

# 報告 超高強度コンクリートの圧縮試験に及ぼす供試体底面処理の影響

赤羽根 駿之介<sup>\*1</sup>・片山 行雄<sup>\*2</sup>・黒田 泰弘<sup>\*3</sup>

**要旨：** 超高強度コンクリートの強度特性を正確に把握するには、圧縮強度試験用供試体の両端研磨を行う必要があり、JISA 1132 に規定のない供試体底面の処理が重要になる。本報では、調合条件の異なる超高強度コンクリートを対象に、供試体底面の研磨条件を変え、供試体の平面度や端面の応力分布、圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について検討した。その結果、供試体の平面度は、水セメント比が低く、圧縮強度が高いほど、小さくなる傾向にあり、鋼繊維の有無の比較では鋼繊維入りの方が、幾分大きくなること、研磨条件に関しては、上面・底面とも 0.4mm/min の送り速度が適切であることなどを示した。

**キーワード：** 超高強度コンクリート、圧縮強度試験、端面研磨、平面度、圧力分布

## 1. はじめに

コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響要因としては、大きく分けて、供試体作製に関するものと試験に関するものがあり、前者については JISA 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) に、後者については JISA 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に規定がある。JISA 1132 では、供試体の寸法、器具、コンクリートの打込み、供試体の上面仕上げ、供試体の直径、高さ、載荷面の平面度、載荷面と母線との間の角度について規定している。

ところで、コンクリートの強度レベルを振って、型枠の種類や端面の処理方法を変え、供試体の寸法精度が圧縮強度試験結果に及ぼす影響について検討した既往の研究<sup>1)</sup>では、超高強度コンクリートの供試体では両端研磨を行う必要があり、JISA 1132 に規定のない底面処理が重要になることを指摘している。しかしながら、上面仕上げがコンクリートの圧縮試験結果に及ぼす影響について検討した文献<sup>例えば 2),3),4)</sup>は多くあるものの、底面処理の影響についての検討例はなく、超高強度コンクリートの正確な圧縮強度特性を把握する上で、より詳細な検討を行っておく必要があるものと考えられる。

そこで、本報では、調合条件の異なる超高強度コンクリートを対象に、供試体底面の研磨条件を変え、供試体の平面度や端面の応力分布、圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。実験要因は、調合条件と供試体底面の研磨条件とした。調合条件については、水セメント比 (W/C) と鋼繊維の有無の水準について

て検討した。また、供試体底面の研磨条件については、コンクリート圧縮試験用研磨機 (写真-1) への送り速度と回数について検討した。なお、全ての供試体上面は、著者らが供試体を研磨する際の通常の送り速度である 0.4mm/min で研磨した。

### 2.2 使用材料、調合およびフレッシュ性状

使用材料の一覧を表-2に、調合およびフレッシュ性状を表-3に示す。単位粗骨材かさ容積は、鋼繊維を混入しない No.1~3 の調合で 500m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> とし、鋼繊維を 1.0vol% (80kg/m<sup>3</sup>) 混入した鋼繊維補強コンクリートで



写真-1 研磨機 (3連式)

表-1 実験の要因と水準

| 実験の要因   |               | 水準                           |
|---------|---------------|------------------------------|
| 調合条件    | W/C (%)       | 17, 21, 27                   |
|         | 鋼繊維           | 有, 無                         |
| 底面の研磨条件 | 送り速度 (mm/min) | 0.4, 0.8, 1.2                |
|         | 研磨回数 (回)      | 1, 3* (送り速度 0.4mm/min の場合のみ) |

\*研磨中 1 分毎に供試体を 90° 回転させる方法で計 3 分間研磨 (研磨回数 1 回の場合は供試体を動かさず 3 分間研磨)

\*1 清水建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 清水建設 (株) 技術研究所 (正会員)

\*3 清水建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

表-2 使用材料の一覧

| 種類    | 記号  | 材料名               | 主な性質  |
|-------|-----|-------------------|---|
| セメント  | C   | シリカフェーム混合セメント     | 密度 3.08g/cm <sup>3</sup> 比表面積 6450cm <sup>2</sup> /g                      |
| 水     | W   | 練混ぜ水              | 水道水   |
| 粗骨材   | G   | 栃木県桜川産硬質砂岩砕石 2005 | 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.63%, 実積率 61.3%                         |
| 細骨材   | S   | 栃木県桜川産硬質砂岩砕砂      | 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.06%, 粗粒率 2.99                          |
| 化学混和剤 | HSP | 高性能減水剤            | ポリカルボン酸系 (収縮低減タイプ)  |
| 繊維    | PP  | ポリプロピレン繊維         | 繊維長 10mm, 直径 0.05mm, 比重 0.91g/cm <sup>3</sup> , 引張強度 350N/mm <sup>2</sup> |
|       | PA  | ポリアセタール繊維         | 繊維長 10mm, 直径 0.04mm, 比重 1.41g/cm <sup>3</sup> , 引張強度 100N/mm <sup>2</sup> |
|       | SF  | 端部フック型鋼繊維         | 繊維長 30mm, 直径 0.62mm, 比重 8.4g/cm <sup>3</sup> , 引張強度 1339N/mm <sup>2</sup> |

表-3 調合およびフレッシュ試験結果

| No. | W/C (%) | 単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |     |     |    | HSP 添加率 (%) | フレッシュ試験結果 |              |         |         |
|-----|---------|---|--------------------------|-----|------|-----|-----|-----|----|-------------|-----------|--------------|---------|---------|
|     |         |   | C                        | W   | S    | G   | PP  | PA  | SF |             | スランプ (cm) | スランプフロー (cm) | 空気量 (%) | 温度 (°C) |
| 1   | 27      | 500   | 574                      | 155 | 897  | 795 | 2.0 | -   | -  | 1.10        | 19.5      | 32.0         | 2.4     | 17      |
| 2   | 21      | 500   | 738                      | 155 | 756  | 795 | 2.0 | -   | -  | 1.20        | -         | 46.9         | 2.4     | 18      |
| 3   | 17      | 500   | 912                      | 155 | 607  | 795 | -   | 3.1 | -  | 1.45        | -         | 53.7         | 1.8     | 19      |
| 4   | 21      | 300   | 738                      | 155 | 1072 | 477 | 2.0 | -   | 80 | 1.45        | -         | 42.9         | 2.6     | 19      |
| 5   | 17      | 300   | 912                      | 155 | 923  | 477 | -   | 3.1 | 80 | 1.80        | -         | 50.0         | 2.3     | 21      |

300m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。超高強度コンクリートの空気量の目標値は水セメント比によらず、2.0%とした。また、スランプフローの目標値は、No.2, No.4 の調合で 50cm とし、No.3, No.5 の調合で 60cm とした。また、No.1 の調合についてはスランプの目標値を 21cm とした。

表-3 に示す通り、フレッシュコンクリートの試験結果は、いずれも目標値をクリアしていた。なお、圧縮強度用試験体は全て鋼製型枠 (φ100×200mm) に採取した。

2.3 試験項目および方法

(1) 平面度

標準養生の材齢 3 週目に、供試体の研磨を行った際、研磨後の供試体端面の平面度の測定を実施した。

測定点は図-1 に示す 17 点とし、平面度測器具 (ダイヤルゲージの測定精度 1/1000mm) を用いて行った。JIS A 5308 付属書 E では、平面度は外周部の直行する 4 点と中心の高さにより算出する。しかし、本報では、既往の研究<sup>1)</sup>の測定方法を参考に、さらに 45° 傾けた 4 点を加えた計 8 点から平面度を算出した。平面度は JIS A 5308 付属書 E に記載の方法にて、測定点①, ⑩, ⑫, ⑭, ⑯ から計算した値と、測定点①, ⑪, ⑬, ⑮, ⑰ から計算した値のうち、値が大きい方を採用した。また、平面度

の標準偏差を式(1)で算出した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|X_i| - \mu)^2}{n}} \tag{1}$$

ここで、

σ: 平面度の標準偏差

n: 測定点数(17点)

|X<sub>i</sub>|: 各測定点の測定値の絶対値

μ: 全測定点|X<sub>i</sub>|の平均値

(2) 圧力分布

圧縮強度試験 (材齢 4 週) を行う際に、圧力分布の測定を実施した。供試体底面にかかる圧力分布は、底面の載荷面に測定範囲が 0.5-2.5MPa の圧力測定フィルムを設置し、アムスラー式圧縮試験機で供試体に 1.5N/mm<sup>2</sup> で

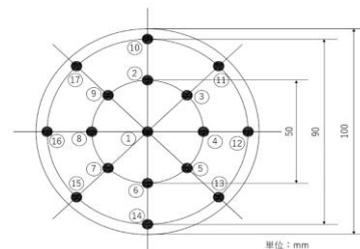


図-1 平面度標準偏差の測定点数

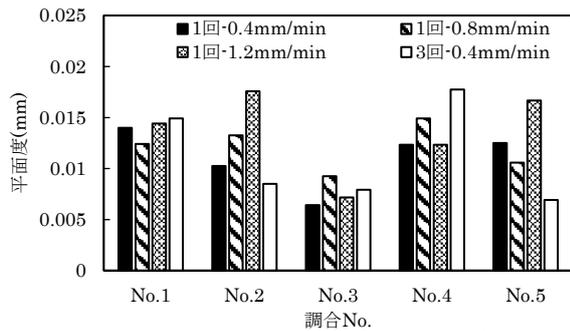


図-2 供試体底面の平面度

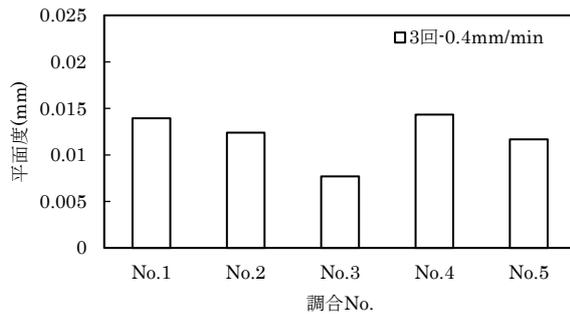


図-3 供試体上面の平面度

載荷して測定した。載荷は、供試体の圧縮応力の平均値が、フィルムの測定応力範囲の中心となつてから5秒間行った。また、研磨回数が3回の条件の供試体については、供試体上面の載荷面にも圧力測定フィルムを設置して、底面と同様に圧力分布を測定した。

さらに、研磨回数が3回の条件の供試体については、荷重を一度除荷し、測定範囲が10-50MPaの圧力測定フィルムを供試体底面に設置し直し、30N/mm<sup>2</sup>の載荷条件における圧力分布の測定も実施した。

なお、圧力測定フィルムは、基層上に発色剤層と顕色剤層が塗布されたフィルムで、圧力が作用すると、上層の発色剤層のマイクロカプセルが破壊され、その中の発色剤が顕色剤に吸着すると化学反応により発色し、圧力に応じた発色濃度が得られるものである。

### (3) 圧縮強度および静弾性係数

圧力分布の測定を終了した供試体について、JIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を行った。また、研磨回数が3回の供試体については、圧縮強度試験の際に耐破壊型のコンプレッソメータを取り付け、JIS A 1149に準拠して静弾性係数試験を行い、静弾性係数を算出した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 平面度

図-2に調合別の供試体底面の平面度測定結果を、図-3に供試体上面の平面度測定結果を、図-4に供試体底面の平面度測定結果の標準偏差を示す。また、それぞれの図に、凡例(研磨回数-研磨速度)を示した(以降、同一の凡例を示す場合は同様に表記する)。

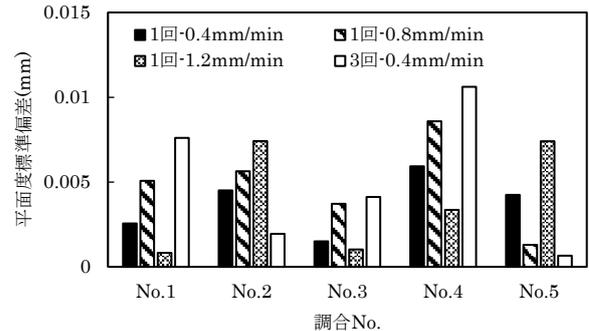
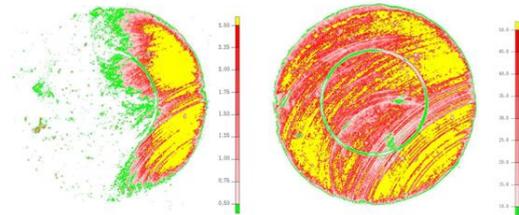


図-4 供試体底面の平面度の標準偏差



(a) 1.5N/mm<sup>2</sup> 載荷時  
基本圧力断面図  
(b) 30N/mm<sup>2</sup> 載荷時  
基本圧力断面図  
(No.3の供試体)

図-5 供試体底面の圧力分布面画像例

図-2および図-3より、平面度の測定結果はいずれもJIS A 1132の規定(直径の0.05%以内)を満たすものであった。また、同じ研磨速度0.4mm/minの条件における、上下面の平面度を比較すると、大差ない結果であった。

次に、調合条件での平面度の違いを比較すると、水セメント比が小さい方が、鋼繊維の有無によらず、平面度は小さく、鋼繊維の有無で比較すると、鋼繊維入りの方が、平面度が大きくなっている。これについては、セメントマトリックスの強度が増すほど、骨材あるいは鋼繊維との硬度の差も小さくなり、均一に研磨できるようになっているのではないかと推察される。なお、同じ研磨条件では、鋼繊維入りの方が、平面度は大きくなる傾向にあるが、骨材よりも鋼繊維の方が硬いことに起因するものと推察される。図-4に示すように、標準偏差についても同様の傾向が認められた。

また、底面の研磨条件の影響について比較すると、送り速度を速くした方が、全体的な傾向としては、平面度は大きくなったが、その差は明確ではなかった。また、複数回研磨しても、No.4の調合のように逆効果となっており、繰返し研磨しても、平面度は必ずしも向上しないことがわかった。

### 3.2 圧力分布

供試体底面の圧力分布の面画像(基本圧力断面図)の例を図-5に示す。(a)は1.5N/mm<sup>2</sup>で載荷したときの面画像であり、(b)は30N/mm<sup>2</sup>で載荷したときの面画像であ

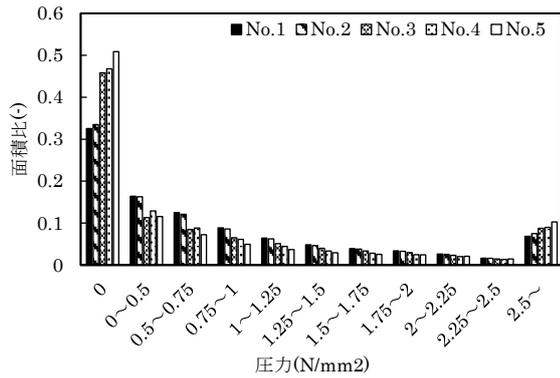


図-6 供試体底面の圧力の面積比 (1.5N/mm<sup>2</sup>載荷時)

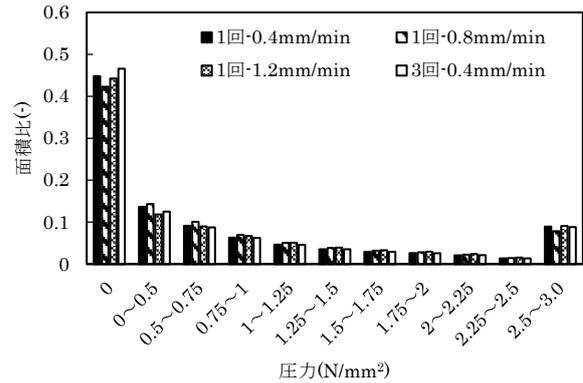


図-8 研磨条件毎の供試体底面に掛かる圧力の面積比(1.5N/mm<sup>2</sup>載荷時)

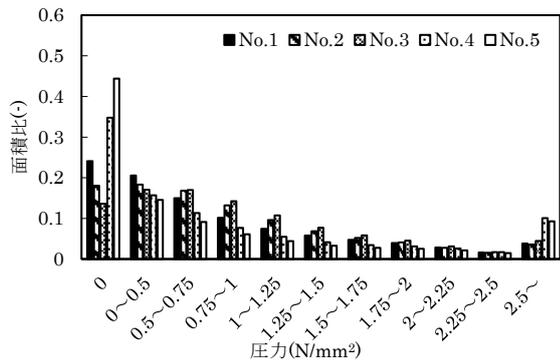


図-7 供試体上面の圧力の面積比 (1.5N/mm<sup>2</sup>載荷時)

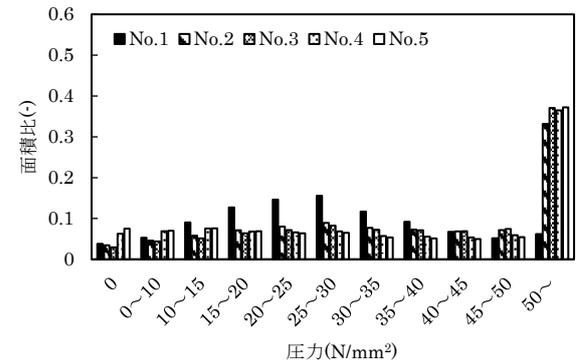


図-9 供試体底面にかかる圧力の面積比 (30N/mm<sup>2</sup>)

る。1.5N/mm<sup>2</sup>で載荷したときには、圧力がかかっていない箇所が大半で、分布が偏っているが、30N/mm<sup>2</sup>で載荷したときには、圧力のかかっている箇所が多くなり、分布の偏りが小さくなっていることがわかる。なお、どちらの画像においても中心部付近に円状に圧力の弱い部分がみられるが、これは載荷試験機の供試体設置部に5φの供試体を設置する目印として、円状の凹部を設けているためである。

また、1.5N/mm<sup>2</sup>で載荷したときの供試体底面にかかる圧力を範囲別に分類し、各範囲に該当する圧力がかかっている面積の供試体端面の面積(≒7854mm<sup>2</sup>)に対する比(以降、圧力の面積比として表記する。)を図-6に、上面にかかる圧力の面積比を図-7に示す。いずれの図も、応力のレベルを、0~2.5N/mm<sup>2</sup>超の11段階に分けて、圧力の面積比を示したものである。

上面と底面の圧力分布について比較すると、上面と比較して底面では、圧力がかかっていない面積比が相対的に大きくなる傾向がみられた。これについては、上面側の球座が載荷面の形状に合わせて角度を変えることにより、底面と比較して圧力が一様にかかるためではないかと考えられる。

次に、鋼繊維の有無で圧力分布がどのように変化するかであるが、載荷面と底面のどちらにおいても、鋼繊維

が入った No.4, No.5 の調査では、圧力がかかっていない範囲の面積比が増加していることが確認された。また、この傾向は 2.5N/mm<sup>2</sup> 超の圧力がかかっている範囲でも同様であり、鋼繊維が入ったシリーズでは圧力が不均一に分布しているといえる。これには、鋼繊維とセメントマトリックスで、圧力がかかった際の変形量が異なることや、平面度が大きいことが影響しているものと考えられる。

また、図-8に、研磨条件別の底面にかかる圧力の分布を示すが、研磨条件による顕著な差は見られなかった。

一方、30N/mm<sup>2</sup>で載荷したときの供試体底面にかかる圧力の面積比を、応力のレベルを0~50N/mm<sup>2</sup>超の11段階に分けて、図-9に示す。30N/mm<sup>2</sup>の載荷を行った場合には、強度がもっとも低い No.1 の調査を除いて、測定範囲外である 50N/mm<sup>2</sup> 超で、面積比が増加する傾向がみられ、No.1 の調査では、応力分布が正規分布に近く、50N/mm<sup>2</sup>以上の応力がかかっている面積が小さいことが確認された。No.1 の調査はほかの調査と比較し、ヤング係数が小さく、同じ 30N/mm<sup>2</sup> の荷重がかかった場合でもより変形が進んでいることが考えられる。このことから、供試体は応力の増加に伴い、底面の凹凸に起因する局所的な変形が抑えられるようになり、一定以上の応力が供試体にかかることで、応力のかかり方はある程度均一に

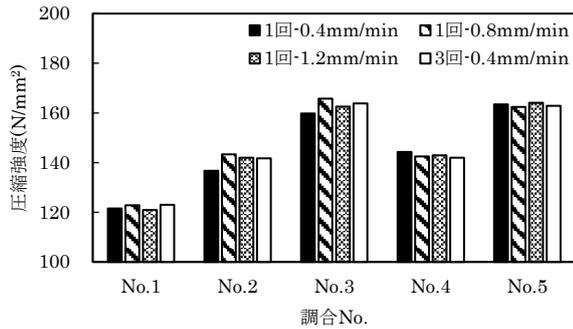


図-10 圧縮強度試験結果

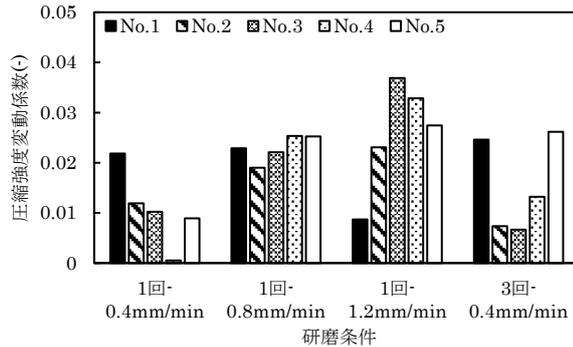


図-11 圧縮強度変動係数

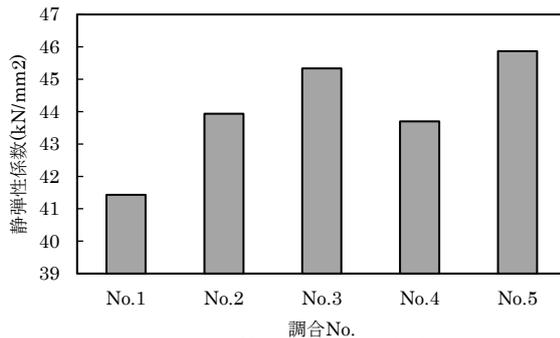


図-12 静弾性係数試験結果

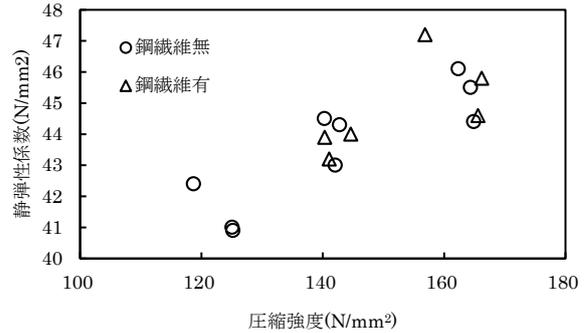


図-13 静弾性係数と圧縮強度の関係

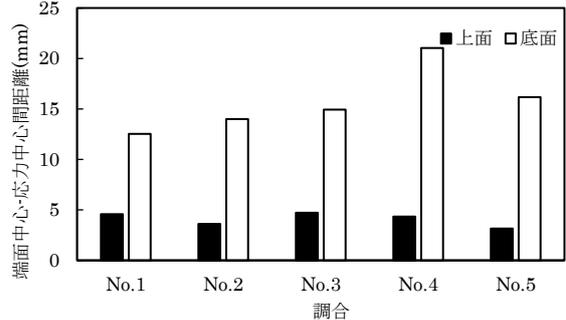


図-14 調合毎の端面中心-応力中心の距離 (1.5N/mm²載荷)

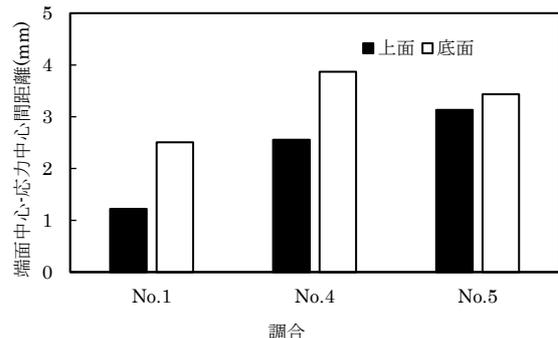


図-15 調合毎の端面中心-応力中心の距離 (30N/mm²載荷)

かかり、正規分布に近くなることが示唆された。

### 3.3 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験結果を図-10に、圧縮強度の変動係数を図-11に示す。圧縮強度には、研磨条件による差はほとんど見られないが、変動係数については、研磨速度が遅い方が小さい傾向が見られた。なお、この範囲では、鋼繊維の有無による強度差はなく、変動係数も同程度であった。

図-12に静弾性係数の試験結果を、図-13に圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。図より鋼繊維の有無による静弾性係数の差はほとんど認められなかった。

### 3.4 圧力分布と静弾性係数との関係

図-14と図-15に、それぞれ1.5N/mm²と30N/mm²で載荷した際の供試体端面(上面・底面)の中心と圧力の中心の距離(以降圧力中心位置と記す。)を示す。ここで、圧力中心位置は、面に加わる圧力の合力の作用点と供試体端面の中心点との距離として、画像解析ソフトにて算出した。

既往の文献<sup>4)</sup>では、供試体の載荷面で、供試体端面の圧力の偏りは供試体にかかる圧力が増加するにつれ減少することが報告されており、今回の検討においても、同様の傾向がみられた。また、圧力の中心と供試体端面の中心の距離は、どの調合においても上面より底面で長く、圧力の偏りは供試体の底面側でより顕著に発生していることが確認された。

圧力の中心に偏りが生じることによる問題として、供試体の変形の不均一さにより、静弾性係数等の計測結果に影響を及ぼすことが考えられる。図-16に、No.1, No.2, No.3の調合の圧力の中心と、供試体のひずみが50μmの時にかかっていた応力(以降、50μmひずみ時応力と表記する)の比の関係を示す。このとき、50μmひずみ時応力の比は、1つの供試体の50μmひずみ時応力を、同調合の50μmひずみ時応力の平均で除して算出した。

図より、より圧力の偏りが大きい供試体の底面において、圧力の中心と供試体の中心の間には若干の負の相関

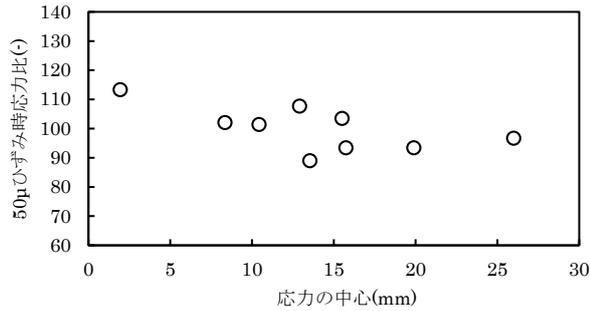


図-16 50μmひずみ時応力比-圧力中心位置の関係

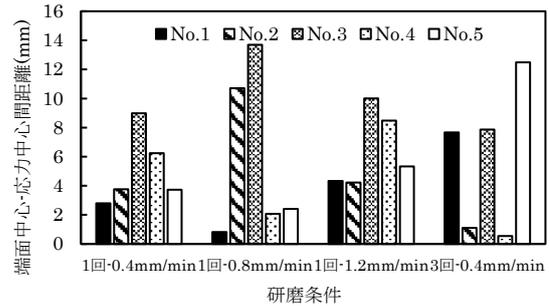


図-17 研磨条件毎の供試体の圧力中心位置

(相関係数：-0.63)がみられ、圧力の中心と供試体の中心が近いほど、50μmひずみ時応力が高くなる傾向が確認された。

50μmひずみ時応力は、JIS A 1149 にて、ヤング係数の算出に用いる値であるため、圧力の中心と供試体の中心の距離が一定でないと、静弾性係数の値の安定性が低下することが考えられる。図-17に、調合、研磨条件毎の圧力中心位置の標準偏差を示す。図より、鋼繊維を混入していない調合では、水セメント比が低いほど上述する標準偏差が大きくなる傾向がみられた。また、研磨条件で比較すると、1回-0.4mm/minの条件で研磨した供試体では、他の条件で研磨した場合と比較して圧力中心位置のばらつきがやや小さくなっていることが確認された。

このため、研磨により整形する供試体の静弾性係数試験結果は、0.4mm/minの送り速度での条件で研磨を行うことで安定する可能性があることが示された。

## 5. まとめ

超高強度コンクリートの供試体では両端研磨を行う必要があり、JIS A 1132 に規定のない底面処理が重要になる。本報では、調合条件の異なる超高強度コンクリートを対象に、供試体底面の研磨条件を変え、供試体の平面度や端面の応力分布、圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について検討した。主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 超高強度コンクリート供試体の平面度は、水セメント比が低く、圧縮強度が高いほど、小さくなる傾向にあり、鋼繊維の有無の比較では鋼繊維入りの方が、幾分大きくなる傾向にあった。
- (2) 超高強度コンクリート供試体は、研磨時の送り速度を遅くした方が圧縮強度の変動係数が小さくなる傾向がみられた。なお、上下面での平面度の差は小

さかった。

- (3) 底面の圧力分布は、1.5N/mm<sup>2</sup>と応力が小さいときには圧力のかかっていない箇所が大半で、しかも偏って荷重がかかる傾向にあるが、応力が大きくなるに従って圧力のかかっている箇所が多くなり、全面にかかるようになった。なお、上下面で比較すると、上面の圧力分布の方が均一であることが確認された。
- (4) 静弾性係数のばらつきは、1回の研磨で0.4mm/minの送り速度で研磨することにより、小さくなることが示唆された。

以上より、超高強度コンクリート供試体の研磨は、上面、下面ともに、0.4mm/minの送り速度で、研磨回数を1回として研磨するとよいことが示された。

## 参考文献

- 1) 河上浩司, 黒田泰弘, 片山行雄, 西田浩和：型枠種類と端面処理が供試体の寸法精度および圧縮強度に及ぼす影響（その1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp.899-902、2018.9
- 2) 野口貴文, 友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす供試体の上面処理方法の影響、日本建築学会構造系論文集、Vol.475号、pp.1-7、1995.9
- 3) 松村仁夫, 黒井登起雄：供試体の表面仕上げ方法がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.64、pp.169-176、2010
- 4) 藤木諒承, 畑中重光, 三島直生：コンクリートの圧縮試験における供試体上端面の圧力分布と縦ひずみに及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、Vol.83、No.749、pp.935-942、2018.07