

EINO NIEMELÄ

Rakenteiden Mekaniikka Vol 21
No 4 1989, s. 61...68

Kuormitetun betonin muodonmuutokset on niitä tarkemmin erittelemättä yleisimmin esitetty yhdellä kuvaajalla, joka on yleensä ollut käyrä. Sen matemaattinen approksimatio on vaihdellut tekijästä riippuen. Kuormitetun betonin muodonmuutos on yleisesti jaettu palautuvaan eli kimmoiseen kuormituksen vaikutusajasta riippumattomaan sekä pysyvään kuormituksen vaikutusajasta riippuvaan muodonmuutokseen eli virumaan. Suoritettaessa koekuormituksia ja muodonmuutuskokeita on kuitenkin voitu todeta, että erityisesti aikaisemmin kuormittamattomaan eli ns. neitseelliseen betoniin syntyy sitä ensi kertaa kuormitettaessa ajasta riippumaton palautumaton muodonmuutos. Viimeisimmässäkään betonin ominaisuuksia käsittelevässä laajassa julkaisussa siihen ei ole kiinnitetty sanotavaa huomiota (2), vaan on katsottu sen sisältyvän kuormitusajasta riippuvaan virumaan.

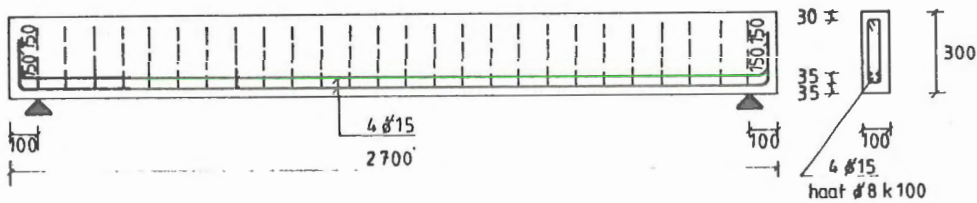
Viruman on katsottu syntyvän hyvin pitkän vaikutusajan kuluessa jopa niin, että se kasvaa vielä jopa 30 vuoden kuormituksen jälkeen (2). Aivan samoin kuin kuormitusaika vaikuttaa virumaan kuormituskertojen lukumäärä. Niinpä viruma kasvaa vähäisessä määrin jopa miljoonannen kuormituskerran jälkeen. Kuormituskokeissa on voitu todeta myös se, että muodonmuutoksen kuvaajan käyrä muuttuu päinvastaiseksi kuormituskertojen luvun kasvaessa (3) (4).

Edellä esitettyjen tosiasiain esille tuomiseksi ryhdyttiin seuraavassa selvitettyihin kokeisiin. Kokeiden tarkoituksena on ollut selvittää niitä palautumattomia muodonmuutoksia, jotka syntyvät palkkiin sitä ensi kertaa kuormitettaessa ja kun sitä toistuvasti kuormitetaan ns. käyttörajatilaa vastaavalla kuormalla. Tämä tarkoittaa kuormaa, joka on noin puolet rakenteen murtokuormasta.

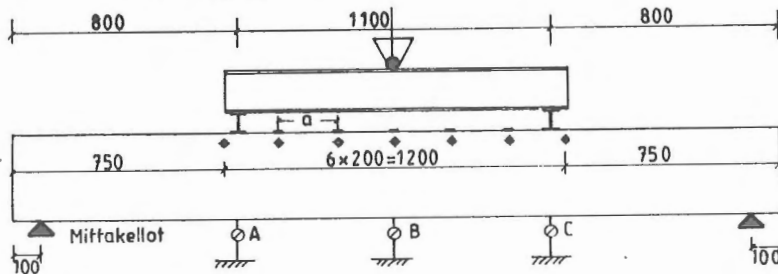
KOEPALKIT

Koetta varten valmistettiin seitsemän palkkia, joista lähinnä kolmen muodonmuutoksia tarkastellaan seuraavassa. Palkkien koettaminen suoritettiin niiden betonin ollessa 60 vrk ikäistä. Kuuden vertailukoekappaleen keskimääräinen lujuus oli $34,6 \text{ MN/m}^2$, joten betonin voidaan otaksua olevan lujuusluokkaa K 35.

Palkin dimensiot ja rauditus selviävät kuvasta 1.



Palkkien taipumien mittauspisteiden ja puristumain mittaussvälien sijainti ilmenee kuvasta 2.



Palkkien laskennallinen murtokapasiteetti oli

$$7/8 h \times A_s \times f_{yk} = 0.875 \times 0.2475 \times 7.08 \times 40,00 \text{ kNm} = 61.3 \text{ kNm}.$$

Kokeen päättyessä määritettiin palkkien murtokapasiteetti. Murtokuormat olivat 165, 168 ja 170 kN ja vastaavat murtomomentit ottaen huomioon rakenteen omapaino olivat 58,6 - 60,3 kNm. Näin voitiin todeta, että rakenteen varsin yksinkertainen kapasiteettimääritys oli kohtuullisen lähellä oikeaa. Tämä vastaa noin 350 palkkikokeen vertailusta saatua tulosta. (1)

KUORMITUSJÄRJESTELY

Palkkien kuormituksen nollapiste vastasi jokaisessa mittauksessa 5 kN kuormalla kuormitetun rakenteen puristumaa ja taipumaa. Palkkia ensi kertaa kuormitettaessa kuormaa nostettiin 10 kN portaissa 75 kN asti joka viides minuutti. Palkkia toistuvasti kuormitettaessa kuormitusportaat olivat 5,25,45 kN. Kunkin kuorman vaikuttamisaika, kuormituslisäys ja poisto mukaan lukien oli 5 minuuttia. Tämä kuormitus toistettiin kymmenen kertaa. Seuraavassa tarkastellaan taulukoiden avulla kolmen palkin taipumia ja vain yhtä puristuman mittaussväliä, koska muiden vastaavat tulokset olivat tyypiltään samanlaisia.

TYYPILLINEN PURISTUMA PALKKIA TOISTUVASTI KUORMITETTAESSA

Jäljempänä olevat arvot on mitattu merkityllä alueella a palkkia 1 toistuvasti kuormitettaessa.

ENSI KUORMITUS

kN		
5	0.000	
15	0.123	
25	0.115	
35	0.135	
45	0.138	
55	0.148	
65	0.157	
75	0.165	0.981, josta pysyvä 0.277.

KUORMITUSSARJAN KUORMITUS 1

5	0.000	
25	0.217	
45	0.214	
75	0.313	0.744, josta pysyvä 0.022.

KUORMITUSSARJAN KUORMITUS 2

5	0.000	
25	0.227	
45	0.206	
75	0.324	0.757, josta pysyvä 0.009.

KUORMITUSSARJAN KUORMITUS 3

5	0.000	
25	0.238	
45	0.207	
75	0.315	0.760, josta pysyvä 0.013.

KUORMITUSSARJAN KUORMITUS 10

5	0.000	
25	0.240	
45	0.232	
75	0.305	0.777, josta pysyvä 0.000.

Yhdennentoista kuormituskerran jälkeen palautumaton muodonmuutos oli kasvanut määrään 0.352 o/oo. Ensi kuormituskerran jälkeisen kymmenen seuraavan kuormituskerran pysyvän puristuman keskimääräinen lisäys oli 0.007 o/oo. Muodonmuutoksen hitaaseen ehtymiseen perustuu CEB:n suosittelemat kimmokertoimen määrittäminen. Muodonmuutoksen ehtyminen on myös havaittavissa palkin taipuman kehittämisestä samojen kuormituskertoimen vallitessa. Tämä käy ilmi seuraavista taulukoista.

PALKIN NUMERO 1 TAIPUMAN KEHITYS

t min.	Kuorma kN	A	ΣA	B	ΣB	C	ΣC
0	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	15	0.398	0.398	0.563	0.563	0.431	0.431
10	25	0.465	0.863	0.632	1.195	0.480	0.911
15	35	0.493	1.356	0.690	1.885	0.505	1.416
20	45	0.558	1.914	0.736	2.621	0.541	1.957
25	55	0.567	2.481	0.780	3.401	0.590	2.547
30	65	0.638	3.119	0.872	4.273	0.626	3.173
35	75	0.672	3.791	0.886	5.159	0.680	3.853
0	5	<u>1.145</u>	0.000	<u>1.439</u>	0.000	<u>1.095</u>	0.000
5	25	0.740	0.740	1.049	1.049	0.782	0.782
10	45	0.833	1.573	1.141	2.190	0.857	1.639
15	75	1.267	2.840	1.745	3.935	1.286	2.925
0	5	<u>1.224</u>	0.000	<u>1.548</u>	0.000	<u>1.183</u>	0.000
5	25	0.750	0.750	1.055	1.055	0.784	0.784
10	45	0.848	1.598	1.153	2.208	0.867	1.651
15	75	1.238	2.836	1.735	3.943	1.262	2.913
0	5	<u>1.243</u>	0.000	<u>1.560</u>	0.000	<u>1.193</u>	0.000
5	25	0.787	0.787	1.126	1.126	0.843	0.843
10	45	0.838	1.625	1.136	2.262	0.856	1.699
15	75	1.232	2.857	1.708	3.970	1.281	2.980
0	5	<u>1.291</u>	0.000	<u>1.621</u>	0.000	<u>1.254</u>	0.000
5	25	0.789	0.789	1.123	1.123	0.840	0.840
10	45	0.839	1.628	1.153	2.276	0.858	1.698
15	75	1.236	2.864	1.696	3.972	1.273	2.971
0	5	<u>1.303</u>	0.000	<u>1.643</u>	0.000	<u>1.268</u>	0.000
5	25	0.803	0.803	1.145	1.145	0.851	0.851
10	45	0.869	1.672	1.188	2.333	0.893	1.744
15	75	1.228	2.900	1.660	3.993	1.244	2.988
0	5	<u>1.345</u>	0.000	<u>1.730</u>	0.000	<u>1.325</u>	0.000
5	25	0.808	0.808	1.120	1.120	0.840	0.840
10	45	0.855	1.663	1.167	2.287	0.880	1.720
15	75	1.228	2.891	1.679	3.966	1.259	2.979
0	5	<u>1.365</u>	0.000	<u>1.694</u>	0.000	<u>1.325</u>	0.000
5	25	0.808	0.808	1.184	1.184	0.860	0.860
10	45	0.868	1.676	1.182	2.366	0.891	1.751
15	75	1.221	2.897	1.675	4.041	1.258	3.009
0	5	<u>1.373</u>	0.000	<u>1.728</u>	0.000	<u>1.328</u>	0.000
5	25	0.832	0.832	1.180	1.180	0.887	0.887
10	45	0.873	1.705	1.205	2.385	0.901	1.788
15	75	1.209	2.914	1.651	4.036	1.222	3.010
0	5	<u>1.393</u>	0.000	<u>1.768</u>	0.000	<u>1.357</u>	0.000
5	25	0.830	0.830	1.098	1.098	0.854	0.854
10	45	0.877	1.707	1.282	2.380	0.930	1.784
15	75	1.214	2.921	1.652	4.032	1.234	3.018
0	5	<u>1.403</u>	0.000	<u>1.763</u>	0.000	<u>1.362</u>	0.000
5	25	0.848	0.848	1.167	1.167	0.889	0.889
10	45	0.864	1.712	1.231	2.398	0.899	1.788
15	75	1.218	2.930	1.850	4.048	1.225	3.013

PALKIN NUMERO 2 TAIPUMAN KEHITYS

t min.	Kuorma kN	A	ΣA	B	ΣB	C	ΣC
0	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	15	0.433	0.433	0.632	0.632	0.517	0.517
10	25	0.455	0.888	0.659	1.291	0.514	1.031
15	35	0.528	1.416	0.725	2.016	0.582	1.613
20	45	0.507	1.923	0.734	2.750	0.552	2.165
25	55	0.546	2.469	0.787	3.537	0.592	2.757
30	65	0.542	3.011	0.783	4.320	0.581	3.338
35	75	0.580	3.591	0.837	5.157	0.630	3.968
0	5	<u>1.130</u>	0.000	<u>1.537</u>	0.000	<u>1.259</u>	0.000
5	25	0.701	0.701	1.039	1.039	0.793	0.793
10	45	0.789	1.490	1.126	2.165	0.843	1.636
15	75	1.110	2.608	1.648	3.823	1.228	2.864
0	5	<u>1.212</u>	0.000	<u>1.636</u>	0.000	<u>1.332</u>	0.000
5	25	0.717	0.717	1.055	1.055	0.814	0.814
10	45	0.793	1.510	1.142	2.197	0.856	1.670
15	75	1.108	2.618	1.627	3.824	1.213	2.883
0	5	<u>1.253</u>	0.000	<u>1.692</u>	0.000	<u>1.383</u>	0.000
5	25	0.735	0.735	1.079	1.079	0.825	0.825
10	45	0.798	1.533	1.142	2.221	0.860	1.685
15	75	1.102	2.635	1.617	3.838	1.196	2.881
0	5	<u>1.255</u>	0.000	<u>1.702</u>	0.000	<u>1.392</u>	0.000
5	25	0.784	0.784	1.129	1.129	0.872	0.872
10	45	0.797	1.581	1.142	2.271	0.852	1.724
15	75	1.089	2.670	1.617	3.888	1.186	2.910
0	5	<u>1.289</u>	0.000	<u>1.733</u>	0.000	<u>1.420</u>	0.000
5	25	0.772	0.772	1.139	1.139	0.868	0.868
10	45	0.799	1.571	1.150	2.289	0.860	1.728
15	75	1.103	2.674	1.608	3.897	1.193	2.921
0	5	<u>1.300</u>	0.000	<u>1.745</u>	0.000	<u>1.428</u>	0.000
5	25	0.781	0.781	1.139	1.139	0.882	0.882
10	45	0.800	1.581	1.167	2.306	0.867	1.749
15	75	1.107	2.688	1.601	3.907	1.190	2.939
0	5	<u>1.338</u>	0.000	<u>1.792</u>	0.000	<u>1.482</u>	0.000
5	25	0.772	0.772	1.146	1.146	0.857	0.857
10	45	0.790	1.562	1.154	2.300	0.857	1.714
15	75	1.108	2.670	1.593	3.893	1.179	2.893
0	5	<u>1.348</u>	0.000	<u>1.810</u>	0.000	<u>1.477</u>	0.000
5	25	0.783	0.783	1.150	1.150	0.881	0.881
10	45	0.792	1.575	1.160	2.310	0.869	1.745
15	75	1.098	2.673	1.611	3.921	1.168	2.913
0	5	<u>1.341</u>	0.000	<u>1.810</u>	0.000	<u>1.480</u>	0.000
5	25	0.811	0.811	1.183	1.183	0.900	0.900
10	45	0.789	1.600	1.159	2.342	0.863	1.763
15	75	1.109	2.709	1.592	3.934	1.178	2.941
0	5	<u>1.370</u>	0.000	<u>1.833</u>	0.000	<u>1.501</u>	0.000
5	25	0.800	0.800	1.189	1.189	0.901	0.901
10	45	0.788	1.588	1.150	2.339	0.858	1.759
15	75	1.112	2.700	1.603	3.942	1.182	2.941

PALKIN NUMERO 3 TAIPUMAN KEHITYS

t min.	Kuorma kN	A	ΣA	B	ΣB	C	ΣC
0	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	15	0.397	0.397	0.527	0.527	0.413	0.413
10	25	0.500	0.897	0.595	1.122	0.535	0.948
15	35	0.522	1.419	0.728	1.850	0.559	1.507
20	45	0.524	1.943	0.747	2.597	0.543	2.050
25	55	0.599	2.542	0.785	3.382	0.603	2.653
30	65	0.580	3.122	0.787	4.169	0.585	3.238
35	75	0.638	3.760	0.811	4.980	0.630	3.868
0	5	<u>1.000</u>	0.000	<u>1.150</u>	0.000	<u>1.011</u>	0.000
5	25	0.833	0.833	1.144	1.144	0.860	0.860
10	45	0.845	1.678	1.159	2.303	0.866	1.726
15	75	1.255	2.933	1.707	4.010	1.273	2.999
0	5	<u>1.052</u>	0.000	<u>1.218</u>	0.000	<u>1.098</u>	0.000
5	25	0.869	0.869	1.181	1.181	0.863	0.863
10	45	0.865	1.734	1.180	2.361	0.872	1.735
15	75	1.219	2.953	1.673	4.034	1.229	2.964
0	5	<u>1.106</u>	0.000	<u>1.272</u>	0.000	<u>1.129</u>	0.000
5	25	0.880	0.880	1.188	1.188	0.901	0.901
10	45	0.854	1.734	1.190	2.378	0.878	1.779
15	75	1.221	2.955	1.660	4.038	1.233	3.012
0	5	<u>1.132</u>	0.000	<u>1.310</u>	0.000	<u>1.170</u>	0.000
5	25	0.900	0.900	1.193	1.193	0.897	0.897
10	45	0.868	1.768	1.202	2.395	0.883	1.780
15	75	1.210	2.978	1.656	4.051	1.227	3.007
0	5	<u>1.172</u>	0.000	<u>1.353</u>	0.000	<u>1.210</u>	0.000
5	25	0.878	0.878	1.189	1.189	0.889	0.889
10	45	0.892	1.770	1.208	2.397	0.892	1.781
15	75	1.215	2.985	2.657	4.054	1.227	3.008
0	5	<u>1.200</u>	0.000	<u>1.368</u>	0.000	<u>1.237</u>	0.000
5	25	0.900	0.900	1.232	1.232	0.912	0.912
10	45	0.890	1.790	1.210	2.442	0.890	1.802
15	75	1.212	3.002	1.641	4.083	1.221	3.023
0	5	<u>1.230</u>	0.000	<u>1.404</u>	0.000	<u>1.272</u>	0.000
5	25	0.882	0.882	1.215	1.215	0.904	0.904
10	45	0.895	1.777	1.210	2.425	0.887	1.791
15	75	1.251	3.028	1.673	4.098	1.250	3.041
0	5	<u>1.258</u>	0.000	<u>1.431</u>	0.000	<u>1.301</u>	0.000
5	25	0.891	0.891	1.218	1.218	0.907	0.907
10	45	0.903	1.794	1.231	2.449	0.903	1.810
15	75	1.203	2.997	1.627	4.076	1.206	3.016
0	5	<u>1.274</u>	0.000	<u>1.451</u>	0.000	<u>1.323</u>	0.000
5	25	0.898	0.898	1.239	1.239	0.907	0.907
10	45	0.900	1.798	1.201	2.440	0.902	1.809
15	75	1.210	3.008	1.637	4.077	1.217	3.026
0	5	<u>1.300</u>	0.000	<u>1.477</u>	0.000	<u>1.347</u>	0.000
5	25	0.880	0.880	1.213	1.213	0.896	0.896
10	45	0.909	1.789	1.217	2.430	0.909	1.805
15	75	1.228	3.017	1.654	4.084	1.225	3.030

Taulukossa on alleviivattu mittauspisteen pysyvän kokonaistaipuman lukuarvo ennen seuraavan kuormitusjakson alkua.

Taulukoissa esitetyt mittauspisteet A ja C sijaittivat symmetrisesti kuormituspisteiden alla ja mittauspiste B sijaitsee palkin keskellä. Taulukoista voidaan havaita, että palautumaton muodonmuutos, joka ensi kerralla oli keskimäärin 1.196 mm oli yhdennentoista kuormituskerran jälkeen enää 0.018 mm eli noin 1,5 % ensi kuormituskerran vastaavasta taipumasta. Tarkasteltaessa palkin taipuman kasvua kuormituskertojen lukumäärän kasvaessa voidaan todeta, että ensimmäisen kuormituskerran jälkeen keskimääräinen palautumaton taipuma oli noin 80 % yhdennentoista kuormituskerran jälkeisestä taipumasta eli numeroina $1196:1434 \% = 80,5 \%$. Vastaavasti voidaan todeta, että tarkastellun mittausalue a:n ensimmäisen kuormituskerran jälkeinen palautumaton puristuma on myös noin 80 % yhdennentoista kuormituskerran palautumattomasta kokonaispuristumasta eli numeroina $277:352 \% = 78,6 \%$.

TULOSTEN MERKITYKSESTÄ

Kun betonirakennetta kuormitetaan toistuvasti, tapahtuu kiviaineksen ja sementtikiven keskinäisestä vuorovaikutuksesta johtuen niiden siirtymistä toistensa suhteen. Tämä ilmiö on voimakkain betonia ensi kertaa kuormitettaessa.

Ultraäänitutkimuksissa on vahvistunut käsitys, jonka mukaan jännityksien tasaantuminen tapahtuu jatkuvina mikromurtumina sementtikivessä, jota runkoaine epätasaisesti ja vaihteittain, jopa epäkeskisesti, kuormittaa. Tähän viittaa mm. se, että painuma, joksi ensi kertaa kuormitetun neitseellisen betonin pysyvää muodonmuutosta voidaan kutsua, on hyvin tiivistetyllä ja imubetonilla tavanomaisella tavalla valmistetun betonin vastaavaa ilmiötä vähäisempi, koska niissä kiviaines on jo betonia valmistettaessa toistensa suhteen siirtynyt.

Vaikka nyt esitetty muodonmuutos yleensä luetaan virumaan kuuluvaksi, on erityisesti koekuormituksia suoritettaessa hoikilla rakenteilla nyt esitetyllä ilmiöllä varsin suuri merkitys.

Kun pyritään nostamaan betonin lujuutta, on seurauksena entistä hoikempien rakenteiden käyttö. Tämä puolestaan merkitsee jo vähäisestikin pysyvää muodonmuutoksesta aiheutuvaa rakenteen staattisen toiminnan muutosta.

KIRJALLISUUSLUETTELO:

- (1) M. Herzog: Das Querschnittsbiegebruchmoment von Stahlbeton, teilweise vorgespanntem Beton und Spannbeton nach Versuchen. Beton-und Stahlbetonbau, Heft 3/1975.
- (2) A. M. Neville: Properties of Concrete. 1986
- (3) E. Niemelä: Havaintoja betonin muodonmuutoksista puristavan kuormituksen ollessa lyhytaikainen, portaittain lisääntyvä tai toistuva ja yksiakselinen. VTK Oulu 1969
- (4) E.Niemelä: Some observations of concrete under short-term compressive loading. Nordisk Betong 26 (1982) No 2-4 p 76.

Eino Niemelä,tekn.tri SUOMEN RAKENNUSTUTKIMUS OY