

論文 圧縮強度試験における荷重速度と強度レベルがコンクリートの強度・変形性状に及ぼす影響

小山 善行^{*1}・鈴木 澄江^{*2}・早川 光敬^{*3}・陣内 浩^{*4}

要旨：本論では、コンクリートの圧縮強度試験における荷重速度がコンクリートの圧縮強度と変形性状に及ぼす影響について、普通強度の領域から超高強度の領域について検証を行った。実験では圧縮試験機を 3 台使用し、圧縮強度試験用の供試体端面精度に至るまで測定を行った。実験の結果、現行の JIS A 1108-2006 の範囲で荷重速度の異なる圧縮強度試験を行った場合に、強度領域により多少の高低差はあるものの極端に大きな差は無く、変形性状も設定荷重速度が両者へ与える影響はあまり大きなものではないと考えられた。

キーワード：荷重速度、圧縮強度、変形性状、高強度コンクリート

1. はじめに

約 10 年前より経済産業省によって推進された JIS と ISO の整合化に伴い、コンクリートの試験方法に関する JIS についても ISO との整合が進められることとなった。このような背景から、1999 年に ISO との整合をはかりながら改正された JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) では、試験時の荷重速度を、従来の毎秒 0.19～0.29N/mm² から ISO と整合させた毎秒 0.6±0.4N/mm² という幅の広い範囲に改正した。この荷重速度は、2006 年に改正された現行の JIS A 1108 にも踏襲されている。

荷重速度が普通強度のコンクリートの強度・変形特性に与える影響は既往の研究^{1), 2)}で明らかにされている。しかしながら、現行の JIS A 1108-2006 の荷重速度の範囲を対象として実施された実験ではないため、現行の JIS の荷重速度の上限と下限で、圧縮強度試験結果がどの程度変動するのかは明らかではない。また、前述した荷重速度が、昨今実用化の進んでいる超高強度コンクリートの圧縮強度や変形性状にどのように影響するのかといった点についても、これまで調査・報告された例はない。そこで筆者らは、6 水準の強度レベルのコンクリートについて、JIS A 1108-2006 で規定されている範囲で異なる荷重速度を設定して圧縮強度試験を行った場合に、設定した荷重速度や強度レベルが圧縮強度試験結果や変形性状にどのような影響を及ぼすのかを検証した。

2. 実験計画

2.1 計画概要

実験の要因と水準を表－1 に示す。コンクリートの調査は 6 水準とした。6 水準の内訳は、目標圧縮強度 120、160N/mm² の超高強度コンクリート、目標圧縮強度 60、

80N/mm² の高強度コンクリート、および目標圧縮強度 20、40N/mm² の一般的なコンクリートである。

圧縮強度試験の設定荷重速度は、JIS A 1108-2006 で規定されている範囲の最小値、中央値、最大値となる 0.2、0.6、1.0N/mm²/秒の 3 水準とした。圧縮強度試験では、

表－1 実験の要因と水準

要因	水準			
目標圧縮強度 (N/mm ²)	20, 40, 60, 80, 120, 160			
設定荷重速度 (N/mm ² /秒)	0.2, 0.6, 1.0			
各試験機関の 使用した圧縮強度試験機 の最大ひょう量 (kN)	目標圧縮強度	A	B	C
	40～60 N/mm ²	1000		
	80～160 N/mm ²	3000	2000	

表－2 使用材料一覧

種類	記号	名称	製造者／産地	物性値
結合材	B1	普通ポルトランドセメント	3 社混合	密度 3.15g/cm ³
	B2	普通ポルトランドセメント	T 社製	密度 3.16g/cm ³
	B3	高強度用結合材*	D 社製	密度 2.99g/cm ³
細骨材	S1	天然砂	大井川産	表乾密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 2.23%
	S2	天然砂	市原産	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 2.03%
	S3	天然砂	市原産	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 1.53%
	S4	天然砂	鹿島産	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.27%
	S5	硬質砂岩系砕砂	津久井産	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 2.70%
	S6	石灰岩系砕砂	鳥形山産	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.10%
	S7	石灰岩系砕砂	葛生産	表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.84%
	S8	安山岩系砕砂	大月産	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 2.37%
粗骨材	G1	硬質砂岩系砕石	青梅産	表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.55%
	G2	石灰岩系砕石	峯朗産	表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.62%
	G3	石灰岩系砕石	葛生産	表乾密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.80%
	G4	安山岩系砕石	大月産	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 1.84%
	G5	安山岩系砕石	大月産	表乾密度 2.63g/cm ³ , 吸水率 2.04%
化学混和剤	AD1	AE 減水剤	B 社製	密度 1.03g/cm ³
	AD2	高性能 AE 減水剤	B 社製	ポリカルボン酸系, 密度 1.07g/cm ³
	AD3	高性能減水剤	B 社製	ポリカルボン酸系, 密度 1.07g/cm ³

*普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフェューム＝7：2：1（質量比）

*1 東京工芸大学 大学院 工学研究科 建築学専攻（正会員）

*2 （財）建材試験センター中央試験所材料グループ専門職・博士（工学）（正会員）

*3 東京工芸大学 工学部建築学科 教授・博士（工学）（正会員）

*4 大成建設（株） 技術センター 主任研究員・博士（工学）（正会員）

筆者らの所属する3箇所の試験機関で、同じ条件の供試体を3個ずつ試験することとし、9個の試験結果を平均することで、試験結果に及ぼす試験機の特性などをできる限り小さくした。

2.2 使用材料と調査

実験に使用した材料を表-2に、各コンクリートでの材料の組合せを表-3に示す。各コンクリートに使用した材料は、それぞれの強度レベルで実際の工事に用いられている一般的なものから選定した。

実験に使用したコンクリートの調査を表-4に示す。コンクリートの水結合材比や単位水量などは、既往の工事記録などをもとに、実際の工事に用いられている調査を参考に定めた。

2.3 供試体作製と製作精度

圧縮強度試験用の供試体は、目標圧縮強度ごとに27個作製した。供試体の寸法は $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、供試体の作製では、打込みから養生、端面の研磨処理、端面精度の確認までを1か所で実施した。端面の精度確認は図-1に示す17点について行い、上下面とも17点の最大値と最小値の差が 0.05mm 以内となるように（研磨処理により）整形し、平面精度³⁾を確認した。

2.4 圧縮強度試験方法

端面精度の確認までを行った供試体は、筆者らの所属する3箇所の試験機関に9個ずつ運搬し、JIS A 1108 (2006)に従って圧縮強度試験を行った。なお、圧縮強度試験を実施する際に、試験機関Aでは目標圧縮強度の高い80, 120, 160N/mm^2 の3水準のコンクリートの供試体ならびに比較用の 20N/mm^2 の供試体の縦ひずみおよび横ひずみを図-2の位置で測定した。横ひずみなどは載荷面の摩擦係数などの影響を若干受けと思われるが、今回の実験ではそこまでの調査は行っていない。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果は概ね安定したものとなった。また、各試験機関の試験結果には試験機の校正誤差などによって若干の差があるものの、極端な差は生じなかった。設定した荷重速度（以下、設定荷重速度と称す）と圧縮強度の関係を図-3に示す。図-3は、3つの機関で実施した圧縮強度試験結果の平均値をもとに作図したものである。これより、 100N/mm^2 を超える超高強度領域であっても、設定荷重速度が増加すると、圧縮強度の試験値が増加することがわかる。具体的な値で示すと、今回実験を行った目標圧縮強度 160N/mm^2 のシリーズでは、設定荷重速度0.2, 0.6, $1.0\text{N/mm}^2/\text{秒}$ での圧縮強度は、それぞれ156, 163, 166N/mm^2 であった。つまり、JIS A1108-2006に規定される荷重速度の中央値 $0.6\text{N/mm}^2/\text{秒}$

秒に対し、設定荷重速度を $1.0\text{N/mm}^2/\text{秒}$ に上げると見かけの圧縮強度は 3N/mm^2 増加し、 $0.2\text{N/mm}^2/\text{秒}$ に下げ

表-3 コンクリートの種類と使用材料の組合せ

目標 圧縮強度 (N/mm^2)	結合材	細骨材		粗骨材	化学混和剤
		細骨材 1	細骨材 2		
20	B1	S1	—	G1	—
40	B1	S1	—	G1	AD1
60	B2	S2	S5	G4	AD1
80	B2	S3	S6	G2	AD2
120	B3	S4	S7	G3	AD2
160	B3	S8	—	G5	AD3

表-4 コンクリートの調査

目標 圧縮強度 (N/mm^2)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
			結合材	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材
20	70.0	47.0	269	188	861	—	999
40	55.0	47.0	329	181	810	—	941
60	50.0	51.9	350	175	777	194	899
80	32.4	52.0	525	170	404	404	908
120	29.0	42.9	534	155	417	417	898
160	17.0	42.8	882	150	597	—	817

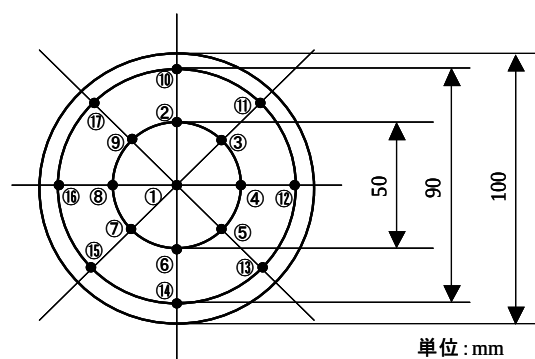


図-1 供試体の平面度の測定位置

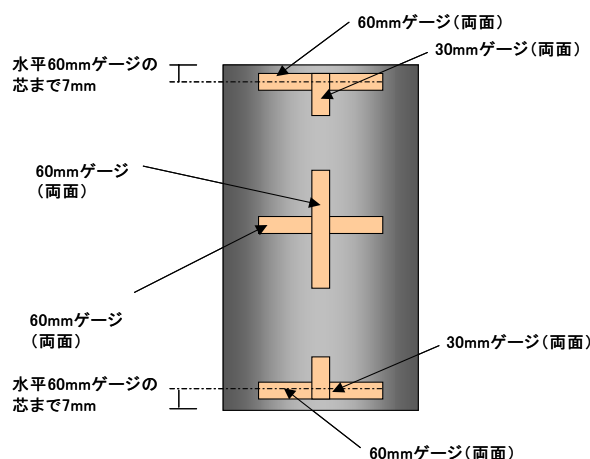


図-2 供試体のひずみ測定位置

ると 7 N/mm^2 減少した。この結果の妥当性をF検定によって分析した結果を表-5に示す。なお、表中には、設定速度毎の圧縮強度の変動係数も示した。超高強度領域では、各使用材料の限界などから圧縮強度試験の分布がどのようなになるのかは不明瞭な部分⁴⁾もあるが、本論では一つの分析方法としてF検定を選択した。ここでは、各試験機関での3個の同条件の供試体の圧縮強度を平均し、各強度レベルごとに荷重速度での分子の自由度 Φ_1 を2、荷重速度と試験所での分母の自由度 Φ_2 を4として5%のF分布表によって検定した。表-5に示すように、今回の実験結果における荷重速度の影響は、目標圧縮強度 20 N/mm^2 のもの以外は、すべて有意となっている。 20 N/mm^2 のものが有意とならなかった理由は明確とはならないが、既往の知見を含めて考察すると、今回の試験誤差などの影響も含まれた結果と考えている。

設定荷重速度 $0.6 \text{ N/mm}^2/\text{秒}$ に対する各荷重速度の場合の強度比を図-4に示す。今回の実験範囲では、設定荷重速度 $0.6 \text{ N/mm}^2/\text{秒}$ での圧縮強度を基本として考えた場合、設定荷重速度 $1.0 \text{ N/mm}^2/\text{秒}$ の場合の圧縮強度は1~3%程度高く、設定荷重速度 $0.2 \text{ N/mm}^2/\text{秒}$ の場合の圧縮強度は2~5%程度低くなった。また、設定荷重速度の影響が、強度レベルが高くなることによって極端に大きな変化はなかった。

各強度レベルにおける設定荷重速度と圧縮強度の変動係数を図-5に示す。既往の報告では、設定荷重速度がコンクリートの曲げ強度試験値のバラツキに影響するとしている研究⁵⁾もあるが、今回の実験範囲では、いずれの強度レベルにおいても、設定荷重速度が圧縮強度の変動係数に及ぼす影響は認められなかった。

3.2 変形状

3.1の検討では、圧縮強度の試験値について分析した。しかしながら、圧縮強度の試験値を分析するだけでは、設定荷重速度が圧縮強度に影響するメカニズムや、強度レベル毎にそのメカニズムが変化しているのかといった分析ができない。そこで、ここでは供試体に貼付したひずみゲージの値をもとに、各供試体の応力とひずみの関係を分析することとした。なお、本論に示す応力-ひずみ曲線の作図にあたっては、設定荷重速度ごとにひずみを測定した3個の応力-ひずみ曲線を整理し、その中から応力-ひずみ曲線の勾配が概ね中間となった供試体を3個の中の代表として選定している。ただし、勾配が概ね中間となった供試体のすべてのひずみゲージが最大荷重時のひずみを測定できた訳ではないので、その場合には他の供試体を代表とした。

3.2.1 縦ひずみ

応力-縦ひずみ曲線と設定荷重速度の関係を図-6に示す。ここでの縦ひずみには、供試体の中央部で測定

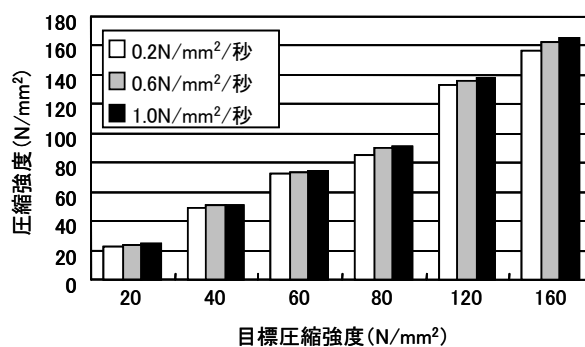


図-3 圧縮強度試験結果

表-5 F検定の結果 ($\Phi_1=2$, $\Phi_2=4$, $P=5\%$)

目標 圧縮強度	各設定荷重速度 での圧縮強度の 変動係数(%)			計算 値	F 値	有意 差
	0.2	0.6	1.0			
20 N/mm ²	5.9	4.4	4.1	3.33	6.94	ない
40 N/mm ²	2.6	2.3	2.2	78.55		ある
60 N/mm ²	3.2	3.9	2.9	7.72		ある
80 N/mm ²	3.0	1.9	3.4	8.57		ある
120 N/mm ²	3.4	3.0	3.9	8.21		ある
160 N/mm ²	4.0	2.3	2.7	7.21		ある

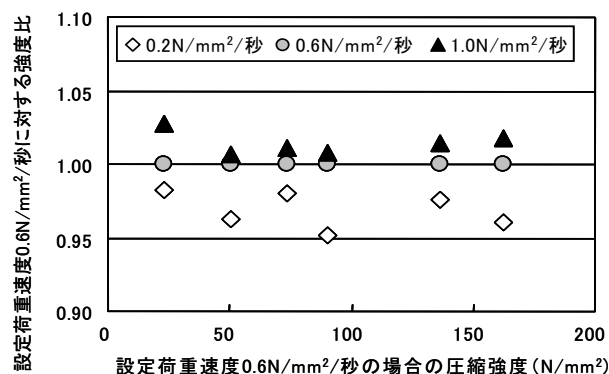


図-4 設定荷重速度 $0.6 \text{ N/mm}^2/\text{秒}$ に対する各設定荷重速度の強度比

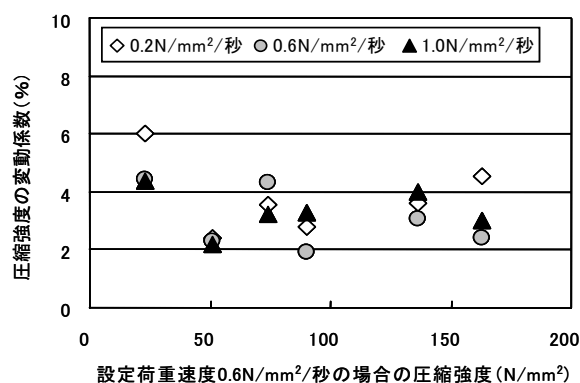
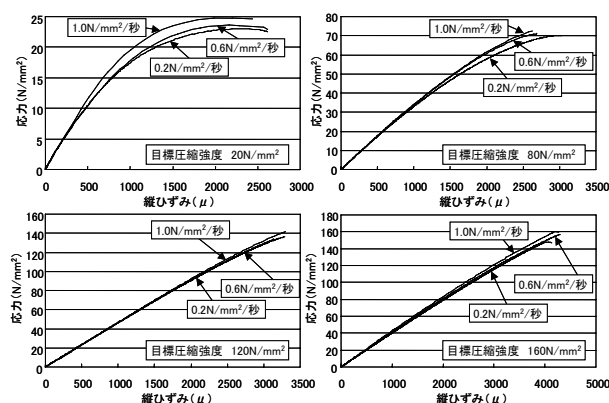


図-5 各強度レベルにおける設定荷重速度と圧縮強度の変動係数

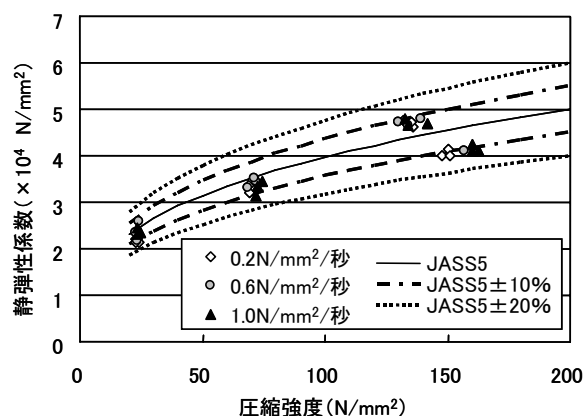
した縦ひずみの平均値を用いている。これより、応力－縦ひずみ曲線の勾配は、設定荷重速度が速いほど大きくなることわかる。この傾向は、既往の研究⁶⁾とも符合している。また、今回の実験範囲では、目標圧縮強度が高いコンクリートほど破壊時の縦ひずみが大きくなった。この傾向は、筆者らの一人が報告した既往の研究結果⁷⁾と符合する。一方、設定荷重速度が応力－縦ひずみ曲線に及ぼす影響は、目標圧縮強度が低いコンクリートほど顕著となった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図－7に示す。ここで示した静弾性係数は、最大荷重の1/3の応力が作用した時の割線静弾性係数である。また、図中には実際の構造設計などで用いられている建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5「鉄筋コンクリート工事」⁸⁾に示される(1)式による静弾性係数の推定結果も示している。なお、ここでは使用材料によって決定される係数 k_1 , k_2 を1.0とし、コンクリートの単位容積質量を 2.4t/m^3 と仮定して推定値を算出している。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_c}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots (1)^{8)}$$



図－6 応力－縦ひずみ曲線と設定荷重速度の関係



図－7 圧縮強度と静弾性係数の関係

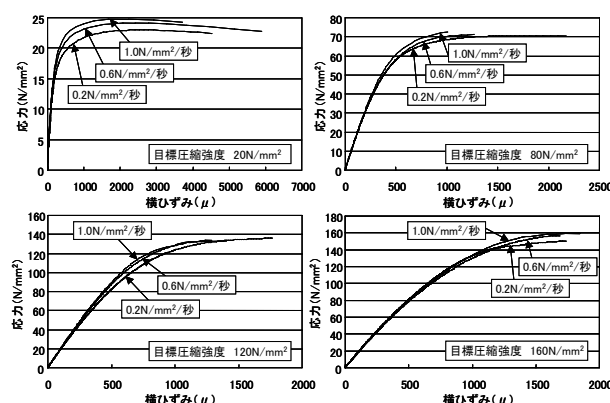
ここに、 E : コンクリートの静弾性係数 (kN/mm^2)
 γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m^3)
 σ_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)
 k_1, k_2 : 骨材, 混和材による係数

図－7からわかるように、JIS A1108-2006 の範囲における設定荷重速度の違いはコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係に若干の影響を与えるが、(1)式による推定結果を含めて考えると、実務上はほとんど影響のない範囲と考えられる。

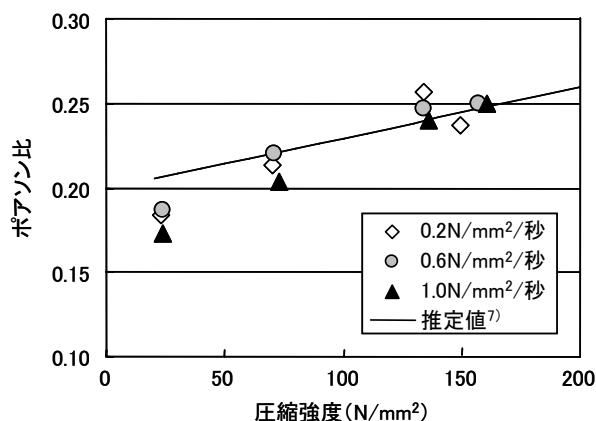
3.2.2 横ひずみ

応力－横ひずみ曲線と設定荷重速度の関係を図－8に示す。これより、応力－横ひずみ曲線の勾配も、設定荷重速度が速いほど大きくなることわかる。縦ひずみと同様に、今回の実験範囲では、設定荷重速度が応力－横ひずみ曲線に及ぼす影響は、目標圧縮強度が低いコンクリートほど顕著となった。

圧縮強度とポアソン比の関係を図－9に示す。ここで示したポアソン比は、最大荷重の1/3の応力が作用した時の縦ひずみと横ひずみの比である。図中には、筆者の一人が行った既往の研究⁷⁾によるポアソン比推定値も



図－8 応力－横ひずみ曲線と設定荷重速度の関係



図－9 圧縮強度とポアソン比の関係

示した。図-9からわかるように、JIS A1108-2006 の範囲における設定荷重速度の違いはコンクリートの圧縮強度とポアソン比の関係にも若干の影響を与えるが、実務上はほとんど影響のない範囲と考えられる。

3.2.3 供試体全体の変形

各供試体の荷重が最大荷重の 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 倍および最大荷重時となった時の載荷面近傍と中央部の縦ひずみの関係を図-10に示す。ここでの載荷面近傍

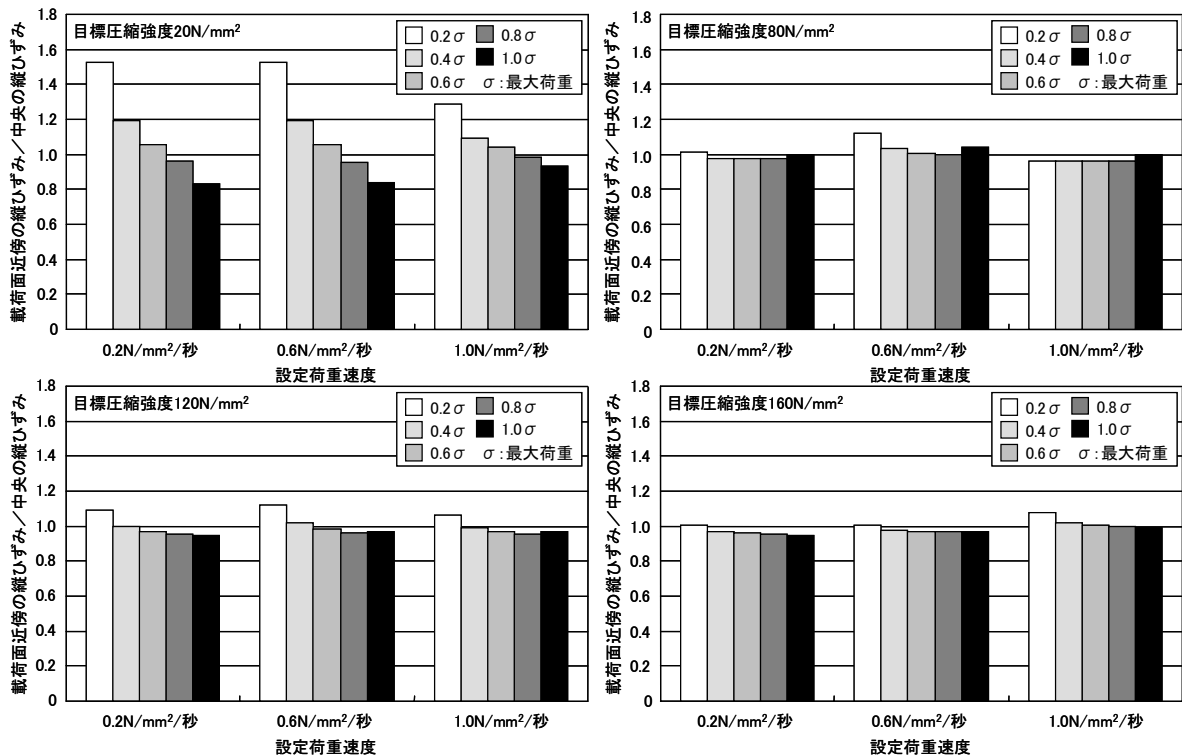


図-10 各荷重時における載荷面近傍と中央の縦ひずみの関係

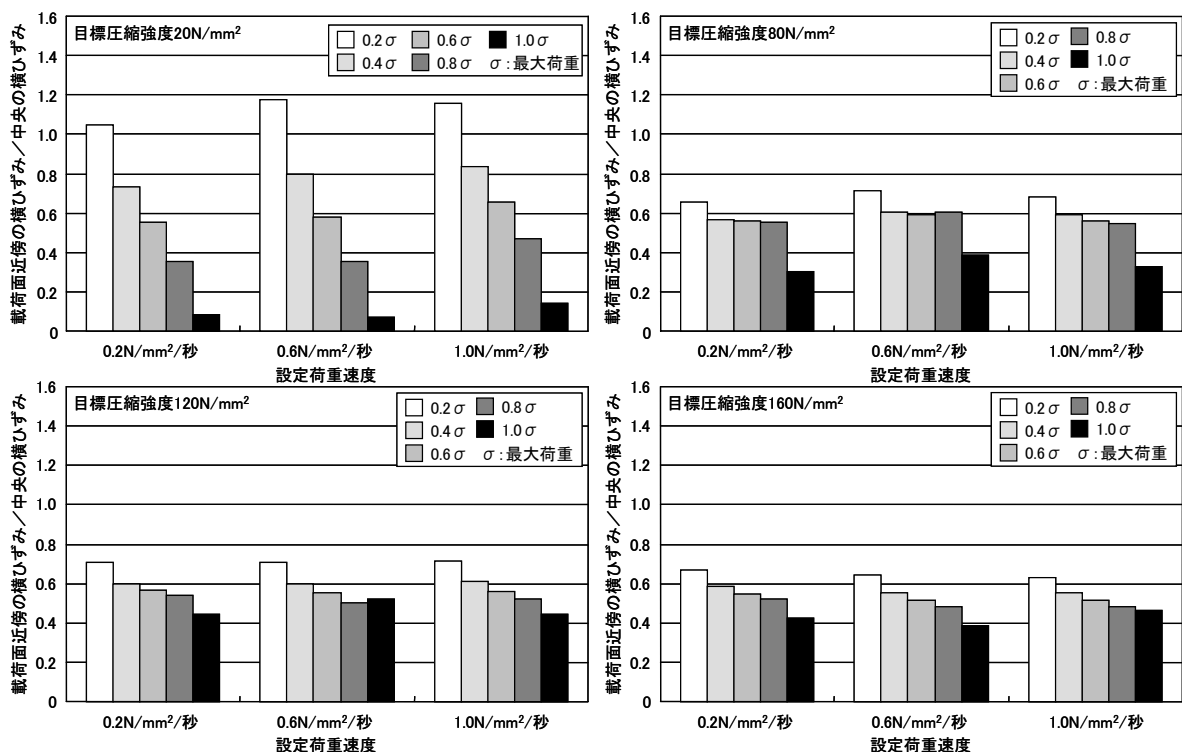


図-11 各荷重時における載荷面近傍と中央の横ひずみの関係

の縦ひずみとは、供試体の載荷面近傍において 30mmゲージで測定した縦ひずみの平均値、中央の縦ひずみとは図-6で扱った縦ひずみを示している。図-10より、目標圧縮強度 20N/mm^2 の一般的なコンクリートと目標圧縮強度の高い 80, 120, 160N/mm^2 のコンクリートでは、供試体全体の縦方向の変形過程は異なるものと考えられた。また、設定荷重速度の影響は明確ではなかった。

目標圧縮強度 20N/mm^2 のコンクリートの載荷面近傍の縦ひずみは、設定荷重速度にかかわらず、荷重の小さい時は中央よりも大きく、荷重の増加とともに中央と同程度となり、最終的には中央よりもやや小さくなった。一方、目標圧縮強度 80, 120, 160N/mm^2 のコンクリートの載荷面近傍の縦ひずみは、設定荷重速度や荷重の大きさにかかわらず、概ね中央と同程度となった。載荷面近傍と中央の縦ひずみが異なることを線材の一軸圧縮で説明することは難しいが、少なくとも一般的なコンクリートの供試体に比べ、目標圧縮強度 80, 120, 160N/mm^2 のような強度の高いコンクリートの供試体は、圧縮強度試験時に縦方向にほぼ均等に変形すると考えられる。

図-10と同じ手法で横ひずみの関係を整理したものを図-11に示す。ここでの載荷面近傍の横ひずみとは、供試体の載荷面近傍において 60mm ゲージで測定した横ひずみの平均値、中央の横ひずみとは図-8で扱った横ひずみを示している。図-11からわかるように、目標圧縮強度や設定荷重速度にかかわらず、載荷面近傍の横ひずみは荷重が増加するにつれて中央よりも小さくなった。また、目標圧縮強度が低いほど、荷重の増加にともなう載荷面近傍と中央の横ひずみ量の相対的な関係の変化が大きかった。これは、目標圧縮強度の高いコンクリートほど、圧縮強度試験時における供試体全体の横方向の変形が揃う傾向にあることを示唆している。載荷面近傍と中央の横ひずみ量が異なる理由は、供試体の載荷面を載荷板が拘束することによるものと考えられる。したがって、強度レベルが異なることによって載荷面近傍と中央の横ひずみ量の相対的な関係が変化する理由は、拘束の度合いが異なるためと考えられる。

今回の実験で得られた結果は、強度レベルの高いコンクリートでは、圧縮強度試験時の供試体の変形が一般的なコンクリートの供試体に比べて均等に近づくというものであった。この理由としては、供試体載荷面の拘束の度合いが影響していると考えられた。既往の研究⁹⁾では、供試体の細長比が圧縮強度試験結果に及ぼす影響が、コンクリートの強度レベルが高くなるほど減少することが報告されている。供試体の細長比と圧縮強度試験結果の関係も供試体載荷面の拘束の度合いに影響されることが考えられることから、今回の結果はこのような既往の知見を裏付ける一つの結果ではないかと考えている。

4. まとめ

- (1) 設定荷重速度 $0.6\text{N/mm}^2/\text{秒}$ での圧縮強度を基本として考えた場合、設定荷重速度 $1.0\text{N/mm}^2/\text{秒}$ の場合の圧縮強度は 1~3%程度高く、設定荷重速度 $0.2\text{N/mm}^2/\text{秒}$ の場合の圧縮強度は 2~5%程度低くなった。
- (2) (1)の結果の妥当性をF検定で判定した結果、目標圧縮強度 20N/mm^2 以外のものは有意差が認められた。
- (3) 設定荷重速度は静弾性係数およびポアソン比の値にも影響したが、現行の JIS A1108-2006 に示される荷重速度の範囲であれば、設定荷重速度が両者へ与える影響はあまり大きなものではないと考えられた。
- (4) 目標圧縮強度 80, 120, 160N/mm^2 といった強度レベルの高いコンクリートでは、圧縮強度試験時の供試体全体の縦変形および横変形が、一般的なコンクリートの供試体に比べて変形が均等に近づく傾向にあった。

参考文献

- 1) J.Takeda : A Loading Apparatus for High Speed Testing of Building Materials and Structures, Proc.of the 2nd Japan Congress on Testing Materials, 1959
- 2) 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.12-18, 1997
- 3) 小山善行, 早川光敬, 陣内 浩, 今西正尚: 超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす端面処理の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.519-524, 2007
- 4) 鈴木澄江, 榊田佳寛: コンクリートの圧縮強度レベルと確率分布形状, 日本建築学会構造系論文集, 第 578 号, pp.1-6, 2004.4
- 5) 吉本 彰: 載荷速度がコンクリートの曲げ試験値におよぼす影響, セメント技術年報, XIV, pp.421-425, 1960
- 6) 例えば, 奥島正一, 小阪義夫, 西岡思郎: 載荷速度がコンクリートの不完全弾性挙動におよぼす影響について, セメント技術年報, XV, pp.250-254, 1961
- 7) 陣内 浩・並木 哲・黒岩秀介・渡邊悟士: 高強度コンクリートの各種力学特性に関する研究, 日本コンクリート工学協会「高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会」報告書・論文集, pp.396-403, 2006.7
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 「鉄筋コンクリート工事」, 2003
- 9) 友澤史紀・榊田佳寛・棚野博之・上西 隆・野口貴文・小野山貫造: 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 3 供試体の細長比の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.509-510, 1989.10