

YDINVOIMALAITOSRAKENTEIDEN VAURIOTODENNÄKÖISYYTEEN PERUSTUVAT MITOITUSMENETELMÄT

Pentti Varpasuo

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 10
No. 3 1977 s. 18...22.

YHTEENVETO: Artikkelissa käsitellään ydinvoimalaitosten rakenteiden vaurioitumistodennäköisyyttä ja normeissa sen ohjearvoksi asetettuja lukuarvoja. Edelleen esitetään vaurioitumistodennäköisyyteen perustuvan mitoitusmenetelmän yleinen periaate, jonka sovellutusesimerkkinä on käsitelty aksiaalisesti kuormitettua suoraa sauvaa. Saatua tulosta on verrattu murtotilamenetelmän mukaisilla varmuuskertoimilla saatuun tulokseen.

JOHDANTO

Nykyaikaisen filosofisen perustan ydinvoimalaitosrakenteiden vaurioitten merkityksen arvioinnissa muodostaa hyväksyttävän vaurioriskin käsite. Se määritellään seuraavasti: Vaurioriski on yhtä kuin vaurion esiintymistodennäköisyyden ja vaurion seuraamusten tulo.

Vaurion esiintymistodennäköisyyden määrittämiseksi erilaisille ydinvoimalaitosprosessissa esiintyville hypoteettisille tilanteille on viime vuosien kuluessa omistettu suuri määrä tutkimustyötä. Tämän tutkimustyön tuloksena on päädytty käsitykseen, että suunnittelun perustana olevan perussonnettomuustilanteen esiintymistodennäköisyys on tarkoituksenmukaisella rakenne- ja komponenttiratkaisujen valinnalla saatava yhtä suureksi tai pienemmäksi kuin 10^{-7} vuotta kohti. Vaikeampi tehtävä sen sijaan on hyväksyttävän vaurion seuraamusten vakavuustason määrittäminen ja voidaankin sanoa, että tämä riippuu niin olennaisesti eri maissa ja eri alueilla vallitsevista olosuhteista, että tuskin siihen mitään yhtenäistä näkemystä lähitulevaisuudessa muodostuu. Esimerkkinä voidaan todeta, että eri kulttuureissa suhtaudutaan ihmishenkien menetykseen kovin eri tavoin.

VAURIOTODENNÄKÖISYYDEN ARVIOINTI ERILAISISSA ÄÄRIMMÄISISSÄ KUORMITUSTILANTEISSA

Ydinvoimalaitosten rakennesuunnittelussa tutkitaan yleensä ainakin seuraavat äärimmäiset kuormitustilanteet vauriotodennäköisyyden arvioimista varten.

- maanjäristystilanne
- tornadotuuli- tai ääritulvatilanne

- missiilikuormitustilanne
- lentokoneen törmäyskuormatilanne
- jäähdytteenmenetysonnettomuustilanne.

Arvioitaessa jonkin ydinvoimalaitosrakenteen kokonaisvauriotodennäköisyyttä voidaan esim. jäähdytteenmenetysonnettomuustilannetta ajatellen tutkia erään tapahtumaketjun esiintymistodennäköisyyttä. Tapahtumaketjun eri osaset voidaan yksilöidä eri tavoin. Eräs mahdollinen tapa esittää kokonaisvauriotodennäköisyys $P(F)$ on seuraava:

$$P(F) = P(F/O) \times P(O/S) \times P(S/I) \times P(I/A) \times P(A) \quad (1)$$

jossa

- $P(A)$ on jäähdytteenmenetysonnettomuuden esiintymistodennäköisyys
 $P(I/A)$ on todennäköisyys sille, että rakenteeseen aiheutuu tietty kuormitusintensiteetti, tiettyä jäähdytteen purkautumisarvoa vastaten.
 $P(S/I)$ on todennäköisyys sille, että tietty rakenteen siirtymätila saavutetaan, kun kuormitusintensiteetti on annettu.
 $P(O/S)$ on todennäköisyys sille, että rakenteeseen syntyy jännityshuippu, kun rakenne on saavuttanut annetun siirtymätilan.
 $P(F/O)$ on todennäköisyys sille, että rakenteeseen syntyy merkittävä vaurio, kun siinä esiintyy annettu jännityshuippu.

Edellä esitetyn ketjun jokaiseen askeleeseen liittyy epävarmuustekijöitä ja yleensä joka askeleella tehdään eräitä konservatiivisia oletuksia näiden epävarmuustekijöiden merkityksen eliminoimiseksi.

Vauriotodennäköisyyden täydellinen analyysi edellyttäisi yhdistetyn todennäköisyysjakautumafunktion muodostamista, joka ottaisi huomioon kaikki nämä epävarmuustekijät ja lisäksi ketjun eri askeleiden välisen mahdollisen keskinäisen riippuvuuden.

Maanjäristyskuormitustilanteella voidaan ylläoleva ketju edelleen yksinkertaistaa seuraavaan muotoon:

Kokonaisvaurio-	Systeemin vaurio-	Jännityshuipun	Maanjäristyskuorman
vauriotoden-	= vauriotoden-	x esiintymistoden-	x esiintymistodennä-
näköisyys	näköisyys	näköisyys	köisyys

(2)

Maanjäristyskuorman esiintymistodennäköisyys antaa arvion siitä, milloin suunnittelumaanjäristyskuorma saavutetaan tai ylitetään. Jännityshuipun esiintymistodennäköisyys kuvaa satunnaisuutta niissä oletuksissa, joiden perusteella tietystä maanjäristysintensiteetistä määrätään rakenteen toiminta ajan funktiona. Systeemin vauriotodennäköisyys esittää tosiseikkaa, ettei tietyn ylijännityksen esiintyminen välttämättä edellytä, että rakenteeseen syntyy vaurio ja että useiden laitteiden on vaurioituttava ennen kuin merkittäviä seuraamuksia esiintyy.

Yhdysvalloissa /1/ on yhtälössä (2) esiintyvien kolmen eri osatekijän vaikutusta arvioitu seuraavasti: Maanjäristyskuorman esiintymistodennäköisyys: Arvioidaan, että vuotuinen todennäköisyys suunnittelumaanjäristyskuorman ylilylykselle on 10^{-6} :sta 10^{-8} :saan. Jännityshuipun esiintymistodennäköisyys:

Arvioidaan olevan 10^{-4} :sta 10^{-5} :teen/vuodessa, jolloin laitekomponentit sijoittuvat vaihteluvälin alapäähän. Systeemin vauriotodennäköisyys: WASH 1400 /2/ raportin mukaan riskin on arvioitu olevan 10^{-1} :stä 10^{-2} :teen.

Kaikissa tapauksissa ei olla välttämättä varmalla puolella, jos yksinkertaisesti kerrotaan kolme osatodennäköisyyttä keskenään, koska eri osatekijät saattavat olla riippuvuussuhteessa keskenään. Kuitenkin voidaan arvioida, jopa ottamalla erittäin konservatiivinen näkökanta, että maanjäristyskuorman tapauksessa kokonaisvauriotodennäköisyys on pienempi kuin 10^{-8} laitosta ja vuotta kohti /3/.

VARMUUSKRITEERIT JA TODENNÄKÖISYYSLASKENTAAN PERUSTUVAT MITOITUSMENETELMÄT

Rakenteen vauriotodennäköisyyden selvittämiseksi yksityiskohdittain on määriteltävä rakenteen käyttäytymistä kuvaavat kaksi tärkeintä muuttujaa: lujuus ja rasitus. Rasituksella tarkoitetaan vauriota aiheuttavaa muuttujaa kuten jännitystä, muodonmuutosta, voimaa tai momenttia ja lujuudella rakenteen rasituksen kantokapasiteettia erilaisissa rasitustilanteissa.

Mikäli lujuus L ja rasitus R voitaisiin määrittää eksaktisti, voitaisiin varmuuskriteeri kirjoittaa seuraavaan muotoon

$$L \geq R \quad (3)$$

Suunniteltaessa rakenteita todennäköisyysslaskentaan perustuvilla menetelmillä sekä rakenteen lujuus että rasitus käsitetään satunnaissuureksi, joilla on tietty todennäköisyysjakauma. Näin ollen todennäköisyysslaskentaan perustuvat suunnittelumenetelmät koostuvat kolmesta vaiheesta:

1. rasitusjakauman $f_2(R)$ määrittäminen
2. lujuusjakauman $f_1(L)$ määrittäminen
3. vastaavan vauriotodennäköisyyden F määrittäminen
4. vähentämällä F ykkösestä saadaan rakenteen luotettavuus V , jota verrataan kulloinkin sovellettavaan varmuuskriteeriin.

Matemaattisesti vauriotodennäköisyys F voidaan kirjoittaa

$$F = \int_a^b \left[\int_c^R f_1(L) dL \right] f_2(R) dR, \quad (4)$$

missä a ja b ovat minimi- ja maksimiarvo, jonka rasitus voi saavuttaa todennäköisyysjakautumansa alueella ja c on minimiarvo, jonka lujuus voi saada todennäköisyysjakautumansa alueella. Eräissä tapauksissa on kuitenkin vaivattomampaa kirjoittaa vauriotodennäköisyyden lauseke seuraavaan muotoon:

$$F = \int_0^{b-c} f(R-L) d(R-L) \quad (5)$$

Seuraava esimerkki valaisee vauriotodennäköisyyden laskemismenetelmää.

Esimerkki

Tutkitaan aksiaalisesti kuormitettua sauvaa, jota kuormittaa voima P . Kuorman jakauma oletetaan normaaliseksi ja jakauman keskiarvo on 100 MN ja keskihajonta 25 MN . Sauvan materiaalin myötölujuus oletetaan niin ikään normaalijakautuneeksi satunnaissuureeksi, jonka keskiarvo on 400 MN/m^2 ja keskihajonta on 20 MN/m^2 . On määrättävä sauvan vauriotodennäköisyys eri poikkipinta-alan arvoille. Olkoon sauvan poikkipinta-ala $A \text{ m}^2$, jolloin, koska P on normaalijakautunut, niin myös $R = P/A$ on normaalijakautunut. Määritellään uusi muuttuja $X = R - L = P/A - L$, joka edelleen on normaalijakautunut. Olettamalla, että P ja L ovat tilastollisesti riippumattomia, saadaan X :n keskiarvo μ_x ja keskihajonta σ_x käyttämällä hyväksi normaalijakautuneiden funktioiden algebran lauseita. Tällöin saadaan

$$\mu_x = \mu_R - \mu_L = \frac{100}{A} - 400 \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} = \sqrt{\left(\frac{25}{A}\right)^2 + 20^2}$$

$f(X)$:n todennäköisyysjakaumafunktio voidaan nyt kirjoittaa muotoon

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ja vauriotodennäköisyys yhtälön (5) mukaan

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_0^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right\} dx \quad (8)$$

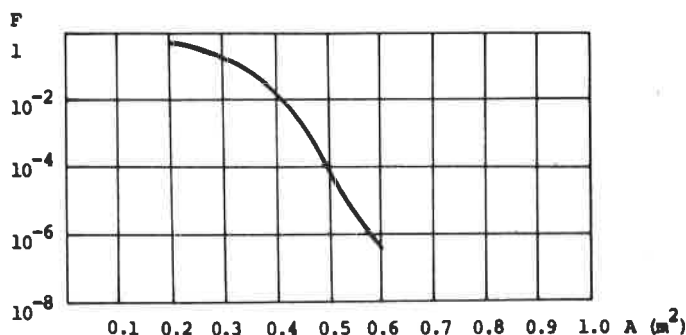
Muuttujan vaihdolla voidaan yhtälö (8) kirjoittaa muotoon

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\mu_x/\sigma_x}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} u^2 \right\} du, \quad (9)$$

mikä on standardimuotoinen normaalijakauman todennäköisyysintegraali, jonka arvo jokaista $-\mu_x/\sigma_x$ arvoa varten voidaan lukea normaalijakauman taulukoista. Jokaista A , μ_x ja σ_x ja tällöin myös μ_x/σ_x arvoa kohti voidaan F määrittää yhtälöstä (9). Nämä arvot eri A :n arvoille on taulukoitu taulukossa 1 ja piirretty käyrän muotoon kuvassa 1.

A	μ_x	σ_x	$-\mu_x/\sigma_x$	F
.2	100.00	126.59	-0.7899	.7851
.3	-66.67	85.70	0.7779	.2183
.4	-150.00	65.62	2.2858	.0111
.5	-200.00	55.85	3.7139	.0001
.6	-233.00	46.22	5.0485	2×10^{-7}

Taulukko 1 Laskuesimerkin lukuarvot.



Kuva 1 Laskuesimerkissä käytetyn sauvan vauriotodennäköisyys poikkipinta-alan funktiona.

Vertailuna murtotilamenetelmään suoritetaan yllä käsitellyn sauvaelementin mitoitus käyttäen kuorman ja lujuuden keskiarvoja karakteristisina arvoina ja kuorman varmuuskertoimena arvoa 1,5 ja materiaalivarmuuskertoimena arvoa 1,1. Tällöin sauvan vaadituksi pinta-alaksi saadaan

$$A = \frac{1,5 \cdot 100 \text{ MN}}{400 \text{ MN/m}^2 / 1,1} = 0,4125 \text{ m}^2$$

ja rakenteen vauriotodennäköisyydeksi kuvan 1 mukaan

$$F = 6 \cdot 10^{-3}$$

ja rakenteen varmuus

$$V = 1 - F = 0,994$$

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Structural analysis and design of nuclear plant facilities, American Society of Civil Engineers, 1976.
- [2] U.S.A.E.C, "Reactor safety study: An Assessment of Accident Risks in the U.S. Comm. Nuc. Power Plants", Wash 1400, August. 1974.
- [3] Whitman, R.V., "Analysis of Overall Risk of Failure of Nuc. Power Plants as a Result of Earthquakes", Presentation to the AEC Regulatory Staff by the AIF Ad Hoc Committee on Seismic Design Bases, Sept. 1974.

Pentti Varpasuo, tekn.tri, Imatran Voima Oy, Helsinki.