

論文 直径と高さ直径比が異なるモルタル供試体の圧縮強度試験における破壊進展状況に関する研究

瀬古 繁喜*1・麓 隆行*2・裏 泰樹*3・山田 和夫*4

要旨：直径が 100mm と 50mm で、高さ直径比(h/d)を 1.0 および 2.0 としたモルタルの円柱供試体を作製し、圧縮強度試験を行う中で、載荷中のみかけの横方向ひずみの分布状況の推移と載荷中の供試体内部の変形状況を X 線 CT 装置により測定した。直径 50mm の場合には、h/d によらず圧縮強度はほぼ同じ値となった。直径 100mm の場合に比べると、直径 50mm で h/d=1.0 では必ずしも端面の変形拘束がみられない場合があり、h/d=2.0 では局所的に横方向へ広がる変形がみられた。X 線 CT の結果では、h/d によらず外側へ開こうとする変形の傾向は同じであり、これらが h/d によらず強度がほぼ同じであったことと関係している可能性がある。
キーワード：モルタル、供試体直径、高さ直径比、圧縮強度、X 線 CT、粒子追跡流速測定法

1. はじめに

構造体からコアを採取して圧縮強度を確認する場合、直径に対する高さの比が 1.90 以下となる供試体では、高さ直径比（以下、h/d）が 2.00 の場合に比べて得られる圧縮強度が高くなることが知られている。JIS A 1107(コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法)-2012 では h/d が 1.90 以下となる供試体で得られた圧縮強度を h/d が 2.00 の場合に相当するように圧縮強度を割り引く補正係数が示されている。

著者らはこれまで、圧縮強度試験における載荷中の横方向ひずみの分布状況の推移の測定や供試体の破壊状況の高速度撮影、あるいは AE 発生源の分布の推移や AE パラメータ解析などの検討を行い、h/d が小さいコンクリート供試体において圧縮強度が高くなる原因を解明しようとしたが未だ明らかとなっていない^{1),2)}。

本報では、直径を 100mm および 50mm としたモルタルの円柱供試体を作製し、h/d を 1.0 および 2.0 として圧縮強度試験を行い、載荷中のみかけの横方向ひずみの分布状況の推移を測定すると併せて、載荷中の供試体内部の変形状況を X 線 CT 装置³⁾により測定した。ここでは、得られた圧縮強度に対する供試体寸法の影響および高さ直径比の影響を検討した結果を述べる。なお、モルタルの目標強度は 30N/mm² とした。

2. 実験の概要

2.1 モルタルの使用材料と調査

(1) モルタルの使用材料

モルタル供試体に使用した材料を表-1 に示す。基本的には一般的な材料であるが、外割りで混入した銅スラ

グ細骨材は、X 線 CT 装置で撮影したときのマーカーとして変形による骨材の移動を追跡するためのものであり、天然の骨材よりも密度が高いものとして使用した。

表-1 モルタルの使用材料

種類	名称・産地	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント(T社)	密度3.16g/cm ³
水	地下水	1.00g/cm ³
細骨材(1)	山砂(愛知県豊田市)	表乾密度2.55g/cm ³ , 粗粒率2.80
細骨材(2)	銅スラグ細骨材(M社 CUS2.5)	表乾密度3.49g/cm ³ , 粗粒率2.48
化学混和剤	AE減水剤(T社)	変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体, 密度1.10g/cm ³

(2) モルタルの調査

モルタルの調査は、あらかじめ試験練りを行って決定した。モルタルの質量調査を表-2 に示す。なお、銅スラグ細骨材は外割りで混入し、モルタルの容積 100 に対して銅スラグ細骨材の容積 3 となる割合とした。

表-2 モルタルの調査

目標強度(N/mm ²)	水セメント比(%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材(1)	細骨材(2)	AE減水剤
30	62.2	280	450	1447	104	2.25

※ 細骨材(2)は外割りで混入した。

2.2 供試体の作製方法

(1) モルタルの練混ぜ・型枠への打込み・養生

モルタルは、容量 60 リットルのシャフトレスミキサー

*1 愛知工業大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻 (学生会員)

*4 愛知工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

用い、1バッチの練混ぜ量を30リットルとして練り混ぜた。ミキサから排出したモルタルは、フレッシュ性状の試験を行った後で円柱供試体を採取した。円柱供試体はφ100mm×h200mmとφ50mm×h100mmのプラスチック製型枠を使用し、JIS A 1132に従って作製した。供試体は材齢1日で脱型し、材齢14日まで標準養生した後、各々の試験の実施までの間（試験実施材齢29日～43日）は気中養生とした。供試体の高さを調整するための切断と端面の研磨は標準養生の間で実施した。供試体側面へのひずみゲージの貼付けは、気中養生の間で実施した。

(2) 供試体の加工方法

円柱供試体は、図-1に示す寸法で切断と研磨を行った。図中のカッコ内の数値は、直径が100mmの供試体の場合を示す。切断は湿式の高速カッターで行い、両端面の研磨は研磨機を用いて行った。

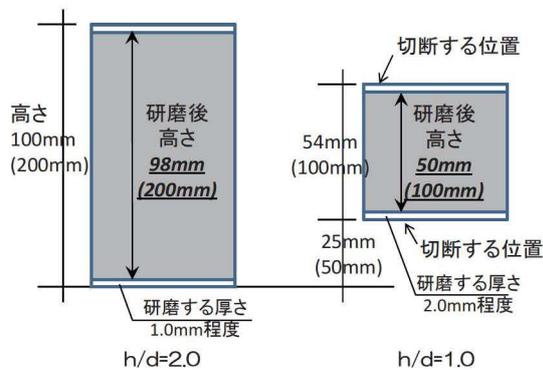


図-1 供試体の切断と研磨の寸法

研磨と標準養生を終えた供試体のうち、横方向のひずみを測定するために供試体の側面にひずみゲージを貼り付けた位置を図-2および図-3に示す。直径50mmの供試体では検長60mmのひずみゲージを用い、直径100mmの供試体では検長90mmのひずみゲージを用いた。なお、直径100mmでは縦方向のひずみも測定した。

円柱供試体で測定した各項目の数量を表-3に示す。X線CT装置による撮影は直径50mmの供試体で実施しており、横ひずみを測定した供試体とは別のものである。

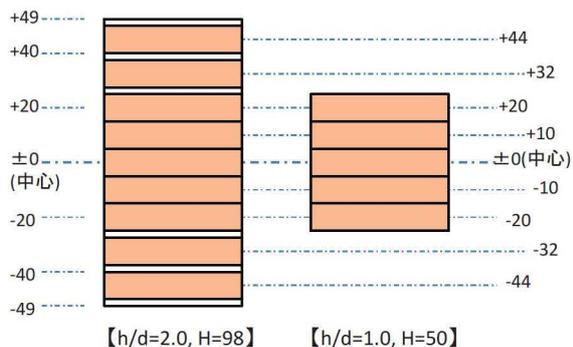


図-2 横方向のひずみゲージの貼付け位置(φ50mm)

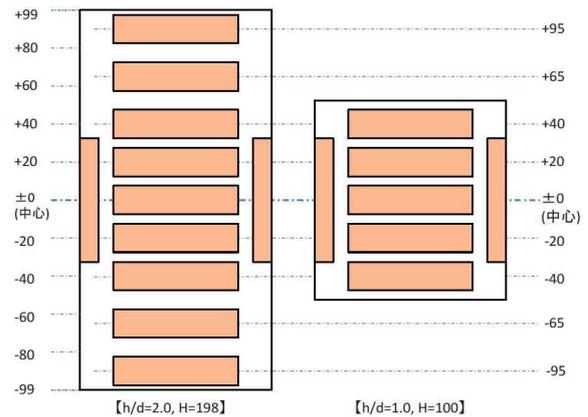


図-3 ひずみゲージの貼付け位置(φ100mm)

表-3 測定した各項目の供試体の数量

供試体の直径	高さ直径比	強度のみ	縦ひずみ	横ひずみ	縦・横ひずみ	X線CT
50mm	1.0	—	1	2	—	1
	2.0	—	1	2	—	1
100mm	1.0	2	—	—	1	—
	2.0	2	—	—	1	—

2.3 実験項目と方法

(1) 圧縮強度試験とひずみの測定

供試体の圧縮強度試験は、アムスラー型1000kN耐圧試験機を用い、JIS A 1108に従って載荷速度0.6±0.4N/mm²/secで実施した。記録した荷重データの最大荷重を断面積で除して圧縮強度を求めた。横方向および縦方向のひずみは、データロガーを用いて圧縮載荷中に渡って連続的に測定した。なお、図-2および図-3に示したひずみゲージは、図中のように手前側のほかに裏面にも同じ位置で貼り付けた。

(2) 圧縮載荷とX線CT装置による撮影

X線CT装置による撮影に先立ち、供試体の応力ひずみ関係を把握するために、直径50mmの供試体の1体に検長30mmのひずみゲージを貼り、アムスラー型1000kN耐圧試験機で圧縮強度試験を行った。その結果から、X線CT装置の撮影は、載荷開始時・縦ひずみ1000×10⁻⁶・同2000×10⁻⁶・同3000×10⁻⁶の段階で実施することとした。X線CT装置で撮影する供試体では検長30mmのひずみゲージを貼り付けてひずみの測定を併せて行った。

本研究で使用したX線CT装置³⁾には、圧縮試験機内側の載荷部の周りを取り囲むように撮影部が設置されている(図-4)。撮影部は載荷フレームの上方から吊り下げられ、クロスローラーリングを用いて載荷中の供試体の周囲360度に渡って透過画像を撮影することができる。

載荷フレームを用いて所定のひずみレベルとなるまで変位制御で載荷し、目標としたひずみに到達したらサ

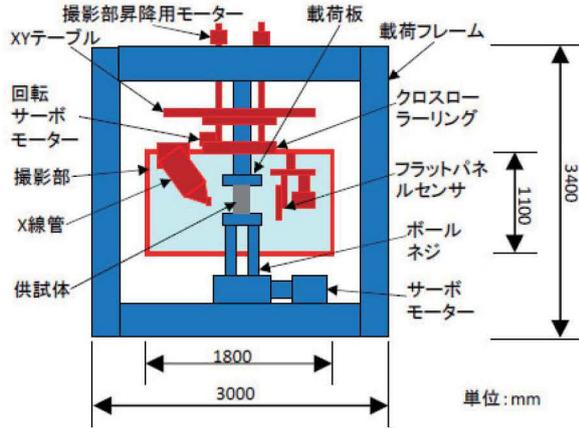


図-4 X線CT装置の概要³⁾

ーボモーターにてそのときの荷重を保持するように調整してX線CTスキャンを実施した。その後、順次ひずみを大きくしながら撮影を行った。なお、既往の論文⁴⁾にあるように、荷重を断続的に保持しながら撮影する手法では、結果として得られる圧縮強度は連続的に载荷した場合よりも20%前後低下することから、X線CT装置で撮影した供試体では圧縮強度は測定していない。

360度の透過情報を再構成して得た三次元画像内の供試体の断面画像を図-5に示す。本研究では1voxel(三次元画像の最小要素)を0.123mmの立方体とした。密度の高い銅スラグ細骨材は図-5のように白く表示される。市販のソフトにより三次元の粒子として同定した結果から銅スラグ細骨材の球相当直径0.6mm以上の粒子の重心位置を求め、PTV(Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡流速測定法)⁵⁾を用いて各ひずみレベル間での移動量を算出した。本研究での画像計測範囲は供試体の高さの中心から上下約35mmまでとした。なお、粒子径0.6mmのPTV計測の誤差は約0.01mmであることを確認している。

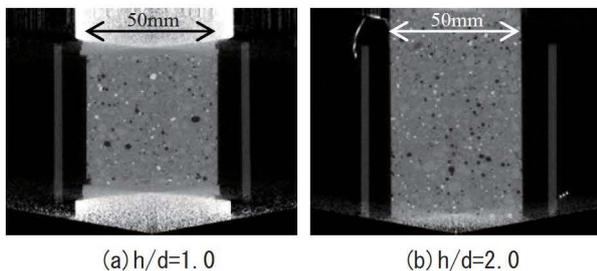


図-5 X線CT装置で撮影された透過画像

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

直径50mmおよび直径100mmの供試体の圧縮強度試験結果を表-4に示す。表中の強度の値の右側には試験した材齢と測定したひずみを示した。直径50mmでは、h/d=1.0の場合において、同じ材齢でも2体の圧縮強度に

は3.1N/mm²の差がみられた。

直径50mmでは、h/d=2.0の圧縮強度は36.0N/mm²で、h/d=1.0の圧縮強度は35.8N/mm²となり、高さ直径比の違いはみられなかった。直径100mmでは、h/d=2.0の圧縮強度は33.9N/mm²で、h/d=1.0の圧縮強度は36.7N/mm²となり、h/d=1.0が10%高い強度となった。h/d=2.0では、直径50mmの方が材齢が1週間程度若いのが直径100mmよりも6%高い値となった。

表-4 圧縮強度試験結果

供試体の直径	高さ直径比(h/d)					
	2.0			1.0		
	①	②	③	①	②	③
50mm	①	36.8	材齢29日 縦ひずみ	①	35.8	材齢29日 縦ひずみ
	②	34.9	材齢35日 横ひずみ	②	34.3	材齢35日 横ひずみ
	③	36.2	材齢35日 横ひずみ	③	37.4	材齢35日 横ひずみ
	平均	35.6	②と③の平均	平均	35.9	②と③の平均
100mm	①	34.0	材齢43日 縦・横ひずみ	①	36.3	材齢43日 縦・横ひずみ
	②	33.7	材齢43日	②	36.4	材齢43日
	③	34.0	材齢43日	③	37.5	材齢43日
	平均	33.9	-	平均	36.7	-

3.2 载荷中のみかけの横方向のひずみの分布

みかけの横方向のひずみ(以下横ひずみと記す)の分布を測定した結果(表裏2か所の平均値)を図-6~図-9に示す。図では、供試体②と③の最大応力度の1/3応力時、2/3応力時、80%応力時、および95%応力時のひずみ分布を示している。直径50mmでは2体の供試体の結果を、直径100mmでは1体の供試体の結果を示す。

直径50mmの場合、供試体上方のひずみが下方よりもやや大きい状況で全体が膨張し、破壊前(95%応力時)には上面から15mm程度下方でひずみが最大となった。図-6では、供試体②の破壊前(95%応力時)に上端面付近のひずみが大きくなって滑っている状態となっており、結果として圧縮強度が低くなったと考えられる。

直径100mmの場合、2/3応力時から上端と下端でのひずみが他の位置より小さい状況(载荷版による拘束)が

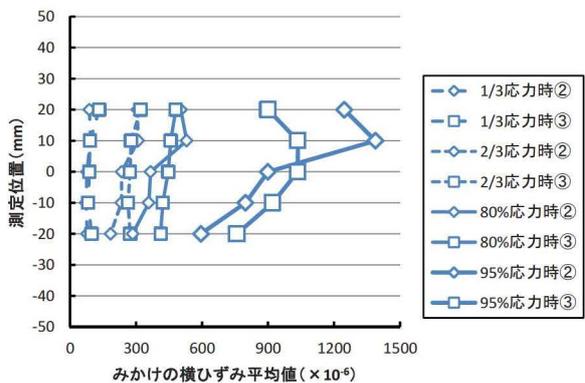


図-6 横ひずみ分布の推移(直径50mm, h/d=1.0)

見られ、破壊前には上下端の変形拘束とともに、供試体の高さ中央付近での膨張が顕著で、全体としては樽型となる傾向がみられた。

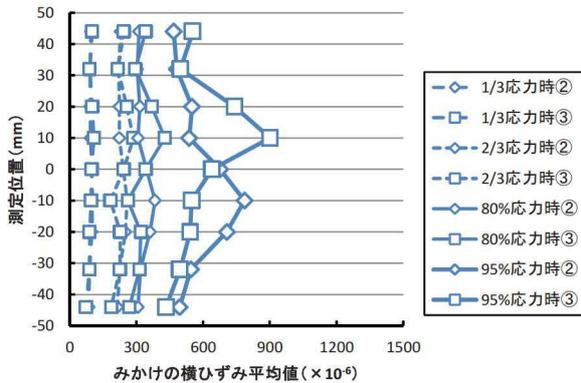


図-7 横ひずみ分布の推移(直径 50mm, h/d=2.0)

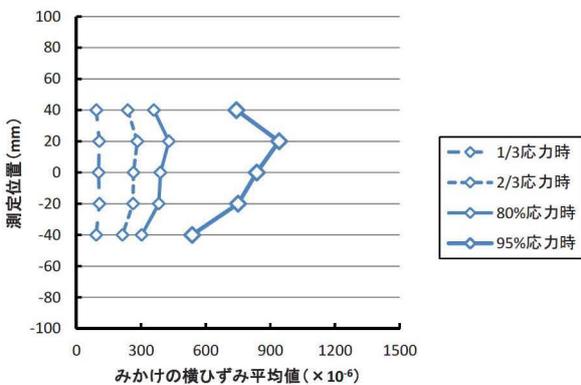


図-8 横ひずみ分布の推移(直径 100mm, h/d=1.0)

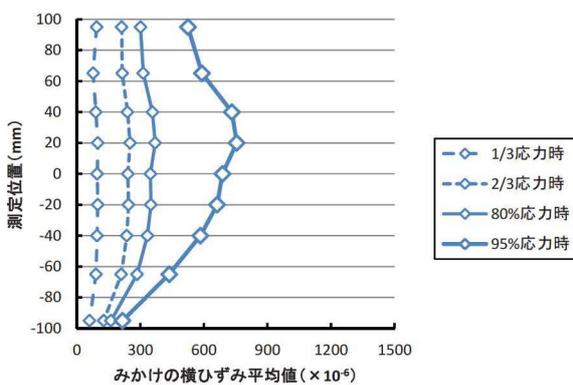


図-9 横ひずみ分布の推移(直径 100mm, h/d=2.0)

3.3 三次元画像計測による供試体内部の変形状況

三次元画像と PTV による計測結果から供試体の載荷軸を含む厚さ 4mm のある断面内に着目し、その断面上の銅スラグ細骨材の二次元での移動量を図-10～図-13 に示す。なお、座標原点は供試体中心位置である。

(1) h/d=1.0 の場合

図-10 より、載荷直後から 1000×10^{-6} までの範囲では内部に発生している変形量は 0.040mm まで(青や水色)の

割合が多い。計測精度を考慮して、0.020mm 以上のベクトルに着目すると、変形の方法は上下端付近では縦向きが多いようであるが、高さ中央部では明確ではない。

図-11 より、載荷直後から 3000×10^{-6} までの範囲では、上端付近において下向き(圧縮方向)に、また下端付近において上向き(圧縮方向)に、比較的大きな変形(赤)がみられた。高さ 0~10mm 程度の範囲では外側へ開こうとする変形が発生したが、変形量は 0.040mm まで(水色)程度となった。個々の移動量は小さいが、同一円周上の 2 点に外側方向の移動が生じると、円周方向にはその移動量の 6 倍以上広がりが生じたこととなる。

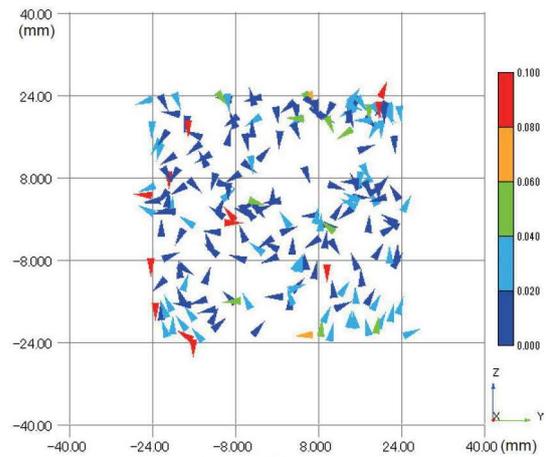


図-10 X線 CT 測定による変形の推移
(直径 50mm, h/d=1.0 : 載荷直後 1000×10^{-6})

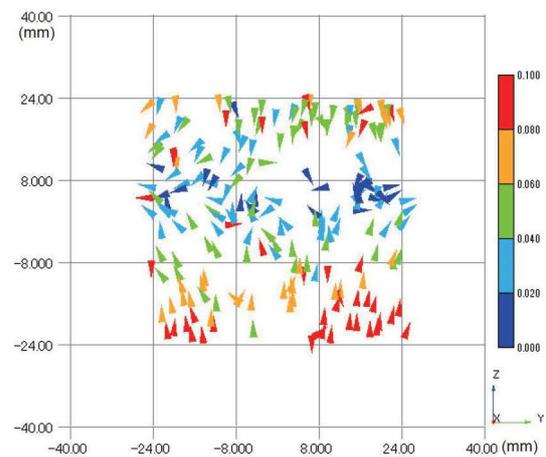


図-11 X線 CT 測定による変形の推移
(直径 50mm, h/d=1.0 : 載荷直後 3000×10^{-6})

(2) h/d=2.0 の場合

図-12 より、載荷直後から 1000×10^{-6} までの範囲では内部に発生している変形は、-8mm より下部の範囲では上向き(圧縮方向)に 0.040 から 0.080mm まで(オレンジ)となった。一方で、高さ 8~40mm では、0.020mm 以上のベクトルに着目すると、変形の方法は上下端付近では縦向きが多いようであるが、高さ中央部では明確ではな

く、図-10 に示された結果と同様の傾向となった。

図-13 より、载荷直後から 3000×10^{-6} までの範囲では高さ 25mm 以上の範囲では下向き(圧縮方向)に、また高さ-8mm 以下の範囲では上向き(圧縮方向)に、比較的大きな変形(赤)がみられ、 $h/d=1.0$ の場合と同じように高さ-8~25mm の範囲では 0.080mm 以下の外側へ開こうとする変形が発生した。ただし、0.040~0.080mm の変形量は、高さ 8~24mm の範囲では左側、高さ-8~8mm の範囲では右側に比較的集中しており、せん断面が生じ始めている可能性を示唆していると考えられる。

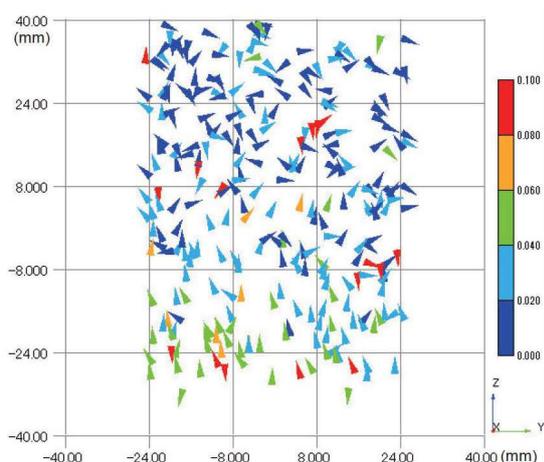


図-12 X線 CT 測定による変形の推移
(直径 50mm, $h/d=2.0$: 载荷直後 -1000×10^{-6})

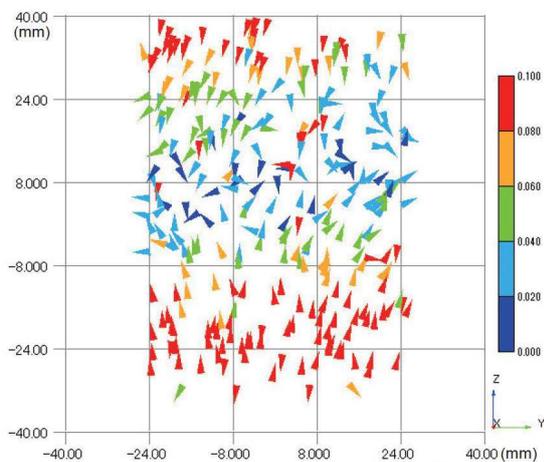


図-13 X線 CT 測定による変形の推移
(直径 50mm, $h/d=2.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})

4. 考察

4.1 供試体直径が異なる供試体の横方向のひずみの分布

図-6~図-9 に示した供試体の横方向のひずみの分布から、同じ h/d で直径(高さ)が異なる供試体の変形状況を比較するために、ひずみゲージの高さ方向の測定位置寸法の比に置き換えてまとめたものを図-14~図-15 示す。なお、図中のみかけの横ひずみは一つの測定位置で 2 枚用いたひずみゲージ各々の値を用いており、

供試体の変形の状況が分かりやすいように 2 枚のひずみゲージの間でプラスマイナスを逆転させている。取り上げた応力レベルは、最大応力度の 80%と 95%とした。

(1) $h/d=1.0$ の場合

図-14 より、最大応力度の 80%応力時(図中の破線)では、直径 100mm の場合には高さの中央付近に比べると上下端部付近はひずみが 20%程度小さく、端面の拘束の影響が見られるのに対し、直径 50mm の場合には二つの供試体とも上端部付近のひずみが他の位置よりも大きく端面の拘束の影響がみられない。

95%応力時(図中の実線)では、直径 100mm の場合には中央付近に比べると上下端部付近はひずみが 20~30%以上も小さく、端面の拘束が継続して最大応力度まで至った。同じような傾向は直径 50mm の③の供試体で見られたが、供試体②では上端のひずみが卓越して破壊に至っており、表-4 に示したように得られた強度は高くない。直径 50mm の場合の圧縮強度にはばらつきがみられたが、このように破壊(端面拘束)の状態が供試体ごとに異なっていたことが原因の一つと考えられる。

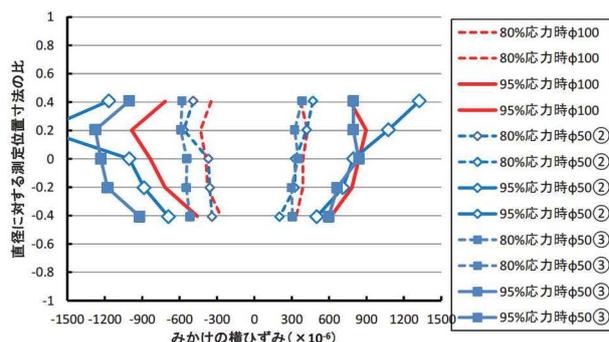


図-14 直径 100mm と 50mm の横ひずみ分布の推移
($h/d=1.0$)

(2) $h/d=2.0$ の場合

図-15 より、最大応力度の 80%応力時(図中の破線)では、直径 100mm の場合には高さの中央付近よりも上端部付近のひずみは 10~20%程度小さく下端部付近のひずみは 50%以上小さくなり、端面の拘束の影響が見られるのに対し、直径 50mm の場合には二つの供試体とも端面の拘束の影響がみられない。

95%応力時(図中の実線)では、直径 100mm の場合には中央付近よりも上下端部付近はひずみが 20~30%以上も小さく、端面の拘束が継続して最大応力度まで至った。直径 50mm の二つの供試体でも端面の拘束の影響がみられた。しかし、表-4 に示した強度は、直径 100mm で 34.0N/mm^2 に対して、直径 50mm②では 34.9N/mm^2 、直径 50mm③では 36.2N/mm^2 となり、直径 50mm の場合が高い値となった。図-15 において直径 50mm では比較的局所的にひずみが大きくなっている。得られる強度の値

が異なる原因は明確ではないが、今回得られた結果では、このような横ひずみの分布が異なることがばらつきに影響している可能性が考えられる。

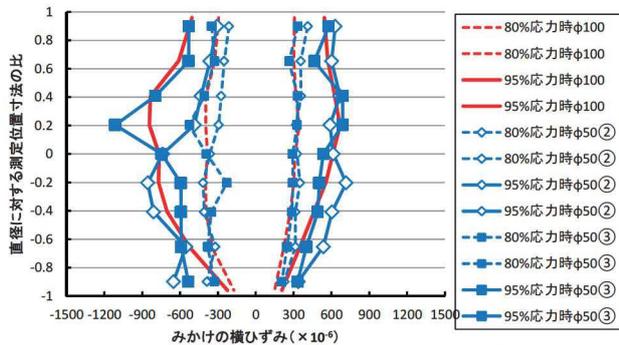


図-15 直径 100mm と 50mm の横ひずみ分布の推移 (h/d=2.0)

4.2 X線 CT 画像による供試体中央部の変形の傾向

図-11 および図-13 より、変形が大きくなると供試体高さ中央部の 20mm 程度の部分において外側へ開こうとする変形が発生していることが分かった。そこで、h/d=1.0 および 2.0 の供試体中央部から±20mm の範囲を取り上げて、変位のベクトルから載荷面と平行な面(横方向)のスカラー量を算出し、横方向の変形のスカラー量の度数分布を求めて比較したものを図-16 に示す。

h/d=1.0 の場合のスカラー量の平均値は 0.028mm で、h/d=2.0 では平均値が 0.027mm であり、ほぼ同じ値となった。図-16 より、スカラー量の度数分布も h/d によらず同じであり、h/d が異なっても中央部が外側へ開こうとする変形の状況はほぼ同じであるといえる。従って、今回の実験結果では、図-13 に示したように h/d=2.0 の供試体では上下端部付近において載荷方向と同じ圧縮側の変形が大きく生じていたほかは、h/d によらず中央部での変形状況はほぼ同じであり、直径 50mm の供試体の圧縮強度が h/d によらず同じであったことは、変形の状況がほぼ同じであったことで説明できる可能性がある。

なお、今回得られている変形ベクトルでは、変形の方角(成分)の解析なども可能であるため、今後は供試体が破壊に至る状況をさらに検討する必要があると考える。

5. まとめ

モルタル供試体の今回の実験結果を以下にまとめる。

- (1) 直径 100mm では h/d=1.0 のときに h/d=2.0 よりも 10% 程度高い強度が得られたが、直径 50mm では h/d によらず圧縮強度はほぼ同じであった。
- (2) h/d=1.0 の供試体で、直径 100mm では上下端部の拘束がみられたが、直径 50mm では拘束がみられる場合とみられない場合があり、得られた強度も異なった。

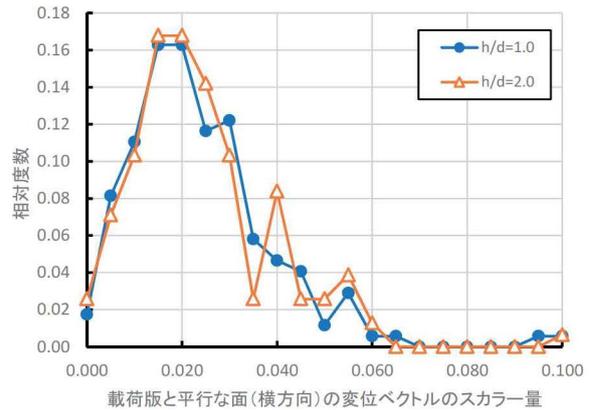


図-16 供試体中央部における載荷面と平行な方向の変位ベクトルのスカラー量の度数分布

- (3) h/d=2.0 の供試体で、直径 100mm と直径 50mm の場合とも上下端部の拘束はみられたが、直径 50mm では局部的にひずみが大きくなり、このことが得られた強度と関係している可能性がある。
- (4) X線 CT による内部の変形の推移から、h/d=2.0 では上下端部付近に圧縮側の変形が大きく生じていたほかは、h/d によらず中央部で外側へ広がる変形状況はほぼ同じであり、このことが h/d によって強度が変わらなかったことと関係している可能性がある。

参考文献

- 1) 瀬古繁喜, 鈴木澄江, 鹿毛忠継, 伊藤康司: 高さ直径比が異なるコンクリートコア供試体の圧縮破壊挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.403-408, 2009.7
- 2) 瀬古繁喜, 山田浩子, 柘植真希子, 山崎修平: 高さ直径比が異なる高強度コンクリート供試体における AE 測定による破壊状況と圧縮強度比に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.343-348, 2013.7
- 3) 麓隆行: 新しい機構の X 線 CT の開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.182-191, 2013
- 4) 麓隆行・裏泰樹・竹原幸生: X 線 CT を用いた圧縮応力によるコンクリート内部の変形計測に用いる指標に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.423-428, 2016.7
- 5) Takehara, K., Adrian, R. J., Etoh, G. T. and Christensen, K. T.: A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids[Suppl.], Vol. 29, pp. S34-S41, 2000.