

RAKENNUKSEN OMINAISVÄRÄHDYSAJAN MÄÄRITTÄMINEN SEISMOGRAFIN AVULLA

Pekka Teikari

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 11
No. 4 1978 s. 1...8

YHTEENVETO: Rakennusten ominaisvärähdysaikojen määrittämiseksi rekisteröitiin puuskaisessa tuulussa talojen ylempien kerrostasojen liikettä horisontaaliseismografilla. Jäljempänä esitetään kyseisissä mittauksissa käytettyjä laitteita, niillä saatuja koetuloksia, sekä verrataan näistä rekisteröinneistä suoraan mittaamalla saatuja ominaisvärähdysarvoja samasta tutkimusmateriaalista laskettujen spektrien maksimeihin.

JOHDANTO

Muutamat viime vuosina tapahtuneet maanjäristykset ja ydinräjäytykset havaittiin poikkeuksellisen voimakkaina joissakin rakennuksissa eri puolilla Suomea. Pyrittäessä selvittämään ilmiön syitä ja tutkittaessa erityisesti rakennusten resonointia maaperän liikkeisiin tarvittiin tietoja niiden ominaisaajuuksista. Tapoja, joilla rakennuksen tai rakenteen ominaistaajuus määritetään löytyy useita. Laskennallisesti ominaistaajuus voidaan enemmän tai vähemmän yksinkertaisesti määrittää, kun tunnetaan tarpeeksi yksityiskohtia itse rakennuksesta ja mahdollisesti perustamistavasta. Tällaisia myös likiarvon laskemiseen tarkoitettuja laskukaavoja ovat esittäneet esimerkiksi Andersson 1951 (1), Borges 1955 (2), Salvadori-Heer 1960 (3) ja Housner 1962 (4).

Ominaisvärähtelyn määrittämiseksi kokeellisesti on käytettävissä ainakin seuraavat neljä erilaista tapaa:

1. Resonanssikoe, jossa itse rakennusta tai rakennuspaikkaa tärisytetään eri taajuuksilla tarkoitukseen soveltuvalla täryttimellä ja samanaikaisesti rekisteröidään tämän pakkovoiman rakennuksille aiheuttama liike. Resonanssitaajuudelta löydetään ominaisvärähdysaika ja voidaan päätellä jotain myös rakennuksen vaimennusasteesta (5).
2. Rakennukselle voidaan antaa alkupoikkeama esimerkiksi seiniin kiinnitetyillä raketeilla! (6) tai taivuttamalla sitä vaijerien ja vinssien avulla. Katkaisemalla jännittynyt vaijeri päästetään rakennus vapaasti värähtelemään. Rekisteröimällä vapaa värähtelyliike saadaan ominaisvärähdysaika ja vaimennusaste määritetyksi (5) (9).
3. Ihmisvoimin voidaan rakennus saattaa heilahtelemaan siten, että yksi tai useampi henkilö ylimmässä kerroksessa rytmillisesti siirtää painoaan puolelta toiselle samalla katsoen rekisteröintilaitteesta kuinka rakennus

käyttäytyy eri taajuisella keinutuksella. Näin menetellen voidaan löytää tehokkain rytmi, jolla rakennus saatetaan laajimpaan heilahteluun. Pysäyttämällä keinutus ja rekisteröimällä vapaa vaimeneva osa rakennuksen heilahtelusta voidaan määrittää sen ominaisvärähdysaika ja vaimennus kuten edellisessäkin menetelmässä (6) (10).

4. Tuulikoe, jossa rakennuksen heilahtelut puuskaisessa tuulessa rekisteröidään ja pyritään havainnoista etsimään puuskien väliltä kohta, joka mahdollisimman hyvin vastaisi vapaan heilahtelun vaihetta edellisissä menetelmissä (5) (10).

Kahden viimeksi esitetyn menetelmän etuna on se, että mittaustoimitus ei millään lailla häiritse, eikä keskeytä rakennuksen normaalia käyttöä, eikä myöskään ole vaaraksi rakenteitten kestävyydelle. Vuosina 1976-1977 suoritettiin Helsingin yliopiston seismologian laitoksen toimesta muutamia tuulimenetelmään perustuvia värähdysaikamittauksia Helsingissä, Porissa, Kouvolassa ja Kuopiossa. Näiden mittausten koejärjestelyjä ja erityisesti Kouvolassa suoritettua kokeen antamia tuloksia esitellään seuraavassa.

MITTAUSJÄRJESTELYT

Rakennusten huojahtelujen rekisteröimiseen käytettiin C5C-tyyppistä horisontaaliseismometriä, suodatin-vahvistinyksikköä ja suoraan rekisteröivää Rapet RMS-11 HPT-mallista 6-kanavaista piirturia, joka oli varustettu 400 Hz:n galvanometreillä (kuva 1).

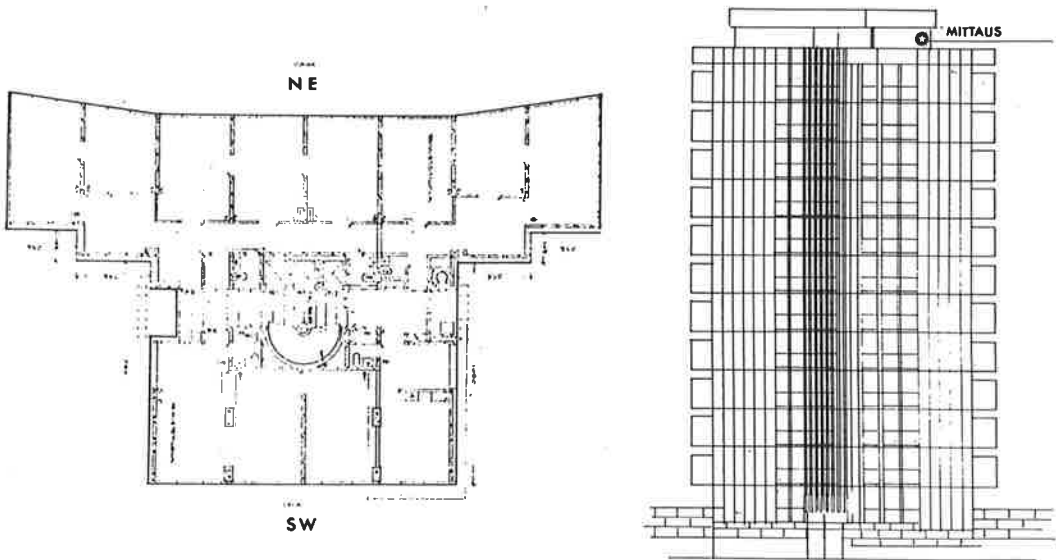


Kuva 1 Ominaisperiodin mittauksiin käytetty siirreltävä seismografikalusto. C5C-horisontaaliseismometri, vahvistin, suodatinyksikkö ja Rapet RMS-11 -piirturi.

Mittaukset suoritettiin yleensä yhdellä kanavalla horisontaalitasossa rakennusten ulkoseiniä suunnissa ja rekisteröintinopeutena käytettiin 5 mm/s. C5C-tyyppinen seismometri on pienikokoinen, 11 kg:n painoinen ja kokoonsa nähden harvinaisen pitkän ominaisvärähdysajan (5 s) omaava laite, joka erityisesti näitä mittauksia varten kehitetyn suodatin-vahvistinlaitteen ansiosta pystyy rekisteröimään taajuusalueella 0,7 Hz:n molemmin puolin (50% maksimisuurennuksesta on alueella 0.25 Hz - 2 Hz). Näin matalille taajuuksille suunniteltu vaste takaa sen, etteivät rakennuksen normaalit häiriötärinät (ovenpaukautukset, hissit ym.) pääse rajoittamaan vahvistimen suurennustason valintaa. Suurin käytetty amplitudisuurennus 5000 riitti kaikissa mittauskohteissa piirtämään kyllin suuria amplitudeja korkeataajuisen tärinän pääsemättä koskaan häiritsemään rekisteröintiä. Yleensä tultiin kuitenkin toimeen huomattavasti pienemmällä suurennustasolla. Rekisteröinnin, kaluston siirtoineen, pystyy suorittamaan yksi henkilö. Tuuliolosuhteet vaikuttavat luonnollisesti ratkaisevasti mittauksen onnistumiseen. Mitä puuskaisempi ja kovempi tuuli on sen paremmat mahdollisuudet ovat mittauksen onnistumiselle. Kokeitten aikana on tuulen voimakkuus vaihdellut 3 m/s - 12 m/s puuskien joskus yltäessä 17 m/s. Rakennuksen heilahtelun laajuudeksi on suoritetuissa kokeissa tuulen voimasta riippuen saatu noin 10 μ m - 600 μ m huipusta huippuun mitattuna.

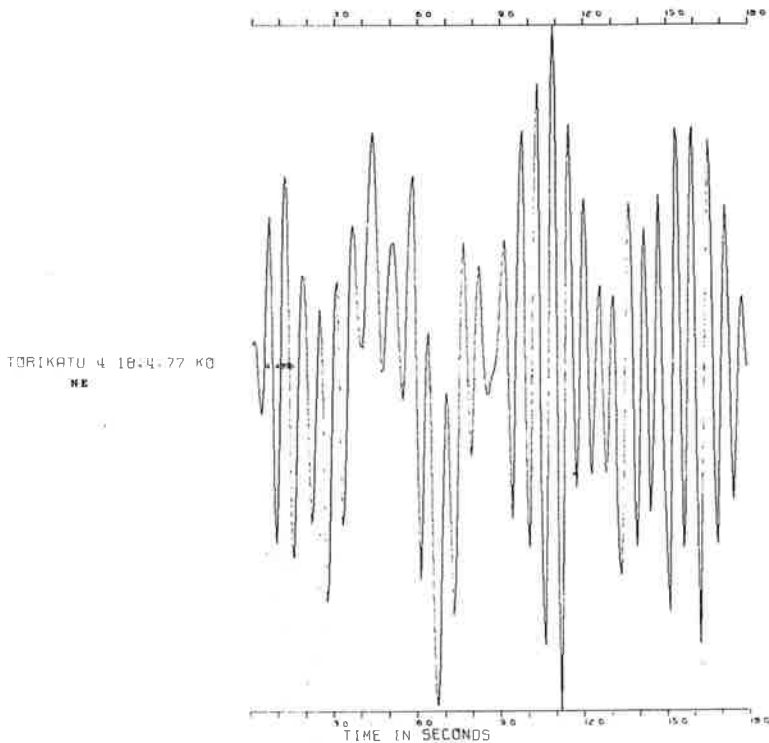
KOETULOKSET

Eräs tuulimittauksissa testatuista rakennuksista oli 12-kerroksinen asuinliiketalo Torikatu 4, Kouvolan keskustassa (kuva 2).



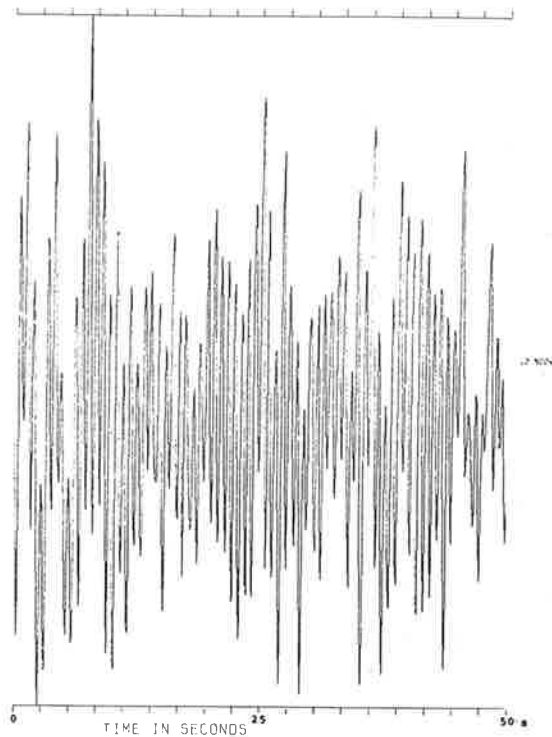
Kuva 2 Yleiskuva eräästä rakennuksesta, jonka ominaistuuksia pyrittiin määrittämään ns. tuulimenetelmällä. Torikatu 4, Kouvola.

Rakennuksen ominaisvärähtelyn mittaus kiinnosti erityisesti sen takia, että juuri tämän rakennuksen oli aikaisemmin todettu makroseismisten havaintojen perusteella olevan erityisen herkkä seismisten ilmiöitten aiheuttamalle maaperän tärinälle. Rakennus on 40 m korkea, 22 m leveä, kokonaistilavuus 27000 m³. Kerrosala on 3044 m² ja lisäksi rakennuksessa on noin 5 m:n syvyinen maanalainen kellarikerros. Rakennus on perustettu sora-hiekka-harjulle, jonka syvyyttä rakennusvaiheessa on tutkittu 11 m:iin saakka kalliopohjaa löytämättä. Sorapatjojen kokonaispaksuutta ei tunneta. Ominaisvärähdysaikamittaukset suoritettiin 18. huhtikuuta 1977 klo 11:n ja 12:n välillä torniosan ulkoseinien suunnassa (koillinen-lounas, luode-kaakko) ylimmällä kerrostasolla. Tuuli mittausaikana oli tasaista 4-6 m/s 160°. Rakennuksen huojahtelua rekisteröitiin noin 1/2 tunnin ajan mutama minuutti kerrallaan katkaisten mittaus aina välillä ja muuttamalla rekisteröintisuuntaa.



Kuva 3 Kahdeksantoista sekunnin otos NE-suunnassa rekisteröidystä seismogrammista. Kuva on digitaalikäsittelyn aikana rekonstruoitu oikean syöttömateriaalin varmistamiseksi.

TORIKATU 4 ; 0.4.77 KO
 **



Kuva 4 Viidenkymmenen sekunnin otos NW-suunnassa rekisteröidystä seismogrammista. Seismogrammi piirretty Calcomp-piirturilla kuten edellinenkin.

Spektrianalyysiä varten valittiin NE-suunnan rekisteröinneistä 16 s:n (kuva 3) ja NW-suunnan rekisteröinneistä 50 s:n pituiset osat (kuva 4). Nämä suurennettiin optisesti ja digitalisoitiin käyttäen puoliautomaattista P.C.D. Type ZAE 2A analogi-digitaalimuunninta 256 ja 512 näytteen pituisiksi aikasarjoiksi digitalisoimisvälin ollessa 13 Hz ja 10 Hz. Näin saadusta digitaalisesta aineistosta laskettiin taajuusjakauman selville saamiseksi laitoksen tietokoneohjelmia käyttäen tehosppektrit (Power spectral density). Tehosppektri määritellään jatkuvalle sattumanvaraiselle (random) prosessille seuraavasti:

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \right|^2$$

missä T on otoksen pituus, x(t) esim. seismogrammi tai maan liike ajan funktiona, f taajuus ja i = $\sqrt{-1}$.

Diskreetistä aikasarjasta voidaan tehosppektrin karkea arvio laskea kaavasta

$$P'(f_k) = \frac{1}{df} X_k^2 \frac{1}{0,875}$$

missä f_k on taajuus, X_k Fourier-komponentin amplitudi ja $1/0,875$ aikasarjan suipentamisesta (tapering) johtuva vakio. Suipentaminen on laskuteknillinen toimenpide aikasarjan alku- ja loppupään pyöristämiseksi, jolla pyritään välttämään aikasarjan katkaisusta johtuvaa spektrin vääristymistä.

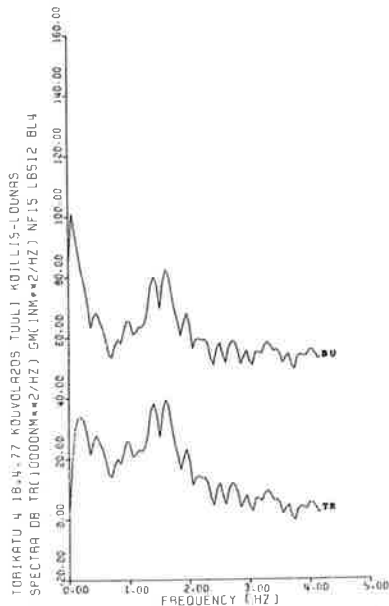
Kompleksiset Fourier-komponentit

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(i2\pi kn/N) \quad k = 0,1,2,\dots,N$$

lasketaan vaivattomimmin käyttäen ns. nopeaa Fourier-muunnosta (Fast Fourier transform eli FFT) algoritmia.

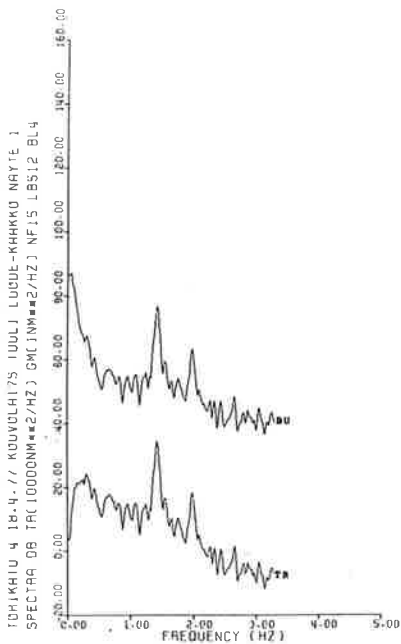
Kaavassa N on aikasarjan näytteiden lukumäärä, X_n , $n=0,1,2,\dots,N$ on aikasarja ja $i = \sqrt{-1}$.

Luotettavamman arvion saamiseksi tehospektrille on vierekkäiset karkeat spektriviivat tasoitettu käyttäen ns. Hamming-tasoitusta. Rakennuksen liikkeen spektrin (BU) määrittämiseksi on rekisteröintikäyrien spektrit (TR) vielä korjattu jakamalla Fourier-amplitudit rekisteröintilaitteen amplitudivas-teella. Saadut tehospektrin arvot on esitetty kuvissa 5 ja 6 desibeleinä ver-rattuna $1 \text{ nm}^2/\text{Hz}$ (BU-kuvaaja) ja $(100 \text{ nm})^2/\text{Hz}$ (TR-kuvaaja). Spektreistä on luettavissa NE-suunnassa päämaksimit 1.40 Hz vastaten värähdysajan arvoa 0.71 s ja 1.60 Hz , arvoa 0.63 s jälkimmäisen ollessa hivenen suurempi. NW-suunnassa spektrin päämaksimi löytyy 1.43 Hz :n (0.71 s) ja toinen pienempi maksimi 1.99 Hz :n (0.50 s) kohdalta.



Kuva 5 Tehospektri Torikatu 4:n ylimmän kerroksen liikkeistä NE-suunnassa. BU-merkityssä spektrissä on seismografin vaikutus otettu huomioon. TR-merkityssä seismografin vaikutus on huomioon ottamatta.

Kaikki rekisteröidyt seismogrammit analysoitiin myöhemmin ja värähtelyn vallitsevat periodit mitattiin valituista suotuisista kohdista rekisteröintiä. NW-suunnassa rekisteröidyistä värähdysajoista saatiin 11 eri mittauksen keskiarvoksi 0.71 s vastaten taajuutta 1.41 Hz, NE-suunnassa tuli taas 15 eri mittauksen keskiarvoksi 0.74 s (1.35 Hz).



Kuva 6. Tehospektri Torikatu 4:n ylimmän kerroksen liikkeistä NW-suunnassa. Spektrissä BU seismografarin vaikutus korjattu. Spektrissä TR vaikutus korjaamatta.

Visuaalisesti seismogrammin perusteella määrättyt värähdysarvot sopivat siis spektrien esittämien matalataajuisempien maksimien kohdalle. NW-spektrin päämaksimin taajuus on 1.40 Hz, mitattu taajuus 1.41 Hz ja NE-suunnassa päämaksimeista toisen taajuus on 1.43 Hz, mitattu taajuus 1.35 Hz. Johdannossa mainittujen henkilöitten karkeita laskukaavoja käyttäen voidaan nyt kysymyksessä olevalle rakennukselle määrittää esim. seuraavia ominaisvärähdysaikoja: 0.74 s (Borges), 0.77 s (Andersson), 0.93 s (Salvador-Heer) ja 0.97-1.1 (Housner). Varsinkin Anderssonin ja Borgesin kaavat näyttävät antavan tässä tapauksessa parhaiten sopivat arvot. Housnerin kaavat ovat kaikissa suorittamissamme kokeissa antaneet pitempiä värähdysaikoja kuin mittaukset.

LOPPUPÄATELMÄT

Tehdyn kokeen perusteella näyttäisi siltä, että visuaalisesti seismogrammilta valittu kohta ja sen sisältämien värähdysaikojen mittaus antaisi suoraan ja nopeasti ominaisvärähdysajan. Valitettavasti ei vielä ole voitu suorittaa

tämän tapaista mittausta tarkistusmielessä sellaisessa kohteessa, jonka ominaisvärähdysajat tunnettaisiin varmuudella jo etukäteen. Samoin olisi mielenkiintoista saada selvitys kuvissa näkyville korkeampitaajuisille suurille spektrimaksimeille mahdollisesti korkeampien moodien ominaistajuuksien, niiden keskinäisen interferoinnin, tai eri rakenneosien vaikutuksen esillesaamiseksi. Mielenkiintoa rakennusten ominaisvärähtelyn määrittelyä kohtaan lisänee sekin, että on todettu ominaisvärähdysajan muutosten antavan viitteitä siitä, että rakennus maanjäristyksessä on kokenut rakenteellisia ehkä muutoin huomaamattomia vaurioita (9) (10).

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Anderson, A.W. et al., Lateral forces of earthquake and wind. Proc. Am. Soc. Civil Eng., 77, No. 66, 1951
- [2] Borges, I.F. The dimensions of structures and the seismic effect. Bol. Ord. Engen., Lisbon 1963.
- [3] Salvadori, M.G., and Heer, E. Periods of framed buildings for earthquake analysis, Proc. 60 Am. Soc. Civil Engrs, 86.
- [4] Housner, F.W. and Brady, A.G. Natural periods of vibrating of buildings. Proc. Am.Soc.Civ.Engrs, 89.
- [5] Hudson, D.E., Keightley, W.O. and Nielsen, N.N., A new method for the measurement of the natural periods of buildings. Bull. Seism.Soc.Am., 54(1), 1964, 233-241.
- [6] Scruton, C., Flint, A.R. Wind excited oscillation of structures. Proc. Inst. Civ. Engrs, 27, 1964.
- [7] Anonymous, The building shakers, Earthquake Information Bulletin, 4(2) 1972.
- [8] Bendat, J.S. & Piersol, A.G., Random data: analysis and measurement procedures. New York, Wiley, 1971.
- [9] Cloud, W.K. Period measurements of structures in Chile. Bull. Seism. Soc. Am., 53(2), 1963, 359-379.
- [10] Mulhern, M.R. & Maley, R.P. Building period measurements before, during and after the San Fernando earthquake. Teoksessa: San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971, Vol. 1, ed. by L.M. Murphy.

Pekka Teikari, fil.lis., Helsingin yliopisto, Seismologian laitos