

論文 圧縮強度の水準が 30N/mm^2 と 100N/mm^2 で高さ直径比が異なるモルタル供試体の圧縮載荷時における破壊挙動に関する研究

瀬古 繁喜*¹・麓 隆行*²・裏 泰樹*³・山田 和夫*⁴

要旨：目標圧縮強度を 30N/mm^2 および 100N/mm^2 とし、高さ直径比(h/d)を 1.0 および 2.0 とした直径 50mm のモルタルの円柱供試体を作製し、圧縮強度試験中に、みかけの横方向ひずみの分布状況の推移と X 線 CT 装置により供試体内部の変形状況を測定した。 30N/mm^2 および 100N/mm^2 とともに h/d の違いが圧縮強度に及ぼす影響はみられなかった。 30N/mm^2 で h/d=2.0 を除くと、みかけの横ひずみから観察されたのは、載荷面付近での破壊であった。X 線 CT による結果から、 30N/mm^2 では供試体の高さ中央部で外へ広がろうとする変形が h/d によらず同じであること、 30N/mm^2 と 100N/mm^2 の供試体では破壊に至る状況が異なる様子が認められた。

キーワード：モルタル供試体、圧縮強度水準、高さ直径比、みかけのひずみ、X 線 CT、粒子追跡流速測定法

1. はじめに

コンクリート構造体から採取したコアの圧縮強度を求める場合、直径に対する高さの比が 1.90 以下となる供試体は、高さ直径比（以下、h/d）が 2.00 の場合に比べると圧縮強度が高くなることが知られている^{たとえ¹}。このことから、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 以下の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補正する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や AE 発生源の分布および AE パラメータ解析などの検討^{たとえ²}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ではない。

前報では、圧縮強度が 30N/mm^2 のモルタルにおいて、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³)により測定した⁴)。本報ではこの結果と合わせて、圧縮強度が 100N/mm^2 のモルタルで同様の実験を行うとともに、X 線 CT 装置によって得られた供試体内部の変形を、粒子移動のベクトルの角度で定量的に表すことにより、圧縮載荷時における供試体の破壊挙動の解明を試みた。

2. 実験の概要

2.1 モルタルの使用材料と調合

(1) 実験の組合せ

実験の因子は、モルタルの目標強度と供試体の h/d とした。実験因子の水準を表-1 に示す。モルタル供試体は、すべての実験の組合せで 4 体ずつ作製した。実験の

項目と供試体の数量を表-2 に示す。

(2) モルタルの使用材料と調合

モルタル供試体に使用した材料を表-3 に示す。外割りで混入した銅スラグ細骨材は比較的密度が高い材料で、X 線 CT 装置で撮影したときのマーカーとして載荷による骨材の移動を追跡するために使用した。

表-1 実験因子と水準

実験因子	水準
モルタルの目標強度(N/mm^2)	30, 100
供試体の h/d	1.00, 2.00

表-2 実験の項目と供試体の数量

目標強度 (N/mm^2)	h/d	実験の項目		
		圧縮強度 ・縦ひずみ	圧縮強度 ・横ひずみ	X線CT
30	1.00	1	2	1
	2.00	1	2	1
100	1.00	1	2	1
	2.00	1	2	1

表-3 モルタルの材料

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
化学混和剤	高性能AE減水剤(T社)	ポリカルボン酸コポリマー、密度 1.10g/cm^3

*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）

モルタルの調合を表-4に示す。モルタルの調合は、あらかじめ試験練りを行って決定した。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-4 モルタルの調合

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	高性能AE 減水剤
30	62.2	280	450	1447	104	2.25	—
100	26.0	292	1123	875	104	—	11.23

※ 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を用い、1バッチの練混ぜ量を30リットルとして練り混ぜた。ミキサーから排出したモルタルは、フレッシュ性状を確認した後にφ50mm×h100mmのプラスチック製型枠へ打込み、供試体を作製した。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～35日)は気中養生とした。標準養生の間に供試体の高さを調整するための切断と端面の複数回の研磨を実施した。端面の平面度は確認していないが、平行度は供試体高さの測定で確認した。ひずみゲージは、気中養生の間の期間で貼り付けた。

(2) 供試体の準備

円柱供試体は、h/d=1.0(高さ50mm)の場合は湿式の高速カッターを用いて上下端を切断し、h/d=2.0の場合ともに両端面は研磨機を用いて1～2mmの厚さを研磨した。

縦方向のひずみを測定する供試体には、検長30mmのひずみゲージを供試体の高さ中央に貼り付けた。供試体の側面に貼り付けた横方向のひずみゲージの位置を図-1に示す。ひずみゲージは検長60mmのものを用了。図-1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に貼り付けた。

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(支柱直径120mm、球座半径150mm、加圧版は研磨面を使用)を用い、JIS A 1108に従って荷重速度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荷重中に渡って連続的に測定した。

(2) 圧縮荷重と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

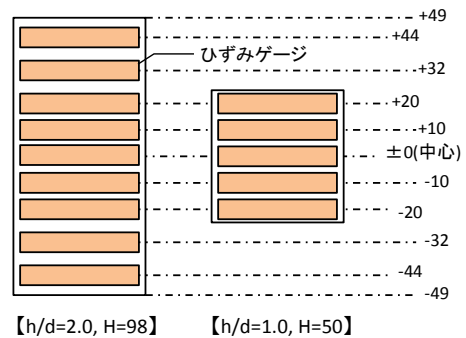


図-1 横方向のひずみゲージの貼付け位置

み関係を把握するために、1体の供試体の圧縮強度試験をアムスラー型1000kN耐圧試験機で行った。その結果から、X線CT装置の撮影は、荷重開始時・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も検長30mmのひずみゲージで縦方向のひずみの測定を行った。

本研究で使用したX線CT装置³⁾には、圧縮試験機(支柱H鋼250×250×9×14-4本、球座半径15mm、加圧版は研磨面を使用)の荷重部の周りを取り囲むように撮影部が設置されている(図-2)。撮影部は荷重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で荷重中の供試体の周囲360度に渡って透過画像を撮影できる。荷重フレームでは所定のひずみとなるまで変位制御で荷重し、所定のひずみに到達したらサーボモーターにて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、X線CTは1体で測定したため、X線CTの結果の再現性は不明である。荷重を断続的に保持する手法では、結果として得られる圧縮強度は連続的に荷重した場合よりも20%前後低下することから、X線CT装置で撮影した供試体の圧縮強度は結果として採用していない。

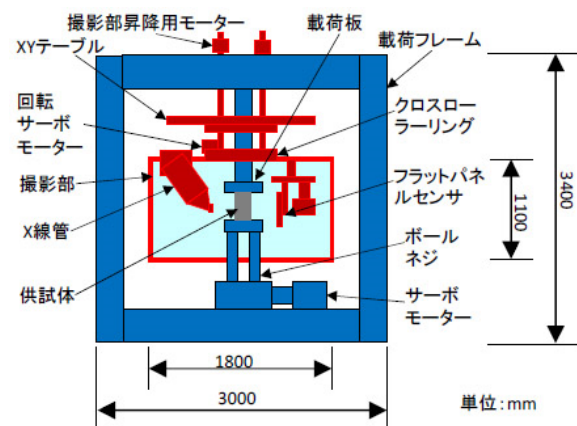


図-2 X線CT装置の概要³⁾

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-3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-3 のように白く表示される。銅スラグ細骨材を市販のソフトにより 3 次元粒子として同定した結果から球相当直径 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。

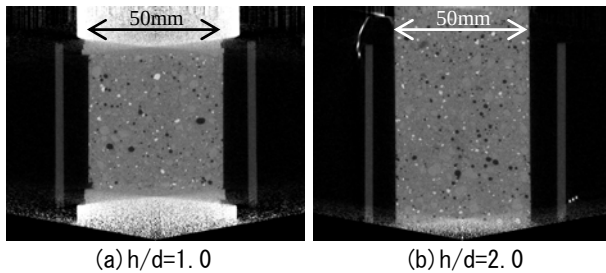


図-3 X線CT装置で撮影された透過画像の例⁴⁾

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-5 に示す。目標強度 30N/mm² 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。目標強度 100N/mm² では、h/d=2.0 の場合において、1 体の圧縮強度が他よりも小さい値となった。また、h/d=1.0 の場合において、3 体の試験結果の変動係数は 10%を超え、比較的ばらつきが大きくなった。目標強度 30N/mm² および 100N/mm² の場合とも、材齢 29 日と 35 日の差は無いようである。

目標強度 30N/mm² 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、h/d による強度の違いはみられなかった。目標強度 100N/mm² では、h/d=2.0 の圧縮強度は 115N/mm² で、h/d=1.0 の圧縮強度は 104N/mm² となり、ばらつきも考慮すると h/d による強度の違いはみられなかった。h/d による圧縮強度への影響がみられないのは、供試体の直径が小さいことが関係している可能性もある。

表-5 圧縮強度試験結果

[圧縮強度の単位: N/mm²]

目標強度 (N/mm ²)	供試体のh/d					
	2.0			1.0		
30	①	36.8	材齢29日	①	35.8	材齢29日
	②	34.9	材齢35日	②	37.4	材齢35日
	③	36.2	材齢35日	③	34.3	材齢35日
	平均	36.0		平均	35.8	
100	①	115	材齢29日	①	105	材齢29日
	②	68.6	材齢35日*	②	91.7	材齢35日
	③	114	材齢35日	③	116	材齢35日
	平均	115		平均	104	

* 平均値の算出から除外した。

3.2 載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を図-4 から図-7 に示す。図では、供試体②と③における最大応力度の 80%時、および 95%時の横ひずみ分布を示している。みかけの横ひずみは一つの測定位置で表裏 2 枚用いたひずみゲージ各々の値で示しており、供試体の変形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た。

(1) 目標強度 30N/mm² の場合

h/d=1.0 では図-4 より、80%応力時においていずれの高さ位置でも横ひずみは大きくは変わらない。95%応力時では、②では図の左側で上下端の変形拘束があり高さ中央部の横ひずみが大きい、右側では上端の横ひずみが大きい。③では下端において変形拘束がみられるが、上端付近では横ひずみが顕著に増大した。

h/d=2.0 では図-5 より、80%応力時においていずれの高さ位置でも横ひずみは大きくは概ね変わらない。95%応力時では、二つの供試体ともに図の右側での横ひずみの増加量に比べると、左側で高さ中央の 10mm 程度上下の位置で横ひずみの顕著な増加がみられる。

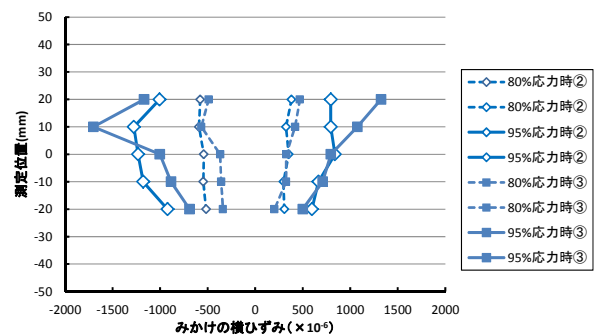


図-4 h/d=1.0 の場合の横ひずみ分布の推移
(目標強度 30N/mm²)

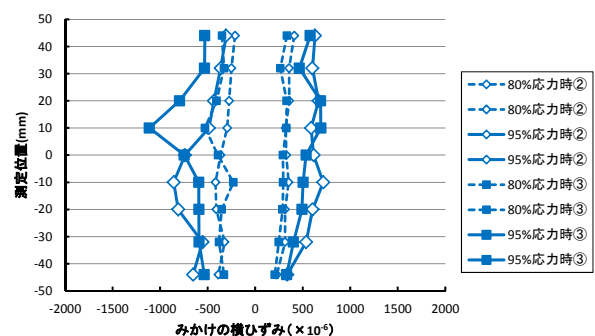


図-5 h/d=2.0 の場合の横ひずみ分布の推移
(目標強度 30N/mm²)

(2) 目標強度 100N/mm² の場合

h/d=1.0 では図-6 より、②では 80%応力時において上端付近の横ひずみが大きくなり、95%応力時では上端付近の横ひずみがさらに大きくなった。③でも 80%応力時

において上端付近の横ひずみが大きく、95%応力時では上端付近の横ひずみが一層大きくなった。

$h/d=2.0$ では図-7 より、②では80%応力時においていづれの高さ位置でも横ひずみは大きくは変わらないが、95%応力時では図の右側で横ひずみの増加がほとんどないのに対し、左側では上端の横ひずみが大きくなった。③では、80%応力時において②の2倍程度の横ひずみであり、高さ中央付近の横ひずみが若干大きい傾向にある。95%応力時では高さ中央付近の横ひずみが大きい、それよりも下端の横ひずみの増加が顕著である。

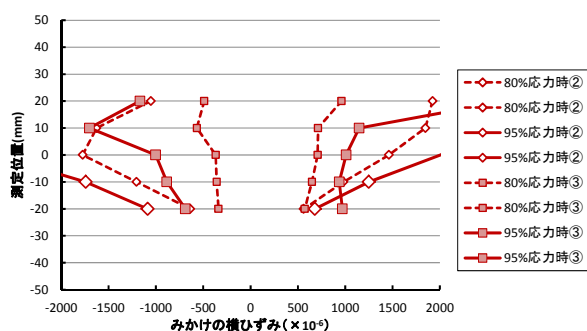


図-6 $h/d=1.0$ の場合の横ひずみ分布の推移
(目標強度 100N/mm^2)

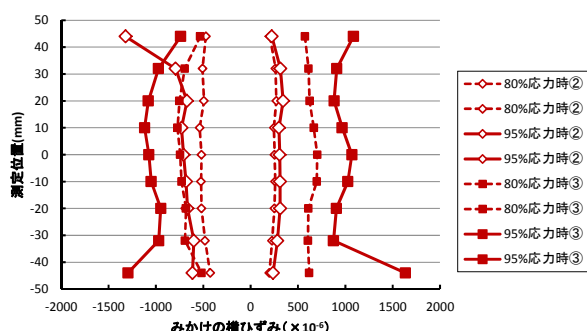


図-7 $h/d=2.0$ の場合の横ひずみ分布の推移
(目標強度 100N/mm^2)

3.3 三次元画像計測による供試体内部の変形状況

三次元画像の PTV による計測結果から供試体の载荷軸を含む厚さ 4mm のある断面内に着目し、その断面上のマーカーの二次元の移動量を色分けし、また移動方向を矢印でまとめたものを図-8～図-11 に示す。座標原点は供試体の中心とし、ここでは载荷直後から縦ひずみが 3000×10^{-6} までの間の移動量と移動方向を示した。目標強度 100N/mm^2 で $h/d=2.0$ の場合には、縦ひずみが 3000×10^{-6} に到達する前に供試体が破壊したため、 2000×10^{-6} までの状況を示した。

(1) 目標強度 30N/mm^2 の場合

$h/d=1.0$ では図-8 より、上端付近において下向きに変形がみられ、下端から上へ 15mm 程度までの範囲においては上向きの大きな変形(赤色)がみられた。高さ中央部

の 20mm 程度の範囲では外側へと開こうとする変形が発生しているが変形量は 0.04mm 程度以下となっている。

$h/d=2.0$ では図-9 より、上端付近において下向きに大きな変形(赤色)がみられた。下端付近から -10mm 程度までの範囲においても上向きで大きな変形(赤色)がみられた。 $h/d=1.0$ の場合と同様に、高さ中央部の 20mm 程度の範囲では外側へと開こうとする変形が発生しているが、変形量は 0.04mm 程度以下となっている。すなわち、上下端部では圧縮载荷の方向とほぼ同じ向きで変形しているが、供試体の中央部では外周方向へ押し出される状況は、 h/d によらず同じようである。

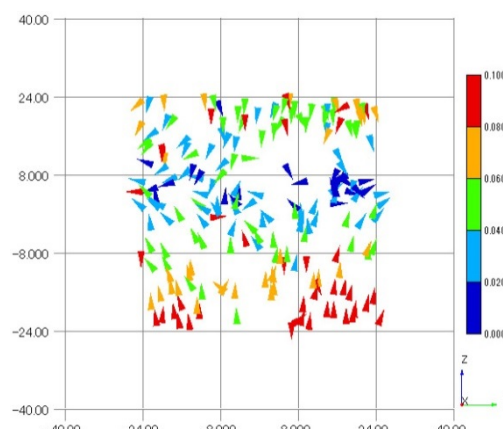


図-8 X線CT測定によるマーカーの移動状況
(強度 30N/mm^2 , $h/d=1.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})⁴⁾

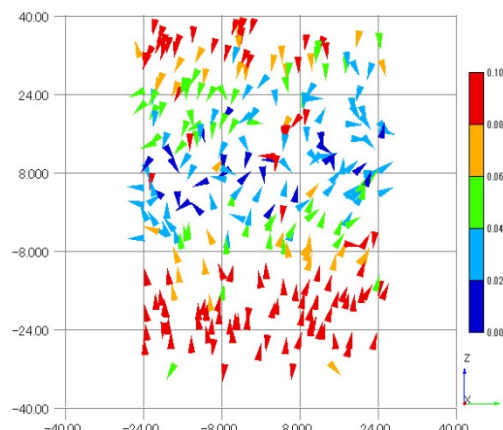


図-9 X線CT測定によるマーカーの移動状況
(強度 30N/mm^2 , $h/d=2.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})⁴⁾

(2) 目標強度 100N/mm^2 の場合

$h/d=1.0$ では図-10 より、上端付近において右下向きに、下端付近において左上向きに変形がみられた。せん断破壊のようにも見えるが、高さ中央部周辺では外側へと開こうとする変形やマーカーの移動が交錯するような状況も発生している。

$h/d=2.0$ では図-11 より、上端付近において右下向きの比較的大きな変形(赤色)が、下端付近において左上向

きの比較的大きな変形(赤色)がみられた。全体では左上から右下へ斜めにせん断破壊している状態を示している。

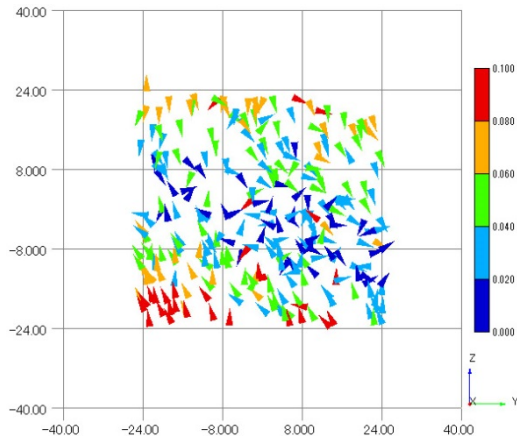


図-10 X線CT測定によるマーカーの移動状況
(強度 100N/mm^2 , $h/d=1.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})

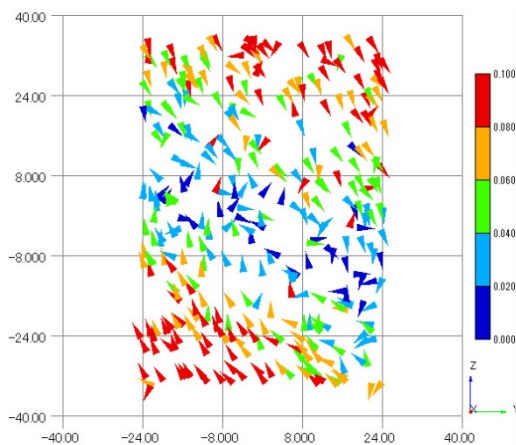


図-11 X線CT測定によるマーカーの移動状況
(強度 100N/mm^2 , $h/d=2.0$: 载荷直後 -2000×10^{-6})

図-8と図-4を比較すると供試体外側の横ひずみの増加傾向と供試体内部でのマーカーの移動状況の関係性が明確ではないが、図-9と図-5では関係性があるようにも見られる。これは载荷試験装置自体が異なり、試験装置の剛性や加圧板の端面拘束の違いなどが影響したことも考えられる。また、供試体数が多くはないため、再現性の確認も必要である。図-10と図-6および図-11と図-7の関係性についても今後の検討課題と考える。

4. 考察

4.1 マーカーの移動方向の角度の算出方法

図-8から図-11の結果より、マーカーの二次元上の移動量から求められる移動方向の角度(以下、変形角度)を算出した。変形角度は、上向きを正で下向きを負とし、第一象限と第三象限の方向の場合には水平方向から反時計回りの角度を、第二象限と第四象限では水平方向から時計回りの角度を算出することとした。得られた結果より、供試体の高さ方向を5mmごとの区間に分けた各測

定位置に含まれる角度の平均値を求め、高さ方向の測定位置との関係にまとめた。目標強度と h/d ごとにまとめた結果を図-12から図-15に示す。図中のXZおよびYZは一つの供試体において直行する二つの断面を示す。

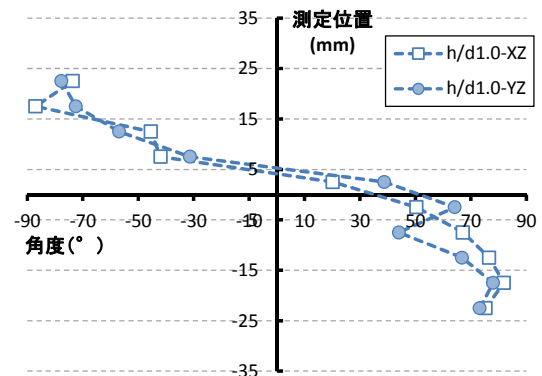


図-12 高さ方向の測定位置と変形角度の関係
(目標強度 30N/mm^2 , $h/d=1.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})

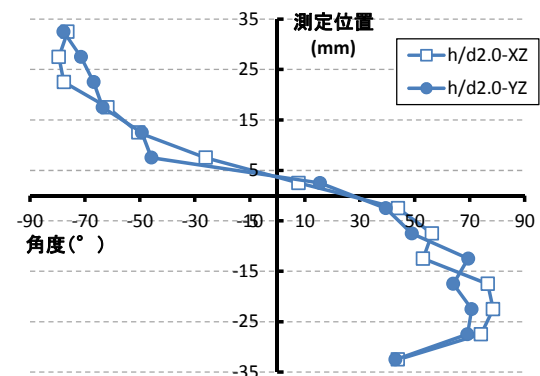


図-13 高さ方向の測定位置と変形角度の関係
(目標強度 30N/mm^2 , $h/d=2.0$: 载荷直後 -3000×10^{-6})

4.2 高さ方向の位置とマーカーの移動方向の角度の関係 (1) 目標強度 30N/mm^2 の場合

$h/d=1.0$ では図-12より、変形角度は上端付近で -75° 前後であったが、12.5mm から高さ中央部へ向かうに従って変形角度の絶対値は急激に小さくなった。測定位置5mm程度を境に -7.5mm まで変形角度は急激に大きくなり、下端付近では 75° 前後となった。

$h/d=2.0$ では図-13より、変形角度は32.5mm から17.5mm では $-60 \sim -80^\circ$ 程度であったが、12.5mm から高さ中央部へ向かうに従って変形角度の絶対値は急激に小さくなった。測定位置5mm程度を境に -7.5mm まで変形角度は急激に大きくなり、 -12.5mm から -27.5mm では $50 \sim 80^\circ$ 程度となった。 -32.5mm の変形角度は 45° 程度となったが、これは数か所が正反対の向きを示したためである。図-12と図-13を比べると、変形角度が急激に変化する範囲は両者とも20mm程度と同じであり、 $h/d=2.0$ において圧縮载荷方向に変形する上限端付近を除くと、内部での変形は $h/d=1.0$ とほぼ同じ傾向である。

(2) 目標強度 100N/mm² の場合

h/d=1.0 では図-14 より、変形角度の絶対値は上端および下端付近で 60～70° 程度であったが、12.5mm から -17.5mm にかけて変形角度はほぼ一定の割合で変化した。

h/d=2.0 では図-15 より、変形角度は XZ 面では 32.5mm から 12.5mm では -35～-40° 程度であったが、7.5mm から -17.5mm では -7～10° 程度となり、-22.5mm から 32.5mm では 20° 程度となった。YZ 面では 32.5mm から 12.5mm では -50～-65° 程度であったが、7.5mm から -2.5mm にかけて変形角度が急激に変化した。-2.5mm から 32.5mm では 30～50° 程度となった。角度の範囲が狭いのは、図-11 のように供試体が斜めにずれるせん断破壊となっており、右上部分が右下向きに、左下部分が左上向きに互いにずれている変形をしているためである。

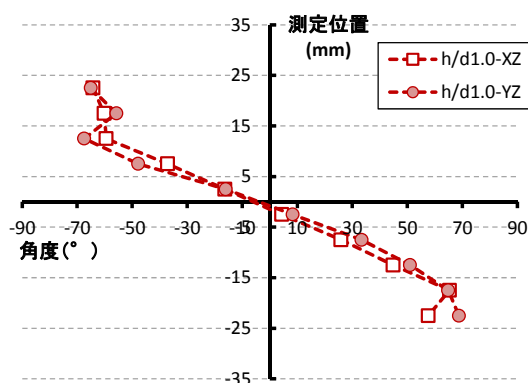


図-14 高さ方向の測定位置と変形角度の関係
(目標強度 100N/mm², h/d=1.0: 載荷直後 - 3000×10⁻⁶)

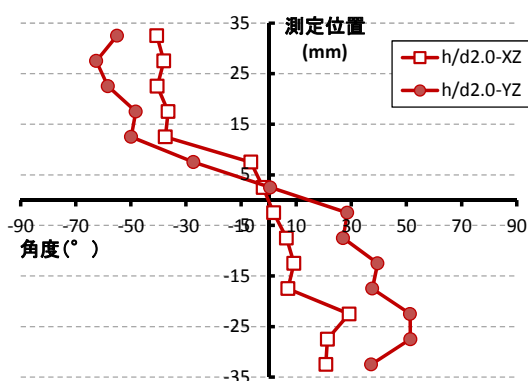


図-15 高さ方向の測定位置と変形角度の関係
(目標強度 100N/mm², h/d=2.0: 載荷直後 - 2000×10⁻⁶)

4.3 破壊に影響する領域に関する一考察

図-12 から図-15 において、高さ中央付近を境としてほぼ一定の割合で変形角度が変化する領域が見られた。測定位置の高さと角度変化の比率として、高さ中央付近での勾配を求めた。得られた結果を表-6 に示す。

30N/mm² では h/d によらず勾配はほぼ同じであり、外側へ広がり破壊に至る変形の状況はほぼ同じとみなせる。同じ h/d=1.0 でも 100N/mm² は 30N/mm² の場合の勾配の 2

倍となっており、図-14 では上下端部を除くほとんどの領域で変形角度が一様に変化している。これは、破壊に影響される領域が載荷面付近まで到達している可能性を示しており、圧縮強度の水準が 30N/mm² と 100N/mm² とでは、破壊の状況が異なっていることを示唆するといえる。

表-6 測定位置の高さと角度変化の比率

目標強度 (N/mm ²)	h/d	測定位置の高さと角度変化の比率(mm/°)		
		XZ面	YZ面	平均値
30	1.0	0.11	0.10	0.11
	2.0	0.14	0.12	0.13
100	1.0	0.24	0.20	0.22
	2.0	1.18	0.38	0.78

5. まとめ

モルタル供試体による実験結果を以下にまとめる。

- (1) 目標強度 30N/mm² および 100N/mm² の供試体では、h/d の違いによる圧縮強度の差は認められなかった。
- (2) 目標強度 30N/mm² では供試体の高さ中央部で外へ広がろうとする変形が h/d によらず同じであった。
- (3) 目標強度 100N/mm² の h/d=2.0 の供試体では斜めのせん断破壊が起こっている状況が確認できた。
- (4) 圧縮強度の水準が 30N/mm² と 100N/mm² の供試体では破壊に至る状況が異なる様子が認められた。

本報のとりまとめにあたり、愛知工業大学工学部 建築学科 幅 郁剛君には多大な協力をいただいた。ここに付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.473, pp.19-28, 1995.7
- 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) 瀬古繁喜・麓隆行・裏泰樹・山田和夫: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.313-318, 2017.7
- 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.