

TERÄSBETONIRAKENTEESEEN KOHDISTUVA TÖRMÄYSKUORMA

Kari Louhenkilpi

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 10
No. 3 1977 s.1...8.

YHTEENVETO: Artikkelissa esitetään suositeltava, kokeellinen kaava teräsbetonirakenteen paksuuden määrittämiseksi, kun rakenteeseen kohdistuu törmäyskuorma, auto tms. Törmäyksessä syntyvän taivutustilan ratkaisemiseksi esitetään kaksi yksinkertaistettua käsinlaskentamenetelmää; "energiamenetelmä" ja "impulssimenetelmä", joita käyttäen saadaan rakenteen vaadittavat teräsmäärät määritetyksi.

YLEISTÄ

Missile = missiili, törmäävä esine (auto, lentokone tms)

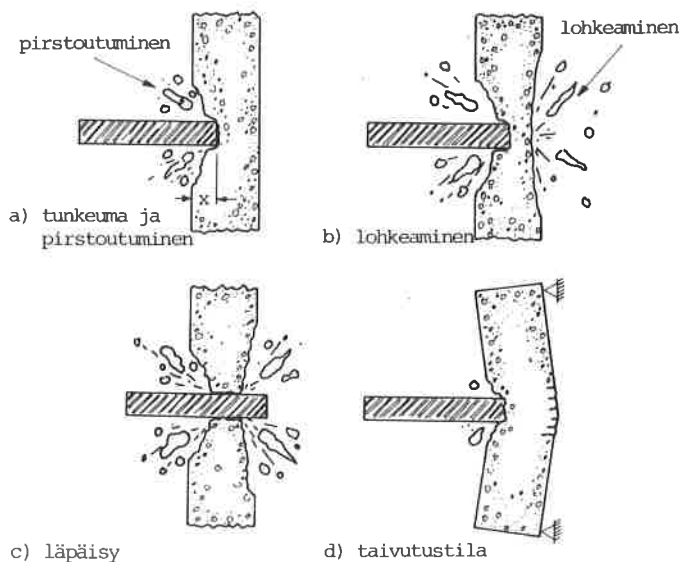
penetration = tunkeuma

perforation = läpäisy

spalling = pirstoutuminen

scabbing = lohkeaminen

Käsitteet eivät ole vakiintuneet suomenkielessä ja muitakin käännöksiä saattaa esiintyä. Käsitteet selvinnevät kuitenkin kuvasta 1.



Kuva 1 Kappaleiden törmäyksessä syntyvät ilmiöt.

Kun rakenteen paksuus on "riittävä" syntyy kuvan 1a mukainen tilanne. Jos rakenteen paksuutta pienennetään, syntyy kuvan 1b mukainen tilanne, jolloin rakenteen (esim. laatan) vastakkaiselta puolelta irtoaa materiaalia. Mikäli paksuutta edelleen pienennetään, syntyy kuvan 1c mukainen tilanne, jossa missiili lämpöisee rakenteen. Edellytyksenä edellä kuvattujen ilmiöiden syntyyn on rakenteen riittävä taivutus- ja leikkauskapasiteetti, jota kuvaa kuvan 1d mukainen tilanne.

Jos rakenteen on suojattava herkkiä laitteita, ei voida sallia materiaalin lohkeavan törmäyskohdan vastakkaiselta puolelta eli tällöin tilanne 1a on mitoitettava. Jos taas sallitaan materiaalin lohkeaminen, on tilanne 1b mitoitettava.

Paksuuksien laskeminen

Läpäisyn tai lohkeamisen ehkäisemiseen tarvittavien paksuuksien laskemiseen on olemassa useita eri kaavoja. Kaavat perustuvat yleensä yksinkertaiseen teoreettisiin tarkasteluihin ja kokeellisiin tutkimuksiin. Kaavat on esitetty varsin perusteellisesti esim. lähteessä /1/.

Kaavat on yleensä kehitetty räjähdyksessä syntyville sirpaleille, joilla on pieni massa ja suuri nopeus. Tästä syystä on kaavoja käytettävä huolellisesti harkiten massiivisille ja hitaille missiileille. Kaavojen sopivuutta hitaammille ja massiivisille missiileille on tutkittu kokeellisesti ns. Calspan-kokeissa USA:ssa /1/. Kokeissa on todettu, että ainoastaan ns. MNDRC-kaava (Modified National Defense Research Committee formula) antaa tällöin kokeellisia tuloksia lähellä olevia paksuuden arvoja. Tästä syystä suositetaan mm. ASCE /2/, että ko. kaavaa tulisi käyttää vaadittujen paksuuksien laskemiseen, kun on kyse hitaiden ja massiivisten missiilien kuten autojen, lentokoneiden tms. törmäyksestä.

MNDRC-kaava voidaan esittää muodossa

$$G(x/d) = K N d^{0.2} D (V/1000)^{1.8} ; \quad (1)$$

missä

x = missiilin suurin tunkeumasyvyys (in) (vrt. kuva 1a)

d = missiilin halkaisija (in)

$$G(x/d) = (x/2d)^2, \text{ kun } x/d \leq 2,0$$

$$(x/d-1), \text{ kun } x/d > 2,0$$

K = vakio, betonille $180/\sqrt{f'_c}$; missä f'_c = betonin murtolujuus (psi)

N = missiilin muotokerroin on, 0,72 tasakärkiselle, 0,84 tylppäkärkiselle missiilille, 1,00 ammuksille yleensä, 1,14 hyvin teräväkärkiselle missiilille

D = W/d^3

W = missiilin massa (lb)

V = törmäysnopeus (ft/sec)

Jos halutaan ehkäistä läpäisy, tulee paksuuden e arvoksi valita

$$e/d = 3,19 (x/d) - 0,718 (x/d)^2, \text{ kun } x/d \leq 1,35 \quad (2a)$$

$$e/d = 1,32 + 1,24 (x/d), \text{ kun } 1,35 < x/d \leq 13,5; \quad (2b)$$

missä

e = suojapaksuus läpäisylle (in)

d = missiilin halkaisija (in)

x = tunkeuma kaavasta (1) (in)

Jos halutaan ehkäistä myös materiaalin lohkeaminen törmäyskohdan vastakaiselta puolelta, tulee paksuuden s arvoksi valita

$$s/d = 7,91 (x/d) - 5,06 (x/d)^2, \text{ kun } x/d \leq 0,65 \quad (3a)$$

$$s/d = 2,12 + 1,36 (x/d), \text{ kun } 0,65 < x/d \leq 11,75 \quad (3b)$$

TERÄSMÄÄRIEN LASKEMINEN

Momenttiteräukset

- Yleistä

Taivutuksen vaatimat teräsmäärät voidaan laskea kahdella eri tavalla. Toinen /3/ perustuu törmäyksen energiatasapainoon. Käytetään tästä tavasta nimitystä "energiamenetelmä". Toinen tapa /4/ tarkastelee törmäyksessä syntyvää impulssia. Käytetään tästä nimitystä "impulssimenetelmä".

- Energiamenetelmä

Lähtemällä liikkeelle liikemäärätasapainosta voidaan ratkaista tason ja missiilin nopeus v_2 törmäyksen jälkeen

$$mv_1 = (m+M)v_2 + mv \text{ eli}$$

$$v_2 = \frac{mv_1 - mv}{m+M}; \quad (4)$$

missä

m = missiilin massa

M = redusoitu massa. Redusoidulla massalla tarkoitetaan massaa, jonka kineettinen energia on sama kuin koko maalin kineettinen energia, kun massa saa saman kiihtyvyyden kuin törmäyskohta. Esim. kuvan 3 tapauksessa $M = 0,131 \times$ laatan kokonaismassa. Redusoidun massan arvoja löytyy esim. lähteestä /5/.

v_1 = missiilin nopeus ennen törmäystä

v = missiilin ja laatan nopeuden maksimierotus. Jos törmäys olisi täysin plastinen, olisi $v = 0$. v saadaan /3/ mukaan likimäärin kaavasta

$$v = - \frac{\sigma_m}{\rho_m c_m};$$

missä

σ_m = missiilin myötölujuus

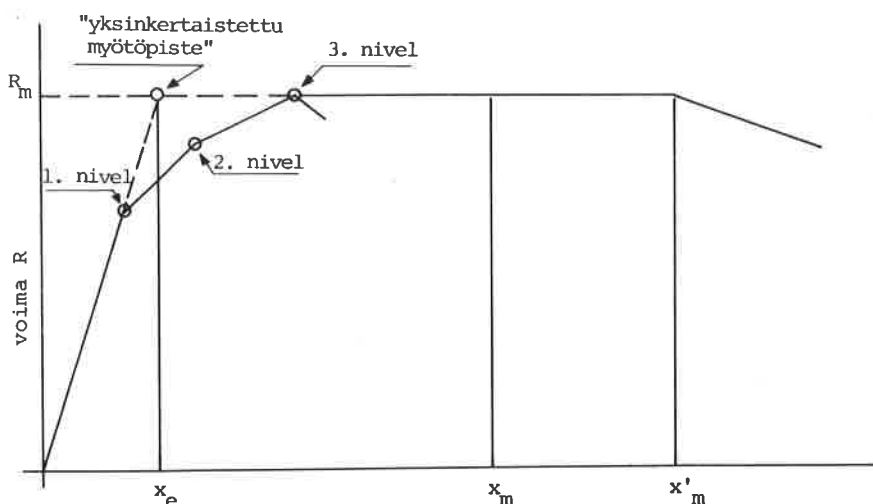
ρ_m = missiilin tiheys

c_m = äänen nopeus missiilissä = $\sqrt{E/\rho_m}$, missä E = missiilin kimmokerroin.

Rakenteeseen absorboituvaksi energiamääräksi saadaan sitten

$$W = \frac{1}{2} (m+M) v_2^2 \quad (5)$$

Rakenteen energia-absorbtiokyvyn tulee olla suurempi kuin absorboituva energiamäärä kaavasta (5). Tämä voidaan osoittaa eri tavoin. Jos rakenteen toiminta voidaan idealisoida esim. kuvan 2 mukaisesti, saadaan energia-absorbtiokyky W_L



Kuva 2 Todellisen rakenteen yksinkertaistaminen.

$$W_L = \frac{R_m x_e}{2} + R_m (x_m - x_e) ; \quad (6)$$

missä

R_m = rakenteen myötökuorma

x_e = myötövenymä

x_m = sallittu venymä = x'_m /varmuusluku

x'_m = murtovenymä

tai jos on kysymyksessä esim. teräsbetonilaatta, voidaan energia-absorbtiokyky ilmoittaa seuraavasti:

$$W_L = \sum_{n=1}^N m_{u_n} r_{u_n} l_n ; \quad (7)$$

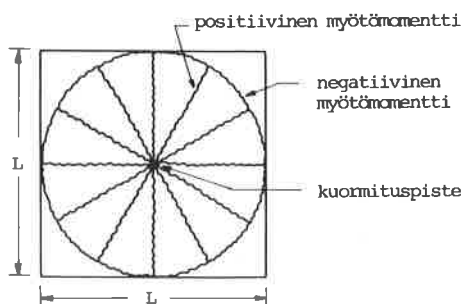
missä

W_L = laatan energia-absorbtiokyky

m_{u_n} = n:nnen myötöviivan myötömomentti pituusyksikköä kohti

r_{un} = n:nnen myötöviivan kiertymä

l_n = n:nnen myötöviivan pituus



Esimerkiksi kuvan 3 mukaiselle myötökuviolle saadaan

$$W_L = \pi R m_u r_u ; \quad (8)$$

missä

$$\pi = 3,14159$$

$$R = \text{myötökuvion säde} = L/2$$

$$m_u = \text{myötömomentti (posit. = negat.)}$$

$$r_u = \text{myötöviivan kiertymäkapasiteetti}$$

Kuva 3 Teräsbetonilaatan eräs mahdollinen myötökuvio.

- Impulssimenetelmä

Missiilin, jolla on muodonmuutoskykyä (esim. lentokone), törmätessä jäykkään maaliin voidaan reaktiota minä ajanhetkenä hyvänsä kuvata yhtälöllä

$$\text{impulssi} = \Delta \text{ liikemäärä} ;$$

missä

Δ kuvaa äärettömän pientä muutosta.

Siten saadaan (vrt. kuva 4)

$$- R \Delta t = M L (V - \Delta V) - (M L V + M \Delta X V)$$

Kun Δt lähenee nollaa, saadaan

$$R = M L a + M V^2 ; \quad (9)$$

missä

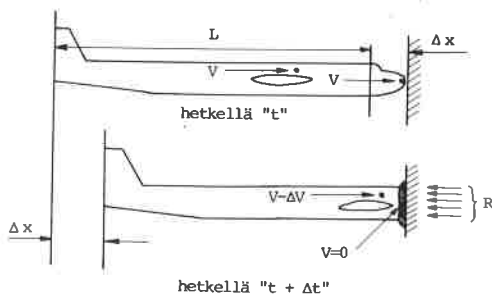
R = maaliin kohdistuva voima hetkellä t

M = missiilin massa pituusyksikköä kohti kohdassa x

$M L$ = missiilin ehjän osan massa

$M L a$ = missiilin rungon lommahdus- tai myötökuorma kohdassa x

V = missiilin ehjän osan nopeus



Kuva 4 Käytetyt merkinnät.

Jos merkitään $M\ddot{x} = P(x)$ ja $M = \mu(x)$ ja otetaan huomioon yhteys $V = dx/dt$ voidaan yhtälö (9) esittää muodossa

$$P(x) + \mu(x) \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = F(t); \quad (10)$$

missä

$P(x)$ = missiilin lommahdus- tai myötökuorma kohdassa x

$\mu(x)$ = missiilin massa pituusyksikköä kohti kohdassa x

$x(t)$ = missiilin murskautuneen osan pituus ajanhetkellä t

$F(t)$ = reaktiovoima hetkellä t

Tämä laskutapa, impulssin määrittämiseksi, on varsin käyttökelpoinen, silloin kun missiili saa suuria muodonmuutoksia, jolloin maalin taipumalla ja kappaleen tunkeumalla ei ole oleellista merkitystä.

"Koville" missiileille impulssi voidaan määrittää likimääräisesti energia-tasapainosta

$$\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \cdot x = \frac{1}{2} mv^2; \quad (11)$$

missä

$P(t)$ = impulssi

x = tunkeumasyvyyys (esim. kaavasta 1)

m = missiilin massa

v = missiilin nopeus

T = törmäyksen kesto aika

Törmäyksen kesto aika saadaan olettamalla, että nopeus v vähenee törmäyksen aikana lineaarisesti nolnaan, joten

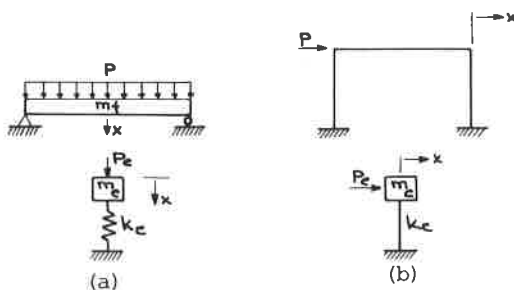
$$T = \frac{2x}{v} \quad (12)$$

Jos oletetaan, että törmäysvoima on vakio, voidaan tämä ratkaista (11):sta ja saadaan

$$P = \frac{mv^2}{2x} \quad (13)$$

Kun impulssi on määritetty esim. kaavan (10) tai (11) mukaan voidaan rakenne mitoitaa laskemalla rakenne ns. yksimassasysteeminä.

Yksimassasysteemeissä rakenne muutetaan yhden massan ja jousivakion systeemiksi. Kuvissa 5a ja b on esitetty rakenne ja rakennetta vastaava yksimassa-



Kuva 5 Yksimassasysteemin havainnollistaminen.

systeemi. Kun yksimassasysteemi on muodostettu, voidaan rakennetta käsitellä käyttämällä yleisesti tunnettua dynamiikan yhtälöä

$$m_e \ddot{x}(t) + k_e x(t) = P_e(t) \quad (14)$$

Yhtälön (14) ratkaisuna saadaan rakenteen siirtymä $x(t)$. Verrattessa $x(t)$:n maksimi arvoa staattisen kuormituksen P aiheuttamaan siirtymään saa-

daan ns. kuormakerroin. Kuormaker-
toimen arvoja löytyy kirjallisuudes-
ta. Kuvassa 6 on esitetty joitakin
arvoja eräille impulsseille. Kuvas-
ta nähdään esim., että kuormitusta-
pauksessa $P_2 = P_1$ saadaan suhteella
 t_1/t_e (t_e = rakenteen ominaisväräh-
dysaika) = $2 \cdot 10^{-2}$ kuormakertoimeksi
2 eli kuorman dynaaminen vaikutus
tulee huomioiduksi, kun rakenne mi-
toitetaan staattiselle kuormalle
 $2P_1$.

Leikkausteräksät

Jotta voidaan olla varmoja, että
taivutustilan edellyttämät muodonmuu-
tokset voivat tapahtua, on tärkeitä
ehkäistä mahdollinen leikkausmurto. Kuva 6 Kuormakertoimen arvoja /6 s.51/.
Tämä saavutetaan mitoittamalla ra-
kenne kestämaan leikkausrasitukset, jotka aiheutuvat pistekuormasta, jonka
suuruus on yhtä kuin rakenteen rajakuorma. Esim. kuvan 3 mukaisen myötöku-
vion rajakuorma P on

$$P = 4\pi m_u \quad (15)$$

Tällöin edellyttäen, että positiivinen ja negatiivinen myötömomentti ovat
 m_u :n suuruiset. Lähteen [1] mukaan on leikkausvoimaa laskettaessa käytettä-
vä vielä varmuuskerrointa 1,5. Tällöin saadaan rajakuormaksi P_s

$$P_s = 6\pi m_u ; \quad (16)$$

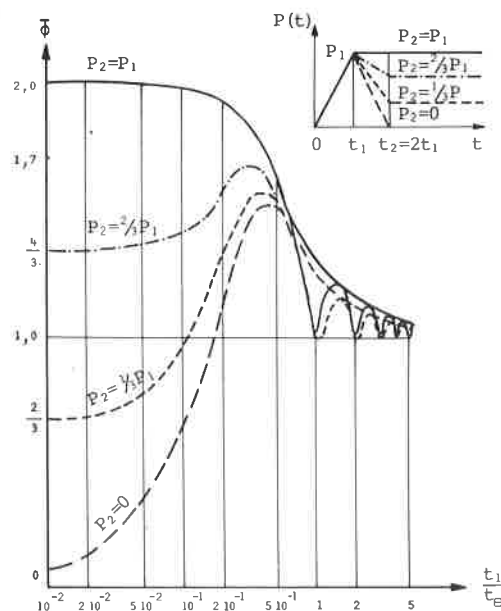
missä

$$\pi = 3,14159$$

$$m_u = \text{myötömomentti (+ ja -)}$$

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Kennedy, R.P., A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, Nuclear Engineering and Design, Volume 37, n:o 2, 1976.
- [2] Structural Analysis of Nuclear Power Plant Facilities, ASCE 1976, draft.
- [3] Plant Design against Missiles, ANSI N177, April 1974, draft.
- [4] Chelapati, C-V. et al., Structural Analysis and Design of a Nuclear Power Plant Building for Aircraft Crash Effects, Nuclear Engineering and Design, Volume 37, n:o 2, 1976.
- [5] Norris et al., Structural Design for Dynamic Loads, McCraw-Hill, USA 1959.



[6] Stangenberg, F., Berechnung von Stahlbetonbauteilen für dynamische Beanspruchungen bis zur Tragfähigkeitsgrenze, Konstruktiver Ingenieurbau; Berichte, Heft 16, Vulkan-Verlang, Essen 1973.

[7] Louhenkilpi, K., Lentokoneen törmäys ydinvoimalaitoksen suojakuoreen. Diplomityö, HTKK, rakenteiden mekaniikka, 1977.

Kari Louhenkilpi, dipl.ins., Insinööritoimisto OY KAISTA & SEBBAS AB, Helsinki.