

既存建物の低強度コンクリートの力学特性

MECHANICAL PROPERTIES OF LOW STRENGTH CONCRETE

荒木秀夫 — * 1 八十島章 — * 2

Hideo ARAKI — * 1 Akira YASOJIMA — * 2

キーワード：
 既存建物, 低強度コンクリート, 応力ひずみ関係, 耐震補強

Seismic evaluations of existing reinforced concrete buildings have been extensive in Japan after the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. According to some reports, seismic evaluations found many RC buildings with very low concrete strength, i.e. less than half of the design concrete strength. It is important for retrofitting to clarify the mechanical characteristics of concrete from the existing reinforced concrete buildings. In this report stress strain curves of low strength concrete from the existing buildings constructed in the 1960s were investigated in comparison with concrete manufactured in the laboratory.

Keywords:
 Existing buildings, Low strength concrete, Stress-strain curve, Strengthening

1. はじめに

地震被害軽減にむけて既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断, 改修が進められている中で, 設計基準強度を下回るコンクリートの存在が顕在化している¹⁾. 本来, 設計条件を大きく満たしていない建物は撤去すべきと考えるが, 経済的理由や環境保全の立場から低強度コンクリート造建物でも改修し, 継続使用したいというのが現状である. そのような背景から低強度コンクリートの力学的性能に関する研究が進められつつある^{2)~7)}. このような研究では低強度コンクリートを作製する必要があり, 水セメント比の調整や石粉(CaCO₃)などの添加物を混入することによって5~10MPa程度の低強度コンクリートを再現して構造実験を実施している. しかし, 建設後長年月を経た建物からコア抜きしたコンクリートが実験室レ

ベルのコンクリートと同等の力学性状を示すかどうかは明確でない. 既存建物から採取した供試体と実験室レベルの低強度コンクリートの試験体を比較検討しておくことは, 既存建物の性能や耐震補強技術の信頼性を確かかなものにするためには必要不可欠と考えられる.

本報告は低強度コンクリートと判定された既存建物から得られたコンクリートの力学的特性について, 実験室で再現した低強度コンクリートと比較検討を行なった報告であり, 今後の既存建物の耐震性評価の基礎的資料とするものである.

2. 既存建物のコンクリート圧縮試験概要

2.1 建物概要

今回検討を行う既存RC建築物は, 昭和30年代に建設された鉄筋

表1 既存建物供試体一覧

コア採取場所	供試体名	直径 d (mm)	高さ h (mm)	重量 W (g)	単位容積質量 γ (kN/m ³)	高さ/直径 h/d	補正係数	
S棟 1F	柱	S1Fc	100.3	176.0	3091.5	22.2	1.75	0.98
	梁	S1Fb	100.3	199.5	3428.4	21.7	1.99	1.00
	壁	S1Fw	68.9	118.5	942.2	21.3	1.72	0.98
S棟 2F	柱	S2Fc	100.6	202.0	3488.5	21.7	2.01	1.00
	梁	S2Fb	100.6	202.3	3470.8	21.6	2.01	1.00
	壁	S2Fw	69.7	107.4	858.0	20.9	1.54	0.96
S棟 3F①	柱	3F1c	100.4	174.6	3067.5	22.2	1.74	0.98
	梁	3F1b	100.4	199.0	3590.4	22.8	1.98	1.00
	壁	3F1w	69.0	129.2	1103.0	22.8	1.87	0.99
S棟 3F②	柱	3F2c	100.6	202.0	3555.1	22.1	2.01	1.00
	梁	3F2b	100.5	191.0	3322.5	21.9	1.90	0.99
	壁	3F2w	68.9	117.0	953.6	21.9	1.70	0.98
S棟 3F③	柱	3F3c	100.5	201.5	3535.9	22.1	2.00	1.00
	梁	3F3b	100.5	201.6	3649.4	22.8	2.01	1.00
	壁	3F3w	69.0	141.0	1172.1	22.2	2.04	1.00

¹⁾ 広島大学工学研究科 准教授
 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²⁾ 筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教

¹⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima Univ.

²⁾ Assistant Prof., Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

コンクリート造 5 階建て床面積 8631m²の公共建物である。

2.2 既存建物供試体

既存建物からコア抜きにより採取した供試体の一覧を表 1 に示す。各棟の柱および梁部材から抜き出した供試体は、φ100mm×200mm のテストピースと同じ形状に成形した。壁部材から採取した供試体は、直径 70mm、高さ 120mm 程度で一般に使用されるテストピースよりも小さく、直径と高さの比も 2 に達しない形状である。いずれの供試体も両端面は研磨処理して加圧試験している。柱、梁、壁はそれぞれほぼ近傍のものとした。また、壁は構造壁から採取している。単位容積質量は、普通コンクリートの 23.0kN/m³ よりも若干小さく 20.9~22.8kN/m³ の範囲となっている。部材種類および採取位置によって大きな相違は無い。

2.3 加力・計測方法

コンクリート強度試験の荷重方法および計測方法を図 1 に示す。加力は 1MN 圧縮試験機を用いて行った。計測項目は、ロードセルによる荷重、ひずみゲージおよびコンプレッソメータによる軸方向ひずみ、軸方向に直角な方向のひずみ、変位計による加力ヘッド間の変位である。

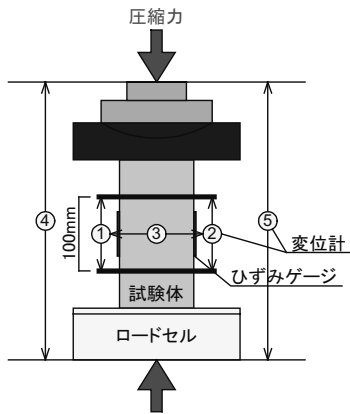


図 1 加力測定方法

2.4 実験結果

(1) 応力ひずみ関係

図 2 に各供試体の応力ひずみ関係を示す。また表 2 に実験結果の一覧を示す。柱、梁をコア抜きした供試体はコンプレッソメータによるひずみを示しているが、壁からコア抜きした供試体は高さが低いため、ひずみゲージにより計測したひずみを示している。壁から採取した供試体は柱や梁からの供試体と比べて最大耐力以降において早期に脆く破壊する傾向があった。これは供試体の大きさが柱、梁の φ100mm×200mm に比べ、φ70mm×120mm と小さく、粗骨材の大きさが相対的に大きいことが影響を与えていることが考えられる。柱と梁の供試体において、低強度コンクリートの特徴といえる最大応力以降の応力軟化域の勾配が緩やかであることがわかる。

(2) 圧縮強度

建物全体でみると圧縮強度はばらつきが大きく、値は 7.9~18.6MPa の間にある。同一建物であってもコア採取場所によって大幅に圧縮強度が異なることがわかる。また、一般に雑壁の強度は構造躯体より低いと言われるが、本建物の構造壁の場合、柱、梁に比べ、異なる傾向は特に見られない。採取箇所の平均強度の最も低い S 棟 1F は 8.9~11.6 MPa、平均強度の最も高い S 棟 3F① は 15.5~18.6 MPa となっており、同一箇所における部材ごとの強度差はあまり無いといえる。一方、採取箇所での圧縮強度平均値をみると最小で 10MPa、最大で 16.7MPa となり、ばらつきは大きい。圧縮強度の平均値は、最大値を記録した S 棟 3F①を除き、本建物建設当時の RC 規準 (1962 年版) に示されている設計基準強度の下限値 13.5MPa 以下となっている。全供試体平均値は 12.4MPa となっている。

(3) ヤング係数

ヤング係数はひずみゲージにより算出し 1/3 割線弾性係数として算出している。ヤング係数と圧縮強度の関係を図 3 に示す。図中には 1999 年 RC 規準式(1)⁸⁾、1991 年 RC 規準式(2)⁹⁾による計算値を示している。平均圧縮強度の最も小さい S 棟 1F (9.93GPa) が最も小さく、平均圧縮強度の最も大きい S 棟 3F① (19.8GPa) が最も大きな値を示しており、圧縮強度の増加に伴い、ヤング係数も増加して

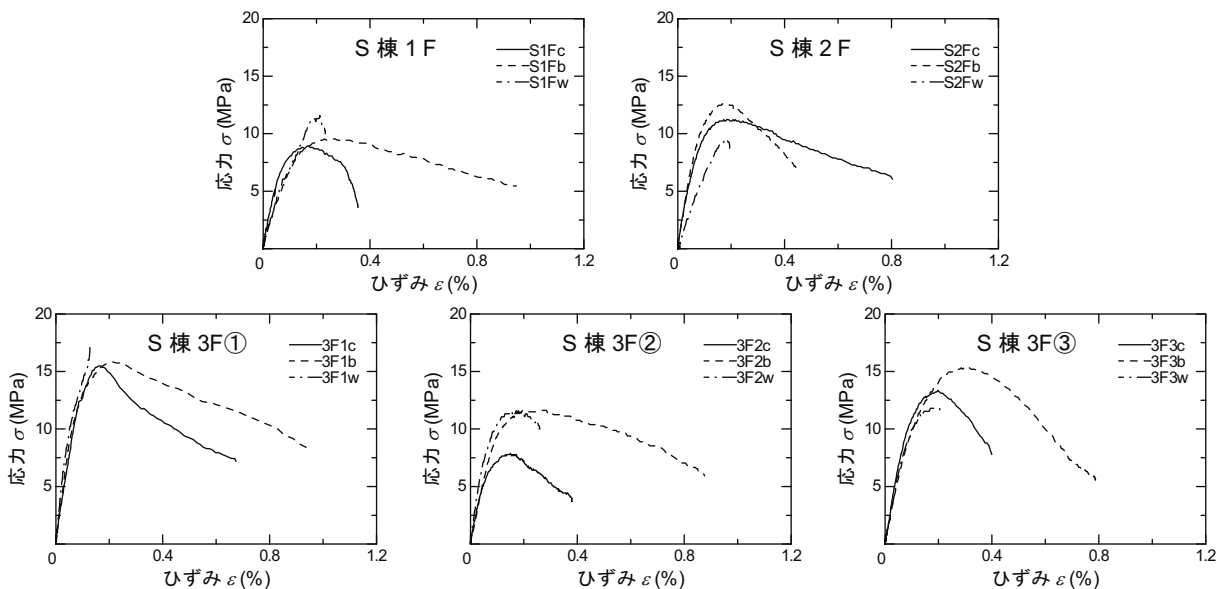


図 2 既存建物供試体の応力ひずみ関係

表 2 既存建物供試体実験結果一覧

コア採取場所	供試体名	圧縮強度 (MPa)		ヤング係数 (GPa)		圧縮強度時ひずみ (%)		ポアソン比	
		実験値	平均	実験値	平均	実験値	平均		
S 棟 1F	柱	S1Fc	8.9	10.0	11.5	9.93	0.174	0.227	0.35
	梁	S1Fb	9.6		9.6		0.296		0.21
	壁	S1Fw	11.6		8.7		0.212		—
S 棟 2F	柱	S2Fc	11.2	11.1	14.2	12.0	0.216	0.202	0.32
	梁	S2Fb	12.6		15.0		0.205		0.21
	壁	S2Fw	9.5		6.9		0.186		—
S 棟 3F ①	柱	3F1c	15.5	16.7	18.5	19.8	0.179	0.169	—*
	梁	3F1b	15.9		17.0		0.212		0.35
	壁	3F1w	18.6		23.9		0.117		—
S 棟 3F ②	柱	3F2c	7.9	12.7	10.7	13.2	0.150	0.188	0.13
	梁	3F2b	11.6		11.2		0.229		0.17
	壁	3F2w	11.6		17.6		0.186		—
S 棟 3F ③	柱	3F3c	13.4	13.5	13.9	12.9	0.198	0.229	—*
	梁	3F3b	15.3		12.4		0.286		0.26
	壁	3F3w	11.8		12.3		0.204		—
全体平均			12.4		13.6		0.203		0.25

*データ不良

いることがわかる。これまでの算定式と比較すると、得られた値は全体的に小さな値を示している。

$$1999 \text{ 年 RC 規準式} \quad E_c = 33.5 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

$$1991 \text{ 年 RC 規準式} \quad E_c = 21 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \left(\frac{\sigma_B}{20}\right)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 E_c : ヤング係数 (GPa)
 γ : 気乾単位容積質量 (kN/m³)
 σ_B : 圧縮強度 (MPa)

(4) 圧縮強度時ひずみ

圧縮強度時ひずみはコンプレッソメータおよび変位計により計測した値としている。圧縮強度時ひずみは 0.1%~0.3%の間に分布している。圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係を図 4 に示す。図中には、圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係式として、Shah 式(3)¹⁰⁾、六車式(4)¹¹⁾、Popovics 式(5)¹²⁾、村上式(6)¹³⁾を示している。村上式のヤング係数は 1999 年 RC 規準式(1)による計算値としている。実験値は、六車式および Popovics 式の推定値を上回っており、村上式および Shah 式の計算値と比較的よく対応している。

$$\text{Shah 式} \quad \epsilon_m = 0.195 + 14.9 \times 10^{-4} \sigma_B \quad (3)$$

$$\text{六車式} \quad \epsilon_m = 0.130 + 13.3 \times 10^{-4} \sigma_B \quad (4)$$

$$\text{Popovics 式} \quad \epsilon_m = 767 \cdot \sqrt[4]{\sigma_B} \times 10^{-4} \quad (5)$$

$$\text{村上式} \quad \epsilon_m = \frac{\sigma_B \times 10^{-1}}{E_c (1 - 1/n)} \quad (6a)$$

$$n = \exp(0.0256 \cdot \sigma_B) \quad (6b)$$

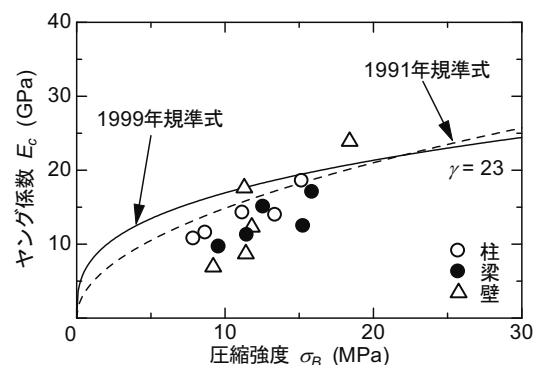


図 3 ヤング係数と圧縮強度の関係

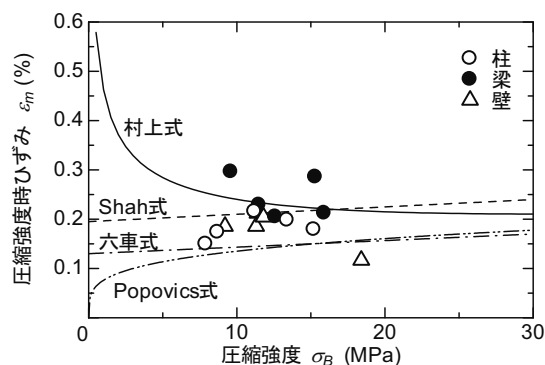


図 4 圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係

ここで、 ϵ_m : 圧縮強度時ひずみ (%)
 σ_B : 圧縮強度 (MPa)
 E_c : ヤング係数 (GPa)
 n : 実験定数

(5) ポアソン比

ポアソン比はコンプレッソメータから求めているため、柱、梁のものであるが、実験値は 0.17~0.35 に分布しており、平均は 0.25 と

なっている。現行の RC 規準では 0.2 が示されているが、以前は 0.167 であったこともあり、ばらついてはいるものの通常コンクリートと大きな相違は無いといえる。

3. 製作した低強度コンクリート圧縮試験概要

3.1 実験概要

比較対象として実験室レベルで低強度コンクリート試験体を製作するにあたって、モールドを用いるシリンダー試験体では打設条件や養生条件が大きく異なるために、比較対象とするには問題があると考え、コア抜きという条件を同じにするように試験体を作製した。

(1) 低強度コンクリートの調査

調査表を表 3 に示す。本研究では、低強度となる要因のうち最も影響が大きいと考えられる水セメント比をパラメーター（70%～140%）として試験練を行なった。強度は耐震診断基準の適用外となる 13.5MPa 以下とし、本研究では 10MPa を目標に調査を決定した。強度推定は JASS5¹⁴⁾ の水セメント比による式であり、本低強度に対しては外挿して使用した。粗骨材最大寸法は 20mm である。

表 3 調査表

調査強度 (MPa)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
10	140	53.0	215
セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
154	941	881	2.31

(2) コア抜き試験体

実際の柱の大きさを模擬して大きさ 500mm×600mm×600mm のコンクリート塊を作製し、打設後、実験室内において現場気中養生し、28 日後にコア抜きを行った。φ100mm のコンクリートコアを縦向き 3 本、横向き 3 本の計 6 本採取した。その後 200mm の長さで 12 試験体に切り分け、端面研磨、ゲージ貼付等の準備のため載荷は打設後 43 日となった。コア抜き後は実験室内に置き、気中養生とした。コンクリート塊形状およびコア抜き位置を図 5 に示す。打設面はコンクリート塊上部で、図中に示す数字は試験体名と対応している。

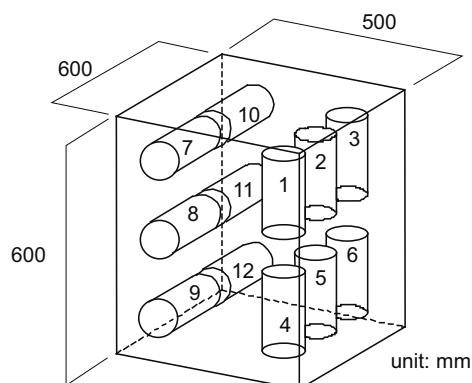


図 5 コンクリート塊形状およびコア抜き試験体位置

3.2 実験結果

(1) 材料試験用試験体の応力ひずみ関係

材料試験用試験体はコンクリート塊の打設時に採取して作製

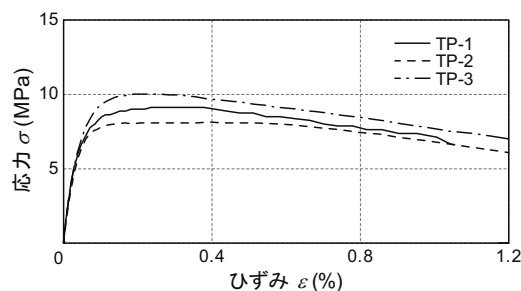


図 6 材料試験用試験体の応力ひずみ関係

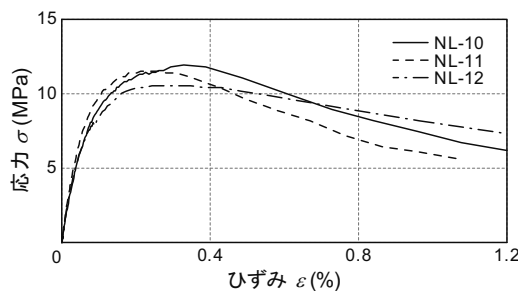
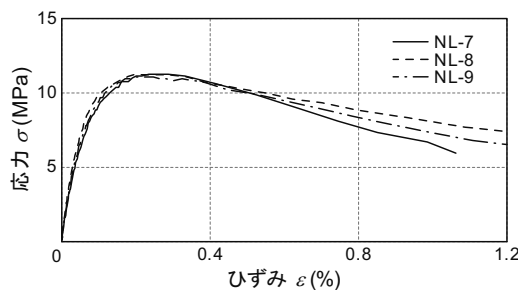
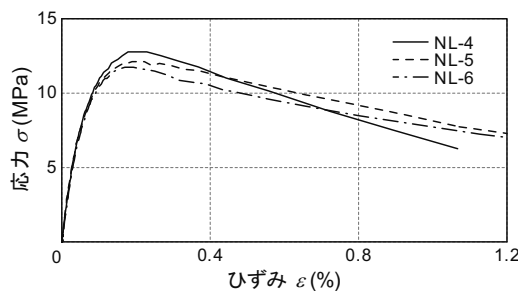
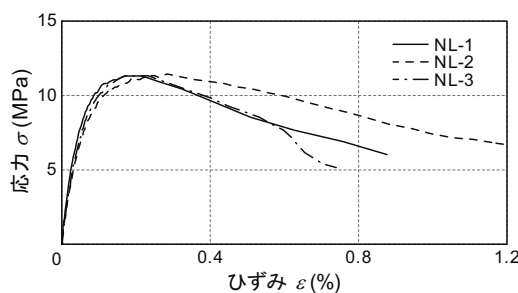


図 7 コア抜き試験体の応力ひずみ関係

したもので、形状はコア抜き試験体と同じφ100×200mmである。脱型は2日後とし、現場封緘養生とした。材齢43日に3本圧縮試験を行なった。図6に応力ひずみ関係を示す。低強度コンクリートの応力ひずみ関係は最大耐力に達した後、急激な耐力低下を示すことなく、緩やかな耐力低下を示した。本載荷方法は荷重制御で行なっているが、高剛性の試験装置を使用するまでも無く、計測可能な最大

ひずみは 1%以上に至っている。これらの性状は低強度コンクリートにおける既往の実験結果とも一致している⁷⁾。

(2) コア抜き試験体の応力ひずみ関係

コア抜き試験体の応力ひずみ関係を図 7 に示す。ひずみ計測はひずみゲージおよびコンプレッソメータにより行い、同図にはコンプレッソメータによるひずみ値を示している。図 6 に示した材料試験用試験体とほぼ同じように最大耐力以降も緩やかな耐力低下を示し、記録される最終的なひずみは 1%を超え、2%にいたるものも存在していた。材料試験用試験体とコア抜き試験体とは大きな相違は無い。

(3) 力学特性

材料試験用試験体およびコア抜き試験体の圧縮試験結果一覧を表 4 に示す。材料試験結果は 3 本の平均値である。材料試験とコア抜き試験体と比較すると圧縮強度、ヤング係数が若干低く、圧縮強度時ひずみが大きめの値となっている。コア抜き試験体の強度は平均 11.4MPa となっている。実験値は 10.5MPa から 12.4MPa に分布しており、ばらつきは小さい。また表 4 に示す性能においてコア抜き位置および抜き取り方向による有意な相違はみられない。

4. 既存建物コンクリートとコア抜きコンクリートの比較

4.1 応力ひずみ関係

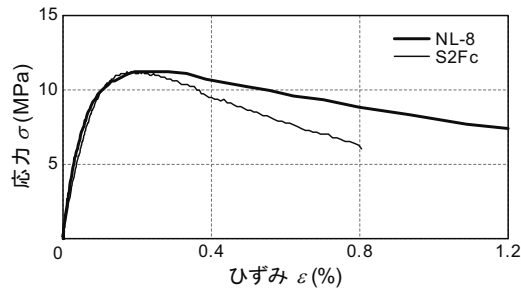
図 8 にほぼ同程度の強度を持つコンクリートの応力ひずみ関係を重ね合わせて例示した。同図は形状が同じで計測にコンプレッソメータを使用した柱、梁のものとしている。この図から既存建物とコア抜きのコンクリート圧縮性状は、最大応力までの領域は同様な傾向を示し、ほぼ同じ曲線形状である。一方、ポストピーク挙動においては、ひずみ 0.3%時の応力差は NL-8 と S2Fc で 0.6MPa、NL-4 と S2Fb で 1.9MPa と小さい応力差であるが、既存建物とコア抜きは異なる傾きで直線的に低下しており、0.4%以上の大ひずみ域では既存建物コンクリートのほうが早期に顕著な耐力低下を起していることが確認でき、大きな違いとして読み取ることができる。

4.2 ヤング係数

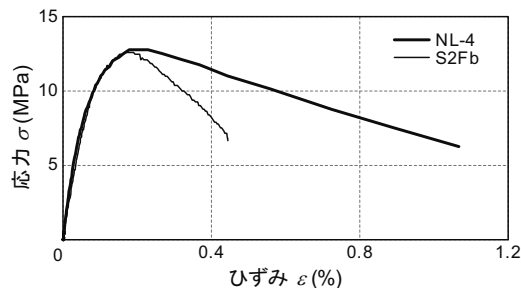
コア抜き試験体 12 体、既存 RC 建築物から採取した供試体のうち、13.5MPa 以下の低強度であった S1Fc、S1Fb、S1Fw、S2Fc、S2Fb、S2Fw、3F3c、3F3b、3F3w、3F2c、3F2w の 11 体を比較検討対象と

表 4 圧縮試験結果一覧

試験体名	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度時ひずみ(%)	ポアソン比
材料試験	9.1	20.5	0.272	0.21
NL-1	11.3	22.0	0.171	0.21
NL-2	11.5	17.1	0.283	0.15
NL-3	11.3	17.8	0.170	0.16
NL-4	12.8	18.1	0.179	0.19
NL-5	12.1	19.6	0.190	0.14
NL-6	11.7	17.9	0.170	0.23
NL-7	11.3	15.2	0.235	0.14
NL-8	11.2	19.7	0.194	0.18
NL-9	11.1	17.2	0.200	0.22
NL-10	11.9	14.0	0.329	0.13
NL-11	11.5	17.4	0.213	0.12
NL-12	10.5	16.2	0.243	0.15
平均	11.5	17.7	0.215	0.17



(a)NL-8 VS. S2Fc



(b)NL-4 VS. S2Fb

図 8 応力ひずみ関係比較例

する。既存建物供試体のヤング係数と圧縮強度の関係を図 9 に示す。図中には 1999 年規準式(1)、1991 年規準式(2)による計算値も示している。コア抜き試験体のヤング係数は 14~22GPa、既存建物供試体は 7~18GPa の間に分布しており、どちらもばらつきは大きい。コンクリート強度が低い場合、ヤング率は試験体中の骨材の影響を受けることが考えられる。また、既存建物供試体のヤング係数は、全体的にコア抜き試験体の値より小さい。その原因として、既存建物の試験体は長年月を経て完全な乾試験となっており、若材齢のコア抜き試験体や、推定式より低い値が出たと考えられる。

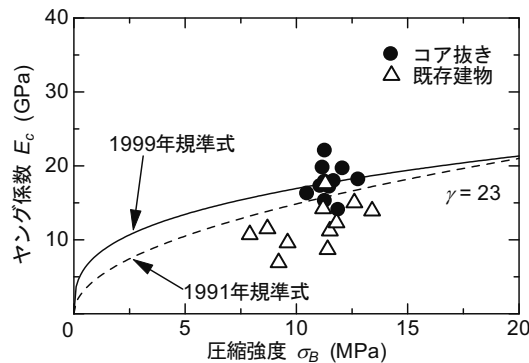


図 9 ヤング係数と圧縮強度の関係

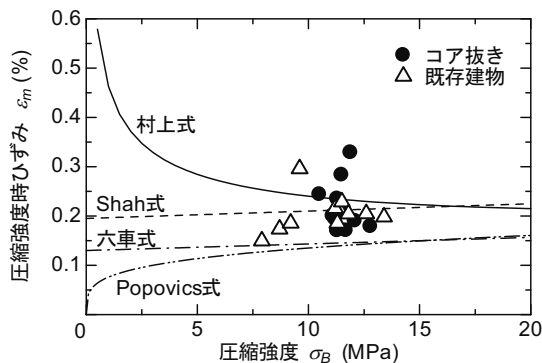


図 10 圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係

4.3 圧縮強度時ひずみ

コア抜き試験体 12 体，既存建物供試体 11 体の圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係を図 10 に示す。図中には Shah 式(3)，六車式(4)，Popovics 式(5)，村上式(6)を示している。

なお，村上式中のヤング係数は 1999 年規準式(2)の計算値としている。既存建物供試体の圧縮強度時ひずみは 0.15%~0.3%の間にあり，一方，コア抜き試験体の値は 0.17%~0.35%にあり，既存建物供試体の圧縮強度時ひずみは，コア抜き試験体の実験値を少し下回っている。その原因として，圧縮強度時ひずみは養生条件により大きく左右されるため，養生条件の違いが考えられる。また，長年月長期荷重を受けていたことにより，クリープ現象により残留ひずみが生じていた可能性も原因として考えられる。また，各算定式による評価は，村上式および Shah 式による計算値が両実験結果と比較的良好に対応している。

4.4 80%強度時ひずみ

図 8 に示したように荷重変形関係のポストピークの性状は早期に荷重低下の傾向がある。本研究における荷重は荷重制御であるが，低強度であるがゆえに，最大強度後も比較的大きなひずみまで計測できる傾向にある。そこで最大強度が 80%に低下した時点のひずみを比較したものを図 11 に示す。既存建物供試体は前節で示した 13.5MPa 以下の低強度コンクリート 11 体から，壁試験体を除き，コンプレッソメーターで計測した 7 体としている。既存建物供試体の 80%強度時ひずみは 0.25%~0.6%に分布し，その平均値は 0.39%となっている。一方，コア抜き試験体は 0.4%~0.9%にばらついており，平均値が 0.62%で，既存建物供試体の結果を大きく上回っている。図中には，Popovics 式および村上式の応力ひずみ関係を用いて算出した推定値も示している。コア抜き試験体はこれらの推定値より大きく，既存建物供試体のひずみ値は Popovics 式による値を中心に分布している。

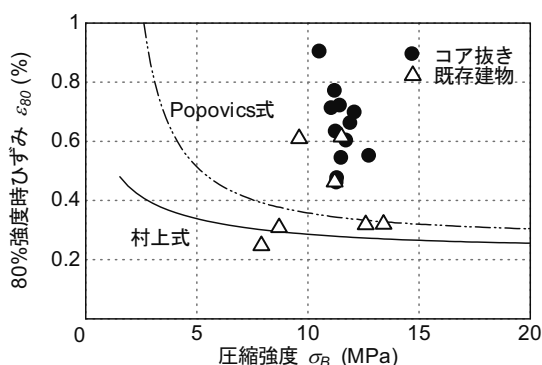


図 11 80%強度時ひずみと圧縮強度の関係

5. まとめ

既存 RC 建築物から採取した低強度の実建物コンクリート供試体と，実験室で作製した低強度コンクリート試験体の圧縮性状を比較検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 既存 RC 建築物から採取したコンクリート供試体のヤング係数は，コア抜きした低強度コンクリート試験体より全体的に小さく，推定式より小さな値となっていた。
- 2) 既存 RC 建築物から採取したコンクリート供試体の圧縮強度時

ひずみは，コア抜きしたコンクリート試験体の実験値を少し下回っている。

- 3) 応力ひずみ関係において応力軟化域では実験室作製したコンクリート試験体の低下勾配の方が緩やかである。
- 4) 本報告ではひとつの既存 RC 建物から採取したコンクリートで比較検討を行なっているが，他の既存建物の低強度コンクリートが同様な性状を示すかどうかは不明である。ただ，実験室レベルで作製するものと違いがあることは同じコア抜きコンクリートと比較することによって確認することが出来たと考えられる。これは補修補強にあたっては現地において十分な調査が必要であることの証でもある。また，低強度コンクリートに関してはこれから実験室レベルの検証が不可欠であるが，実建物における低強度コンクリートの資料蓄積も論を待たない。

謝辞

最後に，実験実施におよびデータ整理に対し広島大学耐震工学研究室の中下潤子君（広島市役所）他学生諸君に多大な御協力を頂いた。関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂巻健太，広沢雅也，清水泰，周建東：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究（その 1~その 2）設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造 IV，pp.801-804，2001.9
- 2) 伊藤嘉則，榎谷榮次，橋本敏男，沢崎詠二：低強度コンクリート既存 RC 柱の耐震補強効果に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.199-204，2003.7
- 3) 永坂具也，林杰，長谷川匡輔，東城正晃：極低強度コンクリートの用いられた RC 梁の耐力と変形，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.361-366，2004.7
- 4) 田才昇，雨宮牧子，帆足勇磨，増田安彦：低強度コンクリート RC 柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究（その 1~その 4），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造 IV，pp.495-502，2007.8
- 5) 根口百世，藤原顕太郎，高月行治，南宏一：低強度コンクリートを用いた丸鋼を主筋とする RC 柱のせん断破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.157-162，2007.7
- 6) 八十島章，谷口博亮，荒木秀夫：低強度コンクリートを用いた RC 部材の耐震性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.931-936，2007.7
- 7) 日本コンクリート工学協会中国支部：低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書，2009.2
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一，1999.11
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991.4
- 10) S.P.Shah, A.Fafitis and R.Arnold : Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete, ASCE, pp.1695-1710, 1983.7
- 11) 六車照，渡辺史夫，田中仁史，勝田庄二：横拘束筋によるプレストレスコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.2，No.2，pp.377-380，1980
- 12) S.Popovics : A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 13) 村上聖：鉄筋コンクリート梁の終局せん断強度算定式に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，No.533，pp.143-150，2000.7
- 14) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（2003）

[2009 年 6 月 10 日原稿受理 2009 年 8 月 28 日採用決定]