

RAKENNUSTEN VASTE MAANJÄRISTYKSESSÄ SATUNNAISVÄRÄHTELYONGELMANA

Pentti Varpasuo

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 29
Nro 3-4, 1996, s. 35-50

JOHDANTO

Maanjäristyksen aiheuttamat kuormitukset ovat vahinkopotentiaaliltaan monilla maapallon alueilla vaarallisin kuormitustapaus. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi Japani, California, Uusi-Seelanti, Chile, Välimeren rannikkoalueet, Vähä-Aasia ja Lähi-Itä. Neljä ensinmainittua aluetta kuuluvat ns. Tyynenmeren kehään, jossa maanjäristysten aiheuttama riski ja vulkaaninen riski ovat poikkeuksellisen suuria.

Maanjäristysten tuhot sellaisillakin alueilla, joilla maanjäristykset on otettu huomioon rakennusten ja infrastruktuurin suunnittelussa, voivat muodostua suuriksi. Esimerkkinä tästä voidaan mainita vuoden 1995 Koben maanjäristys, jonka tuhot on arvioitu 100 miljardiksi dollariksi. Suuren osan näistä tuhoista muodostivat kaasu-, vesi- ja sähköverkkojen ja liikenneyhteyksien vauriot.

Näin ollen onkin hyvin ymmärrettävää, että maanjäristys ilmiöiden tutkimiseen ja rakenteiden ja rakennusten maanjäristyssuunnittelun ja maanjäristysanalyysin kehittämiseen on kahdeksankymmentä- ja yhdeksänkymmentäluvulla panostettu voimakkaasti.

Maanjäristyssuunnittelun ja maanjäristysanalyysin kehittämisessä panostus on ollut voimakkainta seuraavilla alueilla:

- Satunnaisvärähtelyjen teorian kehittälyssä ja rakenteiden vasteen määrittelyssä satunnaisvärähtelyherätteelle;
- Maaperän ja rakenteen yhteisvaikutusilmiöiden tutkimuksessa;
- Rakenteiden vasteen määrittelymenetelmien kehittämisessä vaihtoehtoisille herätteen esitysmuodoille.

Käsitellään kutakin osa-aluetta hieman yksityiskohtaisemmin. Satunnaiset dynaamiset kuormat aiheutuvat monista erilaisista lähteistä kuten seismisyydestä, tuulesta, aaltoilusta ja liikenteessä ajoradan epätasaisuudesta. Näitten kuormien käsittely deterministisin menetelmin johtaa yleensä ylenmäärin konservatiiviseen suunnitteluun ja suuriin kustannuksiin. Edistys satunnaisvärähtelyanalyysin menetelmissä ja

tietotekniikan kehitys pöytämikrojen tehon, muistikapasiteetin ja kiintolevykapasiteetin suhteen on mahdollistanut satunnaisvärähtelyjen teoriaan perustuvien menetelmien käyttöönoton.

Seuraavassa esityksessä käsitellään rakenteen vastetta maanjäritysherätteelle satunnaisvärähtelyongelmana STOCAL II ohjelmaa apuna käyttäen¹. STOCAL II on kehitetty Kalifornian yliopistossa, Berkeleyssä ja muodostaa havainnollisen ja kätevän menetelmän satunnaisvärähtelyongelmien ratkaisussa. Tässä esityksessä satunnaisvärähtelyongelmien ratkaisua valotetaan sovelluksen avulla ja sovellukseksi valitaan VVER-91 ydinvoimalaitoskonseptin ulkosuojarakennus. Rakenteen vaste esitetään suojarakennuksen huipun vaakakiihtyvyyden, suojarakennuksen kaatavan momentin ja suojarakennuksen perustusleikkauksen neliöllisen keskiarvon neliöjuuren aikahistorioitten muodossa.

Maaperän ja rakenteen yhteisvaikutusongelmien käsittelyn havainnollistaminen tapahtuu CARES-ohjelmaa apuna käyttäen². CARES-ohjelma on kehitetty Brookhaven National Laboratoriossa, Yhdysvalloissa ydinvoimalaitosten nopeaan ja yksinkertaiseen seismisen vasteen analyysiin, kun maaperän ja rakenteen yhteisvaikutus otetaan huomioon. Rakenteen ja maaperän yhteisvaikutusongelmaa havainnollistetaan samalla ulkosuojarakennusesimerkillä kuin satunnaisvärähtely lähestymistapaa käytettäessä. Maaperän jäykkyys ja vaimennusominaisuuksia kuvaamaan käytettiin seuraavia neljää impedanssifunktioiden esitysmuotoa:

- taajuudesta riippumaton esitysmuoto elastiselle puoliavaruudelle;
- Veletsos- esitysmuoto;
- Kausel -esitysmuoto
- Beredugo-Novak -esitysmuoto

Näiden mallien avulla esitetään suojarakennuksen huipun vaste vastespektrin muodossa.

Esityksen kolmannessa osassa suoritetaan tavanomaisten, determinististen rakenteen vasteen määrittämenetelmien vertailu MSC/NASTRAN³ ja SAP4 ohjelman PC-versiota⁴ käyttäen. Tarkasteltavat menetelmät ovat:

1. Aikahistoriamenetelmä
2. Vastespektrimenetelmä
3. Kompleksinen taajuus-vastemenetelmä
4. Staattisen korvausvoiman menetelmä

Esimerkkirakenteena käytetään edelleen VVER-91 laitoskonseptin ulkosuojarakennusta ja tulokset esitetään vaakakiihtyvyydsamplitudin,

taivutusmomentin ja leikkausvoiman maksimiarvojen jakautumakäyriä rakennuksen korkeussuunnassa.

ESIMERKKIRAKENNE JA KÄYTETYT PERUSMAAN MÄÄRITTELYPARAMETRIT

1. Materiaaliominaisuuksina käytettiin seuraavia arvoja:

teräsbetoni kimmokerroin $E = 30\,000\text{ MPa}$

Poissonin vakio $\nu = 0.2$

2. Sauvamallin karakteristiset arvot ovat seuraavat:

12 nurkkaa, 12 pistemassaa $m = 1.35 \times 10^6\text{ kg}$

11 elementtiä, pituus = 5.7 m in keskimäärin

elementtien poikkileikkausarvot olivat seuraavat :

pinta-ala = 95 m^2 tehollinen leikkauspinta-ala = 47.5 m^2

hitausmomentti $I = 30\,500\text{ m}^4$

rakenteellinen vaimennus 5% kaikille ominaismuodoille

3. Perusmaan määrittelyparametrit :

Leikkausaallon etenemisnopeus (m / s) : 1100

Tiheys (kg / m³) : 2200

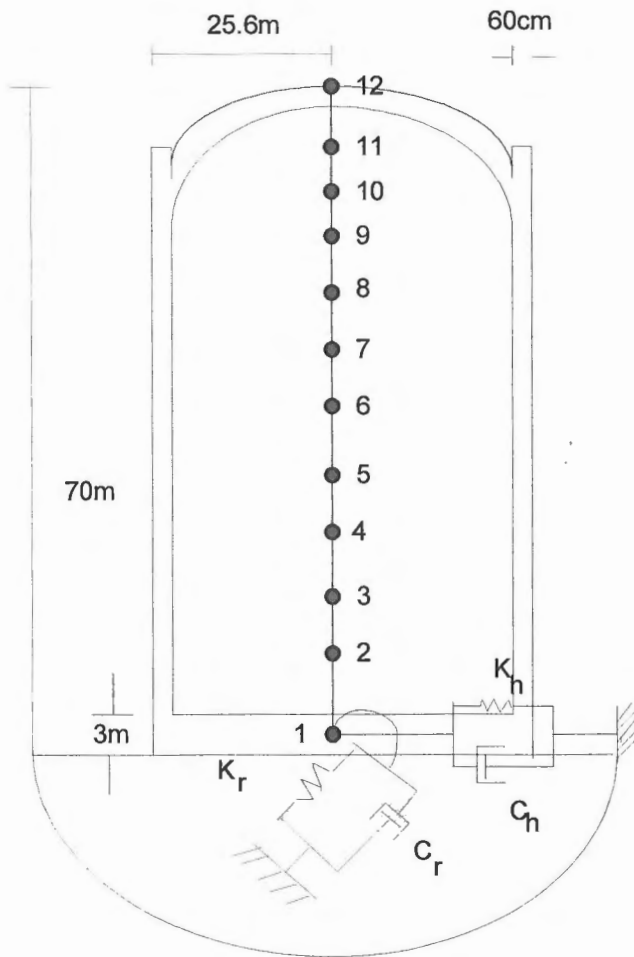
Poissonin vakio: 0.4

Sisäinen vaimennus (%) : 2

Liukumoduli (MPa) : 2782

Perusmaan luokitus : Keskimääräistä, Keskimääräisestä kovaan.

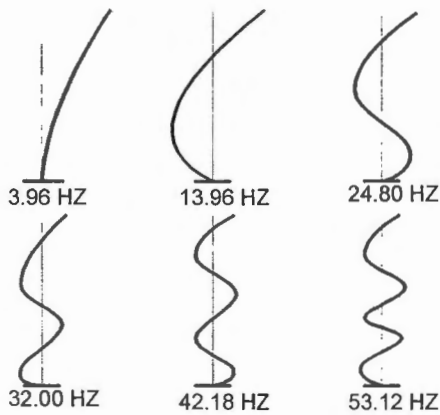
Rakennemalli ja perusmaan elastisen puoliavaruuden mallia esittävät jousi- ja vaimennuselementit on esitetty Kuvassa 1.



Kuva 1. Rakenteen ja perusmaan mallinnus

RAKENTEEN OMINAISMUODOT JÄYKÄLLE KIINNITYKSELLE

Kaikissa tässä esityksessä tarkastelluista ratkaisumenettelyistä lukuunottamatta kompleksisen taajuus-vasteanalyysin suoran menetelmän variaatiota tarvitaan rakenteen ominaismuotoja. Suojarakennuksen kuusi alinta ominaismuotoa on esitetty Kuvassa 2.



Kuva 2. Rakenteen kuusi alinta ominaismuotoa

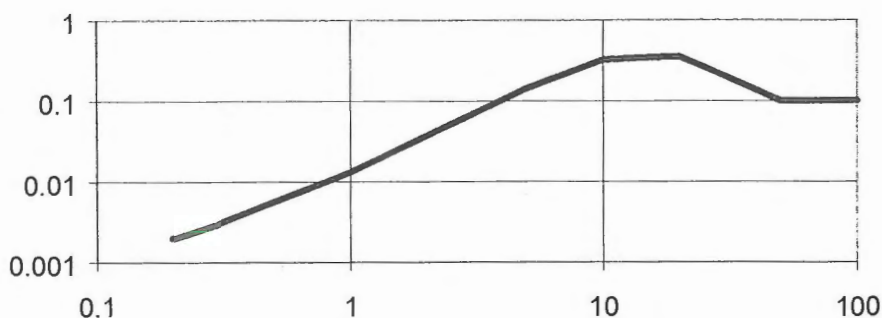
KUORMITUKSEN MÄÄRITTELY

Kuormituksen määrittely perustuu Statens Kärnkraftinspektionin (SKI) sponsoroimaan tutkimusprojektiin⁵. Tutkimuksen tavoitteena oli Ruotsin ydinvoimalaitoksiin kohdistuva seisminen riski, jonka puitteissa myöskin määriteltiin äärimmäisen pienen esiintymistodennäköisyyden omaava maanjäristyksen aiheuttama maaperän liike. Tutkimuksessa otettiin huomioon Ruotsin ja lähialueiden geologiset ja seismologiset erikoisolosuhteet ja käytettiin hyväksi kokemusperäisiä tuloksia maapallon muilta alueilta.

Koska suuren mittakaavan geologiset ja seismologiset olosuhteet Ruotsin eri ydinvoimalaitosten ympärillä eivät vaihtele suuresti, niin tulokset, jotka on saatu “tyypilliselle kalliolaitospaikalle” voidaan katsoa päteviksi erillisille laitospaikoille.

Rakenteiden vasteen määrittämistä varten SKI:n tutkimus määritteli maaperän liikkeen vastespektrin avulla. Spektrit määritettiin nk. “tasariskispektrien” muodossa. Spektriordinaatat kuvaavat yhden vapausasteen värähtelijän vasteen raja-arvoja, joiden voidaan odottaa ylittyvän taajuuksilla 10^{-5} , 10^{-6} ja 10^{-7} vuotuista tapahtumaa laitospaikkaa kohden.

Tässä tutkimuksessa käytettäväksi spektrin muodoksi valittiin taajuutta 10^{-5} vastaava “tasariskispektrin” muoto “tyypillisille kalliolaitospaikalle”. Tämä muoto katsottiin sopivimmaksi prospektiiviselle laitospaikalle, joka sijaitsi Kuolan niemimaalla. Spektrin vaimennussuhteeksi valittiin 5% ja spektri ankkuroitiin maaperän maksimikihtyvyyteen 0.1 g ⁶. Kuva 3.



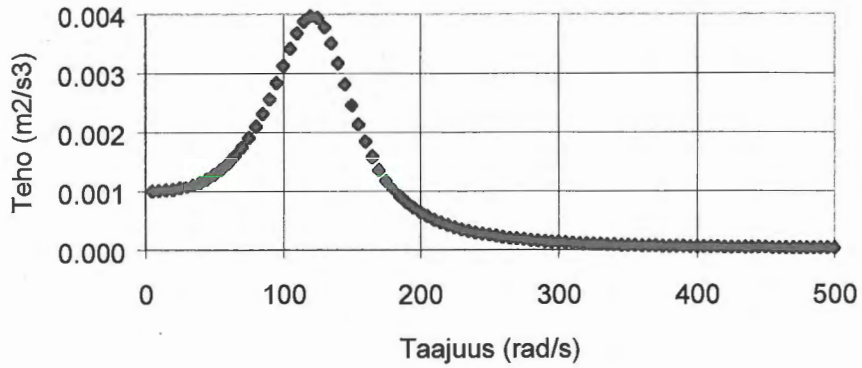
Kuva 3. Maa-perän liikkeen vaakasuoran komponentin vastespektri. Vaaka-akselilla taajuus (HZ) ja pystyakselilla spektriampplitudi (g).

SATUNNAISVÄRÄHTELYJEN LÄHESTYMISTAPA

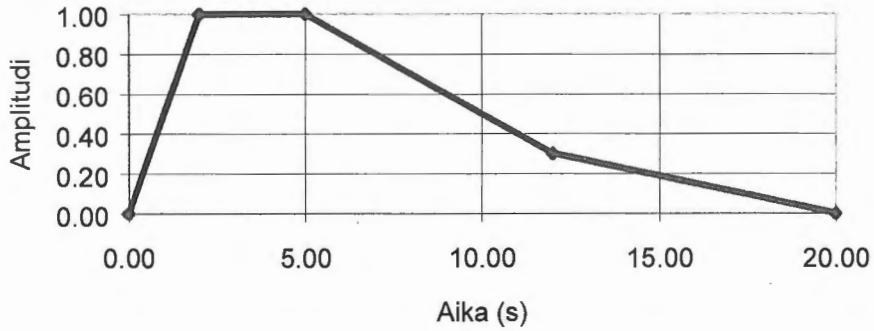
Kuvassa 1 esitetty rakennemalli analysoitiin STOCAL II ohjelmaa käyttäen. Maanjäristyskuorman esittämiseen käytettiin kahta eri menettelyä. Satunnaisvärähtelyjen teorian kannalta maanjäristysliike on ei-stationäärinen satunnaisprosessi. Teoreettisten johtojen mahdollistamiseksi prosessi oletetaan Gaussin prosessiksi, stationäärisessä tehtävän asettelussa riittää, kun tunnetaan prosessin tehospektrin tiheysfunktio eli PSD-funktio. Tehospektrin tiheysfunktio maanjäristysliikkeelle eli suodatetun valkoisen kohinan tehospektrin tiheysfunktio määrittellään kolmen parametrin Φ_0 , ω_g ja ζ_g avulla. Ensimmäinen määrittelyparametri kuvaa satunnaisprosessin tehoa eli maanjäristyksen tapauksessa hyposentrissä tapahtuneen energiapurkauksen suuruutta, toinen ns. suodatinparametri kuvaa sen taajuusalueen painopistettä, jolla maanjäristyksen hallitsevat taajuudet sijaitsevat ja kolmas ns. nauhanleveysparametri kuvaa maanjäristyksen taajuusisällön eli nauhan leveyttä. Seuraavassa maanjäristystä kuvaavan stationäärisen suodatetun valkoisen kohinan määrittelyparametrit ovat Φ_0 on $0.001 \text{m}^2/\text{s}^3$, ω_g on 125 rad/s ja ζ_g on 0.6 .

Maanjäristysliikkeen epästationäärisyys otetaan huomioon moduloimalla stationääristä, suodatettua valkoista kohinaa modulaatiofunktioilla. Evolutionääriseen spektriin perustuva menettely moduloi suodatettua valkoista kohinaa tässä esityksessä taajuudesta ja ajasta riippuvalla paloittain lineaarisella modulaatiofunktioilla. Tasaiseen modulaatiofunktioon perustuva menettely moduloi maanjäristysliikettä ainoastaan ajasta riippuvalla modulaatiofunktioilla.

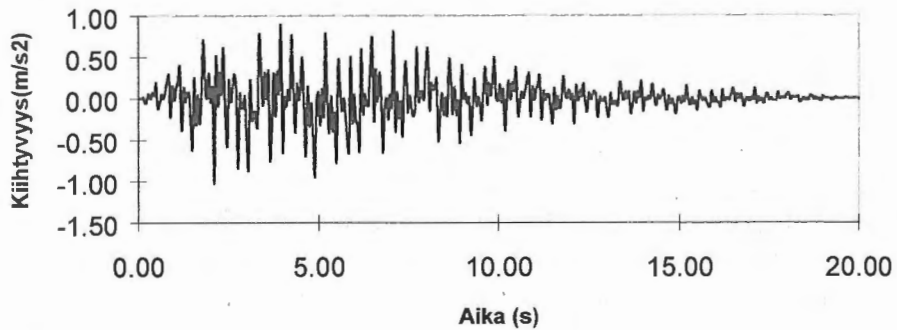
Kuvissa 4,5 ja 6 on esitetty suodatetun valkoisen kohinan tehospektrin tiheysfunktio, tasainen modulaatiofunktio ja otosaikahistoria. Kuvissa 7 ja 8 on esitetty taajuudesta ja ajasta riippuva modulaatiofunktio ja vastaava otosaika-historia.



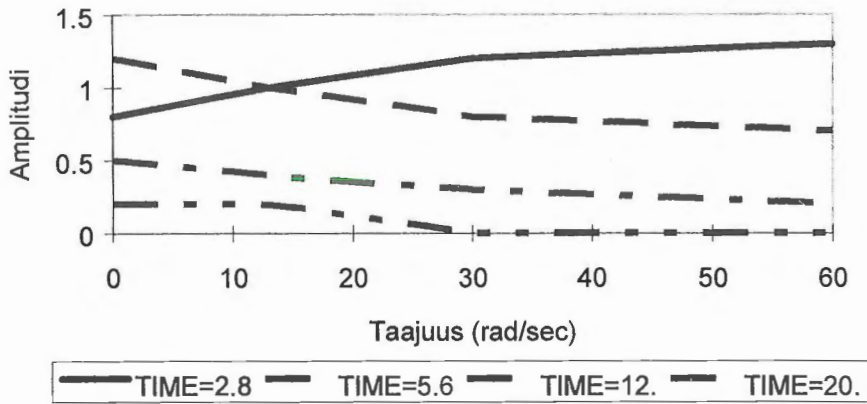
Kuva 4. Tehospektrin tiheysfunktion kuvaaja



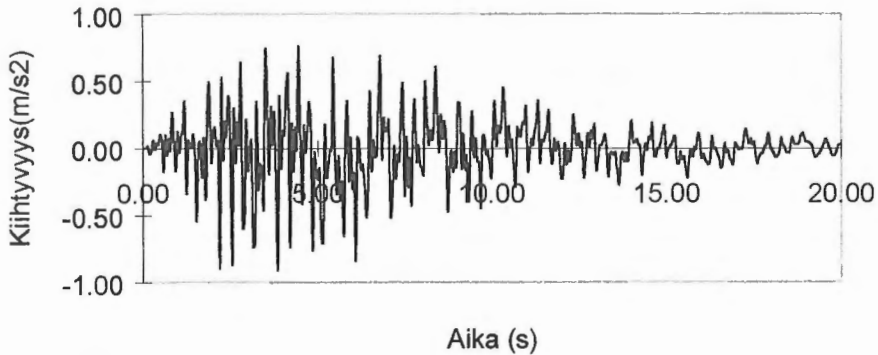
Kuva 5. Tasaisen modulaatiofunktion kuvaaja



Kuva 6. Tasaisesti moduloidun suodatetun valkoisen kohinan otosfunktio



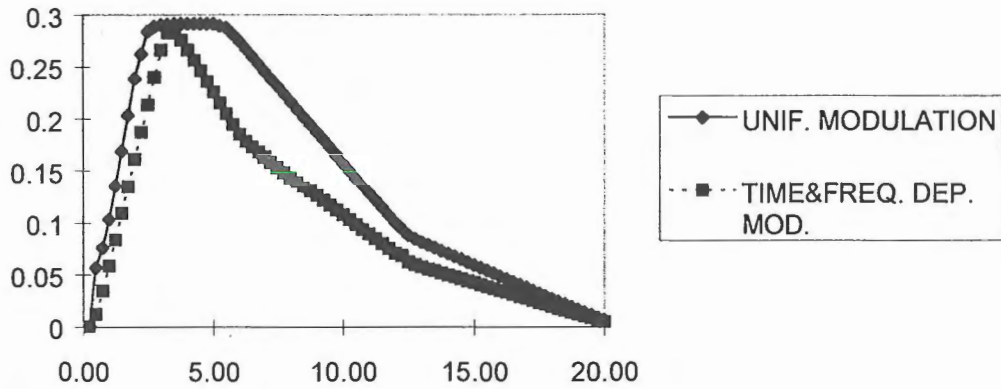
Kuva 7. Evolutionäärisen mallinnuksen modulaatiofunktio



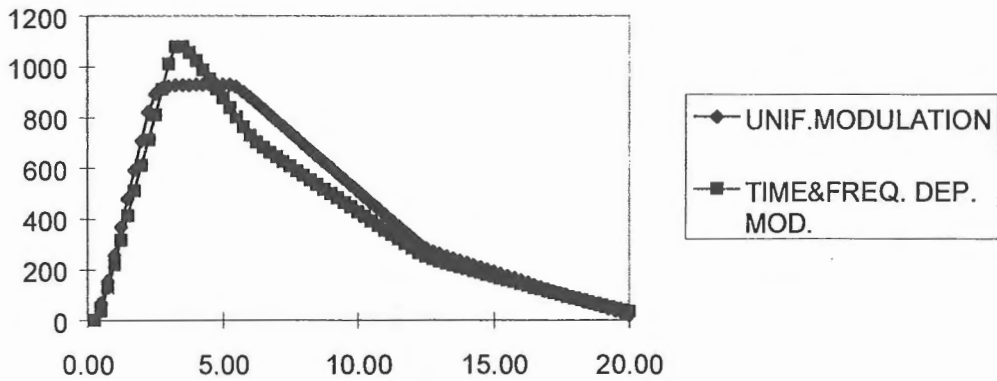
Kuva 8. Evolutionäärisen mallinnuksen otosaika-historiafunktio. Vaakakselilla aika (s), pystyakselilla vaakakiihtyvyyss (m/s²)

Kun tunnetaan heräteprosessin tehospektrin tiheysfunktio ja modulaatiofunktio, voidaan vasteen geneeriset, kahden ominaisuusmuotovasteen väliset korrelaatio (varianssi)- ja tehospektrin tiheysfunktiot määrittää. Geneerisiä ratkaisufunktioita tarvitaan laskettaessa vastetta usean vapausasteen systeemille. Systeemin kokonaisvaste saadaan geneerisistä ratkaisufunktioista ominaisuusmuotosuperpositiota käyttämällä.

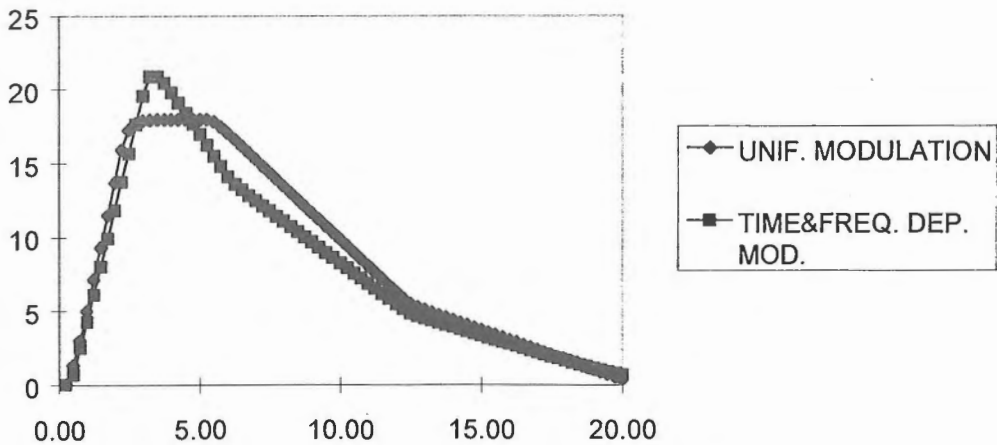
Rakenne on määritetty, kun tunnetaan ominaisarvot, ominaisuusmuotovaimennukset ja ominaisuusmuotojen teholliset osallistumiskertoimet. Heräte on määritetty tehospektrin tiheysfunktiolla ja modulaatiofunktiolla. Kuvissa 9, 10 ja 11 on esitetty suojarakennuksen huipun kiihtyvyyden, kaatavan momentin ja perustusleikkauksen varianssifunktioiden neliöjuurien (r.m.s) kuvaajat.



Kuva 9. Suojarakennuksen huipun r.m.s kiihtyvyyys (g) ajan (s) funktiona



Kuva 10. Suojarakennuksen kaatavan mom. (MNm) r.m.s ajan funktiona



Kuva 11. Suojarakennuksen perusleikkauksen (MN) r.m.s ajan funktiona

PERUSMAAN JA RAKENTEEN YHTEISVAIKUTUSANALYYSI

Perusmaan ja rakenteen yhteisvaikutus analyysi suoritetaan seuraavassa olettaen perusmaa elastiseksi puoliavaruudeksi. Tällä hetkellä on olemassa menetelmiä, joiden avulla myöskin perusmaan kerroksellisuus voidaan huomioida perustuksen impedanssifunktioita laskettaessa. Tällöin kunkin kerroksen paksuus, elastiset parametrit (leikkausaallon etenemisnopeus ja Poissonin vakio), sisäinen vaimennus ja tiheys on määritettävä analyysin lähtöarvoina. Tässä esityksessä rajoitutaan kuitenkin elastisen puoliavaruuden tapaukseen, jolloin impedanssi funktiot voidaan määrittää, kun tunnetaan perusmaan elastiset ominaisuudet (liikumoduli ja Poissonin vakio), tiheys, sisäinen vaimennus ja perustuksen muoto ja koko ja ylärakenteen hitausominaisuudet. Mekaanisesti ylärakenne on yhdistetty liikkuvaan perustaan (maanjäristysliikkeeseen) jousi- ja vaimennusjärjestelmällä, jotka kuvaavat perustuksen jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia. Matemaattisesti perustuksen dynaamiset ominaisuudet esitetään perustuksen impedanssifunktioiden avulla. Impedanssifunktiot ovat taajuudesta riippuvia kompleksisia funktioita, joiden lausekkeet johdetaan tutkimalla elastisen tai viskoelastisen kontinuumin kannattamaa perustusta. Impedanssifunktioiden reaali- ja imaginaariosat edustavat perustuksen jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksia. Yleisesti perustuksen impedanssit riippuvat perustuksen geometriasta ja joustavuudesta niinkuin myös perusmaakontinuumin ominaisuuksista ja konfiguraatiosta. Analyytisesti impedanssifunktiot määritetään äärellisten elementtien - tai reunaelementtien menetelmää käyttäen. Tunnetuimmat referenssit ovat kontinuumimekaniikkaan perustuva CLASSI ⁷ ja elementtimenetelmään perustuva SASSI ⁸. Tässä esityksessä käytettävässä CARES ohjelmassa on käytettävissä joukko impedanssifunktioiden esitysmuotoja, jotka kattavat verrattain laaja yhteisvaikutusanalyysien sovellusalueen. Tämä alue käsittää sekä pinta- että upotetut perustukset, jotka liittyvät elastisiin tai viskoelastisiin puoliavaruuksiin. Käytössä on impedanssifunktiomallit:

- Taajuudesta riippumattomien parametrien malli
- Veletsos malli
- Kausel malli
- Beredugo/Novak malli

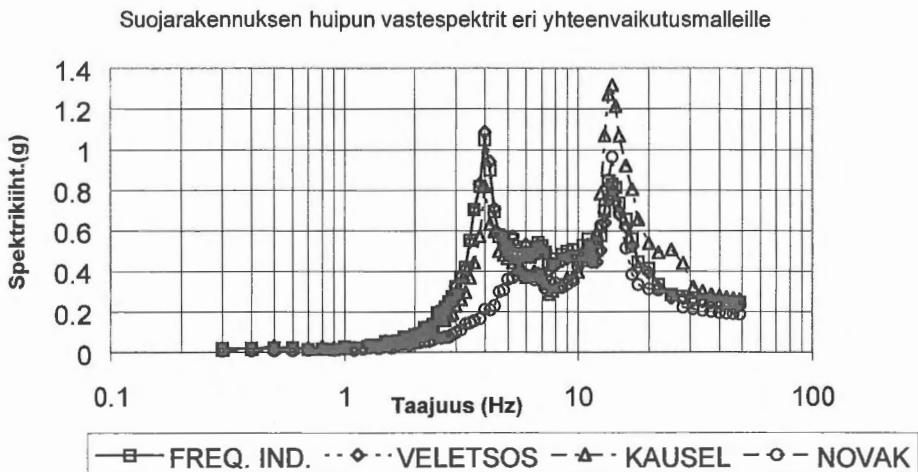
Taajuudesta riippumattomien parametrien malli sekä Kauselin ja Beredugo/Novakin mallit kuvaavat elastista puoliavaruutta kun taas Veletsosin malli ottaa huomioon perusmaan sisäisen vaimennuksen ja esittää viskoelastista puoliavaruutta.

Käytetty ratkaisumenettely on suora kompleksinen taajuusvasteanalyysi ja ratkaisuproseduuri voidaan esittää seuraavien askeleitten avulla:

- muodostetaan ylärakenteen globaalit jäykkyys- ja massamatriisit

- kiinnitetään ylä rakenne yhteisvaikutus nurkasta (nurkka 1 Kuva 1)
- määrätään ylä rakenteen kiinnitetyn perustuksen ominaismuodot ja ylä rakenteen vaimennusmatriisi
- muodostetaan perustuksen impedanssit ja perustuksen jäykkyys- ja vaimennus lisätään jäykkyys- ja vaimennusmatriiseihin
- Fourier- muunnetaan heräte ja jokaiselle herätteen taajuudelle lasketaan:
 - systeemin dynaaminen kerroinmatriisi muodostetaan
 - lasketaan Gaussin eliminaatiolla vasteen Fourier- komponentit
- Fourier- muunnetaan vaste takaisin aika-avaruuteen

Kuvassa 1 esitetty suojarakennusmalli analysoitiin maanjäristysliikkeen herätteelle, joka oli yhteensopiva Kuvan 3 spektrin kanssa. Maaperän ja rakenteen yhteisvaikutus mallinnettiin neljällä edellä esitetyllä mallilla. Tulokset suojarakennuksen huipun kiihtyvyydelle on esitetty vastespektrien muodossa Kuvassa 12.



Kuva 12. Suojarakennuksen huipun vaakakiihtyvyyden vastespektrit eri yhteisvaikutusmalleilla analysoituna

RAKENTEEN VASTEEN DETERMINISTISIÄ MÄÄRITYSMENETELMIÄ

Usean vapausasteen systeemin liikeyhtälö on muotoa:

$$[M] [\{A\} + \{A_g\}] + [C] \{V\} + [K] \{S\} = \{0\} \quad (1)$$

missä

$[M]$, $[C]$ ja $[K]$ = massa-, vaimennus-, ja jäykkyysmatriisit

$\{A\}$, $\{V\}$ ja $\{S\}$ = suhteelliset siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyysektorit

$\{A_g\}$ = perusmaan kiihtyvyydsvektori

1. Aika-historiamenelmä

Yhtälö (1) voidaan ratkaista ominaismuotojen superpositioon perustuvalla aikahistoriamenettelmällä, joka on tavallisin deterministisen maanjäristysanalyysin ratkaisumenettely. Ensiksi yhtälöryhmä (1) muunnetaan toisistaan riippumattomien differentiaaliyhtälöiden joukoksi ominaismuotokoordinaattimuunnoksella. Riippumattomat yhtälöt ratkaistaan esimerkiksi Duhamelin integraalia käyttäen. Saadut ominaismuotovasteet superponoidaan rakenteen kokonaisvasteen määrittämiseksi.

2. Vastespektrimenetelmä

Vastespektrimenetelmässä yleistetty ominaismuotovaste lasketaan yhtälöstä ⁹

$$Y_j(\max) = \Gamma_j (S_{aj}/\omega_j^2) \quad (2)$$

missä

S_{aj} = herätteen spektrikiikkyvyys vastaten taajuutta ω_j^2

Γ_j = ominaismuodon osallistumiskerroin vastaten muotoa j

Rakenteen nurkan i maksimisiirtymä, joka aiheutuu ominaismuodosta j, saadaan kertomalla yhtälön (2) lauseke ominaismuotovektorin j komponentilla i. Rakenteen kokonaisvaste saadaan jälleen superponoimalla ominaismuotovasteet.

3. Kompleksinen taajuusvastenalyysi

Kompleksisessa taajuusvastenalyysissä rakenteen vaste kirjoitetaan muotoon

$$R(t) = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (3)$$

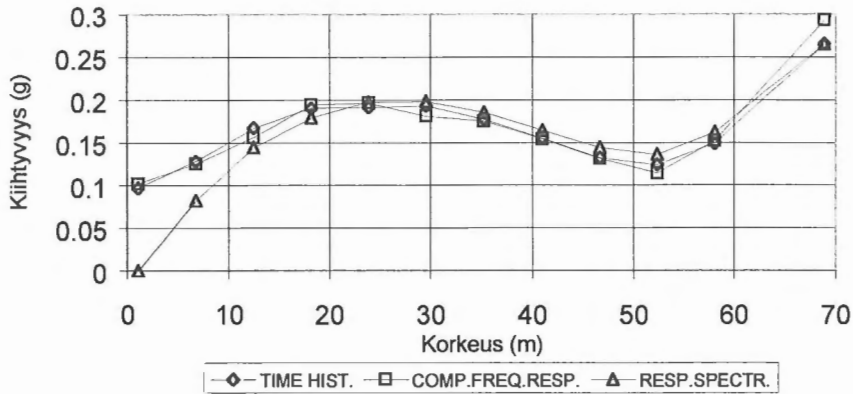
missä

$$R(\omega) = T(\omega) A_g(\omega) = \text{vaste taajuusavaruudessa} \quad (4)$$

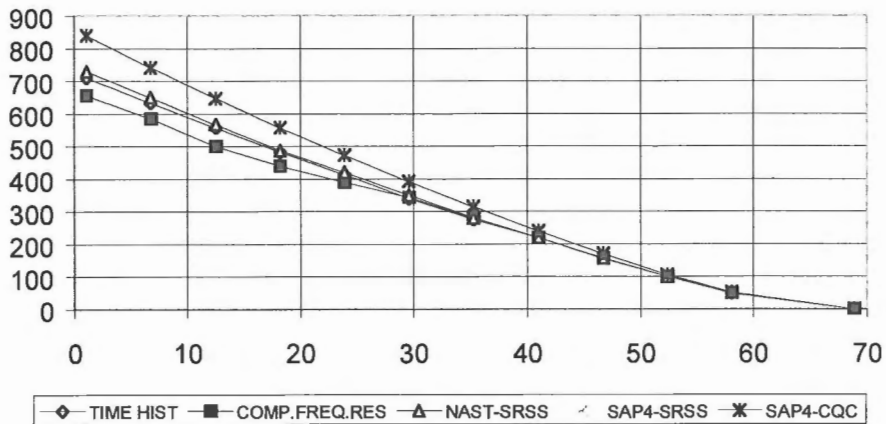
$T(\omega)$ = rakenteen siirtofunktio kulmataajuudella ω

$$A_g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_g(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (5)$$

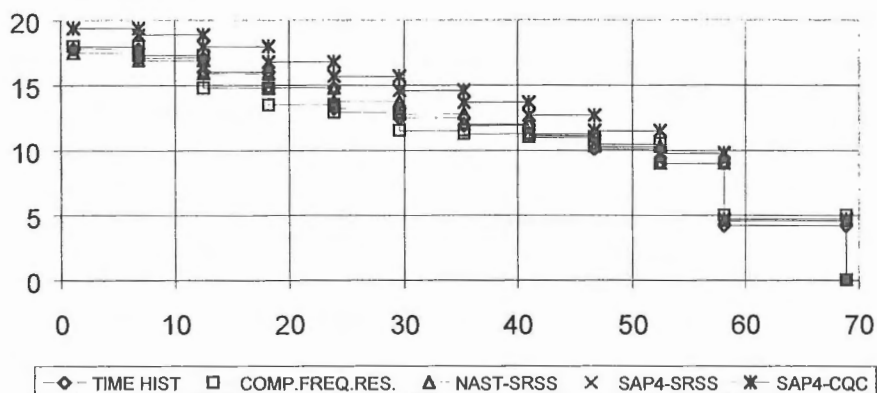
Sovelluksena suojarakennuksen vaakakiihtyvyyden, taivutusmomentin ja leikkausvoiman jakautumat on esitetty kuvissa 13, 14 ja 15 käyttäen edellä esitettyjä vaihtoehtoisia ratkaisumenettelyjä. Kuormitus on Kuvan 3 spektrin kanssa yhteensopiva aikahistoria ja rakenne oletetaan jäykästi kiinnitetyksi.



Kuva 13. Suojarakennuksen vaakakiihtyvyyden jakaumat korkeussuunnassa.



Kuva 14. Suojarakennuksen taivutusmomentin jakaumat.



Kuva 15. Suojarakennuksen leikkausvoiman jakaumat

KESKUSTELUA

Muutammat selittävät ja kommentoivat huomiot ovat paikallaan. Satunnaisvärähtelyanalyysistä on huomattava, että kuorman määrittämiseksi tarvitaan enemmän tietoa kuin deterministisessä analyysissä. Tarvitaan tehospektrin tiheysfunktio ja modulaatiofunktio. Rakenteen osalta satunnaisvärähtelyanalyysin vaatimukset ovat samat kuin lineaarisen deterministisen analyysin eli tarvitaan ominaisarvot, ominaismuotovaimennukset ja ominaismuotojen osallistumiskertoimet. Kuitenkin on huomattava, että satunnaisvärähtelyanalyysi antaa vasteesta huomattavasti enemmän tietoa kuin deterministinen analyysi.

Vaste voidaan kuvata varianssi-, covarianssifunktioiden ja tehospektrin tiheysfunktioiden avulla. Varianssifunktiot antavat kuvan vasteen neliön keskimääräisen arvon aikariippuvuudesta ja covarianssifunktiot kertovat eri vastesuureiden keskinäisestä korrelaatiosta. Tehospektrin tiheysfunktiot kertovat vasteen hallitsevista taajuuksista ja vertaamalla herätteen ja vasteiden tiheysfunktioita saadaan kuva rakenteen toiminnasta suodattimena. Varianssin neliöjuuri eli r.m.s -arvo on yksi mitta vasteen vaihtelulle keskiarvon ympärillä eli sitä voidaan verrata deterministisen analyysin tuloksiin. Enemmän tietoa vasteen vaihtelusta saadaan muodostamalla vasteen ääriarvon maksimin eli $\max[|X(t)|]$:n jakauma ja tämän jakauman parametrit kuten ääriarvon maksimin odotusarvo ja keskihajonta. Nämäkin arvot vasteelle voidaan määrittää STOCAL II ohjelmalla, niitä ei tässä olekaan esitetty.

Maaperän ja rakenteen yhteisvaikutusongelmien käsittelystä tässä esityksessä on todettava, että esitys oli niukka ja yleisluonteinen aiheen tärkeyteen verrattuna. Olennaista on, että yhteisvaikutus ilmiöitä on mahdollisuus tutkia menettelyillä, jotka mahdollistavat maaperän jäykkyys- ja vaimennusominaisuuksien taajuusriippuvuuden huomioonottamisen.

Deterministisistä lineaarisista vasteen määrittelymenetelmistä ilmeisesti kompleksinen taajuusvastemenetelmä on voimakkain, se antaa mahdollisuuden taajuusriippuvuuksien huomioonottamiseksi. Toisaalta on muistettava, että se on matemaattiselta apparaatiltaan ja laskentatehon tarpeeltaan myös selvästi raskain.

YHTEENVETO

Kaikista suoritetuista tarkasteluista voidaan tehdä yhteenvetotaulukko, jonka saatuja tuloksia on mukavaa verrata toisiinsa. Mielenkiintoista on havaita kuinka vähän satunnaisvärähtelyanalyysin r.m.s tulokset eroavat deterministisen analyysin tuloksista. Edelleen havaitaan SSI- analyysissä eri mallinnoitettujen väliset erot ja erot kiinnitettyyn perustaan ovat pieniä. Tämä selittyy sillä, että kyseessä on kova maaperä (leikkausaallon etenemisnopeus noin 1000 m/s). Pehmeän pohjamaan tapauksessa tilanne muuttuu olennaisesti toiseksi ja ero kiinnitettyyn perustaan on ratkaiseva ja erot mallien välillä selvät.

| Analysis type | Random vibration | | Soil - structure interaction (SSI) | | | | Deterministic Structural response | | | | |
|-------------------|------------------|------|------------------------------------|------|------|------|-----------------------------------|-------|-------|---------|------|
| | STOCAL | | CARES | | | | MSC/NASTRAN | | | SAP4-PC | |
| Analysis option | Uni | Evo | M1 | M2 | M3 | M4 | T&H | F&R | R&S | SRSS | CQC |
| Acc. at top (g) | 0.29 | 0.28 | 0.24 | 0.23 | 0.25 | 0.18 | 0.265 | 0.293 | 0.265 | NA | NA |
| Overt. mom. (MNm) | 927 | 1077 | NA | NA | NA | NA | 710 | 655 | 730 | 840 | 840 |
| Base shear (MN) | 18 | 20.9 | NA | NA | NA | NA | 17.8 | 18 | 17.5 | 19.4 | 19.5 |

Taulukko 1 Yhteenvetotaulukko laskennan tuloksista

KIRJALLISUUSVIITTEET

1. Wung, C.D. & A. der Kiureghian. 1989. STOCAL II : Computer-assisted learning system for stochastic dynamic analysis of structures, Part I-Theory and development, Part II-Users' s manual. University of California at Berkeley, California. Report No. UCB / SEMM-89 / 10
2. Xu, J. et. al. 1990. Cares (Computer analysis for rapid evaluation of structures) Version 1.0, Seismic module, Theoretical manual Vol.1; User' s manual Vol.2; Sample problems Vol.3. Brookhaven National Laboratory, NUREG /CR-5588
3. MSC/NASTRAN, version 68.5 User' s guide, McNeal-Schwendler Corp, 1995.

4. SAP4- PC version, User's manual, National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE), Berkeley, California, 1995.
5. Statens Kärnkraftinspektion, Project SEISMIC SAFETY, SUMMARY REPORT, VBB, Stockholm, May 1989.
6. 50-SG-S1 Earthquake hazard and associated events for NPP site selection. Safety manual. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1991.
7. "Soil. Structure Interaction: A Linear Continuum Mechanics Approach, CLASSI." Wong, H. L., Luco, J. E., Report CE-79-3, University of Southern California, Los Angeles, CA., 1979.
8. "SASSI-A System for Analysis of Soil- Structure Interactin, User's Manual, Version 1 Revision 0.", Lysmer J. et al., University of California, Berkeley, CA, April 1987.
9. ASCE STANDARD. 1986. Seismic analysis of safety-related nuclear structures.

Pentti Varpasuo, dos., tekn.tri
IVO International Oy, Vantaa