

[134] 高強度軽量コンクリート部材の曲げ及びせん断強度

正会員 村山八洲雄（鹿島建設技術研究所）

正会員 ○岩瀬 明（鹿島建設技術研究所）

1.はじめに

軽量コンクリート（LWC）は死荷重が支配的荷重となっている長大PC橋梁への利用が有望視されている。長大PC橋梁に用いる軽量コンクリートとしては、設計基準強度が 400kg/cm^2 程度で、かつ品質管理が容易な粗骨材のみを軽量骨材としたコンクリート（Sand-LWC）が想定される。このような高強度LWCでは、同程度の圧縮強度を有する普通コンクリート（NWC）や低強度のLWCとは静弾性係数、引張強度及び応力ひずみ関係等の基本的力学特性が異なるため、これを用いた部材の挙動もNWCとは違ったものになることが考えられる。そこで、LWC部材の特性を調べるために、鉄筋コンクリート（RC）矩形はりを用いた曲げ及びせん断実験を実施し、これらの結果をNWC RC矩形はりの結果と比較検討した。

部材の曲げ強度は、コンクリートの応力ひずみ関係に影響されるので、まず圧縮時の応力ひずみ関係におけるLWCとNWCの差異を確認した後、RC部材の実験を行って曲げ強度について検討した。

また、部材の斜め引張強度は、コンクリートの引張強度と相関しており、引張強度が小さいLWCでは斜め引張破壊モードのせん断強度はNWCよりも小さくなることが推察される。ここではこのモードに着目した実験を行ってせん断強度について検討した。また、ひびわれ面に沿ったせん断摩擦を測定するための実験も併せて実施した。

表-1コンクリートの配合

2.コンクリートの性質

2.1 コンクリートの配合

今回の実験シリーズでは、圧縮強度 480kg/cm^2 、スランプ $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4 \pm 1\%$ を目標にした表-1に示す配合のLWCと比較用のNWCを用いた。

LWCの理論単位容積重量は 1907kg/m^3 (M, B) 及び 1931kg/m^3 (MH) である。

2.2 静弾性係数と引張強度

ここで用いた高強度LWCの力学的性質の位置づけを明らかにするため、圧縮強度試験、静弾性係数測定および引張強度試験を実施し、既往のデータとの対応を調べた。試験及び測定は、JIS A 1132に従って製作した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、それぞれJIS A 1108、JIS原案（ここでは検長は 10cm ）、及びJIS A 1113に従って行った。また供試体は試験及び測定の直前まで標準養生した。コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係及び圧縮強度と引張強度の関係を、既往のデータとともにそれぞれ図-1、図-2に示す。今回得られた静弾性係数は同程度の圧縮強度の既往のデータとほぼ等しく、概ね $2.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ であり、NWCに比べて約30%小さい。また、静弾性係数の推定には図中に示すように、Morales³⁾の式の適合度が高い。引張強度の試験値も既往の同程度の圧縮強度を有するLWCとほぼ等しく、ばらつきはあるものの、NWCよりも小さい値を示している。その差はACI Building Code⁴⁾に示されている15%に近いものとなっている。

以上より、今回用いた高強度LWCの基本的性質は、同程度の圧縮強度を有する既往のLWCと大差ないものになっているといえる。

粗骨材名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
MH	37	43	150	405	749	627
M	37	41	150	405	715	637
B	37	41	150	405	715	637
N	41	38	157	383	676	1125

*) MH : A社製の非造粒型人工軽量骨材 M : A社製の造粒型人工軽量骨材

B : B社製の造粒型人工軽量骨材 N : 川砂利

軽量粗骨材は吸水率約28%、F.M.約6.4；川砂利はF.M.約6.8；

細骨材はF.M.約2.8の川砂

LWCには高性能減水剤、AE剤を、NWCにはAE減水剤、AE助剤を添加した。

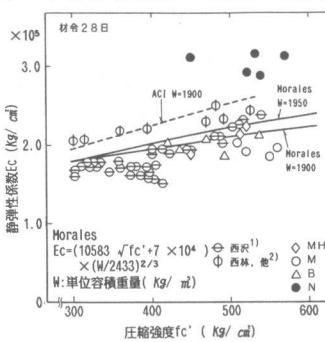


図-1 静弾性係数

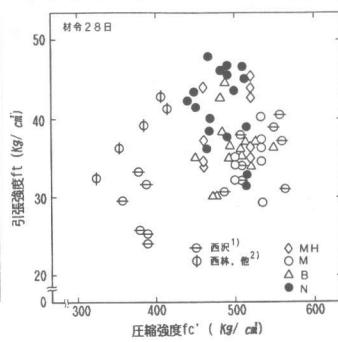


図-2 引張強度

3. RC部材の曲げ強度

3. 1 応力ひずみ曲線

応力下降域を含めた応力ひずみ曲線を測定するため、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体に、クローズドループ方式のアクチュエータ（MTS社製）を用いてひずみ制御で載荷した。ここでは供試体中央部のひずみを検長 10cm で測定した。ひずみ速度は、JIS A 1108の応力度増加速度を考慮して、LWCの場合 $10 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 、NWCの場合 $6.67 \times 10^{-6}/\text{sec}$ とした。図-3に今回の測定から求まった応力ひずみ曲線の一例（全ての軽量骨材について類似）と既往のデータを示す。

LWCとNWCの応力ひずみ曲線を比較すると、LWCの方が最大応力以降の応力降下が急激であり、破壊が脆性的であることがわかる。また、最大応力時のひずみはNWCが $1500 \sim 2000 \times 10^{-6}$ であるのに対し、LWCが $2000 \times 10^{-6} \sim 2500 \times 10^{-6}$ でLWCの方が大きい。この比は静弾性係数比の逆数にほぼ対応している。

3. 2 パラメータ解析

上述の応力ひずみ曲線の相違が終局強度に及ぼす影響を調べるために、LWCとNWCの応力ひずみ曲線の特性を考慮して設定した曲線を用いて、終局強度に関するパラメータ計算を実施した（図-4）。これによると、LWC及びNWCのいずれに対応する曲線を用いても釣合い鉄筋比の50%程度（コンクリートの圧縮強度が 480kg/cm^2 の場合、鉄筋比が3.0%， $P_w/f_c' = 0.22$ ）以下では、LWCとNWCの応力ひずみ曲線の相違の影響は小さいことがわかる。

3. 3 RC矩形はりの曲げ実験

本実験に用いた試験体を表-2及び図-5に示す。主筋にはD16及びD22（いずれもSD35）を用い、鉄筋比は通常使用される範囲で0.79%及び1.55%とした。ひびわれ発生荷重、鉄筋降伏荷重、及び終局荷重に関する実験値と計算値を表-2に示した。荷重の算定には、前項の計算結果を参考にして、コンクリートの応力ひずみ曲線としては、土木学会の『コンクリート構造の限界設計法指針（案）』に示される通常のNWCに適用されている応力ひずみ曲線を用いた（図-4の①）。これら

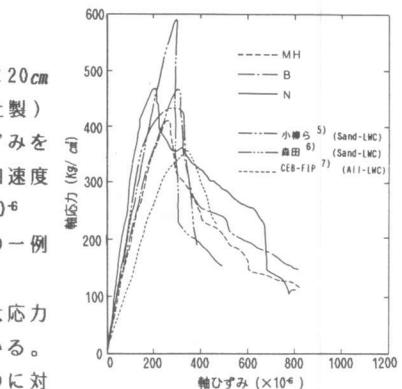


図-3 応力ひずみ曲線

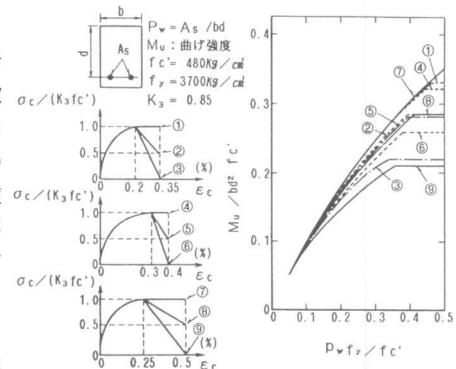


図-4 曲げ強度のモデル計算

表-2 曲げ試験体の種類及び実験・計算結果

供試体名	鉄筋比 P_w (%)	28日材令 (kg/cm^2)		ひびわれ発生荷重 (t)		鉄筋降伏時荷重 (t)		終局荷重 (t)			じん性率
		圧縮強度	引張強度	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値①	計算値②	
MH1	1.55	466	33.9	7.0	4.7	27.4	27.0	31.4	29.5	—	6.1
MH1'		474	36.6	6.5	4.8	27.7	27.0	30.0	29.5	—	4.7
B1		452	35.9	6.0	4.8	27.3	27.0	29.7	29.5	—	5.1
N1		487	45.1	6.0	5.5	28.2	27.6	31.3	29.5	—	5.4
MH2	0.79	443	30.3	6.0	3.7	14.9	14.4	19.3	15.6	18.0	≥10
B2		429	34.3	6.0	4.9	15.3	14.4	19.7	15.6	18.0	≥10
N2		476	37.6	5.0	5.0	17.0	14.8	20.7	15.6	18.0	≥10

表中、供試体名の英字が粗骨材の種類を表している。

①：鉄筋のひずみ硬化を無視、②：鉄筋のひずみ硬化を考慮
く、また計算

結果とも比較的良く一致している。従って、LWCの終局強度は、今回の鉄筋比の範囲ではNWCと同じ応力ひずみ曲線を用いる通常のRCの曲げ理論によって実用上十分な精度で推定できる。このことから通常使用される範囲の鉄筋比を有する部材では、応力ひずみ曲線の影響は特に考慮する必要の無いことがわかる。

部材のじん性率は、今回の実験の範囲では鉄筋比0.79%の場合、すべて10以上、1.55%の場合4.5~6にあり、LWCとNWCとの間に大きな差はなかった。ただしLWCの破壊は載荷点間の圧縮部がNWC

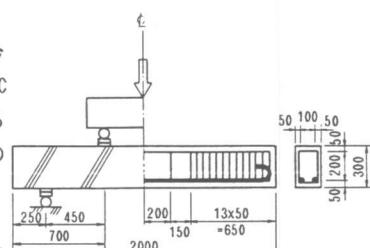


図-5 曲げ試験体の形状

に比べて急激に圧壊する傾向があった。

4. R C 部材のせん断強度

4. 1 ひびわれ面に沿うせん断摩擦

Mattock ら⁸⁾の実験にならひ図-6に示すPush-off試験体を用いて実験を行った。試験体のせん断破壊面には予め幅 0.25 mm のひびわれを入れておいた。

図-7にせん断面に与えた拘束応力（鉄筋比×鉄筋降伏強度）と最大せん断応力（せん断摩擦力）の関係を示す。図中にはMattock らのLWCに関する実験結果もプロットしたが、これに比べて今回の高強度LWCのデータは10~20%程度小さく、NWCに対しては30%程度小さい。これは、供試体に予めひびわれをいれる際、高強度LWCの場合の方が粗骨材の破断の度合が大きいためと推定される。最大せん断応力の拘束応力に対する比であるせん断摩擦係数を、ACI Building CodeではSand-LWCの場合にNWCに対して15%低減させているが、今回の高強度LWCの実験結果はこれよりも大きな低下を示している。

4. 2 R C 矩形はりのせん断実験

本実験に用いた試験体の形状、配筋状況、及び載荷方法を図-8に示す。主筋にはD29及びD32(いずれもSD35)を用いており、鉄筋比はそれぞれ2.57%及び3.18%である。試験体は、せん断補強筋で補強していない。a/dは斜め引張破壊が生じるように3及び4に設定した。ただし、鉄筋比が1.55%でa/dが2.5のもの、鉄筋比が3.18%でa/dが3.1, 3.6のものも、補足的に実験した。試験体の種類を表-3に示す。ここでは、前述した実験結果から、軽量粗骨材の種類によるLWCの基本的な差異が認められなかつたので、LWCは主にBを用いた。

また、同表には実験から得られたせん断強度と、岡村ら⁹⁾の式に基づくせん断強度推定値も併記した。図-9には各a/dに対応して、実験から求まったせん断強度の計算による曲げ強度に対する比を示した。

a/d=4の場合、LWC NWCともに斜め引張破壊が生じており、NWCのせん断強度は岡村らの式で求めた推定値と良く一致している。LWCのせん断強度はNWCの約70%であったが、圧縮強度が200~300kg/cm²のHanson¹⁰⁾の実験(a/d=5)及び220~330kg/cm²(一部530kg/cm²前後)の桧貝¹¹⁾の実験(a/d=4.5)でも同様の結果が示されている。

両者のせん断強度の差の主たる原因是、NWCと比べてLWCの引張強度が15%程度小さいこと、せん断摩擦力が30%程度小さいこと等の強度特性の差にあると思われる。

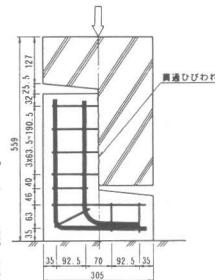


図-6 Push-off 試験体

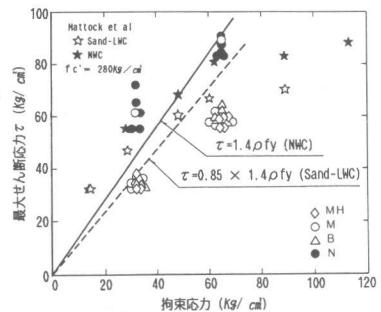


図-7 拘束応力と最大せん断応力の関係

表-3 せん断試験体の種類と実験・計算結果

供試体名	鉄筋比 Pw (%)	a/d	28日材令 (kg/cm ²)		斜めひび われ発生 荷重 (t)	せん断破 壊荷重 (t) ①	せん断強度 の推定値 (t) ②	①/②
			圧縮強度	引張強度				
M1	1.55	2.5	446	34.3	6.9	10.9	—	—
			451	34.0	6.0	10.4	—	—
			480	38.4	6.5	9.9	—	—
			520	42.5	7.4	8.5	—	—
NP1	3.18	3.1	481	36.4	8.9	8.9	9.7	0.92
			482	38.9	11.5	11.5	9.7	1.19
			502	39.6	9.7	9.7	9.3	1.04
NP3	3.6	3.6	506	36.7	7.9	13.0	9.2	1.41
			520	36.4	6.7	11.7	9.2	1.27
			522	36.0	7.0	13.3	10.1	1.32
BS1	2.57	3.18	503	35.3	6.7	11.9	10.0	1.19
			520	34.3	6.8	11.6	10.1	1.15
			464	47.3	9.5	9.5	8.9	1.07
NS1	2.57	3.18	477	38.0	8.8	9.3	9.0	1.03
			500	43.6	8.8	8.8	10.0	0.88
			515	45.0	8.4	8.4	10.1	0.83
BL1	2.57	4	513	37.4	6.0	6.0	8.3	0.72
			493	33.6	5.8	5.8	8.2	0.71
			489	37.0	6.7	6.7	9.0	0.74
BL4	3.18	4	522	37.2	6.3	6.4	9.1	0.70
			478	43.5	9.3	9.3	8.2	1.13
			447	43.4	8.2	8.2	8.0	1.03
NL1	2.57	4	443	41.9	8.5	8.5	8.0	1.06
			488	44.6	9.1	8.1	8.9	1.02
			480	45.2	9.3	9.3	8.9	1.04

表中、供試体名の先頭の英字が粗骨材の種類を表している。

②: 岡村らの式 ; $V_u = 0.94 f_{c}'^{1/3} \cdot (0.75 + 1.4d/a) \cdot (1 + \beta p + \beta d) b w d$

$$\beta p = \sqrt{(100Pw) - 1}, \quad \beta d = \sqrt{(100/d) - 1},$$

$f_{c}':$ 圧縮強度、 $d:$ 有効高さ、 $a:$ シアスパン、 $bw:$ 断面の幅

一方、 $a/d=3$ の場合、NWC は斜め引張破壊し、岡村らの式に基づく強度推定値と良く一致したが、LWC では斜めひびわれ発生後も耐荷力を發揮し、最終的には載荷点間の圧壊で終局に至った。また、この破壊モードをタイドアーチ的破壊機構に移行した後のせん断圧縮破壊と仮定して、二羽ら¹²⁾ が NWC に対して提案しているせん断強度推定式を準用して今回の試験体のせん断強度を計算したが、実験結果はこれよりかなり大きな値を示している。NWC の破壊はほぼ支点と載荷点を結ぶように斜めひびわれが発生すると同時にひびわれ先端が載荷点の外側に抜けて生じたのであるが、LWC では斜めひびわれが発生しても、その後ひびわれ先端はほぼ水平に載荷点の内側へと進展していく。破壊状況が異なる理由として、LWC では断面圧縮域が大きいこと、せん断摩擦によるせん断力の伝達が小さいこと等により、破壊域の応力状態が NWC とは異なることが推察される。

また、せん断圧縮破壊したと考えられる $a/d=2.5$ の場合も LWC のせん断強度は NWC より大きかった。

5. 結 論

高強度 LWC (設計基準強度 400kg/cm^2) を用いた RC 部材の曲げ及びせん断実験から、次のことが明らかになった。

1) 圧縮時の応力ひずみ曲線は、NWC に比べ最大応力以降の応力降下が

急激で、また、破壊が脆性的である。

2) しかしながら、部材の曲げ強度に及ぼす上記の影響は、通常用いられる鉄筋比の範囲では小さく、今回の実験範囲である鉄筋比が 1.6% 程度以下の RC 部材では、実用上この影響を無視することができる。

3) ひびわれ面に沿ったせん断摩擦は、同程度の圧縮強度の NWC よりも約 30% 小さく、低強度 LWC に比較しても 10~20% 程度小さい。

4) せん断補強筋の無い RC 部材の斜め引張破壊モードのせん断強度は同程度の圧縮強度の NWC よりも約 30% 小さい。しかし、 a/d が 3 度より小さくタイドアーチ的耐荷機構に移行した場合のせん断強度は NWC よりも大きくなる現象がみられる。

参考文献

- 西沢：人工軽量骨材を用いたコンクリートの力学的性質に関する実験結果、コンクリートライブライヤー第10号、土木学会、1964.5
- 西林、他：人工軽量骨材に関する 1,2 の実験、セメント技術年報、昭和40年
- S.M. Morales : Short-Term Mechanical Properties of High-Strength Light-Weight Concrete , PB Report 83-223065, Aug. 1982
- ACI : ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-83) , 1983
- 小柳、他：コンクリート供試体の下降域を含む荷重一変位曲線の自動計測システム、土木学会論文集、第 354 号/V-2、1985.2.
- 森田：圧縮を受けるコンクリートの性質についての 2,3 の考察、セメント技術年報、昭和45年
- CEB/FIP: Manual of Lightweight Aggregate Concrete design and technology, CEB/FIP, 1977
- Mattock et al: Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete, PCI Journal, 1976 Jan.-Feb.
- Okamura H. et al: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proceedings of JSCE No.300, August 1980
- J.A. Hanson : Tensile Strength and Diagonal Tension Resistance of Structural Lightweight Concrete, Journal of ACI, July 1961
- 桧貝：軽量鉄筋コンクリート桁のせん断強度について、コンクリートライブライヤー第24号、土木学会、1969.10
- 二羽、他：ディープビーム的な RC 部材の設計方法に関する提案、第 5 回コンクリート工学年次講演会講演論文集、コンクリート工学協会、1982

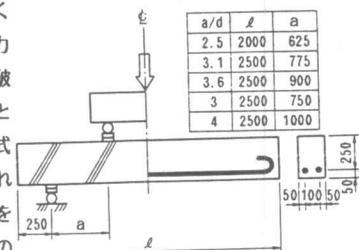


図-8せん断試験体の形状

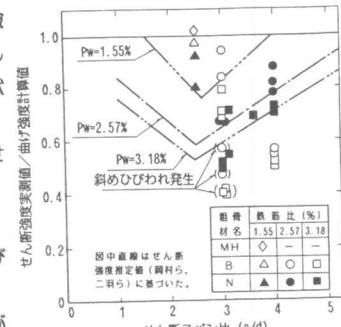


図-9せん断実験結果