論文　小径コアの圧縮強度の変動に関する基礎的研究

山本 大介[*1] ・ 廣光 俊海[*2] ・ 濵田 秀則[*3] ・ 佐川 康貴[*4]

要旨：本研究では，一般的に圧縮強度のばらつきが大きい，小径コアを用いた試験方法の測定精度を向上させることを目的に，コンクリートおよびモルタル平板試験体から小径コアを採取し，圧縮強度試験を行った。その結果，小径コアの圧縮強度のばらつきの大きな要因の１つは供試体個々の骨材の内部構成のばらつきにあること，また安定した小径コアの圧縮強度を求めるために必要な供試体本数は 11 本以上であり，その際小径コアの圧縮強度はφ100mm コアに比べて 85～87%となることがわかった。

キーワード：小径コア，圧縮強度，端面摩擦，寸法効果

1.　はじめに

高度経済成長期に建設された構造物のストック量は膨大であり，ほぼ一斉に老朽期に入ることから，これら構造物を今後どのように維持管理していくかが大きな課題となっている。構造物に使用されるコンクリートの物性を表す代表的な指標の１つとして圧縮強度試験値が挙げられる。圧縮強度を求める際には JIS A 1107 に基づき，直径が粗骨材の最大寸法の 3 倍以上となるようコアを採取する方法が一般的であるが，埋設鉄筋等による採取場所の制約を受けることが多く，また構造物へ与える損傷が大きいことが問題となる場合がある。そのため，直径が小さいコア，すなわち小径コア（φ25mm コア）を用いることが望ましい場合も多い。小径コア法は微破壊試験の１手法として，コンクリートの品質管理の有効な方法として提案されている [1)~5)]。既往の研究では，小径コア内の粗骨材の分布に起因する偏心載荷などがその強度に及ぼす影響について十分に言及されておらず，また端面処理等の違いが圧縮強度試験値へ及ぼす影響もさらに検討を重ねる必要があると思われる。小径コアの圧縮強度はφ100mm コアの圧縮強度に比べばらつきが大きいというデメリットがあるため，安定した圧縮強度を求めることが難しく，そのために実構造物に対して広く普及するに至っていないのが実情である。

本研究は，小径コア内の粗骨材分布の影響等に起因する圧縮強度の変動の特性を把握することを目的として，コンクリート及びモルタル平板試験体から小径コアを採取し，圧縮強度のばらつきについて検討を行ったものである。なお，本研究では，新設コンクリートの品質管理として小径コアの圧縮強度試験値を用いることは想定していない。

2.　実験概要

2.1 配合及び採取方法

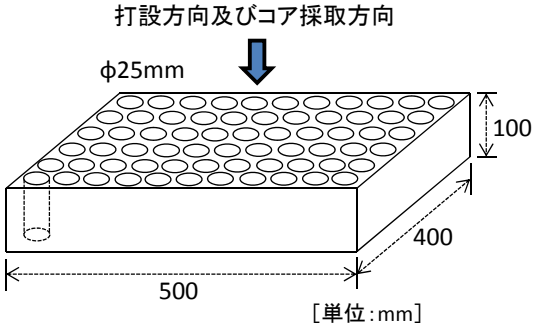
表－1 にコンクリートの配合を，**表－2** に使用材料の名

表－1　コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m^3)				AE減水剤 (g/m^3)	AE剤 (ml/m^3)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
20	50	43.3	165	330	749	1150	1031	12

表－2　使用材料の名称及び物性値

材料	種類・物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm^3，比表面積3360cm^2/g）
細骨材	海砂（表乾密度2.58g/cm^3，吸水率1.59%）
粗骨材	砕石（表乾密度2.91g/cm^3，吸水率0.81%）
AE減水剤	リグニンスルホン酸系化合物
AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤



図－1　平板試験体の打設方向及びコアの採取方向

*1 九州大学大学院　工学府　建設システム工学専攻　技術職員　(正会員)
*2 九州大学大学院　工学府　建設システム工学専攻　修士課程　(学生会員)
*3 九州大学大学院　工学研究院　社会基盤部門　教授　博士(工学)　(正会員)
*4 九州大学大学院　工学研究院　社会基盤部門　准教授　博士(工学)　(正会員)

称及び物性値を，**図－1** に小径コアを採取したコンクリート及びモルタル平板試験体の概念図を示す。小径コアは平板試験体から採取し，φ100mm×200mm の試験体は円柱型枠を用いて，同一バッチから採取した試料により作製した。粗骨材の最大寸法は 20mm とした。モルタル平板試験体には，フレッシュコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを用いた。φ100mm 供試体および平板試験体は打設後 28 日間水中養生を行い，その後 20℃の気中養生に切替え，材齢 12 ヶ月で小径コアを採取した。小径コアの採取方向は打設方向と同じとし，コア採取速度は供試体の側面形状が変化しないよう約 35mm/min.の速度で採取した。

2.2 圧縮強度試験方法

本研究では，コア採取後，端面研磨機で高さ 50mm±1mm，また供試体両端面の平面度が 1mm 以内となるよう小径コアを成形し，圧縮強度試験に供した。**表-3** に圧縮強度試験の要因別分類を示す。小径コアの圧縮強度試験時には 40×40×160mm 角柱モルタル用圧縮試験治具を用いた。端面摩擦が圧縮強度のばらつきに及ぼす影響を検討するため，ウッドメタルキャッピング，または端面の両面に減摩材（厚さ 0.1mm のテフロンシートを 2 枚重ね）の付与を試みた。その他の条件は JIS A 1108 に準拠し，圧縮強度試験を行った。また，ひずみゲージを側面軸方向に 2 枚対称に貼り付け，圧縮試験時のひずみ計測を行った。ここで粗骨材もしくはモルタル部のみのひずみ計測とならないようにするため，検長 30mm のひずみゲージを用いた。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

表－4 に圧縮強度試験の試験結果を示す。標本数はφ100mm 試験体では 3 本，小径コアでモルタル供試体の場合は各要因 20 本，小径コアでコンクリート供試体の場合は各要因 50 本とした。既往の研究では最弱リンクモデルによる寸法効果の影響によって，供試体の直径が小さくなるほど圧縮強度が高くなる結果も報告されているが [6]，本研究では，小径コアの圧縮強度はφ100mm 供試体の圧縮強度より小さくなった。この原因として，既往の研究においても示されているとおり [7)~9)]，小径コアの内部材料の非均質性が一因であると推察される。すなわち，幾何学的非均質度の及ぼす影響が，寸法効果が圧縮強度に及ぼす影響よりも大きくなったものと考えられる。

3.2 圧縮強度のばらつきの原因

圧縮強度のばらつきの原因は，供試体個々の大小骨材の内部構成が影響する自然的なばらつきと，試験を行う際に影響する人為的ばらつきに分けて考えることができる。大小骨材の内部構成が影響する自然的なばらつきとは，コア採取箇所によるモルタルや粗骨材の不均一性からなるばらつきのことである。人為的なばらつきとは，載荷速度など供試体成形方法に起因するばらつき，端面処理の違いに起因するばらつき，また，圧縮時の偏心により引き起こされるばらつきなどがある。小径コアはそのサイズの小ささから人為的なばらつきの影響が大きくなりやすいと考えられる。そのため，本研究では，人為的なばらつきの要因として考えられる平面度，端面摩擦，偏心載荷に着目し，これらが圧縮強度のばらつきに与える影響を考察した。また，その他の圧縮強度のばらつきに影響を与えうる諸条件は極力同一となるように注意しつつ，実験を行った。

(1) 減摩載荷による圧縮強度のばらつき

テフロンシートは端面摩擦を低減し，コンクリート内の応力分布を均一にする効果があり [10]，材料内の応力の均一化によって圧縮強度のばらつきの制御に効果があると期待される。**表－4** より，モルタル小径コアの圧縮強度の変動係数は要因 1，要因 2 に比べ，テフロンシートを用いた要因 3 は小さくなっていることがわかる。しかし，コンクリートの場合，各要因の間で変動係数に大きな差は見られなかった。

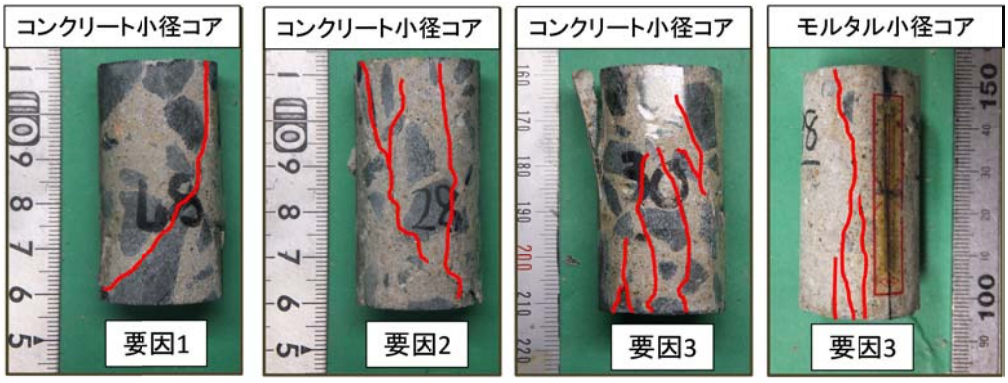
写真－1 に，モルタルおよびコンクリート小径コアの圧縮破壊後のひび割れ形状を示す。要因 1 のコンクリートでは端面は崩壊せず，粗骨材に沿った斜めひび割れが

表－3　圧縮強度試験の要因別分類

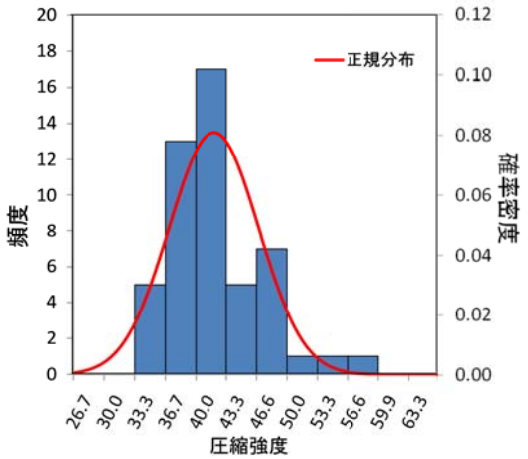
要因	試験法の分類
1	キャッピングあり，テフロンシートなし
2	キャッピングなし，テフロンシートなし
3	キャッピングなし，テフロンシートあり

表－4　圧縮強度試験結果

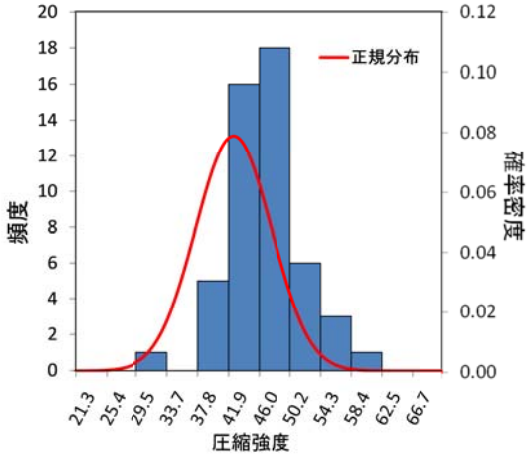
	直径	試験要因	標本数（本）	圧縮強度（N/mm^2）				変動係数（%）
				平均値	最小値	最大値	標準偏差	
モルタル	φ100mm	2	3	61.9	61.2	63.2	1.13	1.82
	φ25mm	1	20	54.9	47.4	61.0	3.94	7.18
		2	20	57.4	43.2	64.9	5.21	9.07
		3	20	48.8	42.9	53.4	2.87	5.89
コンクリート	φ100mm	2	3	49.4	47.1	51.6	2.27	4.60
	φ25mm	1	50	42.1	33.4	56.9	4.93	11.71
		2	50	42.7	25.5	54.6	5.08	11.92
		3	50	35.4	25.1	43.5	4.06	11.48



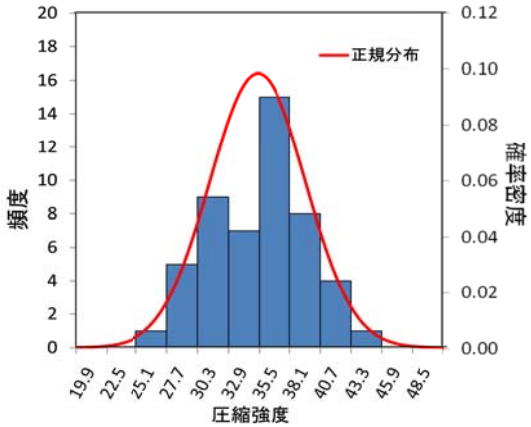
写真－1　モルタル・コンクリート小径コア　圧縮破壊後のひび割れ形状（赤線：ひび割れ）



図－2　要因 1 のヒストグラムと正規分布



図－3　要因 3 のヒストグラムと正規分布



図－4　要因 4 のヒストグラムと正規分布

発生するものが多く見られた。要因 3 のモルタルの場合，長軸方向に直線的に入るひび割れが多く見られたが，要因 3 のコンクリートでは長軸方向ひび割れの多くが粗骨材界面に沿っており，破壊形状に差が見られた。要因 2 は，ひび割れ形状は要因 1 ほど斜めではないが，要因 3 ほど長軸方向ひび割れは多くなかった。

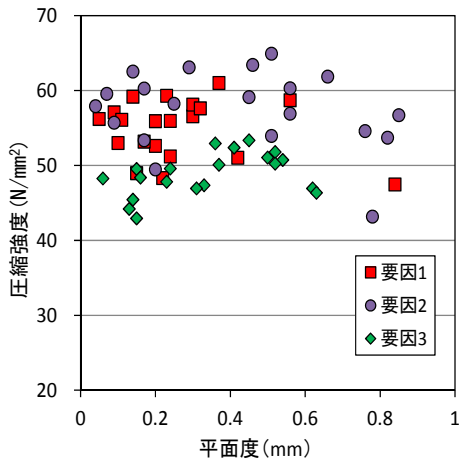
これらより，モルタルの場合は減摩載荷による内部の応力均一化によって圧縮強度のばらつきを抑制しているものの，コンクリートでは，要因 3 においても粗骨材の影響により内部応力均一化効果が弱くなり，**表－4** に示すように圧縮強度がばらついたと考えられる。また，モルタルおよびコンクリート双方で，要因 3 の圧縮強度試験値が小さい結果となった。これは，端面摩擦が小さく，また圧縮応力が供試体内部に比較的均一に作用し，そのため同心円方向に引張応力が働き，圧縮強度が小さくなった[11]ことが原因と考えられる。

(2) 小径コアの圧縮強度の正規分布とヒストグラム

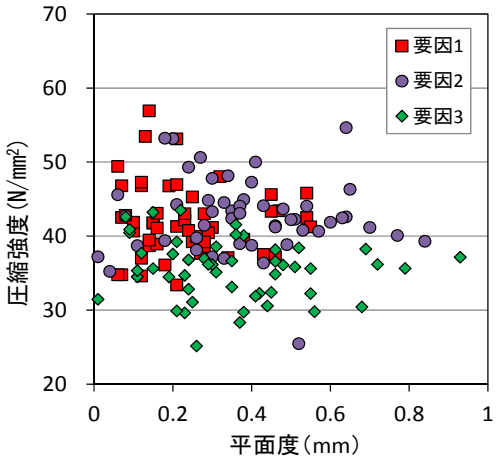
図－2 に要因 1，**図－3** に要因 2，**図－4** に要因 3 のコンクリート小径コアの圧縮強度のヒストグラムと最適正規分布を示す。いずれも，変動係数は 11～12%と大きく，また，要因 1，要因 2 に比べ，テフロンシートを用いて減摩載荷を行った要因 3 の圧縮強度が小さくなっているが，いずれの分布も正規分布に近い形となっていることがわかる。これらより，小径コアの圧縮強度の分布は正規分布で表すことができる可能性があることがわかった。

3.3 圧縮強度と載荷時の平面度の関係

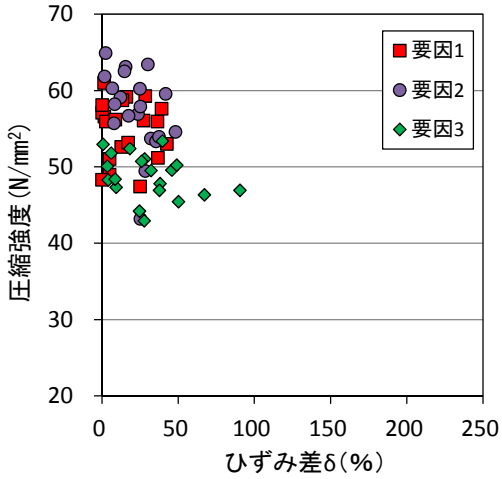
圧縮強度のばらつきに影響を及ぼす原因として載荷時の偏心があり，偏心に影響する要因の一つに平面度が挙げられる。JIS A 1132 では「載荷面の平面度は直径の 0.05%以下」とされている。JIS 規定に準拠する場合，φ25mm の小径コアで許容される平面度の誤差は 0.013mm



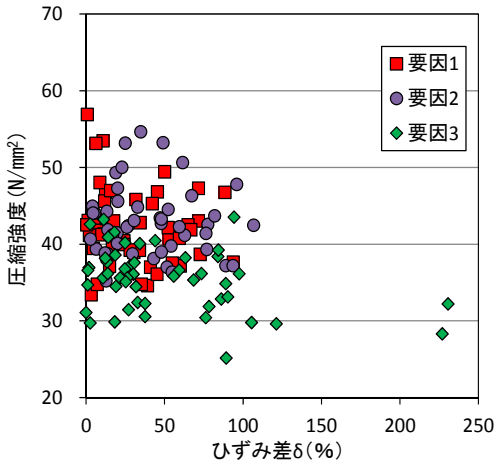
図－5　モルタル小径コアの圧縮強度と平面度の関係



図－6　コンクリート小径コアの圧縮強度と平面度の関係



図－7　モルタル小径コアの圧縮強度とひずみ差の関係



図－8　コンクリート小径コアの圧縮強度とひずみ差の関係

以内であり，このような精度での端面成形は困難である。そこで，本研究では供試体軸方向と供試体端面をほぼ直角に，また両端面の平面度の許容誤差を 1mm 以内と設定した上で供試体を端面研磨機にて成形し，小径コア両端面の平面度が圧縮強度のばらつきに及ぼす影響について要因 1，要因 2，要因 3 に基づき検討を行った。

図－5 はモルタル小径コアの圧縮強度と平面度の関係を，**図－6** はコンクリート小径コアの圧縮強度と平面度の関係を示す。**図－5** において平面度が 0.6mm より大きくなると圧縮強度が低下する傾向が弱いながらも読み取れるが，**図－6** に示すコンクリート小径コアの圧縮強度と平面度の関係においてはそのような傾向は見られない。これより，平面度が 1mm 以内であれば，平面度が圧縮強度に及ぼす影響は大きくないと考えることができる。

3.4 圧縮強度と載荷時の偏心の関係

偏心載荷が圧縮強度に与える影響を考察するために，偏心の影響を圧縮終局時のひずみを用いて式(1)に示すように数値化することを試みた。圧縮強度試験の最大応力時における 2 枚のひずみゲージのひずみ値の差をひずみ差 δ とし式(1)のように定義した。

$$\delta = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{\bar{\varepsilon}} \times 100(\%) \qquad (1)$$

ここに，δ：ひずみ差（%）

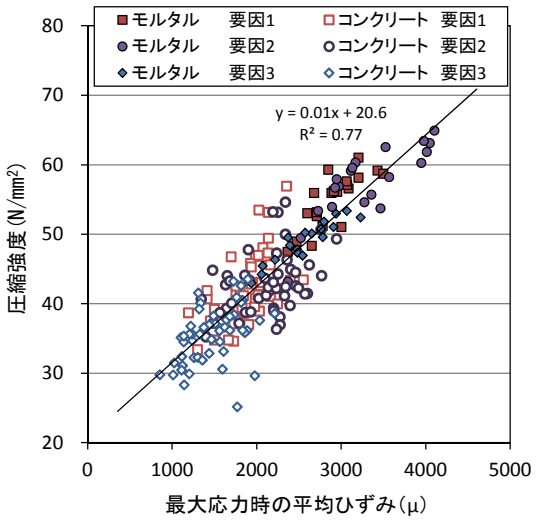
ε_1：最大応力時のひずみ 1

ε_2：最大応力時のひずみ 2

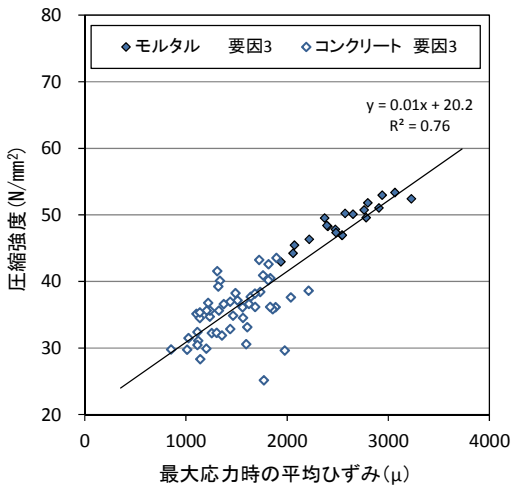
$\bar{\varepsilon}$：最大応力時の平均ひずみ

図－7 にモルタル小径コアの圧縮強度とひずみ差 δ の関係を，**図－8** にコンクリート小径コア圧縮強度とひずみ差 δ の関係を示す。**図－7** および**図－8** から，コンクリート小径コアのひずみ差 δ の分布範囲は，モルタルのそれと比べ広いことがわかる。また，粗骨材の影響のないモルタル小径コアにおいても，同程度のひずみ差 δ で圧縮強度にばらつきが発生することが確認された。また，コンクリート小径コアにおける要因 3 ではひずみ差 δ が大きいほど圧縮強度が低くなる傾向が若干見られるものの，要因 1 と要因 2 についてはひずみ差と圧縮強度の関連性は確認されなかった。

これより，偏心載荷は圧縮強度に及ぼす影響が多少あると考えられるが，式(1)で定義したひずみ差 δ のみでは圧縮強度のばらつきを説明できないことがわかった。



図－9　小径コア（モルタルおよびコンクリート）の圧縮強度と最大応力時の平均ひずみの関係



図－10　小径コア要因 3 の圧縮強度と最大応力時の平均ひずみの関係

3.5 圧縮強度と最大応力時のひずみの関係

図－9 にモルタル・コンクリートの要因 1，要因 2，要因 3 の小径コア圧縮強度と最大応力時のひずみ(平均値)の関係を示す。図より，小径コアのモルタル・コンクリートの双方において，ばらつきが大きいながらも圧縮強度と最大応力時のひずみに正の相関があることがわかる。また，比較的圧縮強度のばらつきが小さかった要因 3 に着目し，**図－10** に要因 3 のみを抽出したモルタル・コンクリートの小径コア圧縮強度と最大応力時のひずみ（平均値）の関係を示す。

本実験のモルタル小径コアは，コンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルから作製しており，養生条件も同一とした。そのため，小径コアコンクリート供試体と小径コアモルタル供試体の構成材料の相違は粗骨材を含むか否かのみとなっている。ここで，**図－10** のような傾向が表れた原因として，以下のことが考えられる。

小径コアに粗骨材が含有されることによって，骨材界面が弱点となり，純モルタル供試体と比較して載荷早期に骨材界面に滑り等の部分的破壊が生じ，ひずみ値が比較的小さい状態で破壊に至ったと推察される。また，小径コアコンクリート供試体では，内部の骨材分布が最大応力時のひずみに大きく影響し，そのために圧縮強度が大きくばらついたと考えられる。

4.　平均圧縮強度の取り扱いについての考察

4.1 外れ値の取り扱いについて

小径コアの圧縮強度の試験値データとして極端に大きな値や極端に小さな値を得ることが多い。そこで式(2)で表される外れ値の検定法としてのスミルノフ・グラブス検定の適用を試みた。

表－5　棄却後の圧縮強度試験結果（コンクリート）

要因	標本数	圧縮強度(N/mm²)				変動係数(%)
		平均値	最小値	最大値	標準偏差	
1	49	41.8	33.4	53.5	4.48	10.73
2	49	43.0	35.2	54.6	4.48	10.42
3	50	35.4	25.1	43.5	4.06	11.48

$$Ti = \frac{|Xi - \bar{X}|}{\sqrt{S}} \qquad (2)$$

ここに Ti：検定統計量

Xi：外れ値

$\bar{X}$：平均圧縮強度

S：不偏分散

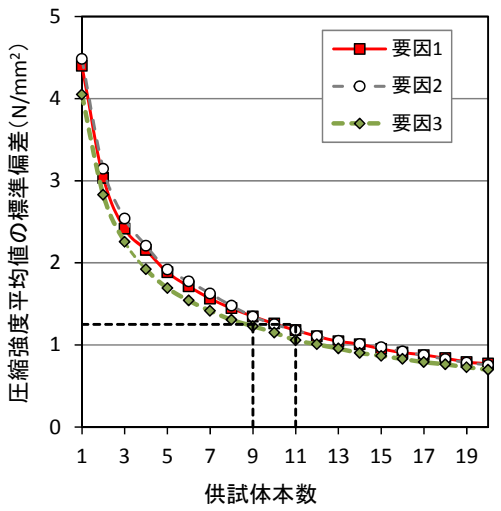
なお，スミルノフ・グラブス検定は，「小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案）」で提案されている棄却検定法である [2)]。

式(2)より得られた統計量から，決められた有意水準の検定量を超えたとき，その値は外れ値として棄却するという考え方であり，ある試験データを棄却した後，残りのデータを対象に棄却するデータがなくなるまで繰り返し検定を行う。

本研究内においては，有意水準を 5%と設定し，棄却検定を行った。**表－5** に棄却後のコンクリート小径コアの圧縮強度試験結果を示す。要因 1 の圧縮強度の最大値が 1 本，また要因 2 の圧縮強度の最小値が 1 本棄却対象となった。

4.2 モンテカルロ法を用いた圧縮強度のばらつきを抑えるために必要な供試体本数の算出

モンテカルロ法を適用し，コンクリート小径コアにより得られた各要因の 49 本もしくは 50 本の圧縮強度試験値から，重複しないようにしつつ無作為抽出を行った。供試体抽出本数は 1 本から 20 本までと設定した。この無



図－11　目標標準偏差を満足するときの必要供試体本数（モンテカルロ法を利用）

作為抽出作業を 1000 回試行し，抽出された圧縮強度試験値の平均値（1 本から 20 本まで）の標準偏差を求めた。**図-11** に抽出供試体本数による圧縮強度平均値の標準偏差と，抽出した供試体本数の関係を示す。

ここで，許容誤差範囲を 5.0N/mm^2，つまり小径コアの圧縮強度の平均値から±2.5N/mm^2 とし，小径コアによる圧縮強度試験結果が正規分布に則ると仮定すると，平均値 μ，標準偏差を σ としたとき，有意水準を 5%ととった時の信頼区間は約 $\mu \pm 2\sigma$ となる。すなわち，σ=1.25 のとき，95%の確率で平均値から±2.5N/mm^2 以内の圧縮強度の平均値が得られるになる。

図－11 より，要因 1，要因 2 が σ=1.25 となるのは約 11 本の時である。要因 3 については圧縮強度のばらつきが比較的小さかったため，同精度に必要な供試体本数は 9 本となった。また，このときの要因 1 および要因 2 の小径コアの圧縮強度は ϕ100mm 試験体の圧縮強度の 85～87%となった。

なお，本論文による必要供試体本数の算出は本研究内の限られた供試体条件による結果であるため，今後更なるデータの蓄積が望まれる。

5.　結論

以上，示した実験結果より以下の結論を得た。

(1) 小径コアにおいて発生する強度試験のばらつきは，粗骨材やモルタル部などの材料の不均質性から発生するものと考えられる。

(2) モルタル，コンクリートともに小径コア圧縮強度試験値のばらつきは正規分布に従うことがわかった。

(3) 小径コアの平面度が 1mm 以内であれば圧縮強度に及ぼす影響は小さいことが確認された。

(4) 偏心の影響を数値化したひずみ差 δ と圧縮強度の間には明確な相関関係は見られなかった。

(5) 供試体個々の内部骨材のばらつきは，最大応力時の平均ひずみや圧縮強度試験値に影響する可能性がある。

(6) 本研究内においては，小径コアの圧縮強度を求めるために必要な供試体数は 11 本以上と算出された。その際，小径コアの圧縮強度は ϕ100mm コアの圧縮強度に比べて 85～87%となると計算された。

参考文献

1) 国土交通省大臣官房技術調査課：微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領（案）（解説），2009.4

2) （株）銭高組，前田建設工業（株），日本国土開発（株），（独）土木研究所：小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006.5

3) 若林信太郎ほか：小径コアによる構造体コンクリートの強度の推定方法に関する研究（その 1 小径コア供試体の圧縮強度試験結果），日本建築学会構造系論文集，第 555 号，1-8，2002.5

4) 若林信太郎ほか：小径コアによる構造体コンクリートの強度の推定方法に関する研究（その 2 構造体コンクリート強度推定式の設定），日本建築学会構造系論文集，第 561 号，9-16，2002.11

5) 佐原晴也他：試験方法の違いが小径コアの圧縮強度に及ぼす影響，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，pp1105-1106，2006

6) K.Omine, H.Ochiai, N.Yasuhuku, N.Hayashi：Evaluation of the size effect on the strength of cement-treated soils, The Geotechnics of Hard Soils，Vol.2，pp.751-760，1998.10

7) 谷川恭雄，山田和夫：コンクリートの圧縮強度の寸法効果について，日本建築学会論文報告集，pp13-21，第 262 号，1977.12

8) 清水厚年ほか：コアの寸法の違いによる試験値の差に対する各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，2008.7

9) 大池武，川口徹：直径の異なるコア供試体の強度試験結果の信頼性に関する検討，日本建築学会技術報告集，第 15 号，pp.43-46，2002.6

10) 小坂義夫ほか：各種の減摩材を用いた場合の圧縮供試体端面の応力分布について，コンクリート工学年次論文集，Vol.2, No.1, pp.121-124, 2001.6

11) 改定新版コンクリート工学ハンドブック，岡田清，六車熙，朝倉書房，pp.378-379