

Dimensioneringsguide för infästningar i stålfiberarmerad betong



Rasoul Nilforoush, Martin Nilsson och Lennart Elfgren

2020-02-25

FÖRORD

Denna rapport presenterar resultat från en serie försök med infästningar i stålfiberarmerad betong.

Huvuddelen av arbetet har planerats och utförts av Rasoul Nilfroush som fortsättning på hans doktorsarbete vid Avdelningen för byggkonstruktion vid Luleå tekniska universitet. Biträdande professor Martin Nilsson och senior professor Lennart Elfgren har medverkat vid planering och utvärdering.

Försöken har utförts vid MCE-laboratoriet vid Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser vid LTU av laboratoriechef Mats Petersson och forskningsingenjör Erik Andersson.

En referensgrupp har stött arbetet. Den har bestått av adj. prof. Hans Hedlund (Skanska), biträdande professor Rickard Malm (KTH), tekn. Lic. Anders Bergkvist (Vattenfall/Energiforsk) samt professor Akanshu Sharma och forskningsingenjör Boglarka Bokor (Stuttgarts universitet).

Ekonomiskt stöd har erhållits från SBUF och Luleå tekniska universitet. De testade förankringarna har kostnadsfritt tillhandahållits av Peikko Group, Helsingfors. Vi tackar hjärtligt för allt stöd och all uppmuntran vi erhållit

Luleå i februari 2020

Rasoul Nilfroush

Martin Nilsson

Lennart Elfgren

SAMMANFATTNING

Tidigare studier har visat att ett tillskott av stålfibrer förbättrar brottegenskaperna hos betong. Det finns dock endast få studier som belyser inverkan stålfiberarmering på bärförmågan för infästningar.

För att förbättra kunskaperna har en experimentell studie genomförts av ingjutna förankringar i oarmerad och stålfiberarmerad betong. Förankringar har gjutits in med olika djup ($h_{ef} = 100$ och 150 mm). De provade parametrarna är stålfibermängd och infästningarnas placering i förhållande till hörn och kanter.

Volymandelen stålfiber har varierats mellan $v_f = 0, 0.5,$ och 1.0 % vilket motsvarar ett fiberinnehåll av $\rho_f = 0, 40$ och 80 kg/m³ (PC, SFRC 40 och SFRC80). Eftersom kantavståndet C spelar stor roll för bärförmågan har olika kantavstånd provats, $C = 0.5h_{ef}, 1.0h_{ef}, 1.5h_{ef}$ och $\gg 1.5h_{ef}$.

Bärförmågan för bultförsedda infästningar i oarmerad betong kan ganska väl förutsägas med en modell baserad på en konformad brottyta, CCD-metoden (Concrete Cone Capacity Design). Bärförmågan ökar väsentligt i stålfiberarmerad betong och denna ökning underskattas med CCD-metoden oberoende av avståndet till kanter.

De provade infästningarna som satt nära fria kanter hade lägre bärförmåga och mindre deformationer vid brott än motsvarande förankringar som satt längre in i en platta. Detta beror på att en fullt utvecklad brottkon inte kan bildas i en infästning nära en kant och att bärförmågan därför reduceras.

Bärförmågan för provade infästningar mitt i en platta ökade med 32 % i SFRC40 och med 45 % i SFRC 80 i jämförelse med oarmerade plattor. Dessutom blev brotten segare och deformationerna ökade avsevärt vid brott, Samma uppförande observerades för infästningar nära fria kanter. Bärförmågan ökade här med mer än 29 % i jämförelse med infästningar i oarmerade betong.

Sammanfattningsvis rekommenderas att den beräknade bärförmågan kan ökas med 25 % vid användning av konkapacitetsmodellen (CCD) för stålfiberarmerad betong med minst 0.5 % stålfiber (40 kg/m³) med hakförankring av här studerad typ.

SUMMARY IN ENGLISH

Previous studies have shown that the addition of steel fibers to concrete mixture improves the fracture properties of concrete. To date, however, rather limited research is available on the behaviour and capacity of fastening systems in Steel-Fiber-Reinforced Concrete (SFRC).

To improve the current knowledge of fastening systems to SFRC structures, an experimental study was carried out on cast-in-place headed anchors embedded in plain concrete and SFRC members. In this study, cast-in-place headed anchors at different depths ($h_{ef}=100$ and 150 mm) were tested in plain and steel-fiber-reinforced concrete. The testing parameters include the amount of steel fiber in concrete component and the position of anchors with respect to free edges of the concrete component.

The concrete components have various steel fiber volume fractions (i.e., $v_f=0.0$, 0.5 , and 1.0%). These fiber volume fractions correspond respectively to steel fiber content of $\rho_f = 0$, 40 and 80 kg/m^3 of concrete volume. Since anchor edge distance C significantly affects the anchorage capacity, anchors were also tested at different position of concrete (i.e. at a remote distance to concrete edges $C \gg C_{cr,N}$ and also at various close distances to the concrete edges $C=0.5h_{ef}$, $1.0h_{ef}$, and $1.5h_{ef}$).

The tensile capacity of headed anchors in plain concrete was relatively close to the failure load predicted by Concrete Capacity Design (CCD) method. However, the anchorage capacity increases significantly in steel-fiber reinforced concrete. It was realized that the CCD method underestimates significantly the tensile capacity of headed anchors in steel-fiber-reinforced concrete. This is the case for all tested anchors both at a remote and close distances to concrete edges.

The tested anchors that were close to concrete free edges showed lower capacity and less deformation at peak load, compared to the corresponding anchors at the center of concrete slabs. This is due to the fact that a full concrete cone cannot form for headed anchors located close to concrete free edges and thus the anchorage capacity reduces.

The mean anchorage capacity for the tested anchors at the center of concrete slab increased by 32% in SFRC40 and by 48% in SFRC 80, compared to those in plain concrete. In addition, the anchorage behavior became more ductile and the deformation of headed anchors at peak load as well as at post-peak loads increased significantly in fiber-reinforced concrete members.

The same behavior was observed for the tested headed anchors positioned at close distances to the concrete free edges. The anchorage capacity for the near edge anchors increases by more than 29% in steel fiber-reinforced concrete compared to those in plain concrete.

In summary, it is recommended that the calculated load-bearing capacity, based on CCD method, can be increased by 25% for headed anchors in steel fiber reinforced concrete with at least 0.5% steel fiber (40 kg/m^3) of hook-end type studied here.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND	5
2. SYFTE.....	7
3. METODIK - BROTTMODER.....	8
4. EXPERIMENTELL STUDIE	10
4.1 PROVNINGSPROGRAM	10
4.2 PROVNINGSFÖRFARANDE	12
4.3 PROVNINGSRESULTAT	13
5. SLUTSATSER.....	17
LITTERATURFÖRTECKNING.....	18

1. BAKGRUND

I all byggverksamhet behöver krafter tas upp i konstruktioner. I betongkonstruktioner förs dragkrafter ofta in med hjälp av ingjutna eller inborrade infästningar. Detta sker såväl vid nybyggnad som vid om- och tillbyggnader. Några vanliga användningsområden och typer av infästningar i betongkonstruktioner visas i Figur 1.



Figur 1. Exempel på tillämpningar av olika förankringar i tak, väggar och golv av betong.

Högpresterande fiberarmerad betong är ett nytt material som vinner ökad användning i bland annat industrigolv och vid bergförstärkning, se t. ex. materialnormerna SS 14651 (2007) och SS 812310 (2014), tillämpningsexempel i Gunnarsson & Lindell (2015) och i arbete med dimensioneringsregler Walraven (2008) och Zirgulis (2015).

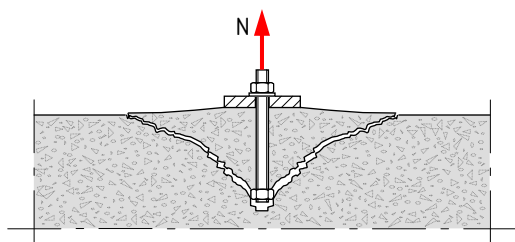
Tekniken för infästningar går tillbaka till antika sten- och murverkskonstruktioner som ofta hölls samman av förankringsstänger av metall s.k. ankarjärn, se Figur 2. Tekniken har utvecklats kraftigt under den senaste 50-årsperioden med tillkomsten av effektiva slagbormaskiner med vilka hål lätt kan borraras i befintliga betongkonstruktioner. Normer och riktlinjer har också börjat växa fram, CEB (1991), Eligehausen et al (2006), SIS-CEN/TS 1992-4-2 (2009) och fib B58 (2011).

Reglerna gäller huvudsakligen för dimensionering av nya infästningar i oarmerade konstruktioner medan infästningar i armerade konstruktioner endast behandlats i ett fåtal undersökningar, Nilsson et al (2011). Tidigare arbeten med infästningar vid Luleå tekniska universitet redovisas även i Elfren et al. (1980, 1982, 1987, 1989, 1991, 2001, 2002) och i Nilforoush et al (2016, 2017, 2017a, b, c, 2018 a,b)



Figur 2. Ankarjärn med ankarslut i murverk i kv. Cephalus i Gamla stan i Stockholm.

Brottbeteendet i en oarmerad betongkonstruktion illustreras i Figur 3. De nuvarande normerna bygger på draghållfastheten i den oarmerade betongen. Vid användning av en högpresterande fiberarmerad betong kan högre lastkapacitet erhållas i tunnare betongkonstruktioner. Fiberarmeringen förväntas öka brottlast och seghet/duktilitet så att oönskade spröda brott undviks.



Figur 3. Brott i en oarmerad betongkonstruktion.

Vid ombyggnads- och reparationsarbeten har infästningar en potential att bidra till en mer hållbar utveckling i branschen genom att befintliga byggnader och konstruktioner kan användas mer flexibelt och inte rivas lika snabbt som nu utan kompletteras och förstärkas så att de kan nyttjas under längre tid.

2. SYFTE

I en tidigare pilotstudie (SBUF ID 13255, Nilforoush et al. 2018a) visades att huvudförsedda infästningar i stålfiberarmerade betong har en överlägsen bärförmåga jämfört med i oarmerad betong, se även Nilforoush et al. (2017c). Försöken visade att bärförmågan och segheten ökade väsentligt och att nuvarande dimensioneringsmetoder är mycket konservativa.

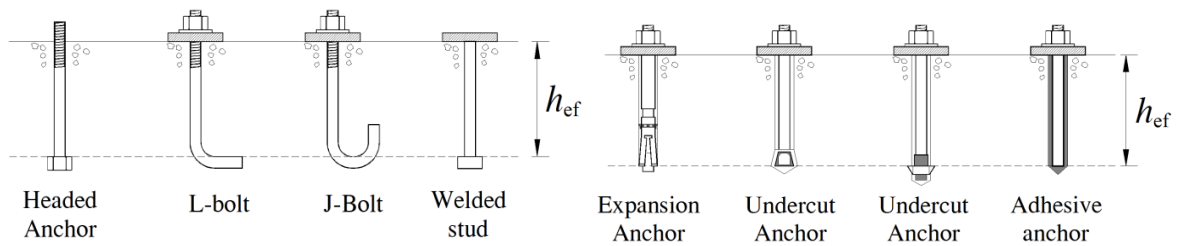
Eftersom det inte finns några riktlinjer för dimensionering och tillståndsbedömning i stålfiberarmerad betong är det övergripande målet för denna undersökning att ge underlag för utveckling av sådana metoder.

I denna studie undersöks ingjutna huvudförsedda förankringar med olika infästningsdjup i oarmerad och stålfiberarmerad betong. Olika armeringsmängder och kantavstånd studeras.

Resultatet av projektet förväntas vara användbart för konsulter, entreprenörer och byggherrar som arbetar med prefabricerade betongkonstruktioner och med kompositkonstruktioner av stål och betong.

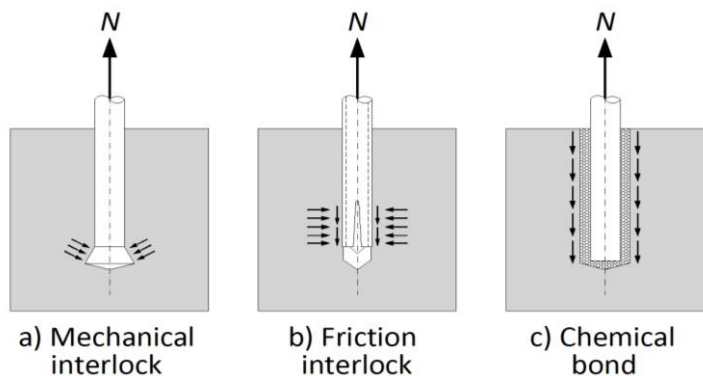
3. METODIK - BROTTMODER

Det finns många olika typer av förankringar, se Figur 4., Eligehausen et al. (2006).



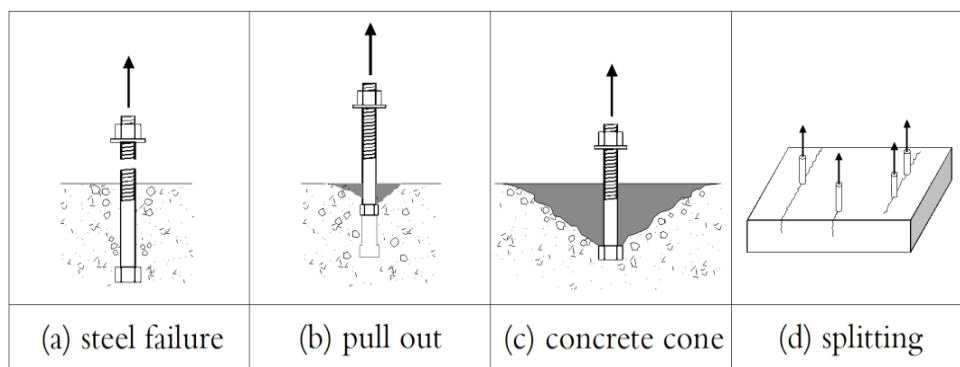
Figur 4. Från vänster fyra exempel på ingjutna förankringar (Bultformat huvud, L-järn, J-järn, Svetsat huvud) och efterinstallerade förankringar (Expanderande förankring, Underskuren förankring i två versioner, Limmad förankring), Eligehausen et al. (2006).

Kraftöverföringen kan i princip ske på tre olika sätt, se Figur 5.



Figur 5. Lastöverföring för olika förankringstyper (Mekanisk lastöverföring; friktion; och kemisk bindning/adhesion)

För dragbelastade huvudförsedda förankringar kan brott uppkomma på fyra sätt genom (a) stålbrott; (b) utdragsbrott; (c) betongkonbrott; (d) betongspjälkning, se Figur 6.



Figur 6. Brottmoder för huvudförsedda förankringar: (a) stålbrott; (b) utdragsbrott; (c) betongkonbrott; (d) betongspjälkning.

Stålbrott är ofta en önskvärd brott-typ eftersom man anser sig ha mer kontroll över stålets draghållfasthet än motståndsförmågan hos den omgivande betongen. Det beräknas med uttrycket:

$$N_{u,s} = f_{u,s} \cdot A_s \quad \text{Ekv. 1}$$

där $f_{u,s}$ är stålets brotthållfasthet och A_s förankringsstångens area..

Utdragsbrott inträffar om betongen inte förmår hålla emot dragkraften. Brottlasten uppskattas med uttrycket

$$N_{u,p} = \tau_b \cdot \pi \cdot d_0 \cdot h_{ef} \quad \text{Ekv. 2}$$

där τ_b är vidhäftninghållfasthetens medelvärde [MPa], d_0 är förankringsstångens diameterdiameter [mm], och h_{ef} är förankringens effektiva djup [mm].

Betongkonbrottet karakteriseras av att ett konformat brott i betongen. Det brukar beräknas med den semiempiriska formeln

$$N_{u,c}^0 = k \cdot \sqrt{f_{cc}} \cdot h_{ef}^{1.5} \quad \text{Ekv. 3}$$

där f_{cc} är betongens tryckhållfasthet [MPa] och K är en empirisk faktor med värdet 15.5 om lastöverföringen sker mekaniskt (bulthuvud) eller med värdet 13.5 om överföringen sker genom friktion eller adhesion. Formeln har inarbetats i flera normer i Europa som CEB (1997) och CEN/TS 1992–4 (2009), och i U.S.A. i ACI 349 (2006) och ACI 318 (2014), Internationellt finns den i *fib* Bulletin 58 (2011). Den betecknas ofta som CC-metoden (Cone Capacity Method).

Ekvation 3 gäller bärförmågan för en enskild infästning placerad långt från kanter och hörn. Ekvationen förutsätter att det finns en tillräckligt stor betongvolym som kan förankra infästningen. Om den är belägen nära en kant eller ett horn, kan en full kon inte utbildas och bärförmågan reduceras i förhållande till en ideal förankring (Eligehausen et al. 2006).

För infästningar nära en kant kan bärförmågan beräknas enligt:

$$N_{u,c} = \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot N_{u,c}^0 \quad \text{Ekv. 4}$$

var

$$\psi_{s,N} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{C}{C_{cr,N}} \leq 1.0 \quad \text{Ekv. 5}$$

$A_{c,N}^0$ är ytan av en kon placerad långt från fria kanter ($A_{c,N}^0 = 9.0 \cdot h_{ef}^2$); $A_{c,N}$ är den teoretiska ytan av konen när kantavståndet C är mindre än det kritiska kantavståndet $C_{cr,N} = 1.5 \cdot h_{ef}$.

Faktorn $A_{c,N}/A_{c,N}^0$ beaktar den geometriska influensen av den verkliga betongbrottytan. Även faktorn $\psi_{s,N}$ beaktar den kantavståndets geometriska influens. När $C \geq C_{cr,N}$ utvecklas den fulla brottkonen, medan däremot denna reduceras när $C < C_{cr,N}$ och därmed även bärförmågan.

4. EXPERIMENTELL STUDIE

En serie utdragsförsök har utförts med huvudförsedda infästningar i oarmerad och stålfiberarmerad betong. Vid försöken har två infästningsdjup provats, $h_{ef} = 100$ och 150 mm. Stålfiberarmeringsvolymen har utgjort $v_f = 0, 0.5$ och 1.0 %, vilket motsvarar $\rho_f = 0, 40$ och 80 kg/m^3 . Kantavståndet C har varierats från $C \gg C_{cr,N}$ till $C = 1.5 h_{ef}, 1.0 h_{ef}$ och $0.5 h_{ef}$.

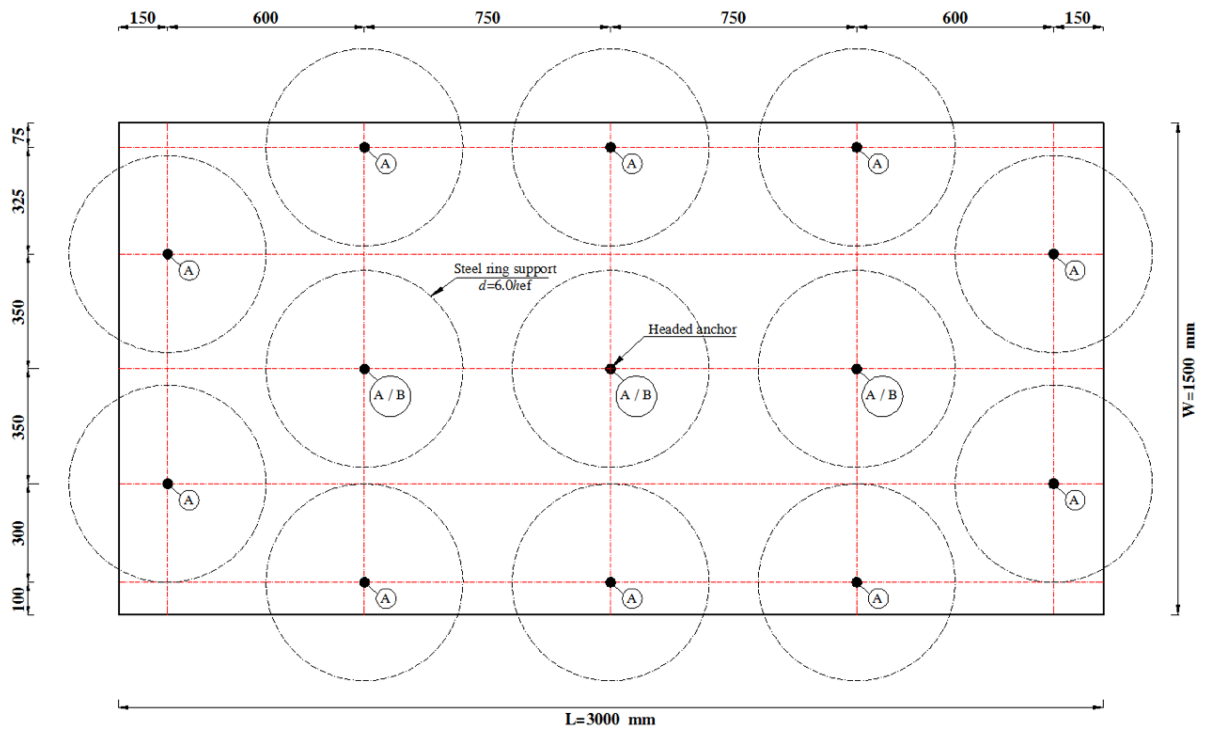
4.1 Provningsprogram

Provningsprogrammet redovisas i Tabell 1. Provuppställning och försöksgeometri visas i Figur 6. Figur 7 visar stålfibrernas geometri. De har längden 50 mm och har hakformade förankringar. Materialdata ges i Tabell 2. Där betecknas betong utan fibrer samt med 40 och 80 kg/m^3 stålfibrer som PC, SFRC40 och SFRC80.

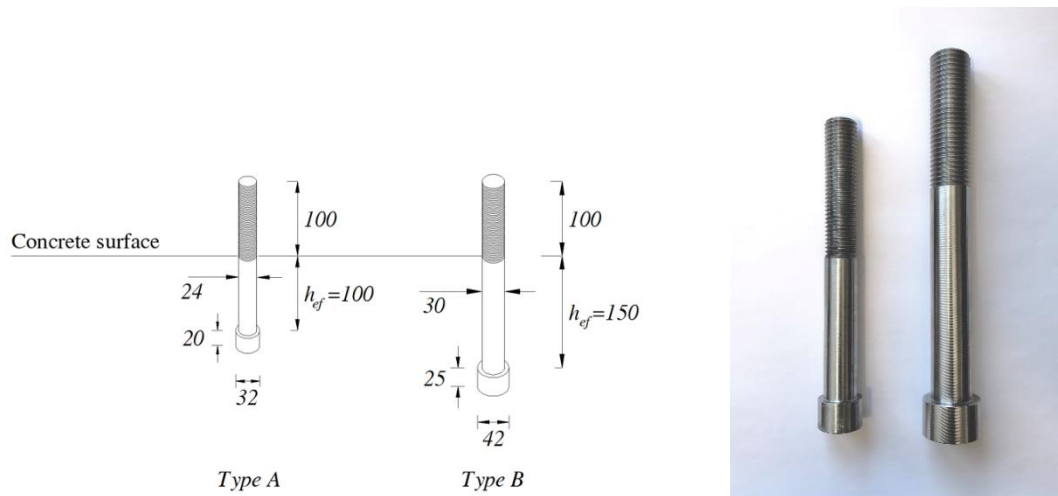
Tabell 1. Provningsprogram

Infästnings- position	Test ID	h_{ef} [mm]	ρ_f [kg/m^3]	C [mm]	Antal försök
I mitten	PC-h100-c	100	0	$>C_{cr}$	3
	SFRC40-h100-c	100	40	$>C_{cr}$	3
	SFRC80-h100-c	100	80	$>C_{cr}$	3
	PC-h150-c	150	0	$>C_{cr}$	3
	SFRC40-h150-c	150	40	$>C_{cr}$	3
	SFRC80-h150-c	150	80	$>C_{cr}$	3
Nära kanten	PC-h100-e75	100	0	$0.75 \cdot h_{ef}$	3
	SFRC40-h100-e75	100	40	$0.75 \cdot h_{ef}$	3
	SFRC80-h100-e75	100	80	$0.75 \cdot h_{ef}$	3
	PC-h100-e100	100	0	$1.0 \cdot h_{ef}$	3
	SFRC40-h100-e100	100	40	$1.0 \cdot h_{ef}$	3
	SFRC80-h100-e100	100	80	$1.0 \cdot h_{ef}$	3
	PC-h100-e150	100	0	$1.5 \cdot h_{ef}$	4
	SFRC40-h100-e150	100	40	$1.5 \cdot h_{ef}$	4
	SFRC80-h100-e150	100	80	$1.5 \cdot h_{ef}$	4

h_{ef} : Förankringsdjup; ρ_f : Fiberinnehåll; C : Kantavstånd;

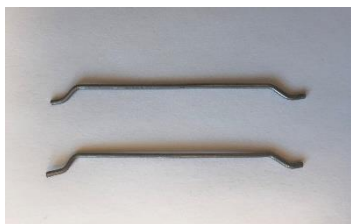


(a) Geometri för prover med förankringar i mitten och nära kanten



(b) Geometri för provade förankringar (typ A: $h_{ef} = 100$ mm och typ B: $h_{ef} = 150$ mm)

Figur 6. Provuppställning och försöksgeometri



Figur 7. Stålfibrer med hakformade förankringar

Tabell 2. Materialdata

Betong	PC	SFRC40	SFRC80
Hållfasthetsklass	C25/30	C25/30	C25/30
w/c	0.70	0.70	0.70
Cement-CEM II/A+V52.5N (kg/m ³)	300	300	300
Ballast 0–4 mm (kg/m ³)	550	550	550
Ballast 4-8 mm (kg/m ³)	590	590	590
Ballast 8-16 mm (kg/m ³)	800	800	800
Tillsatsmedel (% av cement vikt)	-	0.4	0.8
Stål fibrer (kg/m ³)	-	40	80
Mekaniska egenskaper	Medelvärden (COV %)		
Täthet (kg/m ³)	2276 (0.5%)	2321 (0.8%)	2332 (0.8%)
Tryckhållfasthet $f_{cc,m}$ (MPa)	32.8 (1.9%)	33.6 (2.8%)	31.2 (3.6%)
Draghållfasthet $f_{ct,m}$ (MPa)	2.9 (3.8%)	3.2 (5.1%)	3.7 (3.8%)

4.2 Provningsförfarande

Provuppställningen visas i figur 8.



Figur 8. Provuppställning och belastningsanordning

4.3 Provningsresultat

Försöksresultaten sammanfattas i Tabell 3. Försöksbeteckningen (ID) består i tabellen av tre delar; den första definierar betongtypen (PC, SFRC40 och SFRC80); den andra delen definierar förankringsdjupet ($h = 100$ och 150mm); och den tredje delen definierar förankringens läge i förhållande till fri betongkant (c: centrum; e: avstånd till kant 75, 100, eller 150 mm).

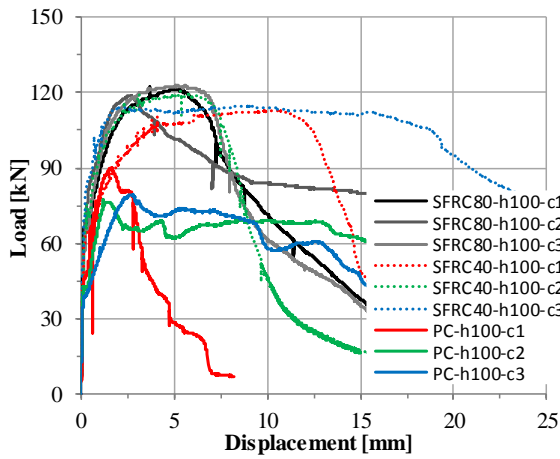
Tabell 3. Försöksresultat

Test ID	$N_{u,\text{test}}$ [kN]				$N_{\text{um,test}}$ [kN]	$\delta_{u,m}$ [mm]	$N_{u,\text{CCD}}$ [kN]	$N_{\text{um,test}}/N_{u,\text{CCD}}$	% increase w.r.t. tests in PC [%]
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4					
PC-h100-c	89.9	77.4	79.5	-	82.2	1.8	88.7	0.93	-
SFRC40-h100-c	112.7	120.5	114.6	-	115.9	8.2	89.8	1.29	1.41
SFRC80-h100-c	122.4	118.8	123.1	-	121.4	3.8	86.5	1.40	1.48
PC-h150-c	167.8	154.6	168.2	-	163.5	3.6	163.0	1.00	-
SFRC40-h150-c	212.7	230.3	203.7	-	215.6	6.2	165.0	1.31	1.32
SFRC80-h150-c	252.1	243.0	238.4	-	244.5	5.9	159.0	1.54	1.50
PC-h100-e75	50.0	53.5	55.8	-	53.1	0.8	56.6	0.94	-
SFRC40-h100-e75	76.2	68.4	73.5	-	72.7	1.0	57.3	1.27	1.37
SFRC80-h100-e75	73.0	71.9	84.3	-	76.4	2.8	55.2	1.38	1.44
PC-h100-e100	65.0	64.6	57.2	-	62.3	0.9	66.6	0.94	-
SFRC40-h100-e100	81.1	98.4	94.6	-	91.4	1.4	67.4	1.36	1.47
SFRC80-h100-e100	72.5	80.3	88.7	-	80.5	1.2	64.9	1.24	1.29
PC-h100-e150	68.0	75.2	67.4	71.3	70.5	1.4	88.7	0.79	-
SFRC40-h100-e150	102.3	97.7	100.8	103.4	101.0	2.6	89.8	1.12	1.43
SFRC80-h100-e150	97.0	97.3	104.7	106.7	101.4	2.9	86.5	1.17	1.44

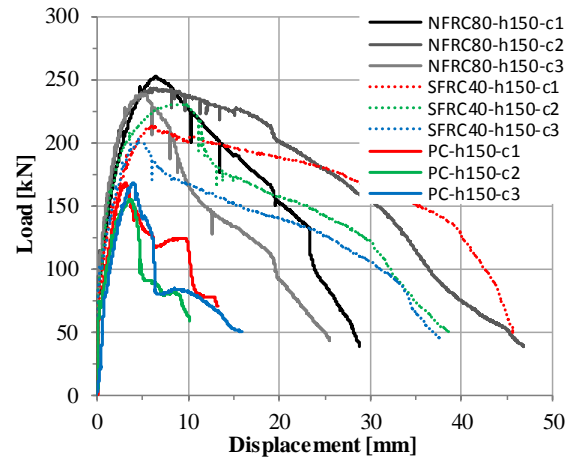
$N_{u,\text{test}}$: Infästningens brottlast; $N_{\text{um,test}}$: Medelvärde av $N_{u,\text{test}}$; $\delta_{u,m}$: Medelrörelse vid brottlast; $N_{u,\text{CCD}}$: Beräknad brottlast med CCD-metoden.

Brottmod för alla provade infästningar var konbrott i betongen. Förhållandet mellan brottlast erhållen vid försök och vid beräkning med konkapacitetsmetoden (CCD) varierar mellan 1.29 och 1.48.

Detta visar att konkapacitetsmetoden väsentligt underskattar bärförmågan för stålfiberarmerad betong. Några last-deformationskurvor för förankringar i oarmerad och fiberarmerad betong redovisas i Figur 9 och 10. Som visas i figurerna ökar brotthållfastheten och deformationen avsevärt i fiberarmerad betong.

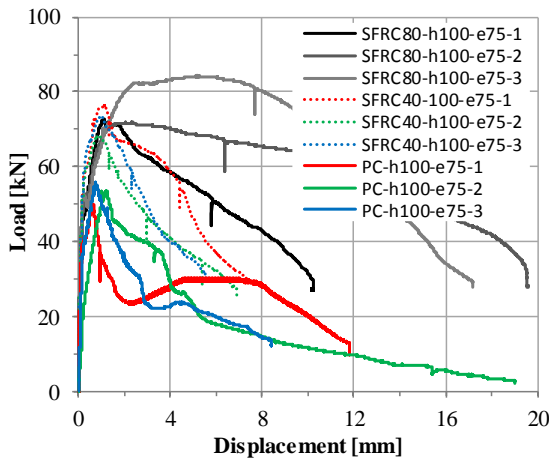


(a) $h_{ef}=100$ mm

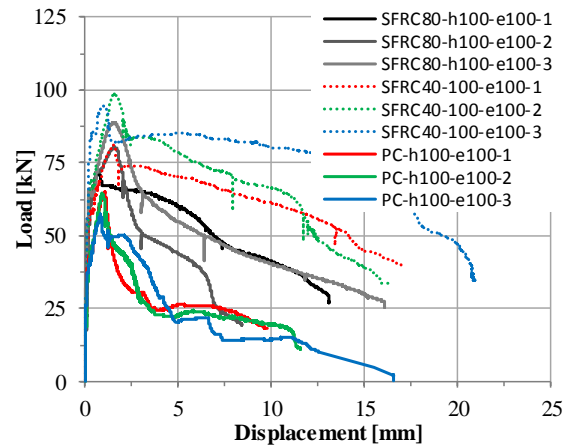


(b) $h_{ef}=150$ mm

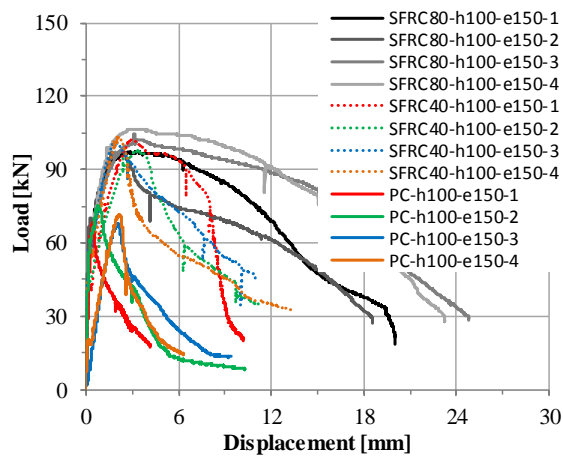
Figur 9. Last-deformationskurvor för infästningar placerade i mitten av oarmerade och fiberarmerade betongplattor



(a) Kantavstånd $C=75$ mm



(b) Kantavstånd $C=100$ mm



(c) Kantavstånd $C=150$ mm

Figur 10. Last-deformationskurvor för infästningar placerade nära kanten av oarmerade och fiberarmerade betongplattor.

Figurerna 11, 12 och 13 visar några typiska brottbilder för infästningar i betong med olika armeringsgrad: oarmerad (PC, Plain Concrete), SFRC40 och SFRC80.



Infästning i mitten ($h_{ef}=100$)



Infästning i mitten ($h_{ef}=150$)



Infästning nära kant ($C=75$ mm)

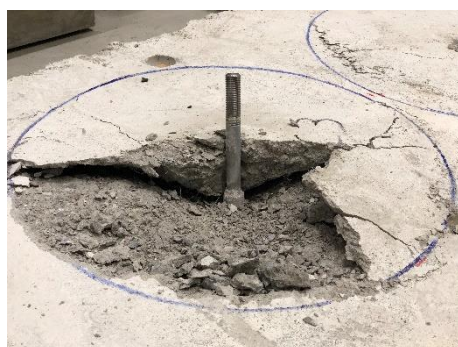


Infästning nära kant ($C=100$ mm)

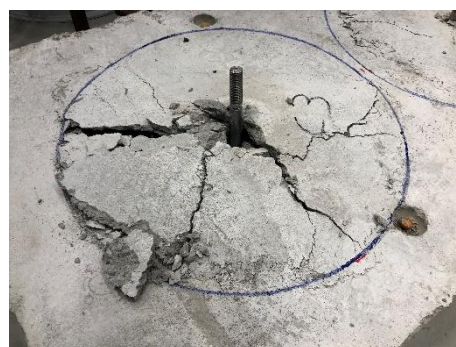


Infästning nära kant ($C=150$ mm)

Figur 11. Brottbilder för infästningar i oarmerad betong



Infästning i mitten ($h_{ef}=100$)



Infästning i mitten ($h_{ef}=150$)



Infästning nära kant ($C=75$ mm)



Infästning nära kant ($C=100$ mm)



Infästning nära kant ($C=150$ mm)

Figur 12. Brottbilder för infästningar i armerad betong med 40 kg/m^3 stålfiber



Infästning i mitten ($h_{ef}=100$)



Infästning i mitten ($h_{ef}=150$)



Infästning nära kant ($C=75$ mm)



Infästning nära kant ($C=100$ mm)



Infästning nära kant ($C=150$ mm)

Figur 13. Brottbilder för infästningarna i armerad betong med 80 kg/m^3 stålfiber

5. SLUTSATSER

Brottlasten för de provade infästningarna i oarmerad betong visar relativt god överensstämmelse med beräknade värden enligt konkcapacitetsmetoden (CCD Concrete Cone Capacity Design). Bärförmågan ökar betydligt i stålfiberarmerad betong och konkcapacitetsmetoden underskattar bärförmågan med 25 till 50 %. Detta gäller för alla utförda försök, såväl för de som är placerade långtifrån som nära fria kanter.

Infästningar nära fria kanter har lägre bär- och deformationsförmåga än motsvarande infästningar som sitter mitt i en betongplatta. Detta beror på att en brottkon ej kan utbildas fullt ut nära en kant.

Bärförmågans medelvärde för provade infästningar placerade långt från fria kanter ökade med 32% i SFRC40 och med 48% i SFRC 80 i jämförelse med oarmerad betong. Dessutom ökar infästningarnas seghet och deformationsförmåga. Bärighetsökningen nära en fri kant var 29%.

I försöken har huvudförsedda infästningar provats med infästningsdjupen $h_{ef} = 100$ och 150 mm. Resultaten överensstämmer med en tidigare pilotstudie (Nilforoush et al. 2018a) med infästningsdjupet $h_{ef} = 220$ mm. Det är därför rimligt att komplettera konkcapacitetsmetoden i ekvation 4 med en faktor $\psi_f = 1,25$ som tar hänsyn till inverkan av stålfiberarmeringen:

$$N_{u,c} = \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_f \cdot N_{u,c}^0 \quad \text{Ekv. 5}$$

Faktorn $\psi_{s,N} = 1,25$ tar hänsyn till gynnsam inverkan av stålfibrer. För att faktorn skall vara tillämpbar måste stålfibervolymen vara minst 0.5% vilket motsvarar 40 kg stålfibrer per m³ betong. Vid mindre stålfibermängder kan ingen ökning tillgodoräknas.

Ovanstående modifieringsfaktor baseras på en begränsad mängd försök med huvudförsedda infästningar i stålfiberarmerad betong med endast en fibertyp med hak-förankringar. Eftersom parametrar som fibertyp, fibergeometri, fiberorientering och betongsammansättning kan påverka egenskaperna behöver ytterligare studier genomföras för att resultatens skall kunna generaliseras även till infästningar utsatta för skjuvbelastningar och för infästningar utsatta för kombinerade drag- och skjuvlaster. Sådana studier bör även inkludera fler vanliga infästningstyper som inborrade infästningar.

LITTERATURFÖRTECKNING

- ACI Committee 318 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 524 pp.
- ACI Committee 349 (2006). *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures* (ACI 349-06), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 134 pp.
- CEB (1991): *Fastenings to Concrete and Masonry Structures. State of the Art Report*. (First issued as Bulletins d'Information No 206 and 207 by Comité Euro-International du Béton (CEB) 1991). Thomas Telford, London 1994. 250 pp. ISBN 0-7277-1937-8.
- CEB Design Guide (1997). *Design of Fastenings in Concrete*, Comité Euro-International du Béton (CEB), Thomas Telford, Lausanne, Switzerland, 92 pp.
- CEN/TS 1992-4 (2009). *CEN Technical Specification (TS): Design of Fastenings for Use in Concrete*, Final Draft, European Organization for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 166 pp.
- Elfgren, Lennart; Broms, Carl Erik; Johansson, Håkan E.; and Rehnström, Arne (1980): *Anchor Bolts in Reinforced Concrete Foundations. Short Time Tests*. Research Report TULEA 1980:36. Division of Structural engineering, University of Luleå, 1980, 117 sid, ISSN0347-0881.
- Elfgren, Lennart; Cederwall, Krister; Gylltoft, Kent; and Broms Carl Erik (1982): *Fatigue of Anchor Bolts in Reinforced Concrete Foundations*. IABSE Colloquium Lausanne 1982. Fatigue of Steel and Concrete Structures, pp 439-470.
- Elfgren, Lennart, Anneling, Roger, Eriksson, Anders & Granlund, Stig-Ola (1987): *Adhesive anchors: tests with cyclic and long-time loads*. Statens Provningsanstalt, Borås. SP rapport, nr 1987:39
- Elfgren, Lennart, editor (1989): *Fracture Mechanics of Concrete Structures. From theory to Applications*. A RILEM State of the Art Report. Chapman & Hall, London 1989, 407 pp. ISBN 0-412-30680-8.
- Elfgren, Lennart och Shah, Surendra P., Editors (1991): *Analysis of Concrete Structures by Fracture Mechanics*. Proceedings of the International RILEM workshop dedicated to Professor Arne Hillerborg, sponsored by RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) and organized by RILEM Technical Committee 90-FMA Fracture Mechanics of Concrete Structures – Applications, Abisko, Sweden, June 28-30, 1989. London, Chapman and Hall, 305 pp, ISBN 0-412-36980-X.
- Elfgren, Lennart; Eligehausen, Rolf and Rots, Jan G. (2001): Anchor bolts in concrete structures: summary of Round Robin tests and analysis arranged by RILEM TC 90-FMA Fracture Mechanics of Concrete - Applications. *Materials and Structures*, Vol 34, No 242, October 2001, pp. 451-457. The full report can be downloaded from <http://epubl.ltu.se/1402-1528/1998/14/index.html>
- Elfgren, Lennart and Nohhabai, Keivan (2002): Tension of reinforced concrete prisms. Bond properties of reinforcement bars embedded in concrete tie elements. Summary of a RILEM round-robin investigation arranged by TC 147-FMB "Fracture Mechanics to Anchorage and Bond. *Materials and Structures*, Vol 35, No 250, July 2002, p. 318-325. The full report can be downloaded from <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2001/13/index.html>
- Eligehausen, Rolf; Mallée, Rainer and Silva, John F (2006): *Anchorage in Concrete Construction*. Berlin: Ernst & Sohn, 378 pp, ISBN 978-3-433-01143-0.
- EN 12390-3 (2009). Testing hardened concrete, Compressive strength of test specimens, 19 pp.
- EN 12390-6 (2009). Testing hardened concrete, Tensile splitting strength of test specimens, 11 pp.
- fib B58 (2011): *Design of anchorages in concrete. Guide to good practice*. Lausanne: The International Federation for Structural Concrete, fib, Bulletin 58, 282 pp, ISBN 978- 2-88394-098-7

- Gunnarsson, Jakob & Lindell, Eric (2015): *Konstruktioner I stålfiberbetong. Provning och dimensionering enligt ny svensk standard*. Examensarbete i konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet, 162 sid.. Nedladdningsbart från <http://pure.ltu.se/portal/files/103078500/LTU-EX-2015-102973904.pdf>
- Hillerborg, Arne (1985): The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of Concrete. *Materials and Structures*, No 107, pp 407-413.
- Nilforoush, Rasoul (2017). Anchorage in Concrete Structures. Numerical and Experimental Evaluations of Load-Carrying Capacity of Cast-in-Place Headed Anchors and Post-Installed Adhesive Anchors. Doctoral Thesis in Structural Engineering, Luleå University of Technology. 352 pp. Available at <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1153811/FULLTEXT01.pdf>
- Nilforoush, Rasoul, Nilsson, Martin, Söderlind, Gunnar & Elfgrén, Lennart (2016), 'Long-Term Performance of adhesive Bonded Anchors' *ACI Structural Journal*, 113(2), 251-261 MS No. S-2014-302.R2. Accepted for publication
- Nilforoush, R., Nilsson, M., Elfgrén, L., Özbolt, J., Hofmann, J., & Eligehausen, R. (2017a). Influence of Surface Reinforcement, Member thickness and Cracked Concrete on Tensile Capacity of Anchor Bolts. *ACI Structural Journal*, 114(6), 1543–1556
- Nilforoush, R., Nilsson, M., Elfgrén, L., Özbolt, J., Hofmann, J., & Eligehausen, R. (2017b). Tensile capacity of anchor bolts in uncracked concrete : Influence of member thickness and anchor's head size. *ACI Structural Journal*, 114(6), 1519–1530.
- Nilforoush, R., Nilsson, M., & Elfgrén, L. (2017c). “Experimental Evaluation of Tensile Behaviour of Single Cast-in-place Anchor Bolts in Plain and Steel Fibre-reinforced Normal- and High-strength Concrete,” *Engineering Structures*, 147, 195–206.
- Nilforoush, R., Nilsson, M. & Elfgrén, L. (2018a). Infästningar i fiberarmerad högpresterande betong. Slutrapport SBUF 13255. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, 18 sid.
- Nilforoush, R., Nilsson, M., & Elfgrén, L. (2018b). Experimental Evaluation of Influence of Member Thickness, Anchor-Head Size, and Orthogonal Surface Reinforcement on the Tensile Capacity of Headed Anchors in Uncracked Concrete. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 144(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001976](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001976)
- Nilsson, Martin; Ohlsson, Ulf & Elfgrén, Lennart (2011); Effects of surface reinforcement on bearing capacity of concrete with anchor bolts. *Nordic Concrete Research*, Vol 2011, No 44, pp 161-174.
- SIS-CEN/TS 1992-4-2 (2009): *Technical specification – Design of Fastenings for use in Concrete – Part 4-2 Headed fasteners*. European Committee for Standardization, Brussels, 34 pp
- SS 14651 (2007). *Provningsmetod för betong med metallfibrer – Bestämning av böjdraghållfasthet*. Stockholm, Sverige: SIS Förlag AB. Svensk standard SS-EN 14651:2005+A1:2007.
- SS 812310 (2014). *Fiberbetong – Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner*. Stockholm, Sverige: SIS Förlag AB. Svensk standard SS-EN 812310:2014.
- Zirgulis, Giedrius; Svec, Oldfich; Vidal, Elena Sarmient; Geiker, Mette Rica; Cwirzen, Andrzej and Kanstad, Terje (2015): Importance of quantification of steel fibre orientation for residual flexural tensile strength in FRC. *Materials and Structures*, On line Nov 2015, pp 1-17, DOI 10.1617/s11527-015-0759-3
- Walraven, Joost (2008): On the way to design recommendations for UHPFRC. IN “Ultra High Performance Concrete (UHPC)”, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008. Edited by E. Fehling, M. Schmidt and S Stürwald, Kassel University Press, Kassel, pp 45-56, ISBN: 978-3-89958-376-2. Available at <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-376-2.volltext.frei.pdf>