

HOLVIVOIMIEN VAIKUTUS TERÄSBETONISEN ARINALAATAN LÄVISTYSLUJUUTEEN

Pentti Lumme ja Pekka Kanerva

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 16
No. 3, 1983, s. 1...19

YHTEENVETO: Artikkelissa tarkastellaan holvivoiman vaikutusta teräsbetonilaattojen murtokuormiin. Aluksi on tarkasteltu holvivoiman vaikutusta laattojen murto-tapaan. Artikkelin pääosan muodostaa arinalaatoilla tehtyjen lävistyskokeiden selostus ja saatujen lävistysmurtokuormien vertailu laskettuihin tuloksiin. Laattakentät kuormitettiin yksitellen kentän keskipisteessä sijaitsevalla piste-kuormalla. Kokeissa saatiin noin 4-8 kertaa niin suuria lävistysmurtokuormia kuin normien mukaan lasketut. Myös raudoittamattomien laattakenttien lävistyslujuus oli samaa luokkaa. Tutkimuksen perusteella ehdotetaankin verkkoraudoituksen jättämistä pois pienistä laattakentistä, joissa raudoitusta ei tarvita taivutuslujuuden vuoksi tai mahdollisten paloteknillisten syiden vuoksi.

JOHDANTO

Teräsbetonilaattojen holvautumista ei yleensä suunnittelussa käytetä hyväksi. Tämä johtuu siitä, että holvivaikutuksen kehittymisen kannalta välttämättömien, laattakenttää ympäröivien vaakavoimien kehittymismahdollisuuksien arviointi vaatii huolellista rakenteen kiinnitysjäykkyyden tarkastelua.

Teräsbetonilaattoihin on suunnitteluohjeiden mukaan lähes poikkeuksetta aina asennettava minimiraudoitus. Minimiraudoitusvaatimus koskee myös arinalaattojen yksittäisiä laattakenttiä.

Näiden laattojen murtokuorma lasketaan tavallisesti taivutuksen perusteella. Tällöin laattaosan raudoitusmäärä saattaa muodostua huomattavan suureksi. Holvivoiman ottaminen huomioon voisi johtaa huomattavaan raudoituksen vähenemiseen.

TERÄSBETONILAATAN HOLVAUTUMINEN

Yleistä

Teräsbetonilaatat toimivat lineaarisen kimmoteorian mukaan niin kauan, kuin laatat ovat ehjiä. Kun betonin vetolujuus saavutetaan, laattaan muodostuu halkeama. Kun kuormitusta edelleen lisätään, laatan reunat pyrkivät siirtymään

Tukien jäykkyydellä vaakasiirtymiin nähden on erittäin suuri merkitys holvivoiman kehittymisen kannalta. Vaakasiirtymiin vaikuttavia tekijöitä ovat laatan kimmainen puristuma, holvivoiman aiheuttamat siirtymät laatan ympäristössä, kuumiskutistuminen ja viruminen.

Lähteessä /1/ on tarkasteltu teoreettisesti sekä laattakaistan että suorakaidelaatan kuormituksen ja taipuman välistä riippuvuutta, kun laatan vaakasiirtymät on estetty. Kuvassa 3 on esitetty laatan hoikkuuden (l/h) ja laatan ympäristön jäykkyyden (S) vaikutus kuorma-taipumakuvaajiin. Laatan ympäristön jäykkyydellä tarkoitetaan tässä sitä arvoa, joka tarvitaan yksikön suuruisen vaakasiirtymän aikaansaamiseksi laatan tukien kohdalla. Kuorma on esitetty suhteellisenä jakamalla se myötöviivateorian mukaisella myötökuormalla.

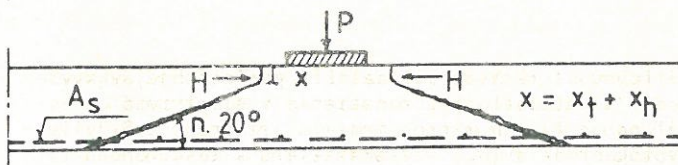
Kuvasta 3 nähdään, että laatan hoikkuuden (l/h) pienentyessä kasvaa maksimikuorman suhteellinen arvo. Ympäristön jäykkyys S vaikuttaa varsin voimakkaasti kuorma-taipuma-riippuvuuteen pienillä $S:n$ arvoilla. Ympäristön jäykkyyden lisääntyessä maksimikuormaa vastaava taipuma pienenee.

Teräsbetonilaatan holvautuminen lisää pistekuorman läpileikkautumiskapasiteettia. Lähteessä /2/ esitetyn pistekuorman läpileikkautumismallin pohjalta on kehitetty laskentamalli /3/, joka ottaa huomioon laatan holvautumisen aiheuttaman kapasiteetin lisäyksen. Laskentamallissa on keskeisenä suureena n_s kiinnityskerroin n . Kerroin ottaa huomioon eri tekijät, jotka vaikuttavat holvivoiman kehittymiseen.

Tavanomaisissa talorakenteissa saavutetaan laskentamallin perusteella leikkauskapasiteetin arvoja, jotka ovat yli kaksinkertaisia verrattuna laattoihin, joiden vaakasiirtymät pääsevät vapaasti tapahtumaan.

HOLVIVOIMAN VAIKUTUS LAATTAKENTÄN LÄVISTYSLUJUUTEEN

Julkaisuissa /4, 5/ on käsitelty holvivoimien vaikutusta laatan leikkauskestävyyteen. Lähteiden mukaan leikkaushalkeamien synnyttyä kuorma välittyy laattaan kuormitusalueen ympärille muodostuneen puristusrenkaan kautta ja puristuspuolen lopullinen murtuminen tapahtuu pitkän kuormitusalueen reunoja kulkevassa leikkauksessa.



Kuva 4. Leikkauskartion muodostuminen.

Lävistyskapasiteetin oletetaan nyt suurenevan holvivoimien vaikutuksesta samassa suhteessa kuin puristuspuolen korkeus kasvaa kuormitusalueen reunojen kautta kulkevassa leikkauksessa. Kun kuvan 4 mukaisesti merkitään puristuspuolen korkeutta puhtaassa taivutuksessa x_t :llä ja holvivoimien aiheuttamaa puristuspuolen kasvua x_h :llä, saadaan laatan lävistyskapasiteetille kaava

$$V_{uh} = V_u + \frac{x_h}{x_t} V_{uv} \quad (1)$$

Kaavassa tarvittava lävistyskuorma V_u lasketaan kaavasta

$$V_u = \frac{5.031 \text{ ad}\sqrt{f'_c} (1-0.075 \frac{a}{d})}{1+1.761 \frac{\text{ad}\sqrt{f'_c}}{P_u}} \quad (2)$$

jossa suureiden dimensiot ovat seuraavat:

- V_u, P_u [N]
- a, d [mm]
- f'_c [N/mm²]

lieriölujuus f'_c saadaan koetulosten perusteella tai muuntamalla kuutiolujuus lieriölujuudeksi betoninormien taulukon mukaan. P_u on myötöviivateorian perusteella laskettu laatan taivutusmurtokuorma, joka saadaan kaavasta

$$P_u = 2\pi(m_u + m'_u) \quad (3)$$

Myötömomentit m_u ja m'_u lasketaan lausekkeesta:

$$m_u = \rho d^2 f_y \left(1 - \frac{\rho}{1.7} \frac{f_y}{f'_c}\right) \quad (4)$$

Negatiivisen taivutuksen myötömomenttia laskettaessa kaavaan (4) sijoitetaan yläpinnan suhteellinen raudoitismäärä.

V_{uv} lasketaan kaavasta (2), mutta laskettaessa P_u :n suuruutta kaavasta (3) yläpinnan mahdollista raudoistusta ei oteta huomioon, ts. $m'_u = 0$.

Puristuspuoleiden korkeudet lasketaan kaavoista

$$x_h = \frac{H_{\max}}{f'_c} \quad (5)$$

ja

$$x_t = \frac{A_s f_y}{f'_c} \quad (6)$$

Holvivoimat alkavat kehittyä vasta laatan ensimmäisten halkeamien muodostumisen jälkeen. Lähteessä /5/ on koetulosten perusteella päädytty siihen, että laatan reunoihin kohdistuvan vaakasuoran holvivoiman suurin arvo H_{\max} voidaan laskea kaavasta

$$H_{\max} = 4.09(P_u - P_r)10^{-1} + 0.43(P_u - P_r)^2 10^{-12} \left(\frac{l}{2}\right)^4, \quad (7)$$

jossa H_{\max} [N/mm]

P_u, P_r [kN]

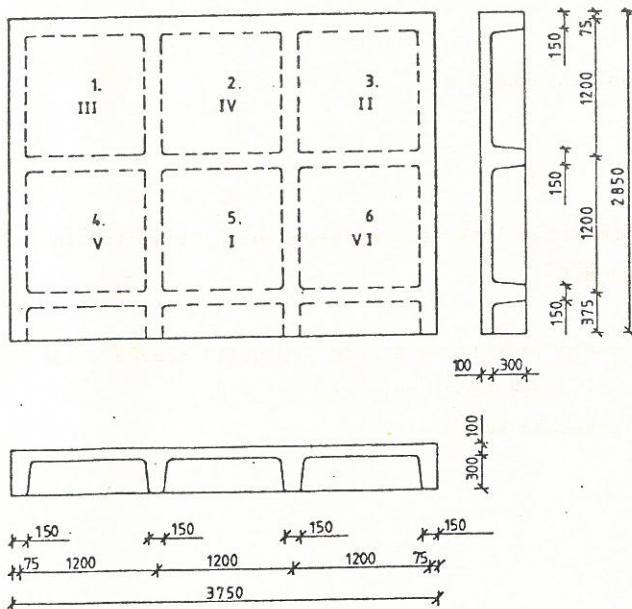
l [mm]

Murtokuorman P_u ja halkeamakuorman P_r arvot saadaan arinalaatan koekuormitustuloksista.

JATKUVALLA ARINALAATALLA SUORITETUT KOKEET

Koelaatasto

Kokeita varten valmistettiin kuvan 5 mukainen kuusikenttäinen koelaatta /6/. Sen kokonaispituus oli 3750, leveys 2850 ja korkeus 400 mm. Ripapalkkien osuus korkeudesta oli 300 mm, joten laatan paksuudeksi jäi 100 mm.



Kuva 5. Kokeissa käytetty arinalaatta.

Arinalaatan kentistä K1 ja K3 olivat raudoittamattomia. Kenttiin K2 ja K5 asennettiin minimiraudoitus keskeisesti ja kenttiin K4 sekä K6 vahvako raudoitus edellisessä alapintaan ja jälkimmäisessä keskeisesti. Kylmämuokatuista betoniteräksistä hitsattujen verkkoraudoitettujen koko oli 1200 x 1200 mm², joten ne ulottuivat laatassa rivin keskeltä keskelle. Kenttien raudoitusmäärät, geometriset ja mekaaniset raudoitussuhteet nähdään taulukossa 1.

Arinalaatan ripojen pääraudoituksessa käytettiin 2 ϕ 25 harjatankoa ja haatettiin hitsatusta verkosta.

Betonin lujuuden määrittämiseksi valettiin kappaleet, joiden lujuuskoetulokset on esitetty taulukossa 2. Betoniterästen vetokoetulokset ovat taulukossa 3.

Taulukko 1. Arinalaatan kenttien raudoitukset.

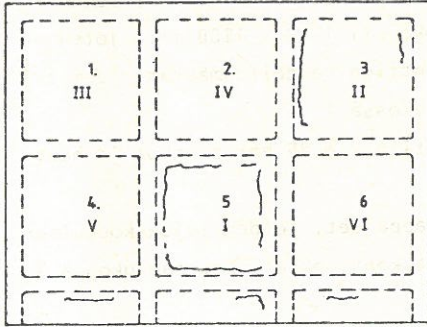
Kenttä	Teräs	Raudoitus	Sijainti	A_s mm ² /m	A_s/A_{smin} %	ρ_x %	ρ_y %	ω_x %	ω_y %
K1		raudoittamaton							
K2	B500PV	5/5-200/200	keskeinen	98	100	0.178	0.196	0.050	0.055
K3		raudoittamaton							
K4	B500PV	10/10-150/150	alapinta	523	540	0.654	0.747	0.182	0.208
K5	B500PV	5/5-200/200	keskeinen	98	100	0.178	0.196	0.050	0.055
K6	B500PV	10/10-150/150	keskeinen	523	540	0.902	1.090	0.251	0.304

Taulukko 2. Betonikoekappaleiden lujuustulokset.

Puristuslujuus MN/m ²			Halkaisuvetolujuus MN/m ²		Taivutusvetolujuus MN/m ²	
f_{cm}	s	K_k	f_{ctm}	s	f_{cfm}	s
33.1	1.12	31.5	1.83	0.17	3.34	0.32

Taulukko 3. Raudoitustankojen vetokoeket.

Laatu	ϕ mm	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	δ %
B500P	5	540	625	11.4
B500P	10	538	601	12.0



Kuva 6. Arinalaatan kutistumishalkeamat.

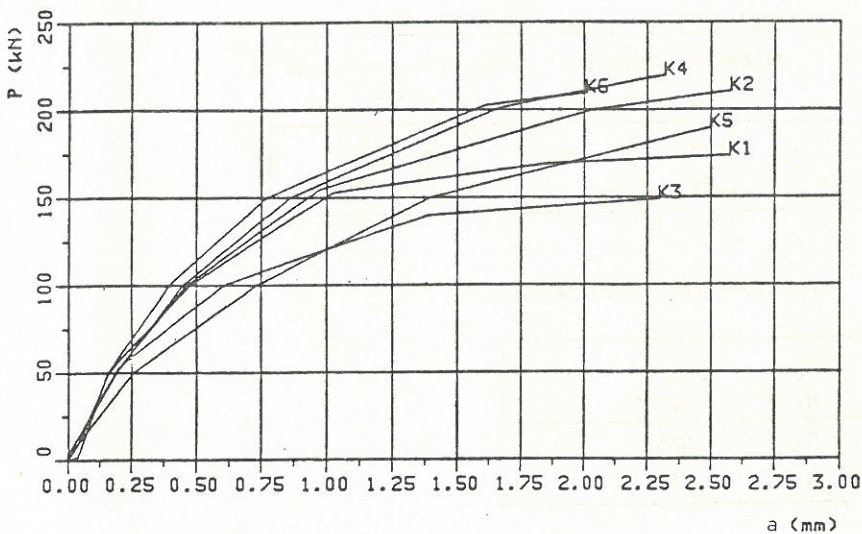
Koekappale peiteltiin huolellisesti valun jälkeen muovilla lukuun ottamatta kenttiä K3 ja K5, joiden kohdalta pinta jätettiin paljaaksi, jotta laattaan olisi syntynyt kuivumiskutistumisen aiheuttamia halkeamia. Ennen testausta muodostuneet halkeamat on esitetty kuvassa 6.

Arinalaatan kentät kuormitettiin kuvassa 6 esitettyjen roomalaisten numeroiden osoittamassa järjestyksessä. Ensimmäinen testattiin 47:n, kolme seuraavaa 48:n ja kaksi viimeistä 49 vrk:n iässä. Muotti purettiin 5 vrk ennen ensimmäistä laattakentän K5 testausta.

KOETULOKSET

Muodonmuutokset

Laattakenttien voima-siirtymä -käyrät ja taipumaviivat on esitetty lähteessä /6/. Kuvassa 7 on esitetty kuormitusportaittain piirretyt laattakenttien keskipisteiden taipumien kuvaajat.



Kuva 7. Laattakenttien K1-K6 keskipisteiden taipumat.

Laattakenttien keskipisteen taipuma-arvot murtokuorman saavuttamis- ja murtokartion leikkautumishetkellä on esitetty taulukossa 4.

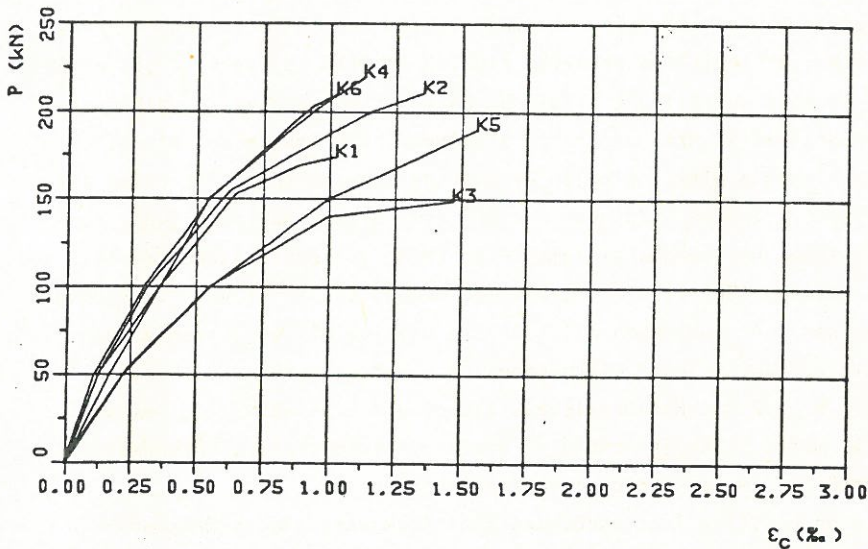
Taulukko 4. Laattakenttien keskipisteen taipumat murto- ja läpileikkautumishetkellä.

Kenttä	K1	K2	K3	K4	K5	K5
a_u mm	2.9	2.4	2.9	2.7	2.5	2.2
a_1 mm	3.4	2.8	3.5	3.1	3.0	2.8

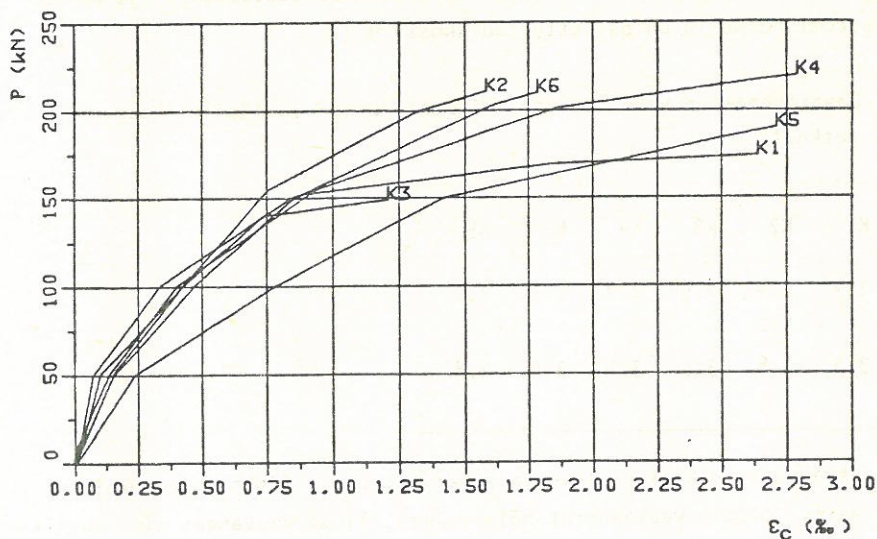
Kaikkien laattakenttien keskipisteen taipuman kasvu oli lähes yhdenmukaista n. 1.5 mm:iin asti, jolloin vaakasuorat holvivoimat olivat kasvaneet niin suuriksi, etteivät laattaa ympäröivät rivat enää kestäneet. Kenttien K3 ja K5 taipumien kasvu oli ollut hieman muita nopeampaa, koska yläpinnassa oli ripojen reunoja myötäileviä kutistumishalkeamia (kuva 6).

Murtokuorman saavuttamishetken suurin taipuma oli kaikilla laattakentillä erittäin pieni, alle 3 mm:n. Jännevälin suhde murtotaipumaan vaihteli n. 410:stä 550:een.

Laattakenttien keskiosassa betonin muodonmuutoksia mitattiin kuormituspisteen vierestä (kuva 8). Jokaisen laattakentän keskimääräisten puristumien ja venymien kuormituksen aikainen kasvu on esitetty kuvissa 8 ja 9.



Kuva 8. Laattakenttien K1-K6 keskiosan betonin puristumat yläpinnassa.



Kuva 9. Laattakenttien K1-K6 keskiosan betonin venymät alapinnassa.

Halkeilu ja murtuminen

Arinalaatan eri laattekentät käyttäytyivät testauksessa melko yhdenmukaisesti ja halkeamat muodostuivat niihin lähes samansuuruisilla kuormilla.

Ensimmäiset halkeamat syntyivät aina laatan alapintaan kuormituspisteen kohdalle. Kuorman kasvaessa tälle rajatulle alueelle muodostui runsaasti pieniä halkeamia, jotka eivät aluksi päässeet etenemään laatan reunoille. Samaan aikaan, kun halkeamat alkoivat levitä ja etenivät ripojen lähelle, syntyivät myös ensimmäiset ripojen reunoja myötäilevät yläpinnan halkeamat. Seuraavassa vaiheessa halkeamat etenivät laattakentän ympäri ja alapinnan halkeamat alkoivat levitä laatan nurkista alaspäin pitkin ripojen kylkiä. Halkeamien päästyä ripojen alareunaan saakka syntyi laatan yläpinnan ensimmäinen koelaattaa ympäröivän ripapalkin poikki kulkeva ns. rengshalkeama. Pian tämän jälkeen pistekuorma leikkautui äkillisesti laatan läpi ripojen halkeamien avauduttua riittävästi. Irronneen murtokartion vaipan kaltevuuskulma oli suurista holvivoimista johtuen vain n. 20°.

Viimeisen mittaustauon aikana mikroskoopilla mitattujen rengshalkeamien leveydeksi saatiin n. 0.2 mm. Halkeamaleveys kasvoi vielä selvästi läpileikkautumishetkeen asti, mutta tarkkoja arvoja ei saatu mitatuksi, koska halkeamat sulkeutuivat välittömästi murtokartion irrottua laatasta.

Taulukossa 5 on esitetty laattakenttien kuormituksesta saadut halkeama- ja murtokuormat. Testauksen aikana seurattiin laattakenttien ala- ja yläpinnan sekä

ripapalkkien halkeamahetken kuormia. Murtokuormana pidetään suurinta kunkin laatan testauksessa saavutettua kuorma-arvoa, joka koelaatasta riipuen oli 10-15 kN läpileikkautumishetken kuormaa suurempi.

Kokeista saadut ylä- ja alapinnan halkeamakuormat vaihtelevat melko vähän, sillä suurimman ja pienimmän kuorman välinen ero jäi molemmissa tapauksissa n. 20 kN:iin. Odottamattoman pieneksi muihin tuloksiin verrattuna jäi kuitenkin laatan K5 alapinnan halkeamakuorma, vaikka laatta oli arinalaatassa keskikentän asemassa.

Taulukko 5. Arinalaatan kenttien halkeama- ja murtokuormat.

P_{rap} = alapinnan halkeamakuorma
 P_{ryp} = yläpinnan halkeamakuorma
 P_{rr} = rivan halkeamakuorma
 P_u = murtokuorma

Kenttä	P_{rap} kN	P_{ryp} kN	P_{rr} kN	P_u kN
K1	90.6	140.1	169.3	183.0
K2	90.2	141.8	190.1	211.3
K3	100.4	140.1	149.3	151.2
K4	100.5	160.0	191.0	229.0
K5	79.8	150.3	179.6	194.0
K6	91.1	141.0	190.9	219.3

Kuorman pienuus johtui laatan yläpinnan kutistumishalkeamista, joiden vuoksi alapinnan venymät pääsivät kasvamaan suuriksi laatan keskiosassa ripapalkkien pienistä sivusiirtymistä huolimatta.

Laataston ripapalkkien halkeamakuormat vaihtelivat jo selvästi, sillä suurimman ja pienimmän kuorman välinen ero oli n. 40 kN. Halkeamakuormien suuruuserot johtuivat lähinnä kenttiä ympäröivän rakenteen erilaisuudesta.

Murtokuormat vaihtelivat keskenään huomattavasti halkeamakuormia enemmän. Kutistumishalkeamat laskivat kenttien (K3, K5) murtokapasiteettia n. 13 % vertailukentillä (K1, K2) saatuihin tuloksiin nähden.

Koetulokset eivät kuitenkaan ole suoraan vertailukelpoisia, koska laattakenttiä ympäröivän rakenteen jäykkyys vaihtelee sen mukaan, missä kohdassa arinalaattaa kukin laattakenttä sijaitsee. Jäykkyys on pienin laattojen K1 ja K3 ympärillä. Näitä laattoja ympäröiviin ripoihin syntyivät halkeamat muita pienimmällä

kuormilla (ks. taulukko 5).

Kokeen perusteella laatan raudoituksen vaikutus laattakentän murtokapasiteettiin jää pieneksi. Myöskin laatan yläpintaan muodostuneiden kutistumishalkeamien aiheuttama murtokapasiteetin lasku jäi melko vähäiseksi. Testatussa arinalaatas-
sa laattakenttiä ympäröivä rakenne oli siten riittävän jäykkä estämään ripojen sivusiirtymät, jolloin laatat kestivät holvivoimien ansiosta isoja pistekuormia raudoittamattominakin.

LASKETTUIJEN MURTOKUORMIEN JA KOETULOSTEN VERTAILU

Raudoitettujen laattojen materiaalikoeikkapaleiden lujuustuloksia käyttäen lasketut myötöviivateorian mukaiset murtokuormat on esitetty taulukossa 6.

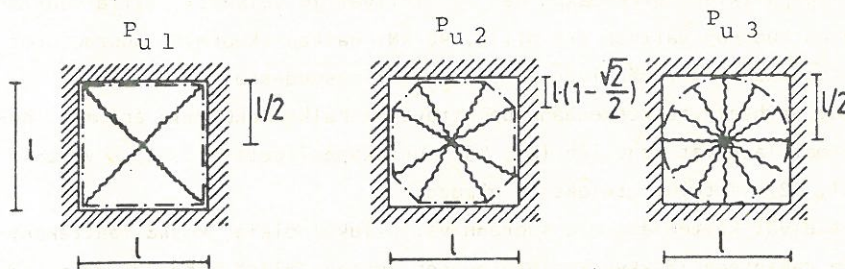
Taulukko 6. Raudoitettujen laattakenttien Myötöviivateorian mukaiset murtokuormat.

$$P_{u1} = 8 (m_u + m'_u)$$

$$P_{u2} = 16 (\sqrt{2} - 1) (m_u + m'_u)$$

$$P_{u3} = 2\pi (m_u + m'_u)$$

Kenttä	P_{ukoe} kN	P_{u1} kN	P_{ukoe}/P_{u1}	P_{u2} kN	P_{ukoe}/P_{u2}	P_{u3} kN	P_{ukoe}/P_{u3}
K2	211.3	45.0	4.70	37.3	5.66	35.4	5.97
K4	229.0	228.5	1.00	189.3	1.21	179.4	1.28
K5	194.0	44.2	4.39	36.6	5.30	34.7	5.59
K6	219.3	226.2	0.97	187.4	1.17	177.7	1.23



Kuva 10. Keskisen pistekuorman rasittaman, jäykästi reunoiltaan tuetun neliölaatan myötökuvioita.

Tuloksia laskettaessa on otettu huomioon jokaisen laattakentän positiiviset ja negatiiviset myötömomentit. Laattojen K1 ja K3 tuloksia ei ole käsitelty tässä yhteydessä, koska myötöviivateoria ei sovellu raudoittamattomien laattojen analysointiin.

Koelaattojen laskennalliset ja kokeelliset lävistyskuormat on esitetty taulukossa 7. Teoreettiset lävistyskuormat on laskettu käyttäen betoninormin kaavaa

$$V_{uk} = k\beta(1 + 50\rho) u d f_{ctd} . \quad (8)$$

Taulukko 7. Laattakenttien lasketut lävistysmurtokuormat.

Kenttä	P_{ukoe}	V_u kN	P_{ukoe}/V_u
K1	183.0	32.5	5.63
K2	211.3	25.8	8.19
K3	151.2	32.5	4.65
K4	229.0	51.5	4.45
K5	194.0	25.8	7.52
K6	219.3	35.7	6.14

Raudoittamattomien kenttien lävistyskapasiteettia laskettaessa käytettiin poikkileikkauksen tehollisen korkeuden d asemesta momenttivarren pituutta ($z = \frac{2}{3} h$).

Kokeista saadun murtokuorman ja vastaavan betoninormien mukaisen lävistyskuorman välinen suhde vaihteli 4.45:stä 8.19:ään. Kokonaisvarmuus murtumista vastaan oli suuri kaikilla, myös raudoittamattomilla laatoilla. Niiden kohdalla on laskettu lävistyskuormia tarkasteltaessa otettava lisäksi huomioon, että laskenta-kaavan /7/ soveltaminen edellyttää laatan alapinnassa käytettävän taivutusrasitusten vaatimaa raudoitusta. Todettakoon, että laskettaessa kentän lävistyskuorma raudoittamattoman betonirakenteen sallitun leikkausjännityksen /8/ perusteella, tulokseksi saadaan n. 10 kN.

Taulukosta 7 nähdään, ettei käytetyllä laskumenetelmällä saatu lävistyskapasiteetille koetuloksia lähellä olevia arvoja. Käytetyssä laskumenetelmässä ei oteta huomioon holvivoimia, jotka kasvattavat arinalaatan kaltaisen rakenteen murtokuormaa huomattavasti.

Kaavan (1) mukaan lasketut raudoitettujen koekenttien lävistyskuormat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Arinalaatan raudoitettujen kenttien lävistyskapasiteetit holvivaikutus huomioon ottaen.

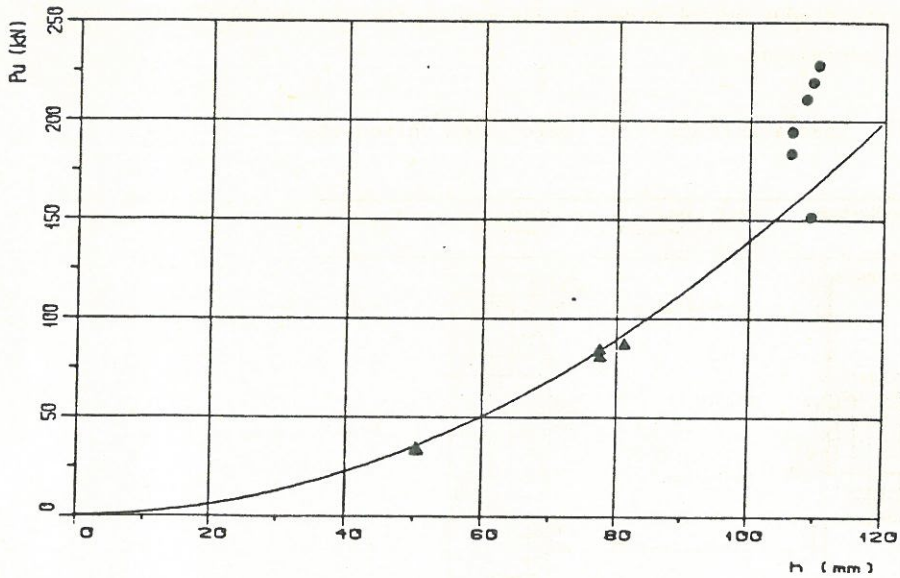
Kupu	P_{ukoe} kN	V_{uh} kN	P_{ukoe}/V_{uh}
K2	211.3	355.9	0.59
K4	229.0	361.6	0.63
K5	194.0	312.1	0.62
K6	219.3	260.1	0.84

Menetelmän mukaan lasketut lävistyskuormat olivat selvästi suurempia kuin kokeista saadut murtokuormat, mutta koetulosten suhde laskettuun kuormaan vaihteli kohtuullisen vähän. Murtohetkellä vaikuttavien holvivoimien suuruutta ei ole pystytty ratkaisemaan tyydyttävällä tavalla, minkä seurauksena holvivoimien lävistyskapasiteettia kasvattavan vaikutuksen arviointi jää epävarmaksi. Laattojen leikkausmurtomekanismi oli Hyttisen /5/ esittämän teorian mukainen ja lävistyskapasiteetin lisääntyminen johtui selvästi holvivaikutuksen vuoksi kasvaneista laatan yläpinnan puristusjännityksistä. Kokeessa käytetyssä laatastossa holvivoima kuitenkin pienenee halkeamien synnyttyä laattaa ympäröivään rakenteeseen. Ellei näitä halkeamia syntyisi, olisivat koetulokset todennäköisesti lähellä taulukossa 8 esitettyjä, laskettuja arvoja. Arinalaatan lävistyskapasiteettia ei käytetyllä menetelmällä siis pystytä arvioimaan luotettavasti. Tämän tutkimuksen perusteella on kuitenkin selvästi nähtävissä laatan holvivoimista aiheutuva merkittävä lävistyslujuuden lisäys.

Laatan paksuuden vaikutus lävistyslujuuteen

Edellisestä koesarjaa täydennettiin yksittäisillä laattakentillä suoritetuilla kokeilla, joissa selvitettiin laattaosan paksuuden vaikutusta lävistysmurtokuormaan /9/. Kuvassa 11 on esitetty yhteenvetona molempien koesarjojen tulokset.

Laatan paksuudella on merkittävä vaikutus lävistysmurtokuormaan. Murtokuorman havaittiin olevan verrannollinen laatan paksuuden neliöön. Kuvassa 11 on verrattu paksuuden vaikutusta laattojen murtokuormaan. Kuvaan on piirretty käyrä, jonka yhtälö on $P_u = 0.01388 \times h^2$. Murtokuormien havaitaan osuvan hyvin lähelle tätä käyrää. Myös Parkin tekemissä kokeissa /1/ saattoi havaita murtokuorman olevan suunnilleen verrannollinen laatan paksuuden neliöön.



Kuva 11. Laatan paksuuden vaikutus murtokuormaan.

YHTEENVETO

Taulukossa 9 on esitetty arinalaatan kenttien raudoitukset ja yhteenveto tärkeimmistä koetuloksista. Arinalaatan testauksessa saadut laattojen murtokuormat ovat 4,45-8,19 kertaa suurempia kuin viranomaismääräysten /6/ mukaan lasketut lävistyskuormat. Kokonaisvarmuus murtoa vastaan on siis näiden koetulosten perusteella huomattavan suuri.

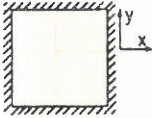
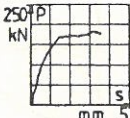
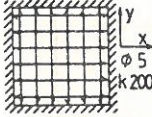
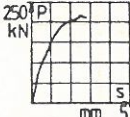
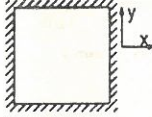
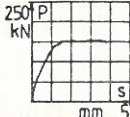
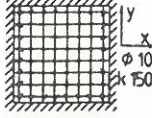
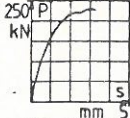
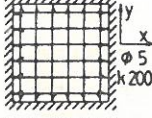
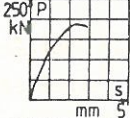
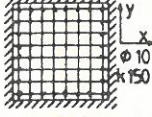
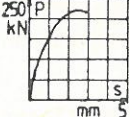
Sijainnista ja raudoituksesta riippumatta arinalaatan kaikki koelaatat murtuivat samalla tavalla pistekuorman leikkautuessa äkillisesti laatan läpi. Irtilaikautuneen murtokartion vaipan ja laatan tason välinen kulma (n. 20°) oli selvästi pienempi kuin leikkauskestävyyskokeissa on kirjallisuuden /3, 5/ mukaan tavallisesti saatu.

Raudoitusmäärä ja raudoituksen sijainti laatan korkeussuunnassa eivät vaikuttaneet merkittävästi laatan lävistyskapasiteettiin. Raudoittamattominakin laattojen murtokuormat olivat vain vähän pienempiä kuin raudoitettujen laattojen murtokuormat. Ripapalkkien yläpinnan raudoituksen puuttumisesta huolimatta koelaattojen lävistyskapasiteetti kasvoi voimakkaan holvivaikutuksen ansiosta suureksi.

Valupinnan huonon suojaamisen vuoksi arinalaatan yläpintaan helposti syntyvät kutistumishalkeamat laskivat koelaattojen lävistyskapasiteettia selvästi. Kuumiskutistumisilmiöllä ei kuitenkaan ole suunnittelun kannalta suurta merkitystä,

koska kokeista saadut murtokuormat olivat moninkertaisia laskennallisiin lävistyskuormiin verrattuna.

Taulukko 9. Laattakenttien K1-K6 koetulosten yhteenveto.

Kenttä	Raudoitus	Teräslaatu Raudoitusmäärä Sijainti	Kuormitus- kuvaajat	P_{ukoe}/V_{uk}
K1		raudoittamaton		5,63
K2		B500PV $\rho_x = 0,178 \%$ $\rho_y = 0,196 \%$ keskeinen		8,19
K3		raudoittamaton		4,65
K4		B500PV $\rho_x = 0,654 \%$ $\rho_y = 0,747 \%$ alapinta		4,45
K5		B500PV $\rho_x = 0,178 \%$ $\rho_y = 0,196 \%$ keskeinen		7,52
K6		B500PV $\rho_x = 0,902 \%$ $\rho_y = 1,090 \%$ keskeinen		6,14

Arinalaatan lävistyskapasiteetin suuruus riippuu lähinnä laatan paksuudesta ja yksittäistä laattaa ympäröivän betonirakenteen jäykyydestä. Kulmakentänkin asemassa olevaa laattaa kiertävät rivat ja ripojen yli jatkuva laatta muodostavat niin jäykän rakenteen, että laatan lävistyskapasiteetti kasvaa moninkertaiseksi laskennalliseen lävistyskuormaan verrattuna. Laatan kuormituksessa syntyvän voimakkaan holvivaikutuksen vuoksi arinalaatan verkkoraudoitus on siten näiden koetulosten perusteella yleensä tarpeeton.

Laatan paksuudella (hoikkuudella) on oleellinen vaikutus murtokuormiin. Koekaiden perusteella havaittiin murtokuorman olevan suoraan verrannollinen laatan paksuuden neliöön.

Palo- ja muita katastrofitilanteita ajatellen olisi selvitettävä paloverkon tai jonkin muun vastaavan kevyen raudituksen tarpeellisuus ja käyttökelpoisuus arinalaataston laatan ainoana raudoituksena. Pitkäaikaisten kuormien kannalta olisi lisäksi selvitettävä, miten paljon lävistyskapasiteetti saattaisi laskea betonin kutistumisen ja virumisen vuoksi.

MERKINNÄT

A_s	vetoraudituksen pinta-ala
E_c	betonin kimmokerroin
H	holvivoima
H_{max}	holvivoiman maksimiarvo
P_r	halkeamakuorma
P_{rap}	laatan alapinnan halkeamakuorma
P_{rk}	laskenta-arvojen mukainen halkeamakuorma
P_{rkoe}	halkeamakuorman koetulos
P_{rr}	arinalaatan rivan yläpinnan halkeamakuorma
P_{ryp}	laatan yläpinnan halkeamakuorma
P_u	murtokuorma
P_{ukoe}	murtokuorman koetulos
P_{uteor}	teoreettinen murtokuorma
S	laatan tuen jäykkyys vaakasiirtymiin nähden
V_c	laatan betonin lävistyskapasiteetti
V_u	laatan lävistyskapasiteetti
V_{uh}	lävistyskapasiteetti holvivaikutus huomioon ottaen
V_{uk}	lävistyskuorma
V_{uMoe}	lävistyskapasiteetti Moen teorian mukaan
a	laatan keskikohdan taipuma, kuormitusalueen sivumitta
a_1	laattakentän keskipisteen taipuma lävistymishetkellä
a_u	laatan keskipisteen taipuma murtohetkellä
b	poikkileikkauksen leveys
f_c	betonin puristuslujuus
f_{cfm}	betonin taivutusvetolujuuskoetulosten keskiarvo
f_{cm}	betonin puristuslujuuskoetulosten keskiarvo
f_{ct}	betonin vetolujuus
f_{ctk}	betonin ominaisvetolujuus
f_{ctm}	betonin halkaisuvetolujuuskoetulosten keskiarvo

f_u	teräksen murtolujuus
f_y	teräksen myötölujuus
f_{yk}	teräksen ominaislujuus
g	pysyvä tasainen kuorma
h	laatan paksuus
l	jänneväli
m_u	mittayksikön levyisen laattakaistan positiivinen momenttikapasiteetti
s_{ukoe}	laattakentän keskipisteen pystysuuntaisen siirtymän koetulos
u	kuormitusalueen reunasta etäisyydellä $0.5 \cdot d$ olevan leikkauksen rajoittaman kuvion piiri lävistyksessä
x	neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen puristetusta reunasta
x_h	holvivoimien aiheuttama lisäys neutraaliakselin etäisyyteen poikkileikkauksen puristetusta reunasta
z	poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi
β	kerroin, jonka avulla otetaan huomioon läpileikkautuneen laatan osaan kohdistuvan kuorman epäkeskisyys
ϵ_c	betonin suhteellinen muodonmuutos
ρ	suhteellinen raudoitusmäärä l. geometrinen raudoitussuhde
ϕ	tangon halkaisija
w	mekaaninen raudoitussuhde

KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Park, R., Gamble W. L., Reinforced concrete slabs, Canada 1980, 618 s.
- [2] Kinnunen S., Nylander H., Punching of concrete slabs without shear reinforcement, Transactions of the royal institute of technology, no. 158, Stockholm 1960.
- [3] Hewitt, B. E., Punching shear strength of restrained concrete slabs, Journal of the structural division, vol. 101, st. 9, September 1975, s. 1837-1853.
- [4] Hyttinen, E., On the strength of reinforced concrete slabs, Part C: On the flexural and shearing strength and deflections of reinforced concrete slabs. Helsinki 1969. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Julkaisu 138. 108 s.
- [5] Hyttinen, E. & Tuomioja, M.; Dome action in reinforced concrete slabs. Helsinki 1971. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Julkaisu 160. 67 s.

- [6] Mörntinen, J., Ristiin raudoitetun teräsbetoni­laatan raudoituksen kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööri­osasto. Otaniemi 1982. 205 s.
- [7] Betoninormit 1981. Vammala 1981. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Julkai­su RIL 131-1981. 179 s.
- [8] Betonirakenteet. Ohjeet 1981. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B4. Sisäasiainministeriö Helsinki 1980. 60 s.
- [9] Mikkola, A., Raudoitustankovälin vaikutus teräsbetoni­laatan toimintaan. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööri­osasto. Otaniemi 1982. 154 s.

Lumme, Pentti, tekn.lis., Oy Ovako Ab.

Kanerva, Pekka, prof., Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööri­osasto.

