

Hoikan teräsbetonipilarin kehittyneet mitoitusmenetelmät

Jarkko Hakola, Diplomi-insinööri,
Oulun yliopisto, Konetekniikka,
Rakennesuunnittelu
jarkko.hakola@sweco.fi

Hoikan teräsbetonipilarin kehittyneet mitoitusmenetelmät -diplomityö tehtiin vuoden 2014 kevään ja kesän aikana. Diplomityön ohjaajana toimi TkL Raimo Hannila Oulun yliopistosta. Tilaajina ja rahoittajina toimivat Parma (DI Pasi Salmela) ja Sweco Rakennetekniikka (DI Atte Leppänen). Ulkopuolisena tarkastajana toimi TkL Harri Isoherranen Fira Oy:stä.

Tutkimuksen tausta

Hoikkien teräsbetonipilareiden mitoitukseen liittyy paljon yksinkertaistuksia ja valmiita diagrammeja, jotka voivat kasvattaa poikkileikkausta, teräsmäärää ja aiheuttaa kilpailukyvyn heikentymisen. Mitoitus voidaan suorittaa kuitenkin tarkemmin epälineaarilla laskennalla Eurocoden ohjeiden mukaisesti. Epälineaarilla laskennalla saadaan rakenne laskettua todellisten siirtymien ja voimasuureiden mukaisesti.

Diplomityön lähtökohtana oli optimoida 2-laivaisen hallirakennuksen teräsbetonipilareiden geometria ja raudoitusmäärä epälineaarilla analyysillä ja vertailla tuloksia Eurocoden nimellisen jäykkyyden ja kaarevuuden menetelmillä saataviin tuloksiin.

Yksinkertaisilla menetelmillä laskettaessa hoikkien teräsbetonipilareiden kohdalla on approksimoitava betonirakenteen epälineaarista käyttäytymistä. Mitoitusta ei näin ollen tehdä ”tarkasti”, vaan se pidetään yksinkertaisena ja lyhyenä tavallista käytännön suunnittelua silmällä pitäen.

Rakenteiden analysointiin tarkoitetut kaupalliset tietokoneohjelmat ovat kehittyneet kovasti 2000-luvulla, johtuen tietokoneiden laskentatehon kasvusta. Vaativat epälineaariset laskentatehtävät voidaan suorittaa muutamissa minuuteissa, kun 20–30 vuotta sitten vastaavaan saattoi koneelta kulua aikaa useampia päiviä.

Rakennesuunnittelija voi nykyään lähes tyhjä mitoitus tehtäviä epälineaarilla analyysillä yhä helpommin ja useammin, koska ohjelmat ovat kehittyneet ja laskentatehot kasvaneet.

Rakennesuunnittelijan on kuitenkin ymmärrettävä ja tunnettava epälineaarisen laskennan teoriaa ja tiedettävä, miten laskentaa suorittava tietokoneohjelma toimii teorian ja normien osalta. Epälineaarinen laskenta antaa helposti vääriä tuloksia, mikäli suunnittelija ei tunne teoriaa ja ohjelman laskentamenetelmiä perusteellisesti.

Eurokoodi 2

Eurokoodi 2:ssa esitetään kaksi yksinkertaista menetelmää hoikkien betonipilareiden analysointiin; nimellisen kaarevuuden ja nimellisen jäykkyyden menetelmät. Yksinkertaisilla menetelmillä tarkoitetaan analyysimenetelmiä, joissa lineaarisen laskennan (1. kertaluvun) taivutusmomentteja korotetaan kuvaamaan 2. kertaluvun vaikutuksia. Korottamisen jälkeen tarkistetaan kyseisen poikkileikkauksen kestävyys normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutukselle poikkileikkauksen tasolla. Yksinkertaisimmillaan voidaan käyttää hyväksi valmiita yhteisvaikutusdiagrammeja.

Eurokoodi 2:ssa mainitaan, että yksinkertaisen menetelmien tuottamat nimelliset toisen kertaluvun momentit ovat useasti selvästi suurempia kuin stabiliteetin menetystä vastaavat momentit. Näin varmistetaan, että mitoitus on varmalla puolella.

Eurokoodi 2:ssa esitetään myös yleinen menetelmä, joka perustuu epälineaariseen toisen kertaluvun analyysiin. Betonin materiaalsen epälineaarisuuden lisäksi hoikilla rakenneosilla on huomioitava geometrinen epälineaarisuus.

Geometrinen epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että hoikka pilari taipuu sivulle, jolloin taivutusmomentti kasvaa epälineaarisesti.

Epälineaarista analyysia voidaan käyttää sekä käyttö- että murtorajatilojen muodonmuutoksien laskentaan, kunhan tasapaino- ja yhteensopivuusehdot toteutuvat ja käytetään sopivaa epälineaarista materiaalmallia. Hoikissa rakenneosissa betonin viruminen on vaikuttaa muodonmuutoksiin ajan kuluessa ja sen vaikutukset on sisällytettävä murtorajatilien tarkasteluihin.

Tutkittava hallirakenne

Diplomityössä tutkittiin 2-laivaisen hallin (kuva 1) pitkien mastopilareiden käyttäytymistä, kun 2. kertaluvun vaikutukset ovat suuria.

Tutkittavan hallin ulkolinjalla pilarijako on 5,4 metriä ja poikkileikkaus 480 x 480 mm². Hallin keskellä pilarijako on 10,8 metriä ja poikkileikkaus joko 480 x 480 tai 580 x 580 mm². Yläpohjarakenteena ovat 24 metriä pitkät Parman TEK-elementtilaatat.

Hallirakennetta tarkasteltiin vain 2D-mallina, jolloin taivutus huomioitiin vain yhteen suuntaan. Rauditus mallinnettiin yhdelle riville samalla keskiöetäisyydellä (h-d = 60 mm).

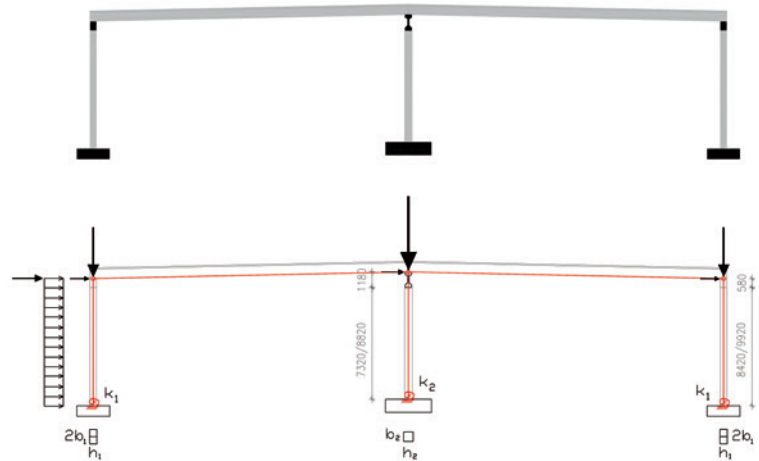
Tutkittavat kehämallit

Diplomityöhön valittiin 7 erilaista kehämallia taulukon 1 mukaisesti, missä pilareiden pituudet, rauditusmäärät ja keskipilarin koko vaihtelivat. FEM-ohjelmilla mitoitettaviin kehämalleihin laskettiin lineaariset jousivakiot vastaamaan

1 Diplomityössä tutkittiin 2-laivaisen hallin pitkien mastopilareiden käyttäytymistä, kun 2. kertaluvun vaikutukset ovat suuria. Yläpohjarakenteena olivat 24 metriä pitkät Parman TEK-elementtilaatat.

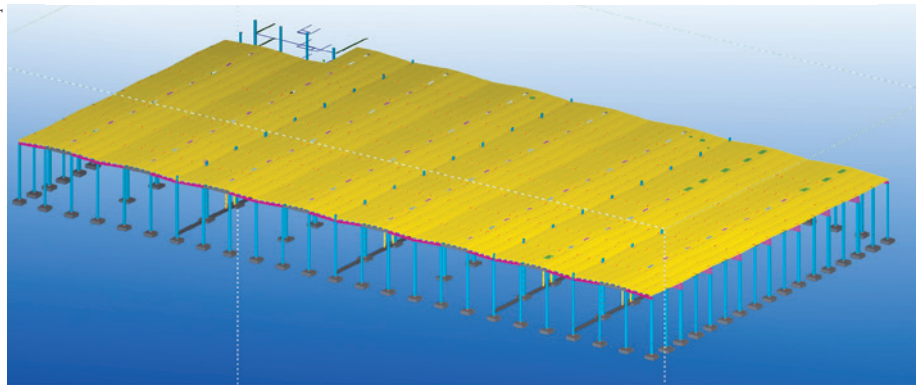
2 Hallirakennetta voidaan tarkastella myös 3D-mallina. Kuvassa on esimerkki Parman mastopilarirakennemallista.

3 Halli, jossa on käytetty Parma Oy:n mastopilareita. Kuvan halli ei liity artikkelin tutkimukseen.



1

Parma Oy

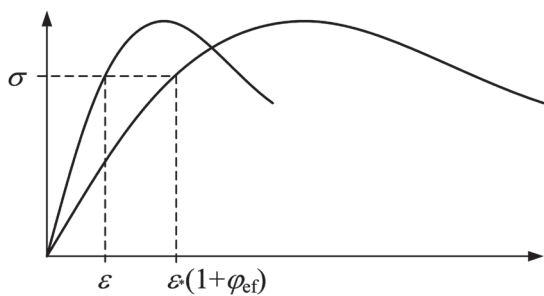


2

Parma Oy



3



4 Eurokoodi 2:ssa yksinkertaisimmillaan viruma huomioidaan murtorajatilan tarkasteluissa kasvatamalla muodonmuutoksia efektiivisellä virumaluvulla (SFS-EN1992-1-1: kaava 5.19) kuvan 4 mukaan.

joustolukua 0,1. Yksinkertaisilla menetelmillä käytettiin yksittäisen mastopilarin nurjahduspituutena 2,18L (L=todellinen pilarin pituus), jolloin alapään joustoluku on tuo vastaava 0,1. Lineaarinen vaakakuormien jakaantuminen kehässä laskettiin yksinkertaisissa menetelmissä kuitenkin jäykällä alapään tuennalla. Taulukon 1 teräsmäärät ovat vetoteräsmääriä.

FEM-ohjelmat

Diplomityöhön valittiin kaksi FEM-ohjelmaa, joista toinen FEM-ohjelma on Suomessa paljon käytetty RFEM5 (versio 5.02.0053 Student) ja toinen vähemmän käytetty hollantilainen MatrixFrame (versio 5.1.4 SP4). Jälkimmäinen on herättänyt kiinnostusta hyvien tulosten ja helpon käytettävyyden ansioista. Tarkoituksena oli selvittää molempien ohjelmien luotettavuus ja soveltuvuus epälineaarisen mastopilarikehän analysointiin.

Molemmat FEM-ohjelmat perustavat laske-
kennan elementtimenetelmään ja kuormaoh-
jattuun analyysiin. Ohjelmat pystyvät laske-
maan geometrian muutoksen epälineaarisesti
ja yhtäaikaaisesti materiaalin käyttäytymistä
voidaan kuvata epälineaarisesti.

FEM-mallissa pystysauva (pilari) mallinnet-
tiin siten, että sen pituus oli pilarin ja palkin
yhteispituus kuten kuvan 1 statiiikkamallista
voidaan nähdä.

Tulokset

Kahdessa tutkitussa kehämallissa (kehä 1 ja 3)
syntyi menetelmien välillä eroja. Kehässä 1 oli
reunapilareiden raudoitussuhde todella pieni ja
kehässä 3 keskipilarin koko oli 480 x 480 mm².
Taulukossa 2 on nimellisen kaarevuuden vaa-
timat vetorautoitusmäärä punaisella fontilla
ja alapuolella prosentuaalinen ero yleisellä

Tutkittavat kehämallit

Betoni C40/50

Tehollinen korkeus h=60mm

	Normaalivoima, N _{Ed} [kN]			
	reunapilari	keskipilari	reunapilari	
KY2	536.6	1075.5	536.6	0,9*pysyvä+1,5*tuuli
KY3	957.8	1918.6	957.8	1,15*pysyvä+1,05*lumi+1,5*tuuli
KY4	1074.5	2151.9	1074.5	1,15*pysyvä+1,5*lumi+0,9*tuuli

	480x960 2T32	580x580 2T32	480x960 2T32	poikkileikkaus vetorautoitus
KEHÄ 1	9,0m 346 222 kNm	8,5m 390 752 kNm	9,0m 346 000 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)
KEHÄ 1b	10,5m 296 762 kNm	10,0m 332 139 kNm	10,5m 296 762 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)

	480x960 10T25	580x580 5T25	480x960 10T25	poikkileikkaus vetorautoitus
KEHÄ 2	9,0m 346 222 kNm	8,5m 390 752 kNm	9,0m 346 000 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)
KEHÄ 2b	10,5m 296 762 kNm	10,0m 332 139 kNm	10,5m 296 762 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)

	480x960 10T25	480x480 5T25	480x960 10T25	poikkileikkaus vetorautoitus
KEHÄ 3	9,0m 346 222 kNm	8,5m 183 296 kNm	9,0m 346 222 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)

	480x960 4T32	580x580 2T32	480x960 4T32	poikkileikkaus vetorautoitus
KEHÄ 4	9,0m 346 222 kNm	8,5m 390 752 kNm	9,0m 346 000 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)
KEHÄ 4b	10,5m 296 762 kNm	10,0m 332 139 kNm	10,5m 296 762 kNm	pituus (pilari+palkki) jousivakio (jousto 0,1)

Taulukko 1.

menetelmällä kestävään kehämalliin verrattuna.

Yleisen menetelmän etu tulee esille, kun
mitoitetaan mastopilareiden peruspultit ja
anturat. Yksinkertaisista menetelmistä tulevat
kokonaistaivutusmomentit ovat selvästi suurem-
pia, kuten taulukosta 3 voidaan nähdä kahden
kehämalliin osalta. Taulukon 3 reunapilareiden
taivutusmomentit ovat 480 x 480 mm² poikkileik-
kaukselle. Perustukset on mitoitettu vertailua
varten molempiin suuntiin yhtä suurella taivu-
tuselementillä ja peruspulttien mitoituksessa
ei ole huomioitu asennusaikaista tilannetta.

Loppupäätelmät

Tutkimuksessa selvisi, että yleinen menetelmä
eli epälineaarinen rakenneanalyysi antaa posi-
tiivisemmat tulokset etenkin silloin, kun raudoi-

tussuhde on pieni ja pilarien hoikkuus on suuri.
Yksinkertaisilla menetelmillä taivutusmomentit
kasvavat tällöin helposti suuriksi.

FEM-ohjelmien välillä syntyi pieniä eroja
ja syyt johtuivat suurelta osin eri betonin jän-
nitysvienymäyhteyksien käytöstä ja RFEM5:n
betonin vetojäykkyyden huomioimisesta. Mat-
rixFrame siirtää vetojännitykset heti teräkselle,
kun poikkileikkaus joutuu vedolle.

Tutkimuksen FEM-ohjelmat huomioi-
vat viruman "vaikutukset voimakkaammin"
kuin Eurokoodi 2 ohjeistaa. Eurokoodi 2:ssa
yksinkertaisimmillaan viruma huomioidaan
murtorajatilan tarkasteluissa kasvattamalla
muodonmuutoksia efektiivisellä virumaluvulla
(SFS-EN1992-1-1: kaava 5.19) kuvan 4 mukaan.
Efektiivisellä virumaluvulla vähennetään

Yleinen menetelmä vs. nimellisen kaarevuuden menetelmä

Raudoitusmäärän tarve

Kehä 1	2T32 reunap.	2T32 keskip.	Kehä 3	10T25 reunap.	5T25 keskip.	
	4T32/6T25 50%/55%	ok		ok	4T32 50%	
	ok	ok		ok	ok	

Taulukko 2.

	N.Ed [kN]		Kehät 2, 4		Kehä 2		Kehä 2		Kehä 4		Kehä 4	
	N.Ed [kN]		NKM		NJM		Yleinen menetelmä		NJM		Yleinen menetelmä	
	reunap.	keskip.	reunap.	keskip.	reunap.	keskip.	reunap.	keskip.	reunap.	keskip.	reunap.	keskip.
KY2	268.3	1075.5	227.6	422.9	156.4	229.4	124.7	187.6	181.0	278.7	126.6	204.1
KY3	478.9	1918.6	320.3	649.1	204.2	331.7	150.0	229.0	264.4	455.8	159.2	265.8
KY4	537.3	2151.9	302.2	657.9	144.6	264.4	105.7	159.0	197.1	403.7	111.6	173.4
Peruspultit	HPKM39/ HPM39L		PEC45/ PPM45L		HPKM30/ HPM30L		HPKM20/ HPM20L		HPKM16/ HPM16L		PEC30/ PPM30L	
	86%		81%		72%		90%		98%		54%	
Anturan koko	PEC30/ PPM30L				HPKM24/ HPM24L				HPKM30/ HPM30L		HPKM30/ HPM30L	
	104%				101%				101%		101%	
	1900x 1900x 500		2400x 2400x 600		1500x 1500 x500		2200x 2200x 600		1400x 1400 x500		2150x 2150x 600	

NKM=nimellisen kaarevuuden menetelmä

NJM=nimellisen jäykkyyden menetelmä

Taulukko 3.

pitkäaikaiskuorman suhteelliset vaikutukset murtorajatilan kuormitusyhdistelyissä. Kuitenkin tutkimuksen FEM-ohjelmat selkeyden ja mitoituksen varmuuden takia kasvattavat muodonmuutoksia normaalilla virumaluvulla. Tämä käytäntö tarkoittaa, että kaikki kuormat ovat pitkäaikaisia.

Efektiiivisen virumaluvun määritykseen liittyy epäjohtomukaisuuksia, etenkin silloin kuin rakenteessa vaikuttaa pelkästään pysyvää kuormaa. Tässä tapauksessa efektiiivinen virumaluku on 74 % virumaluvusta, koska kerroin virumaluvulle muodostuu käyttö- ja murtorajatilan osavarmuuksien suhteesta (1,0/1,35). Normien ajatuksena on laskennan mahdollistaminen yhdellä kertaa, mutta osavarmuuskertoimien huomioiminen on hieman epäselvä käytäntö.

Tästä johtuen on FEM-ohjelman käyttäjän tiedettävä, syötetäänkö ohjelmaan virumaluku vai efektiiivinen virumaluku. Tämän jälkeen on tiedettävä, laskeeko ohjelma itse jokaiselle kuormitusyhdistelmälle oman efektiiivisen virumaluvun vai kasvattaako ohjelma muodonmuutoksia pelkästään virumaluvulla.

Ohjelman käyttäessä laskennassa pelkästään virumalukua, voi käyttäjä halutessaan laskea jokaiselle kuormitusyhdistelylle oman efektiiivisen virumaluvun ja laskea näin ollen niitä vastaavat voimasuureet ja siirtymät syöttämällä virumaluvun paikalle efektiiivisen virumaluvun. Käytännössä asia on kuitenkin monimutkaisempi kuin normi antaa ymmärtää ja selkeintä on käyttää kuvan 2 efektiiivisen virumaluvun paikalla virumalukua.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että mastopilarikehä voidaan luotettavasti laskea epälineaarisella laskennalla. Laskentamallia tekevän suunnittelijan on kuitenkin tunnettava teoriaa tarpeeksi, jotta laskenta-asetuksia osaa tulkita varmasti oikein. Yksinkertaisten menetelmien ja yleisen menetelmän välille syntyisi ilmeisesti enemmän eroja, mitä suurimmiksi 2. kertaluku kasvaa kehän pilareissa.