1964年に建設されたRC建物から採取したコンクリートの物性

PROPERTIES OF CONCRETE FROM OLD EXISTING RC BUILDING CONSTRUCTED IN 1964

荒木秀夫 ——— * 1

キーワード：

既存建物、コンクリート、応力ひずみ関係、圧縮強度、ヤング係数、引張強度

Keywords:

Existing building, Concrete, Stress-strain curve, Compressive strength, Modulus of elasticity, Tensile strength

Hideo ARAKI ——— * 1

The properties of old concrete are important factors in the seismic evaluations of existing RC buildings. It is investigated that those properties of concrete in existing buildings are affected by deteriorations over long time periods, uncertainty of construction and several other important factors. 31 concrete cylinders were obtained from the structural members of an RC gymnasium planned for demolition. The mechanical properties of concrete are mainly discussed. The carbonation tests and the componential tests are also performed for the material properties.

1. はじめに

竣工後長年月を経た既存建物におけるコンクリートの力学的特性は実験室で作成されたコンクリートと同等ではないことは梶田等¹⁾、山本等²⁾の研究によって示されているところである。筆者等が行った検討においても同様な結果が得られている³⁾。しかし、現行の既存建物耐震性能評価ではこの相違について特に考慮されず、実験室データに基づいて得られた評価式を用いているのが実情である。

上記の研究では多数の既存建物の様々な部位から得られたコンクリートコアを用いてその力学的特性を評価しているが、建物が異なれば環境条件やコンクリートに使用される骨材やセメント、施工時の状況も異なっており、そのことがコンクリートの特性に与える影響は無視できないと考えられる。単一の建物から採取したコンクリートの特性を把握することは、使用材料や打設方法の違い等の影響を取り除くことにより、コンクリートの採取部材や採取位置がコンクリートの物性に与える影響をより詳細に調査できると考えられる。このような背景から筆者等は10階建て集合住宅の構造部材からコンクリートを採取し、その力学的特性に与える部材種別、階数等の影響について検討を加えた⁴⁾。その結果、部材種別、コア採取位置、階数などはコンクリートの力学的特性にそれほど影響を与えないことが分かったが、ヤング係数が推定式より低めの評価となることなど従来の研究成果と同じ結果が得られた。本研究はこのような背景から、既存建物の耐震性能評価の精度向上を目指して長年月を経たコンクリートの物性を把握することを目的としている。そのためには資料の蓄積が必要であり、本論文は竣工後50年の中学校体育館のコンクリートの物性を調査したものである。文献⁵⁾の対象建物の平均圧縮強度は設計基準強度を上回り、強度的には比較的健全であったのに対し、本建物は耐震診断優先度調査でコンクリートの圧縮強度が 10N/mm^2 以下であることが分かり、解体と判断されたものである。このような問題がある建物は調査されることなく解体撤去される場合が多いが、建物の継続使用を判断する資料と考えると貴重

なものである。本建物は2階建て体育館であり、1階の全周の梁、柱からコンクリートを採取して圧縮試験、割裂試験、中性化試験を行った。応力度ひずみ度関係から求めた圧縮強度、ヤング係数、圧縮強度時ひずみおよび引張強度について、既往のRC規準式や各種推定式との比較検討を行った。応力度ひずみ度関係については既往の評価式を修正して、実験値との比較を行った。また、圧縮強度及び中性化については建物平面内での分布を検討した。対象建物の圧縮強度の分布幅が非常に大きく、その原因を調べるために、圧縮試験を行ったコアを用いてコンクリートの成分分析を行った。

2. 対象建物及び試験体概要

本研究で対象とした建物の概要を以下に示す。

用途：中学校体育館

竣工：1964年（解体2014年：50年経過）

主構造：RC造（1F, 2F）鉄骨屋根

建築面積：740 m^2

延床面積：662 m^2

スパン数：X方向5スパン Y方向3スパン

設計基準強度： $17.6\text{N/mm}^2(180\text{kg/cm}^2)$

検討対象建物は中学校体育館であり、架構種別は軒下までRC造、屋根はS造のR1タイプである。図1にコンクリートコアの採取位

図1 コア抜き位置

*1 広島工業大学工学部建築工学科 教授・工博
(〒739-5193 広島市佐伯区三宅2丁目1-1)

*1 Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

置を示す。コアの直径は約 100mm であり、全部材とも抜き切りを目標とした。1 階の柱および梁、2 階では柱から図 1 中に示す矢印方向に採取した。1 階の柱は建物解体に向けて取り壊された 1 本を除き、全ての柱からコアを採取した。梁については 1 階の両表面の大梁 1 本当たりそれぞれ 2 本ずつ採取している。抜き取ったコアは柱 19 本、梁 12 本である。2 階の柱からは足場の関係から採取したコアは 4 本である。柱断面は 680mm×680mm および 600mm×400mm の 2 種類で、いずれの柱も断面長手方向にコアボーリングしている。梁断面は 400mm×700mm で梁幅方向に抜き取っている。圧縮試験用および割裂試験用ともコアの直径と高さの比が 1 : 2 となるように切り分けた。ただし、予想外の鉄筋やジャンカ等のため中折れし、規定長さに達しないものは割裂用試験体の予備として使用し、試験結果には影響のないようにした。圧縮試験において高さがわずかに規定に満たなかった供試体については強度補正を行った。長さを確保できる柱のコンクリートコアは圧縮用と割裂用の供試体に切り分けた。これまで既存建物から抜き取ったコンクリートの引張強度と圧縮強度との関係を直接比較したものは殆ど無いためである。梁から抜き取ったコンクリートコア長さは 400mm のため、1 本を除き全て圧縮試験用とした。試験用に整形した供試体は柱から 50 個（内割裂用 24 個）、梁から 12 個（内割裂用 1 個）、合計 62 個である。

3. 加力測定方法

圧縮試験方法は JIS A1108 によっている。加力は 200 トン圧縮試験機を用い、ひずみ測定の際はコンプレッソメータ（以下 C.M.）と検長 60mm のひずみゲージ（以下 S.G.）を併用して行った。割裂試験方法は JIS A1113 によっている。ヤング係数は JIS A 1149 に基づいて算出している。

4. 試験結果

4.1 単位体積重量

供試体は JIS に基づいて直径、高さ、重量を計測し、単位体積重量 γ を算出した。表 1 に単位体積重量を採取部材別に比較した結果を示す。鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁶⁾（以下 RC 規準）では圧縮強度 $F_c < 36\text{N/mm}^2$ の範囲ではコンクリートの単位体積重量は 23kN/m^3 を推奨しているが、本建物から採取した供試体は全て 23kN/m^3 を下回っており、平均で 21.89kN/m^3 となった。柱梁それぞれの平均値をみると部材別で有意な差はないと判断される。ばらつきも大きくない。

表 1 単位体積重量 γ (kN/m³)

部材	個数	平均	標準偏差	分散
柱	50	21.93	0.374	0.140
梁	12	21.67	0.290	0.084
全部材	62	21.89	0.373	0.139

4.2 圧縮強度

表 2 に部材別の圧縮強度の平均値等を示す。建物全体で見ると圧縮強度は $7.96 \sim 30.8\text{N/mm}^2$ の間に大きくばらついている。1 階および 2 階柱の平均値はそれぞれ 18.41N/mm^2 、 17.0N/mm^2 となり、いずれも本建物の設計基準強度 17.6N/mm^2 前後である。一方、梁の圧縮強度は $7.96 \sim 19.1\text{N/mm}^2$ に分布し、その平均値は

表 2 圧縮強度 σ_B (N/mm²)

部材	個数	平均	標準偏差	分散
柱(1F)	21	18.41	4.25	18.1
柱(2F)	5	17.00	4.40	18.4
梁	11	14.09	4.22	17.8
全部材	37	16.94	4.59	21.0

図 2 圧縮強度と単位体積重量

14.09N/mm^2 と設計基準強度を下回る結果となった。1, 2 階の柱については圧縮強度が若干異なるものの標準偏差、分散とも類似した値となり、以下の検討では特に区別しないこととする。

図 2 に圧縮強度と単位体積重量の関係を示す。多数の既存建物のコンクリートに関する研究をみると文献 7) に示される式 (1) がある。

$$\sigma_B = 2.733\gamma - 36.282 \quad (1)$$

ここで、 σ_B : 圧縮強度 (N/mm²)

γ : 単位体積重量 (kN/m³)

この式に表 2 の単位体積重量平均値 21.89kN/m^3 を用いて圧縮強度を求めてみると 23.54N/mm^2 となり、本建物の圧縮強度平均値 16.94N/mm^2 と大きな隔たりがあることが分かる。また図中に耐震診断基準⁸⁾の適用下限値 13.5N/mm^2 及び設計基準強度 17.6N/mm^2 を示す。本建物のコンクリートにはこの下限値を下回るものがあり、優先度調査時の判定を裏付けるものであるが、設計基準強度以上のものも多数あることからその信憑性には疑問が残るところである。

4.3 ヤング係数

表 3 に JIS に基づいて求めた部材別のヤング係数の平均値等を示す。ヤング係数はコンプレッソメータの値から求めたものである。ただし、コンプレッソメータの 2 つの縦ひずみに著しい相違があり、計測不良と判定した場合はストレインゲージによる計測値からヤング係数を求めた。ヤング係数は $8.0 \sim 20.34\text{kN/mm}^2$ の間にばらつき、平均値で 13.64kN/mm^2 となった。部材別の平均値を比較すると、柱部材は 14.18kN/mm^2 であるが、梁部材の平均値は 12.3kN/mm^2 となっており、圧縮強度と同様に梁の方が低くなっている。しかし、ばらつきは柱のほうが大きい。

図 3 にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。同図中に RC 規準⁶⁾にある式 (2) の値を挿入している。なお、RC 規準式を用いる際には

表 3 ヤング係数 E_c (kN/mm²)

部材	個数	平均	標準偏差	分散
柱	24	14.18	3.48	12.1
梁	10	12.35	2.47	6.61
全部材	34	13.64	3.29	10.8

図3 ヤング係数と圧縮強度の関係

文献 1) に従って単位体積重量 γ として 23kN/m^3 を用いている。また、同文献にある RC 規準式の $90\% \pm 15\%$ の値も挿入した。

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

ここで、 E_c : ヤング係数 (kN/mm^2)

得られたヤング係数は RC 規準式と同様に圧縮強度の上昇とともに増加する傾向にあるものの、実験値は推定値を大幅に下回っており、既往の研究結果と同様となった 1)-3)。しかしその低下度合いは梶田等 1) の推定よりも更に下回る結果となっていることが分かる。長年月を経たコンクリートのヤング係数が推定式 (2) を下回る原因として既往の文献では長期荷重によるコンクリートのクリープの影響 3) や長期間による乾燥による影響 3) などが指摘されているが、現在のところ、これらのことは既存建物の耐震性能評価に反映されていない。コンクリートのヤング係数は耐震診断時における形状指標（偏心）に関わっていると同時に、耐震補強時に最も多用されるあと施工アンカーの強度評価（支圧強度推定）に使われており、診断改修設計において再評価されることが強く望まれる。RC 規準式 (2) 式をもとに本実験で計測された単位体積重量と圧縮強度を用いて推定ヤング係数を求め、実験値とを比較したものを図 4 に示す。柱のヤング係数実験値は梁に比べばらつきは大きいものの、最小二乗法による 1 次回帰曲線を求めると両部材ともに実験値は推定値のほぼ 76% となっている。単位体積重量を考慮しても推定値との差は梶田等の研究 1), 2) で示される相違より大きくなっている。

図4 ヤング係数の比較

4.4 引張強度

これまで構造体コンクリートとしての引張強度（割裂強度）に關しての研究はあまり見られない。文献 9) では 11 供試体と少なかったが、本報告では 25 供試体を対象としている。また、圧縮強度との

表 4 引張強度 σ_{st} (N/mm^2)

部材	個数	平均	標準偏差	分散
柱	24	1.23	0.350	0.122
梁	1	1.56	-	-
全部材	25	1.24	0.349	0.122

関係を明らかにするために部材から抜き取った 1 本のコンクリートコアを切り分けて圧縮試験用と割裂試験用にした。従って多くの供試体は部材幅が大きい柱から得られており、部材幅の小さい梁からは 1 本のみとなった。表 4 に引張強度一覧を示す。引張強度は $0.59 \sim 2.03\text{N/mm}^2$ に分布し、その平均値は 1.24N/mm^2 となった。圧縮強度の 1/13 程度である。図 5 に引張強度と圧縮強度との関係を示す。図中には、引張強度と圧縮強度の関係式として日本建築学会の文献 10) に示される式 (3)、土木示方書 11) に示される式 (4) を挿入している。両式による推定値は概ね実験値の上限値となっていることが分かる。

$$\text{日本建築学会} \quad \sigma_{st} = 0.33 \times \sqrt{\sigma_B} \quad (3)$$

$$\text{土木示方書} \quad \sigma_{st} = 0.23 \times \sigma_B^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

ここで、 σ_{st} : 引張強度 (N/mm^2)

図 6 に全供試体の引張強度について建築、土木の両推定式との比較を示す。建築学会の式 (3) の精度が式 (4) に比べ幾分高くなってお

図5 引張強度と圧縮強度

図6 推定式の比較

り、実験値は最小二乗による推定値の 86% 程度になっている。

4.5 最大強度時ひずみ

表 5 に最大強度時ひずみ一覧を示す。得られた圧縮強度時ひずみは大きくばらつき $0.20 \sim 0.43\%$ に分布しており、全平均はほぼ 0.3% となった。梁のひずみは柱のひずみの 1.09 倍と若干大きく、圧縮強度が低いことと関係しているものと考えられる。

表 5 最大強度時ひずみ (×10⁻⁶)

部材	個数	平均	標準偏差	分散(×10 ³)
柱	24	2910	591	325
梁	10	3165	637	406
全部材	34	2985	593	352

図 7 圧縮強度時ひずみと圧縮強度

図 7 に圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係を示す。図中に推定式として、Popovics 式¹²⁾、村上式¹³⁾を示している。村上式中のヤング係数は RC 規準式(2)を用いて求め、その際に単位体積重量は 23kN/m³を用いている。

$$\text{Popovics 式} \quad \varepsilon_m = 767 \sqrt[4]{\sigma_B} \quad (5)$$

$$\text{村上式} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_B \times 10^3}{E_c (1 - 1/n)} \quad (6a)$$

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

ここで、 ε_m ：圧縮強度時ひずみ (×10⁻⁶)

圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係は Popovics 式や他の提案式^{14), 15)}にも示されるように圧縮強度の上昇に従って圧縮強度時ひずみも上昇するがと考えられているが、本建物のコンクリートは圧縮強度が増加するに従って低下する傾向がある。この傾向は文献⁵⁾に示す既存建物のコンクリートでも見られる。このことから既存建物から得た古いコンクリートと打設後間もないコンクリートに相違があると推定される。村上式はこの傾向をとらえているものの、実験値はこの式を上回るものとなっている。もともと村上式は Popovics による応力度ひずみ関係式における実験定数 n を圧縮強度、ヤング係数、圧縮強度時ひずみを用いて式(7)のように表現している。

$$n = \frac{1}{1 - \sigma_B / (E_c \times \varepsilon_m)} \quad (7)$$

この式を用いて本実験における実験定数 n と圧縮強度の関係を表わしたものが図 8 となる。回帰分析による本実験の実験定数 n と圧縮強度の関係は村上式とは異なり式(8)のように表される。

$$n = \exp(0.0358 \sigma_B) \quad (8)$$

上記の式(8)と 1991 年 RC 規準による推定ヤング係数が実験値の 76%であることを考慮して修正した式(9)を用いて圧縮強度時ひずみの推定を行った。

図 8 実験定数 n と圧縮強度

図 9 圧縮強度時ひずみ推定値

$$E_c = 16 \times \left(\frac{\gamma}{23} \right)^{1.5} \times \left(\frac{\sigma_B}{20} \right)^{0.5} \quad (9)$$

図 9 に実験値との比較を示す。実験値は柱、梁とも最小二乗法による推定値の 1.08 倍となっているが 2500 μ から 4000 μ の大変形領域までほぼ推定可能であることを確認した。

4.6 応力度ひずみ関係

前項で示すように最大強度時ひずみが圧縮強度および単位体積重量によって推定できることから Popovics による応力度ひずみ関係の推定式(10)を用いて実験値との比較を行った。計測ひずみについては大変形領域まで計測できるコンプレッソメータによる値を用いた。

$$\sigma = \sigma_B \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \cdot \frac{n}{n - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_m)^n} \quad (10)$$

紙面の都合上、応力度ひずみ関係の比較は圧縮強度 20N/mm² 程度の普通強度から 10N/mm² 以下の低強度コンクリートのものまでを抽出して比較した。比較例を図 10 に示す。各図中に圧縮強度実験値 σ_B 、実験定数 n 、最大強度時ひずみ実験値 Obs. ε_m 、同計算値 Cal. ε_m を示す。いずれの強度においても圧縮強度に拘わらず最大強度まではほぼ一致していることが分かる。全体的な形状をみると比較的強度の高いものは最大強度時ひずみおよび最大強度以降で計算値が実験値を追跡し得ていない場合がある。これは圧縮強度が高くなるにつれて試験機剛性の影響を受けやすくなり、実験定数 n を定めた図 8 から分かるようにばらつき度合いが大きくなることに要因があるものと考えられる。一方、圧縮強度 15N/mm² 以下の応力度ひずみ関係においては大変形領域に至ると実験値が徐々に低下し始め、推定曲線から離れる傾向にあるものの微小変形領域から大変形に至るまでほぼ追跡し得ているといえる。最大耐力以降の耐力低下度合いが緩やかな傾向は実験室レベルで作成される低強度コンクリートとも一致している¹⁶⁾。

図 10 応力度ひずみ度関係の比較

4.7 圧縮強度分布

現在実施されている日本建築防災協会の耐震診断基準⁸⁾では現地調査として1つの建物の1階、1工区で3本のコンクリート採取が推奨され、その平均値から標準偏差の1/2を差し引いた値をもって推定される強度としている。この現状では建築面積がいくら大規模でも構造図面上に工区割りが無い場合、ある程度のばらつきの範囲内で圧縮試験コア本数は1階当たり3体でよいことになっている。しかし、本建物の場合、建設年から考えると現場練りが予想され、建物規模が大きくなることによって図面上1工期といえども安定したコンクリートが打設されていない可能性がある。そこで本建物平面内のコンクリート強度分布について検討した。図11に1階の強度分布状況を模式的に示す。図中には設計基準強度(17.6N/mm²)以上、耐震診断基準適用下限値(13.5N/mm²)以下、その中間と3水

図 11 圧縮強度分布

準に分けて示す。もともと本建物のコンクリート強度は大きくばらついていたが、その分布性状をみると低強度コンクリートが建物の南西妻面に集中していることが分かる。その他の面には設計基準強度以下のものが散見されるが13.5N/mm²以下の低強度コンクリートは存在しない。本建物の優先度調査(耐震診断を実施するための先行調査)では、たまたま南西妻面の1、2階壁から1本ずつコア採取している。その圧縮強度はそれぞれ11.5N/mm²、8.04 N/mm²という結果であったため、本建物の継続使用を断念した経緯がある。他の構面のコンクリートを採用したならば低強度コンクリートの判定とならずそのまま使用され続けた可能性が残る。以上のことから体育館などの比較的大規模な平面形状を有する建物や古い年代に竣工した建物のような場合には適宜、コンクリートコア調査対象数を増やすことが必要と考える。

4.8 中性化速度係数

コア採取後、中性化試験を行った。本建物の仕上げはモルタル、漆喰、リシン吹きつけ、打ち放しなどであった。中性化深さは建物内側平均値で26mm、建物外側で36mmとなった。最大中性化深さは内側で76mm、外側で86mmであり、場所によっては主筋位置まで中性化している。部分的に主筋が錆びて露出している箇所もみられた。中性化深さの推定は式(11)に示すように建物竣工後年数に依存するとされる。式(11)中のAは中性化速度係数であり本論文ではJASS5¹⁷⁾に示される式(12)を用いることとした。構造図面にある設計基準強度17.6N/mm²(180kg/cm²)と経過年数50年を使用して求めた中性化深さは18mmであり、本建物における中性化深さは推定値を大幅に上回っている。図12に中性化速度係数と圧縮強度の関係を示す。室内側、室外側で大きな差は見られない。また、図中に示す耐震診断で通常標準値として用いられる中性化速度係数は3.73であり、計測された中性化速度係数は式(12)を大幅に上回っていることがわかる。

$$C = A\sqrt{t} \quad (11)$$

$$A = 23.8 \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 0.13 \right) \quad (12)$$

ここで、C: 中性化深さ (mm)

A: 中性化速度係数(mm/√年)

t: 経年(50年)(年)

f: 標準養生4週強度 (N/mm²)

図 12 圧縮強度と中性化速度係数の関係

図 13 中性化深さ分布

4.9 中性化深さ分布

本建物の圧縮強度が大きくばらついていることもあり，建物平面内の中性化分布について検討した．図 13 に 1 階の中性化深さの分布を示す．この図からも明らかなように圧縮強度が低い南西面の室内側、室外側ともに中性化が著しいことが分かる．

4.10 コンクリートの成分分析

本建物の圧縮強度は $7.96\sim 30.8\text{N/mm}^2$ の間に大きくばらついており，その要因を調べるため，圧縮試験後の供試体を用いて成分分析を研究機関に依頼した．試料は圧縮強度の高いものから 2 個，低いものから 2 個選んだ．化学分析においては配合推定では使用されたセメントおよび骨材の化学分析値が不明なため，セメントの酸化カルシウム以外は(社)セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」に示された仮定値を使用している．セメントの酸化カルシウム量は「通産省工業技術院東京工業試験所調査結果」記載の昭和 39 年における酸化カルシウム量 64.6%を使用している．化学分析結果を表 6 に示す．各供試体に大きな相違はない．表 7 に配合推定結果を示す．圧縮強度 10N/mm^2 以下の No.1 と No.2 の水セメント比は 100%を超えており，低強度コンクリートの原因が貧配合であることが推定された．

表 6 化学分析

資料名	圧縮強度 (N/mm^2)	Ig.loss(%)		insol (%)	CaO
		600℃	1000℃		
No.1	7.96	2.5	3.8	85.3	5.6
No.2	9.24	2.5	3.8	85.2	5.6
No.3	23.04	2.5	3.7	82.3	7.0
No.4	30.08	2.5	3.6	83.0	6.9

表 7 配合推定

資料名	圧縮強度 (N/mm^2)	材料単位量(kg/m^3)			水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材	
No.1	7.96	172	195	1924	113
No.2	9.24	168	210	1898	125
No.3	23.04	227	177	1939	78
No.4	30.08	220	156	1942	71

5. まとめ

既存建物のコンクリートの物性について検討を行った．本分析の範囲で得られた知見を以下に示す．

- 1) 得られた圧縮強度は単位体積重量を用いた推定値より大幅に低い値を示した．
- 2) 得られたヤング係数は日本建築学会で推奨される推定式の約

76%程度の値であった．

- 3) 得られた引張強度は日本建築学会で推奨される推定式が概ね上限値であった．
- 4) 圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係は村上式がほぼ下限値となっていた．村上式に基づいて応力度ひずみ度関係を推定し，大変形領域まで近似していることを確認した．
- 5) 圧縮強度分布を調べた結果，低強度コンクリートは集中して発生していることが判明した．耐震診断時のコア採取位置および本数は今後の検討課題であることを指摘した．
- 6) 最大中性化深さは推定値を大きく上回り，中性加速度係数は JASS5 に示される式より大きくなった．中性化が進行している箇所は低強度コンクリートの位置と対応していた．
- 7) 成分分析の結果，低強度コンクリートの原因は貧配合にあることが推定された．

謝辞

本研究の実施にあたり平成 26 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号: 25289190 代表: 広島工業大学・荒木秀夫) および平成 25・26 年度中国建設弘済会の助成を受けた．本研究の資料収集にあたっては広島県呉市に協力いただいた．また実験実施にあたっては広島工業大学学生諸君の協力を得た．ここに記して謝意を表す．

参考文献

- [1] 榊田佳寛，友澤史紀，矢島善磨：実際の RC 造建築物におけるコンクリート品質，その 1 主として建物別圧縮強度について，日本建築学会論文報告集，No. 311, pp. 153-162, 1982. 1
- [2] 榊田佳寛，友澤史紀，矢島善磨：実際の RC 造建築物におけるコンクリート品質，その 2 主として部位別・階別の圧縮強度について，日本建築学会論文報告集，No. 317, pp. 155-163, 1982. 7
- [3] 山本泰稔，矢野武，秋山友昭：低強度 RC 造建築物の耐震性能に関する研究，その 2 採取コアコンクリートの性質，日本建築学会学術講演梗概集，構造 IV, pp. 711-712, 2008. 9, その 3 採取したコアコンクリートの性質，構造 IV, pp. 649-650, 2008. 9
- [4] 荒木秀夫，星川知毅：既存 RC 建物におけるコンクリートの力学的特性，日本建築学会技術報告集，第 40 号，pp. 919-924, 2012. 10
- [5] 荒木秀夫，星川知毅：長年月を経た SRC 建物のコンクリートの力学的性能，日本建築学会技術報告集，第 42 号，pp. 562-566, 2013. 6
- [6] 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一，1991
- [7] 建築研究振興協会：既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル 2003 年版，増補版 2007
- [8] 日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針 同解説，2001. 10
- [9] 長谷川寿夫，杉山雅：構造体コンクリートの乾燥と力学的性状に関する研究，その 1 強度が異なる場合の部材の養生環境による差，日本建築学会論文報告集，No. 295, pp. 11-18, 1980. 9
- [10] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- [11] (社)土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，1996
- [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] S. P. Shah, A. Fafitis and R. Arnold: Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete, ASCE, pp. 1695-1710, 1983. 7
- [15] 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
- [16] 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，2013. 7
- [17] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5，鉄筋コンクリート工事，2009

[2016 年 2 月 1 日原稿受理 2016 年 6 月 9 日採用決定]