



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

**BETONIELEMENTTIRAKENTAMISEN SOVELTAMINEN
KORKEISIIN RAKENNUKSIIN**

Eemeli Tikkanen

Diplomityö, jonka aihe on hyväksytty Oulun yliopiston
Konetekniikan koulutusohjelmassa 14.08.2014

Ohjaajat: TkL Raimo Hannila, DI Atte Leppänen,
DI Tuomas Jaakkola ja DI Juha Rämö

TIIVISTELMÄ

Betonelementtirakentamisen soveltaminen korkeisiin rakennuksiin

Eemeli Tikkanen

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Diplomityö 2014, 167 s.

Työn ohjaaja: TkL Raimo Hannila, DI Atte Leppänen, DI Tuomas Jaakkola ja DI Juha Rämö

Työssä tutkitaan elementtirakentamisen soveltuvuutta korkeaan asuinrakentamiseen, kun myös välipohjat toteutetaan elementtirakenteisina. Työssä tutkitaan korkean elementtirakennuksen kokonaisstabiliteettia ja koko jäykistysjärjestelmän toimintaa elementtirakenteisena. Tutkimuksen kohteena ovat rakennusmallit jäykistetään pystysuunnassa asuinrakentamiselle tyypillisellä mastojäykistyksellä. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää erilaisten ontelolaatastojen toimivuus vaakasuuntaisena jäykistejärjestelmänä osana mastojäykistejärjestelmää. Tutkimusta kohdistetaan elementtirakenteiden jäykistäviin ja kuormia siirtäviin vaaka- ja pystysuuntaisiin liitoksiin. Tutkimuksessa selvitetään nykyisten suunnitteluohjeiden mukaisten liitosten soveltuvuus korkeisiin elementtirakennuksiin ja mahdolliset jatkotutkimustarpeet liitosdetaljien osalta. Tutkimuskohteiden käyttötilan siirtymiä ja asukkaiden kokemaa haitallista kiihtyvyyttä verrataan tunnettuihin raja-arvoihin.

Rakennuksen voimasuuret lasketaan numeerisesti elementtimenetelmällä. Tutkimusosio suoritetaan muodostamalla kolme erillistä FEM-kuorimallia samalla vaakageometrialla siten että tutkittavien asuinrakennuksien kerroslukumäärät ovat 16, 24 ja 32. Elementtien pysty- ja vaakasuuntaisten liitosten kapasiteetit lasketaan nykyisten suunnitteluohjeiden mukaisesti, joita verrataan FEM-laskentatulosten voimasuureisiin. Laskentamalleissa otetaan huomioon kuormituksen alkamisen ajankohta eli rakentamisen vaiheisuus. Kantavien rakenteiden suunnittelustandardina käytetään eurokoodia, jonka mukaan määritetään myös tuulikuormat.

Mastojäykistäminen todettiin tehokkaaksi jäykistejärjestelmäksi työssä tutkituilla alle 100 metrisillä rakennuksilla, kun jäykistejärjestelmä on jatkuva koko rungon

korkeudella. Tutkimuskohteiden kaikki pystyrakenteet pysyvät puristettuna kaikilla kuormitustapauksilla, jolloin rungon stabiliteetti kaatumista vastaan saavutetaan ilman vetorasitettuja liitoksia. Kun laskentamallissa otetaan huomioon kuormituksen alkamisen ajankohta, eli kun laskentamalli vaiheistetaan huomioimaan rakennusrungon pystytys, vältetään pystysuuntaisten liitosten leikkausvoimajakauman vääristyminen. Työssä saavutettujen laskentatulosten perusteella vaiheeton laskenta johdattaa pystysuuntaisten saumojen ylimitoitukseen rakennuksen huipulla ja alimitoitukseen rungon keskivaiheilla, mikä voidaan välttää vaiheistetulla laskennalla. Vaaka- ja pystysuuntaisten liitosten kapasiteettien puolesta kaikki tutkimuskohteiden mukaiset rakennuksen voidaan toteuttaa täyselementoituna. Tutkimuskohteiden vaakasuuntaiset liitokset voidaan toteuttaa tukemalla ontelolaatat kantavien seinien väliin Betoninormikortin n:o 27 mukaisesti ilman konsoliliitosta. Varsinaisille liitosdetaljien jatkotutkimuksille tutkimuksessa ei havaittu tarvetta, vaan nykyisten suunnitteluohjeiden mukaisten liitosten kapasiteetit ovat riittäviä. Vaikka korkeissa rakennuksissa tuulikuormat ovat matalarakentamista suuremmat, tutkimuskohteiden vaakasuuntainen jäykistejärjestelmä on mahdollista toteuttaa elementtirakenteisena. Tutkimustulosten perusteella elementtirakenteisia tasolevyjä voi hyödyntää myös korkeassa rakentamisessa.

Mastojäykistykseen todettiin toimivan tehokkaasti myös käyttötilan vaatimusten täyttämässä. Tutkimuskohteiden käyttörajatilan mukaiset kokonaissiirtymät ovat hyvin vähäisiä ja täyttävät siirtymäraajat. Lisäksi kaikki tutkimuskohteet täyttävät selvästi värähtelymitoituksen vaatimukset, ja tulosten perusteella värähtely ei ole betonirunkoisten mastojäykistettyjen asuinrakennusten ongelma alle 100 metrisillä rakennuksilla.

Asiasanat: korkea rakentaminen, betonielementti, vaiheistettu laskenta, elementtimenetelmä, jäykistys

ABSTRACT

The appliance of precast concrete elements in tall buildings

Eemeli Tikkanen

University of Oulu, Department of Mechanical Engineering

Master's thesis 2014, 167 p.

Supervisor: Raimo Hannila Lic.Sc. (Tech.), Atte Leppänen M.Sc. (Tech.), Tuomas Jaakkola M.Sc. (Tech.) ja Juha Rämö M.Sc. (Tech.).

The appliance of precast concrete elements in constructing tall residential buildings has been investigated in this thesis when floors are composed of hollow core slabs. In this thesis the stability of tall buildings is analyzed when all load bearing and bracing structures are precast concrete elements. Shear walls are used as the bracing structure. The diaphragm behavior of floors composed of hollow core slabs is investigated. This thesis concentrates on forces in vertical and horizontal joints between precast elements. The appliance of mostly used joint details and connections in Finland are investigated. The connection capacities are calculated by current Finnish design principles. In addition a tall buildings horizontal displacements and dynamic movements caused by wind loading are analyzed.

A finite element analysis (FEA) is used for the design. FE-analysis is used to calculate the connection forces in joints between precast elements. Three different height tall buildings are analyzed. First building has 16 floors, second 24 floors and third 32 floors. All buildings have same plan geometry. Vertical and horizontal connections capacities are calculated according to current Finnish design principles. The joint capacities are then compared to the calculation results of FE-analysis. In FE-analysis different construction stages are taken into consideration to model the real behavior of a building. Eurocode is used as the design standard for load bearing structures and also wind loads are determined from eurocode.

In this thesis the shear wall bracing system was found out to be effective in the studied tall buildings, when the load path is continuous. All load bearing elements stay under compression in every load combination so the lateral stability of the structures

is achieved without tension resisting connections. In this thesis it was found out that if the construction process is not taken into account, the results could be falsified considerably especially in vertical connections. By taking account the construction stages oversizing and undersizing can be avoided. According to the calculation results it was found out that the capacities of mostly used vertical and horizontal joint details are sufficient and can be used in tall buildings. Floors composed of hollow core slabs can be designed and constructed to transmit horizontal loads to shear walls and can act as floor diaphragm in tall buildings. Shear wall bracing system was also found out to be very effective in fulfilling horizontal displacement limitations and requirements for vibration design if buildings that are less than 100 meters high.

Keywords: tall buildings, precast concrete element, construction stages, finite element method, bracing

ALKUSANAT

Diplomityön tarkoituksena on edistää korkeiden rakennuksien elementtirakentamista sekä kehittää korkeiden rakennusten numeerista mallintamista. Diplomityö on tehty opinnäytetyötä Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan konetekniikan osastolle diplomi-insinöörin tutkintoa varten. Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikan Atte Leppästä ja Parma Oy:tä haastavasta diplomityöaiheesta.

Diplomityön ohjaajina toimivat TkL Raimo Hannila Oulun yliopistosta, DI Atte Leppänen ja DI Tuomas Jaakkola Sweco Rakennetekniikasta sekä DI Juha Rämö Parmalta. Olen tehnyt diplomityöni Sweco Rakennetekniikan Oulun toimipisteessä puolen vuoden opintovapaani aikana. Ohjaajien lisäksi diplomityön tekemisessä minua ovat avustaneet Sweco Rakennetekniikan Oulun toimipisteen henkilökunta. Oulun toimipisteen henkilökunnasta erityiskiitoksen haluan osoittaa Esa Tuohimaalle arvokkaista neuvoista ja keskustelusta työn aihepiiriin liittyen. Työssä käytetyn StruSoft FEM-design -ohjelmiston olen saanut suoraan StruSoftilta ja työssä käytetyn Dlubal RFEM -ohjelmiston olen saanut RAK-TEK Solutions Oy:n kautta Dlubalilta. Diplomityön rahoituksen on järjestänyt Sweco Rakennetekniikka ja Parma.

Oulu, 24.11.2014



Eemeli Tikkanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	6
SISÄLLYSLUETTELO	9
MERKINNÄT JA LYHENTEET	10
1 JOHDANTO	13
2 KORKEA RAKENTAMINEN	15
2.1 Korkean rakentamisen määritelmä	15
2.2 Viranomaisvaatimukset Suomessa	15
2.3 Korkean rakentamisen rakentamistapaohje	16
2.4 Paloturvallisuus	18
2.5 Betonielementtirakentamisen hyödyt	20
2.5.1 Laatu ja tarkkuus	21
2.5.2 Rakentamisen nopeus ja kustannukset	21
2.5.3 Rakennusfysikaaliset ominaisuudet	22
2.5.4 Rakennettavuus	22
2.6 Betonielementtirakentaminen maailmalla	23
3 RAKENTEIDEN KUORMAT	26
3.1 Omapaino ja hyötykuormat	26
3.2 Hyötykuormien vähennys	27
3.3 Tuulikuorma	29
3.3.1 Puuskanopeuspaineen määrittämisen perusteet	30
3.3.2 Tuulen aiheuttamat kiihtyvyydet ja siirtymät	33
3.3.3 Pyörreratailmiö ja aeroelastiset epästabiiliusilmiöt	35
3.3.4 Tuulitunnelikokeet	42
4 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT	44
4.1 Rakennuksen luokittelu	44
4.2 Lujuus ja stabiileetti	47

4.3	Suunnittelurajatilat	48
4.3.1	Murtorajatila	48
4.3.2	Käyttörajatila	49
4.4	Rakennuksen jäykkyys ja siirtymäraajat	50
4.5	Värähtely	52
4.6	Rakenteiden kokoonpuristuma ja vaiheittainen rakentaminen	56
4.6.1	Vaakasuuntainen laajeneminen	63
5	KORKEAT ELEMENTTIRAKENNUKSET	68
5.1	Jäykistys	68
5.2	Liitokset	70
5.2.1	Seinien pystysuuntaiset liitokset	71
5.2.2	Seinien vaakasuuntaiset liitokset	79
5.2.3	Ontelolaatan pään liitos seinään	80
5.2.4	Ontelolaatan reunan liitos seinään	86
5.3	Elementtirakenteiset tasolevyt	90
5.3.1	Monikerrosrakentamisessa käytettävät laattatyypit	90
5.3.2	Tasolevyn voimasuureiden laskenta	94
5.3.2.1	Voimasuureiden ratkaisu elementtimenetelmällä	96
5.3.2.2	Tasolevyn kestävyyslaskenta	101
6	TUTKIMUSOSIO	109
6.1	Tutkimuskohteen esittely	109
6.2	Tutkimusmenetelmät	111
6.3	Laskentamallin kuvaus	113
6.3.1	Laskentamallin muodostamisen perusoletukset	113
6.3.2	Tutkimuskohteen FEM-laskentamallit	117
6.3.3	Kuormat ja rakennusten luokitus	119
6.3.4	Tarkasteltavat rakenneosat ja -liitokset	121
7	LASKENTATULOKSET	124
7.1	16-kerroksinen rakennus	124
7.1.1	Vaakasuuntaiset liitokset	127
7.1.2	Pystysuuntaiset liitokset	131
7.1.3	Tasolevyjen rasitukset	135
7.2	24-kerroksinen rakennus	138
7.2.1	Vaakasuuntaiset liitokset	139

7.2.2	Pystysuuntaiset liitokset	142
7.2.3	Tasolevyjen rasiitukset	144
7.3	32-kerroksinen rakennus	146
7.3.1	Vaakasuuntaiset liitokset	147
7.3.2	Pystysuuntaiset liitokset	150
7.3.3	Tasolevyjen rasiitukset	153
7.4	Käyttöraajatilatarkastelut	154
7.4.1	Siirtymät	154
7.4.2	Värähtely	156
8	YHTEENVETO	159
9	LÄHDELUETTELO	163