

電力中央研究所 ○正会員 青柳 征夫

〃 〃 満木 泰郎

〃 〃 原口 晃

§ 1. まえがき

最近、我が国においても膨張ケツ岩、焼成フライアッシュ等の良質の人工軽量骨材が数種市販され、これらを用いて普通コンクリートと同程度の圧縮強度の軽量コンクリートを得ることができるようになっている。これに伴って、長大スパンの軽量PC構造物を経済的に設計施工しようとする気運が高まり、すでに試験的に実施されたものもある。本報告は、軽量PCはりの基礎的な諸性状、特に軽量PCはりに関して重要な問題であるせん断破壊性状を検討することを目的に、PCはりの静的破壊試験を行なった結果を報告するものである。

§ 2. 使用材料および試験方法

セメントはアサノ普通ポルトランドセメントを使用した。

軽量骨材には細粗骨材とも三井金属工業K.K. 製膨張ケツ岩人工軽量骨材(メサライト)を用い、普通骨材には相模川産の川砂利および川砂を用いた。粗骨材の最大寸法を1.5mmとし、軽量骨材、普通骨材および混合骨材の3種の骨材を用い、図-1に示したような粒度に調整して使用した。

骨材の比重、吸水量、粗粒率は表-1に示すようである。

PC鋼材には高周波熱錬K.K. 製第4種PC鋼棒(ヤング率 $2.00 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 引張強度 123 kg/mm^2)を使用した。

コンクリートの配合は、細粗骨材とも普通骨材のもの(SS配合)、細粗骨材とも軽量骨材のもの(MM配合)、および軽量粗骨材、細骨材の1.2mm以下を川砂で置き換えたもの(MS配合)の3種とし、スランブを5~7cm、空気量を5~7%を標準として、各配合に低強度および高強度の2段階を設け、表-2に示すような配合とした。

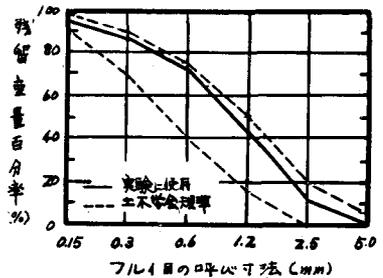


図-1 実験に用いた骨材の粒度曲線

表-1 骨材の比重, 吸水量, 粗粒率

骨材種別	項目	吸水量%	表乾比重	粗粒率F.M
軽量骨材	5-10mm	10.2	1.57	6.60
	10-15	14.9	1.38	
	0-5	2.00	2.10	
普通骨材	5-15	0.9	2.63	6.60
	0-5	1.5	2.61	3.04
混合砂	0-5	8.3	2.43	3.04

- 注) 1) 吸水量は48時間吸水量
 2) 48時間吸水時の骨材の比重を表乾とした。
 3) 軽量骨材の比重, 吸水量の測定はPlenometer法, 普通骨材はJISによる。
 4) 混合砂は1.2-5mmを軽量砂, 0-1.2mmを普通砂

表-2 コンクリートの配合

配合番号	配合種別	打込月日	単位セメント量 kg/m^3	単位水量 kg/m^3	水セメント比%	細骨材率%	単位細骨材量 kg/m^3	単位粗骨材量 kg/m^3		単位骨材量 kg/m^3	単位AE剤量 g/m^3	スランブcm	空気量%
								5-10mm	10-15mm				
1	SS-H	10/4 10/12	410	164	40.0	44.5	686	422	634	1742	492	5.0±0.5	4.7±0.2
2	SS-L	10/7	340	163.5	48.0	41.5	741	420	630	1791	340	7.0	6.3
3	MS-H	9/19, 9/27 9/27	485	183.5	38.0	36.0	528	243	320	1091	679	5.7±0.7	6.3±0.6
4	MS-L	9/21	425	184	43.5	39.0	588.5	238	313.5	1140	510	4.3	6.3
5	MM-H	8/29 8/31	500	185	37.0	41.0	484	232	311	1027	800	4.5±0.1	6.8±0.2
6	MM-L	9/5, 9/8	460	184	40.0	40.0	493	239	316	1048	598	7.1	7.6

注) 配合種別においてSSとは川砂, 川砂利, MSとは軽量粗骨材, 軽量と川砂の混合細骨材, MMとは細粗骨材とも軽量骨材を用いたものをあらわす。AE剤にはピンゾールを使用した。

MM配合およびMS配合のコンクリートは容量100ℓの山中式パン型強制練りミキサーで練り混ぜ、SS配合のコンクリートは容量8切の重力式可傾ドラムミキサーで練り混ぜた。いずれの場合も1バッチを110ℓとし、3分間練り混ぜを行なった。

PCはり供試体、φ10×20cm円柱供試体、φ10cm圧裂試験用供試体および10×10×40cm曲げ試験用供試体は、コンクリート打ち込みの翌々日脱型し、28日間20℃水槽中で養生した後、約2週

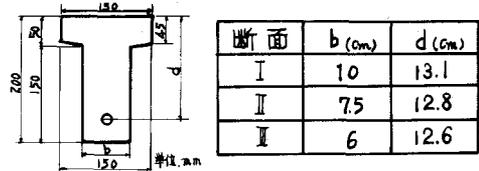


図-2 供試はりの断面寸法

間実験室内で自然乾燥させた後、はりにプレストレスを導入した。プレストレスの導入は30tセンターホールジャッキを用いて行ない、導入後ただちにグラウトを行なった。プレストレス導入後10~14日の後、はりの載荷試験を行なった。

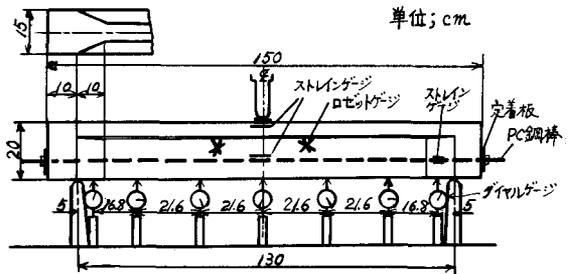


図-3 載荷試験方法

試験に供したはりは、軽量PCはり14本、普通PCはり6本の計20本であって、

スパンを130cmとし、断面はT型であって、その寸法は図-2に示すように3種である。これらを腹部の大きい順にI, II, III断面とする。

はりの載荷試験は、図-3に示すように、スパン中央一点載荷として行ない、ダイヤルゲージによってはりのたわみを、コンクリート表面各部およびPC鋼材のひずみをワイヤーストレインゲージによって測定した。

§ 3. 実験結果

PCはりの載荷試験、コンクリートの強度試験結果等は一括して表-2に示した。

1. 軽量コンクリートの力学的性質

圧裂引張強度係数と圧縮強度の比は、MM配合4~5%、MS配合5~7%、SS配合7~8%であり、曲げ引張強度と圧縮強度の比は、MM配合5.5~7.5%、MS配合6~7%、SS配合8.5~9.5%であって、細骨材に混合砂を用いると引張強度特性が若干改善されるが、一般に気乾状態が置かれた軽量コンクリートの引張強度は普通コンクリートに比べかなり劣っていることが認められた。

圧縮強度の1/2点におけるヤング係数は、MM配合 $1.46 \sim 1.59 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、MS配合 $1.44 \sim 1.73 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、SS配合 $2.24 \sim 2.57 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であって、前2者は普通コンクリートのそれぞれ約65%、70%であった。

自然乾燥状態の単位体積重量は、MM配合 $1555 \sim 1595 \text{ kg/m}^3$ 、MS配合 $1630 \sim 1665 \text{ kg/m}^3$ であって、普通コンクリートの約%であった。本実験に用いたコンクリートについては、引張強度、ヤング率は単位体積重量にほぼ比例して減少していた。

2. PCはりの曲げひび割れ荷重および曲げ破壊荷重

曲げひび割れ荷重の実験値と計算値は2.3の例外を除いて比較的よく一致していた。

曲げ破壊荷重は、はりの上縁におけるコンクリートの破壊ひずみを、軽量コンクリートの場合、0.0035、普通コンクリートの場合、0.0030として、平面保持の仮定に基づいて試的方法によ

り中立軸の位置を求めて計算したものである。表-2において曲げ破壊を生じたはりについてみると、理論値が実験値より大きくなっているものがあるが、これはT型はりであって、しかも曲げ圧縮破壊が多かったために、上フランジの片側に圧縮力が偏心して作用したものがあつたためであると考えられる。

3. PCはりのたわみ

ひび割れ荷重の0.9倍の荷重におけるはりのスパン中央におけるたわみの実験値および理論値 ($\delta = \frac{P\ell^3}{48EI}$) の比較は表-2に示すように、両者はよく一致している。したがって、スパンおよび断面の諸元が同じであればPCはりのたわみはコンクリートのヤング係数に反比例して増大する。しかし、同一設計荷重における軽量PCはりの弾性たわみは、死荷重の減少に伴うはり断面の減少による断面2次モーメントの減少をも考慮すれば、普通PCはりに比べ相当に大きくなるものと考えなければならぬであろう。

破壊荷重の0.9倍の荷重におけるたわみは、軽量はりと普通はりの間では顕著な差は認められず、主として破壊形態に関係し、せん断破壊、曲げ圧縮破壊、曲げ引張破壊の順序でたわみが大きくなっている。

§ 4. 軽量PCはりのせん断強さについて

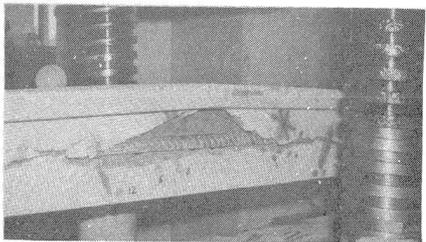
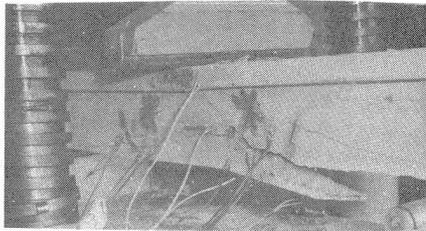
せん断破壊を生じたのは軽量コンクリートはりのみであって、普通コンクリートはりではせん断破壊を起

表 2 実験結果

断面 および 鋼種	有効アレ ストレス (t)	コンクリート				単位体積重量 kg/m ³	曲げひび割れ荷重(P _{cr})		破壊荷重(P _b)		P=0.9P _b におけるたわみ		P=0.9P _b におけるたわみ		破 壊 形 態			
		圧縮強度 kg/cm ²	曲げ強度 kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	静弾性係数 ×10 ⁵ kg/cm ²		実験値 t	計算値 t	実験値 t	計算値 t	実験値 10 ⁻² mm	計算値 10 ⁻² mm	実験値 10 ⁻² mm	計算値 10 ⁻² mm				
I, φ20	1.43	393	228	195	1.52	1572	3.75	3.73	10.05	7.25	7.95	9.13	130	127	1.023	472	曲げ圧縮	
	"	1.38	322	200	2.25	1556	3.85	3.54	10.87	8.50	7.98	10.64	165	172	0.960	580	曲げ圧縮	
	"	9.8	406	285	1.75	1666	-	-	9.03	9.45	9.957	-	133	130	1.023	654	曲げ圧縮	
II, φ20	1.70	504	464	389	2.57	2320	5.20	4.85	10.72	9.25	10.97	0.843	89	102	0.872	438	曲げ引張	
	1.46	393	228	195	1.52	1572	3.90	3.78	10.30	6.75	8.72	0.774	61.3	0.897	0.815	164	せん断	
	1.47	311	242	173	1.46	1555	4.50	3.84	11.71	7.23	7.24	0.998	5.87	1.042	0.830	176	せん断	
III, φ16	1.43	406	285	1.75	1666	3.85	3.80	10.13	6.75	9.02	0.749	5.90	5.72	1.034	0.874	142	せん断	
	1.38	398	238	2.17	154	1640	3.80	3.60	10.56	7.00	7.50	0.933	6.10	6.38	0.957	0.872	138	せん断
	1.65	504	464	389	2.57	2320	4.80	4.53	10.58	8.40	11.05	0.760	9.54	-	-	99	せん断	
IV, φ16	1.62	419	396	280	2.24	2250	4.75	4.43	10.70	7.75	10.40	0.745	7.87	-	-	113	曲げ引張	
	1.15	436	240	178	1.59	1595	3.00	3.08	0.976	6.75	7.24	0.933	5.05	1.109	0.830	113	曲げ引張	
	1.18	322	200	225	1.44	1556	2.90	3.09	0.939	6.45	8.06	0.800	6.07	-	-	121	せん断	
V, φ16	1.10	366	249	238	1.68	1630	3.00	2.99	1.004	6.25	6.86	0.911	6.07	-	-	116	曲げ引張	
	1.10	506	452	370	2.42	2303	3.75	3.19	11.76	7.50	7.50	1.000	7.16	-	-	81	曲げ引張	
	1.13	436	240	178	1.59	1595	3.00	3.08	0.976	4.85	7.13	0.681	4.10	4.46	0.880	0.845	151	せん断
VI, φ16	1.08	311	242	1.95	1.52	1571	2.90	2.95	0.985	4.58	5.80	0.790	4.00	4.29	0.933	0.873	144	せん断
	1.10	366	249	238	1.68	1630	3.45	3.00	1.150	5.03	6.75	0.746	4.65	5.19	0.840	0.924	158	せん断
	1.17	398	238	217	1.54	1640	3.25	3.15	10.30	6.50	7.00	0.930	5.10	5.08	1.002	0.785	135	せん断
VII, φ16	1.29	506	452	370	2.42	2303	3.50	3.75	0.934	6.40	7.12	0.900	7.16	-	-	101	曲げ引張	
	1.24	419	396	280	2.24	2250	3.10	3.57	0.869	5.85	6.58	0.889	6.30	-	-	92	曲げ引張	

(注) 破壊荷重(P_b)の計算値はすべて曲げ破壊として計算したものである。

したものはなかった。せん断破壊を起した軽量はりでは、スパン中央付近に発生した2～3本の曲げひび割れが上フランジとウェブの結合部付近まで伸長した後、破壊荷重の80～95%の荷重でせん断スパンの中立軸付近に載荷点に向かって部材軸と約30°の角度の斜ひび割れを発生した。軽量PCはりのせん断破壊は非常に脆性的であって、大きな金属的な音響を伴って破壊し、中には破壊時のプレストレスの解放に伴う副次的な影響によってはりが完全に破砕してしまったものもあった。はりのせん断破壊後の状態の一例は写真に示すようである。



はりのせん断スパン内の腹部にゲージ長さ60mmのワイヤーストレインゲージを直角型のロゼット状に貼付し、両側3点ずつ計6点を電磁オシログラフで同時記録し、斜引張応力度を求めた。荷重と斜引張応力度の関係は図-4に示すように、曲げひび割れの発生以前であっても、互に直線関係にはなく、荷重の増加に対する斜引張応力度の増加が次第に著しくなっている。この図から、斜引張応力がコンクリートの引張強度を越えたところの荷重を斜ひび割れ荷重とし、この荷重と土木学会「プレストレストコンクリート設計施工指針」に基づき、全断面を有効と考え、コンクリートの引張強度に圧裂引張強度を代入して斜ひび割れ荷重を算定すると、実験値と計算値の比は60～72%であって、計算値はかなり大きな値を与えることが認められた。

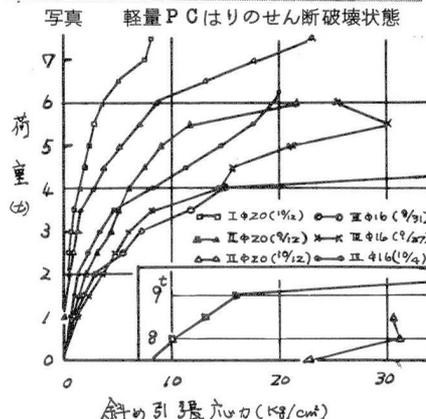


図-4 斜引張応力度の実測値と荷重の関係

この原因としては、斜ひび割れと直角方向に作用する圧縮応力の影響による組み合わせ応力下の引張強度の低下、鋼棒の付着破壊による軸方向圧縮応力の減少などが考えられるが、一応コンクリートの引張強度の代わりにその半を代入して次式によって斜ひび割れ荷重を算定すると、実験値と計算値は表-2に示すように比較的よく一致していた。

$$V_D = \frac{2I_p b_0}{Q} \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma \sigma_t}$$

ここに、 I_p ; PC鋼材換算断面の断面2次モーメント、 Q ; 中立軸より上の断面の中立軸に関する断面1次モーメント、 b_0 ; 腹部の中、 σ_t ; コンクリートの引張強度、 σ ; 中立軸に作用している軸方向圧縮応力である。

したがって、腹鉄筋を計算上配置しない軽量PCはりの許容斜ひび割れ荷重を算定する場合、軽量PCはりのせん断破壊が特に危険であることをも考慮して、許容引張応力度をコンクリートの引張強度の1/4程度とするのが合理的であるように思われる。なお、計算上スターラップを必要としない場合でもスターラップ間隔を軽量PCはりでは普通PCはりに比べ密に配置すべきと考えられる。