

小径コアによる塩化物イオン定量方法および 強度推定方法に関する研究

伊 藤 始

笹 倉 伸 晃

佐 藤 文 則

渡 部 正

要 旨

既設コンクリート構造物の維持管理において、健全性を診断する場合には、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を採取し、この供試体を用いて各種試験を実施するのが一般的である。しかしながら、この場合、コア径が大きいこと、構造物に与える損傷が大きいことや過密配筋部での採取が困難であることなどの制限を受けることが多い。そのため、小径のコアやドリルを用いた診断方法の開発が進んでいる。

本研究は、コンクリート構造物の塩化物イオン量の測定方法、ならびに圧縮強度の推定方法について小径コアの適用を検討するものである。塩化物イオン量の測定では、 $\phi 100\text{mm}$ コアと同程度の精度を得るために必要な混合試料量を決定し、圧縮強度の推定では、粗骨材最大寸法 40mm の骨材を使用したコンクリートでの適用を確認した。

キーワード 小径コア／維持管理／塩化物イオン量／圧縮強度／粗骨材最大寸法

目 次

- | | |
|------------------|---|
| 1. はじめに | 3. 40mm 骨材コンクリートの圧縮
強度試験の精度に関する検討 |
| 2. 塩化物イオン定量方法の検討 | 4. まとめと課題 |

A STUDY ON MEASURING METHOD FOR CHLORIDE ION IN CONCRETE AND ESTIMATING METHOD FOR STRENGTH USING SMALL SIZE CORES

Hajime ITO
Fuminori SATO

Nobuaki SASAKURA
Tadashi WATANABE

Synopsis:

In maintenance management of an existing concrete structure, when diagnosing soundness, it is common to extract core specimens with a diameter of 100mm from a concrete structure and to carry out various tests using these core specimens. However, in this case, since the diameter of a core is large, there are many restrictions that the damage affects a structure is large, and the extraction of core specimens from overcrowded reinforcing area is difficult, and so on. Therefore, development of the diagnostic method using the core with a small diameter and drilling is progressing.

This study investigates application of a core with small diameter for measuring the amount of chloride ion of a concrete structure, and the presuming compressive strength. In measurement of the amount of chloride ion, the required amount of samples was determined in order to acquire accuracy of the same grade as the core with a diameter of 100mm . Moreover, in presumption of compressive strength, it was considered that the possibility of applying a core with a small diameter to the concrete that used aggregate with a maximum size of 40mm .

1. はじめに

近年、海岸近くに立地している構造物や洗浄が不十分な海砂を使用した構造物において、塩害によりコンクリート中の鉄筋が腐食する被害が深刻な問題となっている。そのため、塩害による劣化の可能性の判定や将来予測をすることが重要となり、それらのデータを得るために塩化物イオンの測定が行われている。

一方、既設コンクリート構造物の維持管理において、健全性を診断する場合には、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を採取し、この供試体を用いて各種試験を実施するのが一般的である。しかしながら、この場合、コア径が大きいため構造物に与える損傷が大きいことや過密配筋部での採取が困難であることなどの制限を受けることが多い。

そのため、簡易法として小径コアやドリル削孔などを用いた試料採取方法の開発が進んでいる^{1),2)}。小径コア法は、圧縮強度、中性化深さ、および塩化物イオン量といった複数の測定が同時に可能であること、ドリル削孔法は、簡便な機械で塩分分析用試料の採取が可能であることなどの特徴を有している。

小径コアやドリル削孔の使用は、実際にコンクリート構造物の維持管理をしていく上で、調査費用が安価であることや構造物への損傷が少ないことより、劣化調査の間隔を短くすることができ、劣化への迅速な対応が可能となる。しかしながら、これらの方法は、 $\phi 100\text{mm}$ コアに比べ、採取する試料の量が少なくなり、測定精度のバラツキが大きくなることが予想されるため³⁾、それらの測定精度を把握し、バラツキを同程度とする方法を考える必要がある。

また、小径コアを用いた圧縮強度試験において、建築分野を対象とした粗骨材最大寸法 25mm までのコンクリート構造物については、手法が確立されているものの、土木分野におけるコンクリート構造物では、粗骨材最大寸法が 25mm を超えるものが多くあり、単位粗骨材量が多いのが一般的である。そのため、それらの適用性を検討し、使用範囲を広げる必要がある。

表－1 試験体種類

試験体 No.	含有塩化物イオン量 (kg/m^3)
1	0.1
2	0.6
3	1.2
4	2.5

2. 塩化物イオン定量方法の検討

2.1 実験概要

(1) 検討方法

小径コアおよびドリル削孔を用いた塩分測定方法の測定精度の検証をするために、塩化物イオンを混入したコンクリート試験体を作製し、混入量と試料採取方法をパラメータに試料を採取し、塩化物イオン量を定量した。

採取方法は、 $\phi 100\text{mm}$ コア（以下、通常コアと記す）、 $\phi 25\text{mm}$ コア（以下、小径コアと記す）、 $\phi 16\text{mm}$ ドリル削孔（以下、ドリル削孔と記す）とした。

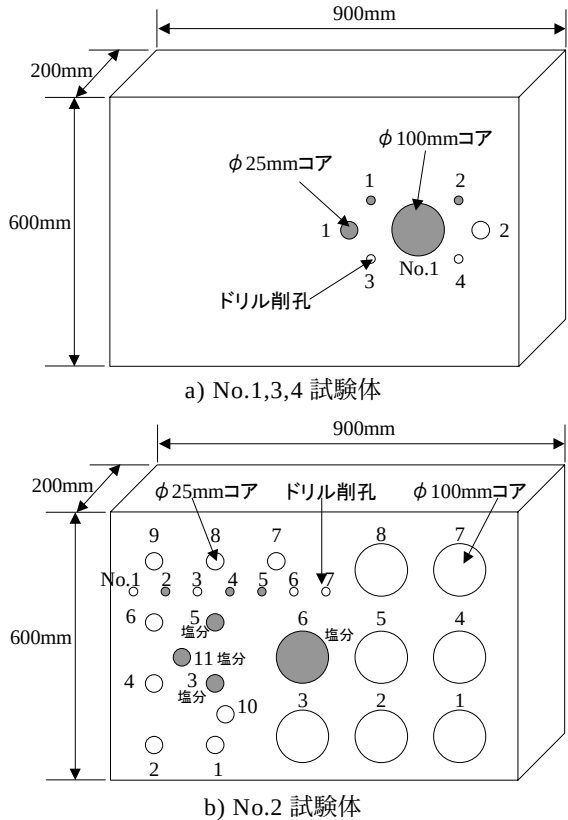
(2) 試験体

試験体は、表－1 に示すように含有塩化物イオン量をパラメータに 4 種類作製した。試験体に用いたコンクリートの配合を表－2 に示す。塩化物イオンは、塩化ナトリウム溶液を希釈して練混ぜ水として用いることでコンクリートに混入した。試験体寸法は、図－1 に示すように、 $900 \times 600 \times 200\text{mm}$ である。

表－2 塩分分析に用いたコンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	55	46	165	300	822	994

＊セメント：普通ポルトランドセメント，スランプ：12cm



図－1 塩分用試験体寸法とコア採取位置

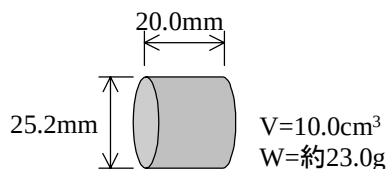
(3) コアリングおよび試料数量

コアおよびドリル削孔粉は、図－１に示すように試験体の側面（900×600mm の面）から採取した。今回の分析に使用したコア本数およびドリル削孔箇所数は、図－１の灰色部分に示すように、No.1,3,4 試験体では通常コア１本、小径コア１本、ドリル削孔２箇所とした。No.2 試験体では通常コア１本、小径コア３本、ドリル削孔３箇所とした。これらのコアおよびドリル削孔粉より、分析試料とした。なお、ドリル削孔粉は、20mm ごとに収集した。

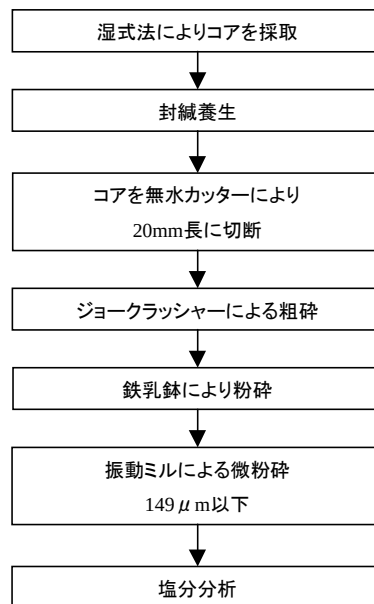
試験体より採取したコアを無水カッターにより、図－２に示すように表面から長さ 20mm 間隔で切断した。切断したコアは、乾燥による塩分の移動や型枠面のために起こるモルタルと骨材の比率の違いによる影響を考慮して表面部分を取り除いたものを試料として用いた。塩分分析試料としたコア（削孔箇所）と深さの関係を表－３に示し、試料数量を表－４に示す。

(4) 分析方法

分析試料とするために切断したコアの粉碎を行った。コアの採取から分析試料調整までの手順を図－３に示す。コアの粉碎には、ジョークラッシャー、鉄乳鉢、振動ミルを用いた。塩分分析は、日本コンクリート工学協会規準 JCI-SC「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて、全塩化物イオンを定量した。



図－２ 小径コア１試料の形状寸法



図－３ 分析までの手順

表－３ 採取コアと試料深さの関係

a) No.1,3,4 試験体

採取方法	削孔箇所またはコア番号	深さ(mm)						
		0 ～ 20	20 ～ 40	40 ～ 60	60 ～ 80	80 ～ 100	100 ～ 120	120 ～ 140
ドリル削孔	1							
	2							
小径コア	1							
通常コア	1							

■:採取位置
□:未採取

b) No.2 試験体

採取方法	削孔箇所またはコア番号	深さ(mm)								
		0 ～ 20	20 ～ 40	40 ～ 60	60 ～ 80	80 ～ 100	100 ～ 120	120 ～ 140	140 ～ 160	160 ～ 180
ドリル削孔	2									
	4									
	5									
小径コア	3									
	5									
	11									
通常コア	6									

表－４ 試料数量

試験体 No.	試料数		
	通常コア	小径コア	ドリル削孔
1	5	6	6
2	5	18	9
3	5	6	6
4	5	6	6
合計	20	36	27

2.2 分析結果

(1) 塩分分析値

各試験体における採取方法ごとの塩分分析値の平均値および標準偏差を図－４、図－５に示す。図－４では、横軸に通常コアの分析値を、縦軸に小径コアおよびドリル削孔の分析値を与えた。各試験体ともに若干の差異が見られるものの、おおむね同様の塩分分析値が得られている。

(2) 標準偏差

図－５では、縦軸に採取方法ごとの標準偏差を与えた。各塩分量および各採取方法における標準偏差は、塩分分析値の１割程度となっていることが分かる。すなわち、変動係数が１０％程度である。各採取方法ごとのバラツキはあるものの、塩分量が大きくなるにしたがい、標準偏差も大きくなる傾向にある。

(3) 分析値比

コンクリート中の塩分量が増えるにしたがい、標準偏差が大きくなることを考慮して、式(1)で示すように、試料採取方法ごとの塩分分析値を各試験体における通常コアの分析結果の平均値との比で整理することとし、この値を以下より「分析値比」と記す。分析値比で整理することにより、各塩分分析値を無次元化し、試験体に含ま

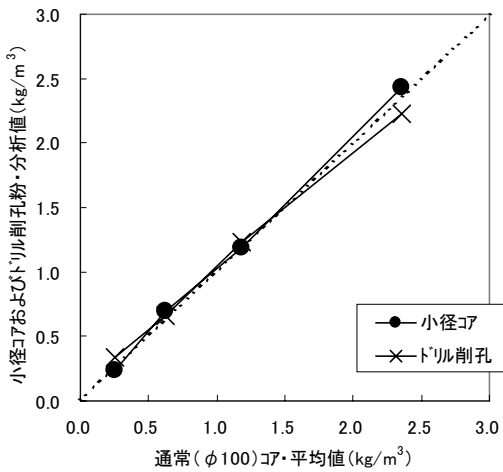
れる含有塩化物イオン量の影響を取り除くことで、採取方法を対象とした比較を行った。

$$\text{分析値比} = \frac{\text{塩分分析値 (kg/m}^3\text{)}}{\text{通常コア・平均値 (kg/m}^3\text{)}} \quad (1)$$

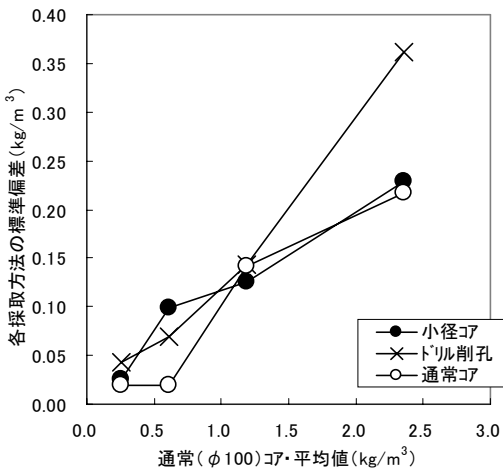
図－6に各採取方法における分析値比のヒストグラムを示す。ヒストグラムは、正規分布にしたがっていると仮定して、統計的な検討を行った。表－5は、各採取方法における分析値比の平均値、標準偏差、および試料数を示す。

通常コアでは、ほとんどの分析値比が0.85～1.15の範囲に入っており、1割程度の誤差で測定されている。それらの標準偏差は0.079となっている。

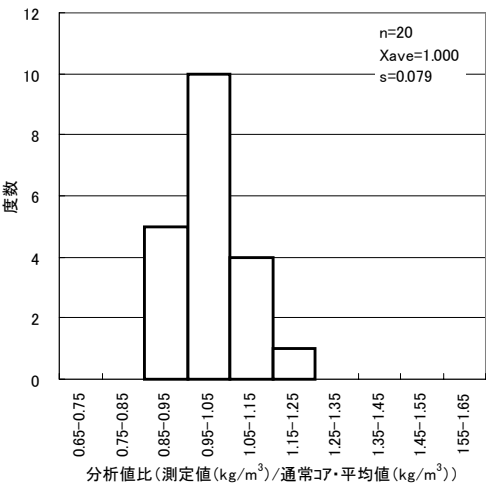
小径コアの標準偏差は、0.144であり通常コアの1.8倍程度、ドリル削孔の標準偏差は、0.186であり2.4倍程度となった。小径コアおよびドリル削孔では、通常コアに比べて、標準偏差、すなわち測定精度のバラツキが大きい結果となった。



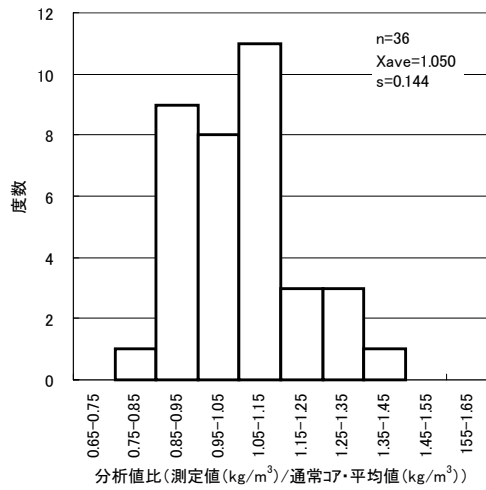
図－4 各試験体と採取方法の塩分分析値



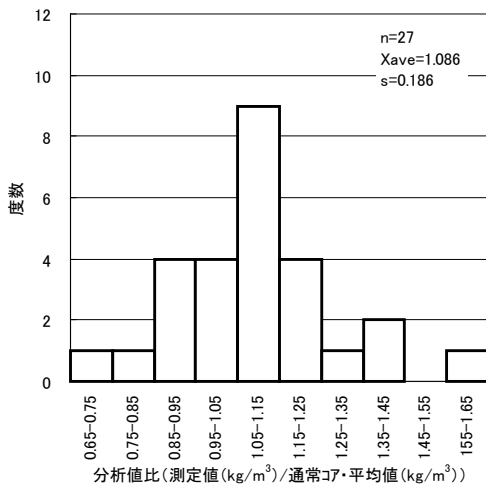
図－5 各採取方法の標準偏差



(a)通常コア



(b)小径コア



(c)ドリル削孔

図－6 分析値比のヒストグラム

表－5 分析値比の平均値と標準偏差

	通常コア	小径コア	ドリル削孔
平均値	1.000	1.050	1.086
標準偏差	0.079	0.144	0.186
試料数	20	36	27

2.3 混合試料数と測定精度の関係

(1) 概要

実際の構造物における含有塩化物イオン量の測定に小径コアおよびドリル削孔を用いる場合に、通常の測定に用いられているφ100mm コアと同程度の測定精度は、試料量を増やすことで得ることが可能となる。すなわち、小径コアでは試料の本数、ドリル削孔では削孔箇所数を増やし、これらの試料を混合することである。

ここでは、前述した分析値比を用いて、信頼区間の算定を行い、混合する試料の量を決めることとした。

(2) 算定方法

信頼区間の推定の考え方⁴⁾により、混合試料数と分析値比の信頼区間βの関係を算定した。信頼区間とは、95%の信頼率で母数が入る区間のことであり、ばらつきの指標となる。

算定手順と信頼区間βの算定方法を以下に示す。

- ① 乱数表を使用して、ランダムサンプリングにより、全データから所要の混合数のデータを選択する。
- ② サンプリングデータの平均を取り、これを1試料の分析値とする。
- ③ 分析値を5試料分算定し、式(2)を用いて、これらの信頼区間βを求める。
- ④ ①～③の操作を5回繰り返し、βの平均値を求める。

$$\beta = t(\phi, \alpha) \cdot \sqrt{\frac{V}{n}} \quad (2)$$

φ：自由度（φ＝n－1）

V：分析値から得られた分散 $V = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$

α：有意水準（両側信頼率 P=95%のとき α＝0.05）

n：試料数

(3) 算定結果・混合試料数

図－7 および図－8 に信頼区間の算定結果を示す。図－7 では混合試料数を横軸に与えた。通常コア 20mm-1本の信頼区間は 0.1 程度となった。小径コアでは 1 本で 0.2 程度であり、通常コアの約 2 倍となった。試料 3 本を混合した結果では通常コアの信頼区間を下回り、通常コアと同程度の精度となる必要試料数は、3 試料となった。ドリル削孔での必要試料数は、5 試料となった。

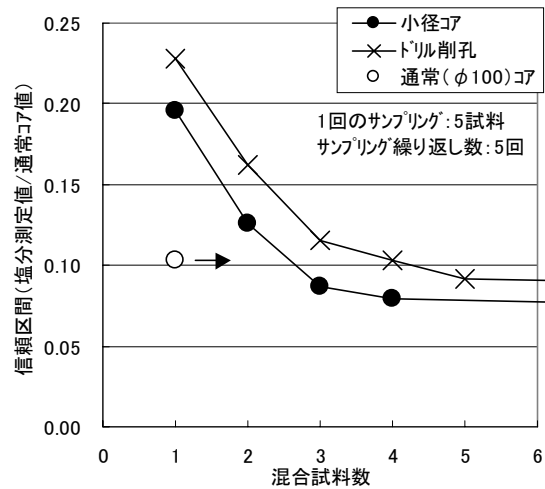
(4) 算定結果・混合試料量

図－8 では混合試料量を横軸に与えた。混合試料量は、小径コア 1 本あたりの質量を 23.0g、ドリル削孔 1 箇所、深さ 20mm あたりの質量を 9.4g として計算した。この結果をみると、小径コアとドリル削孔の両採取方法ともに試料量が 50g～70g 以上となることで通常コアの信頼区間を下回っていることが分かる。

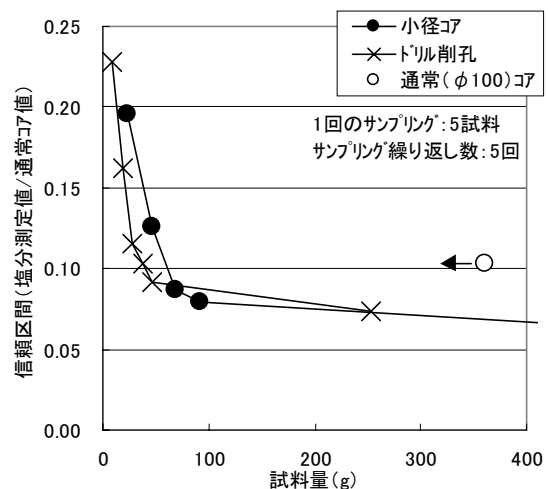
著者らの既往の研究³⁾において「φ100mm、厚さ 20mm の標準的な試験と同等の精度で測定する場合には、φ25mm 小径コアでは 50mm（約 58g）の長さが必要である。」との結論が得られている。本研究の検討結果は、既往の結果と一致しており、整合性が取れている。

表－6 に算定結果のまとめとして、小径コアとドリル削孔の両採取方法に関する必要試料数と試料量を示す。

これらの結果を反映して、小径コアを用いた場合の塩分分析試料の混合例を図－9 に示す。



図－7 混合試料数と信頼区間の関係



図－8 試料量と信頼区間の関係

表-6 必要試料数と試料量

	小径コア	ドリル削孔
必要 試料数	3 試料 (φ25-20mm)	5 試料 (φ16-20mm)
必要 試料量	69g	47g

＊必要試料数・量：通常γと同程度の精度となる試料数・量

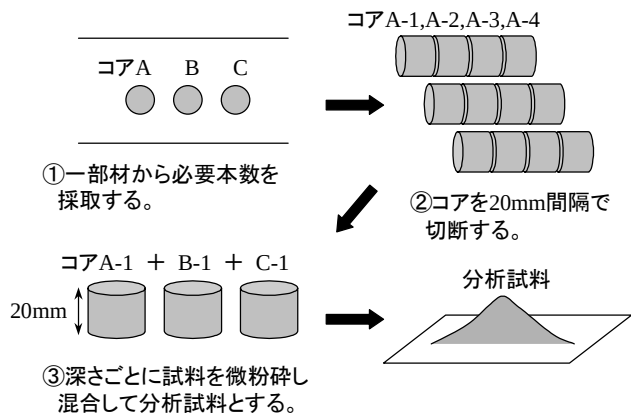


図-9 小径コアの塩分分析試料の混合例

3. 40mm 骨材コンクリートの圧縮強度試験の精度に関する検討

3.1 実験概要

(1) 検討方法

小径コアを用いた粗骨材最大寸法 40mm のコンクリートにおける圧縮強度試験の測定精度を検証するために、水セメント比を 4 水準としたコンクリート試験体を作製し、試験体採取方法をパラメータに圧縮強度試験を行った。採取方法は、 $\phi 100\text{mm}$ の通常コアと小径コアとした。

(2) 試験体

試験体は、表一七の配合表に示すように水セメント比をパラメータに 4 種類作製した。いずれの試験体も粗骨材は、最大寸法 40mm のものを用いた。試験体寸法は、図一 10 に示すように、 $900 \times 600 \times 200\text{mm}$ である。

(3) コアリングおよび強度試験方法

小径コアの採取および圧縮強度試験は、(財)日本建築センター・(財)建築保全センター：技術審査証明第 0005 号、既存コンクリート強度調査法『ソフトコアリング』における調査マニュアルに準じて行った。コアは、図-10 に示すように試験体の側面から採取した。

今回の強度試験に使用したコア本数は、図-10の灰

色部分に示すように、試験体から通常コア6本、小径コア4本を採取した。採取した通常コアは、端面を研磨し圧縮強度試験用供試体とした。採取した小径コアは、表-8に示すようにコア1本から長さ50mmに切断して3本の圧縮強度用供試体とした。小径コアの供試体は、端面を硫黄キャッピングした。強度試験を行った供試体数を表-9に示す。

圧縮強度試験時の載荷方法は荷重制御とし、載荷方法は JIS A 1108 に準じて $0.25\text{N/mm}^2/\text{s}$ とした。

表-7 強度試験に用いたコンクリートの配合

試験 体 No.	水セ メント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
1	45	40	151	336	702	1129
2	50	39	151	302	730	1126
3	55	41	155	282	822	994
4	60	42	151	252	784	1113

※セメント：普通ポルトランド[®]，スランプ：12cm，粗骨材最大寸法：40mm

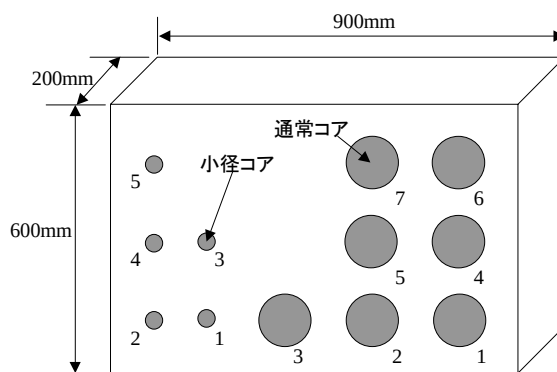


図-10 強度用試験体の寸法とコア採取位置

表-8 採取コアとコア深さの関係

[illegible]

表－９ 強度用供試体数

試験体 No.	強度用供試体数	
	通常コア	小径コア
1	6	12
2	6	12
3	6	12
4	6	12
合計	24	48

3.2 実験結果および考察

(1) 小径コアと通常コアの強度の関係

表－１０に小径コアと通常コアの圧縮強度の差、標準偏差、および変動係数を示す。表中には、粗骨材最大寸法 20mm の既往の結果も示した⁵⁾。また、図－１１に小径コアと通常コアの圧縮強度の関係を示す。横軸の通常コアの圧縮強度は供試体 6 本の平均値である。図中には傾きを 1 に固定し、強度差 5.1N/mm² を切片とした回帰直線を示した。

図－１１をみると、小径コア強度の平均値は、通常コア強度より大きくなる傾向にあり、既往の研究結果である粗骨材最大寸法 20mm の場合と同様の傾向となった。

通常コアとの強度差は、試験体ごとに平均値で 4.0 から 6.1N/mm² までのばらつきがあり、全体の平均値は、5.1N/mm² であった。この結果は、粗骨材最大寸法 20mm の場合の 4.6N/mm² と同程度となった。

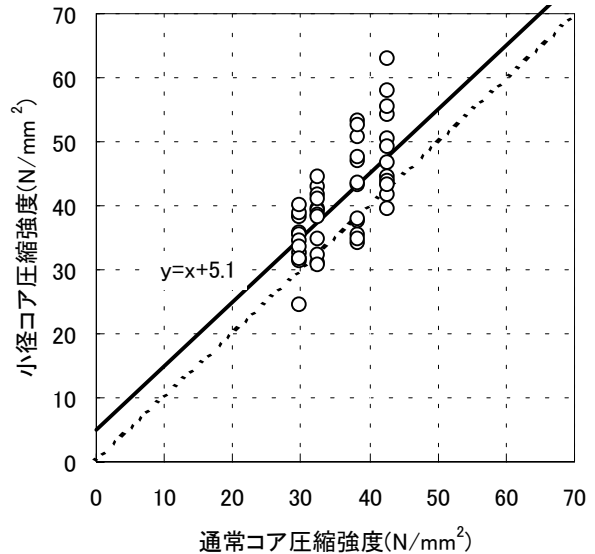
(2) 試験値のばらつき

表－１０より、通常コアにおける標準偏差の平均値が 4.3N/mm² であるのに対し、小径コアの平均値は 5.8 N/mm² であり、1.3 倍程度となった。また、試験体強度が大きいほど、標準偏差が大きくなる傾向にあった。

一方、粗骨材最大寸法が 20mm の場合の標準偏差と比較すると、約 1.5 倍となった。これは、粗骨材最大寸法 40mm のコンクリートより採取した小径コアの方が、粗骨材による影響を受けやすく、粗骨材混入割合や破壊形態で強度試験値が変動しやすいためと考えられる。

表－１０ 圧縮強度差、標準偏差、および変動係数

採取方法	小径コア		通常コア
粗骨材最大寸法(mm)	20	40	40
通常コアとの強度差 (N/mm ²)	4.6	5.1	—
標準偏差 (N/mm ²)	3.3	5.8	4.3
変動係数 (%)	12	14	12



図－１１ 通常コアと小径コアの圧縮強度の関係

4. まとめと課題

4.1 塩分分析

今回の研究により得られた知見を以下に示す。

- ① $\phi 100\text{mm}$ コアに代えて、 $\phi 25\text{mm}$ の小径コアや $\phi 16\text{mm}$ のドリル削孔を用いて、塩分分析試料を採取した場合でも、 $\phi 100\text{mm}$ コアと同様に評価できることが確認できた。
- ② 塩分分析値を各試験体における通常コアの分析結果の平均値との比で整理した分析値比は、正規分布にしたがい、統計処理が可能であることが確認できた。
- ③ 通常コアと同程度の測定精度を得る方法は、小径コアおよびドリル削孔で得られた試料を混合し、分析試料量を増やす方法が有効である。
- ④ 精度を得るために必要な混合試料数は、分析値比の信頼区間の推定により、小径コア・ $\phi 25\text{-}20\text{mm}$ で 3 試料（質量 69g）、ドリル削孔・ $\phi 16\text{-}20\text{mm}$ で 5 試料（同 47g）であることが確認できた。

4.2 圧縮強度試験

本研究では、粗骨材最大寸法 40mm を用いたコンクリートの試験体より採取した小径コアと通常コアの強度の関係を求めた。その結果より以下の知見が得られた。

- ① 平均値において小径コア強度は、通常コア強度より大きくなる傾向があり、その差は 5N/mm² 程度となった。
- ② 試験体強度が大きいほど、標準偏差が大きくなる傾向にあり、その平均値は、5.8N/mm² であった。

- ③ 粗骨材最大寸法 40mm の場合は、20mm の場合に比べ、標準偏差が 1.5 倍程度となるものの、通常コアに比べ小径コアの強度が大きくなる傾向は同様であり、その時の強度差は同程度であった。したがってφ 25mm 程度の小径コアを用いて、粗骨材最大寸法 40mm の強度推定が可能であると考えられる。

また、実際に小径コアを用いて、粗骨材最大寸法 40mm のコンクリートの強度を推定するためには、20mm の場合と同様に、以下の項目を今後、検討する必要がある。

- ① 通常コアとの強度の差異を補正する強度補正式を提案すること。
- ② 通常コア 3 本の平均強度に相当する精度で強度を得るために必要な採取本数を特定すること。

謝辞

本研究は、(株)錢高組、日本国土開発(株)、当社の共同研究として実施されました。本研究の実施にあたり、ご指導を頂きました(株)錢高組の野永健二氏、日本国土開発(株)の佐原晴也氏、(財)先端建設技術センターの横田季彦氏、(株)建設技術研究所の重松英造氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオンの現場試験方法の提案, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.21, No.2, pp.1303-1308, 1999
- 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法, コンクリート工学, Vol39, No.4, pp.27-32, 2001
- 3) 伊藤始, 石上鉄雄, 横田季彦, 重松英造, 野永健二, 佐原晴也: 試料の採取方法が塩化物イオンの測定精度に及ぼす影響, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.648-649, 2001
- 4) 近藤良夫ほか: 品質管理セミナー, (財)日本科学技術連盟, pp.59-78, 1997.9
- 5) 中込昭, 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に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演概集 A1, pp.707-708, 1999.9