

# 論文 300N/mm<sup>2</sup>級超高強度モルタルの圧縮試験方法に関する研究

本間 大輔<sup>\*1</sup>・原 靖宗<sup>\*2</sup>・小島 正朗<sup>\*3</sup>

**要旨**：実強度 250～350N/mm<sup>2</sup>級の超高強度モルタルの圧縮試験について直径 50mm×高さ 100mm の試験体で試験体の平面度または直角度が圧縮強度に与える影響について検討を行った。その結果、平面度が 0.01%低下すると圧縮強度で 3.1N/mm<sup>2</sup>小さくなることを、直角度が日本工業規格の 0.5 度の範囲内に納まっても直角度が 0.1° 小さくなると 11N/mm<sup>2</sup>およそ 4%圧縮強度に低下する傾向が見られた。平面度に関しては、研磨面を平滑に仕上げることができる研磨盤を使用することで改善でき、直角度に関しては試験体側面に 4 か所の変位計を設けた治具を使用して偏心状況を確認しながら試験を実施することで、信頼性の高い圧縮試験できる。  
**キーワード**：設計基準強度 300N/mm<sup>2</sup>, 超高強度モルタル, 圧縮試験方法, 平面度, 直角度

## 1. はじめに

低熱ポルトランドセメントやシリカフェーム利用技術の開発、流動性を向上させる化学混和材技術、火災時の爆裂対策技術、加熱養生技術などのコンクリートの高強度化技術の開発に伴い、超高強度コンクリートの設計基準強度は、60N/mm<sup>2</sup> から段階的に 80, 100, 150, 200, 300N/mm<sup>2</sup> と高められてきた。超高強度コンクリートは RC 造超高層集合住宅、CFT 構造の超高層オフィスビルなどの超高層建築の実現や、中低層建築物の柱や梁などを小断面化でき、空間自由度を高め、高付加価値な空間を実現する技術として展開されてきている<sup>1)</sup>。

本報では、超高強度コンクリートのセメントと細骨材からなるモルタル部分に関して、開発過程で蓄積された 300N/mm<sup>2</sup> クラスの圧縮強度試験方法について、試験体の平面度、および直角度、試験体の成形方法が圧縮強度に与える影響について検討した結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験因子と実験の組合せ

高強度コンクリートの圧縮試験方法に関する既往の研究としては、載荷面の平面度の低下が圧縮強度の低下につながることを、載荷面の傾きが圧縮強度に影響することを強度レベル 60~110N/mm<sup>2</sup> のコンクリートについて報告されている<sup>2)</sup>。そこで、本実験では、それ以上の強度レベルに対して影響を検討すべく表-1 に示す因子水準で

表-1 実験の因子水準

因子	水準
平面度	0.01~0.08%
直角度	0.1~0.7 度

実験を実施した。実験因子は平面度と直角度とし、平面度に関しては、0.01~0.08%を水準とし、直角度に関しては、0.1~0.7 度を水準として、300N/mm<sup>2</sup> クラスの試験体に対して実験を行った。

### 2.2 モルタルの調合および材料、練り混ぜ

使用材料を表-2 に示す。材料は低熱ポルトランドセメントを使用し、結合材に平均粒径 0.1 μm と 1.0 μm のシリカフェームを、細骨材には 6 号珪砂を使用した。調合は表-3 の通り、水結合材比 11.5%とした。練り混ぜはハンドミキサーを用いて行い、粉体に練り混ぜ水と混和剤を投入後、10 分間練り混ぜを行った。練り混ぜは容量 18 l のペール缶を用いて 80 分練り混ぜた。

### 2.3 試験体の打ち込みおよび養生

練り混ぜたモルタルは直径 50mm×高さ 100mm の形状の厚さ 0.22mm のブリキ製軽量型枠に 2 層で詰め、各層突き棒で 5 回つき、脱泡を行った。表面はポリ塩化ビニルシートで覆い、表面から水分が逸散することを抑制した。試験体は材齢 7 日まで 20℃封緘養生した後、昇温速度 15℃/h で 130℃まで昇温させ、130℃を 48 時間保持し、その後 20℃まで降温速度 10℃/h で降温させる加熱養生を実施した。加熱養生後には、再度 20℃の封緘養生を圧縮試験材齢の 28 日まで実施した。

表-2 使用材料

材料	種類	
結合材 B	セメント	低熱ポルトランドセメント (3.24g/cm <sup>3</sup> )
	混和材	シリカフェーム (2.2g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 S		6 号珪砂
混和剤		ポリカルボン酸系高性能減水剤

\*1 株式会社竹中工務店 技術研究所 (正会員)

\*2 株式会社竹中工務店 九州支店 (正会員)

\*3 株式会社竹中工務店 技術研究所 構造材料グループ グループリーダー (正会員)

表-3 調合

水結合材比	混和材混入率	S/B	減水剤使用率 B×	テーブルフロ	空気量
11.5%	24%	37.5%	3.5%	28±3 cm	2.5%以下

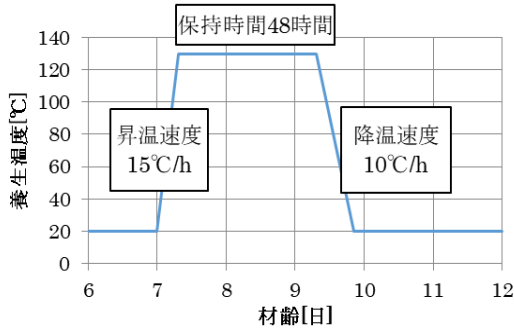


図-1 養生条件

## 2.4 試験方法

### (1) 試験体の研磨

試験体の研磨は、2種類の研磨盤を用いて実施した。研磨盤Aは、高強度コンクリート用の切削刃で切削刃と切削刃の間に溝があり研磨粉が排出しやすい構造となっている。研磨盤Bは切削刃と切削刃の間は溝のないタイプで切削で出た粉の排出は少ないものの湿式で研磨をする分には問題無く研磨が可能であるものである。図-2に各研磨盤で研磨した試験体の粗さ測定結果（断面曲線）の一例を示す。図から研磨盤Bの方が平滑であるのが明瞭であり、3個の試験体の研磨面の粗さ測定結果をもとに算出した算術平均粗さ  $Ra^3$  は研磨盤Aは  $5.9\mu m$  に対し、研磨盤Bは  $4.1\mu m$  であった。最大高さ粗さ  $Rz^3$  についても研磨盤Aは  $37\mu m$ 、研磨盤Bは  $29\mu m$  であり、研磨盤Bの方が、粗さ測定の結果からも平坦であった。

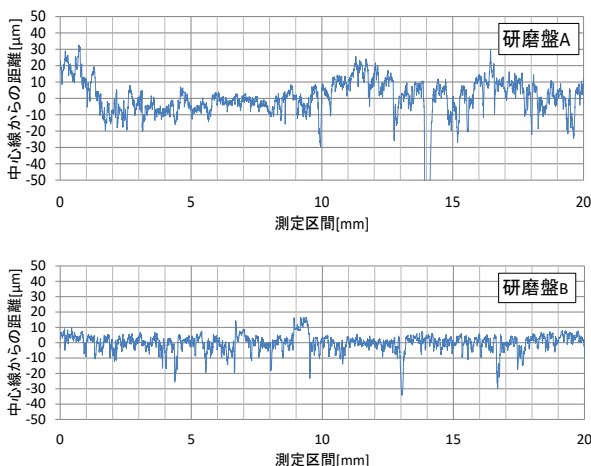


図-2 研磨盤の違いによる粗さ測定の比較（断面曲線）

### (2) 平面度、直角度の測定

試験体は圧縮試験前に、日本工業規格 JISA1107 コンクリートからのコアの採取方法および圧縮試験方法の解説<sup>4)</sup>に示されている方法を参考に平面度、直角度の測定を行った。各測定の方法を図-3、図-4に示す。

直角度の測定は、直角定規つきの精密定盤の上に試験体を載せ、直角定規に試験体を当てながら回転させ、直角定規と試験体が最も離れた時の値を隙間ゲージを用いて測定し、測定した値を供試体高さで割り正接をとり直角度とするものである。

平面度は、日本工業規格 JIS A5308 レディーミクストコンクリート<sup>5)</sup>に記載のダイヤルゲージを組みつけた平面度測定装置に試験体を載せ、日本工業規格 JIS では90度に直交する線を測線として、測線上の最大値と最小値の差を直径かで割り平面度とするものであるが、本報ではより詳細を期するため、測線は、5mmグリッドの格子状として最大値と最小値を求め平面度を算出した。平面度は、上下面の最大値を試験体の平面度とした。

表-4に参考値として試験体寸法の規準を示す。日本工業規格 JIS では、平面度の許容値として直径の0.05%以内としており、直径50mmの場合、 $25\mu m$ 以内となる。直角度の許容値は  $90\pm 0.5^\circ$  としており、高さ100mmの場合の隙間の大きさは  $0.87mm$  となる。

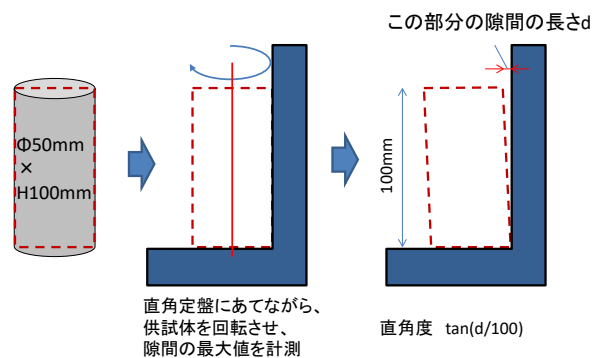


図-3 直角度の測定方法

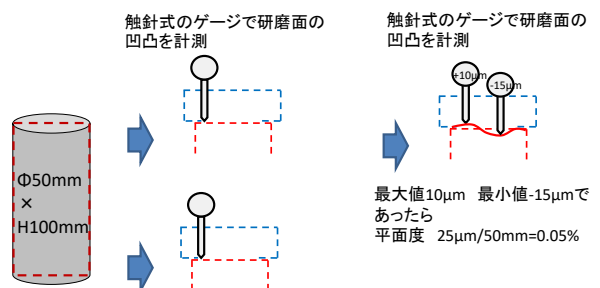


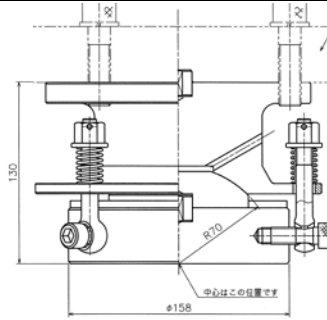
図-4 平面度の測定方法

表-4 試験体寸法の規準

	許容差 (JIS 規準)	直径 50mm×高さ 100mm の場合の計測値
直径	0.5%以内	49.75~50.25mm
高さ	5%以内	95~105mm
平面度	直径の 0.05%以内	25 μm 以下
直角度	90±0.5°	0.87mm 以下



図-5 球座の形状 (曲率半径 70mm)



(3) 圧縮試験方法

圧縮試験は、耐荷重 3000kN のアムスラー型万能試験機を使用し、荷重速度 0.6N/mm<sup>2</sup>/sec で実施した。図-5 に試験機付帯の球座を示す。球座は、試験機上部架構に吊られる形で固定されており、バネによって球座が効く形となっているが、超高強度コンクリートの圧縮試験は破壊時に爆裂破壊を生じるため、通常の強度のバネであると破壊時の衝撃で変形してしまうため、超高強度コンクリート用の試験用には変形しにくい高強度のバネを使用している。また、直径 100×高さ 200mm の圧縮試験用と兼用のため、球座の球の曲率半径が 70mm と大きく、そのため球座が効きにくいものとなっている。野口の論文では、供試体半径の 80%以上、200%以下には納まるものを推奨しているが、若干大きいものを使用している<sup>6)</sup>。

そのため圧縮試験では試験体の直角度の影響を受け偏心荷重されやすいと推察されるため、試験体には偏心荷重の状況を確認するため、試験体側面に供試体の軸に平行に、かつ前後左右 4 か所にひずみゲージを張り付け、ひずみを測定しながら実施した。

3. 試験結果と考察

3.1 フレッシュ試験結果

表-5 にフレッシュ試験結果を示す。練り混ぜたモルタルのテーブルフローの値は 295mm、空気量は 1.0% であ

表-5 フレッシュ試験結果

試験項目	試験結果
テーブルフロー	290×300mm 平均 295 mm
空気量	1.0%

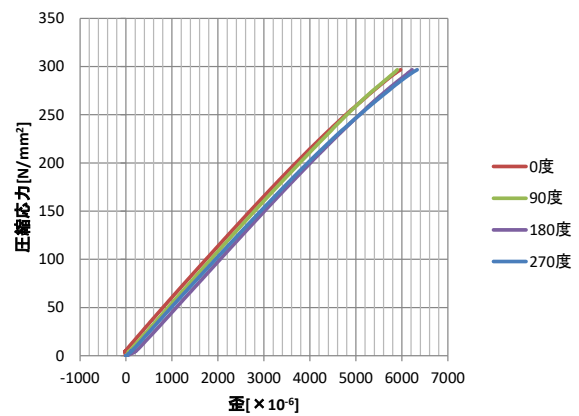
り、管理値内に入っていた。

3.2 圧縮試験結果

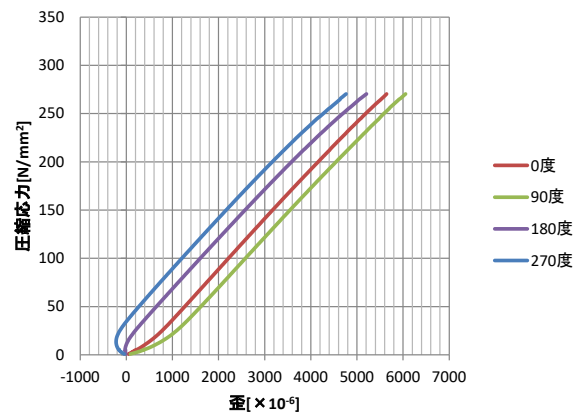
図-6 に圧縮試験結果の一例を示す。図-6.a は、試験体側面前後左右に張り付けたひずみゲージが均等に縮んでおり偏心荷重されずに圧縮試験できているものである。図-8.b は、荷重初期の段階で左側のひずみゲージが引張側に入り偏心荷重していることが推察される結果である。偏心荷重の原因は、材料が均一なものであれば、試験体の形状の影響によるものであり、直角度や平面度が影響しているものと推察される。また、本実験の応力ひずみ関係は、概ね圧縮応力 300N/mm<sup>2</sup> で圧壊するが、その際のひずみは、6000×10<sup>-6</sup> 程度であった。

(1) 平面度と圧縮強度の関係

図-7 に研磨盤 A および研磨盤 B について平面度を測定した結果を測定値とともに示す。研磨盤 B は研磨面のダイヤルゲージの最大値と最小値との差は 0~20 μm であったが、研磨盤 A は 15~43 μm であり、この値を直径で割った値の平面度(%)で表すと、研磨盤 A は JIS の規準の 0.05% 以内におよそ半分が納まっておらず、研磨盤 B は JIS の範囲内に納まっており、研磨盤 B の方が平面度が小さく平滑である結果であった。



a. 偏心荷重なし



b. 偏心荷重在り

図-6 圧縮試験結果の一例

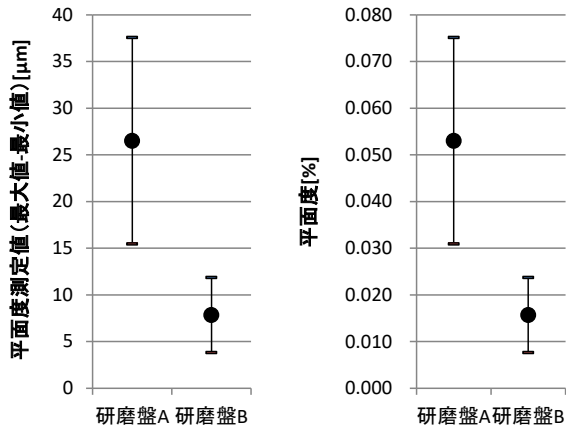


図-7 各研磨盤の平面度測定結果  
(平均値, 平均値±σ)

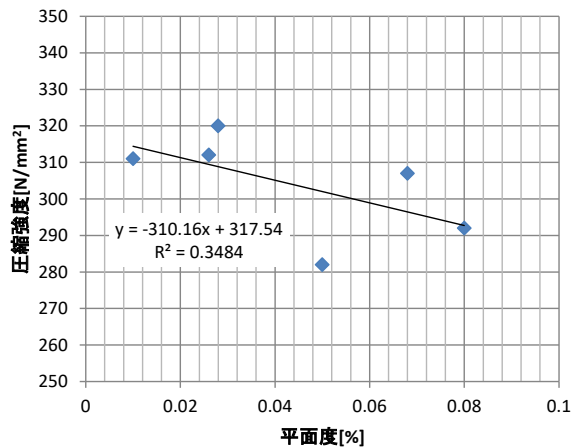


図-8 圧縮強度と平面度の関係 (n=6)

平面度が圧縮試験に与える影響を考慮するにあたって、偏心载荷されていないものを圧縮応力  $100\text{N/mm}^2$  のひずみゲージの最大歪と最小歪の差が  $500 \times 10^{-6}$  以下のものと仮定し、これについての平面度と圧縮強度の関係を図-8に示す。ばらつきが大きいものの、平面度が0.01%小さくなると圧縮強度で  $3.1\text{N/mm}^2$  大きくなる傾向が見られた。研磨盤 A と、研磨盤 B で平均で 0.037% 平面度がことなるため、圧縮強度で約  $12\text{N/mm}^2$ 、設計基準強度を  $300\text{N/mm}^2$  とした場合、強度比で約 4% 差が出る結果であった。

本試験体の高さ寸法が  $100\text{mm}$  であるので、図-7 の測定値で示したように、研磨盤 A, B で平面度の測定値の差から、縦方向に平均で  $19\mu\text{m}$  の凹凸の差があると、载荷した際に、ひずみに換算すると  $19\mu\text{m}/100\text{mm}=190 \times 10^{-6}$  のひずみに相当する応力が、凸部に作用することとなる。圧壊時のひずみはおおよそ  $6000 \times 10^{-6}$  程度であり、凸部は局所的に早期に  $6000 \times 10^{-6}$  に達して、その他の部分が、 $5810 \times 10^{-6}$  程度で破壊されることが推察される。つまり、 $190 \times 10^{-6}$  分、ヤング係数が  $50000\text{N/mm}^2$  である

ので、ひずみとヤング係数から求めた力  $50000\text{N/mm}^2 \times 190 \times 10^{-6} = 9.5\text{N/mm}^2$  分強度が低くなることが推察されるが、これは実験結果とほぼ一致している。

通常のヤング係数  $30000\text{N/mm}^2$  程度のコンクリートであれば、凹凸の影響は小さくなるが、超高強度コンクリートのようなヤング係数が大きいコンクリートの圧縮試験は研磨面の影響がより大きくなることが示唆される結果であった。

## (2) 直角度と圧縮強度の関係

図-6に示したように、圧縮試験をした際に、载荷初期に側面の一部が引張側になり、その後圧縮側に入り、偏心载荷される例がある。先述の平面度の他に偏心载荷となるもう一つの原因には、直角度の影響が考えられる。平面度が0.04%以下の試験体に関して、直角度と圧縮強度の関係を調べた。図-9に直角度と、偏心载荷の度合いを表す意味で、载荷応力  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差の関係を示す。直角度が大きく、直角からのずれが

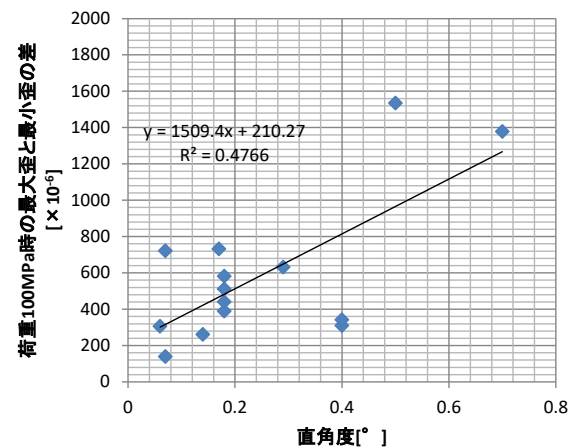


図-9 荷重  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差と直角度の関係 (n=14)

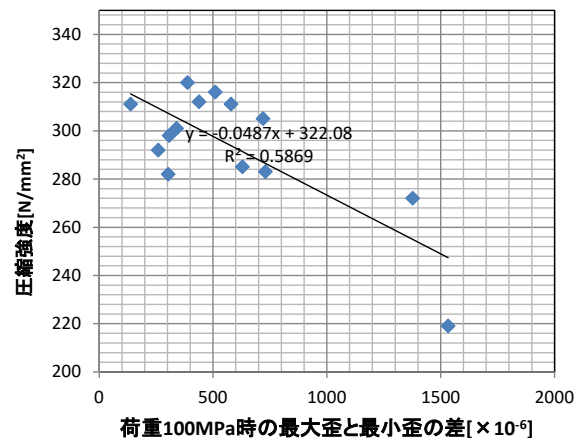


図-10 荷重  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差と圧縮強度の関係 (n=14)

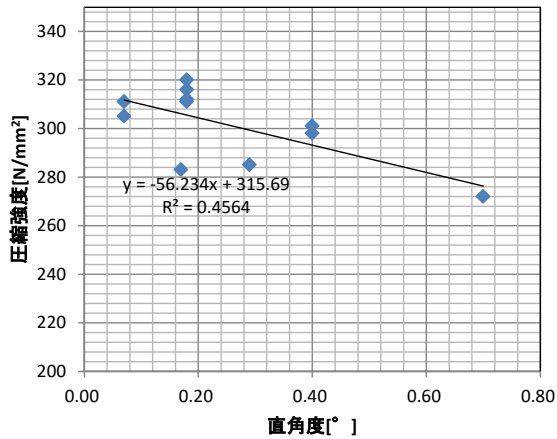


図-11 直角度と圧縮強度の関係 (n=10)



図-12 側面に変位計を4か所つけた歪測定装置

大きい程、荷重応力の  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差が大きくなり偏心荷重となりやすい結果となっていることが確認できる。

図-10 に荷重応力  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差と圧縮強度の関係を示す。ばらつきは大きいものの、荷重応力  $100\text{N/mm}^2$  時の最大歪と最小歪の差の差が大きく、偏心荷重となっているもの程、圧縮強度が小さくなる傾向が見られる。

図-11 に直角度と圧縮強度の関係を示す。直角度が大きくなり直角からのずれが大きいと圧縮強度が小さい結果となっており、本試験体は直角度が  $0.5^\circ$  の JIS 規準に概ね納まっているものも、その中で差がある結果となっていることが確認できる。圧壊時の衝撃対策で球座固定のバネを強くしていること、もしくは直径  $100\text{mm} \times$  高さ  $200\text{mm}$  の試験体兼用の球座で球座間の接触面積が大きく球座が効きにくい設定となっていることなどが影響して球座が効きにくい試験機を使用する場合は、試験体の直角度をより厳しく設定する必要がある結果であった。

### 3.3 偏心荷重への対処方法

球座の効きが悪い圧縮試験機で超高強度コンクリートの圧縮試験を実施する方法として、直角度を  $0.1^\circ$  以下まで合わせて試験を実施することが考えられるが作業時間

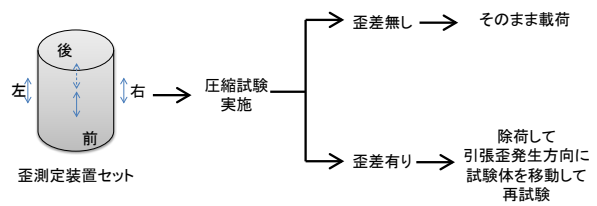
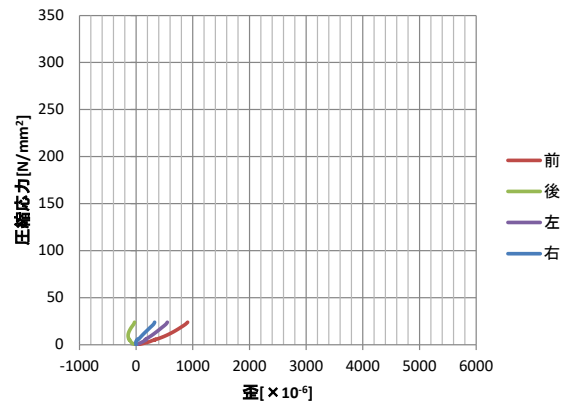
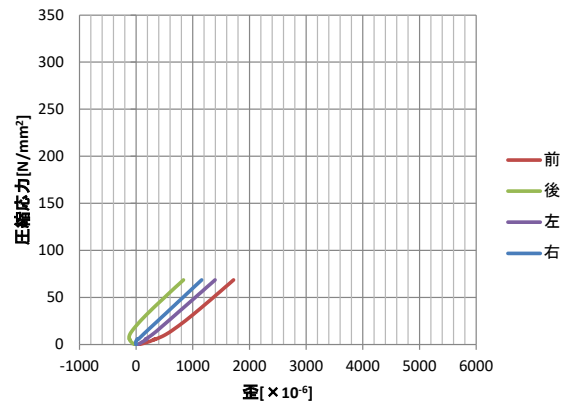


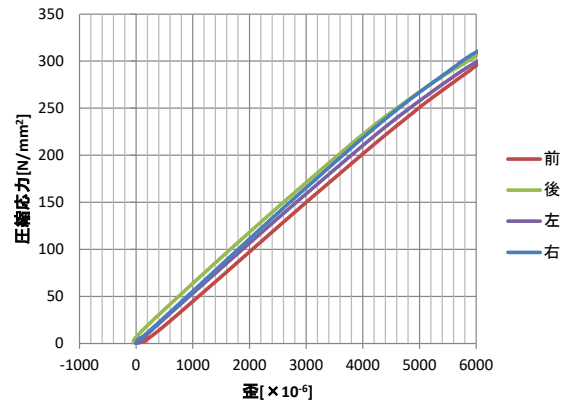
図-13 歪測定装置を用いた圧縮試験方法



a. 最初の試験結果



b. 2回目の試験結果



c. 3回目の試験結果

図-14 偏心荷重へ対処するための圧縮試験結果

が膨大となり現実的では無い。また全ての試験体にひずみゲージを4か所に張り付け、偏心の有無を確認し、偏心しているものを採用しないようにすることも作業時間およびコストの面から現実的ではない。

そこで図-12 に示す供試体の軸方向と平行に供試体側面前後左右の4か所に変位計を設けた歪計測装置を製作した。標点距離を試験体直径の1/2の50mmとして、この間の変位と標点距離から前後左右の歪を測定する。この変位計を用いた圧縮試験の方法を図-13 に、圧縮試験結果を図-14 に示す。試験体は直角度0.18°、平面度0.028%のものを用いた。図-13 に示すように、最初の試験で、引張挙動を示す変位計があった場合、その方向に偏心して載荷されているため、載荷の軸を合わせるため、試験体をずらして載荷する。図-14 の場合では、1回目で試験体の後ろ側に引張力が作用していたため、手前に少しずらして、再度圧縮試験を実施した。2回目の試験では、手前に後ろ方向の引張挙動は小さくなっているものの、まだ歪差が大きいので再度除荷し、手前に試験体を移動し再試験を実施した。3回目の試験では、ひずみ差が小さくなっていることが確認でき(図-14 c)、ひずみ測定装置を外し載荷を実施している。このようにすることで、偏心を抑えて圧縮試験を実施することができることが確認された。ただし偏心の原因は必ずしも直角度だけに由来するものだけではないので、この方法でうまく実施できない場合は違う対処方法の検討が必要である。

#### 4. まとめ

実強度250~350N/mm<sup>2</sup>級の超高強度モルタルの圧縮試験について、直径50mm×高さ100mmの試験体で試験体の平面度または直角度が圧縮強度に与える影響について検討を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 平面度が0.01%小さくなると圧縮強度で3.1N/mm<sup>2</sup>小さくなる傾向が見られた。
- (2) 直角度が日本工業規格の0.5度の範囲内に納まっても直角度が0.1°小さくなると11N/mm<sup>2</sup>およそ5%圧縮強度に低下する
- (3) 平面度に関しては、砥石埋め込み型の研磨盤を使用することで改善できる。
- (4) 直角度に関しては試験体側面に4か所の変位計を設けた治具を使用して偏心状況を確認しながら再試験を実施することで、偏心を抑制して精度の高い圧縮試験ができる。

上記知見に関しては、直径100mm×高さ200mmのコンクリートの試験においても、程度は小さくなるが同様の傾向が見られている。

#### 参考文献

- 1) 小島正朗：超高強度コンクリート，コンクリート工学，vol.54，No.5，pp.554-558，2016.5
- 2) 谷川恭雄，山田和夫，畑中重光，柴田辰正：高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度の試験方法並びに変動係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.12，No.1,1990，pp.231-236
- 3) 日本工業規格 JISB0610 製品の幾何特性仕様 (GPS) 表面性状：輪郭曲線方式-用語，定義及び表面性状パラメータ
- 4) 日本工業規格 JISA1107 コンクリートからのコアの採取方法および圧縮試験方法
- 5) 日本工業規格 JIS A5308 レディーミクストコンクリート
- 6) 野口貴文：高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する研究，東京大学博士論文，1995