

Teräsrakenteiden T&K-päivät
Teräsrakenneyhdistys ry

Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus

Sisältö	Sivu
1 Johdanto	1
2 Maanjäristyksistä	2
3 Suunnittelukriteerit	4
4 Konseptisuunnittelu, maanjäristysvoimien laskenta ja detaljit	5
5 Aikahistoriat ja kiihtyvyysspektri	7
6 Seismiset analyysimenetelmät	8
7 Teräsrakenteet maanjäristyksessä	10
8 Maanjäristysmitoituksen kompastuskivet	12
9 Yhteenveto	13

1 Johdanto

Maanjäristykset ovat merkittävä riski ihmisille ja rakennuksille seismisesti aktiivisilla alueilla. Ne ovat olleet 1900-luvulla tulvien jälkeen toiseksi suurin kuolemia aiheuttava luonnonkatastrofi. Voimakkaan maanjäristyksen osuessa tiheästi asutetulla ja heikosti rakennetulla alueelle aiheutuu todellisia suurkatastrofeja, kuten kävi Haitissa 2010 (200 000 kuollutta). Taloudelliset menetykset monissa vähemminkin kuolonuhreja aiheuttaneissa maanjäristyksissä ovat olleet jättimäisiä. Suorien vaikutusten lisäksi tulee huomioida maanjäristysten epäsuorat vaikutukset, kuten tsunamit, tulipalot ja kulkutaudit.

Koska maanjäristyksien tapahtumisaikaa ei pystytä ennustamaan, ihmisiä ei voida etukäteen neuvoa siirtymään ulos rakennuksista tai evakuoidea kokonaan vaarallisia alueita. Asianmukainen rakenteiden maanjäristyssuunnittelu vähentää kuitenkin tehokkaasti tuhoja. Länsimaissa ongelmana ovat vanhemmat ennen moderneja rakennusmääräyksiä valmistuneet talot. Monissa kehittyvissä maissa saatetaan tinkiä maanjäristyksiin varautumisesta, koska resurssit ovat rajalliset ja tuhoisia maanjäristyksiä ei ole sattunut pitkään aikaan. Tämä saattaa olla maanjäristyksen sattuessa tuhoisaa rakennusmateriaalien ollessa tyyppillisesti painavia ja hauraita (kivi, tiili tai betoni).

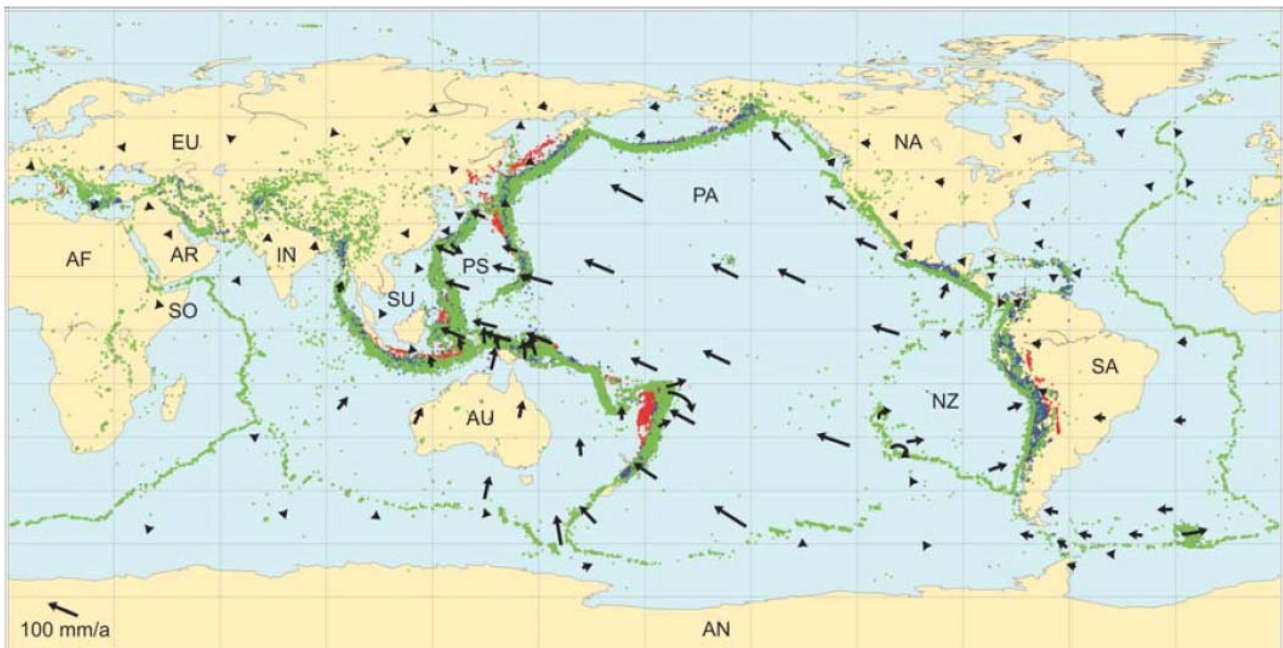
Kokemus on osoittanut, että teräsrakenteet selviävät yleensä maanjäristyksistä kohtuullisen hyvin. Tähän on syynä teräksen sitkeys ja kyky mukautua toistuviin plastisiin muodonmuutoksiin. Teräsrakenteisiin muodostuu maanjäristyksessä paljon plastisia niveliä tai muita pysyviä muodonmuutoksia, jotka syövät järjestyksen energiaa. Suunnitteluvaiheessa teräksen sitkeyttä voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi ja pienentää sen perusteella maanjäristyskuormia. Teräs on rakennusaineena kevyttä lujuuteensa nähden. Koska maanjäristyskuormat hitausvoimina ovat verrannollisia rakenteen massaansa, jäävät ne teräsrakenteilla pieniksi. Isotrooppinen ja homogeeninen teräs on myös ideaalinen materiaali rakennelaskennan kannalta.

Teräsrakenteiden maanjärstysmitoituksen tunteminen Suomessa on tärkeää siksi, että monella kotimaisella yrityksellä on vientiä alueille, joissa maanjärstys on huomioitava rakenteiden mitoituksessa. Globalisoituvassa maailmassa ei ole todennäköistä, että tämä tarve tulisi tulevaisuudessa ainakaan vähenemään. Muun keskeisen suunnittelun ollessa Suomessa ja aikataulujen jatkuvasti kiristyessä ei ole mahdollista eriyttää maanjärstyslaskentaa kohdemaan asiantuntijoille. Ainoaksi vaihtoehdoksi jää hoitaa asia kotimaisin voimin.

Tämän artikkelin tarkoituksena on lisätä teräsrakennesuunnittelijoiden tietoisuutta maanjärstysmitoituksesta esittelemällä tärkeimpiä asiaan liittyviä seikkoja. Artikkelin lähestymistavan on tarkoitus olla aiheeseen johdatteleva, eikä tieteellisen tarkasti valittuihin yksityiskohtiin paneutuva.

2 Maanjärstyksistä

Maapallon kova ja ohut pintakerros eli ns. litosfääri on jakautunut mannerlaatoiksi, jotka pyrkivät liikkumaan plastisen sisäosan päällä maan sisäisten konvektiovirtausten seurauksena. Tämä hidas maan pintakerroksen eläminen ei pääse tapahtumaan jouhevasti kitkan vastustaessa liikettä. Mannerlaattojen pyrkimys siirtyä aiheuttaa kasvavaa jännitystä niiden reuna-alueilla. Jossain vaiheessa kitka ei enää riitä vastustamaan laattojen liikettä ja syntyy äkkinäinen nykäys eli maanjärstys. Maanjärstyksessä maaperän vyöhykkeet liukuvat siirroslinjan suuntaisesti tai siirtyvät pystysuunnassa toisiinsa nähden.



Kuva 1. Maanjärstystä tapahtuu paljon mannerlaattojen reuna-alueilla. Kuvassa on esitetty vuosina 1900 – 2004 tapahtuneet maanjärstykset ja mannerlaattojen liikesuunnat. Vihreät ovat matalalla (alle 35 km), siniset keskisyvällä (35-200 km) ja punaiset syvällä (yli 200 km) tapahtuneita maanjärstykksiä (Korja, Heikkinen ja Karkkulainen, Miksi maapallolla tärisee?, Dimensio 4/2005).

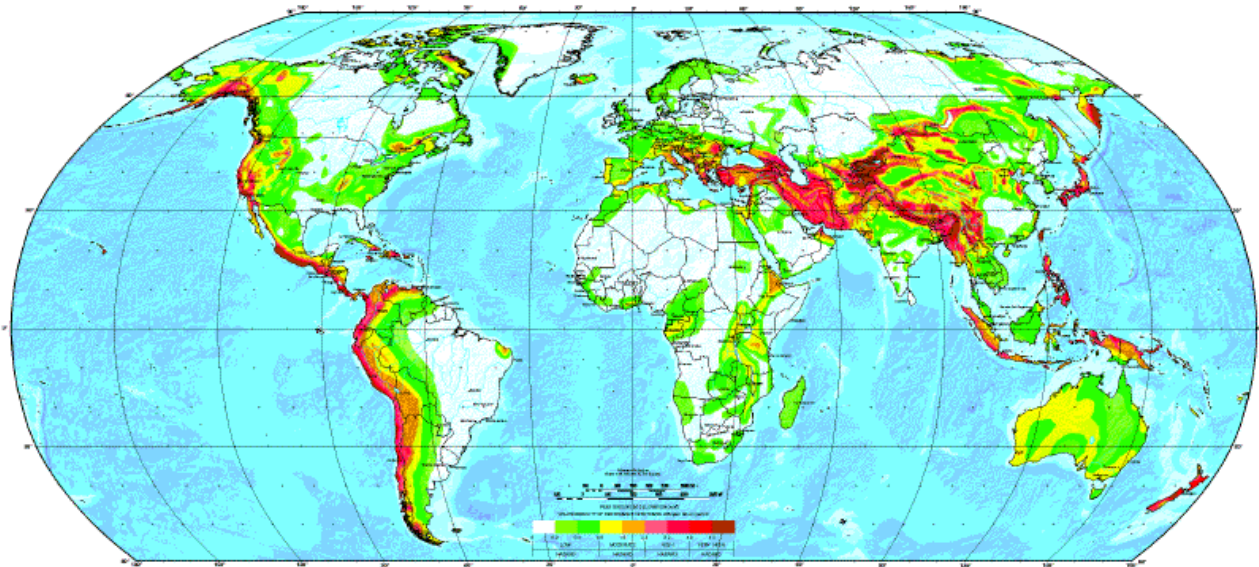
Kallioperän osien äkkinäinen liikahtaminen saa aikaiseksi seismisiä aaltoja, jotka lähtevät etenemään maanjäristyksen keskuksesta eri suuntiin maaperässä. Osa aalloista on maan sisällä eteneviä perusaaltoja ja osa pinnalla eteneviä pinta-aaltoja. Pinta-aallot aiheuttavat yleensä suurimmat tuhot varsinkin kauempana järistyksen keskuksesta. Rakennusten kannalta seismisten aaltojen aiheuttama vaakasuuntainen kiihtyvyys on merkittävämpää kuin pystysuuntainen kiihtyvyys ja tavallisesti suunnittelussa riittääkin, että huomioidaan vain vaakakiihtyvyys.

Valtaosa maanjäristyksistä sattuu mannerlaattojen reuna-alueilla (Kuva 1). Erityisen paljon niitä esiintyy Tyynen valtameren reuna-alueilla, missä arvioidaan vapautuvan 70 - 90 % maapallon seismisestä energiasta. Mannerlaattojen sisäosissa seismisesti aktiiviset alueet ovat maaperän ruhjevöhykkeiden lähetyvillä. Suomen kallioperä on hyvin vakaata ja meillä havaitut pienehköt maanjäristykset aiheutuvat pääsääntöisesti jääkauden jälkeisestä maannoususta. Maanjäristyksiä sattuu jatkuvasti, mutta niistä valtaosa on suuruudeltaan pienehköjä (Taulukko 1). Suuria paljon tuhoa aiheuttavia järistyksiä sattuu onneksi melko harvoin.

Taulukko 1 Maanjäristyksien keskimääräinen vuotuinen esiintymistiheys maapallolla.

Magnitudi	Vuotuinen esiintymistiheys
8,0 tai suurempi (erittäin voimakas)	1
7 - 7,9 (hyvin voimakas)	18
6 - 6,9 (voimakas)	120
5 - 5,9 (keskisuuri)	800
4 - 4,9 (lievä)	~ 6 200
3 - 3,9 (pieni)	~ 49 000
2 - 3 (hyvin pieni)	~ 360 000
1 -2 (erittäin pieni)	~ 3 000 000

Maanjäristyksen suuruuteen liittyy usein epäselvyyksiä ja väärinkäsityksiä. Järistyksessä vapautuvan energian suuruutta kuvataan maanjäristyksen magnitudilla, joka saa yleensä arvoja väliltä 1 – 9. Magnitudiasteikkoja on useita hieman erilaisia ja ne ovat logaritmisia, jolloin magnitudin kasvaminen yhdellä merkitsee yli 30-kertaista vapautuvaa energiamäärää. Intensiiteetti puolestaan kuvaa maanjäristyksen aiheuttamia tuhoja asteikon ollessa I – XII. Myös intensiteettiasteikkoja on useita erilaisia. Magnitudiasteikko on objektiivinen (perustuu mittauksiin) ja intensiteettiasteikko subjektiivinen (ihmisten tekemä arvio). Kallioperän maksimi vaakakiihtyvyys (peak ground acceleration, PGA) on rakennusten mitoituksessa käyttökelpoinen tiettyyn toistumisaikaan liittyvä (mahdollisen) maanjäristyksen suuruutta kuvaava tilastollisesti laskettu suure. Suunnittelussa käytettävä kiihtyvyyden arvo saadaan kulloisenkin kohdemaan kansallisista normeista. Mikäli tarvittavaa normia ei ole käytettävissä, suuntaa antava arvo on nähtävissä yleisistä PGA-kartoista (Kuva 2).



Kuva 2. Kallioperän maksimikiihtyvyys 10 %:n todennäköisyydellä seuraavan 50 vuoden aikana (www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP).

Maaperän maksimikiihtyvyyden perusteella voidaan tehdä karkea luokittelua seismisyyden tasosta:

- Alhainen seismisyys $a_g \leq 0,08g$
- Kohtuullinen seismisyys $0,08g < a_g \leq 0,24g$
- Korkea seismisyys $a_g > 0,24g$

Eurooppalaisten suunnitteluohjeiden (EN 1998-1) mukaan puhutaan hyvin alhaisesta seismisyydestä, jos kallioperän huippukihtyvyys vaakasuunnassa on alle $0,04g$ eli $\sim 0,39 \text{ m/s}^2$. Tällöin ei tarvitse huomioida suunnittelussa maanjäristysmitoituksen määräyksiä ja se voidaan tehdä pelkästään teräsnormin mukaan (EN 1993-1). Vastaavasti jos kallioperän huippukihtyvyys on $0,04g$:n ja $0,08g$:n ($\sim 0,78 \text{ m/s}^2$) välissä puhutaan alhaisesta seismisyydestä. Tällöin seismisessä suunnittelussa voidaan tietyn edellytyksin käyttää yksinkertaistettuja menetelmiä. Jos huippukihtyvyys ylittää $0,08g$:n tulee kaikki maanjäristysmitoituksen vaatimukset ottaa huomioon. Edellä mainittuihin raja-arvoihin vaikuttaa myös maaperä ja ne ovat eurooppalaisia suositusrajoja, joista voidaan poiketa kansallisesti. Vastaavasti muiden maiden normeissa on omat luokituksensa.

3 Suunnittelukriteerit

Rakennusten seismisessä mitoituksessa tulisi huomioida samanaikaisesti kaksi eri suunnittelukriteeriä, jotka liittyvät todennäköisyydeltään erilaisiin maanjäristyksiin. Näistä ensimmäinen on paikallisiin seismisiin olosuhteisiin nähden voimakkuudeltaan keskinkertainen maanjäristys, jonka voidaan olettaa tapahtuvan keskimäärin kerran rakennuksen suunniteltuna käyttöaikana eli tyypillisesti 100 % todennäköisyydellä seuraavan 50 vuoden aikana. Tämänkaltaisen maanjäristyksen ei saa aiheuttaa merkittäviä vaurioita kantaviin rakenteisiin ja syntyneiden vaurioiden tulee olla helposti korjattavissa.

Toinen tarkasteltava tilanne on hyvin harvinainen, mutta voimakkuudeltaan voimakas maanjäristys, joka aiheuttaa vakavia vaurioita kantaviin rakenteisiin. Tällöin ensisijainen tavoite on, että rakennus ei saa sortua tai muuten vaarantaa ihmishenkiä. Syntyvät vauriot voivat hyvinkin olla niin suuria,

että rakennuksen korjaaminen ei ole taloudellisesti järkevää ja uuden tekeminen tulee halvemmaksi. Tyypillisesti hyvin voimakkaan maanjäristyksen esiintymistodennäköisyytenä pidetään 10 % seuraavan 50 vuoden aikana, mikä tarkoittaa noin 475 vuoden keskimääräistä toistumisaikaa.

Rakennuksen käyttötarkoitus ja mahdollisen vaurion aiheuttamat välilliset riskit tulee myös huomioida. Jos kyseessä on yhteiskunnan toimintojen kannalta tärkeä rakennus tai järjestelmä (sairaala, paloasema, voimalaitos, sähköverkko, tärkeä silta tai pato, jne.) kasvatetaan suunnittelussa käytettyjä seismisiä kuormia, jotta rakenteet eivät vaurioituisi ollenkaan tai olisivat nopeasti palautettavissa toimintaan maanjäristyksen jälkeen. Vastaavasti ympäristölleen vaarallisia laitoksia (ydinvoimalat, kemiantehtaat jne.) suunniteltaessa kasvatetaan maanjäristyskuormia.

4 Konseptisuunnittelu, maanjäristysvoimien laskenta ja detaljit

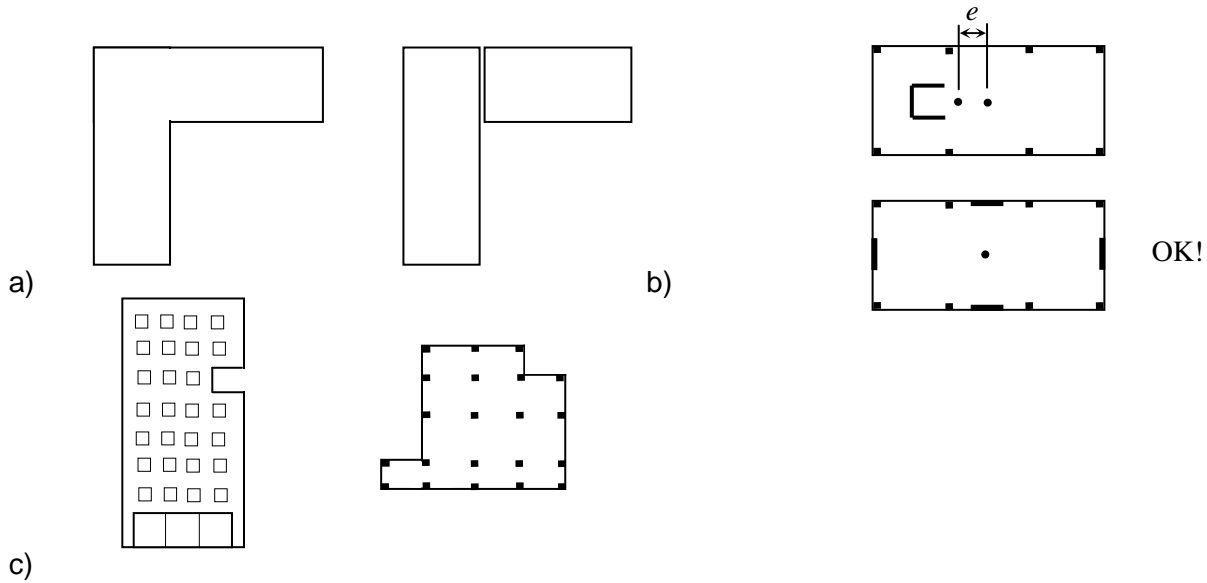
Rakennusten seismisessä suunnittelussa voidaan erottaa kolme eri osa-aluetta, jotka yhdessä muodostavat varautumisen maanjäristyksen mahdollisuuteen: Konseptisuunnittelu, maanjäristysvoimien laskenta ja yksityiskohtien suunnittelu. Seisminen suunnittelu ei siis käsitä vain pelkkien maanjäristyskuormien laskemista ja rakenteen mitoittamista niitä vastaan, vaan myös tarkoituksenmukaisen konseptin valintaa, jotta rasitukset jäisivät pieniksi, ja yksityiskohtien suunnittelu, jotta riittävä sitkeys olisi mahdollista saavuttaa.

4.1 Konseptisuunnittelu

Konseptisuunnittelu tarkoittaa rakennuksen ja sen osakokonaisuuksien sijoittelua ja muotoilua sekä rakennejärjestelmän valintaa niin, että se on maanjäristyksen kannalta edullinen. Monet konseptivaiheen ohjeet ovat paremminkin ideaaltaan yksinkertaisia periaatteita kuin varsinaisia mitoitusohjeita. Tehdyillä valinnoilla on kuitenkin merkittävä vaikutus lopulliseen maanjäristyskestävyyteen ja sen aiheuttamiin kustannuksiin. Konseptivaiheen ohjeet tulisi huomioida mahdollisimman aikaisessa vaiheessa suunnittelua, jotta vältettäisiin mahdolliset ristiriidat arkkitehtuurin ja tilankäytön sekä toisaalta maanjäristyksen vaatiman rakennesuunnittelun kanssa.

Konseptivaiheen ohjeista tärkein on se, että rakennuksen tulisi olla mahdollisimman symmetrinen massan ja jäykkyyden suhteen niin vaakatasossa kuin pystysuunnassa (Kuva 2). Symmetrian puute aiheuttaa seismisten voimien epätasaisen jakauman, rasituskeskittymiä ja vääntöä, joka kasvattaa usein selvästi sisäisiä voimia. Tehokas keino symmetrian parantamiseksi on pohjaltaan epäsymmetristen rakennusten jakaminen liikuntasaumoilla erillisiin symmetrisiin osiin. Saumojen tulee olla riittävän leveitä, jotta erillisinä toimivat osat eivät hakkaisi toisiaan vasten maanjäristyksessä. Muina ohjeina voidaan mainita yhtenäiset perustukset, rakennuksen jäykistysjärjestelmien jatkuminen yhtenäisinä ylhäältä alas asti ja se, että minkään kerroksen jäykkyys saisi olla selvästi pienempi kuin muiden.

Vaakasuuntaisia kuormia vastustavan jäykistysjärjestelmän valinta on iso osa konseptisuunnittelua. Valitulla jäykistysjärjestelmällä on suora vaikutus maanjäristyskuormien suuruuteen, sillä kuormien laskennan lähtökohtana oleva suunnitteluspektri riippuu ns. käyttäytymiskertoimesta, joka taas on erilainen eri jäykistysjärjestelmillä.



Kuva 2. a) Pohjaltaan epäsymmetrinen rakennus voidaan jakaa liikuntasaumalla symmetrisiin osiin. b) Jos vääntö- ja massakeskiö ovat eri paikoissa (mitta e iso), syntyy rakenteisiin vääntöä. c) Rakenteiden tulisi olla säännöllisiä pystysuunnassa ja rakennuksen rungossa ei saisi olla isoja ulokkeita tai syvennyksiä.

4.2 Maanjäristyskuormien laskenta

Rakennukseen kohdistuvat maanjäristysvoimat riippuvat:

- Rakennuspaikan seismisestä aktiivisuudesta
- Maaperän laadusta
- Rakennuksen tärkeydestä
- Rakenneratkaisuista.

Seisminen aktiivisuus (kallioperän maksimikihtyvyyden PGA) vaihtelee maantieteellisesti ja on nähtävissä paikkakunta-kohtaisesti kunkin maan normien kartoista. Annetut arvot liittyvät peruskallioon ja maakerrokset kallion päällä voimistavat maanjäristyksen vaikutuksia rakennuksiin. Tärkeyskertomella kasvatetaan yhteiskunnalle tärkeiden tai ympäristölleen vaarallisten rakennusten maanjäristysvoimia. Koska seismiset voimat aiheutuvat rakennuksen kiihtyvistä liikkeistä, muodostuvat ne sitä suuremmiksi mitä painavampia rakenteet ovat. Massa- ja jäykkyysjakauma määräävät rakennuksen dynaamiset ominaisuudet. Rakenneratkaisut ovat tärkeitä, koska usein maanjäristysmitoituksessa halutaan käyttää hyväksi rakenteiden kykyä mukautua suuriin vaakakuormiin sortumatta.

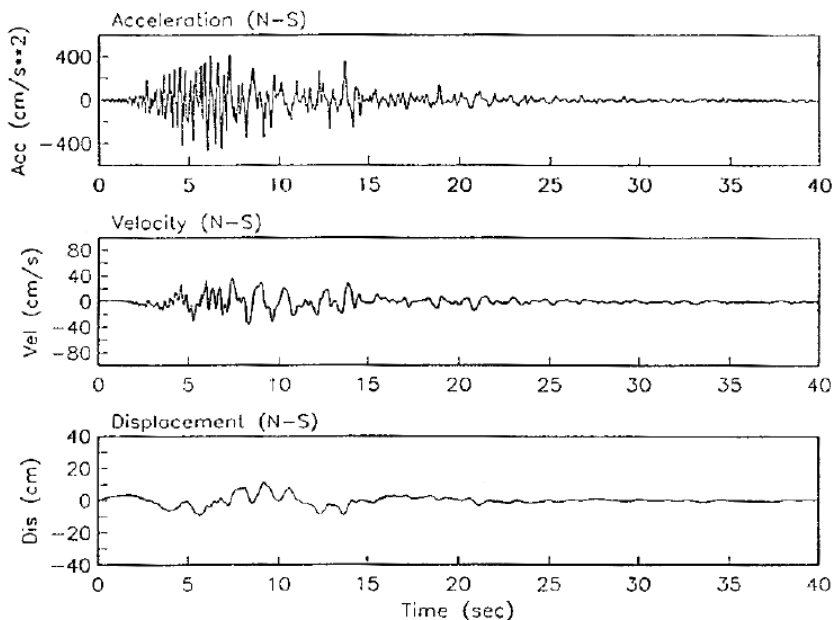
4.3 Detaljit

Maanjäristysnormeissa on tyypillisesti eri materiaaleihin (teräs, teräsbetoni, liittorakenteet, puu ja muuratut rakenteet) liittyviä erityismääräyksiä. Seismisten kuormitusten laskenta ei periaatteessa riipu materiaalista, mutta yksityiskohtien suunnittelu riippuu. Annettujen materiaali-kohtaisten suunnitteluohjeiden tarkoituksena on yleensä varmistua rakenteen sitkeästä käyttäytymisestä,

mikä on maajäritysmiotoituksessa ensiarvoisen tärkeä rakenteen ominaisuus. Niiden kohtien, joiden ei ole tarkoitus plastisoitua, tulee olla riittävän lujia. Huonosti toimivat liitokset ja muut yksityiskohdat voivat pilata rakennuksen toiminnan maanjäristyksessä.

5 Aikahistoriat ja kiihtyvyysspektri

Eri puolilla maapalloa tapahtuneista maanjäristyksistä on olemassa mittaustuloksia 1900-luvun alusta lähtien. Rakennusten suunnittelun kannalta kiinnostavimpia ovat eri suunnissa mitatut maaperän kiihtyvyydet ajan funktiona (Kuva 3). Mittauksien lisäksi myös tietomme maanjäristysten syntymekanismeista, voimakkuudesta, esiintymistiheydestä ja muista seismiseen riskiin vaikuttavista asioista ovat merkittävästi kasvaneet. Siten rakennusten seisminen mitoitus voitaisiin ajatella tehtävän tietyllä seudulla mitattujen aikaisempien maanjäristysten kiihtyvyyshistorioiden avulla huomioiden etäisyys siirroslinjasta, maaperän laatu ynnä muut asiaan vaikuttavat seikat.

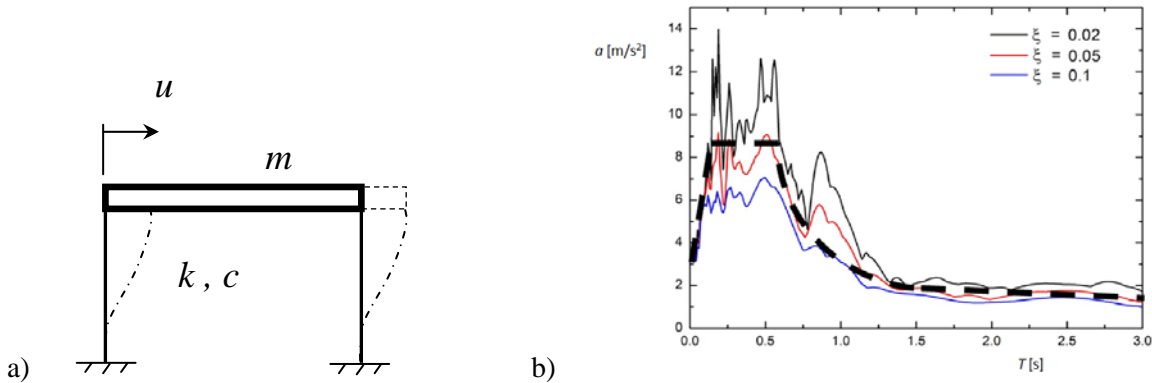


Kuva 3. Kaliforniassa 1989 tapahtuneen Loma Prietan maanjäristyksen pohjois-etelä suunnassa mitattu kiihtyvyy-, nopeus- ja siirtymähistoria (Seismic Design Handbook).

Kiihtyvyyshistorioiden käyttöön kuormitustietona liittyy muutama selvä ongelma. Näistä ilmeisin on maanjäristyksen satunnaisuus. Vaikka mitoituksessa käytetty kiihtyvyyshistoria vastaisi kyseisen paikan seismistä riskiä parhaalla mahdollisella tavalla, ei seuraava maanjäristys todennäköisesti kuitenkaan ole samanlainen. Maanjäristyssuunnittelussa pitäisi siten käyttää useita toisistaan poikkeavia kiihtyvyyshistorioita, jotta voitaisiin olla varmoja niiden kyvystä kuvata yhdessä riittävän hyvin tulevaa maanjäristystä. Lisäksi rakenteen vasteen laskeminen annetun kiihtyvyyshistorian perusteella on varsin työläs tehtävä. Kun kaikessa muussa rakennelaskennassa pärjätään lineaarisella statiikan analyysillä, edellyttäisi vasteen laskeminen dynamiikan ratkaisumenetelmien käyttöä.

Rakenteita mitoitettaessa ei tarvitse tietää maanjäristyksen aiheuttamia rasituksia (normaalivoima, leikkausvoimat, taivutusmomentit ja vääntömomentti) ajan funktiona, vaan riittää kun tiedetään maksimirasitukset. Tällöin käyttökelpoinen työkalu on kiihtyvyysspektri, joka tarkoittaa yhden

vapausasteen vaimennetun värähtelijän kokemaa maksimikihtyvyyttä ominaisvärähdysajan funktiona jollakin kiihtyvyyshistorialla (Kuva 4). Analogisesti voidaan määrittellä nopeus- ja siirtymäspekit, joiden voidaan osoittaa olevan (likimäärin) kytköksissä toisiinsa ja kiihtyvyysspektriin. Kiihtyvyysspektrin ansiosta rakenteen ominaisvärähdysajan T ja seismisen massan m perusteella saadaan selville suurin voima, mitä kyseinen maanjäristys aiheuttaa rakenteessa. Siten kiihtyvyysspektri antaa arvokasta tietoa maanjäristyksen taajuussisällöstä, mitä taas voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa rakennuksen jäykkyyden ja massan vaikutusta seismisten rasitusten ja siirtymien maksimiarvoihin.



Kuva 4. a) Yhden vapausasteen värähtelijä. b) Kiihtyvyysspektrejä suhteellisen vaimennuksen ξ eri arvoilla ja tasoitettu spektri, jota voidaan käyttää suunnittelussa.

Kiihtyvyysspektri liittyy aina johonkin kiihtyvyyshistoriaan. Tämän takia suunnittelussa tarvitaan mahdollisten eri kiihtyvyyshistorioiden tasoitettua käyrää, jota käytetään seismisten kuormien laskennassa. Maanjäristysnormeissa annetaan kussakin maassa käytettävä kiihtyvyysspektri niin, että kyseisen paikkakunnan kallioperän maksimikihtyvyys (PGA), maaperän vaikutus, rakennuksen tärkeys ja muut mahdollisesti asiaan vaikuttavat seikat tulevat huomioiduksi.

Todellisuudessa rakenteet ovat harvoin yhden vapausasteen systeemejä. Usein kuitenkin alin ominaismuoto dominoi ja rakenne voidaan kuvata kohtuullisella tarkkuudella yhden vapausasteen systeeminä. Jäykkyydeltään ja massaltaan monimutkaisemmissa tapauksissa tai haluttaessa tarkempia tuloksia, on myös korkeampien ominaismuotojen vaikutus huomioitava, jolloin laskentamallissa täytyy olla enemmän vapausasteita.

Voimakas maanjäristys on tavallisten rakennusten kohdalla suunniteltuun käyttöikään nähden epätodennäköinen. Siksi on taloudellisesti järkevää käyttää hyväksi teräksen kykyä plastisoitua ja mukautua murtumatta pysyviin muodonmuutoksiin syklisen kuormituksen alla. Rakenteissa oleva sitkeys (kyky sitoa energiaa) otetaan huomioon pienentämällä suoraan kiihtyvyysspektrin arvoja jakamalla käyttäytymiskertoimella, jonka suuruus riippuu valitusta jäykistysyhteisistä ja symmetrisyydestä. Näin saatua kiihtyvyysspektriä sanotaan suunnitteluspektriiksi, joka voi olla vaikkapa vain viidesosa alkuperäisestä ns. elastisesta spektristä.

6 Seismiset analyysimenetelmät

Rakenteen vaste (rasitukset ja siirtymät) maanjäristyksessä voidaan laskea usealla eri tavalla. Käytössä on niin lineaarisia kuin epälineaarisia statiikan ja dynamiikan menetelmiä. Tarvittava laskentatyö vaihtelee merkittävästi eri menetelmien välillä.

6.1 Lineaariset menetelmät

6.1.1 Korvausvoimamenetelmä

Yksinkertaisin lähestymistapa on korvausvoimamenetelmä, missä ideana on korvata dynamiikan tehtävä sellaisella staattisella kuormitusjakaumalla, joka antaa saman siirtymämuodon kuin mitä alkuperäisessä dynamiikan tehtävässä maksimissaan olisi ollut. Jos alin ominaismuoto kuvaa hyvin vastetta maanjäristyksen tapauksessa, voi korvausvoimamenetelmän olettaa antavan kohtuullisen hyviä tuloksia. Jos taas korkeammat muodot osallistuvat oleellisesti vasteeseen, ei korvausvoimamenetelmä voi antaa kovinkaan hyviä tuloksia. Niinpä menetelmän käyttö rajataan normeissa yleensä matalahkoille ja pysty sekä vaakasuunnassa symmetrisille rakennuksille. Käytännön suunnittelutyössä korvausvoimamenetelmä on kätevä, sillä riittää kun kussakin tarkastellussa suunnassa arvioidaan alin ominaisvärähdysaika ja lasketaan sitä vastaavat korvausvoimat. Nämä voimat muodostavat kuormitustapauksen, joka yhdistellään muiden kuormitustapausten kanssa halutulla tavalla. Rajoituksistaan huolimatta korvausvoimamenetelmää voidaan käyttää vertailuratkaisuna tai alustavassa suunnittelussa, missä ei ole mahdollista tehdä tarkempia analyysejä.

6.1.2 Vastespektrimenetelmä

Vastespektrimenetelmä on muodostunut nykyään eniten käytetyksi seismiseksi analyysimenetelmäksi. Siinä ratkaistaan aluksi rakenteen ominaismuotoja tarvittava määrä. Näitä muotoja vastaavien ominaisvärähdysaikojen ja osallistumiskertoimien perusteella saadaan kutakin ominaismuotoa vastaava staattinen voimajakauma, joiden vasteen perusteella voidaan yhdistellä lopullinen rakenteen vaste maanjäristyksessä. Mukaan otettavien muotojen lukumäärä riippuu halutusta tarkkuudesta ja siitä, miten suurelta osin muodot pystyvät kuvaamaan rakenteen käyttäytymistä maanjäristyksessä. Korvausvoimamenetelmää voidaan pitää vastespektrimenetelmän erikoistapauksena. Menetelmä löytyy käytännössä kaikista FEM-ohjelmista, eikä vaadi merkittävää lisälaskentatyötä verrattuna muihin rakennelaskennan analyyseihin verrattuna.

Useamman vapausasteen systeemeillä voidaan tarkastella erikseen eri ominaismuotoja tavallaan yhden vapausasteen systeeminä ja soveltaa kullekin muodolle ja vastaavalle ominaisvärähdysajalle kiihtyvyysspektriä erikseen. Kuhunkin ominaismuotoon kytkeytyy tietty osuus massasta. Vastespektrimenetelmän puutteena voidaan pitää sitä, että ominaismuotojen vaste on maksimivaste, joiden yhdistelyyn ei ole yhtä ja oikeaa menetelmää. Niitä ei kannata suoraan laskea yhteen, koska kunkin muodon tulokset ovat maksimiarvoja, jotka esiintyvät tietyssä kohdin eri aikaan. On esimerkiksi hyvin epätodennäköistä, että palkin poikkileikkauksessa esiintyisi kaikkien muotojen liittyvä suurin taivutusmomentti yhtä aikaa. Yhdistelymenetelmiä on useita erilaisia, mutta eniten käytetty on CQC (complete quadratic combination). Maksimiarvojen yhdistelyn seurauksena esimerkiksi normaali- ja leikkausvoiman sekä taivutusmomentin rasiuskuviot eivät enää vastaa sitä, mihin on tavallisesti totuttu statiikan tehtävässä.

6.1.3 Dynamiikan analyysi

Rakenteen vaste annetulle maaperän kiihtyvyyshistorialle voidaan ratkaista jotakin aikaintegrointimenetelmää tai ominaismuotoja hyväksikäyttävää menetelmää käyttäen. Tällöin saadaan selville siirtymät ja rasitukset kaikilla ajanhetkillä, eikä synny samanlaista eri muotojen tulosten yhdistelyongelmaa kuin vastespektrimenetelmän yhteydessä. Aikaintegrointimenetelmissä ongelmaksi muodostuu se, että aika-askeleen tulee olla riittävän pieni, mikä puolestaan kasvattaa menetelmän laskennallista hintaa. Lisäksi tarvitaan useampia kiihtyvyyshistorioita, jotka kuvaavat riittävän hyvin tulevaa maanjäristystä. Näiden valintaan liittyy omat ongelmansa.

6.2 Epälineaariset menetelmät

Teräsrakenteiden seismisessä suunnittelussa käytetään hyväksi teräksen sitkeyttä ja kykyä plastisoitua toistuvasti syklisessä kuormituksessa. Periaatteessa myös rakenneanalyysin tulisi mahdollistaa plastisten nivelien syntyminen (materiaalin epälineaarisuus) ja suuret siirtymät (geometrinen epälineaarisuus). Kaikissa em. lineaarisissa analyysimenetelmissä oletetaan, että rakenne käyttäytyy lineaarisesti kimmoisesti riippumatta kuormituksen suuruudesta. Ne eivät voi kuvata todellista rasiutusten jakautumista, mihin vaikuttaa merkittävästi rakenteeseen syntyvät plastiset nivelet.

6.2.1 Push over –analyysi

Epälineaarisen statiikan analyysin ja vastespektrin käyttö voidaan yhdistää ns. pushover-analyysissä, jolloin pystytään huomioimaan rakenteeseen syntyvät plastiset nivelet. Käytössä on useita eri variaatioita. Yleensä kuitenkin oletetaan, että rakenteen alin ominaismuoto dominoi ja maanjäristystä kuvaava voimajakauma vastaa alinta muotoa. Poikittaista kuormitusta kasvatetaan askeleittain samalla rekisteröiden rakennuksen huipun taipuma. Kun rakenteeseen syntyy plastisia niveliä, kuormituksen ja siirtymän yhteys muuttuu epälineaariseksi. Kuormituksen kasvattamista jatketaan kunnes rakenne sortuu tai saavutetaan tietty vaakasiirtymä. Näin saatua siirtymän ja voiman välistä epälineaarista yhteyttä voidaan käyttää rakenteen sen sisäisen voimajakauman arvioimiseen, joka vastaa alimman ominaisvärähdysajan siirtymäspektrin arvoa. Siirtymäspektri on puolestaan laskettavissa kiihtyvyysspektristä.

6.2.2 Dynamiikan analyysi

Suoraviivaisin ja todenmukaisin analyysimenetelmä on epälineaarinen dynamiikan analyysi. Se on samalla myös laskennallisesti kaikkein raskain, sillä sitä käytettäessä tulee ratkaista useita materiaalimalliltaan epälineaarisia dynamiikan tehtäviä askeltamalla. Menetelmä ei ole teräsrakenteiden käytännön maanjäristysmitoituksessa vielä käyttökelpoinen, mutta mahdollisuudet sen soveltamiseen paranevat tietokoneiden laskentakapasiteetin jatkuvasti parantuessa.

7 Teräsrakenteet maanjäristyksessä

7.1 Kapasiteettimitoitus

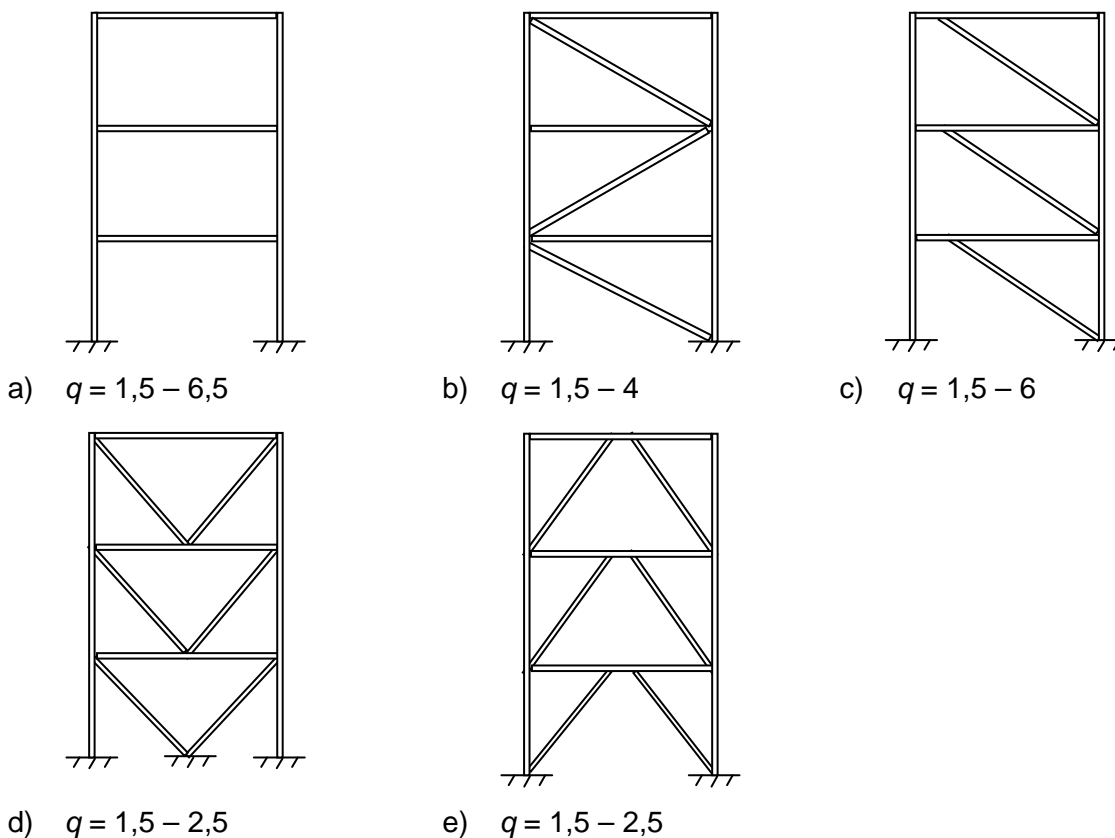
Teräsrakenteiden seismisessä mitoituksessa pyritään siihen, että voimakkaassa maanjäristyksessä rakenne lopulta muodostaa tietyn ennalta määrätyn mekanismin niin, että palkkeihin ja pilarien alapäihin syntyy plastisia niveliä ja vinositeet myötäävät vedossa. Joskus plastisten nivelten voidaan haluta syntyvän myös liitoksiin tai käytetään muita erityisiä ratkaisuita, kuten esimerkiksi ohutta teräksistä leikkausseinää tai erikoissiteitä, jotka eivät voi nurjahtaa. Syntyvän mekanismin tulee olla mahdollisimman laaja, eikä tiettyyn rakenteen osaan keskittyvä paikallinen mekanismi. Muut kuin plastisoituviksi tarkoitetut osat suunnitellaan niin lujiksi, että ne kestävät maanjäristyskuormat vaurioitumatta. Suunnitteluperiaatetta sanotaan kapasiteettimitoitukseksi (capacity design).

Maanjäristyksen sattuessa ideana on, että rakenteeseen siirtyvä energia dissipoituu lämmöksi plastisoitumisen kautta ennalta määrättyissä kohdissa. Siksi plastisoituvien osien sitkeys suuntaansa vaihtavassa syklisessä kuormituksessa on ensiarvoisen tärkeää. Käytännössä asiasta huolehditaan rajoittamalla osien poikkileikkausluokkaa ja erilaisilla yksityiskohtien (liitosten) vaatimuksilla. Todellisessa rakennuksessa energiaa dissipoituu maanjäristyksessä myös muualla kuin vain rungon tietyissä kohdissa. Rungon ja ei-rakenteellisten osien (esim. kuoret) liitoksissa

tapahtuu aina liukumista, missä kitka muuttaa järjestyksen energiaa lämmöksi. Myös betonisten välipohjien ja perustusten halkeilu sitoo energiaa.

7.2 Jäykistysjärjestelmät

Jäykkänurkkaisissa kehissä on mahdollista saada syntymään samanaikaisesti plastisia niveliä hyvin moneen eri kohtaan, jolloin maanjäristysenergia dissipoituu tehokkaasti lämmöksi (Kuva 5 a)). Arkkitehtonisesti ja tilankäytön kannalta momenttikehät ovat myös edullisia, sillä niissä jäykistysiteet eivät rajoita ikkunoiden tai väliseinien sijoittelua. Ongelmaksi momenttikehillä tulee niiden vaatimaton poikittaisjäykkyys kerroskorkeuden kasvaessa. Suuret kerrosten väliset siirtymäerot aiheuttavat normaalivoiman takia lisätaivutusta pilareihin ja rakennuksen kuoret ja väliseinät eivät välttämättä mukaudu suuriin siirtymiin. Jos palkkien ja pilarien välit muurataan umpeen tai muuten täytetään, jäykkänurkkainen kehä ei pääse vapaasti deformingumaan ja kehän toiminta muuttuu merkittävästi. Pilarien ja palkkien hitsausliitoksissa liitosalueille syntyy jännityshuippuja ja liitoksien yksityiskohtien suunnittelu täytyy olla huolellista. Korkeilla ja kapeilla rakennuksilla voivat nurkkapilareille tulevat isot nosteet muodostua ongelmiksi perustusten suunnittelussa.



Kuva 5. Erilaisia jäykistysjärjestelmiä, joissa käyttäytymiskerroin q vaihtelee jäykistysjärjestelmän mukaan. a) Jäykkänurkkainen kehä. b) Keskeisillä vinositeillä jäykistetty kehä. c) Epäkeskeisillä vinositeillä jäykistetty kehä. d) Keskeiset V-siteet. e) Epäkeskeiset käännetyt V-siteet.

Keskeiset vinositeillä jäykistetyssä kehässä siteet, palkit ja pilarit leikkaavat samassa pisteessä, jotta epäkeskisyyden aiheuttamat momentit jäisivät pieniksi (Kuva 5 b)). Vinositeillä saadaan

vaakasuunnassa huomattavasti jäykempi rakenne pienemmällä teräsmäärällä kuin jos käytettäisiin jäykkänurkkaista kehää. Toisaalta siteet rajoittavat tilan monikäyttöisyyttä ja ovat usein ikkunoiden tai kulkuteiden kohdalla. Voimakkaassa poikittaisessa kuormituksessa pitkälti vain vedolla olevat siteet kantavat ja puristuksella olevat nurjahtavat. Siteen pituus kasvaa pysyvästi joka kerta kun se vedossa myötää, mikä pienentää sitkeyttä ja aiheuttaa ”klappia”.

Epäkeskeiset vinositeet eivät kulje palkin ja pilarin leikkauspisteen kautta, joten sidevoima aiheuttaa jonkin verran taivutusmomenttia pilariin. Maanjäristyksessä ideana on, että siteen pään ja pilarin välinen palkin osa eli ns. linkki plastisoituu ja dissipoi energiaa. Muut rakenteen osat suunnitellaan sellaisiksi, että ne eivät nurjahda tai plastisoidu. Koska linkki on melko lyhyt, on epäkeskisillä siteillä jäykistetyllä kehällä liki samat ominaisuudet kuin keskeisillä siteillä jäykistetyllä kehälläkin. Niillä ei ole kuitenkaan em. keskeisten siteiden plastisoitumiseen ja venymiseen liittyviä ongelmia.

V-siteet (tai käännetty V-siteet) voivat olla keskeisiä tai epäkeskeisiä. Periaatteessa V-siteillä on samankaltaiset ominaisuudet kuin edellä oli esillä keskeisten ja epäkeskeisten siteiden yhteydessä. Koska V-siteet liittyvät toisesta päästään palkkiin, syntyy maanjäristystilanteessa palkille suuri poikittainen kuormitus. Vedolla olevassa siteessä on sen plastisen vetokapasiteetin suuruinen voima, kun puristuksella oleva side on puolestaan nurjahtanut ja sen jälkikriittinen puristuskapasiteetti on selvästi pienempi. Palkin tulee kestää tämä kuormitus ja välittää kuormat pilareille. Lisäksi siteiden ja palkin liitos tulisi olla riittävästi tuettu tasosta poispäin tapahtuvaa siirtymää vastaan.

8 Maanjäristysmitoituksen kompastuskivet

Insinööritoimistossa käytännön suunnittelutyössä on noussut esiin joitakin maanjäristykseen liittyviä kompastuskiviä, jotka voivat aiheuttaa ongelmia teräsrakenteiden seismistä mitoitusta tehtäessä. Joihinkin näistä on jo edellä viitattu ja tässä on yritetty kerätä yhtenäinen lista.

Suurin epäselvyyksiä aiheuttava asia on se, että maanjäristysmitoitus on vieras aihepiiri suomalaisille insinööreille. Tämä johtuu tietysti siitä, että kotimaahan suunniteltaessa seismistä mitoitusta ei tarvita, eikä sitä siten juuri opeteta korkeakouluissa ja yliopistoissa opiskelijoille. Tietämättömyys aiheuttaa enemmän tai vähemmän suoraan seuraavia ongelmia:

- Epäselvyydet seismisyyden tasosta kohdemaassa. Eri tavat kuvata maanjäristyksen voimakkuutta menevät sekaisin. Ei ole käsitystä siitä, että onko mahdollinen maanjäristys pienehkö, kohtalainen vai suuri.
- Maaperätiedot puuttuvat ja rakennuksen tärkeyttä ei ole mietitty loppuasiakkaan kanssa.
- Pelkkä maanjäristyskuormien laskenta ei riitä, vaan konseptisuunnittelu ja detaljit ovat myös tärkeitä. Esimerkiksi sidejärjestelmän muuttamisesta kesken kaiken suunnittelua aiheuttavia ongelmia ei ymmärretä.
- Maanjäristyksen aiheuttamia lisäkustannuksia ei voi sanoa tarkasti, koska seismisyyden tason lisäksi moni muukin asia vaikuttaa kokonaisuuteen. Luonnollisesti tarjousta tehtäessä on jotakin arvattava.
- Maanjäristysmitoitusta ei voi tehdä paloittain rakennukselle. Esimerkiksi vastespektrimenetelmässä tarvitaan koko rakennuksen ominaisuudet ja

värähdysajat. Joskus suhteellisen pienet muutokset yhdessä osassa vaikuttavat koko rakennuksen värähtelyominaisuuksiin.

Varsinaisessa teräsrakenteiden suunnittelutyössä vastaantulevia ongelmia ovat puolestaan:

- Normien yhdistely. Maanjäristyskuormat otetaan kohdemaan normista ja muuten suunnittelu haluttaisiin tehdä jollakin muulla normilla (eurokoodi tai ASCE+AISC). Suunnittelunormien yhdistely on ongelmallista ja periaatteessa kiellettyä, koska lopullista rakenteen varmuustasoa on vaikea verifioida.
- Teräsrakenteiden toimitusraja menee tyypillisesti pohjalevyn alapinnassa ja paikallinen toimija hoitaa betonirakenteiden suunnittelun. Maanjäristysmitoituksessa tulisi tarkastella koko rakennetta eli teräsrunkoa, mahdollisia alapuolisia betonikerroksia ja perustuksia yhtä aikaa. Jotta kokonaisuudesta tulisi järkevä, tulee teräsrakenteen perustuskuormia annettaessa olla huolellinen väärinkäsitysten välttämiseksi. Hyvin mitoitetusta teräsrungosta ei ole hyötyä, jos perustukset pettävät sen alta maanjäristyksessä.
- Erilaiset käytännöt maailmalla. Joissakin maissa maanjäristyksiin suhtaudutaan hyvin vakavasti ja toisaalla ne eivät juuri kiinnosta, vaikka seismisyyden taso olisi korkea.
- Maanjäristysnormit kehittyvät jatkuvasti (eurokoodit ENV vs. EN ja AISC -05 vs. -10) ja niissä on selviä eroja eri maiden välillä. Esimerkiksi käyttäytymiskertoimen arvot vaihtelevat selvästi eri normeissa.
- Onko spektrin arvot annettua suoraan muodossa m/s^2 vai suhteessa putoamiskiihtyvyyteen g ? Yksinkertainen asia, joka kuitenkin hämmästyttävän usein aiheuttaa kymmenen kertaa liian suuret tai pienet maanjäristysvoimat.

9 Yhteenveto

Maanjäristys täytyy huomioida kuormituksena hyvin monessa vientiprojektissa. Seismisesti aktiivisia alueita löytyy ympäri maapalloa: Tyynen valtameren reuna-alueet (koko Pohjois- ja Etelä-Amerikan länsirannikko, Venäjän Kaukoitä, Japani, Taiwan, Filippiinit, Indonesia, Uusi-Seelanti), Etelä-Eurooppa, Balkan, Turkki, Iran, Pakistan, Karibian alue jne. Joissakin tapauksissa maanjäristys muodostuu mitoittavaksi kuormitukseksi ja toisinaan taas seismiset kuormat jäävät pienehköiksi. Vaikka maanjäristyskuormat olisivat pienempiä kuin tuulikuormat, tulee huomioida kuitenkin maanjäristysmitoituksen erityismääräykset. Näiden määräyksien tarkoituksena on taata rakenteelle riittävä sitkeys, jotta se isossa maanjäristyksessä pystyisi sortumatta mukautumaan toistuviin plastisiin muodonmuutoksiin. Lisäksi on syytä noudattaa konseptisuunnittelun sääntöjä, joiden ideana on taata perusedellytykset maanjäristyksestä selviämiseksi.

Teräsrakenteet sopivat maanjäristysalueille, koska teräs on lujuuteensa nähden kevyttä ja sitkeää. Kun massaa on vähän, jäävät hitausvoimat pieniksi. Sitkeys mahdollistaa epäelastisen käyttäytymisen ilman murtumista ja rakenteeseen siirtyneen energian dissipoitumisen lämmöksi. Maanjäristysmitoituksen menetelmät ovat nykyään melko kehittyneitä ja vastespektrimenetelmä on muodostunut standardityökaluksi.

Maanjäristykseen liittyy joitakin epäselvyyksiä ja kompastuskiviä. Suurimpana syynä lienee se, että aihe on Suomessa vieras. Maanjäristysmitoituksen tarve kuitenkin vain todennäköisesti tulee tulevaisuudessa kasvamaan.