

# 論文 低強度コンクリート既存建物におけるコンクリートの力学的性質

根口 百世\*1・南 宏一\*2

**要旨：**圧縮強度 13.5N/mm<sup>2</sup>未満の低強度コンクリート既存建物の耐震診断および耐震改修を行うにあたり、既存建物から採取したコンクリートコアを用いた圧縮試験を行うが、圧縮強度のみを用いてコンクリートの特性を知ることは困難である。本論では、既存建物から採取したコンクリートコアについて、ヤング係数、応力度-ひずみ度関係をはじめとする種々の項目について比較検討し、実験用に製造された低強度コンクリートによる既往のデータとの相違点を示した。

**キーワード：**低強度コンクリート、既存建物、圧縮強度、ヤング係数、標準偏差、変動係数

## 1. はじめに

コンクリート圧縮強度が 13.5N/mm<sup>2</sup>未満のいわゆる低強度コンクリートを用いた RC 柱部材の実験研究が積極的に推進され、発表の機会が増えるにつれて、「実験用に製造された低強度コンクリートは、既存建物の低強度コンクリートとは異なった性質を持っているのではないか。」ということを指摘されるようになってきた。<sup>1)</sup> また、このような問題が指摘される一方で、耐震補強の際には、既存躯体のコンクリートの調査が圧縮強度以外に調べられることなく、低強度コンクリート部材の既往の実験結果を適用してしまうことがあることに対し、筆者らは危機感を強めている。

本論は、既存建物から採取したコンクリートコアを用いた圧縮試験を行い、既存建物の低強度コンクリートと実験用に製造された低強度コンクリートとの相違、および、低強度コンクリート建物の耐震補強を検討する際の詳細調査の必要性について述べるものである。

## 2. 既存建物から採取されたコンクリートコア

本研究で用いたコンクリートコアのデータは、耐震診断および耐震改修を行う際に、その対象建物から採取されたコンクリートコアを用いている。各期、各階につき、最低 3 本のコンクリートコアを採取後、材料試験場等で圧縮試験 [この段階では強度のみの試験] を行われており、この試験を本論では『既往の試験』と称している。既往の試験によって低強度コンクリートが含まれていることが判明した建物については、再度コンクリートコアを採取し、応力度-ひずみ度関係、割線ヤング係数などを含めた詳細な材料試験を行った。筆者らはこの詳細な試験を実施し、本論では『再試験』と称し、各項目の分布を調べた。なお、既往の試験の時期は、建物ごとに異なっており、再試験のおよそ 1 か月前から 2 年前に行われている。

## 2.1 試験個数

これまでに再試験として圧縮試験の行われたコンクリートコアの個数を、**図-1** に示す。既存建物から採取したコンクリートコアの総数は、253 個である。

## 2.2 建設年

**図-2** に建物の建設年の分布を示す。一部、建設年が不明な物が含まれるため、他の項目よりも個数が少ないが、再試験が必要とされた建物の建設年の分布に偏りは無いといえる。

## 2.3 コンクリートコアの寸法および単位体積質量

再試験におけるコンクリートコアは、採取後、両端を平滑にするために、研磨あるいは歯科用石膏によるキャッピングの処理を行った。試験時の寸法は直径 100mm、高さ 200mm の円筒形コアを標準試験体としたが、建物の状況によっては、200mm を下回る高さのものも含まれる。**図-3** に示されるコンクリートコアの単位体積質量の分布からは、再試験となったコンクリートコアの単位体積質量に偏りが無いことが認められる。なお、単位体積質量は、キャッピングを含めた質量から求めた。

## 2.4 粗骨材の寸法

**図-4** に 25mm を超える粗骨材の寸法の分布を示す。粗骨材の大きさは、採取されたコンクリートコアの表面に見える骨材または圧縮試験後にコンクリートが破壊された際に露見した骨材の大きさを測定し、その最大値を示したものである。全てのコンクリートコアを破碎して調べたものではないため、実際には同図に示される値よりも大きい寸法の骨材が含まれる可能性があるといえる。柱や梁から採取されたコンクリートコアであるにも関わらず、実施工では**写真-1** の黄線で囲まれた部分のように大きな寸法の骨材が使用されているものがみられ、最大で 90mm の骨材も含まれていた。

\*1 高知工業高等学校 教諭 博士 (工学) (正会員)

\*2 福山大学 名誉教授 工博 (名誉会員)

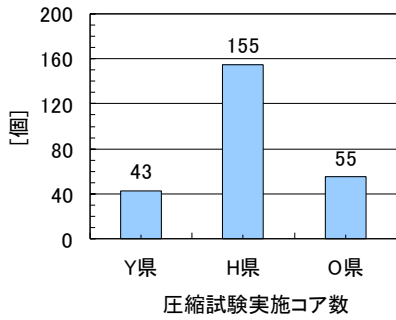


図-1 圧縮試験実施数

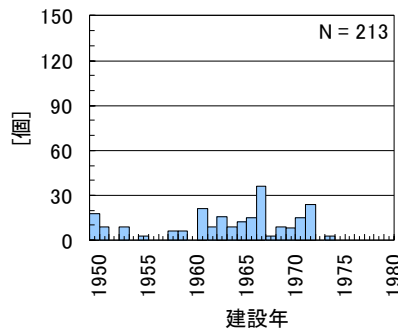


図-2 建設年の分布

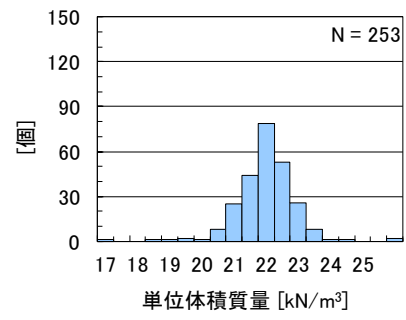


図-3 単位体積質量の分布

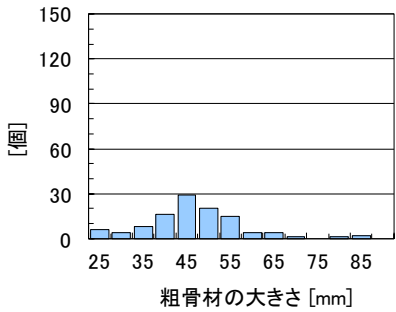


図-4 25mm以上の粗骨材の分布

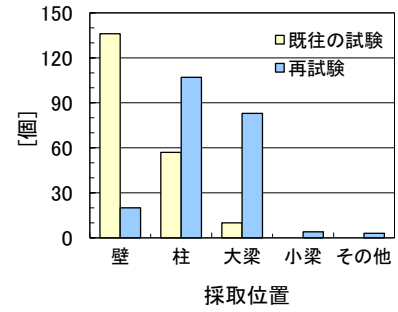


図-5 採取位置の分布

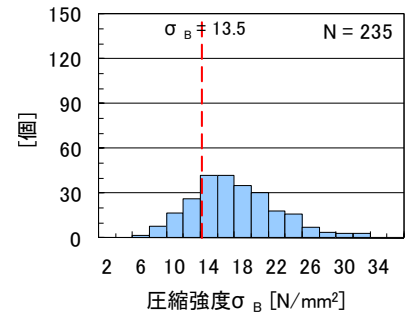


図-6 再試験コンクリートコアの圧縮強度の分布

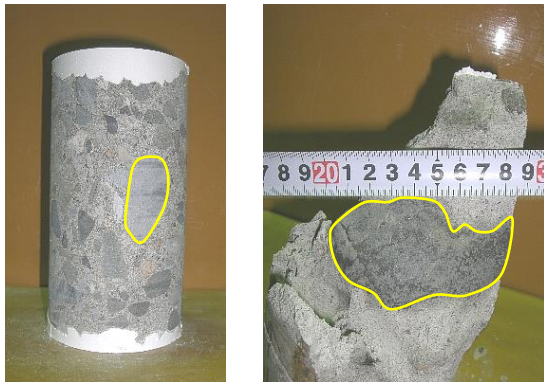


写真-1 コンクリートコアに含まれる粗骨材

## 2.5 採取位置

図-5に既往の試験および再試験時に採取されたコンクリートコアの採取位置の分布をそれぞれ示す。既往の試験時のコンクリートコアは、2/3が壁、1/3が柱から採取されたものであるのに対し、再試験時には、柱および梁の主要構造部から採取されたものがほとんどである。再試験時には、コンプレッソメータをつけてひずみ度を測定するために、できる限り高さ200mmに近いものを採取するよう要求した。そのため、壁からの採取では高さが不足することから、柱あるいは大梁から採取されたものが多く、既往の試験と再試験のコンクリートコアの採取位置が大きく異なる結果となった。

## 3. 圧縮強度と各値の関係

図-6は、再試験された既存建物のコンクリートコ

アの圧縮強度の分布を示したものである。再試験の結果、低強度コンクリートと判断される場合は少ないことが示される。コンクリートコアの個々の圧縮強度と建設年との関係を示す図-7からは、低強度コンクリートが特定の年代の偏った傾向はみられない。また、単位体積質量との関係を示す図-8からは、低強度コンクリートであるからといって、単位体積質量が小さいということは認められない。

図-9は、横軸に既往の試験による圧縮強度を、縦軸に再試験による圧縮強度を示したもので、いずれの強度も、各建物における同一工期および階のコンクリートコアの平均値から標準偏差の1/2を差引いた値〔耐震診断等で用いられる採用強度〕を示している。再試験の結果、普通強度コンクリートであると判断される場合は、全体の60%であった。また、再試験による圧縮強度の80%が既往の試験結果を上回っており、再試験の結果、低強度コンクリートと判断された場合であっても、既往の試験結果よりも高い強度を示している場合が多い。この違いは主要構造部からの採取可否によると推察される。

## 4. 既存建物から採取されたコンクリートと

### 実験用に製造されたコンクリートの比較

#### 4.1 実験用に製造されたコンクリート

既存建物から採取されたコンクリートは、前述された再試験の際に採取されたコンクリートコアに基づくものであるが、その比較対象として、実験用に製造さ

れたコンクリートについて、ここでは述べる。

低強度コンクリート建物は、設計当初から低強度コンクリート建物として設計されているのではなく、普通強度コンクリート建物として設計されたにも関わらず、種々の要素が複合的に働き、低強度コンクリートになっているものと考えている。筆者らは、低強度コンクリート部材の実験<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>などを行う際に、必要な低強度コンクリートを安定的に大量に製造でき、かつ、所要強度のコントロールを容易に行えるようにという観点に基づいて低強度コンクリートの製造に関する基礎実験を行った。

本論で用いる実験用に製造されたコンクリートは、低強度コンクリートは、後述の式(1)および式(2)を用いて製造したものである。この2つの式は、低強度コンクリートは、所定のものより水の量が多く、かつ、セメントそのものの性能が粗悪であったことが組合わされた状態になっていることを想定している。すなわち、単位水量を大きくし、現在一般的に用いられている普通ポルトランドセメントに石粉〔炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$ 〕を混ぜて人工的にセメントの性能を劣化させて基礎実験を行い、式(1)の調合設計式を得た。式(1)は、石粉〔 $\text{CaCO}_3$ 〕を結合材とし、水結合材比を65%、単位水量  $210 \text{ kg/m}^3$  に固定して調合を決定した。

$$F_c = 17.919 \cdot C/W - 2.6371 \quad (1)$$

ここに、 $F_c$  : コンクリート圧縮強度  $[\text{N/mm}^2]$

$C$  : 単位セメント量  $[\text{kg/m}^3]$

$W$  : 単位水量  $[\text{kg/m}^3]$

さらに、その後のデータの蓄積により、式(1)を見直し修正した式(2)を用いた。式(2)による場合も、水結合材比を65%、単位水量  $210 \text{ kg/m}^3$  に固定して調合を決定した。

$$F_c = 16.342 \cdot C/W - 3.3919 \quad (2)$$

低強度コンクリートは、式(1)または式(2)を用いて部材実験の目的に応じて強度を設定し調合され、延べ25回にわたって製造されたコンクリートシリンダー〔直径  $100\text{mm}$ 、高さ  $200\text{mm}$ 〕は、現場封緘養生され、材齢7日から504日までのものを実験しているが、材齢7日、28日、56日のデータが全体の9割以上を占める。

調合表の一例を表-1に示す。

表-1 調合表の例

$F_c$ $[\text{N/mm}^2]$	5	10
水 $[\text{kg/m}^3]$	210	210
細骨材率 [%]	49.9	50.2
水結合材比 [%]	65.0	65.0
水セメント比 [%]	221.0	122.0

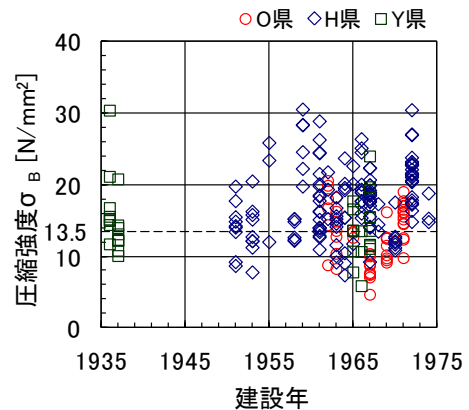


図-7 圧縮強度と建設年の関係

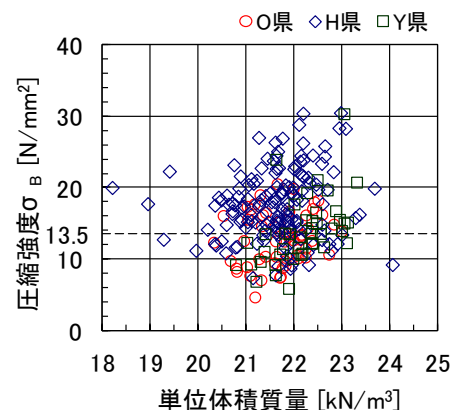


図-8 圧縮強度と単位体積質量の関係

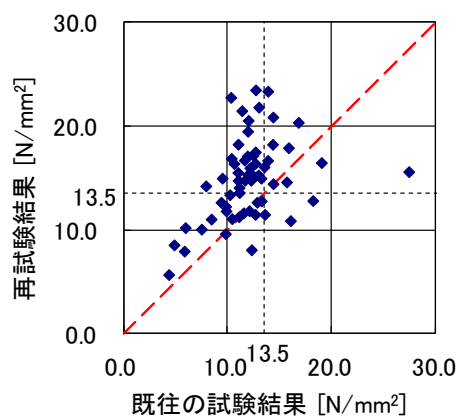


図-9 既往の実験結果と再試験結果の関係

#### 4.2 応力度-ひずみ度関係

既存建物から採取されたコンクリートコアは、ひずみ度の測定を行うために、コンプレッソメータ〔以下、C.M.とする〕、検長  $30\text{mm}$  の Wire Strain Gauge〔以下、 $30\text{mm W.S.G.}$ とする〕、検長  $60\text{mm}$  の Wire Strain Gauge〔以下、 $60\text{mm W.S.G.}$ とする〕の3種類によるひずみ度の測定を同時に行った。実験室で製造されたコンクリートについては、C.M.および  $30\text{mm W.S.G.}$  のデータに比して  $60\text{mm W.S.G.}$  のデータが少ないため、項目によっては割愛している。圧縮試験は、万能試験機（試験

力容量 5000kN) を用いて試験を行った。

図-10 に C.M.でひずみ度を測定したデータを用いた応力度-ひずみ度関係を示す。実線は再試験時の応力度-ひずみ度関係を、破線は実験用に製造された低強度コンクリートの応力度-ひずみ度関係を示している。既存建物から採取されたコンクリートのほとんどは、最大強度以降もひずみ度は増加し、良好な応力度-ひずみ度関係が得られる場合が多く、実験用に製造された低強度コンクリートの応力度-ひずみ度関係と同様の傾向にある。同図(a)のように、実験用に製造されたコンクリートとほぼ同様の性質を示すものもあるが、全体的に最大強度以後の強度低下は、実験用に製造された低強度コンクリートよりも若干大きい傾向がみられ、同図(b)のように、最大強度以後の強度低下がかなり大きい場合もある。

低強度コンクリート部材の既往の実験研究を用いて耐震補強をする際には、実験用に製造されたコンクリートと既存建物から採取したコンクリートコアの強度だけを比較するのではなく、変形能力の把握も重要である。同程度の圧縮強度を示す場合でも、変形性状の違いがみられる場合があることから、特に低強度コンクリートに対しては、応力度-ひずみ度関係を最大強度以後の強度低下の状態を含めた詳細調査を行うことが必要である。このことから、ひずみ度の測定には、W.S.Gよりも大きなひずみ度まで測定できる C.M.を用いることが望ましいといえる。

### 4.3 ヤング係数

図-11 の上側のグラフは、実験用に製造されたコンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  とヤング係数  $E$  の関係について、各ひずみ度の測定方法別にまとめたものである。ひずみ度の測定方法は、C.M.および 30mm W.S.G.について示している。

ヤング係数は、最大圧縮応力度の 1/3 程度の圧縮応力度  $\sigma_1$  に対応するひずみ度  $\varepsilon_1$  と、 $50\mu$  のひずみ度  $\varepsilon_2$  に対応する圧縮応力度  $\sigma_2$  を用いた割線剛性を次式によって求める。

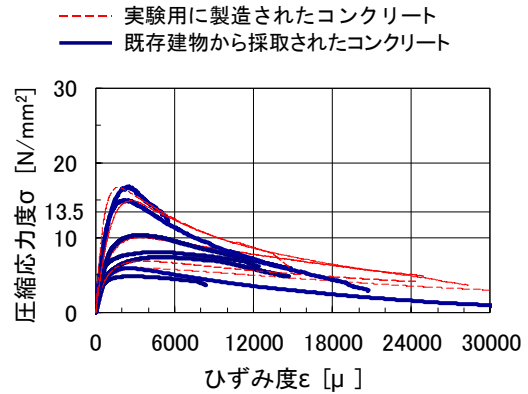
$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (3)$$

図中で示された破線および一点鎖線は、RC 規準に示されたヤング係数の推定式を低強度コンクリートの範囲まで外挿したもので、式(4)および式(5)によるものである。

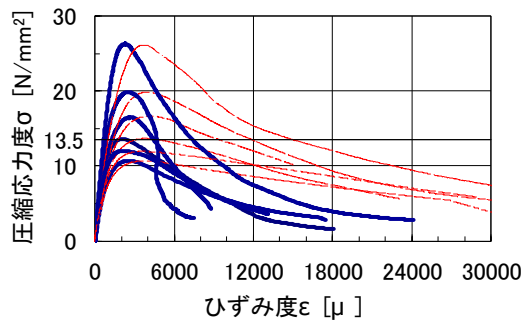
$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \sqrt[3]{\frac{\sigma_B}{60}} \quad (4)$$

$$E = 2.1 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \sqrt[3]{\frac{\sigma_B}{20}} \quad (5)$$

式(4)および式(5)において、



(a) 対応が良い場合



(b) 対応があまり良くない場合

図-10 応力度-ひずみ度関係の比較

$\sigma_B$  : 圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma$  : コンクリートの気乾単位体積重量,  
23kN/m<sup>3</sup>

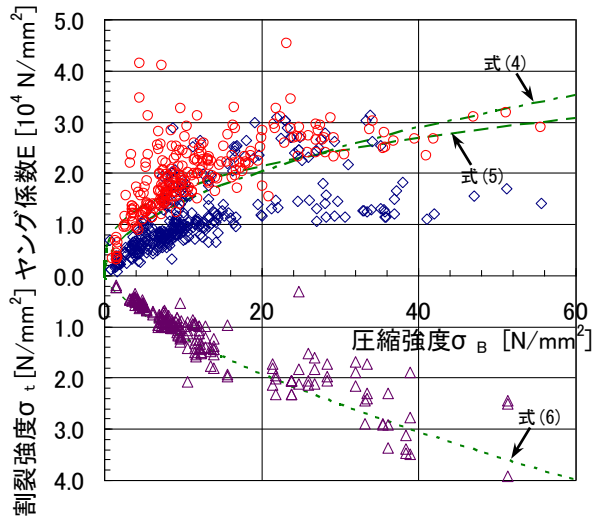
実験用に製造されたコンクリートのヤング係数は、ひずみ度の測定方法によりヤング係数の値に特徴が現われ、例えば、C.M.によって測定されたひずみ度から求めたヤング係数は、式(3)の値の 1/2 から 1/3 程度と相当小さくなっているものが多いが、30mm W.S.G.で測定されたひずみ度から求めたヤング係数は、C.M.による値よりも大きく、RC 規準推定式の値に近いものであるといえる。

また、図-11 の下側のグラフは、実験用に製造されたコンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  と割裂強度  $\sigma_t$  の関係を示したもので、図中の破線は式(6)で表される野口・友澤式<sup>4)</sup>による割裂強度を示したものである。

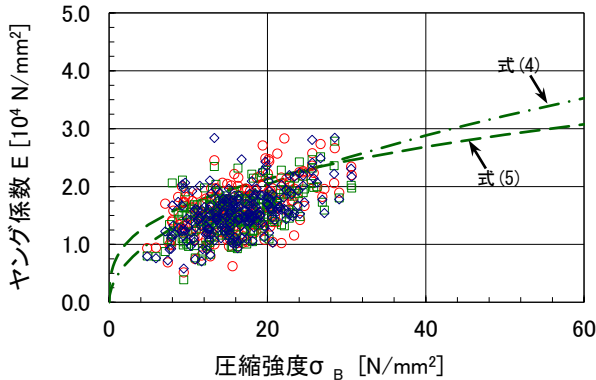
$$\sigma_t = 4 \times \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^2} \quad (6)$$

低強度コンクリートの割裂強度は、高強度コンクリートと同様に式(6)との対応が良く、式(6)によって低強度コンクリートの範囲まで評価できるといえる。

図-12 は、既存建物から採取されたコンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  とヤング係数  $E$  の関係について、各ひずみ度の測定方法別にまとめたものである。



◇ : C.M., ○ : 30mmW.S.G., △ : 割裂強度  
 図-11 圧縮強度－ヤング係数，割裂強度の関係



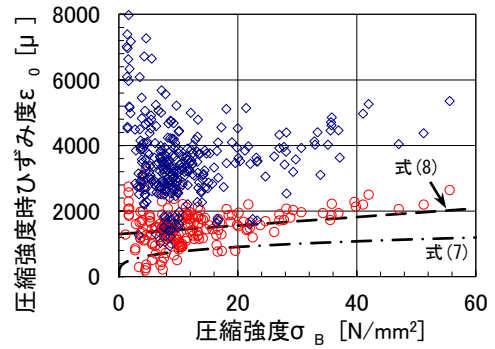
◇ : C.M., ○ : 30mmW.S.G., □ : 60mmW.S.G.

図-12 既存建物の圧縮強度とヤング係数の関係

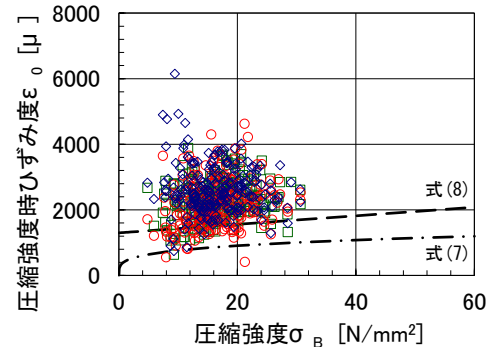
既存建物から採取されたコンクリートのヤング係数は、ひずみ度の測定方法のいかに関わらず、RC 規準に示されるヤング係数推定式による値よりも小さい傾向がみられる。既存建物から採取されたコンクリートと実験用に製造されたコンクリートを比較すると、既存建物のコンクリートのヤング係数は、C.M.でひずみ度を測定した場合は若干大きめに、W.S.G.でひずみ度を測定した場合は、W.S.G.の検長に関わらず小さめの値となり、実験用に製造されたコンクリートのC.M.で測定された値に近い値となっているが、これがどのような要因によるものかは不明である。しかしながら、既存建物のヤング係数を式(4)または式(5)によって推定すると、相当数が過大評価になっていることから、耐震補強を検討する際には、圧縮強度以外にも応力度－ひずみ度関係を調査し、ヤング係数を直接求めることが必要であるといえる。

#### 4.4 圧縮強度時ひずみ度

図-13 は、圧縮強度  $\sigma_B$  と圧縮強度時ひずみ度  $\epsilon_0$



(a) 実験用に製造されたコンクリート



(b) 既存建物から採取されたコンクリート

◇ : C.M., ○ : 30mmW.S.G., □ : 60mmW.S.G.  
 図-13 圧縮強度と圧縮強度時ひずみ度の関係

の関係について、実験用に製造されたコンクリートおよび既存建物から採取されたコンクリートについてまとめたものである。ひずみ度の測定方法は、実験用に製造されたコンクリートは、C.M.および30mmW.S.G.であり、既存建物から採取されたコンクリートは、上記に加え60mmW.S.G.のデータも示している。既往の研究による圧縮強度時ひずみ度として、式(7)および式(8)で示される Popovics<sup>6)</sup> および六車<sup>7)</sup>の式より求め、図中の破線および一点鎖線で表している。

$$\epsilon_0 = 429\sqrt{f_c} \quad (7)$$

$$\epsilon_0 = 1299 + 1.3f_c \quad (8)$$

式(6)および式(7)において、

$\epsilon_0$  : 圧縮強度時ひずみ度 [ $\mu$ ]

$f_c$  : コンクリート強度 [ $\text{kg/cm}^2$ ]

実験用に製造されたコンクリートの圧縮強度時ひずみ度は、C.M.によって測定された場合は、W.S.G.によって測定された場合よりも大きい傾向にあるといえる。既存建物から採取されたコンクリートの圧縮強度時ひずみ度も同様の傾向がみられるが、実験用に製造されたコンクリートの方が、ひずみ度の測定方法に応じた違いが明確である。また、実験用に製造されたコンク



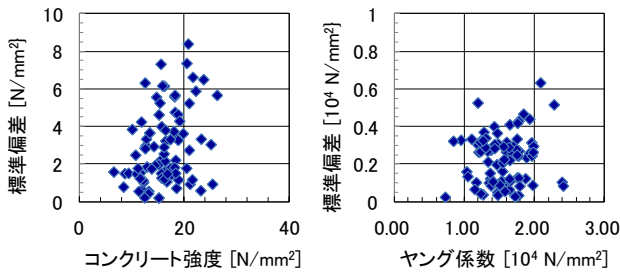


図-14 コンクリート強度およびヤング係数の標準偏差

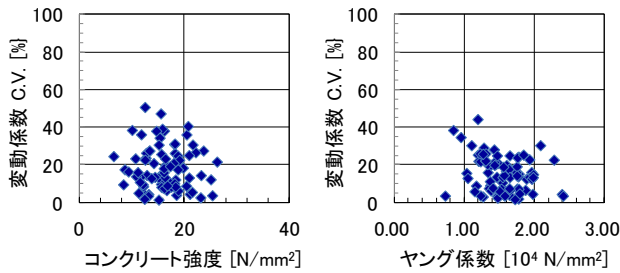


図-15 コンクリート強度およびヤング係数の変動係数

リートおよび既存建物のコンクリートのいずれの圧縮強度時ひずみ度においても、既往の研究による圧縮強度時ひずみ度の値よりも大きいことが指摘される。

#### 4.5 標準偏差および変動係数

図-14は、既存建物から採取されたコンクリートの圧縮強度およびヤング係数の値と標準偏差の関係を示したものである。ばらつきを求めるためには標準偏差が一般的で、耐震診断および耐震補強の際のコンクリート強度の棄却検定等で用いられている。しかしながら、例えば標準偏差が  $3\text{N/mm}^2$  の場合、 $30\text{N/mm}^2$  の普通強度のコンクリートに対するばらつきの割合と、 $5\text{N/mm}^2$  の低強度コンクリートに対するばらつきの割合は異なるといえる。同じ標準偏差の値であっても、低強度コンクリートであるほどばらつきは大きくなり、コンクリート強度の大小によって、標準偏差の  $1\text{N/mm}^2$  の持つ意味は異なる。

そこで、どの程度のばらつきであるのかを、コンクリート強度に関係なく表現する一つの指標として、変動係数を用いることを提案する。変動係数がある数値内に収まっていれば、コンクリート強度によらず、ばらつきが小さいと判断でき、その基準値については、更なる検討を要するが、一案として、図-15に示される既存建物から採取されたコンクリートの変動係数の平均的な値が約20%であることから、この数値内に収まっていれば、ばらつきは小さいと判断できると考える。

#### 5. まとめ

(1) コンクリートコアの採取位置は、コンクリート強度に少なからず影響を及ぼしていることが示され、主

要構造部からコンクリートコアを採取することは、構造躯体のコンクリート強度を適切に推定するために重要であることが改めて確認された。

(2) 実験用に製造された低強度コンクリートと既存建物から採取されたコンクリートコアの応力度-ひずみ度関係を比較すると、最大強度以後の強度低下が大きいコンクリートコアもある。低強度コンクリート建物の耐震補強を検討する際には、個別に応力度-ひずみ度関係を求め、最大強度以降の変形性能を調べた上で、既往の実験結果が使用できるかどうかの判断を行うことが必要といえる。

(3) 実験用に製造された低強度コンクリートおよび既存建物から採取されたコンクリートコアのヤング係数は、W.S.Gで測定した場合よりも、C.M.で測定した場合の方が小さい傾向がみられたが、その値は、式(4)および式(5)で示されるヤング係数の推定式に比して、小さい場合が多いといえる。耐震診断および耐震改修のために圧縮試験を行う場合には、強度のみを調べることがほとんどであるが、式(4)あるいは式(5)を用いてヤング係数を推定すると過大評価となり、危険側の設計につながる可能性があるため、ひずみ度を測定してヤング係数を求めることが望ましいといえる。

(4) 変動係数を用いることで、コンクリート強度のいかにかわからず、単一の基準値でばらつきを表現することができる。

#### 参考文献

- 1) ネットワーク委員会資料：耐震診断・補強設計審査業務の近況メモ，2010.7.20
- 2) 根口百世，高月行治，塚越英夫，南宏一：低強度コンクリート RC 柱の炭素繊維巻き付け補強による補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No.2，pp.1039-1044，2010.7
- 3) 根口百世，吉岡大介，高月行治，南宏一：5  $\text{N/mm}^2$  級の低強度コンクリートを用いた高圧縮力を受ける RC 柱の弾塑性性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31 巻，No.2，pp.151-156，2009.7
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.50-52，2010.2
- 5) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6
- 6) Popovics, S. : Cement and Concrete Research, Vol.3, No. 5, pp.583-599, 1973.9
- 7) 六車照，長井栄治：コンクリートの圧壊ひずみに関する研究，セメント技術年報，30 号，pp.362-365，1976