

[2122] 鉄筋軽量骨材コンクリート造はりの強度と変形性能

正会員 ○松岡 洋行（東京都立大学大学院）

正会員 清水 泰（東京都立大学）

1. はじめに

軽量コンクリートは固定荷重の影響が大きな高層鉄筋コンクリート造建築物の上層部分や、大きなスパンが要求される構造物等に用いられる事が多い。しかしながら、軽量コンクリートを用いた構造部材の耐震性能に関する研究は少ないのが現状で、特に、部材の断面設計を行なう際に問題となるせん断耐力に関しては基礎的な資料が揃っていないと言え難い。

本研究はこの点に着目したものであり、鉄筋軽量コンクリート造はりの耐震性能、特にそのせん断耐力に関する基礎的な資料を得る事を主目的としたものである。研究方法としては、せん断破壊指向型の実物大のはり試験体6体を製作し、逆対称応力の繰り返し静加力実験を行ない、その実験結果と既往の鉄筋コンクリート造はりの諸限界荷重に関する算定式等による計算結果とを比較して、普通コンクリートを用いたはりとの違いを種々検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験で用いた試験体は鉄筋軽量コンクリート造はり6体であり、断面寸法 $B \times D = 25 \times 50$ cm, 引張主筋の配筋 $3-D22$ ($a_t = 11.61 \text{ cm}^2$), せん断スパン比 $M/Qd = 1.11$ (曲げ長さ $a = 50$ cm) 等は全試験体について共通で、主要な変動因子はコンクリート強度 ($F_c \text{ kg/cm}^2$) とせん断補強筋比 ($p_w = a_w/BX$) とした。

本実験で採用した主要変動因子のうち、コンクリートは比較的高強度のものをを用い $F_c = 227, 310, 342 \text{ kg/cm}^2$ の3種類とした。また、せん断補強筋は $D10@100$ と $D10@200$, 補強筋比 ($p_w \%$) にして 0.570% と 0.286% の2種類とした。

試験体一覧を表1に、また、配筋図を図1に示す。

試験体の設計に際しては、鉄筋軽量コンクリート造はりのせん断耐力に関する基礎的な資料を得るために、試験体のせん断破壊が曲げ破壊に先行して生じる様に考慮した。なお、表1に示した各試験体のせん断耐力 ($cQ_{mean} \text{ ton}$) と曲げ耐力 ($cQ_u \text{ ton}$) の比の値は、試験体加力時のコンクリート強度を用い、次ページに示す算定式を用いて求めた値であるが、その値は何れも 1.0 以下となっている。また、付着割裂破壊の影響を極力おさえるために主筋比の値 ($p_t = a_t/BD \times 100 \%$) は 1.0% に留める事とした。

表1. 試験体一覧

試験体名	F_c kg/cm^2	Q_{mean}/Q_u	p_w $\%$
87-LWC1	227	0.739	0.29
87-LWC2	227	0.823	0.57
87-LWC3	310	0.848	0.29
87-LWC4	310	0.932	0.57
87-LWC5	342	0.891	0.29
87-LWC6	342	0.974	0.57

共通事項

主筋: $3-D22, a_t = 11.61 \text{ cm}^2$
 その他: $M/Qd = 1.11, a = M/Q = 50 \text{ cm}$
 $B \times D = 25 \times 50 \text{ (cm)}$

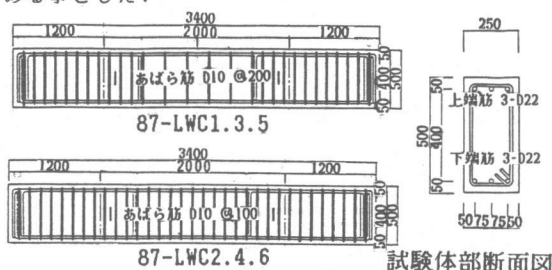


図1. 試験体配筋図

2.2 使用材料

コンクリートは粗骨材のみを人工軽量骨材とした第1種軽量コンクリートを用い、試験体を横向きにねかせた状態で横打ちに打設した。鉄筋は、はりの主筋には SD 40を用い、せん断補強筋には SD 30を用いた。

表2に試験体の製作に使用した軽量コンクリートと鉄筋の試験結果を示す。コンクリート試験に用いたテストピースは打設後2日目でモルタルキャッピングをして、3日目でモールドより脱型した。その後は封かん養生としており、屋外の試験体近くに放置した。

軽量コンクリートの単位容積重量 (γ t/m³) は1.90前後で、圧縮強度 (F_c kg/cm²) は4週間強度でほぼ頭打ちとなっており、割裂試験による引張り強度 (σ_t kg/cm²) は $1.8\sqrt{F_c}$ よりは多少低目な値となっている。

表2. 使用材料試験結果 (a) コンクリートの力学的性質

試験体名	材令日	単重 kg/m ³	圧縮強度 kgf/cm ²	歪	静弾性係数 kgf/cm ²	供試体数	引張強度 kgf/cm ²	供試体数
87-LWC1,2	40	1930	227	0.0024	1.51×10^6	3	25.9	3
87-LWC3,4	43	1900	310	0.0029	1.62×10^6	3	27.5	3
87-LWC5,6	47	1890	342	0.0021	1.79×10^6	3	31.2	3

(b) 鉄筋の機械的性質

呼称	試験体数	使用部位	公称断面積 cm ²	降伏応力 kg/cm ²	降伏歪 $\times 10^{-6}$	最大強度 kg/cm ²	伸び率 %	ヤング係数 $\times 10^6$ kg/cm ²
D22	3	主筋	3.87	4410	—	6970	14.6	1.936
D10	3	あばら筋	0.71	3480	1930	5430	21.2	1.738

3. 実験方法

加力は大野式加力を採用し、図2に示す加力装置を用いて、試験体を拘束ばり状に支持し、対称応力の多数回正負交番繰返し静加力実験を行なった。予定荷重履歴は部材角 (R) で制御する事として、各試験体共通とし、 $R=1/400$ で正負各1回加力し、 $R=1/200$, $R=1/100$, $R=1/50$ で正負各2回ずつ繰返した後、最後に正側方向で $R=1/18$ 前後までの押し切り加力を行なう事を計画した。

なお、加力点是一方を球座を用いてピン支持とし、他方および両支点をテフロン支承を用いてローラー支持となるように設計した。

測定項目としては、精度 $200 \mu/\text{mm}$, 検長 5 cm の変位計を用いて加力点間の相対的なたわみ量 (δ mm) を測定した他、主筋や肋筋の歪度、およびひび割れ幅等を測定した。

4. 実験結果

各試験体実験結果を表3に一括して示す。

また、実験で得られた荷重・変形曲線を図3に、6 サイクル終了時 ($R=1/50$) のひび割れ図を図4に示す。

ここで、初期剛性 (K_e t/cm) は試験体に初ひび割れが生じた一歩手前の測定点で得られた剛性としたが、この値は31から 44 t/mmの間で、平均値 35 t/mmとなった。

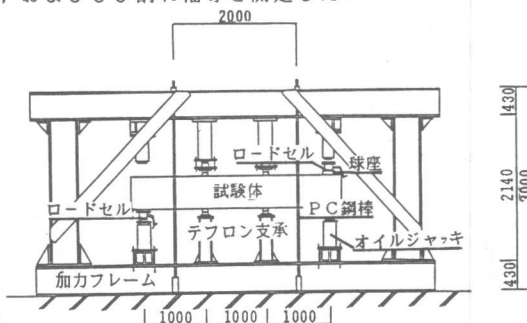


図2. 加力装置

終局時の限界変形 (δu mm) は、最大耐力後に荷重がある程度低下し、その後の繰り返し加力で荷重が最大耐力 (Q_{max} ton) の 80 % 以上に達しなかった場合には最大耐力時の変形を限界変形として採用し、荷重が最大耐力の 80 % 以上に達しその後徐々に耐力低下を生じた場合には、最大耐力の 80 % 迄荷重が低下した点の変形を限界変形として採用した。

全試験体共ひび割れの発生状況、および破壊の進展状況は似ており、先ず + 1 サイクルの平均せん断応力度 τ (Q/B_j) = 9.4 kg/cm²、部材角 $R=1/3000$ 前後で曲げひび割れを生じ、次いで、 $\tau = 17.9$ kg/cm²、 $R=1/260$ 前後で曲げせん断ひび割れを生じている。なお、曲げひび割れや曲げせん断ひび割れの発生荷重に関しては、コンクリート強度やせん断補強筋量の影響は余り見受けられなかった。

その後独立した材端せん断ひび割れが $\tau = 23.5$ kg/cm²、 $R=1/440$ 前後の所で発生し、更に、繰り返し加力を進めると 2 サイクルの $\tau = 27.3$ kg/cm²、 $R=1/310$ 前後で付着割裂ひび割れを生じた。部材中央部の対角線状せん断ひび割れは 4 サイクルの $\tau = 35.1$ kg/cm²、 $R=1/133$ 前後で生じ、これがせん断破壊に直接関係するひび割れとなり、限界変形に達している。

これらのせん断ひび割れや付着割裂ひび割れの発生に関しては、曲げせん断ひび割れが先行して発生していることもあって、せん断補強筋量の影響が多少見られるが、コンクリート強度の影響は比較的小さなものであった。

最大耐力に関しては、各試験体で相当に差があったが、上記の値との比較と言う事で平均値を見ると $\tau = 30.4$ から 47.6 kg/cm² で、平均 39.0 kg/cm²、部材角で $R=1/200$ から $R=1/100$ の所、平均で $R=1/120$ 前後 (2 から 4 サイクル) で荷重が最大値に達し、その後耐力低下を生じて、最終的には全ての試験体がせん断破壊している。

最大耐力はコンクリート強度やせん断補強筋量の影響を相当に強く受けており、両者が最も小さな値となっている No.1 試験体が最も小さな耐力となっている。また、No.1 の最大耐力時の変形量も小さな値であった。

表 3. 実験結果一覧
(a) 諸初ひび割れ発生荷重

最大耐力後 4 サイクルで各試験体共材端部に圧壊を生じたが、これは $\tau = 37.5$ kg/cm²、 $R=1/110$ 前後で起こっており、また、限界変形は 4 から 6 サイクルの $\tau = 36.8$ kg/cm²、 $R=1/90$ 前後となった。

試験体圧壊の発生に関しては、コンクリート強度やせん断補強筋量の影響が大きかった。

なお、加力途中でそれほど極端な耐力低下を生ずる試験体はなかったが、付着割裂の影響で繰り返

し加力による耐力低下は大きく、ループ面積も小さなものであった。また、8 サイクルの押し切り加力を行なった際には、大変形下で付着割裂破壊が進行して、最終的にはかぶりコンクリートは殆ど剥落してしまった。

試験体名	87-LWC1			87-LWC2			87-LWC3		
ひび割れ名	Q	δ	C	Q	δ	C	Q	δ	C
曲げ	12.0	0.5	1	11.0	0.5	1	9.0	0.3	1
曲げせん断	15.4	1.1	1	17.0	1.2	1	20.0	1.9	1
せん断	22.0	2.2	1	—	—	—	18.4	1.7	1
付着割裂	26.0	3.6	2	21.6	2.5	2	22.8	3.2	2
対角線状せん断	26.0	6.3	4	37.3	10.0	4	34.1	10.0	4
端部圧壊	28.0	8.0	4	35.3	8.5	4	34.1	10.0	4
中央部圧壊	—	—	—	—	—	—	25.2	16.0	—

試験体名	87-LWC4			87-LWC5			87-LWC6		
ひび割れ名	Q	δ	C	Q	δ	C	Q	δ	C
曲げ	5.0	0.2	1	10.5	0.4	1	8.1	0.2	1
曲げせん断	19.1	0.9	1	17.5	1.3	1	16.9	1.0	1
せん断	25.3	1.8	1	22.3	2.4	2	27.8	2.5	1
付着割裂	37.2	4.4	2	22.3	2.4	2	31.2	3.4	2
対角線状せん断	42.3	7.0	4	26.7	5.8	4	40.8	6.0	4
端部圧壊	37.6	9.9	4	38.8	10.0	4	47.0	10.0	4
中央部圧壊	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(b) 最大耐力、終局耐力

試験体名	最大耐力			終局耐力		
	耐力	変形	CYCLE	耐力	変形	CYCLE
87-LWC1	29.9	5.0	2	23.9	10.2	4
87-LWC2	36.9	10.0	4	29.6	20.5	6
87-LWC3	35.9	8.1	4	35.9	8.1	4
87-LWC4	42.2	7.0	4	42.2	7.0	4
87-LWC5	38.7	10.0	4	38.7	10.0	4
87-LWC6	46.9	10.0	4	46.9	10.0	4

単位：耐力 (トン)、変形 (mm)

5. 実験結果の検討

表4に各限界荷重等の実験結果とその計算値を示す。ここで用いた計算式を以下に示す。

1) 曲げひび割れ発生荷重 (BC, cQBC) [3]

$$cQBC = MBC/a = 1.8\sqrt{F_c} Z/a \quad (1)$$

2) 曲げせん断ひび割れ発生荷重 (BSC, cQBSC) [4]

$$cQBSC = 0.265Bd\sqrt{F_c} + MBC/(a-0.5d) \quad (2)$$

3) せん断ひび割れ発生荷重 (SC, cQSC1, cQSC2) [3,4]

$$cQSC1 = [0.065kc(500+F_c)/(M/Qd+1.7)] B_j \quad (3) \text{ 荒川式}$$

$$cQSC2 = 0.971\sqrt{F_c} BD(M/QD)^{0.605} \quad (4) \text{ 広沢式}$$

4) 付着割裂ひび割れ発生荷重 (BO, cQBO) [4]

$$cQBO = [\sqrt{H^2 + 4I} - H] b' d \cdot c \sigma_t \quad (5)$$

5) 曲げ耐力 (cQu) [3]

$$cQu = 0.9 a t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (6)$$

6) せん断耐力 (cQmin, cQmean) [3]

$$cQmin = [0.092ku \cdot kp(180+F_c)/(M/Qd+0.12) + 2.7\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}}] B_j \quad (7) \text{ 荒川 min式}$$

$$cQmean = [0.115ku \cdot kp(180+F_c)/(M/Qd+0.12) + 2.7\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}}] B_j \quad (8) \text{ 荒川 mean式}$$

記号, MBC; 曲げひび割れモーメント, $a=M/Q$; 曲げ長さ, Z ; 断面係数, d ; 部材有効せい, kc, ku ; 断面寸法による補正係数, $kc=ku=0.72$, kp ; p_t による補正係数, $kp=0.83$, M/Qd , M/Qd ; シアスパン比, $H=10.5 X1 \cdot b1 \cdot d1/C$, $I=1/C$, $X1=0.245(M/QD)^{1.08}$, $C=1+10.5 dt1 \cdot b1' \cdot d1$, $b1'=b'/B$, $b'=2\sqrt{2dt - \phi o}$ or $b=(B-\Sigma \phi)/n'$ いずれか小さい方の値, ϕo ; 端部主筋の直径, ϕ , n' ; 引張り主筋の径と本数, σ_y , σ_{wy} ; 主筋とせん断補強筋の降伏強度

また、切断法により断面の曲げ応力解析を行なったが、その結果を実験結果や上記の計算結果と比較して図5に示す。なお、解析で用いた断面分割の図も同図中に示す。

以上の図表を見ると、初期ひび割れ発生荷重に関しては、全体的に実験値が計算値を上回っているものが多く、最大耐力実験値は荒川mean式のせん断耐力計算値に近い値を示している。

初期ひび割れ発生荷重については、曲げひび割れはNo.4試験体を省いて全ての試験体で実験値が計算値を上回っており、せん断ひび割れに付いては、せん断ひび割れ発生荷重の下限値を求める荒川式の計算値は曲げせん断ひび割れを含む全てのせん断ひび割れ発生荷重実験値を下回り、広沢式の計算値はせん断ひび割れ発生荷重実験値に近い値となった。また、曲げせん断ひび割れ発生荷重計算値は実験値に近い値を示している。

最大耐力実験値に関しては、全ての実験値が荒川 min式の計算値を上回り、荒川mean式の計算値に近い値を示した。また、曲げ耐力計算値との比較では、これを下回る実験値が得られた試験

表4. 計算値と実験値との比較

試験体名	値	ひび割れ強度 (TON)				対角線状 せん断	付着割裂	最大耐力			
		曲げ	曲げせん断	せん断 荒川	せん断 広沢			切断法 (TON)	Qu (TON)	Qmin (TON)	Qmean (TON)
87-LWC1	計算値	5.6	14.8	11.9	18.2	22.5	11.7	40.1	41.5	26.2	30.6
	比	2.1	1.0	1.3	1.2	1.2	2.2	0.7	0.7	1.1	1.0
87-LWC2	計算値	5.6	14.7	11.9	18.2	22.5	11.7	40.1	41.5	29.7	34.1
	比	2.1	1.2	1.4	—	1.7	1.8	0.9	0.9	1.2	1.1
87-LWC3	計算値	6.6	17.2	13.3	21.4	26.4	13.7	41.1	41.5	29.8	35.2
	比	1.4	1.2	1.5	0.9	1.3	1.7	0.9	0.9	1.2	1.0
87-LWC4	計算値	6.6	17.2	13.3	21.4	26.4	13.7	41.1	41.5	33.3	38.7
	比	0.7	1.1	1.4	1.2	1.6	2.7	1.0	1.0	1.3	1.1
87-LWC5	計算値	6.9	18.1	13.8	22.4	27.7	14.4	41.4	41.5	31.2	36.9
	比	1.5	1.0	1.3	1.0	1.0	1.6	0.9	0.9	1.2	1.0
87-LWC6	計算値	6.9	18.0	13.8	22.4	27.7	14.3	41.4	41.5	34.7	40.4
	比	1.1	0.9	1.2	1.2	1.5	2.1	1.1	1.1	1.4	1.2

備考: 比=実験値/計算値

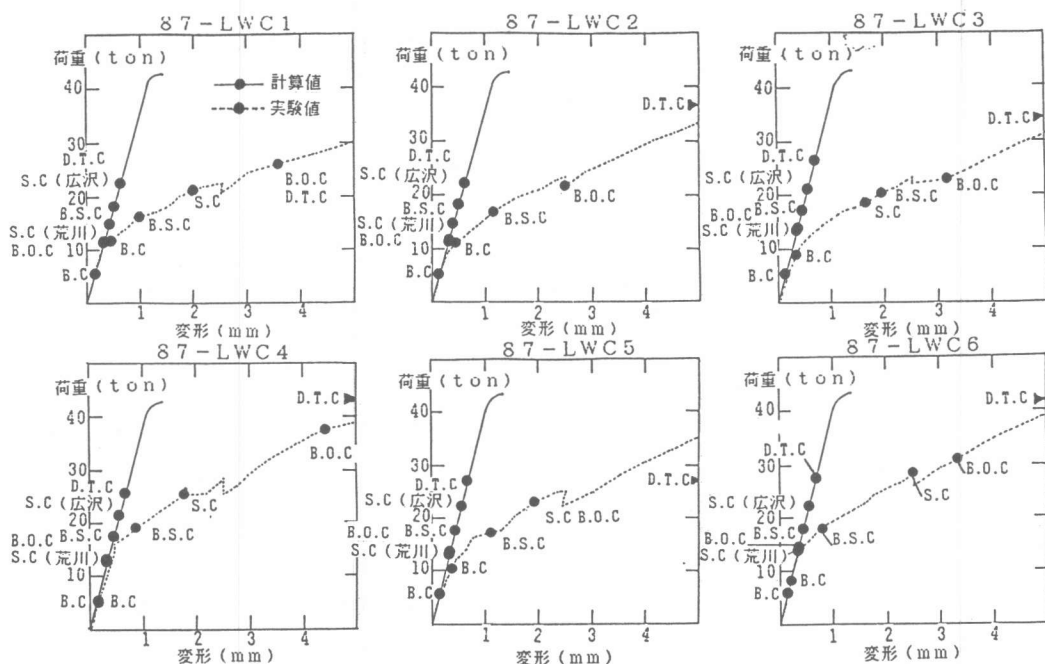


図5. 切断法による曲げ応力解析結果

体が多かったが、せん断補強筋量が多く、曲げ耐力 (cQu) とせん断耐力 (cQ_{mean}) の計算値に殆ど差の無いNo.4とNo.6の両試験体で最大耐力実験値が僅かに曲げ耐力計算値を上回った。しかしながらこれらの試験体でもせん断耐力に対する余裕が無いために、試験体の破壊モードとしてはやはりせん断破壊となっている。

切断法による解析結果 (図中実線) を示した図5では、縦軸にせん断力を探り、横軸に変形の値を探って実験結果 (図中点線) と比較しているが、同図では、また、夫々の線上に計算と実験で得られた諸ひび割れ発生荷重の値を記入し図上での比較を行なった。この図を見ると曲げひび割れ (BC) 発生実験値の少し後位から両者の間に大きな開きが出ているが、これは、曲げひび割れの発生により主筋の抜け出しを生じ、これによって変形量実験値が大きく伸たためであると思われる。

6. まとめ

鉄筋軽量コンクリート造はりの耐震性能に着目して、コンクリート強度とせん断補強筋量とを主要な変動因子として6体の試験体を用いて静加力実験を行ない、その実験結果と、普通コンクリートを用いたはりに関して一般的に用いられている既往の算定式による計算結果とを比較検討した結果、本実験の範囲内では初期剛性、諸初ひび割れ発生荷重、せん断耐力等普通コンクリートと同等として計算した値とほぼ同程度と見做せる結果が得られた。従って、以上の実験結果から、少なくとも剛性や強度に関しては、軽量コンクリートを用いたはりでも普通コンクリートを用いたはりとはほぼ同程度の耐震性能が得られる可能性がある事が指摘出来ると思われる。

(参考文献) 1)武藤 清:耐震設計シリーズ2, 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計, 丸善, 1965.7 2)浜田 稔:建築材料学, 丸善, 1964 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準, 1982 4)広沢 雅也:鉄筋コンクリート部材の強度と靱性, 建築研究報告 No.76, 1977.3

