

報告 強度試験条件が圧縮強度へ及ぼす影響に関する一考察

藤野 由隆*1・伊藤 隆紘*2・玉滝 浩司*3・伊藤 智章*4

要旨：コンクリートの圧縮強度は、強度試験機や供試体の諸条件によって、強度低下やばらつきが増加することなどが知られている。本検討では、超高強度モルタルを用いて、試験機の剛性、設定および供試体の諸条件が強度に与える影響を調査した。その結果、超高強度モルタルの場合は、試験機の剛性を 700kN/mm 以上とし、載荷速度を 0.6N/mm²/sec、破断時に自動で荷重が除荷されない設定にすることで、正しい試験値が得られることが分かった。また、供試体の諸条件では、供試体の打込み面および底面を研磨することで、強度低下の抑制に加え、供試体間のばらつきも小さくできることがわかった。

キーワード：超高強度モルタル、試験機剛性、載荷速度、平面度、強度差

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度試験は、高強度になるほど、強度試験機の剛性、載荷速度および球座の形状等の影響や、供試体の設置状態（偏心荷重）、端面処理および平面度等の影響によって、強度の低下や標準偏差の増加が生じることが知られている^{1), 2), 3), 4)}。一方で、近年、圧縮強度が 100N/mm² を超える補修材や超高強度セメント系材料などが開発され、粗骨材を使用していないことから、φ50×100mm の供試体を使用する場合がある。しかしながら、供試体寸法 φ50×100mm における高強度モルタルに関して、強度試験機の条件や供試体の諸条件が圧縮強度へ与える影響を調査した文献は少なく、その影響が明確ではない。そのため、本報告では、圧縮強度 130～230N/mm² の超高強度モルタルを用いて、強度試験機の剛性、載荷速度、加圧盤の大きさ、供試体寸法の違い、研磨の有無および平面度などの諸条件が圧縮強度へ与える影響について調査した。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

(1) 使用材料および配合

モルタルの配合を表-1 に示す。練混ぜ水は上水道水 (W)、セメントは中熟熱ポルトランドセメント (MC) とし、超高強度を得るためにシリカフェーム (SF) をセメントの 15% 内割置換で使用した。細骨材は超高強度コンクリートへの使用実績がある安山岩砕砂 (S)、混和剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤 (SP) を使用した。水結合材比（以下、W/B とする）は、圧縮強度が 130～230N/mm² 程度となるように、14～36% の範囲で 4 水準設定した。また、混和剤の添加率は、材料分離が生じない範囲で高い流動性が確保できるように調整した。

(2) 練混ぜ方法

モルタルの練混ぜは、室温 20±2℃ の試験室で行った。φ50×100mm の供試体の場合は、最大容量 20L のモルタルミキサ (4.5L/バッチ) を使用して練混ぜを行い、練混ぜ時間は、W/B14%, 24%, 29% および 36% の順で、それぞれ 8 分、4 分、2.5 分および 2 分とした。また、φ100×200mm (W/B14%) の供試体の場合は、二軸強制練りミキサ (40L/バッチ) を使用して練混ぜを行った。練混ぜ時間は 8 分とした。

(3) フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-2 に示す。練上りのモルタルフロー (JIS A 5201, 落下無し) を測定し、高い流動性を有し、かつ、材料分離が生じていないことを確認して供試体を成形した。なお、W/B29% および 36% の場合は、フローを 280mm 程度とした場合に分離傾向が認められたため、他の水準よりもフロー値を小さく設定した。

表-1 モルタルの配合

配合 No.	W/B (%)	目標強度 (N/mm ²)	単位量 (kg/m ³)				
			W	MC	SF	S	SP
1	14	230	220	1336	236	621	29.1
2	24	200	220	779	138	1189	10.1
3	29	170	220	645	114	1328	7.6
4	36	130	220	519	92	1457	5.8

表-2 フレッシュ性状

配合 No.	W/B (%)	供試体寸法 (mm)	モルタルフロー (mm)	モルタル温度 (℃)
1	14	φ50×100	275	27.3
		φ100×200	280	27.1
2	24	φ50×100	281	24.5
3	29	φ50×100	256	22.7
4	36	φ50×100	240	22.5

*1 UBE 三菱セメント 研究所 コンクリート研究室 生コン・特殊コングループ (正会員)

*2 UBE 三菱セメント 研究所 コンクリート研究室 生コン・特殊コングループ

*3 UBE 三菱セメント 研究所 コンクリート研究室 生コン・特殊コングループ グループリーダー

*4 UBE 三菱セメント 研究所 コンクリート研究室 室長 (正会員)

(4) 供試体作製および養生方法

供試体は、練混ぜたモルタルをプラスチック製の軽量型枠に流し込み、テーブルバイブレータで90秒加振して成形した。供試体は温度20℃の試験室内に静置し、16～24時間経過後に脱型した。脱型後の養生は、最終強度到達までの時間を短縮するため、40℃±2℃で管理された水槽内における促進養生とした。また、促進養生は図-1に示すように、1つの試験機を用いて適当な材齢で圧縮強度試験を実施し、圧縮強度の変化が2N/mm²以内に収まるまで行った。その後、圧縮強度試験に供するまで、20℃±2℃の水槽内で養生した。

2.2 強度試験機

使用した強度試験機を表-3に示す。強度試験機は、メーカーまたは最大秤量の異なる5種類の試験機を選定した。強度試験機の剛性は、既往の文献²⁾を参考にし、写真-1に示すように、ロードセル、油圧ジャッキおよび変位計を用いて、10～200kNの荷重を与えた場合の変位量と荷重の関係から算出した(図-2)。

2.3 試験水準

強度試験の水準および実施項目を表-4および表-5に示す。比較する試験項目は、試験機の剛性、载荷速度

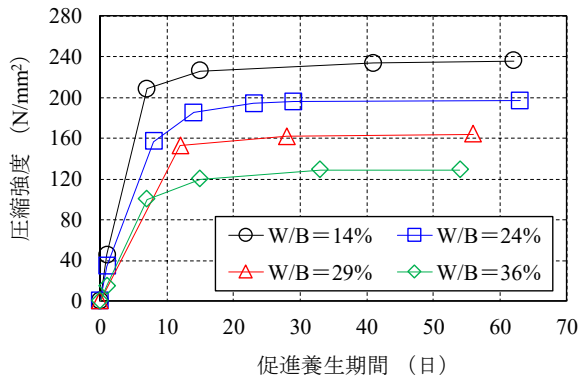


図-1 促進養生期間と圧縮強度との関係

表-3 強度試験機

試験機	最大秤量 (kN)	加圧盤寸法 (mm)	剛性 (kN/mm)
A	3000	φ220	925
B	5000	φ220	1241
C	3000	φ235	909
D	2000	φ158	703
E	1000	φ160	433



写真-1 剛性の測定状況

(0.2, 0.6, 1.0N/mm²/sec), 加圧盤と供試体の寸法比, 破断設定の有無, 供試体寸法(φ50×100mm, φ100×200mm), 供試体底面の研磨の有無(平面度)とした。加圧盤と供試体の寸法比について、加圧盤が大きくなると、球面座の長さに対する供試体直径の割合が小さくなり、供試体設置位置のわずかなずれによって偏心荷重が掛かり、強度が低くなる可能性が考えられた。そのため、加圧盤の直径が75mmの小型球座(写真-2)を用いて、小型球座を使用しなかった場合との圧縮強度の差を確認した。破断設定の有無について、最終強度到達時に爆裂が生じる場合、爆裂前の変形を試験機が感知し、最終強度到達前に荷重が除荷される可能性が懸念された。そのため、破断設定の有無による影響を確認した。平面度の測定は、わずかな気泡の凹凸などの影響を除外するため、正確な位置を定めずに、図-3に示す位置を目安に行った。なお、一部の供試体において、ひずみゲージを貼り付けて縦ひずみを測定した(図-3)。

3. 実験結果

3.1 試験機の剛性

試験機の剛性と圧縮強度との関係を図-4に示す。いずれのW/Bの場合も、試験機の剛性が900kN/mm程度までであれば試験機の剛性が高いほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。また、試験機の剛性が900kN/mmを超えた場合は、W/B24%では強度が低下しているが、その他の

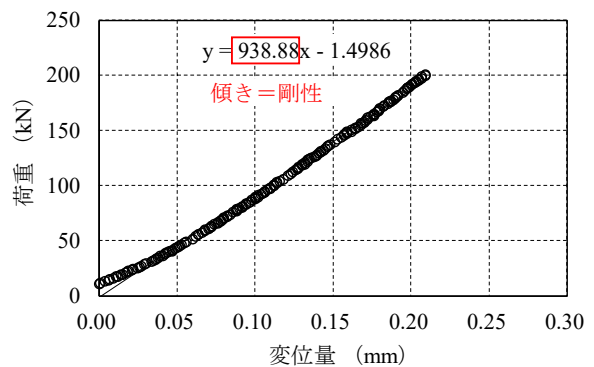


図-2 変位量と荷重の関係

表-4 試験水準

水準 No.	供試体寸法 (mm)	载荷速度 (N/mm ² /sec)	小型球座	研磨	破断設定	
1	φ50×100	0.2	無	両面	無	
2				両面	無	
3		0.6	無	片面	有	
4					無	
5				有	両面	無
6				無		
7	φ100×200	0.6	無	両面	無	

W/B では試験機の剛性 700kN/mm と同等の値であり、試験機の剛性が 700~1250kN/mm の範囲における強度差は小さいと判断できる。本検討においては、加圧盤の寸法や制御方法などは試験機特有の条件であるが、荷速度および平面度は同一条件で試験している。そのため、試験機の剛性と圧縮強度にはある程度の相関があると判断できる。このことより、圧縮強度が高い超高強度モルタル等について、φ50×100mm の供試体を用いて強度試験を実施する場合には、少なくとも剛性が 700kN/mm 以上の試験機を選定することで、試験機による誤差を低減できると考えられる。

3.2 荷速度

荷速度と圧縮強度との関係を図-5 に示す。いずれの試験機および W/B の場合においても、既往の文献⁴⁾と同様に、荷速度が速くなるほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。荷速度 0.6N/mm²/sec の強度に対する載

荷速度 0.2N/mm²/sec の強度比を図-6 に示す。荷速度 0.2N/mm²/sec の場合、荷速度 0.6N/mm²/sec に対する強度比は、試験機 D の W/B14%を除いたすべて水準において小さくなっており、いずれの試験機の場合も、W/B が大きいほど小さくなった。荷速度 0.6N/mm²/sec の強度に対する荷速度 1.0N/mm²/sec の強度比を図-7 に示す。荷速度 1.0N/mm²/sec の場合は、荷速度 0.6N/mm²/sec と同等の強度を示し、試験機の剛性および W/B による明確な差も認められなかった。これは、図-8 に示すように、荷速度 0.2N/mm²/sec の場合は、最大荷重の 70%を超えたあたりから、同一荷重におけるひずみの変化量が徐々に大きくなっており、破壊直前の荷重におけるひずみが、荷速度 1.0N/mm²/sec および 0.6N/mm²/sec の破壊直前の荷重におけるひずみよりも、W/B14%で約 200×

表-5 実施項目

水準 No.	試験機の種類および剛性 (kN/mm) ※1				
	A	B	C	D	E
	925	1241	909	703	433
1	◎	○	—	○	—
2	◎	◎	○	◎※3	◎※3
3	◎	○	○	—	—
4	○	○	○※2	—	—
5	◎	◎	○	◎※3	◎※3
6	◎	○	—	○	—
7	◎	○	○	—	—

※1 ◎は強度とひずみを測定，○は強度のみ測定。

※2 W/B14%および36%のみ実施。

※3 W/B14%および36%のみひずみを測定。



写真-2 小型球座

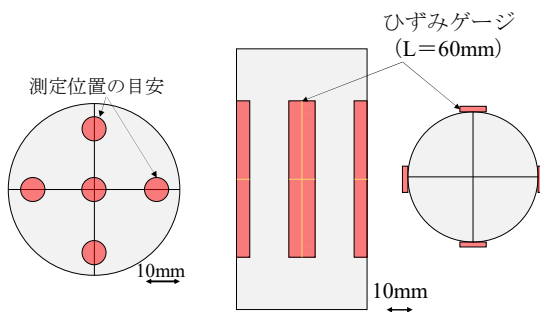


図-3 測定位置（左：平面度，右：縦ひずみ）

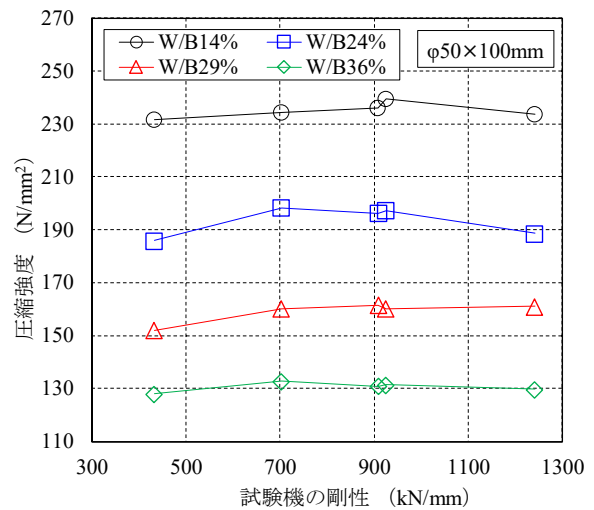


図-4 試験機の剛性と圧縮強度との関係

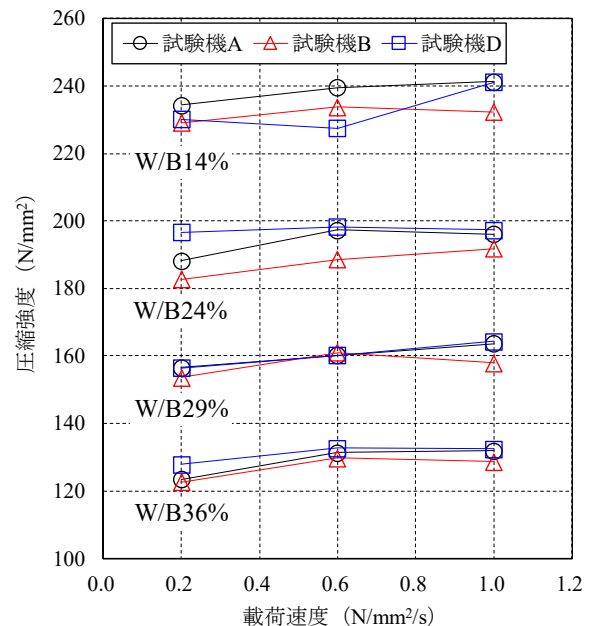


図-5 荷速度と圧縮強度との関係

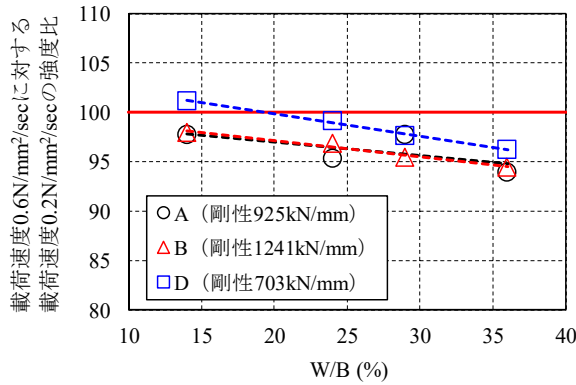


図-6 載荷速度 0.6N/mm²/sec の強度に対する
載荷速度 0.2N/mm²/sec の強度比

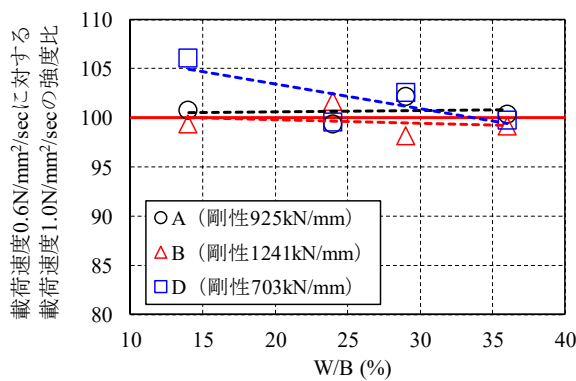


図-7 載荷速度 0.6N/mm²/sec の強度に対する
載荷速度 1.0N/mm²/sec の強度比

10⁻⁶, W/B36%で約 300×10⁻⁶ 大きくなっていることが要因として挙げられる。載荷速度が遅い場合、圧縮強度の最大値に達するまでに荷重を受けている時間が長くなるため、若干低い荷重で供試体が破断するひずみに達したものと考えられる。また、試験機 A, B および D の差は、図-2 に示すように、試験機の剛性が低いほど同一荷重における変位量が大きいため、供試体が受けるひずみに若干差が生じて、試験機 D における強度比の低下が少なくなったと推察される。W/B の影響については、一般的に W/B が大きいほど静弾性係数が小さいことから、同一荷重におけるひずみが大きい (図-8)。そのため、載荷速度が遅い場合に、W/B が大きいほど強度比の差が顕著になったと考えられる (図-6)。載荷速度は、その値を変えても同じ硬化物性が得られるのが望ましいと考えられる。載荷速度が遅い場合、強度の試験値のみでなく、破断直前のひずみにも差が生じているため、載荷速度は 0.6~1.0N/mm²/sec とすることが望ましいと考えられる。

3.3 加圧盤と供試体の寸法比および小型球座の影響

各試験機における小型球座使用時の強度比を図-9 に示す。小型球座を用いて供試体に対する加圧盤の寸法比を変えた場合、小型球座を使用したことによる圧縮強度

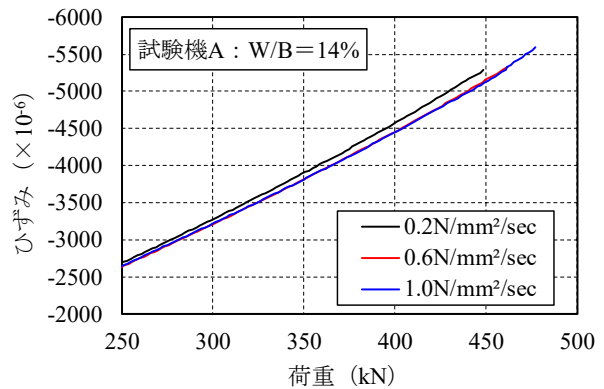
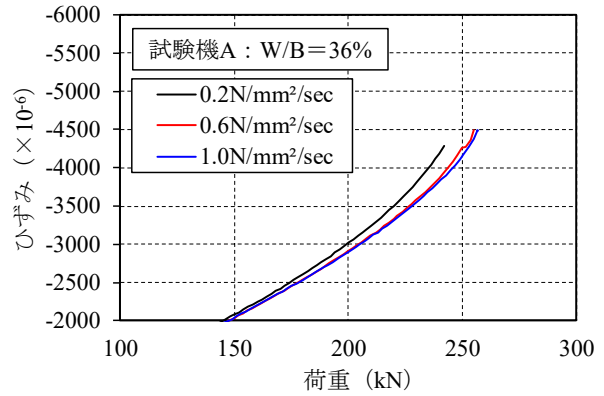


図-8 荷重とひずみとの関係
(上 : W/B=36%, 下 : W/B=14%)

への明確な影響は確認できなかった。このことより、加圧盤の球面座と供試体直径の割合が変わった場合でも、偏心荷重による試験値の低下などは生じにくいと考えられる。W/B と変動係数との関係を図-10 に示す。図-10 に示すように、小型球座を使用することで変動係数が異なる傾向が認められた。その傾向は試験機の剛性によっても差があり、剛性が 900kN/mm 以上の場合、小型球座を使用することで変動係数が大きくなる傾向を示した。一方、剛性が 900kN/mm 未満の場合は、小型球座を使用することで変動係数が小さくなった。ただし、本検討では、小型球座を使用した場合でも、試験機自体の球座の影響も含まれるため、その要因を特定できず、原因の解明には至らなかった。

3.4 破断設定の影響

破断設定は供試体の破断を感知した際に自動で荷重を除荷するための設定である。試験機 A および B では、1 秒間に「X%/フルスケール試験力値」以上の速度で指針がマイナス側に挙動した時を破壊と認識する。試験機 A は 0 ≤ X ≤ 1000 の範囲 (初期値 3) で、試験機 B は 0 ≤ X ≤ 2500 の範囲 (初期値 7) で入力できる。今回の実験は初期値で実施した。試験機 C は、基準速度電圧から破壊検知電圧を設定する仕組みであり、試験荷重電圧が下がり、破壊検知電圧と等しくなった場合に破断と認識する。

0~100目盛の範囲（通常40~60目盛）で設定でき、50目盛で試験を実施した。破断設定の有無における強度試験結果を図-11に示す。試験機Aおよび試験機Cでは、破断設定の有無による圧縮強度の差はいずれも3%未満であり、ほとんど差は生じなかった。一方、試験機Bでは、破断設定をした場合、破断設定をしなかった場合と比較して、強度が最大で12%低下した。破断設定の違いの影響について、試験機AとBのように破断を感知する仕組み、速度が同じ場合でも強度に差が生じた一方で、試験機AとCのように破断設定の仕組みが異なる場合でも破断設定の有無における強度差は同等であった。このことから、本検討の範囲では破断設定の違いによる影響は明確ではなかった。しかしながら、図-11に示すように破断設定をすると強度が低下する可能性があるため、

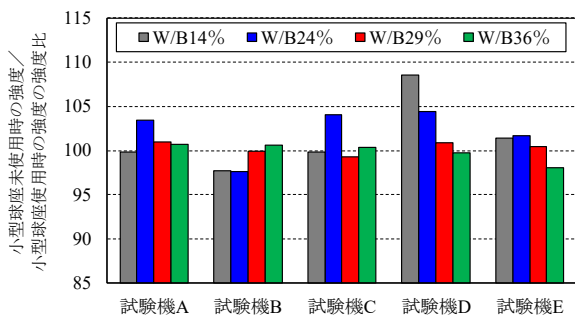


図-9 各試験機における小型球座使用時の強度比

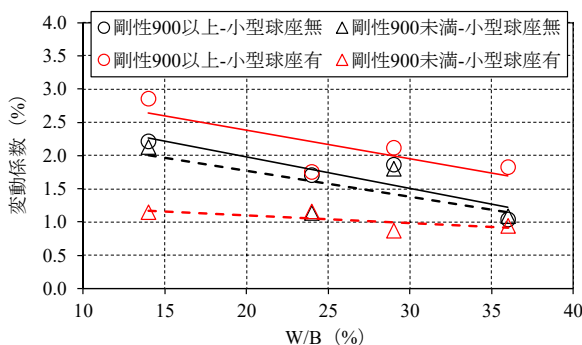


図-10 W/Bと変動係数との関係

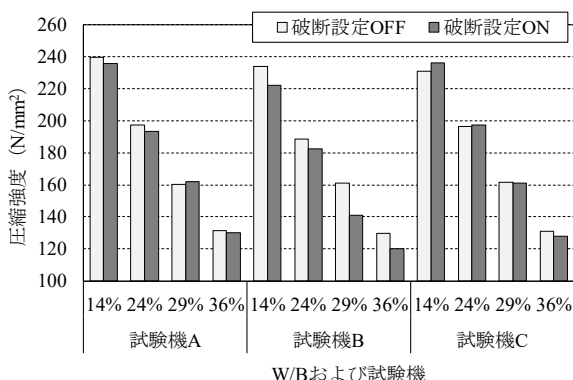


図-11 破断設定の有無における強度試験結果

超高強度の供試体の圧縮強度の測定では、破断設定を解除して、爆裂するまで载荷することが必要と考えられる。

3.5 供試体寸法の影響について

供試体寸法が異なる場合の強度試験結果を図-12に示す。強度試験は、φ100×200mmにおける最大荷重を考慮し、最大秤量3000kN以上の試験機A~Cを用いて実施した。いずれの試験機の場合も、供試体寸法が大きい場合に圧縮強度が低くなった。これは、既往の文献⁵⁾において、供試体の高さ直径比が同じ場合、供試体寸法が小さいほど強度が高く、単位容積質量が増加すると示されており、本検討においても同様の結果(図-13)が示されたと考えられる。なお、その要因については、せき板効果や、水中養生中に吸水する水分の割合の差が挙げられている。本検討はモルタル試験であり、せき板効果による影響は除外できる。また、W/Bが低いため、一般のコンクリートよりも透水係数が小さいと考えられる。このことより、供試体寸法が小さいほど、水中養生中に吸水して水和が促進される割合が多くなり、その割合の差が供試体の見掛けの密度および圧縮強度に影響を与えたと推察される。また、低W/Bであり、粘性が高いことから、φ100×200mmの場合、供試体成形時のエントラップトエアが抜けにくかったことも、φ50×100mmよりも強度が低かった要因として考えられる。JISA1107では、供試体の直径は100mm以上とされている。本実験結果の

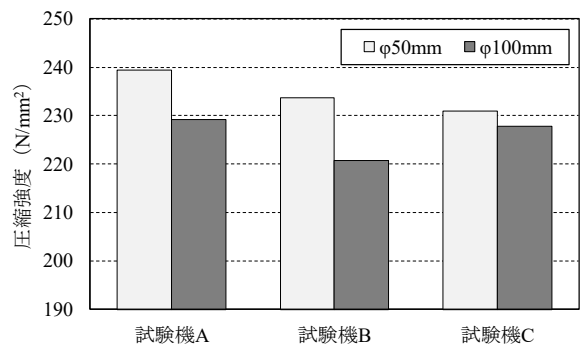


図-12 供試体寸法が異なる場合の強度試験結果

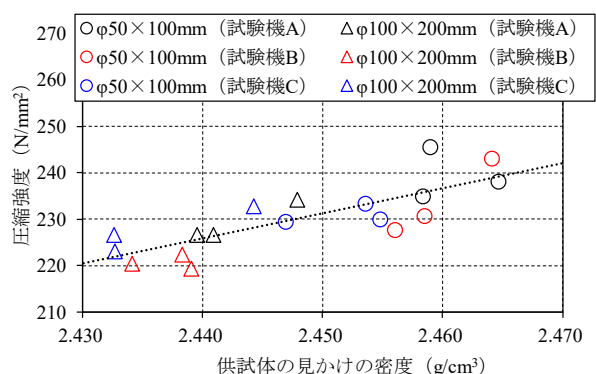


図-13 供試体の見かけの密度と圧縮強度との関係

ように、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の供試体で圧縮強度試験を実施した場合は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ よりも強度が高くなり、危険側の判断となる可能性がある。そのため、構造物に求められる条件や製造環境条件に応じて、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ で強度を管理する場合には、事前に試験練りを行って、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ との強度比を確認し、強度補正するなどの対応が必要と考える。

3.6 平面度の影響

圧縮強度に与える供試体の平面度の影響を確認するため、研磨を両面（打込み面と底面）および片面（打込み面のみ）とした場合の圧縮強度を測定した。平面度の測定は底面のみとし、測定点数は JSTM C 2105 「コンクリートの圧縮強度試験用供試体の平面度及び直角度測定方法」を参考にし、5点とした。各 W/B における平面度と圧縮強度との関係を図-14 に示す。いずれの W/B においても、両面研磨と比較して、片面研磨の方が圧縮強度は小さく、また、ばらつきが大きかった。また、図に示すように、研磨していない底面の平面度は、研磨した底面の平面度よりも大きく、測定点の半分以上が JIS A 1132 に示される平面度の許容差 0.05% (25 μm) を超えていた。底面を研磨していない供試体の圧縮強度が小さ

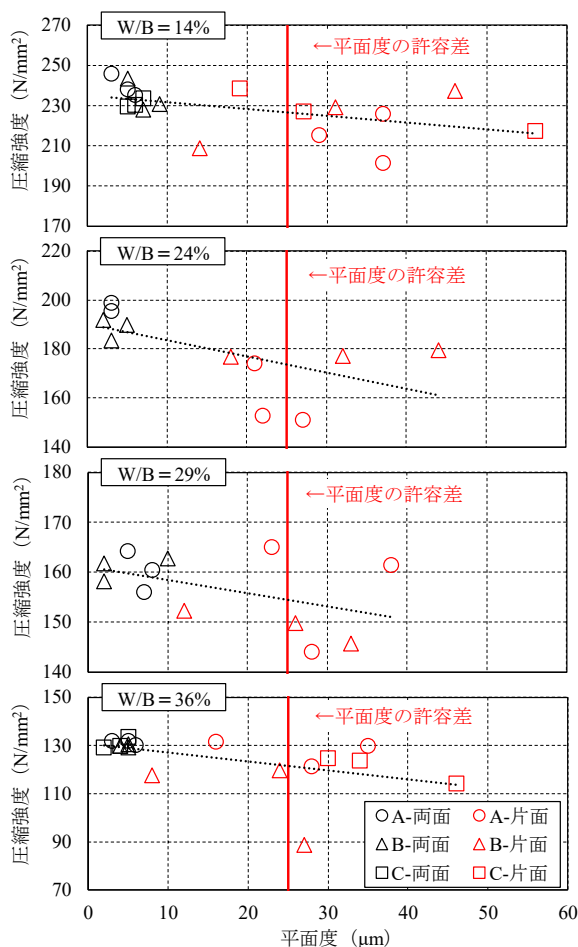


図-14 各 W/B における平面度と圧縮強度との関係

かったのとばらつきが大きくなったのは、底面の平面度が許容値を超えたことにより、偏心荷重が作用したためと考えられる。このことより、供試体の底面を研磨しない場合には、平面度が許容値を超える可能性があることから、超高強度モルタルなどについては、供試体の底面も、打込み面と同様に研磨仕上げが必要と考える。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験機の剛性が 700kN/mm 以上であれば、試験機による圧縮強度の誤差を低減できる。
- (2) 荷重速度が 0.2N/mm²/sec の場合、破断前の同一荷重における圧縮ひずみが大きくなり、荷重速度 0.6 ~ 1.0N/mm²/sec の場合よりも早く破断する可能性があるため、荷重速度は 0.6 ~ 1.0N/mm²/sec にすることが望ましい。
- (3) 剛性が 900kN/mm 未満の試験機においてばらつきが大きい場合には、小型球座などの使用によりばらつきを小さくできる可能性がある。
- (4) 破断を感知して自動で荷重が除荷されないように、試験機の設定は、破断時に自動で荷重が除荷されない設定にしておくことが望ましい。
- (5) 供試体寸法によって圧縮強度が異なる場合があるため、特に寸法の小さい供試体を用いる場合は、事前の試験練りで強度差を確認する必要がある。
- (6) 超高強度モルタルの圧縮強度試験を実施する場合は、両面研磨をすることが望ましい。

参考文献

- 1) 野口貴文: コンクリートの圧縮強度試験結果に影響を及ぼす各種試験条件, コンクリート工学, Vol.35, No.9, pp.12-17, 1997.9
- 2) 友澤史紀ほか: 高強度コンクリートの圧縮強度試験方法の標準化に関する研究 (その1 計画, 提案, 試験機の剛性の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.505-506, 1989.10
- 3) 小山善之, 早川光敬, 陣内 浩, 中村光男: 偏心荷重が超高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.675, pp.669-677, 2012.5
- 4) 岡村憲二, 流田靖博: 高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす荷重速度の影響, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.33, pp.1-4, 2010.3
- 5) 渡邊英樹, 玉井孝幸, 増田博文, 嵩 英雄: 高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1175-1180, 2006