

AVARUUSRISTIKOIDEN PALOTEKNINEN MITOITUS

Dipl.ins. Otso Cronvall

Johdanto

Sadoista sauvoista yleensä koostuvien ja useaan kertaan staattisesti määräämättömien avaruusristikoiden palotekninen mitoitus on monipuolinen ja haastava tehtävä. Nykyiset kehittyneet laskentamenetelmät sekä tehokkaat ja edulliset mikrotietokoneet mahdollistavat tämän mitoitustehtävän suorittamisen käytännön rakennesuunnittelun puitteissa. Teräsrakenteiden palomitoituksen osalta suomalaiset normit (SRMK) ja eurooppalaiset normit (Eurocode) poikkeavat jonkin verran toisistaan. Suomessa kummankin normin käyttäminen on sallittua. Valitussa normissa on kuitenkin pysyttävä, jolloin SRMK:n ja Eurocoden yhdistetty käyttö mitoituksessa ei ole sallittua. Kyseisten normien välisistä eroavaisuuksista johtuen voi olla syytä tarkastella kumman normin käyttö mitoituksessa johtaa pienempään materiaali- ja palosuojausainemenekkiin, ja sitä kautta edullisempaan rakenteeseen.

Avaruusristikoiden ominaisuuksista

Avaruusristikot ovat saavuttaneet maailmalla paljon suosiota tehokkuutensa, suuren kapasiteettinsa, joustavuutensa, miellyttävän ulkonäkönsä sekä turvallisuutensa ansiosta. Tyypillisesti avaruusristikot toimivat kantavina kattorakenteina pitkillä jänneväleillä, aina 100 m pituisiin jänteisiin saakka. Katettavan tilan pohjaratkaisun geometria voi olla lähes mielivaltainen, ja avaruusristikon voi asettaa vaakatasoon nähden vinosti tai samansuuntaisesti. Avaruusristikot koostuvat tyypillisesti suuresta määrästä yksinkertaisia, standardikokoisia, esivalmistettuja elementtejä, jotka yhdistettyinä muodostavat kevyen, mutta hyvin jäykän kolmiulotteisen rakenteen.

Yleensä avaruusristikot ovat teräsrakenteisia, ristikkosauvojen poikkileikkaukset voivat olla avoimia tai suljettuja, ja erilaisia mahdollisia liitosratkaisuja on useita. Liitokset ovat keskeinen ongelma-alue avaruusristikoissa, ja liitosratkaisun valinta on suuresti riippuvainen rasitetuimmille sauvoille valituista poikkileikkauksista. Avaruusristikot voidaan tukea teräs- tai betonipilareihin, kantaviin seiniin tai jatkuviin reunapalkkeihin. Tuentakohtina voi olla avaruusristikon ylä- tai alapaarretason solmut. Usein tukisolmuina ovat reunasolmut. Teräksiset ristikkosauvat voidaan pinnoittaa eri tavoin. Ruosteenestoa varten ne voidaan sinkittää ja palotilanteen varalta ne voidaan suojata palosuojamaalilla. Pinnoittaminen palosuojamaalilla on ainoa kyseeseen tuleva palosuojauskeino silloin, kun avaruusristikko halutaan jättää näkyviin.

Yksi tärkeimmistä avaruusristikoiden sovelluksista on kaksipaarretasoiset avaruusristikot. Nämä rakenteet koostuvat kahdesta vaakasuuntaisesta taseoristikosta, ja näitä yhdistävistä vino- tai vino- ja pystysuuntaisista sauvoista. Vaakaristikoita kutsutaan ylä- ja

alapaarteeksi, ja niitä yhdistäviä sauvoja diagonaaleiksi. Suomessa toteutettuja kohteita, joissa kantavana kattorakenteena on kaksipaarretasoinen avaruusristikko, ovat muun muassa Helsinki-Vantaan lentokentän kotimaan terminaali ja uusi keskiterminaali.

Suuressa tilassa tapahtuvan palon mallintamisesta

Pienehkön huonetilan, kuten asuinhuoneiston olohuone, palossa lieskahdus on yleinen ilmiö. Suuren tilan palossa, jossa palokuormien väliset etäisyydet ovat yleensä suurempia, lieskahdus on huomattavasti epätodennäköisempi ilmiö. Palotilan koko on monesta syystä ratkaiseva ominaisuus. Palopatsaan kuumat kaasut leviävät katon alapuolella säteittäisesti palopatsaaseen nähden, ja suurissa tiloissa kaasut hajoavat ja viilenevät helposti. Tilan vapaan korkeuden ollessa suuri, on etäisyys palamisprosessista kuumaan kaasukerrokseen myös suuri. Tämä aiheuttaa palopatsaan kaasujen viilenemisen niiden noustessa kohden kattoa. Lattiaan kohdistuvan säteilyn määrä kuumasta kaasukerroksesta on myös vähäisempi, johtuen kaasukerroksen suuremmasta etäisyydestä palokuormiin. Suurissa tiloissa palon eteneminen on selvästi hitaampaa kuin pienissä tiloissa. Tästä johtuen palon sammutus (automaattiset sprinklerit, palokunta, yms.) ehtii yleensä alkaa ennen lieskahduksen ja täyden palon vaiheen saavuttamista /1/.

Yleensä avaruusristikot sijaitsevat suurissa tiloissa. Tavallisimmat suurien tilojen palotyypit ovat pistemäinen palo ja yleinen palo. Palokuorma on suuressa tilassa usein epätasaisesti jakaantunut. Standardipalokäyrän ja huonepalomallin soveltaminen suuressa tilassa tapahtuvan palon mallintamiseen johtaa lähes aina rakenteen ja palosuojauksen ylimitoitukseen. Suurien tilojen palojen mallinnuksessa on syytä käyttää todelliseen palonkehitykseen perustuvaa palomallia. Tällöin palon mallinnus voidaan suorittaa vyöhykemallilla, kenttämallilla tai dynaamisilla laskentakaavoilla. Vyöhykemallit eivät sovellu sen kokoluokan tiloissa, joissa avaruusristikot yleensä sijaitsevat, tapahtuvien palojen mallintamiseen. Virtausmekaniikkaan perustuvat kenttämallit ovat palomallien kehittynein, monimutkaisin ja suuritöisin haara. Kenttämallien soveltaminen käytännössä on mahdollista numeerisiin menetelmiin perustuvilla laskentaohjelmilla /2/. Eräät korrelaatioon perustuvat dynaamiset laskentakaavat soveltuvat tietyn rajoituksen suuressa tilassa tapahtuvan palon mallintamiseen.

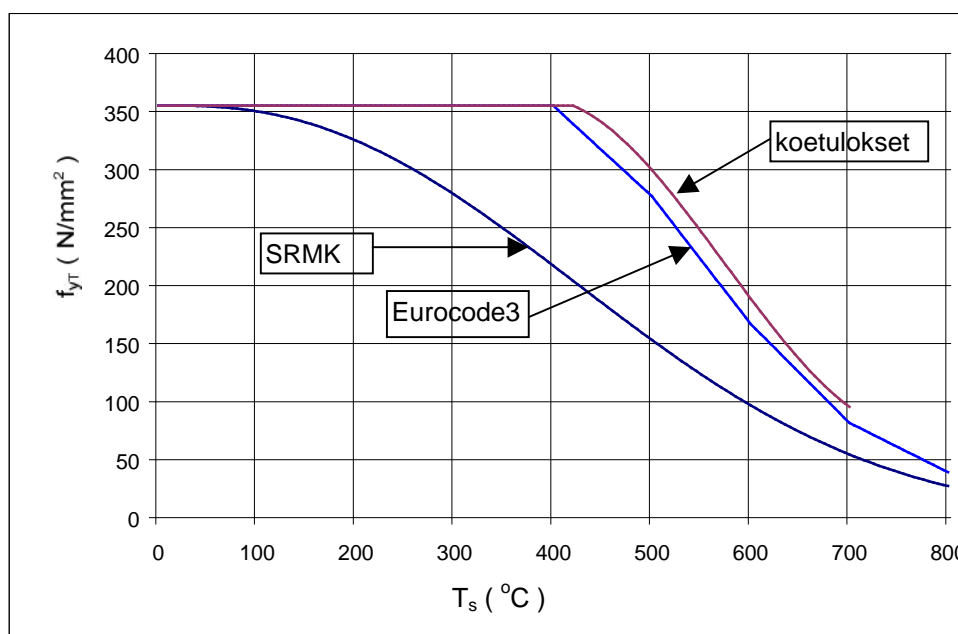
Toistaiseksi ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä palomallinnusmenetelmää geometrialtaan mielivaltaisessa tilassa tapahtuvalle palolle.

Teräksen materiaaliominaisuuksista

Yleensä teräksen katsotaan mallinnettaessa olevan luonteeltaan homogeeninen ja isotrooppinen materiaali. Kun vallitsevat jännitykset jäävät myötöehdon määrittelemän myötörajan alapuolelle, käyttäytyy teräs kimmoisesti Hooken lain mukaan. Myötörajan ylittymisen jälkeen teräksen konstitutiivista yhteyttä ei voi enää ilmaista käyttämällä vakioita, vaan kyseinen suure on muuttunut riippuvaiseksi muun muassa siirtymistä. Lisäksi teräksen konstitutiivinen yhteys on riippuvainen lämpötilasta /3/.

Kantavien teräsrakenteiden palonkestävyys riippuu ratkaisevasti teräksen mekaanisista ja termisistä ominaisuuksista palotilannetta vastaavissa lämpötiloissa. Teräksen myötölujuus ja kimmokerroin ovat käyttöolosuhteiden lämpötiloissa (-40...+80 °C) lähes ajasta ja lämpötilasta riippumattomia /4/. Lämpötilan noustessa myötölujuus ja kimmokerroin saavat pienempiä arvoja. Lähes kaikki teräksen ominaisuudet ovat lämpötilariippuvia.

Eurocode 3 osan 1-2 /5/ määritelmät rakenneteräksen lämpötilasta riippuville materiaaliominaisuuksille vastaavat paremmin rakenneteräksen todellisia materiaaliominaisuuksia kuin SRMK:n osan B7 /6/ määritelmät. Lämpötilan kohotessa rakenneteräksen myötölujuus heikkenee Eurocode 3 osassa 1-2 /5/ hitaammin kuin SRMK:n osassa B7 /6/, katso kuva 1. Myötölujuuden lisäksi rakenneteräksen kimmokerroin, liukukerroin, lämmönjohtavuus, ominaislämpö ja lämpöpiteneminen ovat molempien normiosien mukaan lämpötilasta riippuvia materiaaliominaisuuksia.



Kuva 1 SRMK:n osan B7 /6/, Eurocode 3 osan 1-2 /5/ ja transienttikokeiden tulosten /7/ mukaisten materiaalimallien myötölujuuksien vertailu rakenneteräkselle S355.

Avaruusristikoiden analysointi elementtimenetelmällä

Elementtimenetelmässä (FEM) avaruusristikkoa kuvaava jatkuva malli korvataan mallilla, joka koostuu äärellisestä määrästä äärellisen kokoisia elementtejä, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteissä. Tasapaino- ja yhteensopivuusehtojen huomioonottaminen tuottaa äärellisen määrän algebrallisia yhtälöitä. Näin konstruoidulla yksinkertaisemmalla, korvaavalla mallilla on äärellinen määrä vapausasteita (sallittuja siirtymätiloja). Kyseiset algebralliset yhtälöt, jotka yleensä ratkaistaan matriisimuotoisesti, voidaan muodostaa käyttäen

esimerkiksi siirtymämenetelmää (stiffness method) tai voimamenetelmää (flexibility method) /8, 9/.

Avaruusristikon epälinearisessa FEM-analyysissä on huomioitava sekä geometrisen että materiaalisen epälinearisuuden aiheuttamat vaikutukset. Geometrisilla virheellisyyksillä, kuten ristikkosauvojen alkukäyryydellä ja kuormituksen epäkeskisyydellä, on taipumus vahvistaa epälineaarista käyttäytymistä /3/.

Avaruusristikon palotekninen FEM-analyysi on syytä suorittaa jollain askelittain etenevällä vaiheittaisella ratkaisumenetelmällä. Kyseisten menetelmien peruslähestymistapana on olettaa ratkaisu tunnetuksi ajanhetkellä t , jolloin tehtävänä on etsiä ratkaisu ajanhetkelle $t+\Delta t$, missä Δt on sopivasti valittu aikainkrementti /3/.

Mikäli avaruusristikon liitostyyppin jäykkyyttä (momentin ja kiertymän välistä yhteyttä) ei tunneta riittävän hyvin, oletetaan liitosten käyttäytyvän nivelen tavoin. Useimmiten liitokset mallinnetaankin nivelöityinä. Todellisuudessa liitokset eivät koskaan ole täysin jäykkiä tai nivelöityjä, vaan äärellisen jäykkiä.

Diplomityössä /10/ tarkasteltavien avaruusristikoiden analyysit suoritettiin elementtimenetelmään perustuvalla laskentaohjelmalla nimeltään NISA. Rakennemallit koottiin yleisistä kolmiulotteisista palkkielementeistä, joilla on veto- ja taivutusjäykkyys.

Kaikkien tutkittujen avaruusristikoiden /10/, jotka ovat kaksipaarretasoisia, tyyppi on Sirius ja pohjaratkaisun mitat ovat $40 \times 40 \text{ m}^2$. Rakennekorkeus on 2.0 tai 2.5 m. Ristikoiden materiaaliksi valittiin rakenneteräs S355 ja ristikkoprofiilit ovat neliöpoikkileikkauksisia putkipalkkeja. Kaikki ristikot tuettiin yläpaarteiden reunasolmuista. Kuormituksena oli lämpökuorman lisäksi ristikon ja kattorakenteen omapainot sekä lumikuorma. Kattorakenteen omapaino ja lumikuorma jakaantuivat tasaisesti yläpaarteiden sauvoille. Sovellettu myötöehto oli von Misesin myötöehto. Ne rakenteelliset ominaisuudet tai muut tekijät, joiden vaikutusta avaruusristikoiden käyttäytymiseen palorasitustilanteen analyyseissä tutkittiin, olivat ristikon rakennekorkeus, materiaalimalli, sauvaprofiilien poikkileikkausegeometria, liitosten jäykkyys, lämpölaajenemisen rajoittaminen ja palosuojauksen määrä.

Diplomityössä /10/ tutkitut palotapaukset olivat tasaisen lämpötilajakauman aiheuttava lammikkopalo lentokonehangaarissa ja epätasaisen lämpötilajakauman aiheuttava henkilöauton palo avoimessa pysäköintilaitoksessa. Palotilan ilman lämpötilajakaumat ja liekin korkeus laskettiin Heskestadin ja Alpertin korrelaatioon perustuvilla kaavoilla. Palosuojamateriaaliksi valittiin palosuojamaali.

Palorasitustilanteen tarkasteluissa /10/ laskentamalleille tehtiin epälineaarinen staattinen FEM-analyysi, jolloin sovellettiin askelittain etenevän Lagrangen ratkaisumenetelmän ja Newton-Raphson iteroinnin yhdistelmää. Epätasaisen lämpökuorman aiheuttama avaruusristikon epätasainen lämpötilan nousu selvitettiin epälineaarisen lämmön siirtymisen FEM-analyysin kautta. Mitoituskriteerinä oli sortumisrajatila eli avaruusristikon kantokyvyn menetys.

Diplomityön /10/ laskenta-analyysien tuloksista

Eurooppalaisissa normeissa määritellyn ja transienttikokeiden tulosten perusteella määritellyn materiaalimallin omaavien avaruusristikoiden palonkestävyys oli parempi kuin suomalaisissa normeissa määritellyn materiaalimallin omaavien avaruusristikoiden. Alustavasta mitoituksista saaduilla profiileilla ja ylimitoitettujen yläpaarten profiileilla varustettujen avaruusristikoiden palonkestävyys oli parempi kuin rakennepainon mukaan optimoiduilla profiileilla varustettujen avaruusristikoiden. Tutkituissa puitteissa rakennekorkeudella ei ollut merkittävää vaikutusta avaruusristikoiden palonkestävyyteen. Jäykällä liitoksilla varustettujen avaruusristikoiden palonkestävyys oli huomattavasti parempi kuin nivelöidyillä liitoksilla varustettujen avaruusristikoiden. Kun avaruusristikon lämpölaajeneminen oli estetty, jäi kriittinen lämpötila muista ominaisuuksista riippumatta aina hyvin alhaiseksi. Alhaisimmat laskentamallien kriittiset lämpötilat olivat hieman alle 100 °C, ja korkeimmat kriittiset lämpötilat olivat suurempia kuin 600 °C.

Ristikosauvojen rajatilat olivat nurjahdus, vetomyötö tai puristetun ja taivutetun sauvan kestävyuden ylittyminen, liitosten kestävyyttä ei tutkittu. Laskentamallien tyypillinen sortumismekanismi oli ketjureaktion kaltainen yläpaarten sauvojen rajatilaan joutuminen. Hieman ennen kantokyvyn menetystä ristikon taipuma aina kasvoi pienellä kuormituksen lisäyksellä huomattavasti.

Palomitoitusvaatimusten täyttämiseksi sauvaprofiilien ylimitoittaminen ja rakenteen pinnoittaminen palosuojamaalilla osoittautuivat joissain tapauksissa vaihtoehtoisiksi ratkaisuksiksi.

Palomitoitusmenetelmä avaruusristikoille

Hyvin suunniteltu avaruusristikko säilyttää yleensä kantokykynsä vaikka yksi tai muutama sauva saavuttaisi rajatilan. Avaruusristikolle kohdistettavat palotekniset vaatimukset ja samalla palosuojauksen tarve määräytyvät tapauskohtaisesti, muun muassa palo-osaston geometrian, käyttötarkoituksen ja mahdollisen sammutuslaitoksen perusteella.

Avaruusristikkoa kuvaavalle rakennemallille tehdään joukko epälineaarisia FEM-analyyssejä, joiden tuloksista saadaan rakennemallin kriittiset lämpötilat sekä ristikkosauvojen stabiiliuden menetys- ja taipumahistoriat eri kuormitustapauksille. Jos rakennemallin kriittinen lämpötila ja/tai suurin taipuma ei täytä voimassa olevien normien mukaisia vaatimuksia, rakennetta on vahvistettava, jonka jälkeen laskentaprosessi suoritetaan uudestaan. Kuvassa 2 on kaaviomuotoinen esitys avaruusristikon paloteknisestä mitoituksista, ja mitoituksen keskeisistä osavaiheista.

(Kuva 9.6/s. 171, $h=100=20*5$)

Kuva 2 Avaruusristikon paloteknistä mitoitusta ja keskeisiä vaiheita kuvaava kaavio. T_{kriitt} on kriittinen lämpötila, a_{max} on suurin taipuma, $T_{\text{sall,max}}$ on suurin sallittu lämpötila ja $a_{\text{sall,max}}$ on suurin sallittu taipuma /10/.

Yhteenveto

Lähtö- ja tulostietojen sekä yksittäisten laskutoimitusten suuren määrän takia avaruusristikoiden laskenta-analyyysien suorittaminen johonkin numeeriseen menetelmään perustuvalla laskentaohjelmalla on välttämätöntä. Yleensä käytetään FE-menetelmään perustuvia laskentaohjelmia. Tapauskohtaisuudesta ja avaruusristikoiden sijaintitilojen yleensä suuresta koosta johtuen on lämpökuormituksen selvittämiseksi syytä käyttää todelliseen palonkehitykseen perustuvaa palomallia.

Mikrotietokonetta ja sopivaa kaupallista FEM-ohjelmaa käyttäen epälineaariseen laskenta-analyysiin perustuva avaruusristikon palotekninen mitoitus voidaan tehdä suhteellisen vähin kustannuksin ja kohtuullisessa ajassa. Avaruusristikon tarkka palotekninen mitoitus maksaa itsensä moninkertaisesti takaisin, jos mitoitustuloksen perusteella rakenteen kallis palosuojaaminen osoittautuu osittain tai kokonaan tarpeettomaksi.

Lähdeluettelo

- 1 Alpert, R., L.&Ward, E., J. Evaluation of Unsprinklered Fire Hazards. Fire Safety Journal 7(1984). s. 127-143.
- 2 Beyler, C.&DiNenno, P., J. Introduction to Fire Modeling. In: NFPA Fire Protection Handbook. U.S.A 1997, National Fire Protection Association. s. 11-39 – 11-51.
- 3 Bathe, K. Finite element procedures in engineering analysis. 1982, Prentice-Hall, Inc. 725 s.

- 4 Mäkeläinen, P. Palotekninen mitoitus. In: RIL 167-1 Teräsrakenteet I. Helsinki 1988, Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL. s. 333-369.
- 5 SFS-ENV 1993-1-2: 1995. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus. Helsinki 1996, Suomen standardoimisliitto. 77 s.
- 6 Teräsrakenteet, Ohjeet 1996. Helsinki 1996, Ympäristöministeriö, Suomen rakentamismääräyskokoelma B7. 46+5 s.
- 7 Outinen, J., Kesti, J. & Mäkeläinen, P. Ohutlevyrakenneteräksen S350GD+Z ja rakeneteräksen S355 palotekniset materiaalmallit. Rakenteiden mekaniikka 28(1995)4. s.3-28.
- 8 Kouhia, R. & Tuomala, M. Rakenteiden Mekaniikan Numeeriset Menetelmät. Luentomoniste, 1997. 229+31 s.
- 9 Butterworth, J., W. Analysis of Double-Layer Grids. In: Makowski, Z., S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. London 1981, Applied Science Publishers. s. 57-92.
- 10 Cronvall, O. Kaksipaarretasoisten teräksisten avaruusristikoiden palotekninen mitoitus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Espoo 2000. 195+34 s.

Otso Cronvall, dipl.ins.

Finnmap Consulting Oy