

論文 超軽量コンクリートはりの曲げせん断性状

井上 育^{*1}・稻垣 準二^{*2}・本間 礼人^{*3}・小林 克巳^{*4}

要旨:比重 1.2, 圧縮強度 30MPa および比重 1.6, 圧縮強度 60MPa の超軽量コンクリートを用いた RC はりの曲げせん断実験を行い, 各種耐力の評価, 剛性, 履歴特性の評価について検討した。超軽量コンクリートの材料特性を考慮して普通コンクリートを用いたはりの評価式を適宜修正すれば, 超軽量コンクリートの場合にも適用可能である。ただし, 等価粘性減衰定数は小さくなる傾向があり設計上の考慮が必要であることを示した。

キーワード:超軽量コンクリート, はり, せん断耐力, 曲げ耐力, 剛性, 等価粘性減衰定数

1. はじめに

新しい軽量骨材の開発により, 従来の軽量コンクリートよりも比重が小さく, 圧縮強度は同等あるいはそれよりも大きな高強度超軽量コンクリートの製造が可能となってきた。本論はこれを建築物の構造体へ適用することを前提として, はりの荷重変形関係を知るために, 曲げせん断実験結果¹⁾に基づいて, 各種耐力の評価, 剛性, 履歴特性等について検討したものである。

2. 曲げせん断実験の概要¹⁾

試験体の形状および配筋図の例を図1に示す。はり断面は 200×270mm, 試験区間は内法スパンの 1080mm($a/D=2.0$), 引張鉄筋比は 1.73%

とした。載荷は逆対称曲げモーメント状態で正負繰返しとした。試験体は表1に示す 13 体で, せん断補強筋比を 0.13~2.0% の範囲で変え, せん断破壊から曲げ破壊に変わるように意図した。別に行ったはりの付着割裂実験の結果に基づく検討より, 付着割裂破壊は起こらないよう計画した。 τ_b は付着割裂強度評価値, τ_{M_y} は曲げ降伏時の平均付着応力, Q_{SU1} は普通コンクリートはりを対象としたアーチ・トラスモデルによるせん断耐力計算値²⁾であるが, 超軽量コンクリートはりではせん断耐力が小さくなると予想される。 Q_{Mu} は後述する曲げ耐力評価値である。使用したコンクリートの調合、コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表2、表3に示す。

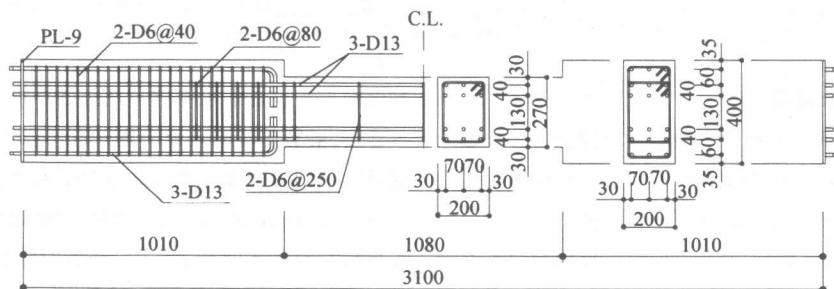


図1 試験体の形状および配筋の例

*1 福井大学 環境設計工学科 (正会員)

*2 清水建設(株) 工修

*3 福井大学助教授 建築・建設工学科 工博 (正会員)

*4 福井大学教授 建築・建設工学科 工博 (正会員)

表1 試験体一覧

No.	試験体名	横補強筋	Pw (%)	Q _{Mu} (KN)	Q _{su1} (KN)	$\frac{Q_{su1}}{Q_{Mu}}$	$\frac{\tau_b}{\tau_{My}}$	*1	$\frac{Q_{su2}}{Q_{Mu}}$	*2	*3
1	N30-M2N250	2-D6@250	0.13	188.0	71.1	0.38	0.48	S	0.38	S	S
2	N30-M3N100	3-D6@100	0.48	198.8	126.3	0.64	0.77	S	0.64	S	S
3	L30-M2N250	2-D6@250	0.13	173.6	83.2	0.48	0.48	S	0.24	S	S
4	L30-M3N100	3-D6@100	0.48	173.9	138.5	0.80	0.77	S	0.51	S	S
5	L30-M3N60	3-D6@60	0.80	175.0	189.0	1.08	0.97	F	0.88	S	F-S
6	L30-M3N40	3-D6@40	1.20	177.4	252.3	1.42	1.21	F	1.05	F	F
7	L30-H3N60	3-D6@60	0.80	194.6	189.0	0.97	0.92	S	0.59	S	S
8	N60-H2M250	2-MD6@250	0.13	212.0	124.3	0.59	0.78	S	0.59	S	S
9	N60-H3M100	3-MD6@100	0.48	224.7	245.0	1.09	1.28	F	1.09	F	F
10	L60-H2M250	2-MD6@250	0.13	191.8	120.6	0.63	0.56	S	0.40	S	S
11	L60-H3M100	3-MD6@100	0.48	193.0	241.4	1.25	1.11	F	0.89	S	S
12	L60-H3M60	3-MD6@60	0.80	196.3	329.1	1.68	1.15	F	1.35	F	F
13	L60-H3M40	3-MD6@40	1.20	198.2	370.7	1.87	1.44	F	1.92	F	F

*1 実験計画時の予想破壊モード, S:せん断破壊, F:曲げ破壊, F-S:曲げ降伏後のせん断破壊.

*2 せん断耐力評価を修正した後の予想破壊モード

*3 破壊モードの実験結果.

試験体名の N30, L30 は普通コンクリート(N)30MPa, 超軽量コンクリート(L)30MPa を表す。N60, L60 も同様。No.1-No.7 の主筋は 6-MD13, No.8-No.13 の主筋は 6-HD13.

表2 コンクリートの調合

目標強度 (MPa)	単位容積 質量(目標) (t/m ³)	w/c	s/a	設計 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	シリカフューム sf	細骨材 S	粗骨材 g	混和剤 sp-8
30	1.2	30	43	3	150	500	—	208	324	1.2%
60	1.6	28	43	3	150	450	50	549	500	1.1%

セメント: 普通ポルトランドセメント

単位容積質量(目標 1.2): 粗骨材にスーパーアソノ、細骨材に G ライト

単位容積質量(目標 1.6): 粗骨材および細骨材にメサライト

表3 コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果

コンクリートの種類	コンクリート				鉄筋の種類	鉄筋		
	ρ	σ_B (MPa)	E (GPa)	σ_t (MPa)		σ_y (MPa)	σ_m (MPa)	E_s (GPa)
普通-30	2.16	27.0	27.8	2.41	D6	308	476	174
超軽量-30	1.22	36.9	12.4	1.59	M-D6	672	861	168
普通-60	2.36	64.0	35.6	4.28	M-D13	785	1037	178
超軽量-60	1.68	52.9	18.8	2.45	H-D13	822	1014	203

ρ : 比重 σ_B : 圧縮強度 E_s : ヤング係数 σ_t : 割裂引張強度 σ_y : 降伏強度 σ_m : 引張強度 E_s : ヤング係数

3. ひび割れ強度

曲げひび割れ強度の実験値と計算値³⁾の比較を図2に示す。材料試験結果のヤング係数を用いて計算値を求めているが、コンクリートの引張強度は $0.56 \sigma_B^{0.5}$ としている。超軽量コンクリートの引張強度は $(0.28 \sim 0.34 \sim 0.40) \sigma_B^{0.5}$ であり、これを考慮すれば計算値は小さくなる。せん断ひび割れ強度の実験値と計算値³⁾の比較を図3に示す。せん断ひび割れ強度がコンクリートの引張強度に関係するとすれば、曲げひび割れ強度と同様に、超軽量コンクリートの引張

強度が小さいことを考慮した評価が行なわれるべきで、計算値はもっと小さくなるはずである。曲げひび割れ強度、せん断ひび割れ強度とも、実験値は目視によってひび割れを確認した荷重であるためばらつきが大きく、既往の算定式を適用することの可否を論じることは難しいが、既往の算定式でも極端に過大評価とはならないことが分る。

4. 曲げ耐力の評価

図4は平面保持を仮定した曲げ解析で求めた曲げ終局強度と実験値の比較である。※印を付

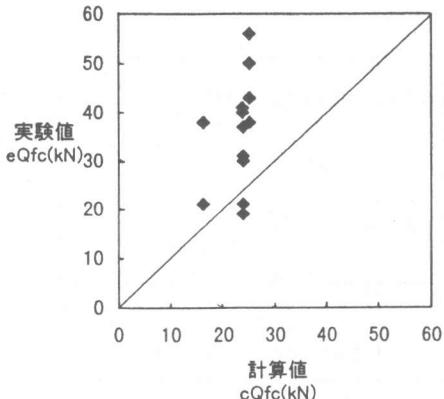


図2 曲げひび割れ強度の実験値と計算値の比較

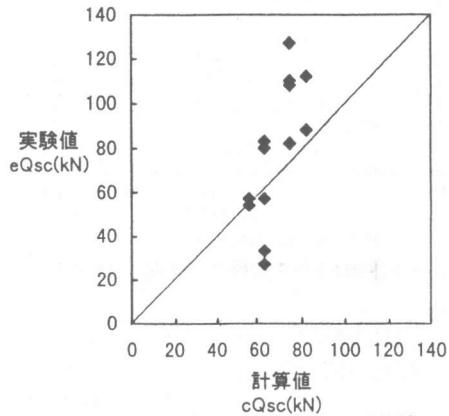


図3 せん断ひび割れ強度の実験値と計算値の比較

した実験値がやや小さい1体は曲げ降伏直後にせん断破壊した試験体であり、平面保持を仮定した曲げ解析で精度良く曲げ終局耐力を求められることがわかる。ここでは、超軽量コンクリートの応力度・ひずみ度関係として、横拘束を受ける柱の中心圧縮実験結果⁴⁾に基づいて定めた図5に示すものを用いているが、圧縮強度以後の負勾配、圧縮強度時ひずみ、圧縮強度に到るまでの剛性の順に曲げ耐力の計算値に及ぼす影響が大きく、これらを忠実にモデル化することが重要である。

5. せん断耐力の評価

図6にせん断耐力実験値と普通コンクリートはりを対象としたアーチ・トラスモデル²⁾による計算値の比較を示す。普通コンクリートを用いた試験体のせん断耐力実験値は計算値よ

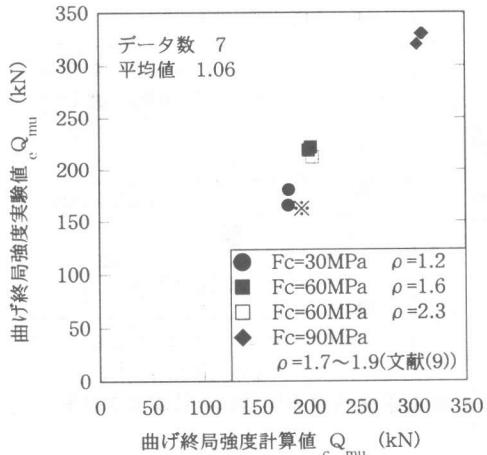


図4 曲げ終局強度と実験値の比較

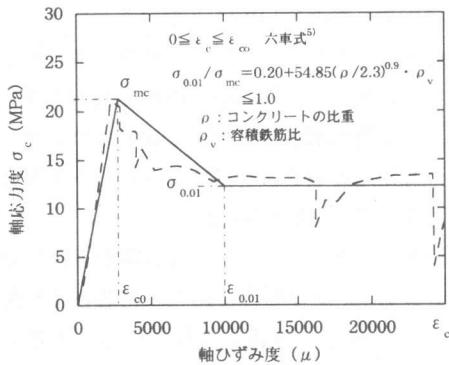


図5 応力度・ひずみ度関係の仮定

りやや大きいところにある。L30 の超軽量コンクリートを用いた試験体のせん断耐力実験値は計算値より 20~30% 小さい。また、L60 の場合は約 10% 小さい。ここで、超軽量コンクリートを用いたはりのせん断耐力が低下する理由は以下のように考えられる。

- (1) 超軽量コンクリートのヤング係数は比重を考慮した RC 規準式⁶⁾によってほぼ評価できるが、比重そのものが小さいために普通コンクリートに比べると相当に小さくなる。従って、アーチ機構の圧縮ストラットの剛性が小さく、これによるせん断力伝達が減少して、トラス機構によるせん断力伝達の割合が大きくなると考えられる。図7は試験区間内の全てのせん断補強筋のひずみ測定結果の平均値からトラス機構による伝達せん断力(Q_t)を計算し、残りをアーチ機構による伝達せん断力(Q_a)として示

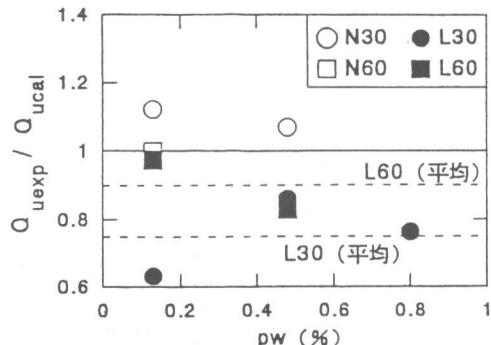


図6せん断終局耐力実験値と計算値の比較

した例で、トラス機構によるせん断力伝達の割合が大きくなっていることが分る。

- (2) 超軽量コンクリートでは、普通コンクリートの場合に比べ、ひび割れが分散して数多く発生する。ひび割れが多数発生した超軽量コンクリートの有効圧縮係数は普通コンクリートの場合よりも低下すると考えられる。
- (3) 超軽量コンクリートはりの付着割裂実験では、普通コンクリートの場合に比べ、主筋の付着強度が低下することが認められている。主筋の付着強度が低下すれば、トラス機構における圧縮ストラットの角度は大きくなり、トラス機構で伝達できるせん断力の大きさは小さくなる。

普通コンクリートはりを対象としたアーチ・トラスモデルを超軽量コンクリートはりの場合に適用するためには、上記の実験結果を適切に評価して修正モデルを作成する必要がある。しかし、変形の適合条件を含む事項もあり、普通コンクリートはりの場合でも解決できていない問題もある。従って、せん断耐力が小さく評価される方向で修正を行えばよいことはわかるが、少ない資料のなかで定式化していくことには困難を伴う。ここでは、暫定的な試みとして、

- (1) アーチ機構によるせん断力伝達にはせん断スパン比の影響も大きいが、アーチ機構における圧縮ストラットの軸方向剛性を減じる意味で、超軽量コンクリートと普通コンクリートのヤング係数比で圧縮ストラットの断面積を小さくする。

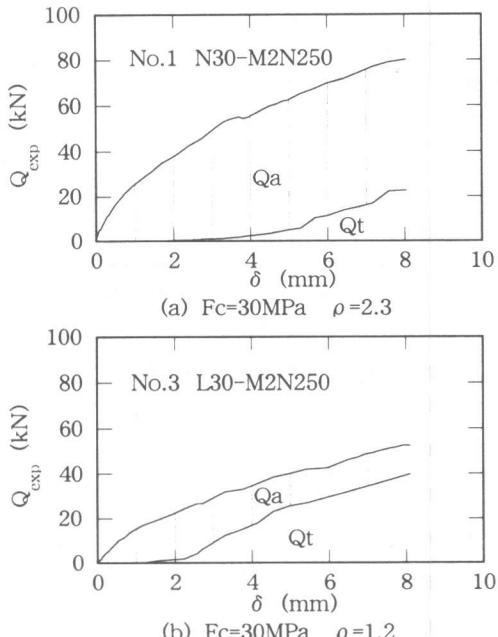


図7アーチ機構とトラス機構のせん断力分担率

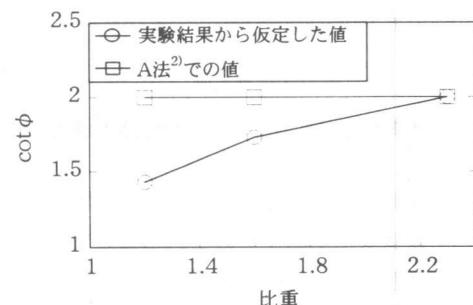


図8 $\cot\phi$ の A 法での値と実験結果

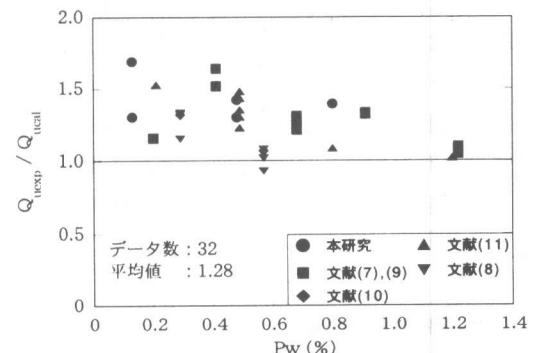


図9せん断終局耐力実験値と修正した計算値の比較

- (2) ひび割れが分散して数多く発生することが、コンクリートの割裂引張強度に関係すると考え、超

軽量コンクリートと普通コンクリートの割裂引張強度の比で有効圧縮強度を減じる。

(3) ト拉斯機構における圧縮ストラットの角度(ϕ)を実験におけるひび割れパターンから読み取り、 $\cot\phi$ の大きさを、例えば図8 ($p_w=0.13\%$ の場合)のように仮定する。

以上の試みを行った結果を、他の文献^{7)~11)}における試験体も含めて図9に示す。殆どの結果が計算値よりも大きくなり、計算値は実験

結果の下限を示すようになる。

6. 荷重変形関係

曲げ降伏した5体の試験体の荷重・部材角(R)関係包絡線を図10に示す。L30試験体ではR=1/30以降、L60試験体ではR=1/40以降に急速に耐力低下を起こしている。コンクリート強度、せん断余裕度などによると思われるが、比較的变形限界がはっきりしている特徴がある。

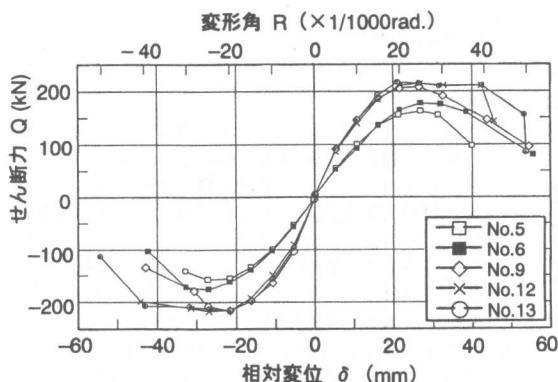


図10 荷重・部材角(R)関係包絡線

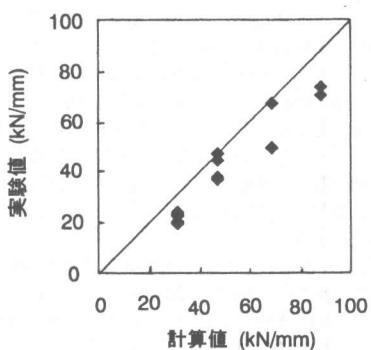


図11 弾性剛性の実験値と計算値の比較

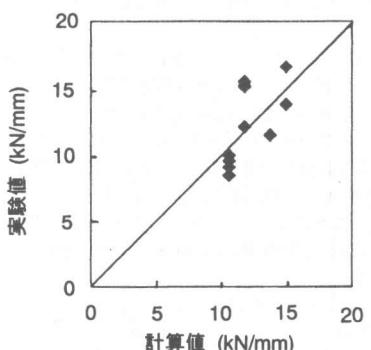


図12 降伏時剛性の実験値と計算値の比較

7. 弾性剛性

弾性剛性の実験値と計算値の比較を図11に示す。計算値は既往の算定式³⁾を用いて求め、コンクリートのヤング係数には材料試験結果を用いた。超軽量コンクリートと普通コンクリートとで大きな違いではなく、コンクリートのヤング係数に材料試験結果に基づいて適切に評価したもの用いることで、既往の算定式³⁾を適用できると判断される。

8. 降伏時剛性

降伏時剛性の実験値と計算値の比較を図12に示す。実験値は、主筋に貼付したひずみゲージによる測定結果より、主筋の応力が380MPaを超えた時点の荷重変形関係の傾きとした。これは主筋としてSD345を用いた場合の降伏荷重点を想定したもので、主筋が降伏していない試験体も図12に含まれている。計算値に対する実験値の比は1.0をやや下回るものもあるが、概ね既往の算定式³⁾で降伏時剛性を求めることができると判断される。

9. 等価粘性減衰定数

配筋が同じで、軽量コンクリートと普通コンクリートの違いを比較できる試験体の等価粘性減衰定数(h_{eq})を求めた例を図13に示す。同一変位で2回の繰返し載荷を行なっているため、それぞれのループで等価粘性減衰定数を計算して図13に示した。L30試験体では普通コンクリートの h_{eq} が6~12%，超軽量コンクリートの h_{eq} が4~10%でやや小さい。L60試験体でも超軽量コンクリート試験体のほうが小さくな

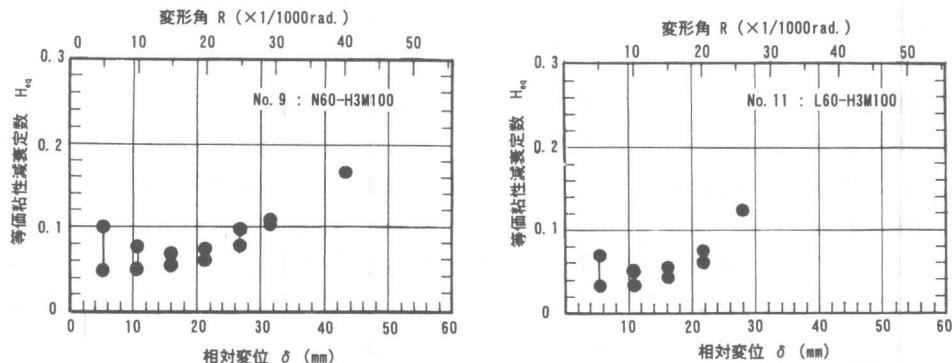


図 13 軽量コンクリート試験体と普通コンクリート試験体の等価粘性減衰定数の比較

っていることが認められ、No. 11 試験体の履歴ループはかなり小さく、 h_{eq} で 3~6% となっている。超軽量コンクリートを構造部材に使用し、変形性能等を決定する際には h_{eq} がやや低下することに注意が必要であろう。

10.まとめ

曲げひび割れ強度、曲げ耐力、弾性剛性、降伏時剛性等、荷重変形関係の骨格曲線を決める項目について検討した。超軽量コンクリートの材料特性を忠実に考慮すれば、曲げに関する諸量は普通コンクリートの場合の方法で求まると考えてよいと判断できる。超軽量コンクリートはりの履歴吸収エネルギーは、普通コンクリートの場合よりも小さくなることが認められたので、設計上の注意点となろう。

また、曲げ降伏を先行させるために、せん断耐力の評価が必要であるが、超軽量コンクリートの割裂引張強度とヤング係数が小さくなることを考慮して、アーチ機構で伝達されるせん断力、コンクリートの有効圧縮強度、トラス機構の圧縮ストラットの角度などを適切に評価すれば、既往の普通コンクリートを対象としたアーチ・トラス理論式を準用できる可能性があることを示した。

謝 辞

本論のもとになる実験は、日米ハイブリッド共同研究に組織された超軽量高強度コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会(委員長: 松崎育弘東京理科大学教授, 1995~1997年度)の活動の一環として行ったものである。

関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 稻垣準二, 小林克巳, 福山洋, 柳下学, 鈴木亨, 鳴下直樹, 白都滋: 超軽量・高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能 その 3 梁の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.479-480, 1998.9
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 6.3 柱およびはりのせん断強度, pp.106-121, 1990.11
- 日本建築学会: 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 第 3 章 鉄筋コンクリート主要構造部材および接合部の構造性能 3.1 はり, pp.39-54, 1992.12
- 熊谷仁志, 小林克巳, 福山洋ほか: 超軽量・高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能 その 2 柱の中心圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.83-84, 1997.9
- 六車暉, 光枝良, 井上弘行: 橫拘束による高強度コンクリートの韌性改善に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1915-1916, 1983.9
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991
- 稻永栄治, 松崎育弘ほか: 人工軽量骨材を用いた RC 梁のせん断性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.197-198, 1988.10
- 清水泰, 西川孝夫ほか: 軽量コンクリート用いたはりのせん断耐力 その 1 実験概要および実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.199-200, 1988.10
- 服部由二, 吾郷明人, 松崎育弘ほか: 超軽量骨材を用いた高強度コンクリート構造の開発 その 4 梁の曲げせん断実験① $\sigma_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ 級, その 5 梁の曲げせん断実験② $\sigma_c = 900 \text{ kgf/cm}^2$ 級, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.33-36, 1993.9
- 荒井英光, 三橋博巳ほか: 人工軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.433-434, 1993.9
- 佐々木仁ほか: 超軽量コンクリート用いたプレキャスト鉄筋コンクリート構造に関する研究開発 その 4 梁部材の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.509-510, 1998.9