

BETONITERÄKSEN A500H KÄYTTÖ PILARINRAUDOITUKSENA

Tuuli Oksanen, Pentti Lumme ja
Pekka Kanerva

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 14
No. 2 1981 s. 38...55

YHTEENVETO: Artikkelissa esitellään Teknillisessä korkeakoulussa tehty kokeellinen tutkimus, jonka tavoitteena oli selvittää teräksen A500H käyttömahdollisuuksia teräsbetonipilareissa. Aluksi selostetaan koekappaleiden ominaisuudet, mittausjärjestelyt sekä kuormitustapa. Pääosa kirjoituksesta käsittelee teräksellä A400H ja A500H raudoitettujen pilarien puristumien vertailua sekä kokeellisten ja laskettujen murtokuormien vertailua.

JOHDANTO

Teräksen A500H myötölujuus on 500 MPa ja sitä vastaava puristuma on 2,5 o/oo. Betonin maksimipuristusjännitystä vastaava puristuma taas on 2,0 - 2,5 o/oo, minkä vuoksi normeissa /1/ betonin myötöpuristuma on rajoitettu 2 o/oo:een. Betoni saavuttaisi täten myötöpuristumansa ennen raudoituksen myötämistä, jolloin osa tankojen lujuudesta jäisi käyttämättä.

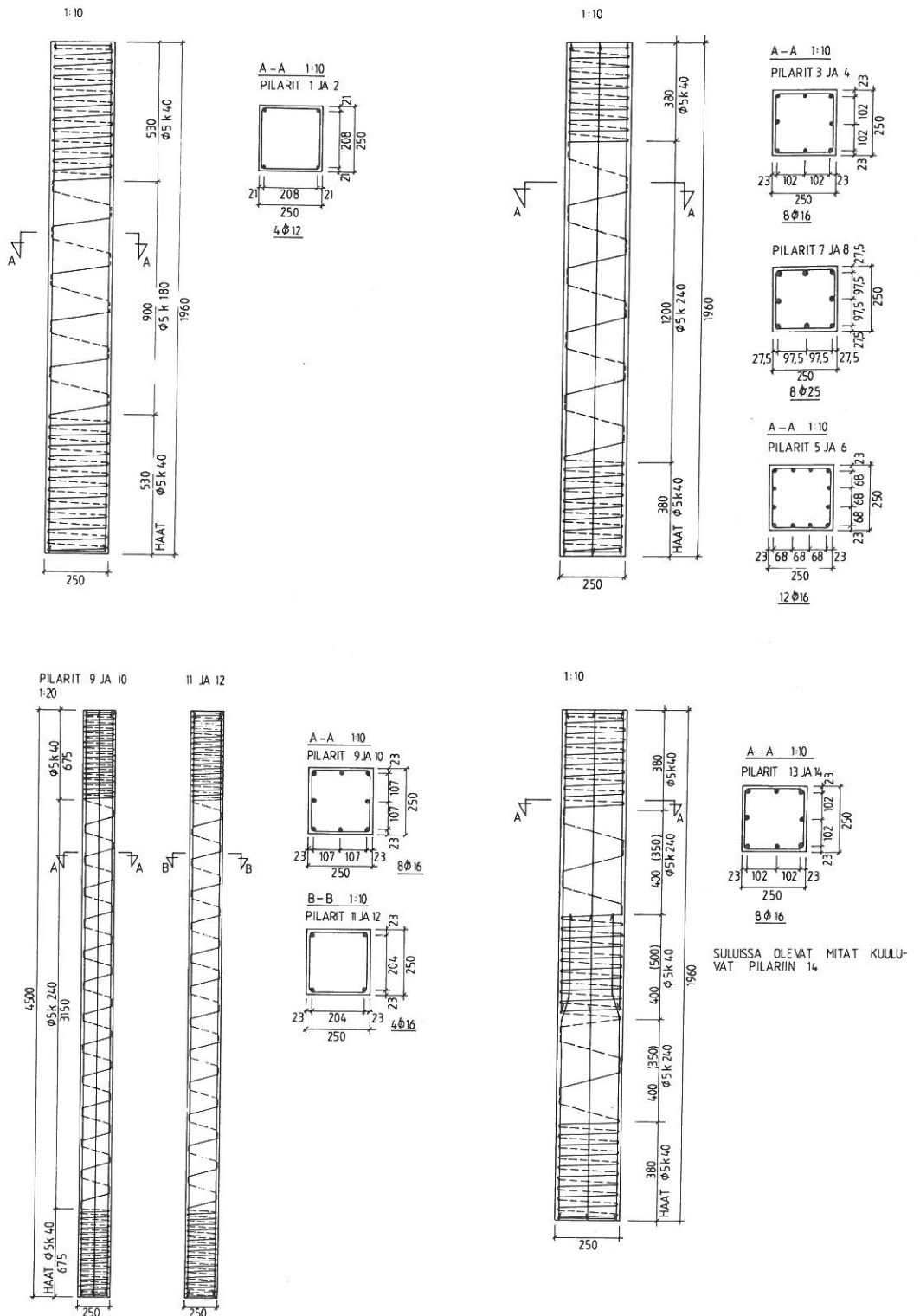
Tässä kirjoituksessa esitellään Teknillisen korkeakoulun huoneenrakennustekniikan laboratoriossa suoritettu tutkimus betoniteräslaadun A500H käyttömahdollisuuksista pilareissa. Tavoitteena oli selvittää, puristuuko betoni niin paljon, että teräksen A500H lujuus voidaan käyttää hyväksi keskimääräisissä kuormitetuissa pilareissa.

Murtokuormitusta vastaavien puristumien selvittämiseksi tehtiin pilarikoesarja, jossa tutkittiin teräksen lujuuden, raudoitusmäärän, pilarin hoikkuiden sekä tankojen jatkosten vaikutusta puristumiin, murtokuormiin sekä murtumistapaan.

Sekä norjalainen tutkimuslaitos SINTEF /2/ ja /3/ että amerikkalaiset Todeschini, Bianchini ja Kessler /4/ olivat aiemmin tehneet samantyyppisiä pilarikokeita, joissa oli käytetty raudoituksena yli 400 MPa myötölujuuden omaavia teräslaatuja. Näissä tutkimuksissa oli saatu samansuuntaisia tuloksia:

- betonin maksimikuormitusta vastaava puristuma raudoitetuissa pilareissa oli yli 3 o/oo
- murtumistapa oli hauras
- betonin lujuudella ei näyttänyt olevan vaikutusta puristumaan.

Kirjallisuustietojen varmistamiseksi katsottiin aiheelliseksi suorittaa koesarja myös suomalaisella teräksellä ja betonilla.



Kuva 1. Pilareiden raudoitus.

KOESARJA

Tutkimusohjelma

Rakennetekniikan laboratoriossa valettiin 15 pilarin sarja. Tarkoituksena oli tutkia A400H ja A500H betoniteräslaaduilla raudoitettujen pilarien käyttäytymistä kuormitettaessa. Muodonmuutokset ja murtokuorma olivat tärkeimmät tutkittavat suureet. Pilareista yhdeksän oli lyhyitä. Pitkiä ja hoikkia pilareita oli neljä ja kaksi lyhyitä pilareita, joiden raudoitus oli jatkettu keskeltä. Kutakin koekappaletyyppiä valmistettiin kaksi samanlaista kappaletta, joista toinen oli raudoitettu teräksellä A400H ja toinen teräksellä A500H. Raudoitusmäärät vaihtelivat normien mukaisesta minimiraudoituksesta maksimiraudoitukseen (hiukan yli maksimin 6 %).

Pilareiden mitat, raudoitus ja materiaalitiedot

Taulukossa 1 on tiedot pilarien mitoista ja raudoitusmääristä. Pilarit, joilla on pariton numero (1, 3, 5, 7, 9, 11 ja 13) on raudoitettu teräksellä

Taulukko 1. Koepilareiden mitat ja raudoitus.

Pilarin n:o	koko b x h mm ²	pituus mm	hoikkuus-luku	raudoitus	raudoitus %	Huom.
1,2	250 x 250	1960	14	4 ϕ 12	0,72	
3,4,13,14	250 x 250	1960	14	8 ϕ 16	2,57	13,14 ovat jat-kospilareita
5,6	250 x 250	1960	14	12 ϕ 16	3,86	
7,8	250 x 250	1960	14	8 ϕ 16	6,28	
9,10	250 x 250	4500	31/62 ^x	8 ϕ 16	2,57	hoikkpilari
11,12	250 x 250	4500	31/62 ^x	4 ϕ 16	1,29	"
15	250 x 250	1960	14	-	-	

^xpilarit 9 ja 11 päistään kiinnitetty = λ = 31

pilarit 10 ja 12 päät nivelellisiä = λ = 62

A400H ja parillisen numeron omaavat pilarit (2, 4, 6, 8, 10, 12 ja 14) taas on raudoitettu teräksellä A500H. Pilari 15 oli raudoittamaton vertailukappale.

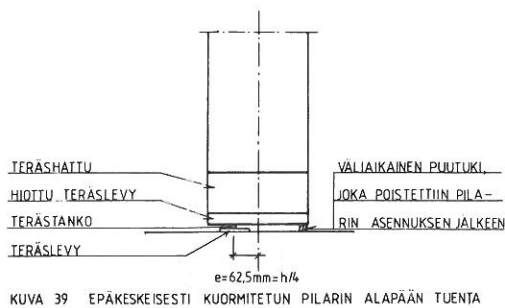
Pääraudoitus oli Ovakon harjatankoa A400H ja A500H. Hakoina käytettiin 5 mm:n sileätä kierrehakaa B500. Pilareiden raudoitus on esitetty kuvassa 1.

Pilarien päissä käytettiin teräksestä valmistettuja paaluhattuja pilarin päiden koossapysymisen varmistamiseksi. Pääteräkset sahattiin päistä suoraksi, jotta ne saatiin tasaisesti kiinni teräshattuun ja jotta kaikki teräkset saatiin saman mittaisiksi. Pilarit valettiin vaaka-asennossa patterimuotteihin.

Betonista valettiin yhdeksän normien mukaista koekuutiota ja -palkkia sekä kolmetoista koelieriötä, joista tehtiin puristuslujuus-, taivutusvetolujuus- sekä lieriöistä halkaisuvetolujuus- ja kimmomodulikokeet. Betonin 28 vuorokauden kuutiolujuus oli 43 N/mm^2 . Koekappaleiden tarkat lujuusarvot löytyvät lähteestä /5/, missä on myös harjatankojen vetokokeista saadut tulokset.

Varsinainen murtokuormitus suoritettiin myös portaittain: kolme minuuttia nostettiin kuormitusta, kolme minuuttia annettiin kuorman olla vakio. Kuormitusportaiden suuruus määräytyi siitä, että laskennallinen murtokuorma ajateltiin saavutettavan noin tunnissa. Käyttötilan maksimikuorman saavuttamisen jälkeen kuormitusportaiden suuruus ja aika puolitettiin.

Pilarien koestus aloitettiin niiden ollessa 21 vuorokauden ikäisiä ja viimeinen kuormitus tapahtui 39 vuorokautta valun jälkeen. Kuormitus suoritettiin VTT:n Rakennetekniikan laboratoriossa 600 kN:n hydraulisella puristimella. Lyhyet pilarit ja kaksi hoikkaa pilaria kuormitettiin keskisesti, mutta hoikkien pilareiden murruttua samalla tavalla kuin lyhyet pilarit, muutettiin kahden viimeisen hoikan pilarin kuormitus epäkeskiseksi. Näiden alapään tuenta on esitetty kuvassa 3. Yläpään tuenta oli samanlainen.



Kuva 3. Epäkeskisesti kuormitetun pilarin alapään tuenta.

Pilareita kuormitettiin kunnes ne eivät enää pystyneet kantamaan suurempaa kuormaa, vaan muodonmuutokset kasvoivat nopeasti. Tällöin kuorma alkoi myöskin laskea ja suojabetonikerros irta murtumiskohdasta. Puristamista jatkettiin suurista muodonmuutoksista huolimatta, kunnes raudoitus nurjahti. Hoikat pilarit sen sijaan nurjahtivat, kun murtokuorma oli saavutettu.

KOETULOKSET

Murtumismekanismi ja -tapa

Lyhyillä pilareilla murtumiskohta osui jompaan kumpaan pilarin päähän kaikilla muilla paitsi minimiraudoitetuilla pilareilla sekä jatkospilareilla. Murtuminen alkoi yleensä siten, että teräshatun reunaan alkoi syntyä pituussuuntaisia halkeamia, jotka kasvoivat kuormitettaessa. Ensimmäiset halkeamat syntyivät melko myöhäisessä vaiheessa: 0,72 %:lla raudoitetuissa pilareissa 100 kN ennen maksimikuorman saavuttamista, raudoitusprosentin ollessa 2,57 % noin 300 kN ja muilla noin 200 kN ennen maksimikuormaa. Murto-kuorman saavuttamisen jälkeen puristumat kasvoivat nopeasti kuorman laskiessa. Suojabetoni lohkesi irti murtumiskohdasta ja lopuksi raudoitus nurjahti.

Pilarin päissä tapahtunut murto ja raudoituksen nurjahtaminen osui tiheän raudituksen alueelle tai kuten pilareilla 6 tangot nurjahtivat ensimmäisen suuremman hakavälin kohdalta. Vahvasti raudoitetuissa pilareissa kuten pilarit 7 ja 8 tankojen nurjahtaessa useat haat katkesivat tiheän raudituksen

alueelta. Samalla repesi myös teräshattu yhdeltä sivulta kokonaan ja muilta sivuilta osittain. Pääraudoitus oli painautunut teräshattuun muodostaen ulkopuolelle kohoutumia. Nämä oli erityisen selvästi nähtävissä yläpään teräshatussa. Sekä hakojen katkeaminen että teräshatun kulmien re-
peytyminen tapahtuivat kuitenkin vasta murtokuorman saavuttamisen jälkeen, jolloin puristumat olivat jo erittäin suuria ja suojabetoni oli kuoriutunut murtumiskohdasta. Niillä ei siis ollut vaikutusta murtokuorman suuruuteen. Jatkospilareilla murto tapahtui tankojen jatkoskohdasta.

Keskeisesti kuormitetuilla hoikilla pilareilla murtumistapa oli samanlainen kuin lyhyillä pilareilla paitsi, että halkeilua ja suojabetonikerroksen murenemistä tapahtui molemmista päistä, kunnes varsinainen murtuminen alkoi jommasta kummasta päästä.

Epäkeskeisesti kuormitetut hoikat pilarit alkoivat taipua jo kuormituksen alkuvaiheessa. Ensimmäiset poikittaiset vetohalkeamat syntyivät pilarin ollessa erittäin paljon taipunut ja pian tämän jälkeen pilari nurjahti.

Pilarin 15, joka oli raudoittamaton, halkeilu alkoi yläkulmasta edeten vi-
nostti. Lopulta se murtui kiilamaisesti kuten puristettu koelieriö.

Voima-muodonmuutoskäyrät ja murtopuristuma

Lyhyillä pilareilla eri sivujen puristumat olivat yleensä melko lähellä toisiaan. Useimmilla pilareilla maksimipuristuma-alue on hyvin selvä, kuva 4, kun murtokuorma on saavutettu ylimpien antureiden puristumat kasvavat nopeasti kun taas keskimmäisten ja alimpien antureiden puristumat alkavat pienetä (murtokohta ylhäällä).

Kuvassa 5 on keskeltä murtuneen pilarin voima-puristuma -käyrät. Maksimikuorman saavuttamisen jälkeen puristumat lisääntyvät edelleenkin erityisesti keskimmäisissä ja alimmissa antureissa. Kuorma ei kuitenkaan laske paljon huolimatta suurista puristumista. Lähteessä /5/ on esitetty kaikkien kuormitettujen pilarien voima-puristuma -käyrät.

Tarkasteltaessa voima-puristuma -käyrää voidaan todeta, että teräksellä A500H raudoitettujen pilarien kuormankantokyky on selvästi suurempi kuin teräksellä A400H raudoitettujen pilarien. Runsaasti raudoitetuilla pilareilla maksimikuorman saavuttamisen jälkeen puristumat kasvavat paljon hitaammin kuin vähän raudoitetuilla pilareilla.

Keskeisesti kuormitettujen hoikkien pilarien murtokohta osui niin kauaksi mittauspisteistä, ettei maksimipuristumia voitu mitata.

Epäkeskeisesti kuormitetuissa hoikissa pilareissa, kuva 6, puristumat olivat aina isompia kuin vastakkaisen puolen venymät.

Kuvassa 7 on esitetty epäkeskeisesti kuormitetun pilarin voima-taipuma -käyrä. Toiseen suuntaan taipuma on yli 30 mm (anturi ylittänyt mitta-alueensa, todellisuudessa maksimitaipuma lähes 50 mm), mutta toiseen melkein nolla. Keskeisesti kuormitetuilla hoikilla pilareilla taas maksimitaipuma jäi vain 3 mm:iin.

Teräksellä A500H raudoitetulla jatkospilarilla syntyi suuria 3-4 o/oo puristumia jo ennen maksimikuormaa, kun taas teräksellä A400H raudoitetulla jatkospilarilla ne jäivät yleensä alle 2 o/oo. Maksimikuorman saavuttamisen jälkeen kummankin pilarin puristumat kasvoivat vielä runsaasti.

Taulukkoon 2 on kerätty tiedot lyhyiden pilareiden puristumista. Sarakkeessa 3 on maksimipuristuma-alueella mitattujen eri sivujen puristumien keskiarvo kuorman ollessa maksimi. Luvun perässä oleva kirjain merkitsee kohtaa, mistä keskiarvo on laskettu: Y = ylimmäiset anturit, K = keskimmäiset anturit ja A = alimmaiset anturit.

Sarakkeissa 4 ja 5 on minimi- ja maksimipuristumat kohdassa, josta sarakkeen 3 keskiarvo on laskettu. Sarakkeessa 6 on murtokuormaa vastaavien kokonaispuristumien keskiarvo ja sarakkeessa 7 kokeellisesti saadut harjatankojen myötöpuristumat.

Tarkasteltaessa sarakkeen 6 arvoja, huomataan, että teräksellä A400H raudoitettujen pilarien kokonaispuristumat jäivät noin 2 o/oo:een ja ne ovat melkein samat kaikilla raudoitusmäärillä. Teräksellä A500H raudoitettujen pilarien puristumat sen sijaan näyttävät kasvavan teräsmäärän lisääntyessä ollen keskiarvoltaan 2,2 o/oo.

Vertailtaessa maksimipuristumia näyttää siltä, että ne kasvavat raudoituksen lisääntyessä. Teräksellä A500H raudoitetuissa pilareissa on suuremmat puristumat kuin teräksellä A400H raudoitetuissa pilareissa.

Raudoittamattomalla pilarilla 15 kokonaispuristumien keskiarvo oli 1,86 o/oo.

Taulukko 2. Lyhyiden pilarien murtokuormaa vastaavat puristumat

1. Pilarin n:o	2. Murtokuorma F_k	3. Puristuma o/oo	4. Max. puristuma o/oo	5. Min. puristuma o/oo	6. Kokonaispuristuma o/oo	7. Terästen myötöpuristuma o/oo
1	2012	2,64K	4,27	1,08	2,01	2,24
2	¹⁾ 2025	1,97K	2,29	1,55	1,83	2,69
3	2500	2,49Y	3,10	1,98	1,86	2,32
4	2700	2,86Y	3,45	2,43	2,31	2,78
5	2900	2,81A	3,56	2,45	2,02	2,32
6	²⁾ 3100	3,51A	3,87	3,27	2,59	2,78
7	3380	3,11Y	3,67	2,56	2,07	2,27
³⁾ 8	3600	2,82A	2,94	2,69	2,03	2,49

¹⁾ Puristumat mitattu tällä arvolla, todellinen maksimikuorma 2069 kN, jolloin puristumatkin hiukan suurempia

²⁾ Puristumat mitattu tällä arvolla, todellinen maksimikuorma 3140 kN, jolloin puristumatkin hiukan suurempia.

³⁾ Tankojen vetokokeissa harjatanko $\varnothing 25$ ei täyttänyt teräksen A500H lujuusvaatimusta.

Taulukossa 3 on tiedot epäkeskisesti kuormitettujen pilarien 10 ja 12 puristumista ja venymistä sekä taipumista.

Murtokohdan puristumista toinen on lähes 5 o/oo ja toisen mitta-anturi on ylittänyt mitta-alueensa. Joka tapauksessa kummatkin ovat kuitenkin yli 4 o/oo eli suurempia kuin normeissa sallima 3,5 o/oo. Venymämittaukset ovat myös todellisuudessa suurempia. Kokonaispuristumat ovat molemmilla pilareilla noin 3,5 o/oo venymien vaihdellessa 2 o/oo:n molemmin puolin.

Taulukko 3. Epäkeskisesti kuormitettujen pilarien puristumat, venymät ja taipumat.

1. Pilarin n:o	2. Murtokuorma F_u kN	3. Puristuma o/oo	4. Venymä o/oo	5. Kokonais- puristuma o/oo	6. Kokonais- venymä o/oo	7. Taipuma x-suunnassa mm	8. Taipuma y-suunnassa mm
10	1) 1100	4,98	2) 1,27	3,46	1,74	3) 32,41	2,03
12	933	4) 4,16	2) 2,69	3,49	2,30	3) 46,20	4,37

1) suurin kuorma 1103 kN, puristumat mitattu kuormituksella 1100 kN

2) anturi ylittänyt mitta-alueensa, todellisuudessa suurempia venymiä

3) anturi ylittänyt mitta-alueensa, todellisuudessa suurempia taipumia

4) anturi ylittänyt mitta-alueensa, todellisuudessa suurempia puristumia.

Mitatut puristumat vastaavat sitä paremmin todellisia murtopuristumia, mitä lähempänä murtumiskohta on mittausväliä. Tämä on muistettava erityisesti pilareilla, joilla murtuminen on tapahtunut pilarin päästä.

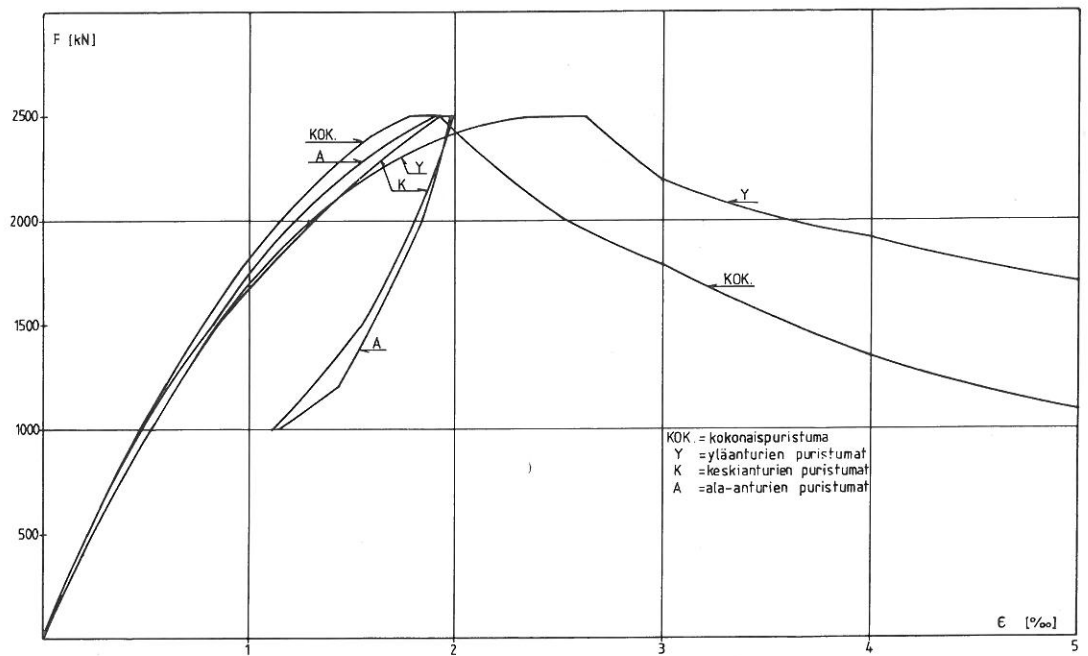
KOETULOSTEN TARKASTELU

Teräksen lujuuden vaikutus pilarin murtokuorma

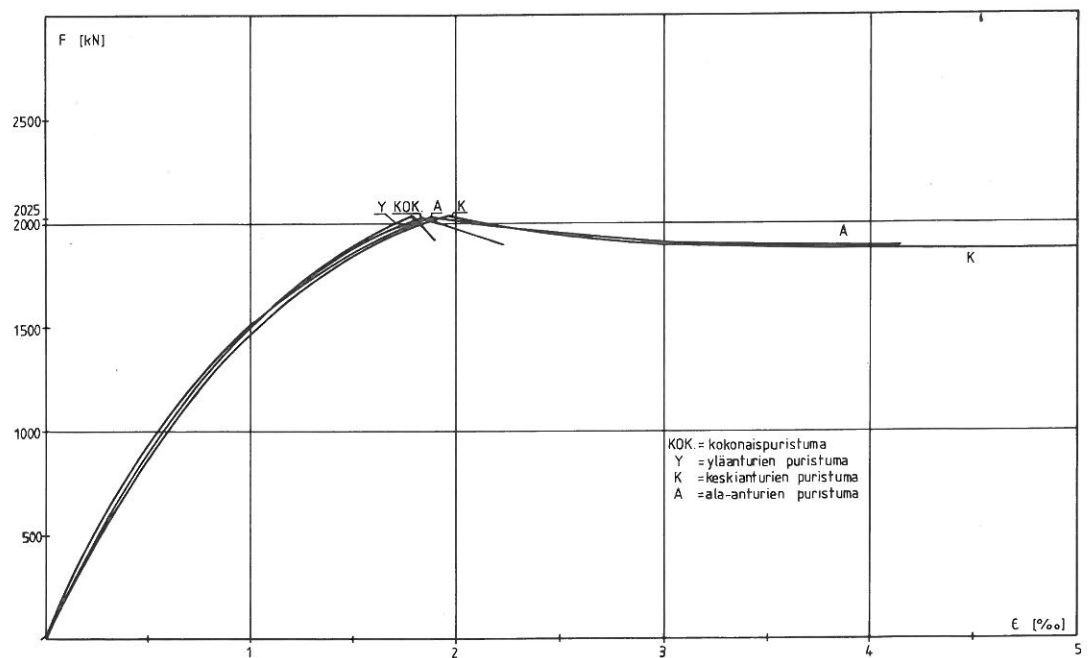
Tarkastellaan aluksi teräksellä A400H ja A500H raudoitettujen lyhyiden pilareiden murtokuormien eroja koetulosten pohjalta, taulukko 4.

Minimiraudoituksen antama murtokuorman lisäys on noin 3 % verrattuna teräkseen A400H, mikä on sama kuin lähteessä /5/ laskettu lisäys. 2,57 %:n ja 3,68 %:n raudoituksella ero on noin 8 %. Tämä asettuu laskemalla saatujen 7-10 %:n väliin. Viimeinen prosenttiluku ei ole vertailukelpoinen huomautuksen 1) johdosta.

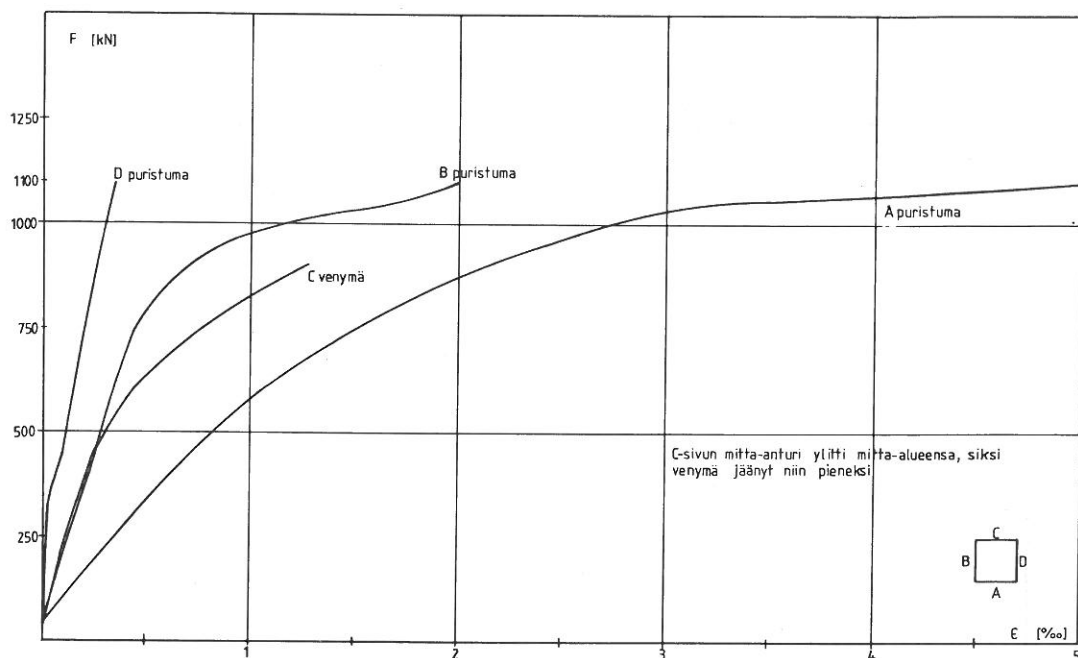
Kuvassa 8 on esitetty murtokuorman riippuvuus teräsmäärästä ja teräksen lujuudesta. Lujuutena on käytetty ominaisarvoja joko 400 N/mm^2 tai 500 N/mm^2 . Koetulokset on merkitty kuvaan ja numeroitu pilarinumeroin. Näiden pisteiden perusteella on laskettu regressiosuora 1. Lisäksi kuvaan on piirretty suora (2), $F_u = (A - A_s) f_{ck} + A_s f_{yk}$, joka kuvaa myöskin murtokuormien riippuvuutta te-



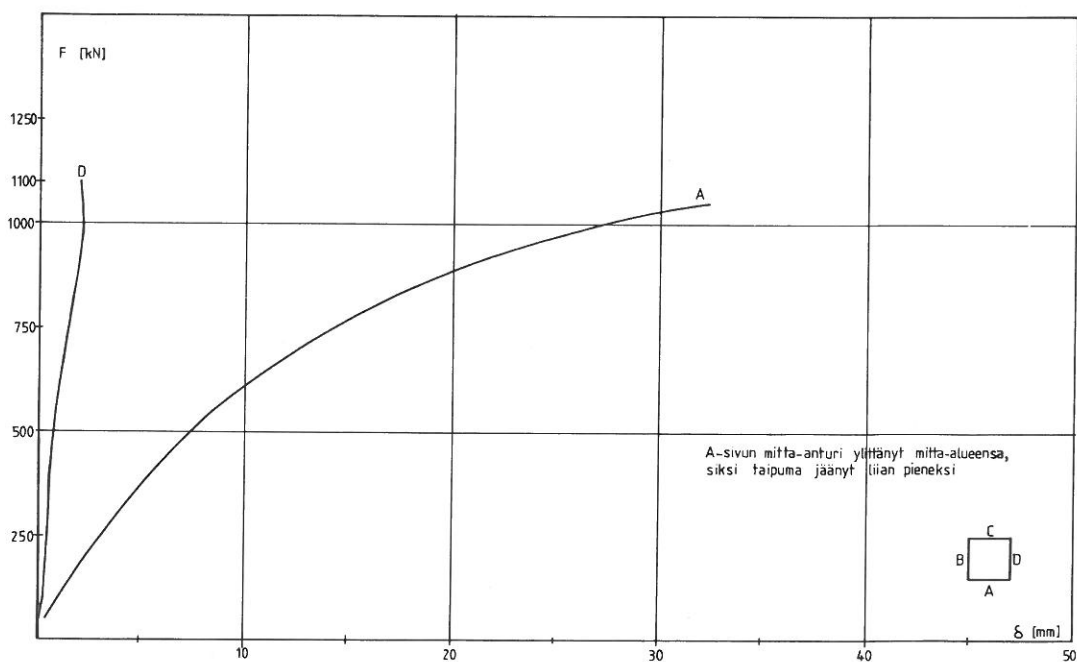
Kuva 4. Pilarin 3 puristumat.



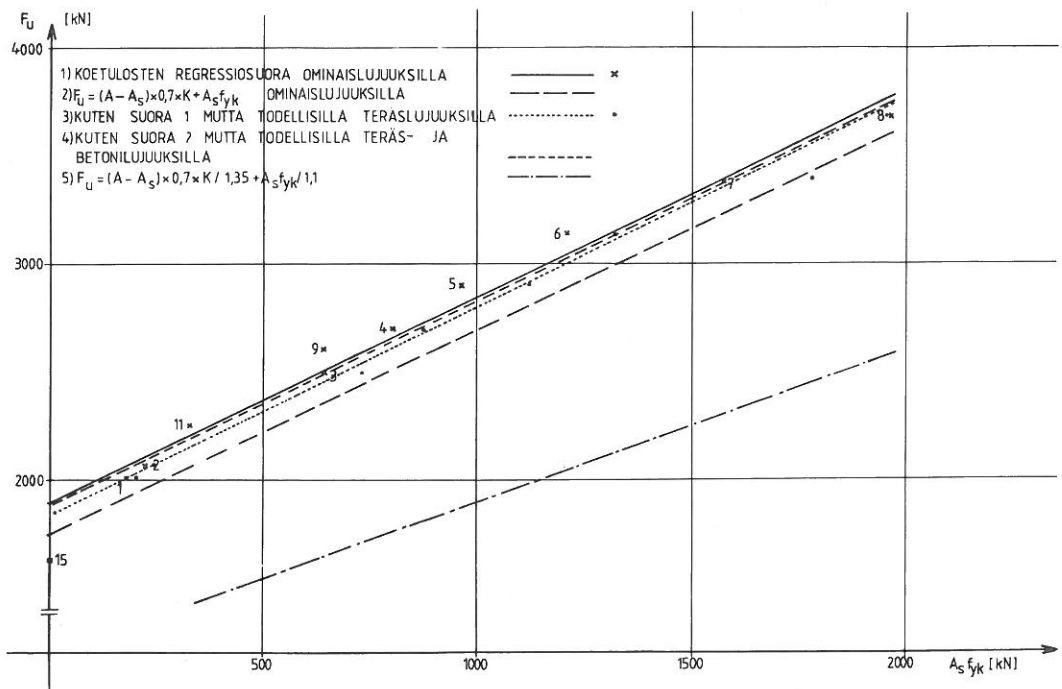
Kuva 5. Pilarin 2 puristumat



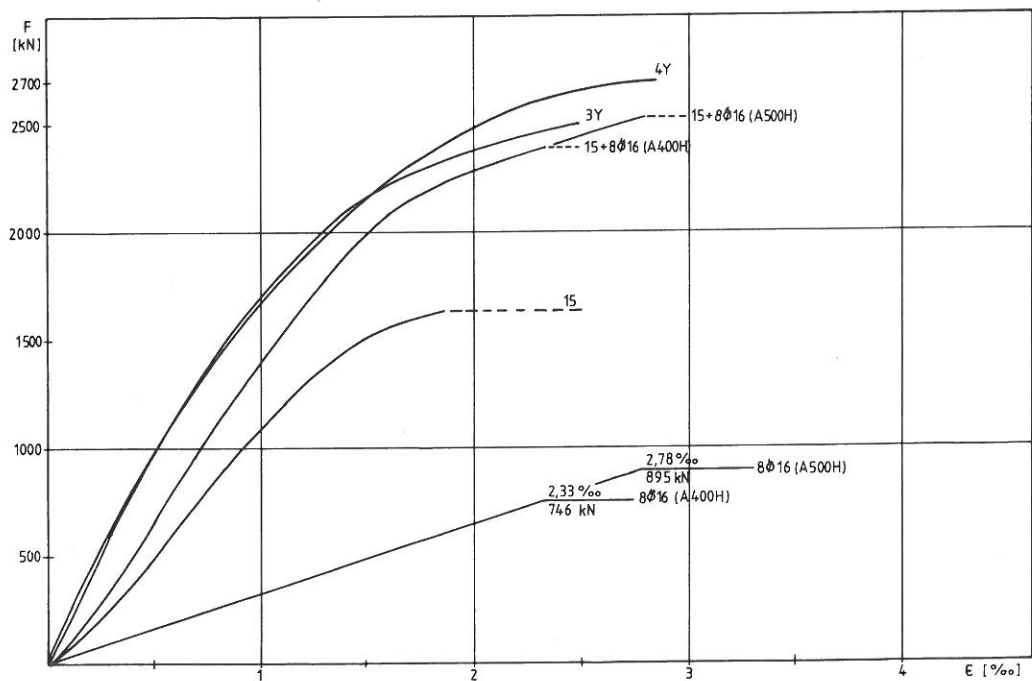
Kuva 6. Pilarin 10 keskimmäisten anturien muodonmuutokset.



Kuva 7. Pilarin 10 keskikohdan taipumat.



Kuva 8. Raudoitusmäärän ja teräksen ominaislujuuden riippuvuus murtokuormasta.



Kuva 9. Superpositioperiaatteen toteutuminen raudoituksella 8Ø16.

Taulukko 4. Lyhyiden pilarien murtokuormat

Pilarin n:o	Raudoitus %	Murtokuorma A400H kN	Murtokuorma A500H kN	Kapasiteetti- ero %
1,2	0,72	2012	2069	2,8
3,4	2,57	2500	2700	8,0
5,6	3,68	2900	3140	8,3
7,8	6,28	3380	¹⁾ 3600	6,5

¹⁾ Pilarin 8 teräkset $\varnothing 25$, jotka eivät täyttäneet lujuuslukan A500H vaatimuksia.

räsmääristä ja teräksen lujuudesta. Samalla tavalla on piirretty suorat 3 ja 4. Niissä on käytetty todellisia teräslujuuksia ja betonilujuutta.

Sekä koetulosten perusteella saadut regressiosuorat 1 ja 3 että lasketut suorat 2 ja 4 ovat melkein saman suuntaisia. Teoreettisilla arvoilla laskettu suora 2 on vain noin 5 % alempana kuin muut suorat.

Kuvassa on myös suora 5, jonka kuormat $F_u = (A-A_s) \times 0.7 \text{ K}/1,35 + \frac{A_s f_{yk}}{1,1}$, on laskettu normien mukaisesti murtorajatilassa. Suora nousee loivemmin kuin edelliset suorat, joten varmuus murtumista vastaan on pienempi alhaisilla raudoitusmäärillä ja pienillä teräslujuuksilla kuin korkealla raudoitusprosentilla ja suurilla teräslujuuksilla.

Koepilareiden murtokuormat lisääntyvät siis lujuuksien suhteessa eikä niissä näy mitään poikkeavuutta teräksellä A400H ja A500 H raudoitettujen pilarien välillä.

Kokeellisten ja laskennallisten murtokuormien vertailu

Seuraavassa vertaillaan kokeellisia ja laskennallisia kapasiteetteja. Tulokset on kerätty taulukkoon 5 lyhyiden pilarien osalta. Sarakkeissa 4-7 betonin lujuutena on käytetty K40-1 ja teräksen lujuutena ominaisarvoja $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$ (parittomat pilarinumerot) tai $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ (parilliset pilarinumerot).

Sarakkeisiin 10 ja 11 on murtokuormat laskettu käyttäen todellisia teräksen vetolujuuskokeista saatuja arvoja (sarake 8) sekä betonin lujuutena koekappaleista saatuja kuutiolujuutta.

Teräksen A500H lujuutta ei voida käyttää hyväksi, jos $\epsilon_{cy} = 2,0$ o/oo (sarakeet 4 ja 5), eli molemmissa lujuusluokissa on sama murtokuorma. Vertailtaessa laskettuja arvoja koetuloksiin betonin myötöpuristuman ollessa 2,0 o/oo huomataan, että betonin puristuslujuuden ollessa 0,75 K teräksellä A400H raudoitettujen pilarien murtokuorma on aika lähellä kokeista saatuja arvoja ylittyen vain minimiteräsmäärällä. Teräksellä A500H raudoitettujen pilarien murtokuorma sen sijaan jää selvästi alle koetulosten, samoin kuin käytettäessä betonin puristuslujuudelle arvoa 0,70 K molemmilla teräslujuuksilla.

Taulukko 5. Lyhyiden pilarsiden kokeelliset ja laskennalliset murtokuormat

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
Pilarin n:o	Raudoitus A_s mm ²	Murtokuormat kokeista F_u kN	Murtokuormat laskennallisesti T_u $\epsilon_{cy}=2,0$ o/oo $\epsilon_{cy}=2,5$ o/oo $f_{ck}=0,70K$ $f_{ck}=0,75K$ $f_{ck}=0,70K$ $f_{ck}=0,75K$				Murtokuormat todellisilla materiaali- lujuuksilla f_{yk} $\epsilon=f_{yk}/E$	$\epsilon=f_{yk}/E$	$f_{ck}=0,70K$	$f_{ck}=0,75K$
			kN	kN	kN	kN	N/mm ²	o/oo	kN	kN
1	452	2012	1918	2042	1918	2042	488,7	2,2	2079	2213
2	452	2069	1918	2042	1963	2087	537,3	2,7	2119	2253
3	1608	2500	2348	2470	2348	2470	464,4	2,3	2588	2720
4	1608	2700	2348	2470	2509	2631	556,7	2,8	2737	2868
5	2412	2900	2647	2767	2647	2767	464,4	2,3	2937	3067
6	2412	3140	2647	2767	2888	3009	556,7	2,8	3160	3290
7	3928	3380	3211	3328	3211	3328	454,8	2,3	3558	3684
8	3928	1) 3600	3211	3328	3604	3721	498,3	2,5	3729	3855

1) teräs ei vastannut A500H lujuusvaatimuksia

$$F_u = (A - A_s) f_{ck} + A_s f_{yk}$$

Jos betonin myötöpuristumana käytetään $\epsilon_{cy} = 2,5$ o/oo, (sarakeet 6 ja 7), teräksellä A400H raudoitettujen pilarien murtokuorma ei kasva, sillä teräs on jo saavuttanut myötölujuutensa.

Teräksellä A500H raudoitettujen pilarien kapasiteetit sen sijaan ovat kasvaneet. Kun betonin puristuslujuutena käytetään 0,75 K:ta, vastaavat kapasiteetit aika hyvin koetuloksia ja taaskin vain minimiraudoitettun pilarin kokeellinen murtokuorma ylittyy. Jos betonin puristuslujuutena käytetään 0,70 K:ta, lasketut kapasiteetit jäävät huomattavasti pienemmiksi kuin koetulokset.

Käytettäessä todellisia materiaaliarvoja ja betonin puristuslujuudelle arvoa 0,70 K (sarake 10), niin kaikki lasketut murtokuormat ylittävät kokeelliset murtokuormat erityisesti maksimiteräsmäärällä. Betonin puristuslujuuden ollessa suurempi eli 0,75 K niin kokeelliset murtokuormat ylittyvät selvimmin.

Taulukkoon 6 on laskettu käyttötilan kuormat sekä niiden osuus kokeellisista murtokuormista prosentteina. Laskelmissa on oletettu, että rauditus saavuttaa laskennallisen myötölujuutensa.

Käyttökuormat ovat 55-56 % kokeellisista murtokuormista paitsi maksimiteräsmäärällä hiukan suurempia.

Taulukkoon 6 on merkitty myös normien mukaiset maksimikuormat (sarake 6). Normien mukaiset kuormat ovat yleensä noin 64-66 % ja maksimiraudoituksella lähes 70 % kokeellisista murtokuormista.

Taulukko 6. lyhyiden pilareiden käyttötilan ja murtotilan kuormien osuus kokeellisista murtokuormista

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Pilarin n:o	Raudoitus A_s mm ²	Murtokuormat kokeista F_u kN	Käyttöraja- tila P_u kN	$(P_u/F_u) \times 100$ %	Normien uormat F_d kN	$(F_d/F_u) \times 100$ %
1	452	2012	1103	55	1290	64
2	452	2069	1134	55	1339	64
3	1608	2500	1402	56	1645	66
4	1608	2700	1516	56	1755	65
5	2412	2900	1609	55	1880	65
6	2412	3140	1774	56	2055	65
7	3928	3380	2000	59	2320	69
8	3928	1) 3600	2269	63	2580	72

Superpositioperiaatteen toteutuminen

Kuvassa 9 on tarkasteltu kuinka hyvin pilarikokeiden voima-puristuma -käyrät yhtyvät ns. superpositioperiaatteella saatuihin käyriin. Nämä on saatu siten, että raudoittamattoman pilarin 15 ja tarkasteltavana olevan pilarin raudoituksen voima-puristuma -käyrät on laskettu yhteen. Raudoituksen voima-puristuma -käyrä on laskettu vetokokeista saatujen tulosten perusteella.

Yleensä kokeellisesti saadut käyrät ovat ylempänä kuin superpositioperiaatteella lasketut käyrät. Teräksellä A400H raudoitetuissa pilareissa ero on noin 5 % paitsi minimiraudoituksella 10 %. Teräksellä A500H raudoitetuissa pilareissa vastaavat arvot ovat pari prosenttia suuremmat.

Raudoituksen lujuuden hyväksikäyttö

Tarkasteltaessa kuinka hyvin raudoituksen lujuus on käytetty hyväksi, voidaan käyttää apuna taulukkoja 7 ja 8. Taulukkoon 7 on laskettu eri raudoitteiden myötökuormat tankojen vetokokeista saatujen myötökuormien avulla.

Taulukossa 8 on esitetty koestetun pilarin murtokuorma sekä raudoittamattoman pilarin 15 murtokuorma, jolloin vähentämällä nämä toisistaan saadaan raudoituksen kantama kuorma. Jakamalla raudoitukselle jäänyt kuorma raudoitteen myötökuormalla saadaan hyötysuhde eli suhde, josta nähdään ovatko tangot saavuttaneet myötölujuutensa. Jos suhde on suurempi kuin yksi, raudoitus myötää.

Eri teräksen lujuusluokkien välillä ei näytä hyötysuhteessa olevan eroja. Sen sijaan raudoitusmäärä näyttää vaikuttavan: mitä suurempi raudoitusprosentti sitä lähemmäksi ykköstä suhde muuttuu. Pieni raudoitusmäärä lisää siis suhteellisesti eniten pilarin kapasiteettia.

Taulukko 7. Raudoitteiden myötökuormat

Teräksen lujuus- luokka	Tangon koko $\varnothing$	Tangon myötö- kuorma kN	Raudoitteen myötökuorma kN			
			4 $\varnothing$ 12	8 $\varnothing$ 16	12 $\varnothing$ 16	8 $\varnothing$ 25
A400H	12	50,7	202,8			
	16	93,3		746,4	119,6	
	25	223,3				1786,4
A500H	12	60,7	242,8			
	16	111,9		895,2	1342,8	
	25	244,7			1957,6	

Taulukko 8. Lyhyiden pilarien raudoituksen kantava kuorma/
raudoituksen myötökuorma

1. Pilarin n:o	2. Murto- kuorma F_k kN	3. Pilarin 15 murtokuor- ma F_{15} kN	4. $F_k - F_{15}$ kN	5. Raudoituksen myötökuorma kN	6. (4)/(5)
1	2012	1632	380	203	1,87
2	2069	1632	437	243	1,80
3	2500	1632	868	746	1,16
4	2700	1632	1068	895	1,19
5	2900	1632	1268	1120	1,13
6	3140	1632	1508	1343	1,12
7	3380	1632	1748	1786	0,99
8	3600	1632	1968	1958	1,01

Seuraavaan taulukkoon 9 on laskettu betonin jännitys murtokuormalla olet-
taen, että teräkset myötäävät. Lisäksi taulukkoon on merkitty betonin kuuti-
tiolujuus ja laskettu pilarin betonijännityksen suhde kuutiolujuuteen.

Pilarien betonijännitys on noin 29 N/mm^2 , mikä on $0,67 \times$ betonin kuutio-
lujuus. Mitään mainittavia eroja ei eri teräslaaduilla raudoitettujen beto-
nijännitysten välillä ole havaittavissa. Ainoa poikkeavuus on betonin jänni-
tyksen jääminen noin $27\text{--}28 \text{ N/mm}^2$:iin, kun rauditusprosentti on yli 6 %.
Raudoittamattomalla pilarilla 15 on betonin jännitys $0,60 \times$ kuutiolujuus.

Taulukko 9. Lyhyiden pilarien betonijännitys sekä betonijännityksen ja kuutiolujuuden suhde

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Pilarin n:o	Murto- kuorma F_u kN	Raudoituksen myötökuorma F_s kN	Betonikuor- ma $F_u - F_s$ kN	Betonin jän- nitys f_c N/mm ²	Betonin kuu- tiolujuus K N/mm ²	f_c/K
1	2012	203	1809	29,15	43,20	0,67
2	2069	243	1826	29,43	43,20	0,68
3	2500	746	1754	28,81	43,20	0,67
4	2700	895	1805	29,64	43,20	0,69
5	2900	1120	1780	29,62	43,20	0,69
6	3140	1343	1797	29,91	43,20	0,69
7	3380	1786	1594	27,21	43,20	0,63
8	3600	1958	1642	28,03	43,20	0,65
15	1632	-	1632	26,11	43,20	0,60

Kokeellisesti kuormitetut pitkät pilarit

Keskeisesti kuormitettujen hoikkien pilarien murtokuormat ovat lyhyiden pilarien koetuloksista lasketun regressiosuoran yläpuolella. Osa syy näiden pilarien suurempaan kapasiteettiin on se, että ne koestettiin myöhemmin kuin lyhyet pilarit, jolloin betonin lujuus oli kasvanut. Hoikkuudella ei siis näyttänyt vielä näillä pituuksilla olleen vaikutusta kapasiteettiin.

Epäkeskisesti kuormitetut hoikat pilarit

Taipumaa mitanneet anturit ovat ylittäneet mitta-alueensa, mutta jos taipumat approksimoidaan murtokuormaan asti, pilarin 10 taipuma on noin 48 mm ja pilarin 12 50 mm. Tällöin murtokuormat ovat

- pilarilla 10 $N_u = 1103$ kN
 $M_u = N(e + \delta) = 122$ kNm
- pilarilla 12 $N_u = 933$ kN
 $M_u = 105$ kNm

Vastaavanlaiset normien mukaiset kuormat murtorajatilassa saadaan lähteen /5/ käyrästöistä epäkeskisyyksien perusteella

- pilari 10 $e = 111$ mm
 $N_{ud} = 780$ kN
 $M_{ud} = 87$ kNm
- pilari 12 $e = 113$ mm
 $N_{ud} = 655$ kN
 $M_{ud} = 74$ kNm

Normien mukaiset murtokuormat ovat noin 60 % kokeellisista.

LOPPUPÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO

Aritkkelissa on käsitelty eri lujuusluokan terästen A400H ja A500H käytön vaikutusta pilarin lujuuteen sekä laskennallisesti että kokeellisesti. Koesarjaan kuului kaikkiaan 15 poikkileikkaukseltaan $250 \times 250 \text{ mm}^2$ pilaria, joista kahdeksan oli lyhyitä (pituus = 2 m), neljä pitkää (4,5 m), kaksi jat-kospilaria (2 m) sekä yksi raudoittamaton (2 m). Pilarit koestettiin keski-sellä kuormalla paitsi kaksi pitkää pilaria, joissa kuorman epäkeskisyys oli $h/4 = 62,5 \text{ mm}$.

Useimmilla pilareilla murtokohta osui jompaan kumpaan päähän. Pilareihin syntyivät ensimmäiset halkeamat myöhään noin 200 kN ennen murtumista ja hoik-killä pilareilla vieläkin myöhemmin.

Pilarien kapasiteetit lisääntyivät lujuuksien suhteessa, toisin sanoen te-räksen A500H lujuus voidaan käyttää hyväksi. Kapasiteettilisäys teräksellä A400H raudoitettuihin pilareihin verrattuna on minimiraudoituksella 3 % ja 4 %:n raudoituksella 8 %.

Pilarin murtuessa raudoitus oli saavuttanut myötölujuutensa, joten myös teräksen A500H lujuus tuli käytettyä hyväksi. Teräksellä A400H raudoitetuis-sa lyhyissä pilareissa murtokuormaa vastaava maksimipuristuma oli 3,1 o/oo, kun se teräksellä A500H raudoitetuissa pilareissa oli 3,5 o/oo. Puristumat olivat siis riippuvaisia teräksen lujuusluokasta, mutta raudoitusprosentin kasvu lisäsi myöskin puristumien suuruutta.

Murtokuormaa vastaavien puristumien mittauksen tarkkuus riippuu siitä, mi-ten lähelle mittauspisteitä murtokohta on osunut. Koesarjan puristumat ovat siksi todellisuudessa vieläkin suurempia, sillä yleensä murtokohta osui pila-rin päähän, kun taas anturit olivat keskialueella.

Normien mukaiset laskennalliset murtokuormat olivat noin 65 % kokeellisista murtokuormista.

Pilarin lujuuden kannalta olisi edullista, jos betoniteräksen jännitysve-nymäkäyrän kimmoinen osa olisi mahdollisimman pitkä, kuten kylmämuokatulla teräksellä, sillä betoni näyttää puristuvan kunnes teräs alkaa myödetä (vrt. SINTEFin tutkimus, jossa teräksen myötölujuus oli jopa yli 700 MPa).

Teräksen lujuusluokalla ei ole vaikutusta betonin jännityksiin murtokuor-malla.

Epäkeskisesti kuormitetuilla hoikilla pilareilla normien mukaiset kuormat taas olivat 70 % kokeellisista murtokuormista. Näillä pilareilla syntyi suu-ria lähes 50 mm taipumia ennen nurjahdusta. Puristuspuolen muodonmuutokset olivat 5 o/oo ja venymät yli 2,7 o/oo.

Teräksellä A500H raudoitetun jatkokspilarin murtokuorma oli 19 % suurempi kuin teräksellä A400H raudoitetun pilarin. Vastaava ero lyhyillä pilareilla oli 8 %.

KIRJALLISUUTTA

- [1] BY 15, Betoninormit 1981. Suomen Betoniyhdistys ry.
- [2] Sjøpler, B., Bruk av høyverdig kamstål (KS60) i betongkonstruksjoner, Delrapp. 1. Søjleforsøk. Forskningsinstituttet for cement og betong ved NTH-tilsluttet SINTEF.TEF. Trondheim 1978. 141 s.
- [3] Hoff, A., Bruk av høyverdig kamstål (KS60) i betongkonstruksjoner, Søjleforsøk. Forskningsinstituttet for cement og betong ved NTH-tilsluttet SINTEF. Trondheim 1979. 106 s.
- [4] Todeschini, Claudio & Bianchini, Albert C. & Kessler, Clyde E., Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels. Journal of the American Concrete Institute 61 (1964) part one. s. 701-715.
- [5] Oksanen, Tuuli, Betoniteräksen A500H käyttö pilariraudoitteena. Diplomitö. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto. Otaniemi 1981. 175 s.

Tuuli Oksanen, tekn.yo., Ekono Oy

Pentti Lumme, dipl.ins., Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto

Pekka Kanerva, prof., Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto