

既存構造物の構造体コンクリート強度調査法 「ソフトコアリング」の開発

篠崎 公彦 江口 清
中込 昭

要 旨

非破壊試験に近い損傷度の低さと、 $\phi 100\text{mm}$ コア試験の精度のよさを併せ持つ構造体コンクリート強度推定法として、 $\phi 18\sim 25\text{mm}$ 程度の小径コアを用いる方法を考案し、その有効性を確認し、実用化した。

小径コアによる調査法は、コアを採取するという直接的な試験のため、推定精度は反発硬度法より高い。また、従来の $\phi 100\text{mm}$ コアによる方法に比べて、コアの径が小さいために対象部材に与える損傷は微かであり、 $\phi 100\text{mm}$ コアでは不可能であった梁や柱等の主要構造部材のコンクリート強度を直接調査できる。小径コア強度は $\phi 100\text{mm}$ コア強度に比べると若干ばらつきは大きい、損傷が微かで採取箇所の制約を受けにくく、採取作業が容易なことからサンプル数を増やすことが可能で、その結果 $\phi 100\text{mm}$ コアと同等の推定精度が得られる。

キーワード 小径コア／ $\phi 100\text{mm}$ コア／構造体コンクリート強度／強度差／推定式／推定精度

目 次

- | | |
|------------------------|-------------------|
| 1. はじめに | 5. 実構造物による推定精度の検証 |
| 2. 標準試験体を用いた基礎実験 | 6. まとめ |
| 3. 構造体模擬試験体を用いた基礎実験 | 7. おわりに |
| 4. 強度推定式の設定および推定式の推定精度 | |

THE DEVELOPMENT OF SOFTCORING: THE METHOD TO ESTIMATE THE STRENGTH OF CONCRETE IN EXSISTING STRUCTURES

Kimihiko Shinozaki
Akira Nakagome

Kiyoshi Eguchi

Synopsis:

The method to assess the strength of concrete in exsisting structures by small size cores, which diameters are between 18 to 25mm, was developed and its effectiveness was confirmed.

This method, in which cores are drilled directly and tested, is more precise than non-destructive test: shumidt hammer test. Damage to structures by small size cores is smaller than that by 100x200mm cores. It is possible to assess directly the strength of concrete in structual element including beams and colums. Although the dispersion of the strength in small size cores is little larger than those in 100x200mm cores, small size cores are less destructive and easier to be dirilled out than 100x200mm cores. It is easy to increase the number of samples which make it possible to estimate strength of concrete as precice as 100x200mm cores.

1. はじめに

現在、コンクリート強度の推定法として、反発硬度法が広く採用されている。この方法の利点としては、非破壊で行えること、試験が容易で熟練を要しないこと等が挙げられるが、圧縮強度を推定する際に、使用材料、材齢等によるばらつきが大きく、推定精度は高いとは言えない¹⁾。一方、コンクリート強度を精度よく推定する必要がある場合には、 $\phi 100\text{mm}$ のコンクリートコアを採取して圧縮試験が行われるが、供用中の構造物から採取する場合、柱および梁などの構造上重要な部材からの採取が難しく、採取場所が壁、スラブ等に限定されることが多い。

筆者らは、非破壊試験に近い損傷度の低さと、 $\phi 100\text{mm}$ コア試験の精度のよさを併せ持つ構造体コンクリート強度の推定法として、 $\phi 18\sim 25\text{mm}$ 程度の小径コアを用いる方法を考案し、その有効性を確認し実用化した^{2)~5)}。小径コアによる方法は、コアの直径が小さいので、柱等の主要構造部材からも採取でき、コア試験という直接的な方法である為、精度は十分に実用レベルを満たしている。

本報では、まず、標準試験体を用いて小径コアの圧縮強度およびその試験誤差に及ぼす種々の要因の影響に関する基礎実験を行い、適切な供試体の作成手順および圧縮試験方法を明確にした。

次に、構造体コンクリートの模擬試験体を用いた基礎実験を行い、小径コア強度と構造体コンクリート強度($\phi 100\text{mm}$ コア強度)の強度差を定量化し、小径コア強度による構造体コンクリート強度の推定式を提案するとともに、その推定精度を検討した。

最後に、供用中の建物²⁾および実物大の部材⁴⁾における実証実験で基礎実験結果の再現性を検証し、本方法の有効性を確認した結果について報告するものである。

2. 標準試験体を用いた基礎実験

直径 100mm ×高さ 200mm の円柱試験体から採取した小径コアを用いて圧縮強度試験を行い、小径コア強度に影響を及ぼす要因を明らかにし、小径コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係を求めた。

2.1 実験概要

1) 因子と水準

表-1に因子と水準を示す。実験には、小径コア強度に影響を及ぼすと予想される、材料、調合、コア採取方法、供試体の成形方法および圧縮試験方法等に関する8因子を取り上げ、水セメント比およびコア採取位置を外側因子とした直交表 $L_{18}(2^1 \times 3^8)$ による繰返し数1の直積実験とし、分散分析により要因効果の検討を行った。

表-1 因子と水準

因子	水準
骨材種類	G1+S1+S2, G2+S1+S2, G3+S3
コアビット呼び径(mm)	$\phi 25$, $\phi 29$
ドリル回転数(rpm)	600, 1100, 1300
コア抜き取り速度(cm/min)	1.0, 1.5, 3.0
コアの高さhと直径dの比h/d	$h/d=1.5$, $h/d=2.0$
圧縮試験時載荷速度(mm/min)	0.65, 1.21, 1.71
コア採取位置	上面部, 底面部
水セメント比 W/C(%)	65, 75, 85, 95, 120

表-2 コンクリートの使用材料

材料区分	記号	種類・銘柄	品質・特徴
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3 比表面積 $3250\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S1	青梅産砕砂	比重 2.65, F.M. 3.25 吸水率 1.99%, 実績率 64.3%
	S2	香取郡産山砂	比重 2.59, F.M. 1.75 吸水率 2.89%, 実績率 61.2%
	S3	信濃川産川砂	比重 2.62, F.M. 2.25 吸水率 1.66%, 実績率 64.3%
粗骨材	G1	青梅産 硬質砂岩碎石	最大寸法 20mm , 比重 2.66, F.M. 6.74 吸水率 1.08%, 実績率 61.2%
	G2	奥多摩産 石灰石碎石	最大寸法 20mm , 比重 2.63, F.M. 6.83 吸水率 0.69%, 実績率 62.7%
	G3	信濃川産 川砂利	最大寸法 25mm , 比重 2.72, F.M. 7.28 吸水率 1.10%, 実績率 63.3%
混和剤	SP	高性能A/E減水剤	ポリカルボン酸系化合物

2) コンクリートの使用材料および調合

表-2にコンクリートの使用材料を示す。

セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、最大寸法 20mm の砕石に砕砂および山砂を組合せたものと、最大寸法 25mm の川砂利に川砂を組合せたものの3水準とした。水セメント比は、構造体コンクリート強度の範囲を $10\sim 30\text{N/mm}^2$ と想定し、 $65\sim 120\%$ の5水準とした。

3) コア供試体の作製および圧縮試験方法

コアの抜き取りは湿式で行った。所定の供試体寸法への切断はダイヤモンドカッターを用い、端面処理は硫黄キャッピングとした。圧縮試験時の載荷用球座は、 $40\times 40\text{mm}$ のモルタル供試体用の球座を用い、載荷速度は3水準とした。なお、圧縮試験は底面部は材齢12週で、上面部については材齢13週で実施した。

2.2 試験結果

図-1に小径コア強度と円柱試験体強度の関係を小径コア直径ごとに示す。小径コア強度は、全体的に円柱試験体強度より大きい傾向にあり、回帰直線の勾配はほぼ1となった。つまり、小径コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係は強度差で表すのが適切であるといえる。

また、小径コアと $\phi 100\text{mm}$ 円柱試験体の強度差につい

て分散分析した結果、コアビットの呼び径（コアの直径）、 h/d 、圧縮試験時の載荷方法は有意であったが、骨材種類、ドリル回転数、コア抜き取り速度および載荷速度については、水準間に有意差は認められなかった。

3. 構造体模擬試験体を用いた基礎実験

構造体コンクリートを模擬したブロック試験体から、小径コアおよび $\phi 100\text{mm}$ コアを採取して、小径コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の強度差を定量化した。それらの結果をもとに、小径コア強度による構造体コンクリート強度（ $\phi 100\text{mm}$ コア強度）の推定式を設定し、その推定精度を検討した。

3.1 実験概要

1) 因子と水準

表-3に、因子と水準を示す。標準試験体を用いた基礎実験結果より、小径コア強度に影響を及ぼす要因と判明したコアビットの呼び径（コアの直径）、 h/d 、圧縮試験時の載荷方法等を主要な因子とし、コアビット呼び径および水セメント比の範囲を拡張した。

2) コンクリートの使用材料および割合

コンクリートの使用材料は円柱供試体による基礎実験と同一のもの（表-2）を使用した。

水セメント比は、圧縮試験時の載荷方法が変位制御の試験体では65～120%、荷重制御の試験体では35～120%とした。これらの水セメント比の範囲における、 $\phi 100\text{mm}$ コアの強度は、変位制御の場合に $8.6\sim 35.6\text{N/mm}^2$ 、荷重制御の場合に $8.6\sim 67.2\text{N/mm}^2$ であった。

割合は目標スランプ値を18cm、目標空気量を4%として決定し、単位水量を $155\sim 225\text{kg/m}^3$ 、細骨材率を44～59%とした。なお、水セメント比が35～50%のものについては高性能AE減水剤を用いた。

3) 試験体

図-2に、試験体およびコア採取位置の一例を示す。構造体の模擬部材として、 $250\times 400\times 240\text{mm}$ のブロック試験体を、合計で56体作製した。試験体は、コンクリート打込み終了後直ちに濡れむしろおよびビニルシートで覆い、脱型することなく10週間湿潤養生を行った。

4) コア供試体の作製および圧縮試験方法

円柱供試体による基礎実験と同じ方法によった。ただし、ドリルの回転数は1100rpm、抜き取り速さは、 1.5cm/min とした。なお、圧縮試験は材齢15週以降に行った。

3.2 試験結果

1) 小径コア供試体の破壊形状

図-3に小径コアの破壊形状を示す。小径コアの破壊形

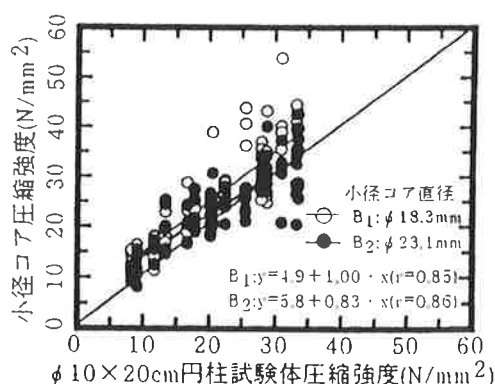


図-1 小径コア強度と円柱供試体強度の関係

表-3 因子と水準

因子	水準
骨材種類	G1+S1+S2, G2+S1+S2, G3+S3
コアビット呼び径(mm)	$\phi 25, \phi 29, \phi 32$
コアの高さ h と直径 d の比 h/d	$h/d=1.5, h/d=2.0$
圧縮試験時載荷方法	変位制御(1.71mm/min) 荷重制御($0.25\text{N/mm}^2/\text{s}$)
コア採取位置(高さ方向)	上部, 下部
コア採取位置(深さ方向)	表層部, 内部
水セメント比 $W/C(\%)$	35, 40, 50, 65, 75, 85, 95, 100, 110, 120

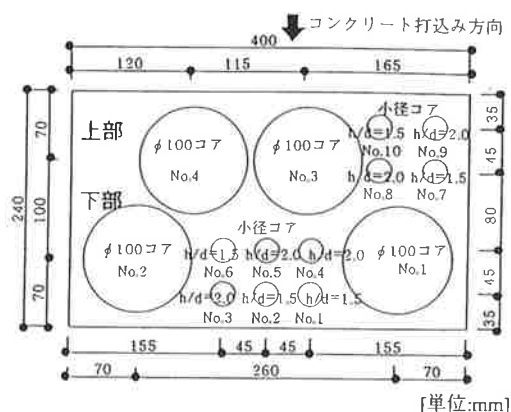


図-2 コア採取位置の例

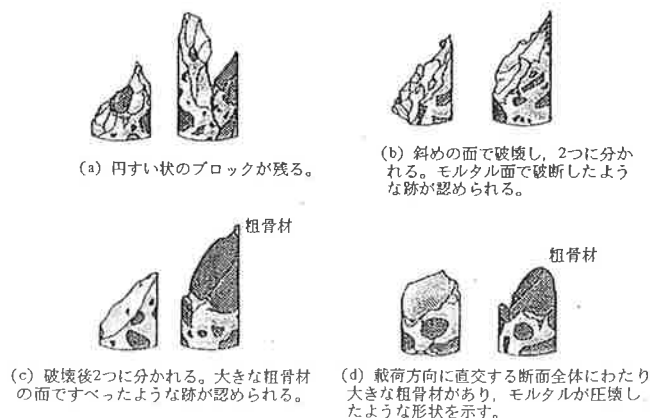


図-3 コアの破壊形状

状は、図に示す四つのタイプに分類できる。

大部分は、(a)および(b)の破壊形状を示した。(c)の破壊形

表-4 小径コア強度試験値の棄却データの割合

載荷方法	コア直径(mm)	骨材種類	試料数	棄却数	棄却割合(%)
変位制御	18.5	硬質砂岩碎石	221	0	0
	22.5	石灰岩碎石	172	0	0
		川砂利	167	0	0
荷重制御	18.5	硬質砂岩碎石	590	16	2.7
	22.5	石灰岩碎石	209	9	4.3
	25.3	川砂利	624	29	4.6
合 計			1983	54	2.7

況を示した供試体は、比較的小さな強度を示す傾向にあった。(d)の破壊形状を示した供試体は、比較的大きな強度を示した。

2) 小径コア強度試験値の棄却検定

上述したように、小径コア供試体は粗骨材位置の影響によって破壊形状が異なり、強度試験値が大きくなる場合、あるいは小さくなる場合がある。したがって、破壊形状が(c)あるいは(d)で、かつ強度試験値が他の試験値と大きく異なる場合、この試験値を棄却すれば、推定精度はより向上すると考えられる。しかし、破壊形状の観察だけで異常値の棄却を行うと恣意的になる恐れがある。そこで、同一条件での試料数が3個以上ある場合、最大値あるいは最小値について、同じ母集団からの試料であるかどうかを、正規分布からの大きさ n の標本における最大偏差と、その標本の標準偏差 s の比を用いて、危険率 10% で検定した。

表-4 に、小径コア強度試験値の棄却データの割合を示す。変位制御の場合、異常値として棄却したデータは皆無である。全データにおける異常値の出現割合は約 3% となり、比較的小さいことから、小径コアによる強度試験は十分実用的であるといえる。

3) 小径コア強度と 100mm コア強度の関係

異常値を棄却した後のデータについて、小径コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係を示す。

図-4 および図-5 に、小径コア強度 x と $\phi 100\text{mm}$ コア強度 X の関係の例を示す。また、図中に線形回帰式と寄与率 r^2 を示した。回帰式の寄与率 r^2 からわかるように、小径コア強度 x と $\phi 100\text{mm}$ 強度 X の相関は高い。回帰直線の勾配はほぼ 1 に近く、小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差 δ は一定となる傾向にある。

4. 強度推定式の設定および推定値の推定精度

4.1 強度差データの整理

小径コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の強度差が一定であることをふまえ、構造体模擬試験体を用いた基礎実験から得られた全データを用いて、小径コアと構造体コンクリート強度とみなした $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差の平均

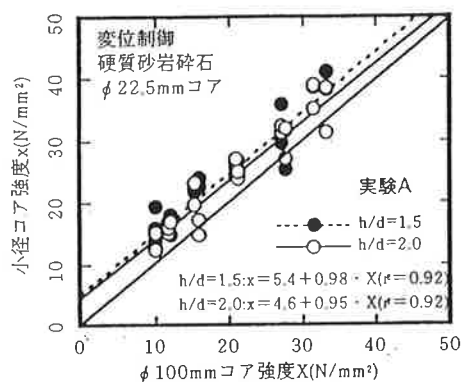


図-4 小径コア強度と $\phi 100$ コア強度の関係

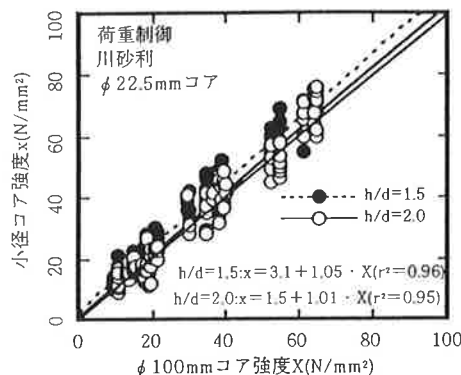


図-5 小径コア強度と $\phi 100$ コア強度の関係

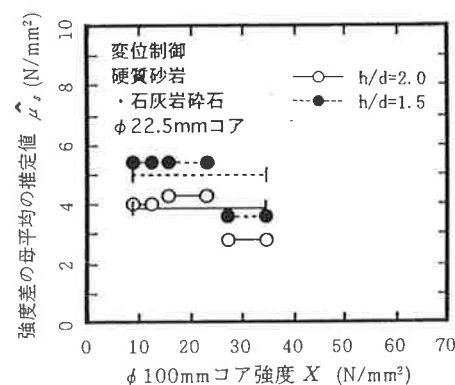


図-6 強度差の母平均の推定値と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係 (変位制御)

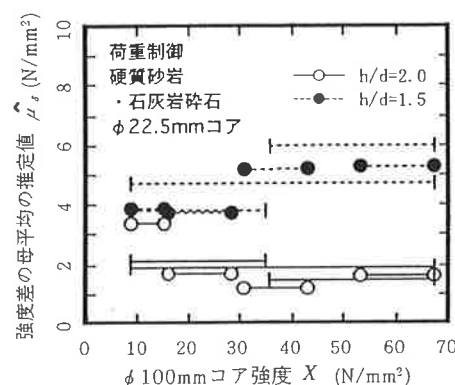


図-7 強度差の母平均の推定値と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係 (荷重制御)

値とばらつきを定量化し、小径コア強度による構造体コンクリート強度の推定式を設定した。

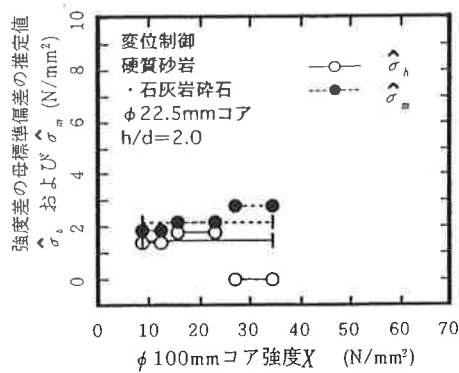


図-8 強度差の母標準偏差の推定値とφ100mm コア強度の関係 (変位制御)

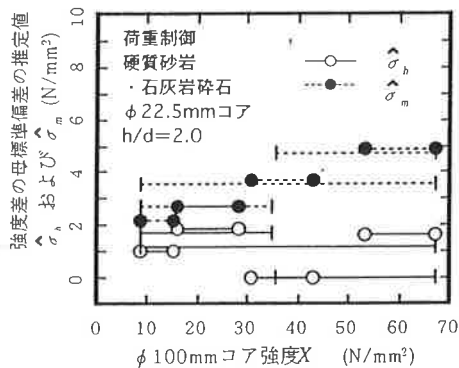


図-9 強度差の母標準偏差の推定値とφ100mm コア強度の関係 (荷重制御)

4.2 強度差と100mm コア強度の関係

図-6 および図-7 に強度差の母平均の推定値とφ100mm コア強度の関係の一例を示す。図中の実線および破線の横軸方向の長さは、φ100mm コア強度の範囲を示し、縦軸の値は、その範囲のφ100mm コア強度に対応する強度差の平均値を示してある。強度範囲の狭い変位制御の場合 (図-6) では明瞭ではないが、強度範囲の広い荷重制御の場合 (図-7) からわかるように、 $h/d=1.5$ の小径コア供試体による強度差の母平均値はφ100mm コア強度が大きくなるにしたがって増加する傾向にある。

また、図-8 および図-9 に強度差の母標準偏差の推定値 (σ_h) および試験誤差の母標準偏差の推定値 (σ_m) とφ100mm コア強度の関係の一例を示す。図からもわかるように、試験誤差の母標準偏差の推定値 (σ_m) は、載荷方法に関わらず、φ100mm コア強度が大きくなるに従って増加する傾向にある。

したがって、荷重制御の場合は、対象とする構造体コンクリート強度の範囲を 35N/mm^2 程度で2つに分け、それぞれ推定式を定めた方が推定精度は向上する。

以上の結果より、小径コアとφ100mm コアの強度差は、コア直径、 h/d 、載荷方法および強度範囲 (荷重制御のみ) に影響されるといえる。また、強度差は h/d の関数で表される²⁾ため、それ以外の要因別に強度差の推定値を求め、 h/d を変数とする推定式を設定すれば、推定精度は向上すると考えられる。

表-5 小径コアとφ100mm コアの強度差の母平均の推定値

小径コア直径 (mm)	変位制御		荷重制御			
			$X \leq 35\text{N/mm}^2$		$X < 70\text{N/mm}^2$	
	$h/d=2.0$	$h/d=1.5$	$h/d=2.0$	$h/d=1.5$	$h/d=2.0$	$h/d=1.5$
18.5	4.5 (166)	5.6 (111)	2.3 (186)	4.3 (179)	2.0 (294)	4.5 (277)
22.5	3.7 (165)	4.8 (118)	1.9 (187)	3.9 (182)	1.9 (295)	4.6 (288)
25.3	/	/	0.7 (92)	3.4 (98)	0.9 (129)	3.9 (140)

* ()内の数字はサンプル数を表す

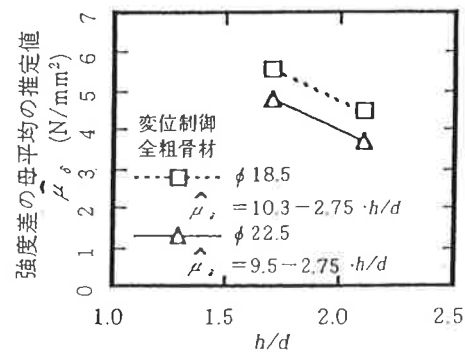


図-10 強度差の母平均の推定値と h/d の関係 (変位制御)

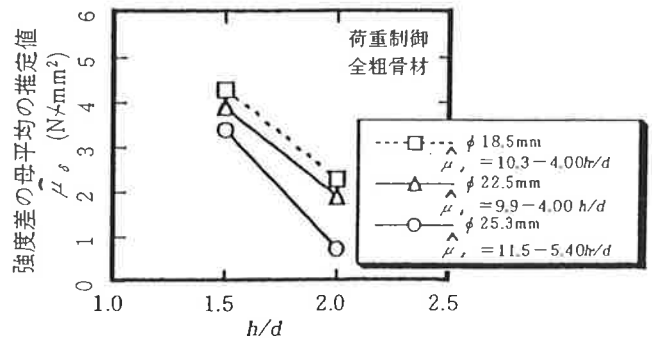


図-11 強度差の母平均の推定値と h/d の関係 (荷重制御: $X \leq 35\text{N/mm}^2$)

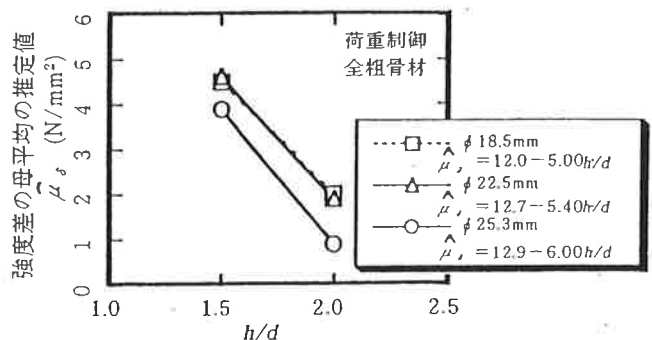


図-12 強度差の母平均の推定値と h/d の関係 (荷重制御: $X < 70\text{N/mm}^2$)

4.3 構造体コンクリート強度推定式の設定

表-5 に小径コアとφ100mm コアの強度差の母平均の推定値を示す。また、図-10～12 に強度差の母平均の推定値と h/d の関係を示す。これらのデータより、小径コア強度による構造体コンクリート強度 (φ100mm コア強度) の推定式を求めると以下の通りである。なお、変位制御のφ25.3mm コアの推定式は、φ25.3mm コアの強度

差をφ18.5mm コアおよびφ22.5mm コアの強度差から外挿して求めることにより設定した。

(変位制御)

$$[\phi 18.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (10.3 - 2.75h/d) \quad [1]$$

$$[\phi 22.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (9.5 - 2.75h/d) \quad [2]$$

$$[\phi 25.3 \text{ mm コア}] \quad X = x - (8.7 - 2.75h/d) \quad [3]$$

(荷重制御: $X \leq 35 \text{ N/mm}^2$)

$$[\phi 18.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (10.3 - 4.00h/d) \quad [4]$$

$$[\phi 22.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (9.9 - 4.00h/d) \quad [5]$$

$$[\phi 25.3 \text{ mm コア}] \quad X = x - (11.5 - 5.40h/d) \quad [6]$$

(荷重制御: $35 \text{ N/mm}^2 < X < 70 \text{ N/mm}^2$)

$$[\phi 18.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (12.0 - 5.00h/d) \quad [7]$$

$$[\phi 22.5 \text{ mm コア}] \quad X = x - (12.7 - 5.40h/d) \quad [8]$$

$$[\phi 25.3 \text{ mm コア}] \quad X = x - (12.9 - 6.00h/d) \quad [9]$$

ここに X : 構造体コンクリート強度の推定値(N/mm^2)

x : 小径コア強度(N/mm^2)

h/d : 小径コア供試体の高さ h と直径 d の比

4.4 推定式の推定精度の検討

小径コアによる構造体コンクリート強度の推定精度は下式で表される。

$$V[\hat{X}] = \frac{\sigma_e^2}{k} + \frac{\sigma_h^2}{k} + \frac{\sigma_m^2}{kl} \quad [10]$$

ここに、

$V[\hat{X}]$: 推定式による総平均値の分散 ($(\text{N/mm}^2)^2$)

σ_e^2 : 構造体コンクリート強度の母分散 ($(\text{N/mm}^2)^2$)

σ_h^2 : 強度差の母分散 ($(\text{N/mm}^2)^2$)

σ_m^2 : 小径コアの試験誤差の母分散 ($(\text{N/mm}^2)^2$)

k : コアの採取箇所数

l : 1 採取箇所での試料数

表-6 に構造体模擬試験体を用いた基礎実験で得られた強度差の平均値および分散成分の推定値を示す。 σ_h および σ_m については表中の値によって推定できる。しかし、 σ_e は未知であり、推定式の推定精度を評価する為に

は、 σ_e の値を仮定する必要がある。

そこで、まず、構造体コンクリート強度が均一 ($\sigma_e = 0$) とした場合、すなわち、小径コアの強度試験値が有するばらつきのみによる推定精度を検討する。次に構造体コンクリートのばらつきが既知とした場合の推定精度を検討し、これらの結果から、小径コアを実構造体に適用する場合の推定精度と所要の試料数の関係を明らかにする。

1) 小径コアの強度試験値のばらつきによる検討

構造体コンクリート強度が均一 ($\sigma_e = 0$) と仮定した場合、信頼率 $(1 - \alpha)$ の母平均の信頼区間 $\pm \beta_{kl}$ は次式で近似される。

$$\beta_{kl} = t(\phi^*, \alpha) \sqrt{V'_s} \quad [11]$$

ここに、 $t(\phi^*, \alpha)$: 自由度 ϕ^* の t 分布における両側 α 点

図-13 および図-14 に信頼区間 β_{kl} とコア採取箇所数の関係の一例を示す。信頼区間 β_{kl} は、採取箇所数 k が大きくなるほど小さくなり、ある値に漸近していく。図-14 の信頼率 80% の場合でみると、信頼限界 β_{kl} は採取箇所数 $k=4$ までは大きく変化するが、 k が 5 あるいは 6 以上になると変化の割合が小さくなる。このことから、ある領域の強度を推定する場合、小径コアの採取箇所数は 6~12 程度とするのが採取箇所数と精度のバランスがよい。

2) 構造体コンクリート強度の母分散を仮定した場合

構造体コンクリート強度が既知と仮定した場合、信頼率 $(1 - \alpha)$ の母平均の信頼区間 $\pm \beta_{kl}$ は次式で近似される。

$$\beta_{kl} = K(\alpha) \sqrt{\frac{\sigma_e^2}{k} + \frac{\sigma_h^2}{k} + \frac{\sigma_m^2}{kl}} \quad [12]$$

ここに、 $K(\alpha)$: 正規分布における両側 α 点

式からわかるように構造体コンクリート強度の分散 σ_e^2 が大きくなれば、小径コア強度の試験値の分散 σ_h^2 および σ_m^2 が全体の分散に及ぼす影響は小さくなる。つ

表-6 強度差の平均値および分散成分の推定値 (全粗骨材, $h/d=2.0$)

荷重方法	コア直径 (mm)	φ100mm コアの強度範囲 (N/mm^2)	小径コア試料数 N	強度差の平均値 (N/mm^2)	不偏分散				母分散の推定値 ($(\text{N/mm}^2)^2$)		母標準偏差の推定値 (N/mm^2)		
					V_H (N/mm^2)	自由度 ϕ_H	V_H (N/mm^2)	自由度 ϕ_H	$\hat{\sigma}_h^2$	$\hat{\sigma}_m^2$	$\hat{\sigma}_h$	$\hat{\sigma}_m$	$\hat{\sigma}_s$
変位制御	18.5	8.6~35.6	166	4.5	19.48	53	7.36	112	3.95	7.36	2.0	2.7	3.4
	22.5	8.6~35.6	165	3.7	16.44	56	4.97	108	3.97	4.97	2.0	2.2	3.0
荷重制御	18.5	8.6~35.6	186	2.3	21.53	53	6.47	132	4.38	6.47	2.1	2.5	3.3
		8.6~67.2	294	2.0	25.43	79	12.43	214	3.54	12.43	1.9	3.5	4.0
	22.5	8.6~35.6	187	1.9	23.28	54	6.37	132	4.99	6.37	2.2	2.5	3.4
		8.6~67.2	295	1.9	26.24	79	12.56	215	3.77	12.56	1.9	3.5	4.0
	25.3	8.6~35.6	92	0.7	13.35	28	3.68	63	3.07	3.68	1.8	1.9	2.6
		8.6~67.2	129	0.9	13.43	40	5.01	88	2.68	5.01	1.6	2.2	2.8

凡例) V_H : φ100mm コアの近傍より採取した小径コア強度の平均値と、対応するφ100mm コア強度の強度差の、各パラメーターごとの平均値 ϕ_H : 各パラメーターごとのφ100mm コアの試料数から1を減じたもの、 V_H : φ100mm コアの近傍より採取した小径コア強度の分散、 ϕ_H : 100mm コアの近傍より採取した小径コアの試料数から1を減じたもの、 $\hat{\sigma}_h$: φ100mm コアの近傍より採取した小径コア強度の平均値と、対応するφ100mm コア強度の強度差の母標準偏差の推定値、 $\hat{\sigma}_m$: φ100mm コアの近傍より採取した小径コア強度の母標準偏差の推定値、 $\hat{\sigma}_s$: $\hat{\sigma}_h^2 + \hat{\sigma}_m^2$ の平方根、小径コアとしての全体的な試験誤差を意味する

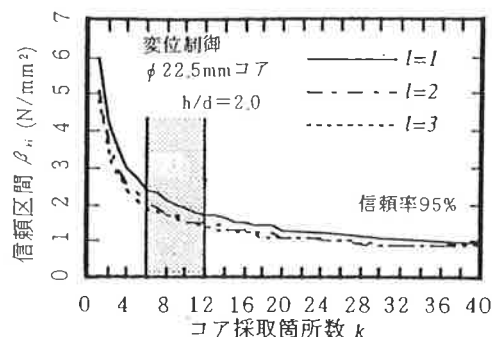


図-13 信頼区間と採取箇所数の関係(信頼率 95%)

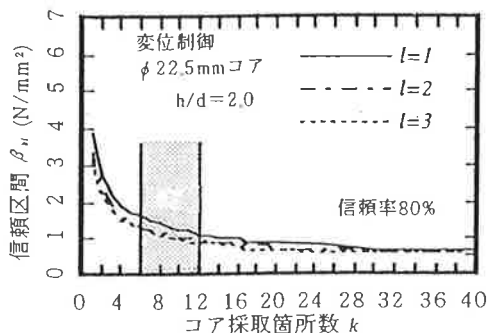


図-14 信頼区間と採取箇所数の関係(信頼率 80%)

まり、推定式の推定精度は、実構造物の構造体コンクリート強度のばらつきの大きさによって異なる。実構造物の構造体コンクリート強度の母標準偏差 σ_e は 4N/mm^2 程度はありうると考えられる。ここで、 σ_e を 4N/mm^2 および 6N/mm^2 と仮定して、式 [12] から計算した信頼区間とコア採取箇所数の関係を図-15 および図-16 に示す。

ところで、実際の建物において、 $\phi 100\text{mm}$ コアで構造体コンクリート強度を推定する場合、一般に 1 フロアあたり 3 本あるいは 500m^2 あたり 1 本程度の試料が採取される。そこで、 $\phi 100\text{mm}$ コアの採取箇所数 (k) = 3 の時の精度に対して、小径コアによる推定精度を比較する。採取箇所数 6 箇所 ($k=6$) から各 1 本 ($l=1$) 採取した小径コアによる構造体コンクリート強度の推定精度は、 $\sigma_e=4\text{N/mm}^2$ 程度では、3 箇所 ($k=3$) から各 1 本 ($l=1$) 採取した $\phi 100\text{mm}$ コアの推定精度と同程度と考えてよい。また、構造体コンクリート強度の母標準偏差 σ_e が 4N/mm^2 より大きくなると、小径コアの精度は、 $\phi 100\text{mm}$ コアより高くなる。

5. 実構造物による推定精度の検証

5.1 実構造物の構造体コンクリート強度の推定

小径コアによる構造体コンクリート強度の推定式の実用性を、実構造物で検証した 12 の実証例のうち代表的な 2 件について述べる。

1) 建物 A

建物 A は、建設後約 30 年経過した鉄骨造平屋建ての工場であり、地中梁 ($350 \times 600\text{mm}$) から $\phi 18.5\text{mm}$ 、 $\phi 22.5\text{mm}$ コアおよび $\phi 100\text{mm}$ コアを採取した。採取位置

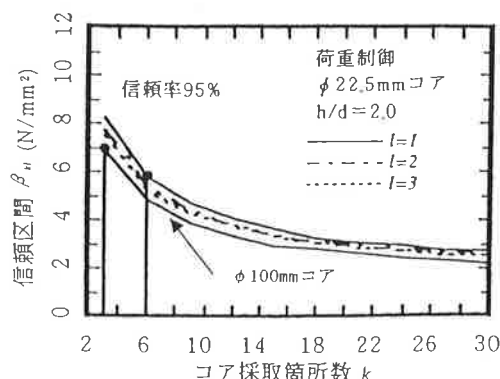


図-15 信頼区間と採取箇所数の関係 ($\sigma_e=4\text{N/mm}^2$)

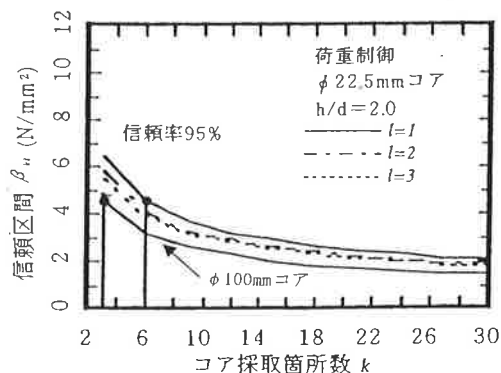


図-16 信頼区間と採取箇所数の関係 ($\sigma_e=6\text{N/mm}^2$)

表-7 圧縮強度試験結果 (建物 A)

コア直径 (mm)	測定位置 1			測定位置 2			合計	
	18.5	22.5	100	18.5	22.5	100	小径コア	100
N	3	4	2	2	5	2	14	4
n'	0	1	0	0	1	0	2	0
n	3	3	2	2	4	2	12	4
$\bar{X}$	34.2	34.2	34.9	34.8	35.6	35.2	34.8	35.0
$\sqrt{V}$	2.4	5.4	1.5	17.3	4.8	1.2	6.3	1.2
$\pm \beta$	6.0	13.3	13.8	15.2	7.6	11.2	4.0	1.8

凡例) N: 試料総数, n': 棄却試料数, n: 不偏分散の算定に用いた試料数, $\bar{X}$: 平均値 (N/mm^2), V : 不偏分散 ($(\text{N/mm}^2)^2$), $\pm \beta$: 信頼率 95% 信頼区間 (N/mm^2)

は 2 箇所であり、1 箇所あたり小径コアは径ごとに 2~5 本、 $\phi 100\text{mm}$ コアは 2 本採取した。圧縮強度試験は、全てのコア供試体の h/d を 2.0 に成形し、変位制御で行った。表-7 に圧縮強度試験結果を示す。小径コアの試験値を 4.3 節で求めた推定式で補正した平均強度は 34.8N/mm^2 であり、 $\phi 100\text{mm}$ コアによる全平均強度 35.0N/mm^2 とほぼ等しいことが分かる。

また、採取位置 1 箇所ごとに着目すると小径コア 2~5 本で推定した強度は、その位置の $\phi 100\text{mm}$ コア強度とほぼ等しい。このことから、局所的な強度を推定する場合には、3 本程度の小径コア試料があれば実用的な推定精度が得られると判断される。

2) 建物 M

建物 M は RC 造 2 階建ての学校であり、 $\phi 100\text{mm}$ コアは 1, 2 階の壁 6 箇所から各 1 本採取し、 $\phi 18.5\text{mm}$ の小

表-8 圧縮強度試験結果（建物M）

	小径コア (N/mm ²)									φ100 コア (N/mm ²)	
	棄却前のデータ			棄却後のデータ			1 個抽出			JIS 補正後	谷川式 補正後
	全体	壁だけ	柱だけ	全体	壁だけ	柱だけ	全体	壁だけ	柱だけ		
n	14	6	8	14	6	8	14	6	8	6	6
$\bar{X}$	24.1	20.6	25.6	24.3	20.7	26.0	23.8	21.0	26.3	22.8	20.9
$\sqrt{V}$	4.2	3.8	3.1	4.6	4.6	3.5	5.5	6.9	3.4	4.3	5.2
$\pm \beta$	2.4	4.0	2.6	2.7	4.8	2.9	3.2	7.2	2.9	4.5	5.5

凡例) n:不偏分散の算定に用いた試料数(箇所ごとの平均値あるいは1個抽出したデータの数), $\bar{X}$:平均値(N/mm²), V:不偏分散((N/mm²)²), $\pm \beta$:信頼率95%信頼区間(N/mm²)

径コアはφ100mm コアの周り（6箇所）およびその近傍の柱（8箇所）から各々数本（3～8本）ずつ採取した。φ100mm コアの h/d は全て 2.0 よりも小さかったため、JIS1107 の補正値を用いる方法、および小坂・谷川の方法⁶⁾で補正した。表-8 に圧縮強度試験結果を示す。ここでは箇所ごとの平均値あるいは箇所（14箇所）ごとに無作為に1個抽出したデータから求めた全体の平均値、標準偏差、信頼区間を示している。柱から採取した小径コア強度は壁よりも大きいことが分かる。このように、小径コアを用いた場合には直接的に主要構造部材の強度が得られるため、構造物の強度をよりの確に推定できると言える。なお、棄却検定で異常値と判定された試料数は70個の小径コアのうち6個であった。

採取部位がφ100mm コアと同じである壁の1個抽出の強度に着目すると、6個の試料の平均値は21.0N/mm²であり、φ100mm コアの谷川式による補正後強度とほぼ等しい。また、このときの95%信頼区間はφ100mm コアの谷川式による補正後強度の信頼区間と大きくは変わらない。これらのことから、4.4節で述べたように、ある領域の強度を推定する場合、小径コアを6箇所程度から1個ずつ採取し、試料数を6個程度とすれば構造体コンクリート強度が実用的な精度で推定できると考えられる。

6. まとめ

本報で述べた検討結果より以下に示す結論を得た。

- 1) 小径コア強度と構造体コンクリート強度（φ100mm コア強度）の強度差データを分析することにより、小径コア強度による構造体コンクリート強度の推定式を設定できた。
- 2) ある領域の強度を推定するには、構造体コンクリート強度均一と仮定した場合、小径コアの採取箇所数を6～12とするのが採取箇所数と精度のバランスがよい。
- 3) 構造体コンクリート強度の現実的なばらつきを考慮した場合、6箇所から各1本採取した小径コアによる構造体コンクリート強度の母平均の推定精度は、3箇所から各1本採取した直径100mm コアの推定精度と同程度と考えてよい。
- 4) 従って、小径コアによりある領域の強度を実用的に（精度よくかつ効率よく）推定するためには、採取箇所と本数を6箇所から各1本程度にするのが妥当である。

5) 建物Aの試験結果より、局所的な強度の推定には3本程度の小径コア試料があれば実用的な推定精度が得られると考えられる。

6) 建物Mの試験結果より、ある領域の強度を推定する場合、小径コアの試料数を6程度にすれば、構造体コンクリート強度が実用的な精度で推定できることが確認できた。

7. おわりに

本報は、名古屋大学谷川恭雄教授の御指導を得て、当社、㈱銭高組、日本国土開発㈱が共同開発し、(財)日本建築センター・(財)建築保全センターの建築物等の保全技術・技術審査証明を取得した既存構造物のコンクリート強度調査法「ソフトコアリング」について、開発の各段階において実施した実験・検討結果をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1992。
- 2) 寺田謙一、谷川恭雄、中込昭、佐原晴也：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定に関する研究（その1～3）、日本建築学会東海支部研究報告書、No.35、pp93～104、1998。
- 3) 若林信太郎、谷川恭雄、中込昭、佐原晴也：モルタル小径コアの圧縮強度に及ぼす寸法効果および供試体の端面仕上げ方法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.847～852、1998。
- 4) 若林信太郎、谷川恭雄、中込昭、佐原晴也、寺田謙一：小径コアによる高強度コンクリートの圧縮強度の推定に関する実験的検討、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.795～796、1998。
- 5) 若林信太郎、谷川恭雄、寺田謙一：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定法に関する実験的研究（その1～2）、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.705～708、1999。
- 6) 小坂・谷川：各種コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体寸法と載荷面の摩擦の影響について、セメントコンクリート、No.265、1969。