

ECSC-PROJEKTI NO 7210 PR 254

OHUTLEVYRANKOJEN PALONKESTÄVYYDEN LASKENTA

Tuuli Oksanen, Olli Kaitila, Ulla-Maija Jumppanen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Kivimiehentie 4 / postiosoite PL1803, 02044 VTT

Tiivistelmä

Kantavien teräsohutlevyrankarakenteiden palonkestävyyden selvittämiseksi tehtiin erilaisille rangoille, levyillä jäykistetyille rangoille sekä kokonaisille seinä- ja välipohjarakenteille kokeita normaalilämpötilassa ja korkeissa lämpötiloissa. Tutkitut rangat olivat C-100, C-150, AWS-150, TC-150 ja C-250. Rangat poikkesivat toisistaan sekä koon, muodon että lujuusluokan suhteen.

Aluksi selvitettiin suojaamattomien rankojen kriittistä lämpötilaa kokeellisesti. Tämän jälkeen tutkittiin rankojen kriittistä lämpötilaa, kun rankojen molemmin puolin oli kiinnitetty kipsilevyt ja osassa kokeista ontelossa oli myös kivivilla. Lopuksi tehtiin kahdelle eri seinärakenteelle, joista toisessa rankana oli C-150 ja toisessa TC-150, sekä ohutlevykannattajista kootulle välipohjarakenteelle palonkestävyyskokeet.

Suuri osa projektin aikana tehdyistä rakennepolttokokeista mallinnettiin käyttäen FE-ohjelmistoa (ABAQUS tai ANSYS). Tämän lisäksi tehtiin laaja parametrinen tutkimus, jossa tarkasteltiin pilarin pituuden, kuormitusasteen, kuormituksen epäkeskisyyden ja lämpötilagradientin vaikutusta palonkestävyyteen. Numeerisen mallinnuksen ja parametrisen tutkimuksen tulosten perusteella kehitettiin C-profiileille yksinkertainen palonkestävyyden laskentamalli.

JOHDANTO

ECSC-projekti Nro 7210 PR 254 ”Calculation rules of lightweight steel sections in fire situation including natural fires” [1] alkoi vuonna 2000 ja päättyi vuoden 2003 lopussa. Projektin koordinaattorina toimi CTICM Ranskasta ja muina partnereina ARBED Luxemburgista, Corus UK, CSM Italiasta, LABEIN Espanjasta, SBI Ruotsista ja VTT Suomesta. Suomalaisena teollisuusrahoittajana oli Rautaruukki Oyj.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kantavien teräsrakenteiden käyttäytymistä ja murtomekanismeja tulipalossa sekä kehittää näiden rakenteiden laskentamenetelmiä. Työ sisälsi seuraavat osatehtävät:

- kylmämuovatus teräksen jännitys-venymäkäyrän määrittäminen korkeissa lämpötiloissa
- suojaamattomien teräsohutlevyrankojen kapasiteetti normaalilämpötilassa ja korkeissa lämpötiloissa (kokeita ja rakenteellinen analyysi)
- levyillä jäykistettyjen teräsohutlevyrankojen kapasiteetti normaalilämpötilassa ja korkeissa lämpötiloissa (kokeita ja rakenteellinen analyysi)
- ohutlevyrankaseiniä ja -välipohjien sekä seinä-välipohjarakenteiden toiminta normaali-lämpötilassa ja korkeissa lämpötiloissa (kokeita ja rakenteellinen analyysi)

VTT osallistui suojaamattomien lyhyiden rankojen testaukseen normaalilämpötilassa ja korkeissa lämpötiloissa, levyillä jäykistettyjen ohutlevyrankojen testaukseen ja analysointiin korkeissa lämpötiloissa sekä seinien ja välipohjarakenteiden palonkestävyyskokeisiin. Seuraava esitys keskittyy tutkimuksen pääkohtiin painottuen VTT:llä tehtyyn työhön; tutkimuksen loppuraportti on lähteessä [1].

POLTTOKOKEET JA NIIDEN TULOKSET

Lyhyiden ohutlevyrankojen kokeet

Lyhyiden ohutlevyrankojen polttokokeilla haluttiin selvittää rankojen kriittinen lämpötila tietyllä kuormitusasteella, kun murtomekanismi olisi vääntönurjahdus. Tämän vuoksi aluksi tehtiin viidelle erilaiselle ohutlevyrangalle normaalilämpötilassa puristuskokeet, joiden perusteella määritettiin koekuormat polttokokeita varten. Lisäksi tehtiin materiaalien vetokokeet. Polttokokeita tehtiin kaikkiaan yhdeksän. C-150 rangoilla kuormitusaste oli 0,07, 0,2, 0,4 ja 0,6 muilla ainoastaan 0,4. Kuormitus oli keskeinen ja se pidettiin vakiona koko kokeen ajan. Lämpötilan nousunopeus oli 10 °C/min ja kokeiden aikana mitattiin rankojen lämpötilaa eri kohdista sekä puristumaa. Koekappaleet ja koetulokset on esitetty taulukossa 1. AWS- ja TC-poikkileikkausten uuma on rei'itetty.

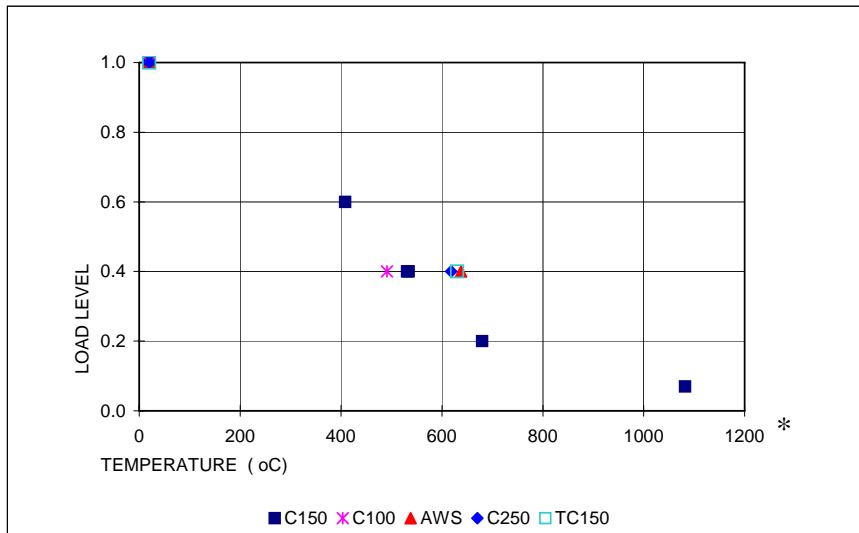
Taulukko 1. Lyhyiden rankojen polttokoetulokset.

Ranka	Pituus (mm)	Teräksen lujuus (MPa)	N _{Testfi} (kuorm.aste) (kN)	Max lämpötila (°C)	Koeaika (min)
Small; C 98-51/49-6/0.6 ^{L)}	600	280	3.3 (0.4)	491	32.8
Medium; C 150-57-13/1.2 ^{C)}	600	350	3.9 (0.07)	1082	94.4
	600	350	35.8 (0.6)	408	26.7
	600	350	11.9 (0.2)	680	53.0
	600	350	23.8 (0.4)	531	39.0
*	600	350	23.8 (0.4)	534	37.8
AWS 150/1.2 ^{R)}	1000	350	29.6 (0.4)	638	47.0
Large; C 250-80-21.5/2.5 ^{R)}	1000	350	78.2 (0.4)	618	43.7
TC 150/1.2 (Termoranka) ^{R)}	600	350	16.6 (0.4)	630	48.0

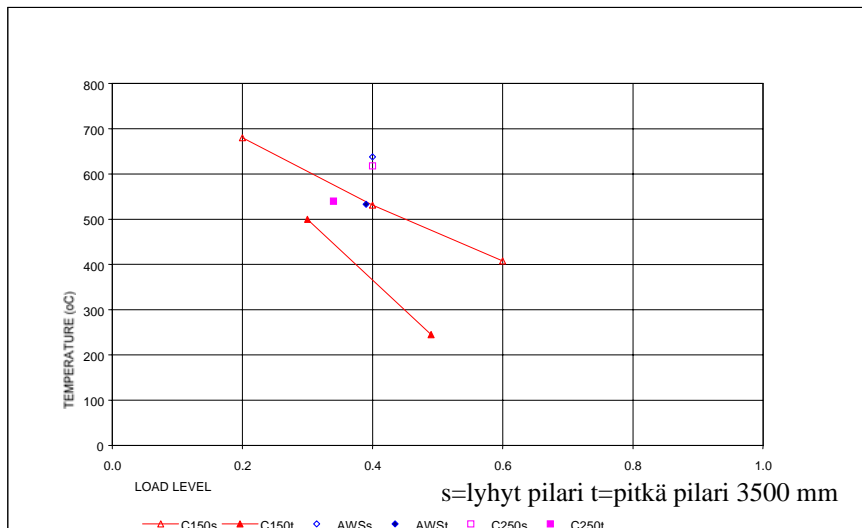
^{L)} Lafarge/Ranska ^{C)} Corus/UK ^{R)} Rautaruukki * uumassa pyöreä reikä

Kuvassa 1 on esitetty kuormitusasteen riippuvuus rangan maksimi lämpötilasta ja kuvassa 2 lyhyiden ja pitkien (l=3500 mm, kokeet tehty CTICM:ssä) rankojen max lämpötilan riippuvuus kuormitusasteesta. Pitkien rankojen kriittinen lämpötila oli 100 - 200 °C alhaisempi kuin lyhyiden rankojen kuormitusasteesta ja profiilityypistä riippuen.

CTICM ja SBI analysoivat koetulokset ANSYS ja ABAQUS -ohjelmilla ehdotettujen lujuuden vähennyskertoimien todentamiseksi. Pituuden lämpötilakertoimena käytettiin Eurocode 3 Part 1-2 mukaista arvoa. Analysoinnin perusteella kehitettiin yksinkertainen C-profiilien laskentamenetelmä, kun ranka on joka puolelta palolle alttiina.



Kuva 1. Kuormitusaste lämpötilan funktiona eri poikkileikkauksille.



Kuva 2. Max lämpötila kuormitusasteen funktiona lyhyillä ja pitkillä rangoilla.

Levyillä jäykistettyjen ohutlevyrankojen kokeet

Levyillä jäykistettyjen ohutlevyrankojen kokeilla haluttiin selvittää levyjen vaikutusta rangan kapasiteettiin. Normaalilämpötilassa levyt jäykistävät rangan molemmat laipat, mutta palotilanteessa tulen puoleisen levyn jäykistävä vaikutus pienenee vähitellen ja lopuksi mahdollisesti vain toinen laippa on jäykistetty. Levytyksestä ja sen kiinnityksistä sekä mahdollisesta ontelon eristyksestä riippuu, kuinka nopeasti levyn jäykistysvaikutus häviää ja miten rangan lämpötila nousee. Rangan lämpötilan nousunopeuteen ja lämpötilajakaumaan vaikuttaa myös itse rangan ominaisuudet; sen ainevahvuus, geometria ja mahdollinen rei'itys.

Levyjen vaikutusta kapasiteettiin tutkittiin 18 polttokokeessa neljällä aiemmin koetulla rankatyypillä: C-150, AWS-150, TC-150 ja C-250, joista C-150 rankaa pidettiin referenssityypinä. Koekappaleet olivat 1200 x 2800 mm² kokoisia ja ne koostuivat kahdesta

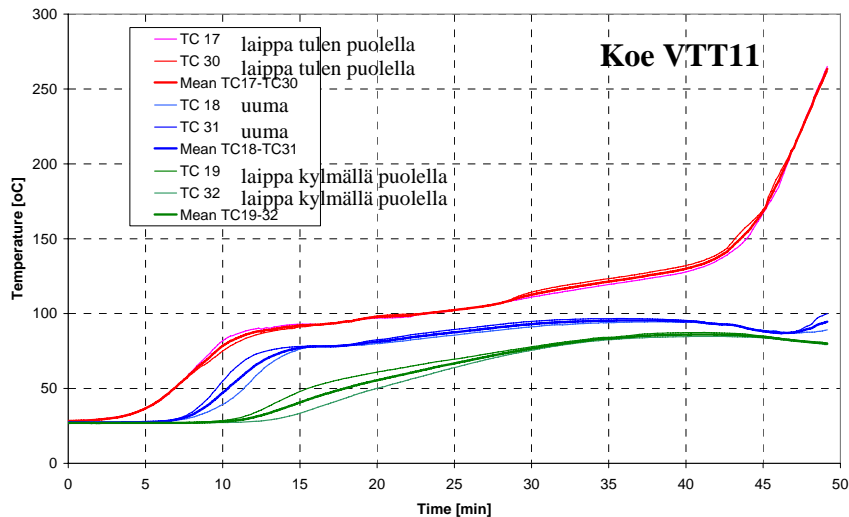
rangasta, joiden molemmin puolin oli kiinnitetty kaksinkertainen kipsilevytyks. Kipsilevyt olivat 12.5 mm paksuja palokipsilevyjä (F) tai 13 mm paksuja tavallisia kipsilevyjä (A). Osassa koekappaleista ontelossa oli kivivillaeriste. Kokeissa tutkittiin kuormitusasteen, epäkeskisyyden, eristeen, rei'ityksen, teräslevyn ja kipsilevytyypin vaikutusta. Palo-olosuhteet olivat standardin EN 1363-1 [3] (ISO 834-1 [4]) mukaiset. Koekappaleista mitattiin lämpötilojen lisäksi koekappaleen taipumia, puristumia ja kiertymä. Todellisen kuormitusasteen määrittämiseksi tehtiin polttokoekappaleita vastaavilla koekappaleilla kokeet myös normaalilämpötilassa (Corus). Yhteenvedo koekappaleista ja koetuloksista on esitetty taulukossa 2.

Kokeen aikana mitattu AWS-150 rangen keskikohdan lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 3. Jakauma on tyypillinen eristetyille rakenteille. AWS-150 ja TC-150 rangat olivat molemmat rei'itettyjä ja niiden lämpötilakehitys oli samanlainen. Rei'ittämättömän C-150 rangen tulenpuoleisen laipan lämpötilan nousu 40 min jälkeen oli hiukan hitaampaa kuin TC-150 rangalla, mutta muuten lämpötilakehitys oli samankaltainen. Poikkileikkauksen C-250 lämpötilat nousivat muita hitaammin.

Taulukko 2. Kipsilevyillä jäykistettyjen rankojen polttokoetulokset.

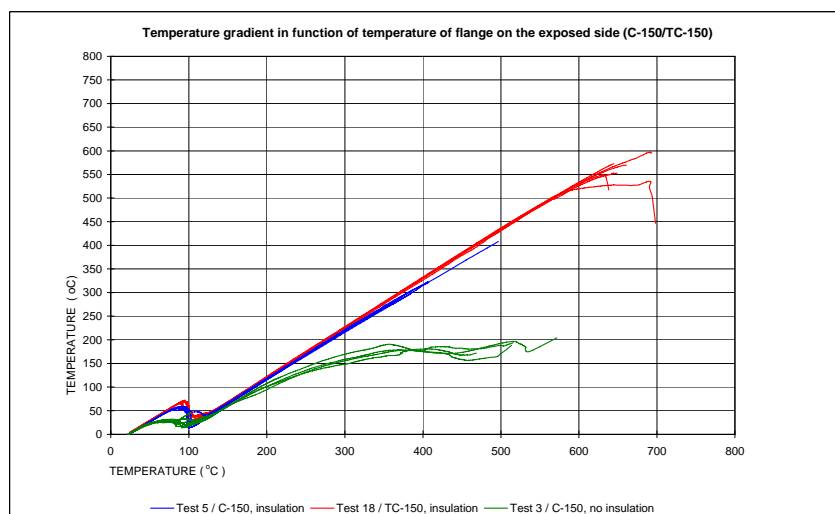
Koe no	Eriste/levytys	Kuorma/kuorm.aste/epäkesk.	Max lämpötila tulenpuolella	Lämpötilaero	Max pitenemä	Koeaika
		kN/-/-	(°C)	(°C)	(mm)	(min)
C-150						
1	ei/2xF ¹⁾	12/0.16/0	637	110	16.6	75
2	ei/2xF ¹⁾	36/0.48/0	429	221	4.4	69
3	ei/2xF ¹⁾	25/0.34/0	537	176	10.4	81
4	on/2xF ¹⁾	36/0.48/0	316	238	1.3	53
5	on/2xF ¹⁾	25/0.34/0	406	322	1.5	56
6	on/2xF ¹⁾	25/0.46/h/4	117	42	3.0	34
7	on/2xF ¹⁾ +teräslevy ³⁾	25/0.43/h/4	334	231	3.1	57
8	on/2xA ²⁾	25/0.46/h/4	285	209	2.1	49
17	on/2xF ¹⁾	25/0.46/h/4	222	136	1.2	48
AWS-150						
9	on/2xF ¹⁾	44/0.77/h/4	79	55	0.6	11
10	on/2xF ¹⁾	15/0.26/h/4	772	440	7.5	75
11	on/2xF ¹⁾	30/0.52/h/4	230	144	3.9	48
12	on/2xF ¹⁾	30/0.32/0	409	328	2.0	56
TC-150						
18	on/2xF ¹⁾	17/0.26 ⁴⁾ /0	672	584	0.6	74
C-250						
13	ei/2xF ¹⁾	78/0.35/0	631	165	13.1	105
14	on/2xF ¹⁾	117/0.52/0	667	575	0.4	83
15	on/2xF ¹⁾	78/0.35/0	759	668	1.9	84

¹⁾F=palokipsilevy ²⁾A=tavallinen kipsilevy ³⁾teräslevy=levy rangan ja kipsilevyn välissä tulen puolella ⁴⁾arvio



Kuva 3. AWS-150 rangan keskikohdan lämpötilajakauma.

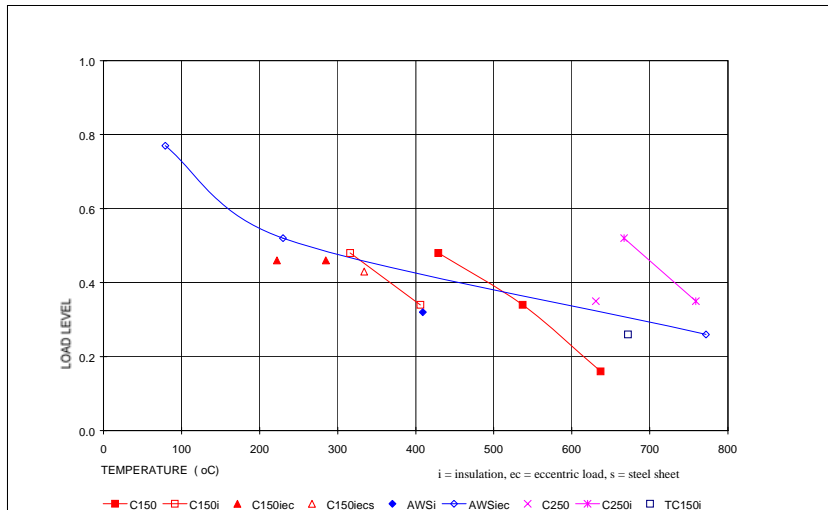
Kuvassa 4 on esitetty C-150 ja TC-150 rankojen laippojen välinen lämpötilaero tulen puoleisen laipan lämpötilan funktiona. Eristeellä on suurin vaikutus poikkileikkauksen lämpötilagradienttiin (Test 3 / Test 5) sen sijaan rei'ityksen vaikutus lämpötilaeroon on hyvin pieni (Test 5 / Test 18). Lisäksi lämpötilaero riippuu poikkileikkauksen dimensioista.



Kuva 4 Laippojen välinen lämpötilaero tulen puoleisen laipan lämpötilan funktiona.

Kuvassa 5 on esitetty eri poikkileikkausten kuormitusasteen riippuvuus murtolämpötilasta. Kuvasta näkyy myös epäkeskisyyden sekä eristeen vaikutus, joka on erilainen eri poikkileikkauksilla: eristämättömällä C-150 profiililla päästään korkeampiin kriittisiin lämpötiloihin kuin eristetyllä, C-250 ja C-100 profiileilla asia on päinvastoin.

Edellä esitettyjen kokeiden lisäksi CTICM tutki C-100 poikkileikkausta kaksoisrunkorakennetta ja rankojen päiden kiinnitystä, eri kipsilevytyypin vaikutusta sekä levytyksen kiinnittämistä vain tulen puolelta, tulenpuoleisen epäkeskisyyden vaikutusta, rankaan



Kuva 5. Kuormitusaste tulen puoleisen laipan murtolämpötilan funktiona.

aiheutuvia pakkovoimia, kun lämpölaajeneminen on estetty sekä luonnollista palorasitusta. Levyjen kiinnittäminen vain yhdeltä puolelta alentaa kriittistä lämpötilaa.

Palonkestävyyskokeet

Kahdelle eri seinärakenteelle ja välipohjarakenteelle tehtiin standardien EN 1363-1 [3] (ISO 834-1 [4]), EN 1365-1 [5] (ISO 834-4 [6]) and EN 1365-2 [7] (ISO 834-5 [8]) mukaiset palonkestävyyskokeet vertailun tekemiseksi yhdistetyn seinä-välipohja-rakenteen toimintaan.

Seinärakenteiden koko oli $b \times h = 3000 \times 2800 \text{ mm}^2$. Toisessa seinässä kantavana rakenteena oli C-150 k/k 600 mm ohutlevyrangat ja toisessa TC-150 k/k 600 mm. Seinien molemmin puolin oli kaksinkertainen kipsilevytyös, A+F. Termorankaseinässä oli lisäksi kivivilla. Molempia seiniä kuormitettiin epäkeskeisellä vakiokuormalla. Välipohjarakenteiden koko oli $b \times l = 2990 \times 5500 \text{ mm}^2$ ja jänneväli 5240 mm. Kantavana rakenteena oli C-250/2,5 k/k 600 mm ohutlevyrangat, joiden alapuolella oli kaksinkertainen kipsilevytyös, 2xF. Välipohjaa kuormitettiin kokeen aikana tasaisella kuormalla. Yhteenvedo seinä- ja välipohjarakenteista, koekuormista sekä koetuloksista on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Seinä- ja välipohjarakenteiden palonkestävyyskokeiden tulokset.

Ranka/ valmistaja	Eriste/ levytyös	Kuorma/ epäkesk.	Murto- aika	Lämpötila tuln puol.	Lämpö- tilaero	Pitenemä / taipuma
Seinä		(kN/mm)	(min)	(°C)	(°C)	(mm)
TC-150/1.2 ^{R)}	kivivilla/A+F ¹⁾	14/15 ²⁾	85.2	909	728	5.2
C-150/1.2 ^{C)}	ei/A+F ¹⁾	33/37.5 ³⁾	87.3	621	248	2.6
Välipohja		(kN/m ²)	(min)	(°C)	(°C)	(mm)
C-250/2.5 ^{R)}	lasivilla/2xF ⁴⁾	1.9	83.0 ²⁾	895	142	73.1
C-250/2.5 ^{C)}	ei/2xF ⁴⁾	4.1	67.5 ²⁾	945	81	39.3

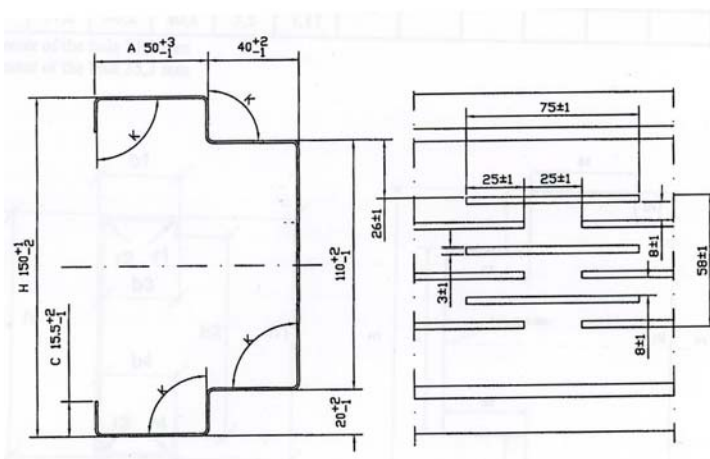
¹⁾tavallinen ja palokipsilevy ²⁾tulen puolella ³⁾tulen vastakkaisella puolella ⁴⁾2xpalokipsilevy ^{R)}Rautaruukki ^{C)}Corus

NUMEERINEN MALLINNUS

Projektin aikana mallinnettiin kaikkiaan 21 levyillä jäykistettyä ohutlevyrankakoetta numeerisesti korkeissa lämpötiloissa. VTT:llä polttokokeiden mallinnukseen käytettiin FE-ohjelmistoa ABAQUS/Standard [9] ja CTICM:llä ANSYS-ohjelmaa. Tämän lisäksi tehtiin palonkestoa käsittelevä laaja parametrinen tutkimus, jossa tarkasteltiin pilarin pituuden, kuormitusasteen, kuormituksen epäkeskisyyden ja lämpötilagradientin vaikutusta kestävyysasteeseen. AWS-profiilien osalta tutkimus tehtiin VTT:llä.

Esimerkkinä numeerisesta mallinnuksesta esitetään tässä Rautaruukin AWS-profiileilla tehdyn ohutlevyrankaseinän kokeen (VTT 11) mallinnustuloksia. Profiilin geometria on esitetty kuvassa 6. Rakenteen kahdesta samanlaisesta rangasta mallinnettiin vain toinen. Rangan pituus on 2800 mm ja seinämän nimellispaksuus 1.2 mm. Profiilin laippoihin oli ruuveilla kiinnitetty 2×12.5 mm paksut palokipsilevyt.

Rakenteelle kohdistettiin kokeessa n. 30 kN kuorma rankaa kohti, mikä vastaa kuormitusastetta 0.52. Kuormitus oli 37.5 mm epäkeskinen tulen vastakkaisella puolella. Korkein kokeen aikana mitattu teräslämpötila oli 246°C ja rakenteen murtuminen tapahtui 48.3 minuutin kuluttua kokeen alkamisesta.



Kuva 6. AWS-profiilin poikkileikkausmitat (mm).

Pilari mallinnettiin nivelpäisenä siten, että kummassakin päässä oli päätylevyt ja lisäksi 75 mm pitkä osuus, jonka jäykkyys oli 10^4 -kertainen normaaliin teräksen lujuuteen verrattuna. Näin pyrittiin välttämään numeeriset ongelmat pilarin päissä, joissa paikalliset jännitykset voivat nousta muuten hyvin suuriksi ja siten keskeyttää ajon ennen kuin pilarin globaali murtuminen tapahtuu. Mallinnuksessa käytetyt teräksen materiaaliarvot perustuivat projektin aikana korkeissa lämpötiloissa tehtyihin materiaalikokeisiin teräkselle S350GD+Z. Ainoastaan lämpöpitenehkertoimelle käytettiin EN 1993-1-2 mukaista arvoa.

Elementtityyppi oli lineaarinen 4-solmuinen kuorielementti S4R. Elementtien keskimääräinen sivumitta oli 12 mm, paitsi uuman rei'ityksen kohdalla, missä jouduttiin käyttämään pienempiä elementtejä (sivumitta 3 mm). Elementtien kokonaismäärä mallissa oli 18131 ja solmujen lukumäärä 20149. Mallinnuksessa käytettiin pilarin muodon alkuvirheenä lommahdusmuotoa, joka oli skaalattu siten, että suurin solmuniirtymä oli 1.0 mm.

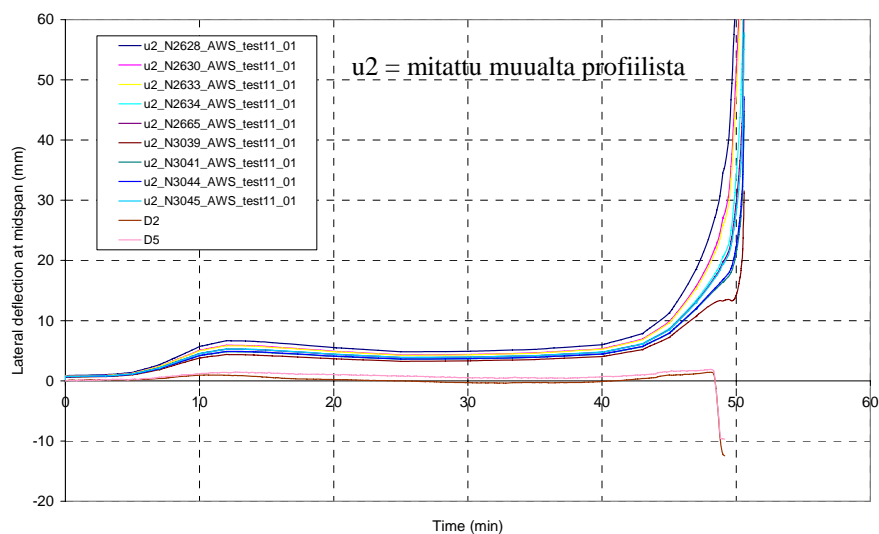
Kokeen aikana mitattiin teräksen lämpötiloja kolmelta eri korkeudelta profiilin molemmista laipoista ja uuman keskeltä. Mallinnuksessa käytettiin yksinkertaisuuden vuoksi vain kuvassa 3 esitettyjä keskitasolla mitattuja keskiarvolämpötiloja, jotka syötettiin malliin lähtötietoina siten, että uuman lämpötila muuttui bilineaarisesti laippojen välillä ja kaikki lämpötilat muuttuivat ajan suhteen paloittain lineaarisesti ajon aikana. Keskitason lämpötilat olivat hieman korkeampia kuin ylä- ja alapään lämpötilat.

Kuvissa 7 ja 8 esitetään vertailut koe- ja mallinnustulosten välillä. Kuvassa 7 näytetään pilarin keskikorkeudella mitattu seinän tasoa vastaan kohtisuora siirtymä ja kuvassa 8 pilarin kuormituspuheen pystysuora siirtymä. Kuvista nähdään, että mallin antama rakenteen kestävyysaika vastaa hyvin koetulosta. Taipuman arvo mallissa on koetulosta hieman suurempi, mutta aksiaalinen siirtymä on hyvin lähellä kokeessa mitattua käyrää.

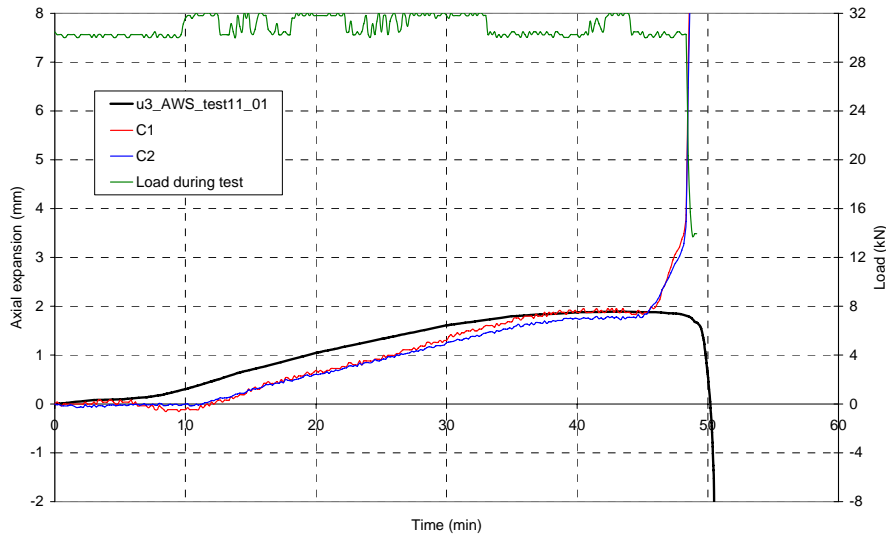
Samanlaisia tuloksia saatiin myös muilla analysoiduilla kokeilla paitsi keskeisesti kuormitetuilla seinillä, joiden rankojen lasketut taipumat kasvoivat paljon nopeammin kuin mitatut rankojen lämpötilan noustua yli 100 °C. Kaikkien analysoidujen koeseinien laskettujen ja kokeellisten palonkestoajojen vertailu on esitetty kuvassa 9. Huomattava on, että palonkestoajojen laskennassa on käytetty mitattuja lämpötiloja eli seinärakenteelle ei ole tehty termistä analyysia.

Projektin aikana luodut numeeriset mallit saatiin vastaamaan koetuloksia kohtalaisen hyvin, joissain tapauksissa erittäin hyvin. Johtuen todellisten rakenteiden tukiehtojen ja materiaaliominaisuuksien epälineaarisuudesta, rakenteiden poikkeamisesta nimellisarvoista (alkuvirheet ja -epäkeskisyydet) ja mallinnuksessa välttämättömistä yksinkertaistuksista (esim. kipsilevyjen vaikutuksen muuttumista lämpötilan funktiona ei ole nykyisissä malleissa otettu huomioon), on tarkan koe- ja laskentatulosten vastaavuuden saavuttaminen kuitenkin käytännössä mahdotonta.

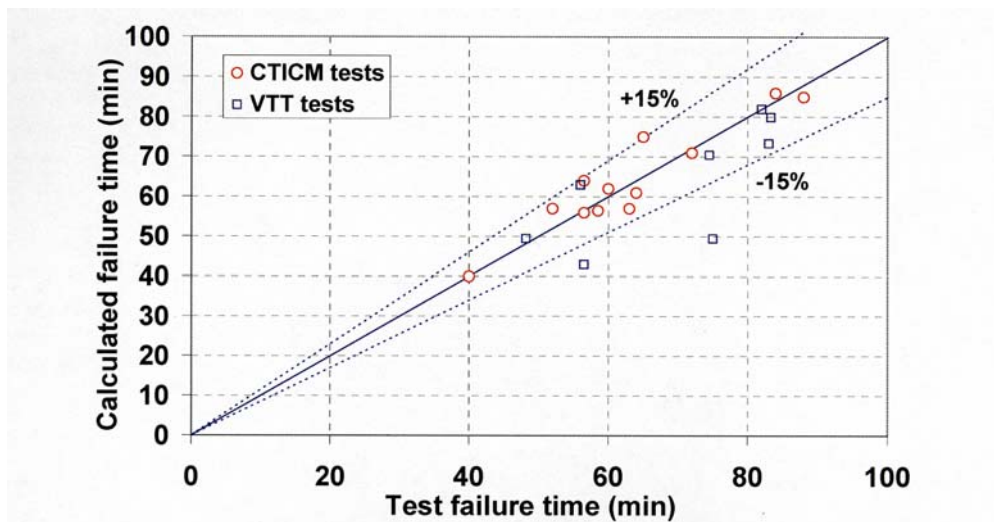
Tulosten perusteella voidaan todeta ainakin, että käytettyä mallinnusmenettelyä soveltaen voidaan suhteellisen hyvällä tarkkuudella ennustaa rakenteen palonkestävyysluokka, vaikka yksittäisissä siirtymissä tai tarkoissa palonkestävyysajoissa voi olla eroja koetuloksiin verrattuna. Joka tapauksessa on syytä olla varovainen tulkittaessa mallinnustuloksia, joiden palonkesto aika osuu lähelle palonkestoluokkien aikarajoja.



Kuva 7. Rangan keskikohdan taipumat kokeesta mitattuna D2 ja D5 ja mallilla laskettuna.

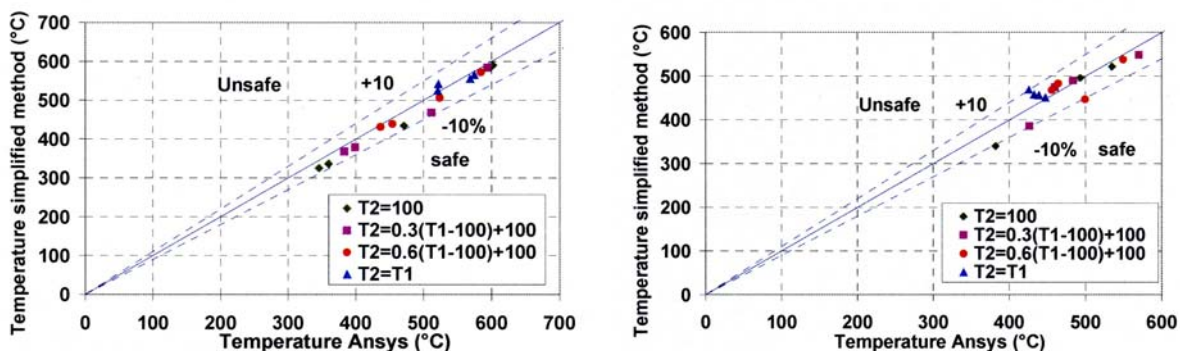


Kuva 8. Rangan kuormituspään pystysuora siirtymä kokeessa C1 ja C2 ja mallissa.



Kuva 9. Laskettujen ja kokeellisten palonkestoajojen vertailu.

Numeeristen simulointien ja parametrinen tutkimuksen perusteella kehitettiin yksinkertainen palonkestävyyden laskentamalli, jonka nurjahdusmalli vastaa Eurocode 3 mukaista normaalilämpötilan nurjahdusmallia ottaen huomioon lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet sekä rangan lämpenemisestä aiheutuvan taipuman. Malli soveltuu kylmämuovattujen C-profiilien mitoitukseen tapauksissa, joissa lämpötilagradientti on pieni. Menetelmä ei sovellu AWS-profiilille. Kuvassa 10 on esitetty C-150 ja C-250 profiileille yksinkertaisella ja numeerisella menetelmällä laskettujen kriittisten lämpötilojen vertailu.



a) keskeisesti kuormitettu C-150

b) epäkeskeisesti kuormitettu C-250

Kuva 10. Laskentamenetelmien vertailu (T_1 ja T_2 laippojen lämpötilat).

KIITOKSET

Työn suomalaisena rahoittajana on ollut Rautaruukki Oyj.

LÄHDELUETTELO

- [1] Final Report of ECSC Research Project N^o 7210 PR 254, Calculation rules of lightweight steel sections in fire situation including natural fires, 2004.
- [2] ENV 1993-1-3. 1996. Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.3: General rules - Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheetings. Brussels: European Committee for Standardization (Document CEN/TC250/SC3 N602E). 128 s.
- [3] SFS-EN 1363-1:1999. Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 49 s.
- [4] ISO 834-1:1999, Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International Organization for Standardization. 24 s.
- [5] SFS-EN 1365-1:1999, Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 1: Walls. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 24 s.
- [6] ISO 834-4:2000, Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 4: Specific requirements for loadbearing vertical separating elements. 7 s.
- [7] SFS-EN 1365–2:1999, Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 2: Floors and roofs, Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 25 s.
- [8] ISO 834–5:2000, Fire resistance tests- Elements of building construction - Part 5: Specific requirements for loadbearing horizontal separating elements. 7 s.
- [9] ABAQUS/Standard Version 6.3 User's Manual, Hibbit, Karlson and Sorensen, U.S.A., 2002.