Detta kan förklaras genom att en håltagning i en solid vägg även med för att den axiella styvheten minskar och därmed fördelas mindre last genom väggen. Sprickor större än 0.3 mm uppkommer först i bjälklag för FE-modellen utan håltagning. Medan för alla andra FE-modeller, med håltagning, uppkommer sådana sprickor i väggarna. Vidare, flytning i dragarmering var det gränssättande tillståndet i brottgränstillstånd och då speciellt flytning i armeringen i bågen mellan övre hörn på håltagning och kant på vägg.

Tabell 1 sammanfattar dragtöjningarnas fördelning, sprickbildning och deformationer vid den första och andra våningen för väggar med håltagning. De redovisade deformationerna är förstörade med en faktor om 40 gånger för att få en tydligare representation av deformationerna. För byggnaden med solida väggar föreligger inga sprickor i väggelementen vid våning ett och två vid brott, för denna simulering är det således bärförmågan i bjälklagen som styr den maximala lastkapaciteten. För simuleringen med små håltagningar kan sprickor observeras i regionen mellan håltagningens övre kant och väggens rand, oberoende om håltagningen är på första eller andra våningen. Även i detta fall är det bjälklagens bärförmåga som styr den maximala lastkapaciteten. När stora håltagningar simuleras blir den maximala bärförmågan begränsad av flytning i väggens armering. När den här typen av håltagning simuleras på den första våningen fås ett lutande sprickplan vilket föranleder en skjuvande brottmod i "balken" ovanför öppningen. När den här typen av håltagning simuleras på både första och andra våningen erhålls en böjande brottmod vid sidan om håltagningens övre hörn vid den första våningen. Det bör noteras att en kombination av en liten håltagning på andra våningen och en stor håltagning på första våningen uppvisar en kombinerad brottmod, skjuvbrott i väggen på andra våningen och böjbrott vid sidan om håltagningens övre hörn på första våningen.

För samtliga simulerade utformningar på håltagning är det flytning i armering som är den övre gränsen i brottgränstillståndet. Detta föranleder att reparations- och/eller förstärkningsåtgärden bör bestå av att applicera ytterligare "armering" för att motverka flytning av den befintliga armeringen i väggelementen. CFRP eller FRCM baserade förstärkningssystem bör i sådana fall kunna motverka den här typen av brottmod, vilket även är visat i försöksstudien. Både förstärkningssystemen (CFRP och FRCM) har påvisat att förstärkningen reducerar maximala töjningstillstånden i armeringen till nivåer under flytgräns i jämförelse med icke-förstärkta väggar. Valet av reparations- eller förstärkningsåtgärd beror till stor del av utformningen på håltagning och

objektet som behöver förstärkas och kräver därför mer omfattande ingenjörsmässiga antaganden och validering för lyckosam implementering.

Table 1. Selected FEM results – principal strain distribution on the walls with cutout openings at failure



## 6. Föreslagen dimensioneringsmodell

Tillgängliga dimensioneringsregler erbjuder väldigt lite råd om hur förstärkning ska utformas i samband med håltagning av befintliga väggelement. När det kommer till användningen av icke-metallisk (t.ex. CFRP) armering/förstärkning i samband med håltagning är det ännu mer sparsamt med råd om hur en sådan ska genomföras. De flesta befintliga modeller baseras på empiri och är kalibrerade mot en begränsad mängd data och lämpar sig bäst för icke-förstärkta väggar. Av denna anledning förekommer det ett stort behov av analytiska metoder som kan beskriva det biaxiella verkningssättet hos väggelement som har tvång längs med samtliga ränder och då speciellt i samband med håltagning och förstärkning med FRP-material. Utveckling av en sådan generell analytisk metod, baserad på plasticitetsteori, har föreslagits inom detta projekt. Den här typen av plasticitetsteori (gränslinjeteori) är en välkänd dimensioneringsmetod för plattor. Metoden förutsätter perfekt plasticitet för samtliga ingående material. Betongen antas därför följa den modifierade Coulomb kriterier med noll draghållfasthet. Den maximala hållfastheten hos betong under enaxiellt spänningstillstånd måste därmed reduceras till en ekvivalent plastisk tryckhållfasthet, nivå I i figur 7a, genom en effektivitetsfaktor  $< 1$  beroende på materialets sprödhet och beroende av transversella töjningar i samband med betongens hållfasthet. Stålarmeringen antas också bete sig plastiskt i både drag och tryck, vilket visas i figur 7b, där flytplattan karakteriseras av flytgränsen från dragprover. Det bör dock noteras att FRP-material är linjärelastiska fram till brott och besitter inget större plastiskt beteende eller mjuknande efter maximal

hållfasthet, se figur 7c. I den föreslagna modellen föreslås därmed att betongmodellen uppdateras med en förfinad betonghållfasthet beroende på omslutningseffekt. Denna omslutningseffekt är en resultat från att CFRP systemen omsluter betongväggen vid sidorna om håltagningen, nivå II i figur 7a. Härledningen av denna tillsammans med tillhörande ekvationer återges inte här utan återfinns i [7].

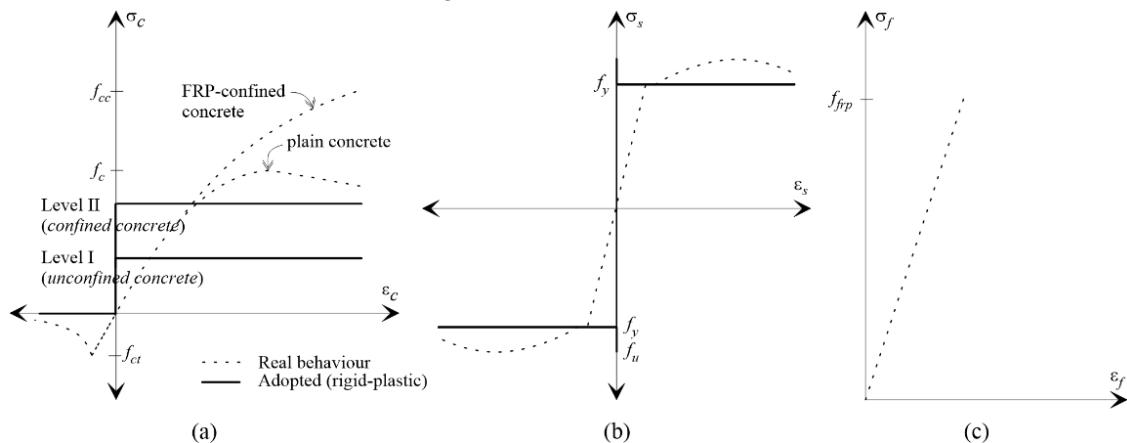


Figure 7. Yield conditions for: (a) concrete; (b) reinforcement; and (c) FRP

## 7. Slutsatser

De huvudsakliga slutsatserna från detta project är kortfattat sammanfattade nedan:

1. En reduktion av tvärsnittsarean, motsvarande 25% (liten) och 50% (stor), hos väggar i samband med håltagning leder till 36% respektive 50% reduktion av bärförmågan i brottgräns.
2. CFRP förstärkningssystemet ökar den axiella kapaciteten hos väggelement med liten respektive stor håltagning med 34-50% respektive 13-27%. Detta medför en delvis reparation av bärförmågan motsvarande 85-95% respektive 57-63% i jämförelse med väggelement utan håltagning.
3. FRCM förstärkningssystemen ökar den axiella kapaciteten hos väggar med liten respektive stor öppning med motsvarande 61-85% respektive 48-50%. Bärförmågan hos väggelement med liten håltagning kunde repareras helt och hållet men för väggar med stor håltagning reparerades endast bärförmågan till 75% jämfört med väggelement utan håltagning.
4. FE-analyserna av ett sammansatt system (byggnad) visade att håltagningar reducerar den axiella styvheten samt reducerar kapaciteten jämfört med väggelement utan håltagning. Fördelningen av lasterna till fundamentet förändras även i samband med håltagning vilket leder till att upp till 60% högre lastfördelning fås i närliggande väggar utan håltagning.
5. I samband med små håltagningar är både CFRP och FRCM förstärkningssystemen möjliga åtgärder. För byggnader med större håltagningar bör även förstärkningslösningar som ökar betongens hållfasthet eller maximal töjningsförmåga genomföras för att få en mer effektiv lösning, t.ex. genom omslutningseffekt av CFRP.
6. En modell baserad på plasticitetsteori har föreslagits inom projektet för att utvärdera maximal lastkapacitet hos väggar i samband med håltagning och förstärkning med CFRP. Denna modell redovisar god överensstämmelse med de experimentella resultaten.

## Referenser

- [1] Li B, Qian K, Tran C. Retrofitting Earthquake-Damaged RC Structural Walls with Openings by Externally Bonded FRP Strips and Sheets. *Journal of Composites for Construction*. 2013;17:259-70.
- [2] Mosallam AS, Nasr A. Structural performance of RC shear walls with post-construction openings strengthened with FRP composite laminates. *Compos Part B-Eng*. 2017;115:488-504.
- [3] Todut C, Dan D, Stoian V. Numerical and experimental investigation on seismically damaged reinforced concrete wall panels retrofitted with FRP composites. *Compos Struct*. 2015;119:648-65.
- [4] Park R. State of the art report: ductility evaluation from laboratory and analytical testing. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol VIII*,. Tokyo-Kyoto, Japan 1988. p. 605-16.
- [5] Sneed LH, D'Antino T, Carloni C. Investigation of Bond Behavior of Polyparaphenylene Benzobisoxazole Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface. *ACI Mater J*. 2014;111:569-80.



- [6] Hendriks MAN, de Boer A, Belletti B. Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures. Delft, Netherlands: Rijkswaterstaat Technisch Document (RTD), RTD 1016-1:2016, Rijkswaterstaat Centre for Infrastructure; 2016.
- [7] Popescu C, Schmidt JW, Goltermann P, Sas G. Assessment of RC walls with cut-out openings strengthened by FRP composites using a rigid-plastic approach. Eng Struct. 2017;150:585-98.