

論文 超軽量コンクリート PCa パネルを用いた PCa・PC 耐震壁の破壊性状

島屋隆志*1・柴田辰正*2・奈良純*3・望月洵*4

要旨:耐震壁の施工性と軽量化を意図して、PCa パネルに超軽量コンクリートを使用したプレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁について、その破壊性状の把握と最大強度の評価を試みている。結果は、耐震壁の力-変形関係に PCa パネルに用いた超軽量コンクリートの特性が反映すること、およびその最大強度は普通コンクリートを用いた耐震壁と同じ方法で評価できることを示している。

キーワード: プレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁, 超軽量コンクリート, 力-変形関係, 最大強度

1. はじめに

構造部材のプレキャスト化と軽量化は、RC 構造の施工性の改善と耐震性の向上に欠くことのできないものである。筆者らは、これまでにプレストレストコンクリートの柱・梁フレームにプレキャストパネルを組み込んだ耐震壁（以後、PCa・PC 耐震壁という。）について実験を行い、滑りを十分に拘束できれば、一体打ち耐震壁に近い破壊性状と耐震性能をもつことを示した¹⁾²⁾。

一方、コンクリートの軽量化を意図した超軽量コンクリートの開発は多くのグループで行われ、安定した性状が得られるまでに進んでいる³⁾。また、これを構造部材に用いるために組織的な研究が行われている。

本研究は、PCa・PC 耐震壁の PCa パネルに超軽量コンクリート(比重 1.2、圧縮強度 30N/mm²以上)を用いた PCa・PC 耐震壁の実験から、その破壊性状を捉えるとともに、超軽量コンクリートの有効性を検討することを目的としている。

2. 超軽量コンクリートの基本的性状

超軽量コンクリートの基本的性状については、文献 3) で報告してあるので、ここではその概略を述べる。

超軽量コンクリートは、従来の膨張頁岩などを主原料とした人工軽量骨材に比べて、骨材中に微細な閉気孔を有し、吸水性が非常に低く、かつ強度特性に優れた人工軽量骨材を使用している。

2.1 軽量骨材

軽量粗骨材は、表乾比重が 0.85 で 24 時間吸水率 4.0%以下の骨材である。軽量細骨材は表乾比重が 0.90 で 24 時間吸水率が 7.4%である。吸水率を低下させることで施工時のポンプ圧送性や凍結融解抵抗性が大幅に改善される。

超軽量コンクリートの調合は、比重、圧縮強度、およびスランプについて、それぞれ 1.2、35N/mm²(水中 28 日)、および 23cm を目標値としている。また、コンクリートの水結合材比は 26.5%としている。表-1 に使用材料の一覧を示す。

表-1 使用材料

結合材	早強ポルトランドセメント
	高炉スラグ微粉末
細骨材	人工軽量骨材, 比重 0.90, 吸水率 7.4%
粗骨材	人工軽量骨材, 比重 0.85, 吸水率 4.0%
混和材	高性能 AE 減衰剤
	AE 助剤

2.2 超軽量コンクリートの物性

表-2 は、実験室レベルの超軽量コンクリート

*1 ドービー建設工業(株) 技術部 技術課 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株) 中央研究所 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 工学院大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (正会員)

*4 工学院大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

表-2 超軽量コンクリートの強度性能

養生方法(材齢)	蒸気養生 (1日)	水中養生 (28日)
比重	1.22	1.27
圧縮強度(N/mm ²)	33.1	35.5
曲げ強度(N/mm ²)	2.73	4.01
せん断強度(N/mm ²)	3.07	3.31
引張強度(N/mm ²)	1.55	1.99
ヤング係数(N/mm ²)	1.16×10 ⁴	1.29×10 ⁴
圧縮強度 引張強度	21.4	17.8

の強度性能をまとめたものである。表は設定した調合によって、目標とした比重と圧縮強度が得られたことを示している。一般的に圧縮強度が35N/mm²以上の超軽量コンクリートの引張強度は圧縮強度に比例して増大せず、頭打ちの状態になることが知られている。普通コンクリートの脆度係数(圧縮強度/引張強度)が12程度⁴⁾であるのに対し、超軽量コンクリートはさらに大きい値となっている。超軽量コンクリートのヤング係数は、同等の圧縮強度を有する普通コンクリートに比較してかなり小さい。一般に、コンクリート強度が一定のとき、コンクリートのヤング係数はコンクリートの比重の関数で表される。超軽量コンクリートにおいてもこの関係がほぼ成立し、ヤング係数は比重が小さくなると低下している。

図-1は、圧縮を受ける超軽量コンクリート、高強度コンクリート、および普通コンクリートの平均的な応力-ひずみ曲線である。超軽量コンクリートの応力-ひずみ曲線は、同強度の普通コンクリートに比べて圧縮強度付近まで直線的な関係

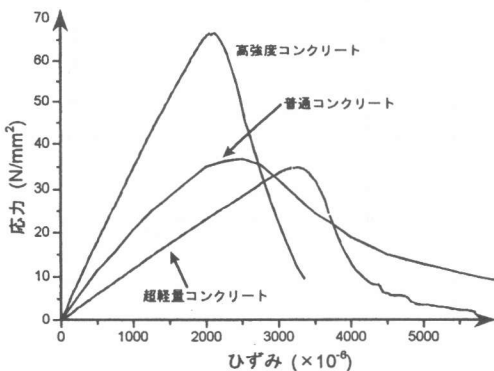


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

を示す。これは、超軽量コンクリートのモルタルと粗骨材の弾性係数の差が小さいことによるものである。一方、超軽量コンクリートの応力下降域の勾配は大きく、急激な破壊を示す。これは、高強度コンクリートの場合とよく似た現象であり、粗骨材とモルタルの力学的性状に近いことに起因する。

3. 実験計画

3.1 試験体

試験体は、PC フレームの 97PCF 1 体、および PCa・PC 耐震壁の 97PCWA および 97PCWD 各 1 体と 97PCWE 2 体の計 5 体である。ここで 97 は実験年度を PCW は PCa・PC 耐震壁を、および記号 A、D、E はパラメータの違いを示している。図-2 に 97PCWA の形状および配筋、図-3 に PCa パネルを示す。

試験体は、連層 PCa・PC 耐震壁の基層を想定した剛強な上下梁、せん断補強規準を満たす補強筋

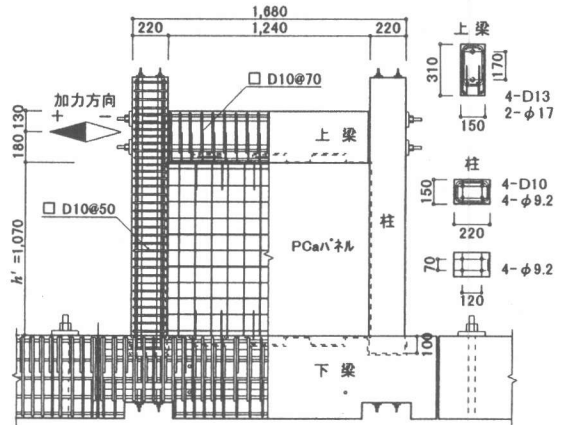
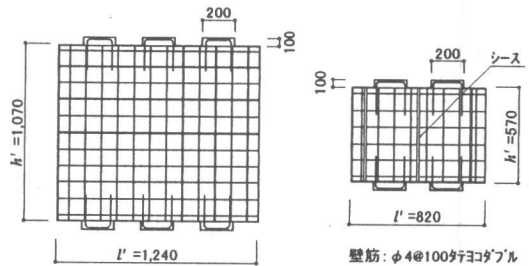


図-2 試験体 97PCWA の形状および配筋(単位:mm)



(a) 97PCWAD

(b) 97PCWE1,2

図-3 PCa パネル

表-3 試験体の諸性質

試験体名	PCa パネル					柱						
	l'×h'	Pa	te	σ_B	目地 σ_B	柱頭 Pg	柱脚 Pg	主筋 σ_y	PC鋼棒 σ_y	σ_B	ΣPi	目地 σ_B
97PCF	—	—	—	—	—	1.67	1.24	368	1525	49	20.0(4- ϕ 9.2)	73
97PCWA	124.0×	0.5	5.0	47	23	1.67	1.24	368	1525	50		73
97PCWD	107.0	0.5	5.0		23	1.67	1.24	368	1525	53		80
97PCWE-1	82×57	0.5	5.2	30	23	1.37	0.94	368	1341	51	16.0(4-D7.1)	80
97PCWE-2		0.5	5.1		23	1.70	1.26	368	1525	55	20.0(4- ϕ 9.2)	73

【記号】 l'(cm)×h'(cm):PCa パネルの寸法, Pa(%):PCa パネルの補強筋比, te(cm):有効壁厚 te=t- ϕ =(壁厚)-(シース径),

σ_B (N/mm²):コンクリート、モルタルの1軸圧縮強度, Pg(%):柱の全主筋比, σ_y (N/mm²):鉄筋,PC 鋼棒の降伏点強度, ΣPi (t):部材の全圧着力

【共通】 PCa パネル:補強筋 斜交コブ状 ϕ 4@100, $\sigma_y=402$ (N/mm²)

柱 (97PCF,WA,D) :b×D=15 (cm)×22 (cm):主筋 4-D10:帯筋 D10@50, $\sigma_y=368$ (N/mm²):上梁:2- ϕ 17.0, $\Sigma Pi=333$ (kN)

柱 (97PCWE1,2) :b×D=18(cm)×18(cm):主筋 4-D10:帯筋 D6@40, $\sigma_y=379$ (N/mm²):上梁:4- ϕ 17.0, $\Sigma Pi=666$ (kN)

と柱脚に深さ 100mm の根入れをもつ柱、および上下水平接合部のみにコッターをもつ PCa パネルで構成されている。97PCWD はこれと同形状である。97PCWE は 97PCWA,D とは PCa パネルの形状比が異なるほか、PCa パネルが、上下梁を貫通する PC 鋼棒 (3- ϕ 7.1, シース内径 ϕ 10mm) によって手締め程度の張力で圧着接合されている点が 97PCWA,D と異なっている。

試験体の主なパラメータは、PCa パネルの形状比、柱の PC 鋼棒の全主筋比、および PCa パネルのコンクリートの種類である。97PCWA は PCa パネルに普通コンクリートを、97PCWD,E は比重 1.2 の超軽量コンクリートを用いている。表-3 に試験体の諸性質を示す。

試験体は、次の手順で組立てられる。はじめに、各部材を所定の位置に設置し、柱脚の根入れ部、および柱と上梁の接合目地に無収縮モルタルを充填する。1 日の養生後、柱と梁を PC 鋼棒で圧着接合し、そのシースにグラウトする。最後に PCa パネルの接合目地に無収縮モルタルを充填する。いずれの試験体も PC 鋼棒の圧着力は、PC 設計・施工規準にもとづく大きさで、その値はひずみゲージの計測で確認されている。

3.2 加力と計測の方法

加力は変位制御の方法とし、アクチュエータを用いた上梁位置に作用する正負繰返し加力とした。加力サイクルは最大強度までは層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad.ごとに 1 回、それ以降は $R=2.0 \times 10^{-3}$ rad.

ごとに 1 回とした。計測は、層間水平変位と柱脚の滑り変位を変位計で、また柱の PC 鋼棒上下端のひずみをひずみゲージで行った。

4. 破壊性状

(1) 試験体 97PCF

この試験体はフレームだけで PCa パネルが組み込まれていない。終局状態には柱頭・柱脚の曲げ降伏で達する典型的な曲げ破壊モードを示した。図-4 に 97PCF の力-変形関係を示す。

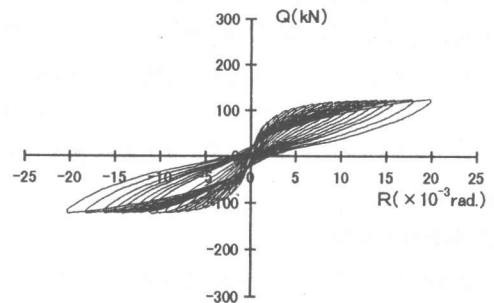


図-4 試験体 97PCF の力-変形関係

(2) 試験体 97PCWA

$R=2.0 (\times 10^{-3}$ rad.) で PCa パネルに斜めひび割れが生じ、引張柱下端から中間部にかけて曲げひび割れが生じた。 $R=3.0 \sim 4.0 (\times 10^{-3}$ rad.) で圧縮柱の上端、中間部に曲げひび割れが生じ、PCa パネルの斜めひび割れは対角方向に伸展した。その後、引張柱の全長にわたって曲げひび割れが生じ、

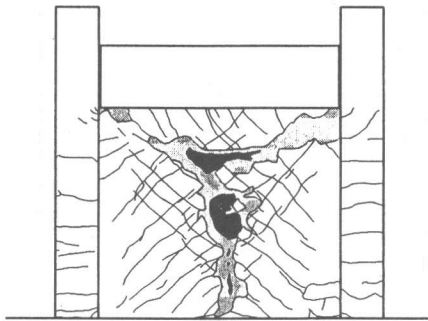


図-5 最終ひび割れ状況(97PCWA)

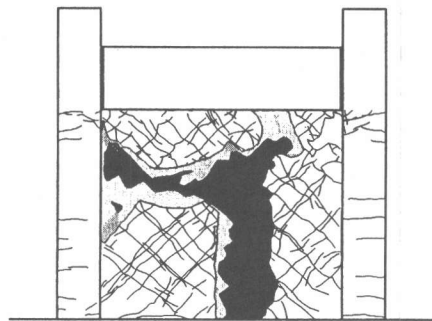


図-7 最終ひび割れ状況(97PCWD)

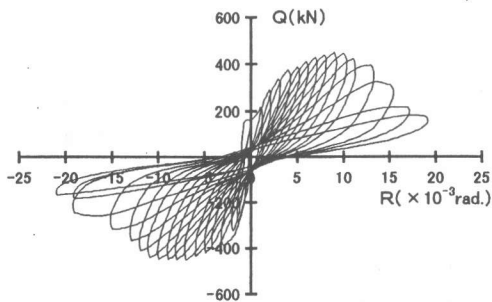


図-6 カー変形関係(97PCWA)

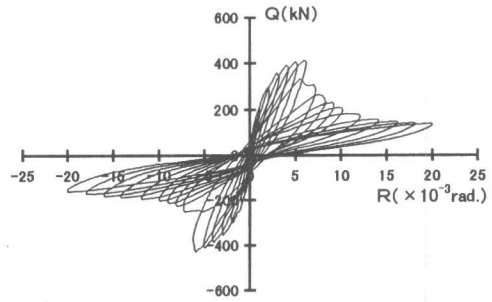


図-8 カー変形関係(97PCWD)

PCa パネルの斜めひび割れは主対角領域に数多く生じた。最大強度には $R=9.0 (\times 10^{-3} \text{rad.})$ で達し、さらに変形が進むと、PCa パネルの中央から剥離が始まり、強度は徐々に低下した。 $R=16.0 (\times 10^{-3} \text{rad.})$ 以降、カー変形関係は 97PCF と同程度の強度を保持した。図-5, 6 に 97PCWA の最終ひび割れ状況とカー変形関係を示す。カー変形関係は曲げ破壊モードに近い曲げ・せん断破壊モードを示している。

(3) 試験体 97PCWD

この試験体は、PCa パネルに超軽量コンクリートを用いたものである。 $R=1.0 (\times 10^{-3} \text{rad.})$ で PCa パネルに斜めひび割れが生じ、 $R=2.0 \sim 5.0 (\times 10^{-3} \text{rad.})$ で引張柱中間部から下部および圧縮柱上部から中間部にかけて曲げひび割れが生じた。PCa パネルの斜めひび割れは、97PCWA が PCa パネルの主対角領域に数多く生じたのに対し、97PCWD は PCa パネル全域に生じた。 $R=6.0 (\times 10^{-3} \text{rad.})$ で最大強度に達し、その後変形が進むと強度は急激に低下した。PCa パネルに生じた引

張破壊または圧壊によるひび割れは粗骨材自体を縦断し、破損させているのが観察された。これは最大強度以降の急激な強度低下とともに、97PCWA との著しい相違点であるといえる。図-7, 8 に 97PCWD の最終ひび割れ状況とカー変形関係を示す。カー変形関係はせん断破壊モードを示したが、最大強度に達するまでは普通コンクリートを使用した 97PCWA と全く変わらない。超軽量コンクリートの低いヤング係数の影響は表われていない。しかし、その最大強度以降の脆性的性状は PCa・PC 耐震壁の破壊モードに反映している。

(4) 試験体 97PCWE1,2

試験体の破壊経過は 2 体とも、97PCWD と同じ様相を示したが、97PCWE1 は最大強度以降で、PCa パネル接合部の目地モルタルの滑落が生じた。このため、PCa パネルと側柱との衝突による隅角部の破壊が著しく生じた。また、カー変形関係はこの影響から、原点近傍でふくらみのある形状を示し、最大強度以降、側柱の PC 鋼棒の断面が小



図-9 最終ひび割れ状況(97PCWE1)

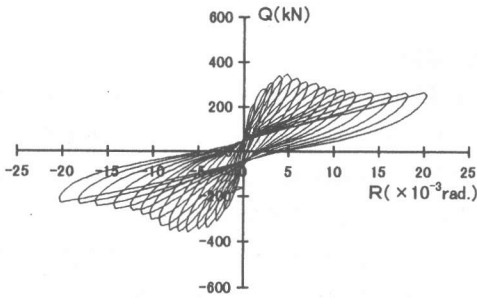


図-10 カー変形関係(97PCWE1)

さいことに起因して、緩やかに強度が低下する曲げ・せん断破壊モードの性状を示した。

97PCWE2 は、97PCWD と同様に最大強度以降急激に強度が低下するせん断破壊モードを示した。最大強度以降、カー変形関係は平滑域を形成し、最終状態までその強度を保った。図-9,10 に97PCWE1 の最終ひび割れ状況とカー変形関係を、図-11 に97PCWE2 のカー変形関係を示す。

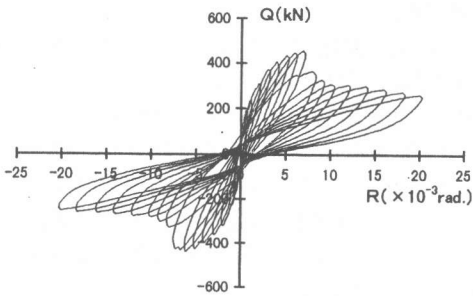


図-11 試験体 97PCWE2 のカー変形関係

(5) 柱脚の PC 鋼棒のひずみ

図-12 に 97PCWE2 の左柱脚部における PC 鋼棒のひずみの計測結果を示す。図は各加力サイクル

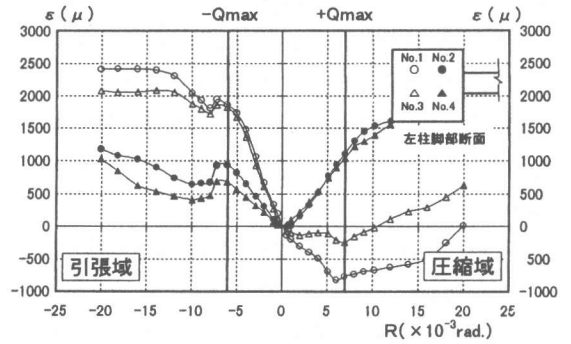


図-12 PC 鋼棒のひずみ(97PCWE2:左柱脚部)

ルでの強度が最大になるときの PC 鋼棒のひずみの計測値を結んだものである。正加力時において内側引張の曲げが、負加力時において外側引張の曲げが生じている。この状態は、普通コンクリートを用いた一体打ち RC 耐震壁または PCa・PC 耐震壁において観察されるものと同じである。

5. 簡略化マクロモデルによる最大強度の評価

4.で、超軽量コンクリートを PCa パネルに使用した PCa・PC 耐震壁の性状が、普通コンクリートを使用したものと大きく変わらないことを示した。

筆者らは、文献 2) で普通コンクリートを使用した PCa・PC 耐震壁の最大強度を簡略化マクロモデルによって評価する方法を構築し、その解析値が実験値をよい精度で評価できることを示した。ここでは、このモデルを用いて最大強度の評価を試みる。

図-13 に PCa・PC 耐震壁の簡略化マクロモデルと想定される応力状態を示す。マクロモデルは剛

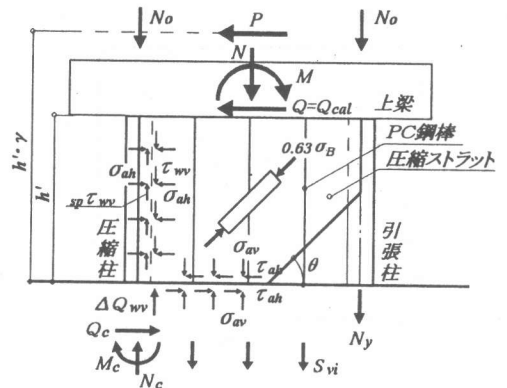


図-13 PCa・PC 耐震壁の簡略化マクロモデル

強な上下梁、柱、傾斜角 θ をもつ圧縮ストラット、および縦引張補強筋 (PCa パネルの PC 鋼棒) により構成される。ただし、97PCWA, D については、縦引張補強筋が省略される。これらの構成要素は最大強度時において、次の性質をもつと仮定される。

- 1) 引張柱下端は引張降伏か、それに近い状態にあり、圧縮柱下端は曲げ降伏している。
- 2) 引張柱下端に生じる曲げモーメントとせん断力は無視できるほど小さい。
- 3) 圧縮ストラットは $0.63\sigma_B$ で降伏している。
- 4) 縦引張補強筋はすべて引張降伏している。

これらの仮定される応力状態は、PC 鋼棒の降伏の有無を除いて、大要、本実験で観察された破壊性状に対応している。また、このモデルでは PCa 構造特有の接合部の滑りを省略している。本研究の PCa・PC 耐震壁は柱に十分な根入れと PCa パネルにシャーコッターをもつため、滑りは観察されていない。

表-4 に PCa・PC 耐震壁の試験体の最大強度の実験値、解析値、および解析値に対する実験値の

表-4 解析結果

試験体名	Qexp		Qcal	Qexp / Qcal	
	+	-		+	-
97PCWA	449.0	447.2	455.6	0.99	0.98
97PCWD	414.8	427.7	435.0	0.95	0.98
97PCWE1	346.4	357.1	346.5	1.00	1.03
97PCWE2	453.8	439.8	533.0	0.85	0.83

Qexp : 実験による最大強度 (kN)

Qcal : 解析による最大強度 (kN)

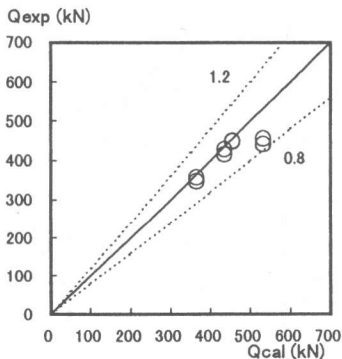


図-14 実験値と解析値の関係

比を示す。また、図-14 には実験値と解析値の比較を示す。

これらの結果は、マクロモデルによる評価が超軽量コンクリートを PCa パネルに用いた PCa・PC 耐震壁についても妥当であることを示している。最大強度の評価は力のつりあいだけを考慮しているため、超軽量コンクリートの脆性的性状は反映されていない。実験結果もまた、その最大強度に脆性的性状は影響を与えていない。

6. 結び

本研究は、構造部材の施工性と軽量化を意図して、PCa パネルに超軽量コンクリートを用いた PCa・PC 耐震壁の実験と簡略化マクロモデルによる解析から、次のようなまとめを得た。

- 1) PCa パネルに超軽量コンクリートを使用した PCa・PC 耐震壁の破壊性状は、普通コンクリートのものと最大強度に達するまでは大きく変わらない。
- 2) 最大強度以降の力-変形関係には、超軽量コンクリートの脆性的性状が反映し、同じ条件の普通コンクリートのものに比べて強度の低下が著しい。
- 3) 最大強度は、既往のマクロモデルの方法によってよく評価できる。

以上のまとめは、試験体数が少ないため、より多数の試験体の実験で検証する必要がある。

【参考文献】

- 1) 望月洵, 小野里憲一, 中村勝, 倉持春夫: PC+PCa 耐震壁に関する実験的研究コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.843-848, 1992
- 2) 望月洵, 倉持春夫, 高見徹也, 藤野一郎: 滑りを完全に拘束したプレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁の破壊性状と強度評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1007-1012, 1996
- 3) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 4) Neville, A.M.: Properties of Concrete (後藤幸正、尾坂芳夫監訳: コンクリートの特性), 技法堂出版, 1979