

1963年に建設された建物から採取したコンクリートの力学的特性

瀬川 優斗*・荒木 秀夫**・坂本 英輔**

(平成28年10月28日受付)

Mechanical properties of Concrete from Existing Building Constructed in 1963

Yuto SEGAWA, Hideo ARAKI and Eisuke SAKAMOTO

(Received Oct.28, 2016)

Abstract

The properties of old concrete are important factors in the seismic evaluations of existing buildings. However, those properties are sometime different from design performance in the structural draft. It is investigated that those properties of concrete are affected by deteriorations over long time periods, uncertainty of construction and several other factors. 54 concrete specimens were manufactured from the concrete cylinders from school building planned for demolition. In this paper, the mechanical properties of old concrete are mainly discussed. By compressive tests using 26 concrete specimens the compressive strengths were widely distributed. The lowest strength 8.4 N/mm^2 was less than half of the specified strength of 17.6 N/mm^2 , although the average compressive strength of 17.1 N/mm^2 was almost the same as the specified strength. The tensile strengths by using 28 concrete specimens were distributed from 0.54 N/mm^2 to 1.95 N/mm^2 . The modulus of elasticity was approximately 0.925 times of the estimated values by using the present equations.

Key Words: Old concrete, Mechanical properties, Existing building, Compressive test, Splitting test

1. はじめに

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榊田等¹⁾、山本等²⁾によって示されている。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、実験室から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建物の様々な部位から得られたコンクリート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。これまで筆者等は集合住宅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、階数などは力学的特性にそれほど影響を与えないが、ヤング係数が推定式より低めとなるなど従来の研究成果と同じ結果が得られた。このような背景から、本研究は既存建物の耐震性評価の精度向上を目指して既存建物のコンクリートの物性を把握することを目的としている。本論文は竣工後53年の学校校舎のコンクリートの物性を調査したものである。文献⁴⁾の対象建物は耐震診断の現地調査で圧縮強度が 13.5 N/mm^2 以下のコンクリートが部分的に存

* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

** 広島工業大学工学部建築工学科

在していることが分かり、解体と判断されたものである。ところが解体時に各階の構造部材から採取したコンクリートの平均圧縮強度は設計基準強度を上回り、强度的には比較的健全であることが分かった。一般的に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、建物の実情を示す資料と考えると貴重なものである。本研究で対象とする建物は耐震診断の結果、耐震性が低く解体が決定した校舎であり、全階の構造部材からコンクリートを採取して圧縮試験、割裂試験を行った。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、抜き取ったコンクリートコアを用いて中性化試験を行い、圧縮強度との関連を調べた。

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 : 高等学校校舎
 竣工 : 1963年(解体2016年:53年経過)
 主構造 : RC造5階建て
 建築面積 : 506.78m²
 延床面積 : 2243m²
 スパン数 : X方向14スパン Y方向1スパン
 設計基準強度 : 17.6N/mm² (180kg/cm²)

検討対象建物は高等学校校舎であり、架構種別はRC造である。写真1に建物全景を示す。コアボーリングの様子を写真2に示す。コンクリートコアの直径は約100mmであり、全部材とも抜き切りを目標とした。柱からは図1(a)



写真1 対象建物



写真2 コアボーリング

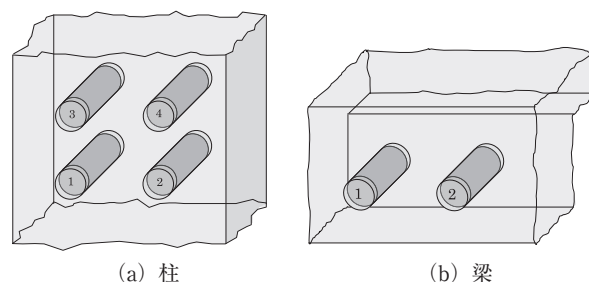


図1 抜き取り位置

に示すように、1本当たり4本抜き取ることとし、水平に隣り合う2本を圧縮用と割裂用に割り当てることとした。抜き取り対象柱は南側の2本とし、全て階の柱から計40本コアを採取した。柱断面は250mm×600mmおよび300mm×900mmの2種類で、いずれの柱も断面短辺方向にコアボーリングしている。大梁は図1(b)に示すように2本ずつ近接して抜き取り、それぞれ圧縮用と割裂用にしている。1階～3階の階段室の2箇所、4階は1箇所、計14本採取している。梁断面は300mm×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となるように成形している。柱から試験用に整形した供試体は40個(圧縮用19、割裂用21個)、梁から14個(圧縮用、割裂用それぞれ7個)、合計54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トンの圧縮試験機を用い、単調載荷している。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。ヤング係数の算定はJIS A 1149に基づいて算出している。中性化試験はJIS A 1152に準拠して行っている。

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⁵⁾(以下RC規準)では圧縮強度 $F_c < 36\text{N/mm}^2$ の範囲でコンクリートの単位体積重量は 23kN/m^3 を推奨して

表1 単位体積重量 (kN/m³)

部材	柱	梁	全体
個数	40	14	54
平均	22.11	22.27	22.15
最大値	23.05	23.23	23.23
最小値	21.56	21.61	21.56
標準偏差	0.01	0.02	0.38
分散	0.34	0.46	0.01

表2 圧縮強度 (N/mm²)

部材	柱	梁	全体
個数	19	7	26
平均	16.6	18.4	17.1
最大値	24.3	25.6	25.6
最小値	8.4	13.5	8.4
標準偏差	3.4	4.0	3.6
分散	11.3	13.7	12.6

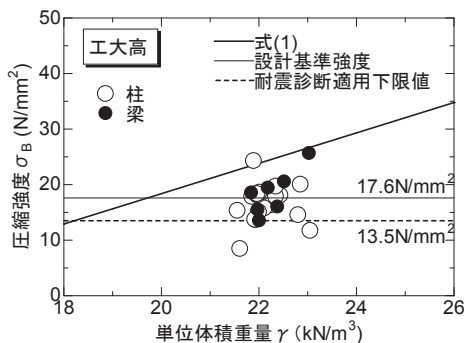


図2 単位体積重量

いるが、本建物から採取した供試体は最大値で23kN/m³を満足しているものの、平均で22.15kN/m³となった。柱梁それぞれの平均値をみるとばらつきも大きくなく、部材別で有意な差はないと判断される。

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8.4~25.6N/mm²の間に大きくばらついている。柱、梁の平均値はそれぞれ16.6N/mm²、18.4N/mm²となり有意な差とは言えない。両部材とも本建物の設計基準強度17.6N/mm²前後の値となり、全供試体の平均値は17.1N/mm²である。図2に圧縮強度と単位体積重量の関係を示す。多数の既存建物から採取したコンクリートに関する研究をみると文献⁶⁾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22.15kN/m³を用いて圧縮強度を求めてみると24.3N/mm²となり、本建物の圧縮強度平均値17.1N/mm²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⁷⁾の適用下限値13.5N/mm²及び本建物の設計基準強度17.6N/mm²を示す。本建物のコンクリートはこの下限値を下回るものがいくつかあり、低強度コンクリートを有する建物と判断される。一方、設計基準強度以上のものも半数近くある。

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

表3 ヤング係数 (kN/mm²)

部材	柱	梁	全体
個数	19	7	26
平均	15.76	18.11	16.39
最大値	23.64	23.54	23.64
最小値	5.22	13.44	5.22
標準偏差	4.18	3.64	4.11
分散	16566	11343	16252

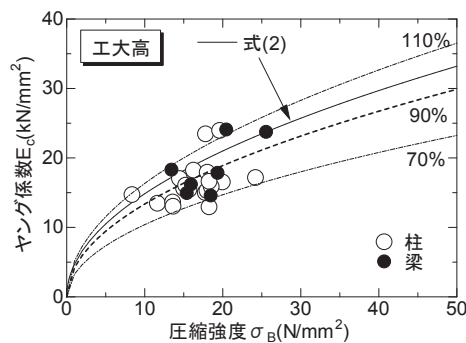


図3 ヤング係数

値等を示す。ヤング係数算出にあたりストレインゲージのひずみを用いて求めたものである。ただし、ストレインゲージの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コンプレッソメータによるひずみからヤング係数を求めた。ヤング係数は5.22~23.64kN/mm²の間にばらつき、平均値で16.39kN/mm²となった。部材別の平均値を比較すると、柱部材は15.76kN/mm²であるが、梁部材の平均値は18.11kN/mm²となっており、圧縮強度と同様に梁の方が若干、高くなっている。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⁵⁾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文献¹⁾に従って単位体積重量 γ として23kN/m³を用いている。

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

ここで、 E_c : ヤング係数 (kN/mm²)

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、実験値は推定値を下回るものも多く、既往の研究結果と同様となった¹⁾。また、同文献では実験値はRC規準式の90%±15%に分布しているとあるが、本建物の場合の中央値はほぼ90%とほぼ同じであるが、分布はやや広く±20%となっている。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²⁾や長期間による乾燥による影響⁸⁾などが挙げられている。特に文献⁸⁾では上の式(2)の早急な改善を指摘しているが、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

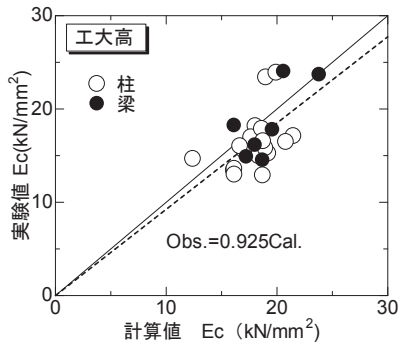


図4 ヤング係数比較

トのヤング係数は耐震診断時における形状指標(建物偏心)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、診断や改修設計において再評価されることが強く望まれる。RC規準の式(2)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。最小二乗法による1次回帰曲線を求めると実験値は推定値のほぼ92.5%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⁾で示される相違とほぼ同程度となっている。

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)に関する研究はあまり見られない。もともと耐震診断業務において要求されない事項であるためである。しかし、引張強度はせん断ひび割れ耐力やあと施工アンカーの引き抜き耐力に直接影響する値であり、既存建物にとって重要な構造指標である。特に前者は1971年以前に建設された既存建物におけるせん断補強筋の少ない部材では急激な耐力低下を引き起こすせん断破壊の引き金にもなりうるものである。文献⁴⁾では11供試体と少なかったが、本研究では25供試体を対象としている。また、圧縮強度との関係を明らかにするために同一部材から抜き取った2本のコンクリートを圧縮試験用と割裂試験用にした。表4に引張強度一覧を示す。引張強度は0.544~1.95N/mm²に分布し、その平均値は1.21N/mm²となった。圧縮強度の1/14程度である。図5に引張強度と圧縮強度との関係を示す。

$$\sigma_{st} = 0.33 \times \sqrt{\sigma_B} \quad (3)$$

$$\sigma_{st} = 0.23 \times \sigma_B^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

ここで、 σ_{st} : 引張強度 (N/mm²)

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⁹⁾に示される式(3)、土木示方書¹⁰⁾に示される式(4)を挿入している。式(3)による推定値は概ね実験値

表4 引張強度 (N/mm²)

部材	柱	梁	全体
個数	21	7	28
平均	1.16	1.31	1.21
最大値	1.92	1.95	1.95
最小値	0.544	0.972	0.544
標準偏差	0.299	0.362	0.315
分散	0.085	0.112	0.095

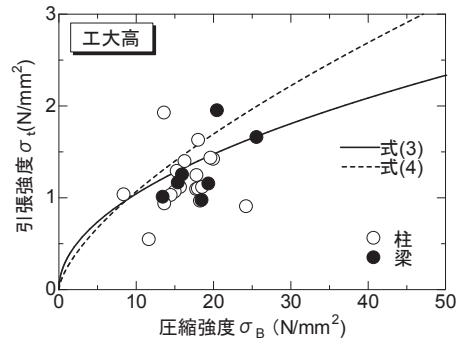


図5 引張強度

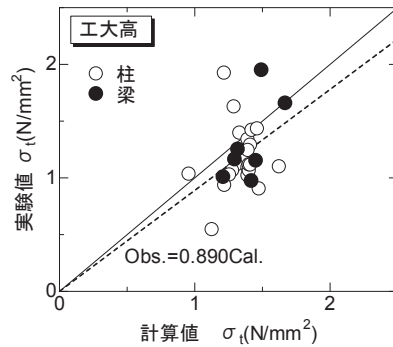


図6 計算値比較

中央値のやや上あたりに位置していることが分かる。図6に全供試体の引張強度について建築学会の式(3)との比較を示す。全体的にばらつきは大きいものの最小二乗法により実験値は推定値の89%程度になっていることが分かる。

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1043 μ ~3703 μ に分布しており、全平均は2166 μ となった。梁と柱のひずみに有意な差は見られない。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¹¹⁾、村上式¹²⁾を示している。

$$\text{Popovics 式} \quad \epsilon_m = 767 \sqrt{\sigma_B} \quad (5)$$

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

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

ここで、 ϵ_m : 圧縮強度時ひずみ ($\times 10^{-6}$)

表5 圧縮強度時ひずみ (μ)

部材	柱	梁	全体
個数	16	6	22
平均	2227	2362	2166
最大値	3703	3275	3703
最小値	1043	1430	1043
標準偏差	532	677	561
分散	265545	381693	300854

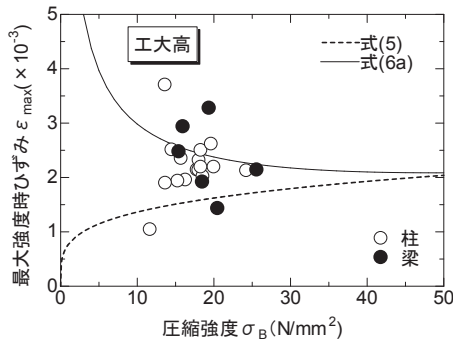


図7 圧縮強度時歪

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。圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係は図中に示すPopovics式や村上式以外の提案式にも示されるように圧縮強度の増加に伴って圧縮強度時ひずみも上昇する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。実験値は推定式を中心に分布している。村上式ではPopovicsによる応力度ひずみ度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。

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

式(7)を用いて求めた実験定数nと圧縮強度の関係を図8に示す。回帰分析による本実験定数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。

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

式(8)による実験定数nと図4に示すように実験値がRC規準式(2)による推定ヤング係数の92.5%であることを考慮して、式(2)を修正した式(9)によるヤング係数を式(6a)に代入して圧縮強度時ひずみの推定を行った。

$$E_c = 18670 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \left(\frac{\sigma_B}{20}\right)^{0.5} \quad (9)$$

図9に実験で得られた圧縮強度時ひずみとの比較を示す。

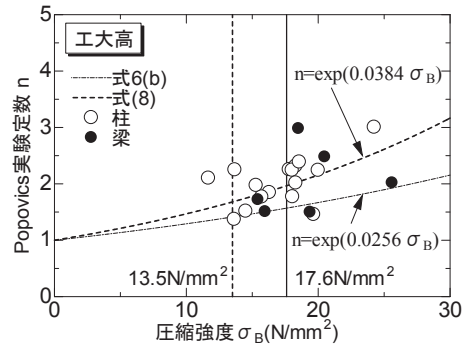


図8 実験定数n

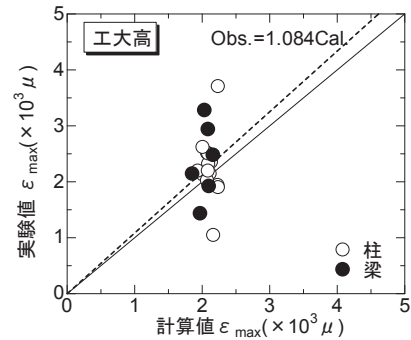


図9 最大強度時ひずみ比較

実験値は最小二乗法による推定値の1.08倍となっているが実験値は2500μから4000μの大変形領域まで分布しているのに対し、推定値はほぼ2000μ前後の値となっており、式(8)もしくは式(6a)は改善の余地があると考えられる。

4.6 応力度ひずみ度関係

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。

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

紙面の都合上、応力度ひずみ度関係の比較は圧縮強度20N/mm²以上の普通強度から10N/mm²以下の低強度コンクリートのものまでを12試験体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最大強度まではほぼ推測可能である。しかし、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。圧縮強度のもっとも高い試験体1FBE-1を除くと最大値以降の応力ひずみ関係は推定値を下回る場合が多い。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ることと、実験定数 n の推定に原因があると思われる。コンクリートの応力ひずみ関係における最大耐力以降の挙動は RC 部材の靱性能と関係しており、既存建物の評価指標 F 値に影響を与えるものである。一方、圧縮強度 20N/mm^2 以上の応力度ひずみ度関係においては大変形領域に至ると推定値が徐々に低下し、実験値から離れる。これは村上式自体が高強度コンクリート用に開発されたものであるためと考えられる。全体的にみると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¹³⁾。

4.7 階数による強度分布

図 11 に階数別の圧縮強度分布を示す。現行の耐震診断では 1 階当たり 3 本程度のコアコンクリート採取が推奨されているが本実験では 5 本の結果を用いている。図中に設計基準強度 17.6N/mm^2 および耐震診断適用下限値 13.5N/mm^2 を挿入している。平均強度は 1, 2 階で設計基準強度を満たしているが、3~5 階は設計基準強度以下となっている。また 1 階, 3 階, 5 階で耐震診断下限値 13.5N/mm^2 を下回るコンクリートがある。特に 1 階では 9N/mm^2 を下回るコンクリートも見られる。この箇所はコアボーリング自体が難しい箇所でもあり、単に低強度コンクリートというより、豆板等による劣悪なコンクリート

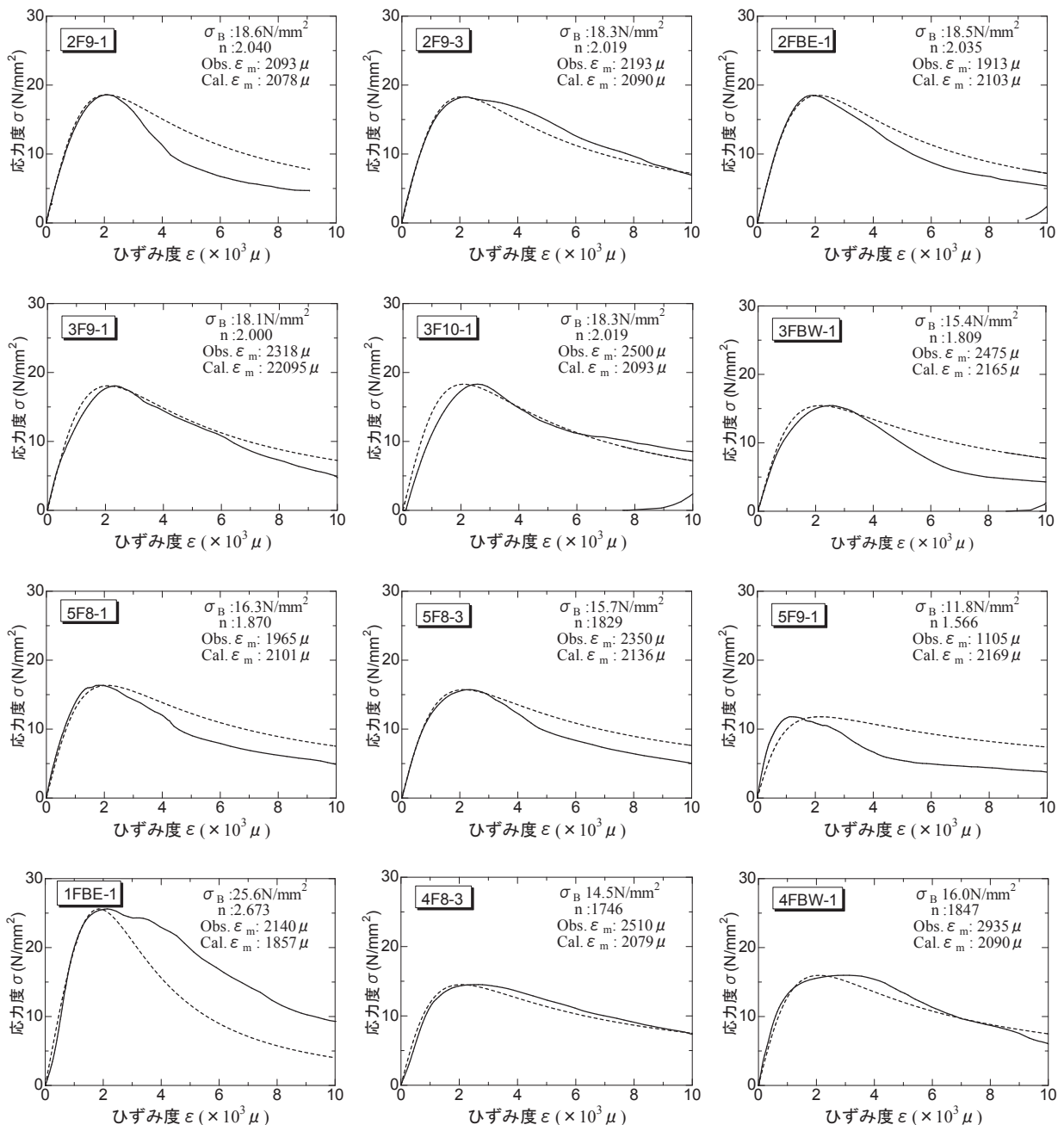


図10 応力度ひずみ度関係

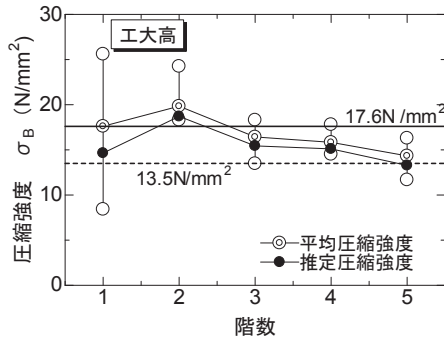


図11 圧縮強度分布

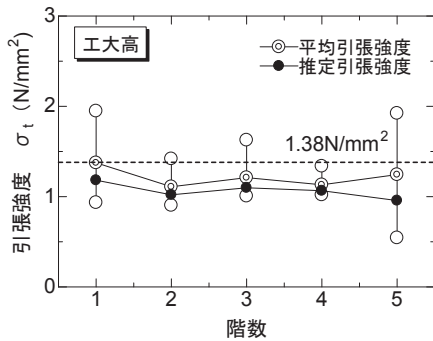


図12 引張強度分布

に分類されるものであった。図中に示す推定強度は耐震診断を行う際に使用される値で平均値から標準偏差の半分の値を差し引いたものである。5階で耐震診断下限値 13.5N/mm^2 を下回り、本建物は低強度コンクリート建物に分類される。

図12に圧縮強度と同様に階数別の引張強度を示す。図中に式(3)に設計基準強度を適用して推定した引張強度 1.38N/mm^2 を示す。すべての階において平均引張強度、推定引張強度は推定値を下回っている。ばらつきも階数によって大きく異なっていることから、改修後の耐震安全性確保のためには改修時においてあと施工アンカー耐力の現地確認試験の実施が望まれる。

4.8 中性化

本建物のコア採取後にJISA1152に基づき、割裂後のコンクリートコアで中性化試験を行った。写真3にその一例を示す。各部材の仕上げはモルタル塗りが多用されていたが、梁の室内側では仕上げ無しの打ち放しもみられた。中性化深さは最大で室外 37.3mm 、室内 49.3mm であった。部分的にはあるが中性化は鉄筋位置まで進行していると考えられる。なお室内側最大値は大梁の打ち放し箇所まで天井裏部分のものである。中性化深さの推定は建物竣工後年数に依存するとされ、本論文では推定値との比較はJASS5¹⁴⁾に示される式(11)を用いて中性化速度係数として評価した。設計基準強度として構造図面にある 17.6N/

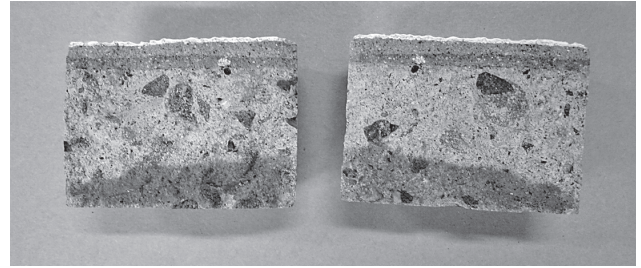


写真3 割裂後の中性化試験(3F柱外側)

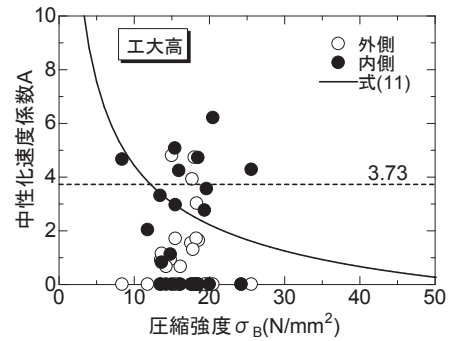


図13 中性化速度係数

mm^2 (180kg/cm^2) を使用して求めた中性化深さは 18.8mm であり、本建物における中性化深さは部分的に推定値を大幅に上回っている箇所がある。柱は室外側、大梁では室内側で中性化が進行している。図13に中性化速度係数と圧縮強度の関係を示す。また、図中にJASS5に示される中性化速度係数と圧縮強度の関係式(12)を示す。

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

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

ここで、 C ：中性化深さ (mm)

A ：中性化速度係数 ($\text{mm}\sqrt{\text{年}}$)

t ：経年 (年)

f ：標準養生4週強度 (N/mm^2)

本実験の結果はコンクリートの圧縮強度が大きくなると中性化速度係数が低下するという明確な傾向は見られない。図中に通常耐震診断で用いられる中性化速度係数 3.73 を示すが、計測された中性化速度係数はこの値を大幅に上回っている箇所がある。現在、耐震診断では建物全体の圧縮強度用コアを用いた中性化深さの平均値によって経年指標 T を求めているが、本建物のように部分的に中性化が進んでいる場合は建物全体の平均値が適切な評価とならないことが分かる。図14に柱から得たコアコンクリートの外側の中性化分布を示す。1階あたり8本のデータのものである。仕上げ厚さはモルタル仕上げで $10\text{mm}\sim 40\text{mm}$ で

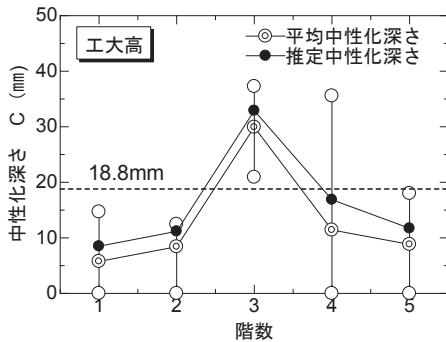


図14 中性化深さ分布 (柱外側)

ある。3階の中性化深さは他の階に比べ突出して高い値となっている。3階の仕上げ厚さが他の階とほぼ同じことから中性化はコンクリートの圧縮強度や仕上げ厚さに拘わらず進行する場合があることがわかる。

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) 単位体積重量は建築学会の推奨値より低い値であった。
- 2) 圧縮強度は単位体積重量を用いた推定値より低い値を示した。
- 3) ヤング係数は圧縮強度と単位体積重量を用いた推定式の約92.5%程度の値であった。
- 4) 引張強度は圧縮強度を用いた推定式の約89%程度の値であった。ただし、ばらつきは大きい。
- 5) 圧縮強度時ひずみと圧縮強度の関係は村上式がほぼ中央値となっていた。村上式に基づいて応力度ひずみ度関係を推定した。
- 6) 圧縮強度分布を調べた結果、5階が低強度コンクリートと判定されたが、他の階にも部分的に低強度コンクリート部分が見られた。
- 7) 最大中性化深さは推定値を大きく上回り、仕上げ厚さに拘わらず中性化は部分的に進行している箇所が見られた。

以上のように既往の提案式では古いコンクリートの力学的特性を評価できない場合もあり、今後更なる資料の蓄積が必要である。また、耐震診断時の現地調査方法も今後の検討課題であることを指摘した。

謝 辞

本研究の実施にあたり平成28年度科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号:16H04458 代表:広島工業大学・荒木秀夫)の助成を受けた。資料収集にあたっては広島工業大学に協力いただいた。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, 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
- 2) 山本泰稔, 矢野武, 秋山友昭: 低強度RC造建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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 10) (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
- 11) S., Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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