

RAKENTEIDEN TUULIKUORMAT JA NIIDEN MÄÄRITTÄMINEN
TUULITUNNELISSA

SEPPO K. LAINE

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 5
No. 1 1972 ss. 4-19; Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

Yhteenveto

Tässä artikkelissa tarkastellaan rakenteisiin kohdistuvia tuulikuormia sekä niiden määrittämistä tuulitunnelikokeilla. Tuulikuormat jaetaan staattisiin ja dynaamisiin kuormiin. Niiden syntymistä selostetaan lähinnä kvalitatiivisesti. Laskennallinen määrittämistapa on esitetty niille tapauksille, joissa se on yksinkertaisesti suoritettavissa. Koska laskennallinen määrittäminen on mahdollista vain tietyissä kuormitustapauksissa, on usein turvauduttava kokeisiin. Tuulitunnelikokeissa mallille ja virtaukselle asetettavia vaatimuksia tarkastellaan.

Rakenteisiin kohdistuvat tuulikuormat voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin kuormiin. Molemmat riippuvat tuulisuhteista, rakenteen ulkoisesta geometriasta ja jälkimmäinen lisäksi rakenteen elastisista ominaisuuksista ja sisäisestä vaimennuksesta.

Tuulisuhteet

Tuulisuhteilla tarkoitetaan tuulen maksiminopeutta, tuuligradienttia ja tuulen puuskaisuutta. Tuulikuormia laskettaessa on perustana tuulen sellainen maksiminopeus, joka saavutetaan tietyn vuosijakson (esim. 30 vuoden) aikana. Tuulen puuskaisuuden takia on maksiminopeus jonkin aikavälin keskiarvo. Aikavälin suuruus on tavallisesti 1...10 min. Koska tuulen nopeus kasvaa ylöspäin kuljettaessa, on tämä maksiminopeus redusoitu vastaamaan nopeutta tietyllä, tavallisesti 10 m:n korkeudella. Tuuligradientti eli nopeusprofiilin muoto riippuu maastotyypistä. Mittausten perusteella on laadittu yksinkertainen kaava nopeusjakautumalle:

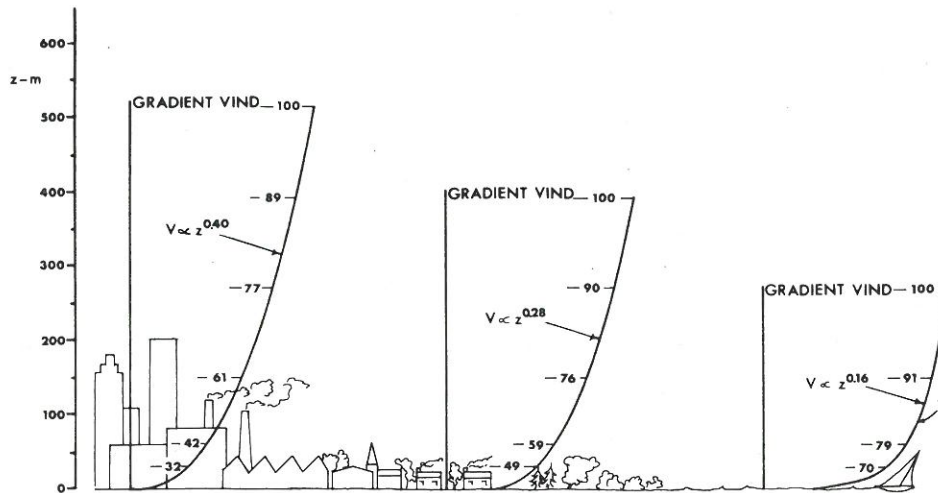
$$U = U_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

missä α riippuu maastosta (ks. kuva 1). U_0 on nopeus korkeudella z_0 .

Tuulen puuskaisuus eli turbulენტtisuus johtuu pääasiassa maanpinnan ja ilman välisestä kitkasta. Jos tuulen keskinopeus on suuri, voi puuska aiheuttaa rakenteissa värähtelyä, sillä puuskien frekvenssialue sattuu rakennusten frekvenssialueelle. Puuskanopeudet varsinaisen tuulen suuntaan ovat suurempia kuin poikittaissuuntaan.

Staattinen tuulikuorma

Kun ilmavirta kohtaa rakenteen, se aiheuttaa paikallisia poikkeamia ilmakehän paineesta rakenteen pinnoilla ts. syntyy tuulikuormia. Paine-eron suuruus riippuu tuulen nopeudesta, tuuligradientista, ilman tiheydestä sekä rakenteen ulkoisesta geometriasta. Tuulen aiheuttama tuulen suuntainen kokonaisvoima F voidaan esittää



Kuva 1. Tuuligradientti eri maastotyypeille [2].

kaavalla:

$$F = cqA$$

missä c on ns. muotokerroin, q tuulen kineettinen paine $\frac{1}{2} \rho U^2$ ja A kappaleen tuulta vastaan kohtisuora poikkipinta-ala. Tässä on lisäksi merkitty ρ :lla ilman tiheyttä ja U :lla tuulen nopeutta.

Muotokerroin c riippuu kappaleen geometriasta, tuuligradientista sekä Reynoldsin luvusta Re . Reynoldsin luku määritellään lausekkeella

$$Re = \frac{U\ell}{\nu}$$

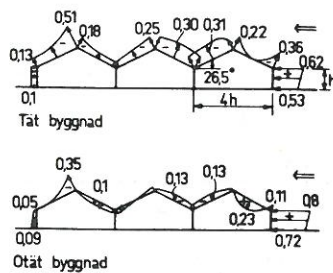
missä ℓ on kappaleen jokin karakteristinen mitta ja ν ilman kineettinen viskositeetti. ($\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ kun $t = 20^\circ\text{C}$.)

Teräväsärmäisten kappaleiden muotokerrointa voidaan pitää Reynoldsin luvusta riippumattomana.

Tuuli ei aiheuta rakenteen pintaan vain "ylipainetta" vaan myös "alipainetta". Alipaine saattaa olla huomattava laakeitten katon pinnalla. Näihin syntyy nostovoima aivan kuin lentokoneen siipeen. Kappaleen pinnalla vaikuttavan paikallisen paineen ja ilmakehän paineen välinen paine-ero Δp voidaan lausua painekertoimen C_p ja kineettisen paineen q tulona

$$\Delta p = C_p q$$

C_p on nyt paikallinen kerroin, joka saattaa vaihdella huomattavasti eri kohdissa pintaa (ks. kuva 2). Paine kerroin C_p riippuu samoista suureista kuin muotokerroin c .



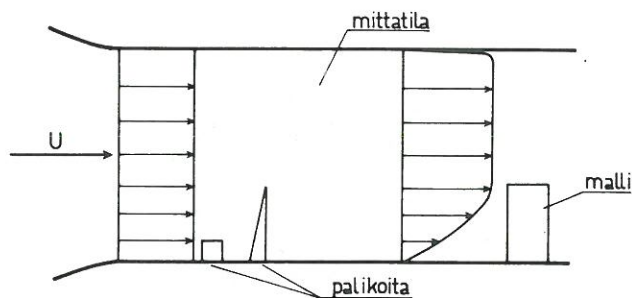
Kuva 2. Paine kertoimen C_p jakautuma rakennuksen pinnalla [2]

Staatististen tuulikuormien kokeellinen määrittäminen

Muodoltaan tavanomaisten rakennusten tuulikuormista on nykyisellään jo tietoa. Tulevaisuudessa tullaan rakentamaan yhä enemmän rakennuksia, joiden muoto ei ole traditionaalinen. Tällaisten rakennuksien ekonomista mitoitus varten on niiden tuulikuormat yleensä tunnettava ja ne voidaan saada vain tuulitunnelikokeista.

Staattiset tuulikuormat riippuvat muotokertoimesta c ja kuormituksen jakautuma painekertoimesta C_p . Staattisten tuulikuormien kokeellinen tutkiminen tarkoittaa muotokertoimen ja/tai painekertoimen määrittämistä. Koska kyseiset kertoimet riippuvat rakenteen muodosta, Reynoldsin luvusta sekä tuulen nopeusprofiilista, on näiden kolmen seikan oltava samat tuulitunnelikokeessa ja luonnossa.

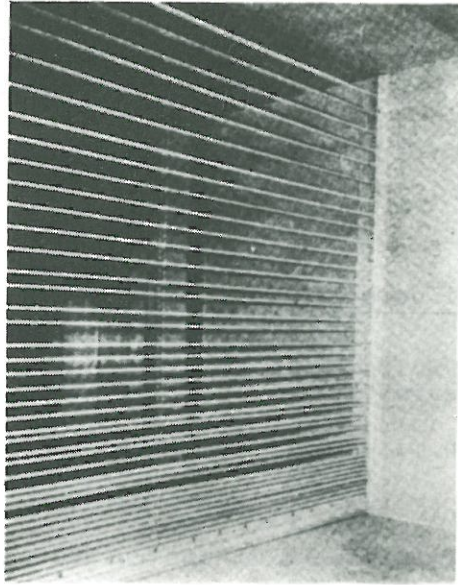
Nopeusprofiili on mahdollista saada aikaan mm. seuraavilla tavoilla. Jos tuulitunnelin mittatila on pitkä, voidaan mittatilan alkupäähän sijoittaa kuvan 3 osoittamalla tavalla palikoita, jotka virtausta jarruttamalla synnyttävät vaadittavan nopeusprofiilin. Palikoiden oikea koko, muoto ja asema on haettava kokeilemalla.



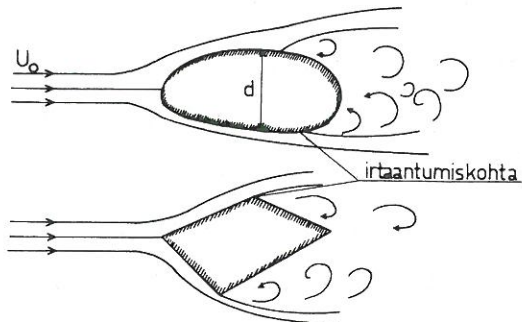
Kuva 3. Nopeusprofiilin synnyttäminen palikoiden avulla.

Toinen mahdollisuus on rakentaa mittatilan alkupäähän latta-raudoista hila siten, että lattaraudat ovat virtauksen suuntaisia ja niiden välimatka on pienin lähinnä lattiaa (ks. kuva 4).

Jos rakenne on muodoltaan teräväkulmainen, ei painekerroin eikä muotokerroin riipu Reynoldsin luvusta. Tällöin saa tuulitunnelimallin Reynoldsin luku ja siis myös virtausnopeus olla mikä hyvänsä. Jos sen sijaan rakenne on pyöreäkulmainen, riippuu painejakautuma ja siten myös muotokerroin Reynoldsin luvusta. Syy tähän on se, että painejakautuma riippuu virtauksen irtaantumiskohdasta (ks. kuva 5).



Kuva 4. Hila mittatilan alkupäässä [2]



Kuva 5. Virtauksen irtaantuminen kappaleen pinnalta.

Teräväreunaisilla rakenteilla irtaantumiskohta on jossain terävässä nurkassa, kun sen sijaan pyöreäkulmaisilla kappaleilla irtaantumiskohta riippuu Reynoldsin luvusta. Käytännössä ovat rakenteet yleensä niin suuria, että tuulitunnelikokeissa ei ole mahdollista saada oikeaa Reynoldsin lukua, joten pyöreäkulmaisille rakenteille tehdyt kokeet voivat olla epäluotettavia.

Koko rakenteeseen kohdistuvat voimat ja momentit voidaan mi-

tata vaa'alla. Paikalliset ilmakeuormat määritetään mittaamalla painejakautuma rakenteen pinnalla. Painejakautuma mitataan johtamalla paineet rakenteen pintaan porattujen pienten reikien kautta manometriin.

Dynaaminen tuulikuorma

Elastisten kantavien rakenteiden kuten riippusiltojen tai metallisten savupiippujen mitoitus varten on tunnettava tuulen aiheuttama dynaaminen kuormitus. Yleisesti voidaan aerodynaamiset kuormat jakaa kolmeen ryhmään sen mukaan kuinka ne syntyvät ja vaikuttavat rakenteeseen:

- a) ilmavoimat, jotka syntyvät pyörteiden jaksollisen irtaantumisen johdosta (von Kármánin pyörrerata). Ilmavoimien frekvenssi riippuu kappaleen muodosta, dimensioista sekä tuulen nopeudesta.
- b) ilmavoimat, jotka syntyvät siitä, että kappaleen asento ja asema muuttuvat tasapainoasemasta. Nämä ilmavoimat riippuvat kyseisen liikkeen amplitudista ja frekvenssistä sekä virtausnopeudesta. Ilmavoimat synnyttävät flutteriksi (aeroelastinen värähtely) sanotun liikkeen.
- c) ilmavoimat, jotka syntyvät jonkin toisen ylävirrassa olevan kappaleen jaksollisista pyörteistä. Ilmiö on englanniksi nimeltään buffeting (tärähtely).

Tuulen puuskaisuudesta johtuvat dynaamiset kuormat ovat rinnastettavissa buffeting-ilmiöön.

Tapauksissa a) ja b) syntyy kappaleen värähtely kahdella eri tavalla riippuen kappaleen poikkileikkauksen muodosta. Toisessa ääritapauksessa, jolloin kappale on sylinteri, ovat värähtelyjä synnyttävät ilmavoimat pelkästään a -tyyppisiä. Sen sijaan tasolevylle syntyy

vät ilmavoimat ovat b -tyyppiä. Tällöin on kuitenkin värähtelyliikkeen saatava jostain alkunsa. Todellisuudessa on tuulen nopeudessa aina vaihteluja, tuulenpuuskia, jotka voivat antaa liikkeelle alun. Poikkileikkaukseltaan mielivaltaisen muotoisille kappaleille voi värähtelyt panna alkuun a -tyyppiset ilmavoimat ja sen jälkeen niitä voi pitää yllä b -tyyppiset ilmavoimat tai a- ja b- tyyppien kombinaatio.

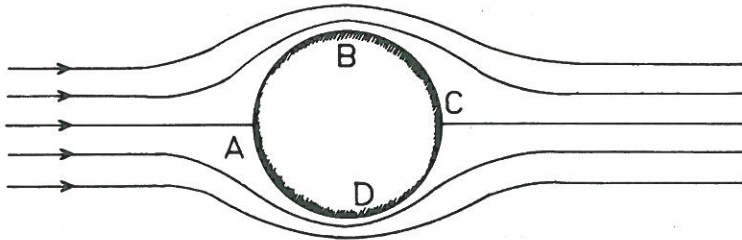
Von Kármánin pyörreeradan synnyttämä värähtely

Tarkastellaan aluksi virtaukseen asetettua ympyräsylinteriä ja pyörreeradan syntymistä sen vanaveteen. Jos virtaus olisi kitkaton, olisivat virtaviivat symmetrisiä kuvan 6 osoittamalla tavalla. Virtausnopeus kasvaisi välillä AB ja pienenesi välillä BC.

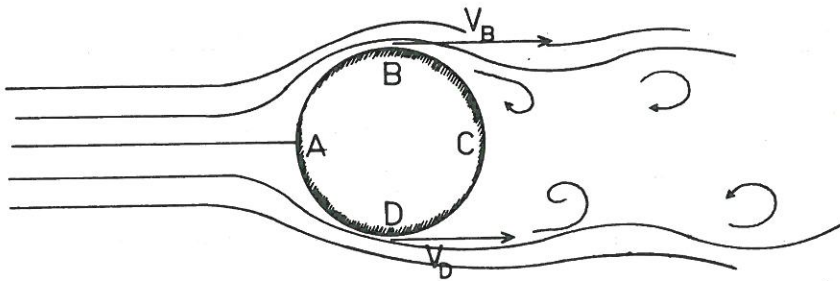
Kitkan johdosta virtaus ei kuitenkaan pysy kiinni sylinterin takaosassa (BC), missä nopeus hidastuu, vaan virtaus irtaantuu sylinterin pinnalta. Nyt irtaantuminen tässä tapahtuu siten, että syntyy pyörteitä vuoron perään ylä- ja alareunalta (pisteiden B ja D läheisyydestä). Pyörteet liikkuvat virtauksen mukana. Virtauskuvio tulee vaaka-akselin suhteen epäsymmetriseksi (ks. kuva 7). Koska paine on pienin siellä, missä nopeus on suurin, syntyy poikittainen painevoima, jonka suuruus ja suunta vaihtelee pyörteiden syntymisen tahdissa. On huomattava, että pyörteet syntyvät riippumatta siitä, värähteleeekö itse sylinteri vai ei. Pyörteiden frekvenssi f lasketaan kaavasta

$$f = S \frac{U}{D}$$

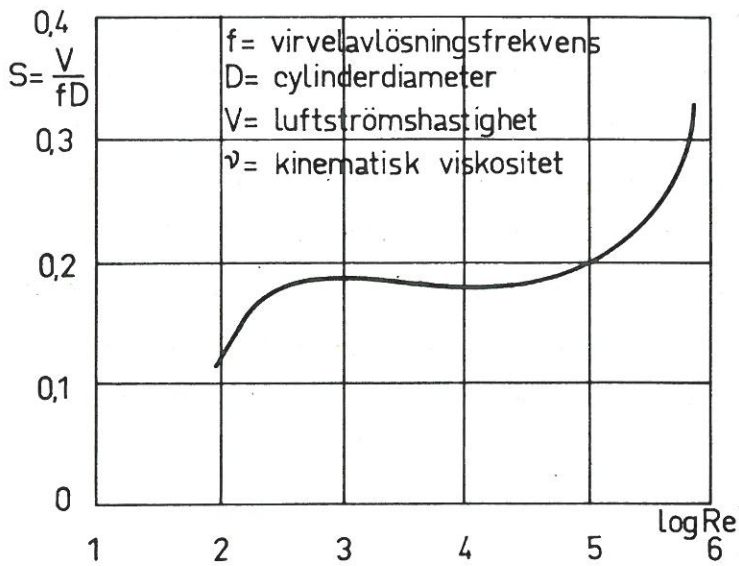
missä S = Strouhalin luku, U = virtausnopeus ja D = sylinterin halkaisija. Strouhalin luku riippuu Reynoldsin luvusta



Kuva 6. Kitkaton virtaus ympyräsylinterin ohi.



Kuva 7. Kitkallinen virtaus ympyräsylinterin ohi.



Kuva 8. Strouhalin luvun riippuvuus Reynoldsin luvusta ympyräsylinterille.

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

Tämä riippuvuus on esitetty kuvassa 8. Von Kármánin pyörrerata on säännöllinen vain Reynoldsin luvuilla $50 \dots 10^5$. Kuitenkin on koekellisesti todettu, että säännöllisiä värähtelyjä saattaa syntyä vielä niinkin suurilla Reynoldsin luvuilla kuin $7 \cdot 10^6$.

Hyvä esimerkki von Kármánin pyörreradan vaikutuksesta on puhelinlankojen "laulaminen".

Teräväreunaisten profiilien vanaveteen syntyy myös pyörrerata, mutta tällöin on Strouhalin luku eri suuri kuin ympyräsylinterille (ks. kuva 9). Strouhalin luku on tällöin Reynoldsin luvusta riippumaton.



Kuva 9. Strouhalin luvun arvoja teräväreunaisille profiileille.

Pyörreradan synnyttämä poikittaisvoima F lasketaan kaavasta:

$$F = C_L qA \sin(2\pi ft)$$

missä C_L = poikittaisvoimakerroin $\sim 0,15 \dots 1,3$

$q = \frac{1}{2} \rho U^2$ = kineettinen eli dynaaminen paine

f = värähtelyn frekvenssi

t = aika

A = poikkipinta-ala virtaussuunnassa olevassa tasossa.

Von Kármánin synnyttämä värähtely on silloin vaarallinen, kun rakenteen oma värähdysluku on suurella tuulennopeudella sama kuin f .

Von Kármánin pyörreradan synnyttämiä värähtelyjä on usein havaittu metallisissa savupiipuissa. Näiden värähtelyjen estämiseksi voidaan piippuun kiinnittää spiraalimainen levykaista, jonka tarkoituksena on turmella virtaus siten, että periodisia pyörteitä ei pääse syntymään. Sopivaksi levykaistan leveydeksi on kokeiden perusteella saatu $0,09D$ ja spiraalin nousuksi $5D$. Levykaistoja tarvitaan kolme kappaletta.

Puhtaasti laskennollisesti on mahdollista määrittää ympyräsylinteriä rasittava periodinen poikittaisvoima, kun Reynoldsin luku on pienempi kuin 10^5 . Kun Reynoldsin luku on välillä $10^5 \dots 10^7$, laskennollinen määrittäminen on epävarmaa ja on turvaututtava kokeisiin. Mastoihin ja antenneihin kohdistuvan ilmakeuorman frekvenssin laskeminen saattaa olla vaikeaa ja sen vuoksi tehdään kokeita.

Von Kármánin pyörreradan synnyttämän poikittaisen periodisen ilmavoiman kokeellinen määrittäminen edellyttää, että Reynoldsin luku on kokeissa ja luonnossa sama, sillä Strouhalin luku on Reynoldsin luvun funktio. Tätä vaatimusta on kuitenkin usein mahdoton saada toteutumaan. Aina tästä ei kuitenkaan ole haittaa, sillä esim. ympyräsylinterille S on vakio, kun $Re \sim 10^3 \dots 10^5$ ts. Strouhalin luku saattaa olla vakio suurella Reynoldsin luvun alueella. Mallin jäykkyysominaisuuksien ei tarvitse olla samoja kuin luonnossa, sillä kyseinen värähtely on rakenteen sisäisistä ominaisuuksista riippumaton. Käytännössä voidaan poikittaisvoiman frekvenssi mitata kiinnittämällä malli sellaisten tukien varaan, joihin on liimattu jännitysvenymäliuskat kiinnitysvoimien määrittämiseksi. Mittaamalla esim.

piirturin avulla tukivoimat, saadaan frekvenssi määritettyä.

Flutteri (aeroelastinen värähtely)

Flutterin tarkastelu jaetaan kahteen osaan:

- yhden vapausasteen värähtely (galloping)
- kahden tai useamman vapausasteen värähtely

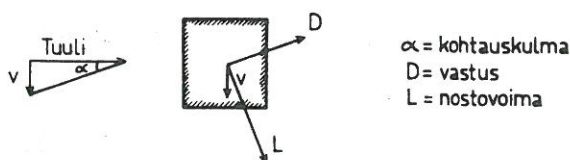
Galloping -tyyppinen värähtely

Galloping -tyyppinen värähtely on aeroelastista värähtelyä, jolle on luonteenomaista suuri amplitudi verrattuna kappaleen halkaisijaan. Tavallisin galloping -tyyppinen värähtely syntyy kappaleille, joilla kohtisuoraan tuulen suuntaa vastaan vaikuttava voima saa negatiivisen lisäyksen kohtauskulman kasvaessa. (Ks. kuva 10)

Jos kappale liikkuu kohtisuorasti tuulen suuntaa vastaan aiheuttaen kohtauskulman muutoksen, joka synnyttää poikittaisnopeuden suuntaisen voiman, tehdään kappaleeseen työtä ja tuloksena voi olla epästabiili liike. Tämä tilanne syntyy, kun

$$- \partial L / \partial \alpha > \partial D / \partial \alpha$$

Esimerkkinä kappaleesta, jolle voi syntyä galloping -värähtelyä, on neliöpoikkipintainen tanko. Tälle syntyy myös von Kármánin pyörrerä-



Kuva 10. Poikittaisvoiman syntyminen neliöpoikkipintaiselle kappaleelle.

ta. Galloping -tyyppistä värähtelyä on havaittu esim. jäätyneissä voimajohdoissa, jolloin amplitudi voi olla moninkertainen johdon halkaisijaan nähden. Sileälle ympyräsylinterille ei galloping -värähtelyä synny. Spiraalimaisesta levykaistasta ei ole apua galloping liikkeen vaimentamiseksi.

Kahden vapausasteen flutteri

Kahden vapausasteen aeroelastisista värähtelyistä tarkastellaan esimerkkinä riippusiltoja. Näissä ilmavoimien aiheuttama värähtely on edellä kuvattua b -tyyppiä.

Riippusillan keskiosaa voidaan hyvin kaavamaisesti pitää pitkänä elastisena tasolevynä, joka on ripustettu jousien varaan. Pääheilahdusmuodot ovat taivutus ja vääntö ja systeemillä voidaan sanoa olevan kaksi vapausastetta.

Heilahtelevaan levyyn kohdistuvat ilmavoimat ovat amplitudien ja niiden aikaderivaattojen funktioita. Ne ovat niin muodoin periodisia voimia, jotka voimakkaasti vaikuttavat levyn vapaisiin heilahdusmuotoihin.

Flutterin syntymisen selvittämiseksi riippusillassa ajatellaan seuraavaa tilannetta. Oletetaan, että pakkovoima F , jolla on sopiva frekvenssi, vaikuttaa edellä tarkasteltuun kaavamaiseen siltamalliin sen heilahdellessa ilmavirrassa. Voima ajatellaan jakaantuneeksi jännevälin suuntaan ja oletetaan, että sillä on sellainen vaikutuspiste ja suuruus, että stationääri heilahtelu säilyy huolimatta ilmavoimien vaimentavasta vaikutuksesta. Pakkoheilahtelu jakaantuu kahteen liikemuotoon, pystysuoraan ja vääntöliikkeeseen, jotka ovat erillisiä vastaavista vapaista heilahteluista, koska

pakkoliikkeen frekvenssit ja taipumamuodot riippuvat virtausnopeudesta U . Pakkoliikkeen liikemuodoilla on eri frekvenssit ja faasiero. Liike ei ole harmonista. Kun virtausnopeutta lisätään, kasvaa aluksi tarvittava ulkoinen voima F . Virtausnopeutta yhä lisättäessä voima F alkaa eräästä nopeudesta lähtien pienentyä, kunnes saavutetaan tilanne, missä ilmavoimat itse pitävät yllä vakioamplitudista heilahtelua. Vastaavaa nopeutta nimitetään kriittilliseksi nopeudeksi eli flutterinopeudeksi. Tällä nopeudella kummallakin heilahtelumuodolla on sama frekvenssi mutta eri faasi. Faasiero on syynä siihen, että levy absorboi energiaa ilmavirrasta ylikriittillisillä nopeuksilla sillä seurauksella, että amplitudit jatkuvasti kasvavat.

Flutterin laskeminen on hankalaa ja usein mahdotonta. Sen vuoksi kokeet ovat yleensä välttämättömiä.

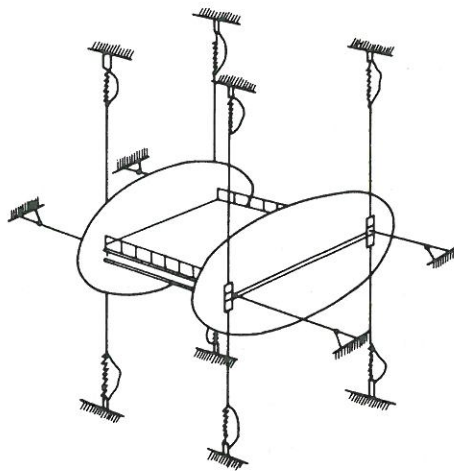
Tuulitunnelissa tehtävissä flutterikokeissa joudutaan käyttämään pienoismalleja. Tällöin mallit on rakennettava siten, että seuraavien suureiden arvot ovat mallille ja luonnolliselle rakenteelle yhtä suuret.

- Rakenteen ominaisvärähtelyjen vaimeneminen (log. dekrementti δ).
- Rakenteen materiaalin tiheys ρ_m .

Lisäksi vaaditaan, että kokeissa ja luonnossa ovat yhtä suuria:

- Reynoldsin luku.
- Rakenteen jäykkyys ja virtauksen kineettinen paine ($= E/2 \rho U^2$).
- Rakenteen materiaalin kimmokertoimen suhde kineettiseen paineeseen ($= E/2 \rho U^2$).

Riippusillan flutterikokeissa riittää usein tutkia osaa sillasta. Mallin ripustuksen jousivakiot määritetään todellisen sillan alimpien ominaisfrekvenssien mukaan (ks. kuva 11).



Kuva 11. Riippusillan tuulitunnelimalli [2]

Buffeting-ilmiön aiheuttamia värähtelyjä voidaan tutkia tuulitunnelissa. Tällöin asetetaan koejärjestelyille samoja vaatimuksia kuin flutteria tutkittaessa.

Tuulenpuuskien synnyttämiä dynaamisia kuormia ei tuulitunnelissa kyetä simuloimaan. Laskennollisen menettelyn on ehdottanut Davenport [4].

Suomessa on teknillisen korkeakoulun aerodynamiikan laboratoriossa Otaniemessä tehty joitain kokeita von Kármánin pyörreradan synnyttämistä värähtelyistä sekä näiden särkemisestä.

Kirjallisuutta

- [1] Rakennusten tuulikuormat. Rakennushallitus. Rakennusosasto tiedotus 1:68.

- [2] Byggnadsaerodynamik. Rapport från Byggforskningen 25/69. Stockholm.
- [3] A Pope and J. Harper, Low-Speed Wind Tunnel Testing. Wiley 1967
- [4] A.G. Davenport, The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. Proceedings, Institutionen of Civil Engineers. London. Vol. 19, Aug. 1961.
- [5] C. Scruton and A.R. Flint, Wind-Excited Oscillations of Structures. Proceedings, Institutionen of Civil Engineers. Vol. 27, April 1964.

Seppo K. Laine, tekn.lis., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi