

MAANJÄRISTYKSEN KESTÄVÄN RAKENNUKSEN RUNGON YLEISSUUNNITTELU

Ilpo Salo ja Pekka Kanerva

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 11
No. 2 1978, s. 13...26

YHTEENVETO: Artikkelissa käsitellään maanjäristysalueille tulevien rakennusten runkoja ja muiden rakenteiden suunnittelua state-of-art-raportin luonteisesti etupäässä yleissuunnittelun kannalta. Rakenteilta vaadittavan energiansitomiskyvyn ja sitkeyden merkitystä käsitellään ensin, jonka jälkeen annetaan yksityiskohtaisia ohjeita rakenteiden yleissuunnittelusta ja rakennuksen muodosta. Rakenteiden koekuormituksia ja maanjäristyksen aiheuttamia kustannuslisäyksiä käsitellään lopuksi.

JOHDANTO

Maanjäristys on stokastinen ilmiö, jonka tilastolliset suuret tunnetaan toistaiseksi suhteellisen rajoitetusti. Erityisesti voimakkaimpien maanjäristysten esiintymistiheydestä ja voimakkuudesta maapallon eri alueilla tiedetään liian vähän, jotta maanjäristyksen esiintymistodennäköisyyksiä voitaisiin ennustaa samalla luotettavuudella kuin muiden luonnonkuormien esiintymistä.

Maaperän geoteknisten ominaisuuksien perusteella on arvioitu [2], että suurimman mahdollisen maanjäristyksen yhteydessä esiintyvä maaperän vaakakiihtyvyys vaihtelisi alueittain välillä 0,5...1 kertaa maan vetovoiman kiihtyvyys. Näin suuria kiihtyvyyksiä vastaaville hitausvoimille rakenteita ei voida taloudellisten resurssien puitteissa mitoittaa, vaan suunnitteluissa käytetään pienempiä vaakavoimia, jonka vuoksi rakennus voi joutua maanjäristysalueella niin voimakkaaseen maanjäristykseen, että se jopa totaalisesti sortuu. Riski on kuitenkin hyvin pieni.

Maanjäristys ei ole rakenteille yksinomaan katastrofikuormitus, vaan se on otettava huomioon maanjäristysalueilla myös usein toistuvana heikompana järistyksenä, jonka rakenteen on kestettävä vaurioitumatta, tai harvemmin toistuvana, jolloin rakenteessa hyväksytään vähäisiä, taloudellisesti korjattavissa olevia vaurioita.

Voidaankin todeta, että rakenteiden suunnittelussa maanjäristykseen varaudutaan sen voimakkuuden perusteella kolmella tavalla:

1. Rakenteen taloudellisena käyttöaikana usein toistuvan heikohkon maanjäristyksen rakenteen on kestettävä vaurioitumatta. Rakenne on mitoitettava kestävä tällainen kuormitus kimmoisana. Materiaalien sallittuja jänni-

- tyksiä voidaan tällöin korottaa suuremmiksi kuin tavanomaiset sallitut jännitykset kuormituksen haryinaisuuden perusteella. Eri maiden normeissa on tavallisesti annettu tätä kuormitustilannetta vastaavat vaakavoimat.
2. Edellistä hieman suuremman maanjäristyksen (vaakakuormitus n. 1,5 kertainen) esiintymistodennäköisyys on pienehkö rakenteen käyttöaikana. Tällöin sallitaan vähäisiä vaurioita pääasiassa ei-kantavissa rakenneosissa. Tämän tapauksen mukainen rakennesuunnittelu on puhtaasti taloudellinen optimointitehtävä, johon viralliset normit eivät yleensä aseta mitään vaatimuksia. Tämän kuormitustapauksen perusteella määräytyvät usein sekundääriset rakenteet (väliseinät, julkisivuelementit jne.), jotka eivät saa vaurioitua käyttökelvottomiksi kantavien rakenneosien vähäisten plastisten muodonmuutosten vuoksi.
 3. Katastrofikuormitukseksi luokitellaan voimakas maanjäristys, jonka esiintymistodennäköisyys on niin pieni, että sen taloudellinen merkitys on vähäinen, vaikka rakenne tuhoutuisikin käyttökelvottomaksi. Tässä tapauksessa pyritään yksinomaan henkilövahinkojen minimoimiseen. Kantavat rakenteet voivat saada huomattavia pysyviä muodonmuutoksia, mutta rakenne ei saa tottaalisesti sortua. Rakenteesta ei saa putoilla raskaita rakenneosia, poistumisteiden täytyy pysyä kulkukelpoisina ja suojaukseen tarvittavien varusteiden (valot, vesijohdot, sprinkler-laitteet yms.) käyttökelpoisina. Tämä edellyttää rakenteilta riittävää sitkeyttä, rakenneosien hyvää kiinnitystä rakenteeseen sekä suojausvarusteiden riittävää lujuutta. Normit vaativat yleensä, että rakenne kestää murtumatta kohdan 1 mukaisen kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset 3...5 kertaisina (sitkeysvaatimus).
- Rakenteen käyttötarkoitus vaikuttaa myös sen suunnitteluun. Kriisitilanteissa ensiarvoiset rakenteet, kuten sairaalat, paloasemat, hallintokeskukset, radio- ja puhelinasemat, sillat ja padot on suunniteltava siten, että ne myös voimakkaiden maanjäristysten aikana pysyvät ainakin rajoitetusti käyttökelpoisina. Kaikkein ankarimmat vaatimukset asetetaan ydinvoimaloille.

MAANPERÄN VAIKUTUS RAKENNUKSEN VÄRÄHTELYYN

Kiinteän maaperän päällä olevalla paikallisella pehmeämmällä maakerroksella on rakenteen mitoituksessa merkitystä kahdella eri tavalla. Perustusten alla maaperässä tapahtuvat kimmoiset muodonmuutokset lisäävät rakenteen notkeutta aiheuttaen näin rakenteen ominaisvärähdysaikojen kasvua. Tämä rakenteen ja sen perustusten vuorovaikutus on yleensä aina huomioitava rakenteen ominais-
taajuuksia määritettäessä [1, 2, 3]. Samalla pehmeä maaperä lisää rakenteen ominaisvaimennusta siirtäessään rakenteessa olevaa dynaamista liike-energiaa maaperään. Molemmat edellä mainitut seikat yleensä vähentävät maanjäristyksen rakenteelle aiheuttamaa kuormitusta.

Toisaalta kiinteän maaperän päällä oleva pehmeämpi maakerros toimii suodat-
timena, joka vaimentaa maanjäristyskuormituksen useimpia taajuuksia, mutta

vahvistaa olennaisesti sellaisten taajuuksien amplitudeja, jotka osuvat maaperän ominaistajuuksille. Mikäli paikallisen maaperän ja rakenteen jotkin ominaistajuuudet osuvat lähelle toisiaan, syntyy resonanssi-ilmiö, joka on otettava ehdottomasti suunnittelussa huomioon. Tällaisissa tapauksissa saattaa pehmeä maakerros aiheuttaa rakenteeseen kohdistuvan kuormituksen kasvamisen yli kaksinkertaiseksi verrattuna kiinteälle maapohjalle perustettuun rakenteeseen.

Mikäli kiinteän maaperän päällä on homogeeninen tasapaksu pehmeämpi maakerros, voidaan sen ominaisvärähdysajat laskea ns. leikkauspalkkiteorian mukaan kaavasta

$$T_n = \frac{4H}{(2n-1)v_s} \quad (1)$$

T_n = maaperän ominaisvärähdysaika

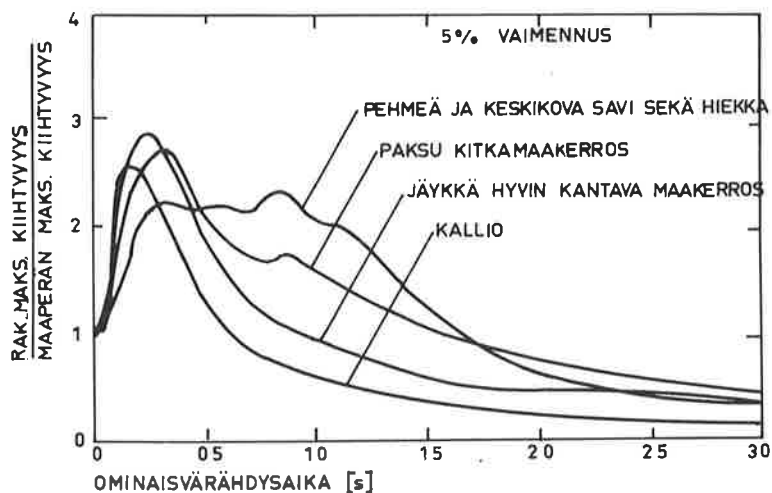
H = maakerroksen paksuus

$n = 1, 2, 3, \dots$

v_s = leikkausaallon etenemisnopeus maakerroksessa

Jos maaperä on epähomogeenista tai kerrokset eivät ole tasapaksuja ja vaaka-suoria, laskelmat muodostuvat monimutkaisiksi vaatien usein elementtimenetelmien hyväksikäyttöä. Laskelmien suorittaminen edellyttää tarkkoja maaperätutkimuksia, jotka on ulotettava riittävän syvälle kovaan maakerrokseen asti. Erityisesti perustettaessa notkeita rakenteita pehmeälle maapohjalle syntyy vaarallisia resonanssitilanteita. Sitä vastoin jäykät, yleensä seinäjäykisteiset rakenteet ovat kestäneet hyvin tällaisissa olosuhteissa.

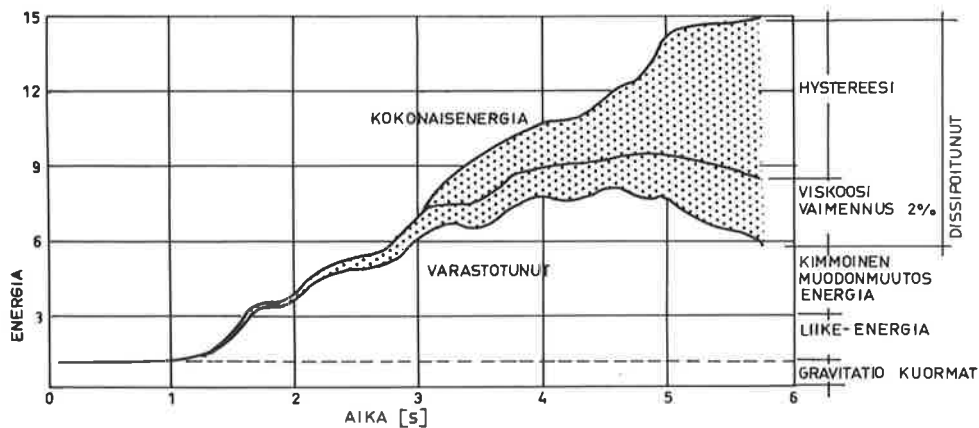
Kuvassa 1 on esitetty paikallisen maaperän vaikutus havaittuihin maanjäristysten aiheuttamiin kiihtyvyyksiin maan pinnalla [1]. Kuvasta voidaan havaita, että pehmeä maakerros pienentää jäykkien, pienen ominaisvärähdysajan omaavien rakenteiden kuormitusta. Sitä vastoin notkeiden rakenteiden kuormitus kasvaa jopa moninkertaiseksi.



Kuva 1 Kuormituksen riippuvuus maaperästä.

RUNGOLTA VAADITTAVA SITKEYS

Normien mukaisille vaakavoimille suunnitellut rakenteet eivät kestä kimmoisina pysyen edes keskisuuria maanjäristyksiä, ja tarkemmin suoritettujen laskelmien perusteella on voitu todeta, että voimakkaiden järjestysten yhteydessä rakenteen kimmoteoreettisesti määritetyt lujuudet ylittyisivät yleensä 4..6 kertaisesti. Näin ollen on selvää, että voidakseen selviytyä hyvin maanjäristyksistä rakenteella täytyy olla paitsi riittävä lujuus myös kyky mukautua varsin suuriin plastisiin muodonmuutoksiin, siis suuri sitkeys. Tästä seuraa, että kantaviin rakenneosiin voidaan käyttää vain riittävän sitkeyden omaavia rakennusmateriaaleja. Lisäksi koko rakenne on suunniteltava siten, että maanjäristyskuormituksen rakenteeseen aiheuttamat plastiset muodonmuutokset ja-kaantuvat mahdollisimman laajalle alueelle, jolloin rakenteella on suuri energian absorpoimiskyky. On huomattava, että rungon on kyettävä absorpoimaan maaperän värähtelyn rakennukseen syöttämä koko energiamäärä (Kuva 2).

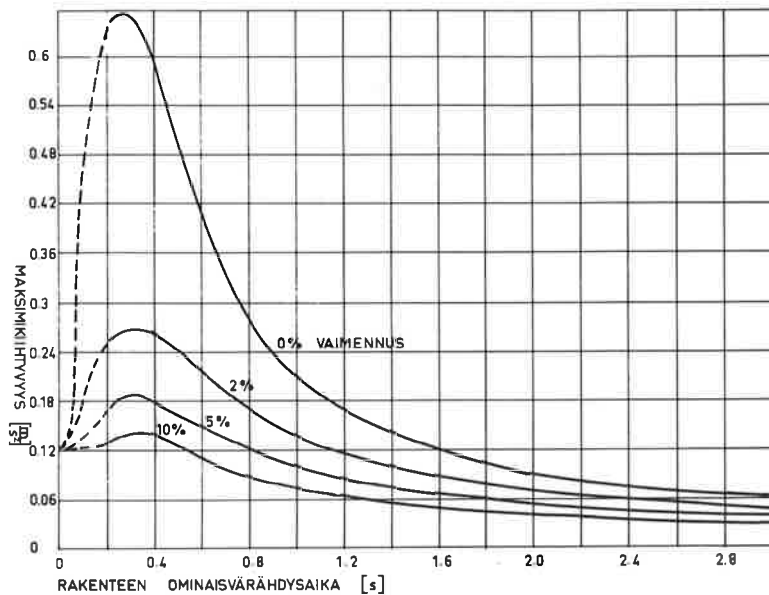


Kuva 2 Laskettu maanjäristyksen (1,5 kertaa El Centro 1940 - maanjäristys) erääseen esimerkkirakennukseen syöttämä energiamäärä [1].

Voidaankin todeta, että rakenteen värähdellessä sitoutuu energiaa seuraavin tavoin:

- liittyvien ja kantavien rakenneosien välinen kitka
- maaperän ja rakennuksen välinen kitka
- rakennusrungon kimmoinen vaimennus
- teräsbetonirakenteiden halkeamien sulkeutuminen ja avautuminen
- viskoosi vaimennus
- metallien edestakaisen myötämisen aiheuttama plastinen vaimennus eli hystereesi

Rakenteen vaimennuksen vaikutus maanjäristyksen aikana syntyvän värähtelyn maksimikiikhtyvyyteen on periaatteellisesti esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Vaimennuksen vaikutus värähtelyyn, jonka aiheuttaa keskimääräinen hyvin voimakas maanjäristys. Eräiden tunnettujen maanjäristysten aiheuttamat kiihtyvyydet saadaan kertomalla kuvan kiihtyvyyssordinaatat seuraavilla kertoimilla: (1) El Centro, 1940 2,7, (2) El Centro 1934 1,9, (3) Olympia 1949 1,9, (4) Taft, 1952 1,0.

Taulukossa 1 on esitetty eräiden rakennetyyppien vaimennuskertoimia ilman myötämisen vaikutusta, jonka vuoksi taulukko 1 ei sovellu sellaisenaan rakennetyyppien keskinäisen hyvyyden vertailuun.

Taulukko 1 Eräiden rakennetyyppien vaimennuskertoimia.

	Vaimennus % kriittisestä
Hitsattu teräskehä, seinät irti	2
Hitsattu tai pultattu teräskehä, ulkoseinät jäykät	5
Teräskehä, betoniset jäykistysseinät	7
Teräsbetonikehä	5
Teräsbetonikehä, betoniset jäykistysseinät	10
Puurakenteiset jäykistysseinät	15

Erikoisesti metallirakenteiden ominaisvaimennus on varsin pieni kimmoisessa tilassa. Plastisten muodonmuutosten syntyessä niiden energian absorboimiskyky kasvaa aivan olennaisesti. Tämä voidaan käsittää myös ominaisvaimennuksen huomattavana lisääntymisenä. Kuvasta 3 voidaan todeta, että tällöin myös rakenteeseen kohdistuva kuormitus pienenee olennaisesti. Voimakkaissa maanjäristyksissä rakenteen kimmainen kantokyky ylittyy helposti, mutta rakenteosien edestakaisiin myötäämisiin sitoutuva energia estää värähtelyiden kasvamisen niin suureksi, että rakennus sortuisi. Näin ollen on tärkeää suunnit-

tella rakenteet siten, että niillä on lujuuden lisäksi myös riittävä sitkeys.

Suunniteltaessa rakennetta maanjäristysalueelle ei eri rakenneosia voida mitoittaa toisistaan riippumatta kiinteälle maanjäristyskuormalle, sillä sen suuruus riippuu hyvin huomattavasti myös muista rakenneosista. Mikäli maanjäristyksen hyvin kestävä rakenteen jotain osaa vahvistetaan, se aiheuttaa usein sen, että rakenne ei enää kestäkään maanjäristystä vahvistetun osan suurentaessa kiinnityskohtiinsa kohdistuvaa rasitusta. Erityisesti rakenneosien liitokset ovat vaarallisia kohtia, joissa saattaa helposti syntyä haurasmurtumia. Liitokset onkin suunniteltava siten, että niiden lujuus on selvästi suurempi kuin liitettävien rakenneosien myötökuorma. Tästä syystä elementtirakenteita on usein vaikea soveltaa käytettäviksi maanjäristysalueilla.

YLEISTÄ MITOITUSMENETELMISTÄ

Mitoitettaessa rakenteita seismisille voimille käytetään useita eri menetelmiä, jotka voidaan jakaa kahteen pääryhmään

- staattisten korvausvoimien menetelmä
- dynaamiset mitoitusmenetelmät

Valtaosa suunnitelluista rakenteista on mitoitettu käyttämällä staattisten korvausvoimien mitoitusmenetelmiä, joiden käyttöön myös useimpien maiden normit perustuvat.

Staattisten korvausvoimien menetelmässä maan vaakasuuntaisesta värähtelystä rakenteeseen aiheutuvat dynaamiset hitausvoimat korvataan staattisilla vaakakuormilla, joiden kokonaismäärä on samalla rakenteen ja maaperän välillä vaikuttava kokonaisleikkausvoima. Tämä saadaan kaavasta

$$V = C \cdot m \quad (2)$$

jossa

m on rakenteen kokonaismassa, joka oman massan lisäksi sisältää rakenteeseen maanjäristyksen aikana todennäköisesti vaikuttavan hyötykuorman tai sen osan,

C on seismistä vaakakiihtyvyyttä kuvaava kerroin, jonka arvo vaihtelee yleensä välillä 0,05 g...0,20 g (g = maan vetovoiman kiihtyvyys).

Kertoimien suuruus määräytyy yleensä seuraavien seikkojen perusteella

- alueen yleinen maanjäristysalttius,
- rakenteen (alin) ominaistajuus,
- paikallisen maaperän vaikutus,
- rakenteen käyttötarkoitus,
- kantavana rakenteena käytetty rakennustyyppi, jonka perusteella pyritään arvioimaan rakenteen jäykkyys ja sitkeys.

Rakenteen suunnittelu aloitetaan yleensä etsimällä kerroin C ko. maan normeista.

Kaavasta (2) saatava kokonaiskuorma jaetaan rakenteen alinta ominaisvärähdys-

muotoa mukailevalla tavalla massakeskittyihin vaikuttaviksi pistekuormiksi siten, että ylempänä olevia massoja painotetaan enemmän, yleensä lineaarisesti niiden maanpinnasta laskettujen etäisyyksien suhteissa. Mikäli rakenteen ominaisvärähdysaika on pitkä, lisätään rakenteen yläosaan vielä suuremmista ominaistaajuuksista aiheutuva ylimääräinen pistekuorma.

Rakenteen sitkeyden vaikutus, joka staattisissa mitoitussuunnitelmissä ei tule näkyviin, on normeissa otettu huomioon erillisillä rakenteellisilla määräyksillä. Lisäksi normeissa on asetettu varsin ankaria rajoituksia rakenteen muodon, koon, massojen ja jäykkyyskierroksien jakaantumisen sekä riittävän säännönmukaisuuden suhteen, joka on välttämätöntä, jotta staattisilla mitoitussuunnitelmillä saataisiin riittävän oikea kuva rakenteen käyttäytymisestä maanjäristyksissä.

Staattisten korvausvoimien menetelmä, joka usein riittää myös rakenteen lopulliseen mitoitukseen, soveltuu melkein aina alustavan yleissuunnittelun, jäykistysjärjestelmän ja jäykisteiden lukumäärän määrittämiseen.

Sitkeyteen nähden voidaan asettaa vaatimus [1], että murtumiseen johtavan muodonmuutoksen tulee olla 2-4 kertaa myötämisen alkamiseen johtava muodonmuutos.

Tarkin dynaamisista menetelmistä on aika-askelin suoritettu suora integrointimenetelmä, jossa kuormituksenä käytetään joko aikaisemmista maanjäristyksistä rekisteröityjä kiihtyvyyksien-aika diagrammeja tai niitä simuloidaan tietokoneohjelmin. Laskelmissa voidaan määrittää rakenteen sekä kimmoisuus että plastinen käyttäytyminen kunakin ajanhetkenä. Laskelmat voidaan suorittaa myös käsittelemällä rakennetta kolmidimensioisena. Mitoitusmenetelmä tulee kalliiksi, koska rakenne täytyy laskea jokaisena valittuna ajanhetkenä, yleensä useita satoja kertoja. Laskennan tarkkuus on tietysti riippuvainen valitun kuormitusdiagrammin hyvydestä ja rakenteen ominaisuuksien, erikseen hystereesin kuvaamisen tarkkuudesta.

Värähtelymuotoanalyysi on edellistä huomattavasti yksinkertaisempi menetelmä, jossa rakenteen jokainen ominaisvärähdysmuoto analysoidaan suoralla integroinnilla samalla tavalla kuin edellä. Tällöin rakenteella on kuitenkin kerrallaan vain yksi vapausaste, ja siis yksi laskettava parametri. Koska menetelmässä lasketaan eri ominaisvärähdysmuotojen aiheuttamat kuormat eri ajanhetkinä superponoimalla yhteen, menetelmää voidaan käyttää luotettavasti vain rakenteen kimmoteoreettiseen mitoitukseen.

Yksinkertaisin on vastespektrimenetelmä, jonka käyttöä eräät normit vaativat käytettäväksi staattisen mitoitussuunnitelman sijasta. Monivapausasteisen rakenteen kutakin ominaisvärähdysmuotoa vastaavan ominaistaajuuden perusteella määritetään maanjäristyskuormituksen vastespektristä sitä vastaavan kuormituksen arvo, ja eri ominaisvärähdysmuotojen aiheuttamat kuormat superponoidaan sopivalla tavalla. Superponoimisesta johtuen menetelmää voidaan käyttää vain kimmoisten rakenteiden analysoimiseen, joskin likimääräismenetelmiä on kehitetty myös rakenteen plastisten muodonmuutosten huomioimiseksi. Tämä suhteellisen yksinkertainen menetelmä soveltuu usein myös rakenteen mitoitukseen

käsin laskemalla.

RUNGON YLEISSUUNNITTELU

Edellä esitetyn ja yleisen värähtelydynamiikan perusteella voidaan johtaa seuraavat säännöt rungon yleissuunnittelua varten:

1. Rungon osilla tulee olla riittävä sitkeys.
2. Rungon osilla tulee olla riittävä vaimennus.
3. Vaakarakenteet myötävät ennen pystyrakenteita ja ennen vaaka- ja pystyrakenteen liitosta.
4. Liitosten lujuus 25...30 % suurempi kuin rungon osien myötökuormat.
5. Ei-kantavien osien kiinnitysten tulee olla sellaiset, etteivät ne muuta rungon ominaisuuksia esim. kerää jännityksiä.
6. Rakennuksen runko on suunniteltava kokonaisuutena.
7. Rungon tulee olla mahdollisimman jatkuva ja monoliittinen (hyperstaattinen).
8. Kaikkia epäkeskisyyksiä tulee välttää.
9. Palkkien ja pilarien loveuksia ja poikkipinnan äkillisiä muutoksia on vältettävä.
10. Pilarien ja jäykistävien seinien tulee olla jatkuvia ja tasapaksuja korkeussuunnassa.
11. Jäykistykseen tulee käyttää materiaaleja, joilla on selvä myötöraja.
12. Rakennuksen pohjan tulisi olla symmetrinen 2:n akselin suhteen.
13. Jäykistävät rakenneosat mahdollisimman tasaväliset.
14. Jäykistävät seinät päällekkäin koko rakennuksen korkeudelle.
15. Ulokkeita on vältettävä, samoin kuin rakennusrungon kaventamista ylemissä kerroksissa.
16. Pitkät ja kapeat rakennukset, samoin kuin L-muotoiset tai muut epäsäännölliset rakennukset on jaettava seismisillä saumoilla toisistaan riippumattomasti värähteleviin osiin. Sauman leveys on 50 mm rakennuksen korkeuden ollessa ≤ 6 m. Saumaa on levennettävä vähintään 13 mm jokaista 3 mm:n korkeuden lisäystä kohti, jolleivät taipumalaskelmat osoita, että tarvitaan leveämpi sauma rakennuksen osien yhteen lyömisen välttämiseksi. Myös perustukset on usein jaettava.
17. Rakennuksen tulisi olla mahdollisimman kevyt.
18. Yksinomaan vedetyistä diagonaalisauvoista koostuvaa jäykistysristikkoa (tie rod system) tulee välttää.
19. Vaakavoimia siirtävinä levyinä toimivat välipohjat on suunniteltava niin lujiksi, että ne pakottavat kaikki jäykisteet myötämään voimakkaan järistyksen aikana jäykisteiden mahdollisista erisuurista jäykyyksistä ja epäsäännöllisestä sijoituksesta huolimatta. Vaakavoimia siirtävät välipohjan osat eivät yleensä saisi myötää ennen kaikkien jäykisteiden myötämistä.

RAKENNUKSEN MUOTO

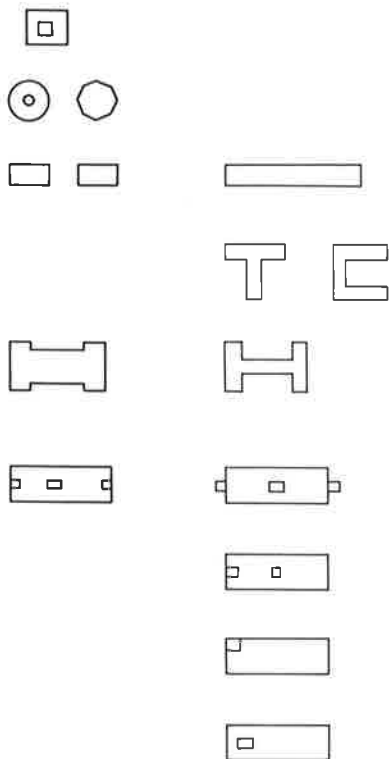
Jotta vaakavoimien aiheuttama rasitus jakaantuisi mahdollisimman tasaisesti eri jäykisteille ja jotta vältettäisiin paikalliset jännityshuiput, rakennuksen muodolle asetetaan seuraavat vaatimukset (Kuva 4 ja 5).

- Rakennuksen pohjamuodon tulee olla symmetrinen sekä jäykistävien elementtien sijoittelun että massojen jakautumisen suhteen.
- Jäykistävien seinien muodostaman systeemin kiertokeskiön (= rakennuksen vääntökeskiö) tulisi sijaita mahdollisimman lähellä rakennuksen painopistettä, jotta välttyttäisiin vääntövärähtelyiltä.
- Eri kerrosten painopisteiden ja vääntökeskiöiden tulisi olla samalla pystysuoralla.
- Eri kerrosten jäykkyyden tulisi olla sama.
- Rakennuksen pohjamuoto ei saa olla liian pitkänomainen eikä sisältää kapeita ulokkeita.

Yllä luetelluilla vaatimuksilla tähdätään rakennuksen tekemiseen mahdollisimman tasajäykäksi siten, että sen eri osilla olisi mahdollisimman samat ominaisvärähdysluvut, jotta välttyttäisiin rakennuksen eri osien heilahteluilta eri taajuuksilla, jolloin rakenne vaurioituu osien lyödessä vastakkain.

SUOSITELTAVA

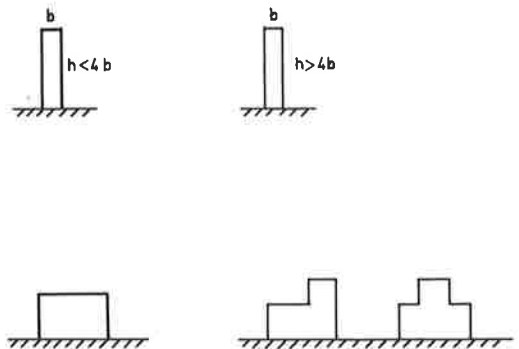
VÄLTETTÄVÄ



Kuva 4 Esimerkkejä suositeltavista ja vältettävistä pohjamuodoista.

SUOSITELTAVA

VÄLTETTÄVÄ



Kuva 5 Esimerkkejä suositeltavista ja vältettävistä rakennuksen poikkileikkausmuodoista.

Edellä esitetyn perusteella on aivan ilmeistä, että maanjäristykset asettavat rakennuksen yleissuunnittelulle sellaisia vaatimuksia, joihin kotimaisissa olosuhteissa ei ole totuttu. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että rakennuksen arkkitehtisuunnittelun alkaessa suunnitteluryhmässä on mukana maanjäristysasioihin perehtynyt rakennesuunnittelija. Jälkeenpäin on usein mahdotonta muokata rakennuksesta maanjäristyksen kestävää kohtuullisin rakennuskustannuksin, jos rakennuksen pohjamuodossa ja jäykisteiden sijoittelussa ei ole alunperin otettu huomioon maanjäristysolosuhteiden vaatimuksia.

RUNGON JÄYKISTÄMISEEN LIITTYVIÄ NÄKÖKOHTIA

Maanjäristysalueille rakennettavissa rakennuksissa voidaan runkorakenteena käyttää parhaiten joko taivutusjäykkää avaruuskehärakennetta tai jäykistäväillä seinillä varustettua rakennetta. Lisäksi on käytetty näiden yhdistelmiä.

Kehäjäykisteinen rakennus voidaan tehdä joko teräsrakenteisena tai paikalla valettuuna teräsbetonirakenteena. Betonielementtirakenteena sitä ei yleensä voida käyttää. Kehäjäykisteisen rungon tärkeimpiä ominaisuuksia ovat seuraavat:

- Rakenne on melko notkea, josta syystä sen muodonmuutokset ovat varsin suuria. Tämä tuottaa usein vaikeuksia ei-kantavien rakenneosien liittämässä rakennuksen runkoon, joka on suoritettava joustavin kiinnikkein. Vaadittu liikevara on noin 20...40 mm kerroskorkeudesta ja rakennusmateriaalista riippuen.
- Rakenteen riittävä sitkeys on helposti saavutettavissa, kun rakenne suunnitellaan siten, että kehäpalkit myötävät pilareiden pysyessä kimmoisina.
- Rakenteen notkeudesta johtuen sen ominaisvärähdysaika on pitkä (muutamia sekunteja), joten rakenteeseen kohdistuva maanjäristyskuormitus on pieni.
- Rakennettaessa pehmeälle maapohjalle saattaa maaperän ja rakenteen resonanssi-ilmiö tulla vaaralliseksi.
- Rakenteen analysointi on melko helppoa ja luotettavaa, mikäli ei-kantavien rakenneosien vaikutus rakenteen dynaamiseen toimintaan voidaan riittävän hyvin arvioida.

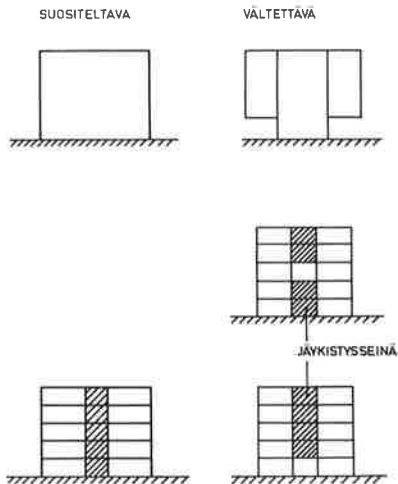
Seinäjäykisteinen rakennus on vaakavoimiin nähden jäykkä. Tavallisimmin käytetty rakennusmateriaali on paikallavalettu teräsbetoni tai teräs (ristikorakenteissa) sekä puu matalissa 1...2 kerroksisissa rakenteissa. Raudoitettut tiilirakenteet ja betonielementtirakenteet saattavat myös tulla kysymykseen, mutta niiden kohdalla riittävän sitkeyden saavuttaminen tuottaa usein vaikeuksia.

Rakennesysteemin ominaisuuksista voidaan mainita seuraavat:

- Koska rakenne on jäykkä, siihen kohdistuu suuri maanjäristyskuorma (yleensä maksimikuormitus).
- Rakenne kestää yleensä suuria vaakakuormia, mutta sen riittävä sitkeys on vaikeasti saavutettavissa.

- Jäykkyudesta johtuen muodonmuutokset ovat pieniä, joten ei-kantavien rakennosien suunnittelu on helppoa.
- Maaperän resonanssivaara on pieni, joten rakenne soveltuu hyvin perustettaessa pehmeälle maapohjalle.
- Rakenteen tarkka ja luotettava dynaaminen analysointi on usein vaikeaa.
- Perustuksiin kohdistuvat vaakavoimat ovat suuret.

Kuvassa 6 on esitetty ohjeita jäykisteiden sijoitteluun nähden.



Kuva 6 Suositeltavia ja vältettäviä jäykisteiden sijoituksia.

PERUSTUKSET

Maanjäristys aiheuttaa rakennuksen alla olevaan perusmaahan seuraavia vaikutuksia.

- epätasainen painuminen,
- perusmaan liukuminen,
- perusmaan mahdollinen nesteytyminen,
- perusmaan siirrokset.

Näiden vaikutusten lisäksi perustusten suunnittelussa on otettava huomioon maaperän ja rakennuksen rungon, erikoisesti jäykistävien osien, väliset suuret vaakavoimat sekä suuntaansa vaihtelevien kaatavien momenttien aiheuttamat pystyvoimien suuruuden vaihtelut.

Perustusten suunnittelussa on noudatettava seuraavia sääntöjä:

1. Perustusten lujuus vaakavoimiin nähden $>$ jäykistävien rakennosien lujuus.
2. Jäykistävien rakennusosien perustusten tulee olla mahdollisimman jäykät kiertymiseen nähden.
3. Perustusten epätasaista painumista on pyrittävä välttämään.
4. Erillisten perustusten kuten pilarianturoiden keskinäinen vaakaliike on estettävä sitein, jotka mitoitetetaan noin 1/10:lle perustusten pystykuormasta.

5. Maanjäristyksen aiheuttama vaakavoima siirtyy maaperästä perustuksiin osittain kitkan ja osittain passiivipaineen välityksellä, jonka vuoksi perusmuurit joudutaan mitoittamaan passiivipaineen aiheuttamalla taiputukselle.
6. Jos perusmaa on altista tärinän aiheuttamalle nesteytymiselle, koko rakennuksen stabiliteetti on tarkistettava tällaisessa nesteytymistilanteessa. Perustusten suunnittelussa on erikoisesti muistettava, että yleensä koko rakennusrungon suunnittelu ja mitoitus perustuu otaksumalle yhtenäisestä ja yhtenä kappaleena värähtelevästä jäykästä perustuksesta.

LIITTYVÄT JA TÄYDENTÄVÄT RAKENNUSOSAT

Keveiden rakennusosien itsensä kohdalla ei ratkaisu yleensä poikkea Suomen oloihin sopivasta rakenteesta, koska keveiden rakenteiden vaakakuormat jäävät pieniksi ja pystykuormat sisältyvät yleensä oman painon varmuuskertoimiin. Suurimmat poikkeamat tulevat kiinnitys- ja liitosdetaljien kohdalle. Kiinnitykset on yleensä mitoitettava 0,5...2,0 kertaa osan oman painon suuruiselle vaakavoimalle.

Pystysuora tärinä pyrkii irrottamaan useita tavanomaisia kiinnitys- ja ripustusratkaisuja, jotka sen vuoksi on suunniteltava uudestaan.

Taipuisan rakennusrungon muodonmuutokset johtavat liittyvän rakenneosan vaurioitumiseen jo pienehkössä maanjäristyksessä, jos liittymiskohdassa ei ole liittävästä liikevaraa (20...40 mm).

Putkien ja sähkölaitteiden tulee olla nivelöityjä seismisten saumojen ja rakennuksen ja maaperän välisissä kohdissa.

RAKENTEIDEN KOEKUORMITUS

Täysikokoisen valmiin rakennuksen koekuormitus maanjäristyksen aiheuttamalla tärinällä on tietenkin käytännössä lähes mahdotonta. Joitakin kokeita on tehty voimakkailla räjähdyspanoksilla, etupäässä maanalaisten ydinräjätysten yhteydessä tekemällä mittauksia räjähdyspaikan lähellä rakennetuissa koetalloissa. Ydinräjättyksen aiheuttama maaperän tärinä on todettu hyvin samanlaiseksi kuin maanjäristyksestä aiheutuva. Koetalossa mitatut kiihtyvyydet ja todetut vauriot vastasivat myös melko hyvin maanjäristyksen aiheuttamia.

Tavallisesti kuitenkin koekuormitetaan laboratoriossa mittakaavaan 1/2 - 1/3 tehtyjä rakennusten jäykistysjärjestelmän osia ja niiden liitoksia. Koekuormituksia tehdään periaatteessa kahdella eri tavalla:

- Täydellinen dynaaminen koekuormitus, jossa rakenteen perustusta vastaavaan osaan kohdistetaan mitattu maanjäristyksen vaakakiihtyvyys tai siirtymäspektri ja todetaan rakenteen mahdollinen vaurioituminen.
- Hidas kvasistaattinen koe, jossa rakennetta kuormitetaan vaakasuorilla edes-

takaisilla heilahduksilla, joiden amplitudi ja lukumäärä vastaa odotettavissa olevan maanjäristyksen aiheuttamia ja jossa kokeen aikana mitataan jäykistävän rakenteen jännitykset ja muodonmuutokset sekä syntyvät hystereesisilmukka. Mittausten perusteella voidaan laskea jäykistävän rakenteen kyky absorpoida energiaa ja todeta riittäisikö tämä kyky todellisen rakennuksen pystyissä pysymiseen järjestyksen aikana.

Jälkimmäisen kokeen etuna on sen helppuus yksinkertaisempien kuormituslaitteiden vuoksi ja helpompi mittaustekniikka. Kokeen seuraaminen on hitauden vuoksi helpompaa ja koe voidaan tarvittaessa pysäyttää havaintojen tekemistä varten.

Jälkimmäiseen koetyyppiin tarvitaan sähköisesti ohjattavat hydraulisilla veto-puristussylintereillä varustettu kuormituslaitteisto ja riittävän suuri ja jäykkä jännitysalusta. Koe voidaan usein suorittaa helpoimmin vaakatasossa siten, että koestettava jäykistysrakenteen "kaadetaan" lattialle, johon se ja pysty- sekä vaakakuormien simuloinnissa tarvittavat sylinterit kiinnitetään pulteilla. Jäykistysrakenteen vaakaliikkeiden laakerointina käytetään teflonlevyjä tai vastaavia.

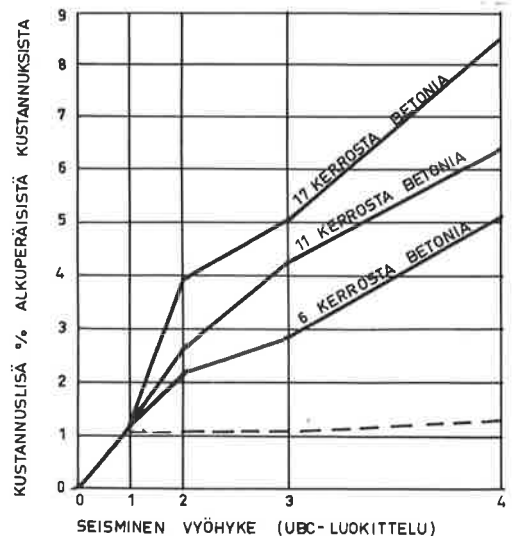
Tämän tyyppisten koekuormitusten käyttö on erittäin suositeltavaa ainakin Suomen oloissa, joissa kokemusta maanjäristysrakenteiden suunnittelusta on vähän ja kaikkia liike- ja murtumismahdollisuuksia ei suunnittelussa varmasti osata ottaa huomioon. Koestukseen sopivia laitteistoja on mm. Teknillisen Korkeakoulun rakennusinsinööri-osastolla Otaniemessä.

MAANJÄRISTYKSEN VAIKUTUS RAKENNUSKUSTANNUKSIIN

Maanjäristysten huomioonottamisen vaikutuksesta rakennuskustannuksiin ei suomalaisilla rakentajilla toistaiseksi ole käytettävissä yleistettävissä olevaa omakohtaista tietoutta. Myös kirjallisuudessa aihetta on käsitelty varsin vähän [1, 5, 6]. Kirjallisuustietojen perusteella voidaan todeta, että maanjäristykset lisäävät kokonaisrakennuskustannuksia keskimäärin n. 5 % suurimpien arvojen ollessa n. 10 %.

Kuvassa 7 on esitetty kustannuslisäysten riippuvuus maanjäristysvyöhykkeestä Whitmanin mukaan [1]. (Vyöhykejako on on USA:n normien mukainen).

Koska maanjäristysalueilla raken-



Kuva 7 Maanjäristysten aiheuttama lisäys tyyppillisen asuinrakennuksen rakennuskustannuksiin.

taminen poikkeaa Suomessa käytetyistä menetelmistä etenkin elementtirakentamisen osalta huomattavasti, täytynee edellä annettuihin kustannusten kirjallisuustietoihin suhtautua varauksellisesti.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Edellä esitetyn perusteella voidaan todeta, että maanjäristyksen kestävää rakennusta ei ole taloudellista rakentaakaan, vaan rakennus suunnitellaan pysymään pystyssä voimakkaimmankin järistyksen aikana ja vaurioitumaan vain lievästi keskimääräisessä järistyksessä. Tämä suunnittelufilosofia johtaa siihen, että erikoisesti jäykistäville rakenneosille asetetaan vaatimuksia paitsi lujuuden alarajaan nähden myös lujuuden ja jäykkyyden ylärajaan sekä sitkeyteen ja energian absorptiokykyyn nähden.

Asetetut vaatimukset johtavat monin paikoin tavanomaisista poikkeaviin rakenneratkaisuihin, joiden kehittäminen vaatii totutun ajattelutavan muutosta.

KIRJALLISUUTTA

- [1] Dowrich, D.J., Earthquake Resistant Design. John Wiley & Sons 1977. 374 s.
- [2] Newmark, N.M., Rosenblueth, E., Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall 1971. 640 s.
- [3] Clough, R.W., Penzien, J., Dynamic of Structures. McGraw-Hill, New York 1975.
- [4] I.A.E.E. Earthquake Resistant Regulations - A World List, International Association for Earthquake Engineering, Tokio 1973.
- [5] Whitman, R.V., Biggs, J.M., Brennan, J., Cornell, C.A., Newville, R. de, Vanmarcke, E.H., Seismic Design Analysis. Structures Publication No 381, Massachusetts Institute of Technology, March, 1974.
- [6] Hollings, J.P., The Economics of Earthquake Engineering, Bulln. New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 4. No. 2, April 1971.
- [7] Ropponen, H., Maanjäristyksen huomioon ottaminen talorakenteiden suunnittelussa. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu rakennusinsinööriosasto 1977
- [8] Clough, R., Bertero, V., Laboratory model testing for earthquake loading. Journal of the Engineering Mechanics Division No 6 December 1977 p. 1105...1124
- [9] Hudson, D., Dynamic tests of full-scale structures. Journal of the Engineering Mechanics Division No 6. December 1977 p. 1141...1157
- [10] Jumppanen, P., Maanjäristyskuormat ja rakennuksen rungon suunnittelu. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 11 No 2. 1978 s. 27...45

*Pekka Kanerva, prof., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi
Ilpo Salo, dipl.ins., Teknillinen Korkeakoulu, Otaniemi*