

LÄMPÖGRADIENTTI TERÄSBETONISEN SUORAKAIDEPALKIN KUORMITUKSENA

Kari Mäkelä

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 9
No. 2 1976 s. 17-26

YHTEENVETO: Artikkelissa tarkastellaan kirjoittajan lisenssiaattityöhön liittyvää tutkimusta, jonka tarkoituksena oli ensiksikin kehittää koestusmenetelmä, jolla aikaansaataisiin teräsbetoniseen suorakaidepalkkiin lineaarinen lämpökenttä sekä pystytettäisiin mittaamaan palkkiin syntyneitä rasituksia ja toiseksi tutkia teräsbetoniseen suorakaidepalkkiin syntyviä rasituksia, kun sitä kuormitti lineaarinen lämpökenttä, sekä kehittää yksinkertainen laskentamalli ko. kuormitustapaukselle. Artikkelin alkuosassa esitellään käytetty koejärjestelmä ja koepalkit. Loppuosassa tarkastellaan koetuloksista tehtyjä johtopäätöksiä sekä yksinkertaista laskentamallia.

1. KOEPALKIT

Lineaarisen lämpögradientin vaikutusta tutkittiin seitsemällä (7) suorakaiteen muotoisella teräsbetonipalkilla, joiden mitat (leveys \times korkeus \times pituus) olivat $200 \times 450 \times 5200 \text{ mm}^3$. Palkissa käytetyn betonin puristuslujuus oli likimäärin 20 MN/m^2 (3 palkkia), 30 MN/m^2 (1 palkki) ja 40 MN/m^2 (3 palkkia). Vetoraudoitusala vaihteli välillä $4,03 \text{ cm}^2$ (0,45 %) ... $19,64 \text{ cm}^2$ (2,18 %), siten että varsinaisilla koepalkeilla (3+3) suhde rauditus/tasapainorauditus oli n. 25 %, n. 50 % ja n. 75 %. Raudoituksena käytettiin harjatankoja A400H.

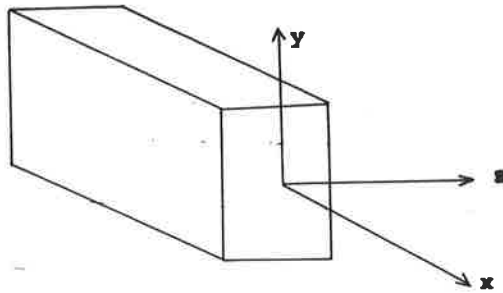
Lineaarinen lämpökenttä

Lineaarisella lämpökentällä tarkoitetaan tässä artikkelissa tilannetta, jossa palkin 3500 mm:n pituisella lämpökuormitetulla osalla lämpötilan muutos täyttää seuraavat ehdot:

- palkin ylä- ja alapinnan välinen lämpötilaero (ΔT) on vakio palkin pituussuunnassa
- lämpötila on vakio palkin leveyssuunnassa
- lämpötila muuttuu lineaarisesti palkin korkeussuunnassa.

Em. ehdot voidaan esittää matemaattisesti kuvan 1 mukaisessa koordinaatistossa yhtälöllä

$$T(xyz) = T_0 + y \frac{\Delta T}{h} \quad (1)$$

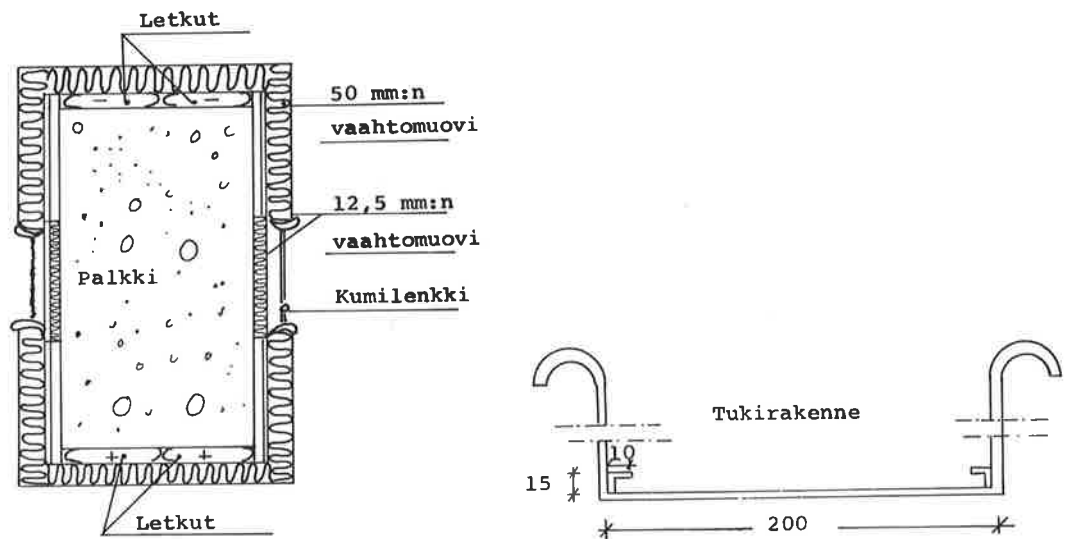


Kuva 1. Käytetty koordinaatisto

2. LÄMPÖKENTÄN AIKAANSAAMINEN

Heti esisuunnitteluvaiheessa todettiin, että virtaava vesi on paras tapa tuoda ja viedä lämpöä palkkiin, sillä vedellä on huomattavan suuri ominaislämpö. Toisaalta käytetty vesi ei saa joutua tekemisiin itse betonin kanssa betonin kosteusliikkeiden välttämiseksi, mutta silti veden täytyy mahdollisimman tiiviisti koskettaa palkin pintoja. Käytetyt lämmönsiirtimet eivät myöskään saa olla niin jäykkiä, että ne haittaavat palkin liikkeitä tai irtoavat palkista, kun se taipuu. Lämmönsiirtimet eivät myöskään saa olla niin raskaita, että ne aiheuttavat palkkiin merkittäviä taipumia.

Edellä mainitut vaatimukset täyttäväksi järjestelmäksi kehitettiin kuvan 2 mukainen lämmönsiirrin.



Kuva 2. Lämmönsiirrin

Sekä palkin ylä- että alapintaa vasten tuettiin 2 kpl 1 1/2":n mustaa, muovitettua, paineen- ja lämmönkestävää, joustavaa paloletkua. Alapinnan letkuissa, joissa kiersi lämmin vesi ja vedenkierto tapahtui eri letkuissa eri suuntiin.

Letkujen tuenta palkkia vasten aikaansaatiin paksuudeltaan 0,5 mm:n teräspellin avulla. Pellissä oli 240 mm:n välein paksuudeltaan 3 mm:n teräskorvakkeita, jotka säätivät pellin etäisyydeksi palkista n. 15 mm. Täten letkut eivät puristuneet tukkoon palkkia vasten. Korvakkeisiin oli lisäksi hitsattu koukut. Palkin ylä- ja alapuoliset lämmönsiirtimet sidottiin näistä koukuista toisiinsa, joten vesiletkut eivät paineen satunnaisesti noustessa päässeet myöskään turpoamaan ja irtoamaan palkista.

Lämmönvaihtimet oli päältä ja sivulta koukkujen korkeudelle saakka eristetty paksuudeltaan 50 mm:n vaahtomuovilla. Sivuilta palkki oli koukkujen välisellä osuudella eristetty 12,5 mm:n vaahtomuovilla.

Esitetyn järjestelmän todettiin olevan kevyt eikä sillä ollut palkin toimintaa häiritsevää taivutusjäykkyyttä.

Lämmin vesi (T_l) otettiin palkin alapuolisiin letkuihin suljetusta vesijärjestelmästä, joka käsitti n. 25 lt:n vetoisen astian siihen kiinnitettyine pumppuineen ja termostaattiohjattuine lämmitysvastuksineen. Termostaatti pystyi pitämään lämpimän veden lämpötilana $T_l \pm 0,05^\circ\text{C}$. Pumppu antoi vedelle virtaaman n. 5 lt/min.

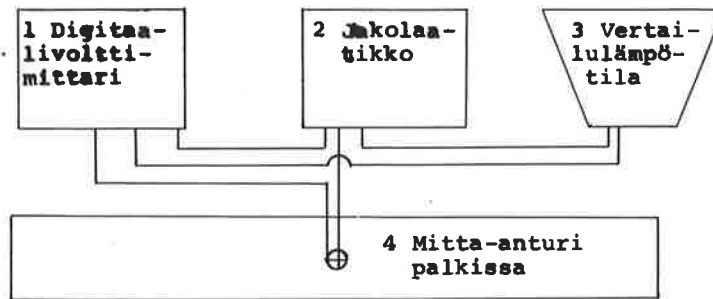
Kylmä vesi (T_k) otettiin suoraan kunnallisesta vesijohtoverkosta. Vedden virtaamana pidettiin n. 7 lt/min. Kylmän veden tulolämpötiloissa havaittiin vuorokauden- ja vuodenaikavaihteluita. Vuorokausittain vesi oli kylmimmillään n. klo 15.00 ja lämpimillään n. klo 6.00. Eroa oli n. $2..3^\circ\text{C}$. Vuodenaikavaihteluna todettiin, että helmi-maaliskuussa vesi oli n. $+4..5^\circ\text{C}$ ja heinä-elokuussa n. $21..22^\circ\text{C}$. Koska lämminvesipuolella lämpötilaa ei letkujen sulamista peläten uskallettu nostaa yli $+80^\circ\text{C}$:n, jäivät saavutetut lämpögradientit kesäaikana hieman alhaisemmiksi kuin keväällä ja syksyllä.

Hyötysuhteeksi saatiin n. 56% eli palkkiin saatu lämpötilaero oli n. 56% kiertovesien lämpötilaerosta ($T_l - T_k$).

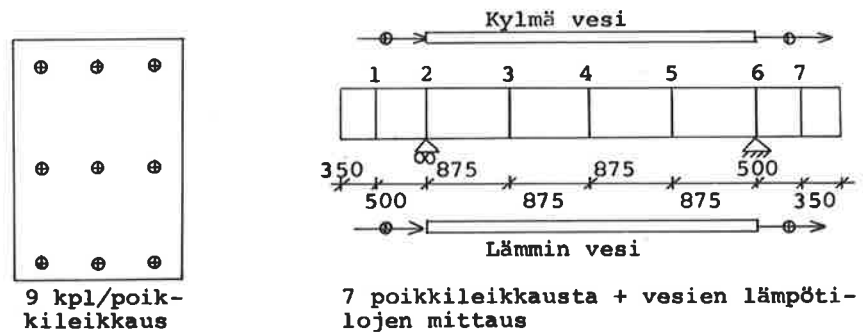
3. LÄMPÖTILAN MITTAUS

Syntynyttä lämpökenttää mitattiin sähköisesti kupari-konstantaani antureilla. Mittausjärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 3.

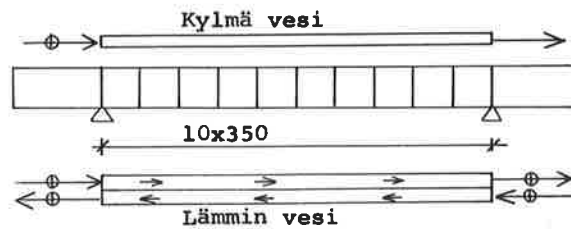
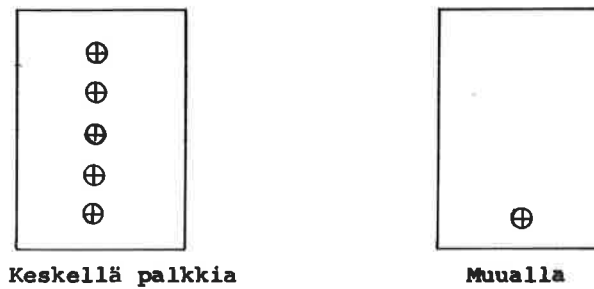
Mitta-antureiden sijainti palkissa 1 oli kuvan 4 mukainen. Ensimmäisessä palkista saatujen tulosten nojalla varsinaisissa koepalkeissa (2...7) käytettiin kuvan 5 mukaista järjestelmää. Mitta-antureita oli paitsi palkissa myös tulevilla ja lähteillä vesiletkuissa.



Kuva 3. Kaaviokuva lämpötilojen mittausjärjestelmästä.



Kuva 4. Palkin 1 mitta-anturien sijainti.



Kuva 5. Palkkien 2...7 mitta-anturien sijainti.

4. HAVAINTOJA SAAVUTETUISTA LÄMPÖKENTISTÄ

Kokeet suoritettiin siten, että lämpimän veden lämpötilaa nostettiin portaittain arvoihin 20°C, 40°C, 60°C ja 80°C, ja laskettiin portaittain arvoihin 80°C, 60°C, 40°C ja 20°C määräajoin.

Lämpökentän tasoittumisaika eli aika, jonka kuluttua käytetyllä mittausjärjestelmällä ei palkissa enää havaittu lämpötilan muutoksia oli n. 45 tuntia gradienttia 1°C/cm kohti. Varsinaisissa kokeissa käytettiin varmuuden vuoksi aikaa 100 tuntia gradienttia 1°C/cm kohti.

Lämpökentän poikittaisjakautuma oli mittaustarkkuuden rajoissa vakio.

$$T(xyz) = T(xy) \quad (2)$$

Lämpökentän pitkittäisjakautumassa oli havaittavissa selvä alku- ja loppuhäiriö siellä missä lämpökuormitus alkoi ja loppui. Nämä tasoittumisvyöhykkeet olivat varsin lyhyet ja niiden vaikutusta pyrittiin vielä vähentämään koejärjestelyllä. Täten voidaan siis käyttää lämpötilafunktiota

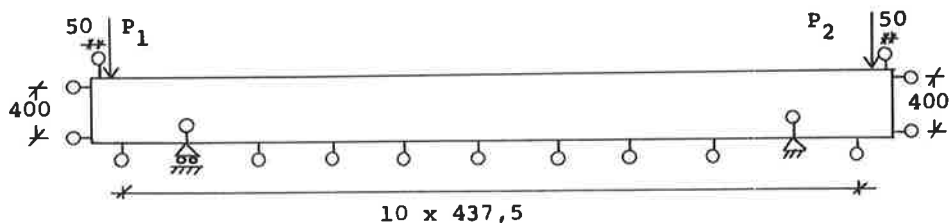
$$T(xyz) = T(y) \quad (3)$$

Lämpökentän pystyjakautuma lämpögradientin pienillä arvoilla (n. 0,25°C/cm) oli lineaarinen, mutta suurilla arvoilla (n. 1,0°C/cm) epälineaarinen. Epälineaarisuus ei kuitenkaan ollut kovin suurta, joten likimäärin on voimassa yhtälö

$$T(xyz) = T(y) = T_0 + y \frac{\Delta T}{h} .$$

5. LÄMPÖKUORMITUSKOKEET

Koepalkit tuettiin ja varustettiin kuvan 6 mukaisin mittalaittein. Edellä esitetty lämpökenttä vaikutti palkkiin sen tukien välisellä matkalla (3500mm).

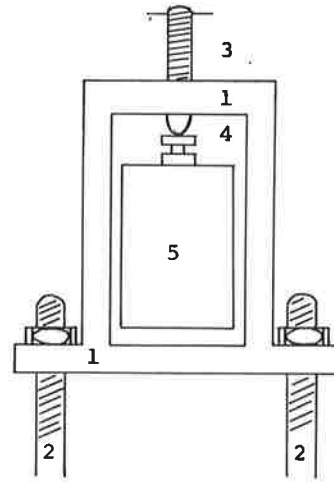


○ = mittakello (17 kpl) Baty, jonka lukemistarkkuus oli 0.002 mm/jako-osa.

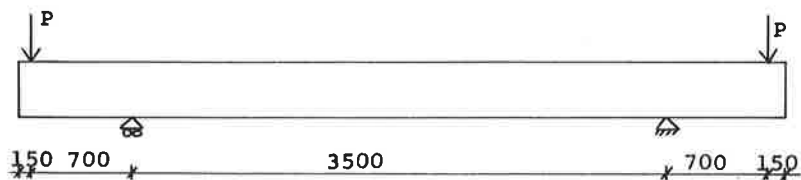
Kuva 6. Kokeen yleisjärjestely.

Jäykkä kiinnitys palkin päissä - eli voimat P_1 ja P_2 - aikaansaatiin kuvien 7 ja 8 mukaisin järjestelyin.

1. Teräskehä
2. Kiinnitystangot, joilla kehä kiinnitettiin lattiaan
3. Voimaruuvi
4. Dynamometri (5Mp tai 10Mp)
5. Koepalkki



Kuva 7. Laitteisto voiman aikaansaamiseksi ja mittaamiseksi.



Kuva 8. Jäykän kiinnityksen aikaansaaminen.

Kuvan 7 mukainen laitteisto vaikutti palkkeihin pisteissä P . Jäykkä kiinnitys saavutetaan, kun

- palkin taipumaviiva tukien välillä on suora,
- palkin taipumaviivan tangentti tuilla on yhdensuuntainen tukilinjan kanssa.

Kulloinkin vaikuttavalla lämpögradientin arvolla vaatimukset toteutettiin säätämällä voimat P_1 ja P_2 sopiviksi. Voimien P_1 ja P_2 avulla taas voitiin laskea kiinnitysmomentit M_1 ja M_2 .

6. YLEISTÄ TERÄSBETONIPALKIN JÄYKKYYDESTÄ

Jos tasajäykkää (jäykkyys EI), päistään kiinnitettyä, suoraa palkkia ra-
sittaa lineaarinen lämpökenttä (yhtälö 1), syntyy palkkiin vakiomomentti

$$M = \alpha \cdot EI \frac{\Delta T}{h} \quad (5)$$

missä α on lämpöpiteneäkerroin,
 EI on palkin jäykkyys ja
 $\frac{\Delta T}{h}$ on lämpögradientti.

Teräsbetonipalkeilla em. momentin M arvioimisen vaikeus on siinä, että palkin jäykkyys EI riippuu kuormittavasta momentista eli

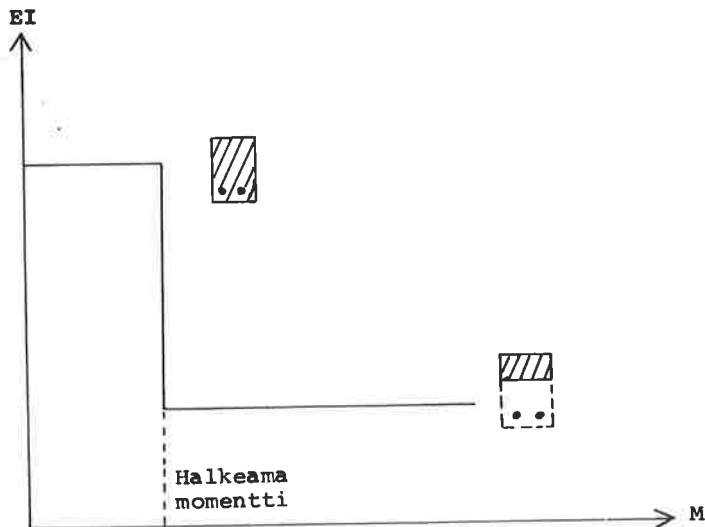
$$EI = f(M) \quad (6)$$

Lisäksi riippuvuus on sellainen, että M :n kasvaessa EI pienenee. Täten, jos siis teräsbetonipalkkia rasittava lämpögradientti $\Delta T/h$ kasvaa, on odotettavissa, että momentti M ei kasva samassa suhteessa.

7. LÄMPÖGRADIENTIN KUORMITTAMAN TERÄSBETONIPALKIN JÄYKKYYS

Koesarjan pienuudesta (7 palkkia) johtuen ehdottomia, pitkälle vietyjä johtopäätöksiä ei voitu tehdä, mutta seuraava yksinkertainen riippuvuus näyttää pätevän.

Lämpögradientin kuormittaman teräsbetonipalkin jäykkyys pienenee erittäin nopeasti määrättyllä momentin arvolla. Ennen tätä pienenemistä palkki käyttäytyy ehjän palkin tavoin ja sen jälkeen kuin vedetyltä poikkileikkauksen osalta haljennut palkki. (Kuva 9.)

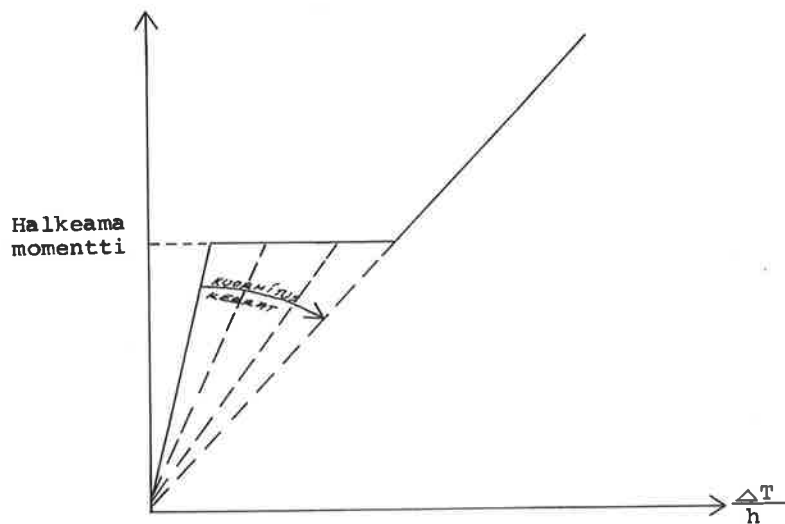


Kuva 9. Lämpögradientin kuormittaman teräsbetonipalkin idealisoitu jäykkyys.

Palkin vetoraudoitusosalalla näytti myös olevan vaikutuksensa. Kuvan 9 esittämä idealisointi päti sitä paremmin mitä suurempi raudoituspäätös oli. Raudoituspäätöksen ollessa yli n. 2 % em. idealisointi oli varsin tarkkaan voimassa ja päätöksen ollessa alle 1 % oli havaittu jäykkyys n. 1,5 kertaa vedetyltä poikkileikkauksen osalta haljenneen palkin jäykkyys. Vaikutus saattaa johtua myös koejärjestelystä, koska lämpögradienttia ei voitu nostaa tarpeeksi suureksi.

Lisäksi todettiin, että vaikka palkki käyttäytyi kuin vedetyltä poikkileikkauksen osalta haljennut palkki, ei siitä mikroskooppillakaan (10 x suurennus) löytynyt halkeamia. Tämä viittaa siihen, että halkeamat ovat tasanjakautuneita, hyvin lähekkäin olevia mikrohalkeamia. Teoreettisesti niin pitää ollakin, koska lämpögradientin aiheuttama momentti kuormittaa palkkia tasaisesti eivätkä jännitykset poistu halkeamien väliseltä alueelta.

Idealisoituna lämpögradientin $\frac{\Delta T}{h}$ ja momentin M välinen riippuvuus teräsbetonipalkeille on kuvan 10 mukainen.



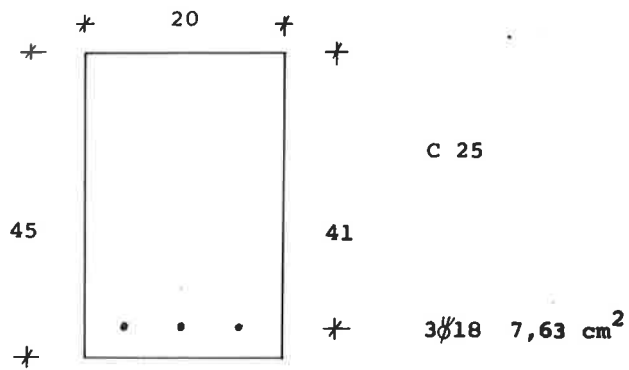
Kuva 10. Idealisoitu teräsbetonipalkin $(\frac{\Delta T}{h} ; M)$ - riippuvuus.

Kuormituksen poistuttua mikrohalkeamat sulkeutuivat niin hyvin, että seuraavalla kuormituskerralla palkki käyttäytyi lähes samoin kuin ensimmäiselläkin. Vasta useiden kuormituskertojen jälkeen palkin jäykkyys väheni havaittavissa määrin pysyvästi.

Esimerkki

Määrättävä kuvan 11 mukaista palkkia rasittava momentti ΔT :n funktiona. Ehjälle poikkileikkaukselle saadaan

$$\begin{cases} EI = 432 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2 \\ W = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \end{cases}$$



Kuva 11.

Koska betonin vetolujuus on likimain C/10 eli nyt 2,5 MN/m², on palkin halkeamamomentti

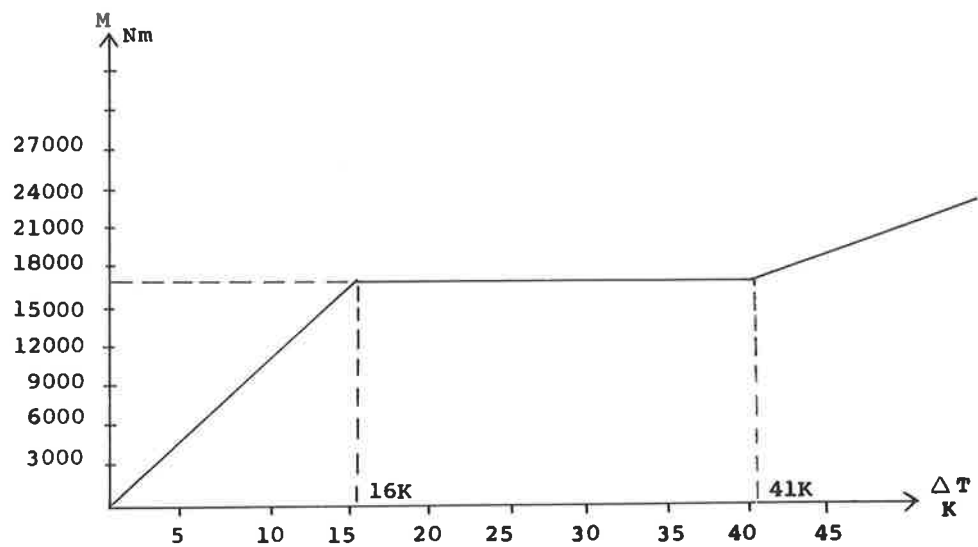
$$M_h = W \cdot \sigma = 16875 \text{ Nm} \approx 17000 \text{ Nm}$$

Poikkileikkauksen vedetyltä osalta ($X \approx 10,7 \text{ cm}$) haljenneen palkin jäykkyys on $(EI)_h = 170 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2$.

Lämpömomentti on

$$M = EI \frac{\Delta T}{h}$$

Lopputulos on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12.

LOPPUSANAT

Työ suoritettiin prof. T. Recharttin johdolla HTKK:n rak.ins.osaston rakennetekniikan laitoksen laboratorioissa pääosin vuoden 1973 aikana.

KÄYTETYT MERKINNÄT

EI	palkin jäykkyys
$(EI)_h$	haljenneen palkin jäykkyys
M	momentti
M_h	halkeamamomentti
P_1 ja P_2	palkin päihin vaikuttavia voimia
T	lämpötila
$T(xyz)$	lämpökenttä
T_o	palkin painopisteakselin lämpötila
ΔT	palkin ylä- ja alapinnan välinen lämpötilaero
T_k	kylmän veden lämpötila
T_l	kuuman veden lämpötila
W	taivutusvastus
h	palkin korkeus
x,y,z	koordinaatit
α	lämpötilakerroin
σ	jännitys
X	poikkileikkauspinnan vedetyn osan korkeus

KIRJALLISUUTTA

K. Mäkelä: Lämpögradientti teräsbetonisen suorakaidepalkin kuormituksena. Lisensiaattityö HTKK 1975.

Kari Mäkelä, tekn.lis., Tiilikeskus Oy, Helsinki