

論文 高強度コンクリートの供試体端面の圧力分布と円周方向ひずみに及ぼす高さの影響

入江 一次^{*1}・黒井 登起雄^{*2}・松村 仁夫^{*3}

要旨：本研究は、圧縮強度試験、コンクリートの軸方向と上下端部近傍の円周方向のひずみ測定、圧力測定フィルムによる加圧面の圧力分布の解析などによって圧縮強度 80MPa 以上のコンクリートにおける圧縮強度特性を実験的に検討したものである。本研究の実験結果から、以下の各点が明らかになった。(1) コンクリートの圧縮強度は、円柱供試体の直径と高さの比(h/d)が 2.0 であっても端部摩擦の影響で、円周方向の拘束を受けている可能性がある。(2) 高強度コンクリートの供試体の上下端部の拘束は、円周方向ひずみの観測および加圧面の圧力分布解析の結果より、供試体高さや、上下端面の平滑度による摩擦の影響を受けている。

キーワード：高強度コンクリート, 圧縮強度, 供試体高さ, 圧力分布, 圧力測定フィルム, 円周方向ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化診断、補修・補強などにおけるコンクリート品質は、JIS A 1107 に従って圧縮強度試験を行って判断される。健全なコンクリートであれば一つの物性値を把握することで、圧縮強度、引張強度および弾性係数の間にある一定の関係が成立し、ほかの物性の大略は推定できるためである。コンクリート供試体に圧縮荷重を加えると供試体の上下端面と加圧板との間に摩擦が生じる。このとき生じた摩擦抵抗力は、供試体の中心に向かって半径方向に作用し、供試体の端部付近における横方向変形を拘束するため、圧縮強度が増加すると、この拘束の影響も増大する。しかし、高強度コンクリートの圧縮強度試験は、強度に関係なく JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行なわれている。そこで、本研究では、圧縮強度試験(実験-1,2,3)、コンクリートの軸方向と上下端部近傍の円周方向のひずみ測定(実験-1,2,3)、高速度カメラによる破壊性状の観測(実験-1,2)、圧力測定フィルムによる加圧面の圧力分布の解析(実験-2,3)などによって、高強度コンクリートの強度と端面の影響などを実験的に検討した。

2. 使用材料および実験要因

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、鬼怒川産川砂(密度：2.56~2.65g/cm³、吸水率：2.16~2.76%、粗粒率：2.72~2.87)を使用した。粗骨材は、硬質砂岩砕石(葛生町産、最大寸法：20mm、密度：2.58~2.63g/cm³、吸水率：0.77~0.94%、粗粒率：5.87~6.63)を使用した。混和剤は、高性能 AE 減水剤(SP8HE)、消泡剤(404)、AE 減水剤(ヴィンソル 80)、AE 剤(ヴィン

ソル)を W/C によって使い分けた。表-1 に各水準の配合と、フレッシュコンクリートの性質を示す。

2.2 実験要因および水準

各試験に用いたコンクリートの実験要因および水準を表-2~4 に示す。なお、実験-3 における空気量の規定は実験-1,2 の結果より、規定無しとした。

3. 実験方法

3.1 コンクリートの練混ぜと供試体の作製

コンクリートの練混ぜは、容量 100ℓ のパン型強制練りミキサで行った。供試体個数は、各水準共 3 個とした。供試体高さの調整は、打ち込み時にやや高めにコンクリートを打ち込み、14 日以上の中水養生後に供試体上下端部をコンクリート研磨機により研磨して行った。

3.2 供試体の成形と側面形状測定(直角度の測定)

各供試体は、材齢 1 日で脱型し、試験材齢(28 日以上)まで 20±3 の水中で養生した。供試体の上下の端面は、材齢 14 日以降にコンクリート研磨機により仕上げ、圧縮試験前にすべての供試体の直角度を変位測定装置で測定し、直角度が 90±0.5° 以内にあることを確認した。

3.3 供試体のひずみ測定

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に従って行った。また、供試体端部の円周方向ひずみの測定は JIS A 1149 によって、ひずみゲージ(ゲージ長 60mm)を貼付けて測定した。

3.4 強度試験時の破壊状況の観察

コンクリート供試体の圧縮強度試験時における破壊時のひび割れ状況は、高速度ビデオカメラ(Phantom V4.2)によって撮影し、供試体高さの違いによる破壊性状を確認、検証した。

*1 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 研究員(正会員)

*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科教授 (正会員)

*3 足利工業大学 工学部都市環境工学科助手 (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フロー ^{*2} / スランプ ^{*3} (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤		
20(実験-1)	38.4	174	870	503	812	15.66 ^{*1}	-----	60×60 ^{*2}	4.5
20(実験-2)	39.2	174	870	512	804	13.92 ^{*1}	-----	52×50 ^{*2}	4.3
20(実験-3)	38.4	174	870	509	796	16.10 ^{*1}	-----	55×55 ^{*2}	5.3
25(実験-1)	39.4	174	696	573	886	6.960 ^{*1}	-----	52×50 ^{*2}	4.3
25(実験-2)	40.2	174	696	583	877	6.612 ^{*1}	-----	54×55 ^{*2}	5.0
25(実験-3)	39.4	174	696	579	870	6.960 ^{*1}	-----	55×55 ^{*2}	5.0
30(実験-1)	43.6	194	647	630	818	1.941	0.259	10.3 ^{*3}	4.0
30(実験-2)	40.3	162	540	649	973	2.160	0.216	10.7 ^{*3}	4.1
30(実験-3)	40.4	188	625	605	868	2.500	0.438	10.7 ^{*3}	4.1

¹*: 併せて消泡剤(404)を使用 ²*: スランプフロー値 ³*: スランプ値

表-2 実験要因および水準(実験-1)

W/C (%)	コンシステンシーの範囲 (cm)	空気量 (%)	供試体の寸法の寸法 (h/d)
20	フロー= 55±5	5±1	2.0
25			1.8
30	スランプ= 10±1		1.6
			1.4
			1.0

表-3 実験要因および水準(実験-2)

W/C (%)	コンシステンシーの範囲(cm)	空気量 (%)	供試体の寸法(h/d)
20	フロー=	5 ± 1	3.0
25	55 ± 5		2.5
30	スランプ= 10 ± 1		2.0
			1.5

表-4 実験要因および水準(実験-3)

W/C (%)	コンシステンシーの範囲(cm)	空気量 (%)	供試体の寸法 (h/d)
20	フロー=	5 ± 1	3.0
25	55 ± 5		2.5
30	スランプ= 10 ± 1		2.0
			1.5

3.5 圧力測定フィルムによる端部圧力の測定・解析

(1) シートの種類と測定原理

1) 圧力測定フィルムの種類；フィルムにはツーシートタイプとモノシートタイプの2種類があり、本実験では、モノシートタイプの高圧用のフィルム（測定可能圧力範囲；50～130MPa）を用いた。

2) 発色の原理；フィルムの赤い発色は、図-1 に示すように、発色剤層のマイクロカプセルが圧力によって破壊され、その中の発色剤が顕色剤に吸着する化学反応で生ずる。発色剤のマイクロカプセルは、用途に応じた大きさ・強度に調整され、かつ均一に塗布されているため、圧力に応じた発色濃度が得られる。また、圧力測定フィルムの発色濃度は、測定時の温度と湿度の影響を受けるため、圧力測定の際には測定時の温度・湿度を記録する必要がある¹⁾。圧力測定フィルムによって定量的な圧力データを得る場合には、図-2 の標準色見本の濃度（発色濃度）と圧力との関係で示される A および B 曲線による解析や、後述する測定機器によって解析することになる。

(2) 測定機器の構成

圧力測定に使用する機器は、解析用 PC と解析画像読み取り用スキャナー(FUJIFILM PRESCALE FPD-9210)で構成される。画像解析は、スキャナーによって読み込まれた、圧力測定フィルム上の赤色の濃度を「圧力画像解析ソフトウェア FPD-9210S」により圧力に変換し行われる。

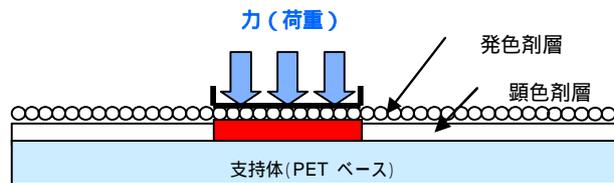


図-1 圧力測定フィルムの発色原理

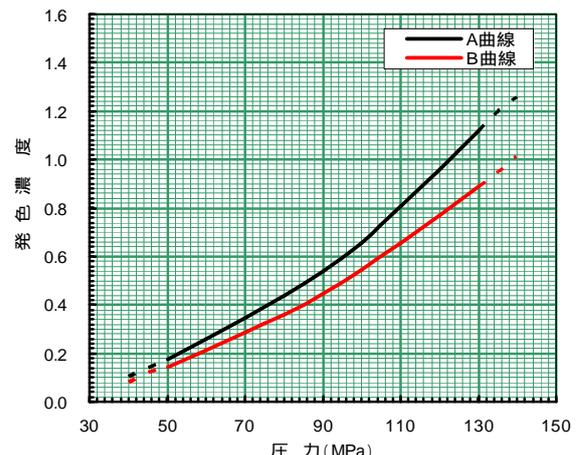


図-2 圧力と発色濃度との関係 (持続圧標準チャート)

(3) 圧力の画像解析手順と解析機能

圧力測定フィルムによる圧力画像解析は、図-3 に示す解析システムを起動させて、「基本応力断面図」の読み取り作業で開始する。解析機能は、検討の目的によって面分析や Excel データ化などがある。

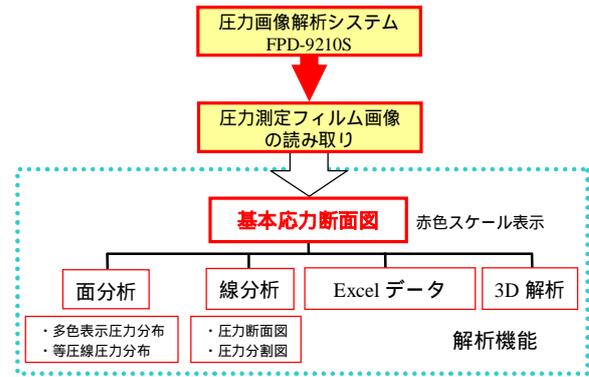


図-3 画像解析システムの手順と解析機能

4. 高強度コンクリートの圧縮強度特性

4.1 h/d と圧縮強度の関係

図-4 は、高強度領域 ($W/C=20 \sim 30\%$) における h/d と圧縮強度比 ($h/d=3.0$ における強度を 1.0 として表示) の関係を示す。図より、普通強度(圧縮強度 40MPa 以下)のコンクリートと同様に、高強度領域のコンクリートにおける圧縮強度も、 h/d が小さくなるとともに増加することが認められる。また、普通強度領域において一般に云われている強度変化²⁾と同様に、 $h/d > 2.0$ の範囲における強度は、 $h/d=2.0$ の強度より若干の低下が認められる。しかし、その低下の割合も 5% 程度であることから、高強度コンクリートの供試体高さの変化による圧縮強度の変化は、 $h/d=3.0$ でほぼ一定になるものと考えられる。

4.2 h/d と円周方向ひずみ

図-5 は、 $W/C=20\%$ における各供試体 ($h/d=1.0 \sim 3.0$) の $1/3$ 圧縮応力時の平均横方向ひずみの高さ (中央部と上下端部の 3 箇所) 分布を示す。図-5 より、高強度コンクリートの円周方向ひずみの高さ方向分布は、 $h/d=2.0 \sim 3.0$ の場合、中央部から上端部におけるひずみに比べ、下端部のひずみが小さくなっていることがわかる。これは、圧縮強度試験機の構造が、上端部を固定し、下方向から圧力を加える構造となっているため、下端部において、上端部に比べてより大きな摩擦拘束力が生じているのではないかと考えられる。なお、上端部の研磨による傷の影響も考えられるが、本研究では、研磨による傷がないように注意した。しかし、 $h/d = 1.5$ の場合、ひずみの高さ方向分布は、異なる破壊状況になってくるため、上記と違う分布を示すと思われる。

4.2 圧縮強度試験時における破壊性状

写真-1 は、 $h/d=2.0$ 、圧縮強度 108MPa および $h/d=3.0$ 、圧縮強度 94.3MPa の円柱供試体による高強度コンクリートの破壊状況 (ひび割れ発生から破壊まで) の連続写真を、また、表-5 は圧縮強度試験における供試体の破壊性状をそれぞれ示す。写真-1 より、圧縮強度 108MPa の高強度コンクリート ($h/d=2.0$) の破壊状況は、変形がひび割れ発生後 0.175 秒という短時間のうちに急激に進行し、破壊完了に至っている。このときの破壊状況は、供試体の破壊面の形状から、「せん断ひび割れ発生後圧縮破壊」と考えられる。また、圧縮強度 94.3MPa の高強度コンクリート ($h/d=3.0$) の破壊状況は、ひび割れ発生後 0.30 秒の時点で一度コンクリートの欠落が見られたが、 $h/d=2.0$ の

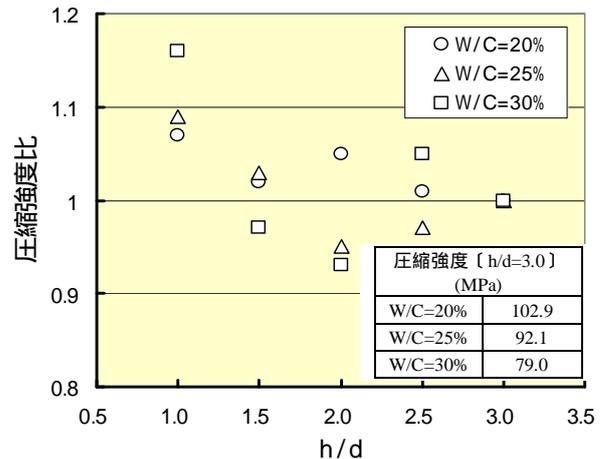


図-4 h/d と圧縮強度比($h/d=3.0$ 基準)の関係

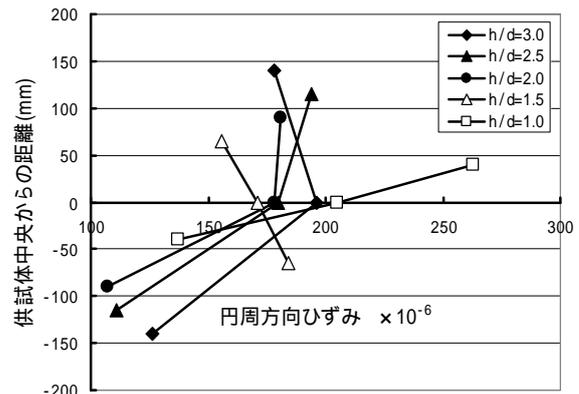


図-5 各種供試体の円周方向ひずみ分布($W/C=20\%$)

供試体と同様に、ひび割れ発生後 0.52 秒という短時間で急激に変形が進行し、破壊に至っている。この欠落は供試体強度に大きな影響を及ぼしていないようである。このときの破壊状況は、供試体の破壊面が上下加圧面に到達していないこと、この形状から、普通強度における $h/d=2.0$ の破壊と同様に、「せん断破壊」と考えられる。また、表-5 より、コンクリートの圧縮強度 (W/C) と h/d の変化による、圧縮強度試験時における破壊性状の一覧表を見ると、 $h/d=2.0$ における破壊性状は、普通強度領域のコンクリートと高強度領域のコンクリートで大きく異なる。しかし、高強度領域のコンクリートの破壊性状も、

W/C=20% h/d=2.0 圧縮強度：108MPa				
	経過時間(秒)	0.00	0.15	0.165
W/C=20% h/d=3.0 圧縮強度：94.3MPa				
	経過時間(秒)	0.00	0.10	0.30

写真-1 高強度コンクリートの破壊状況の一例

表-5 圧縮試験による供試体の破壊状況

		h/d		
		3.0	2.0	1.0
W/C (%)	40*	-----	せん断破壊	せん断破壊 (h/d=1.4)
	30	せん断破壊	せん断破壊	圧縮破壊
	25	せん断破壊	せん断ひび割れ 発生後 圧縮破壊	-----
	20	せん断破壊	せん断ひび割れ 発生後 圧縮破壊	圧縮破壊

*高強度コンクリートとの比較用³⁾

h/d を大きく(h/d=3.0 付近)することによって、普通強度領域のコンクリートと同様に、せん断破壊になることがわかる。図-6 に各供試体の円周方向ひずみ分布(W/C=20%)と計算値(弾性理論)との比較³⁾を示す。写真-2 は、供試体の破壊面の拡大写真を示す。写真より、両供試体ともに最も破壊の激しい部分が供試体中央部よりやや上側であること、図-6 に示す供試体の円柱方向ひずみ分布の h/d=2.0 の供試体においてひずみの最も大きい箇所が供試体上端部から約 h/4 の部分であることから、供試体端部と加圧板との摩擦による拘束の影響は下端部に比べ、上端部の方が小さいと考えられる。また、

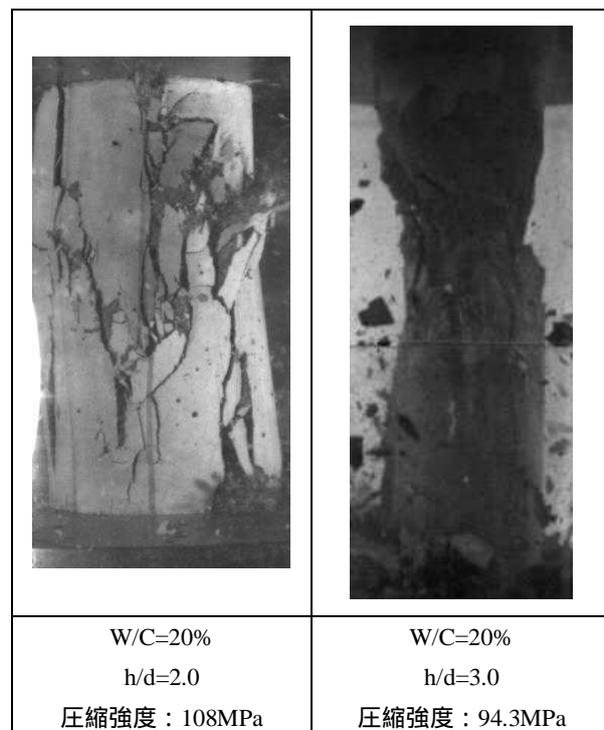


写真-2 高強度コンクリートの破壊面の拡大写真

両供試体の破壊面の形成角度に注目すると、h/d=2.0 および 3.0 の両供試体ともに同様の形状を示しているが、供試体端部に注目すると、h/d=2.0 の供試体の破壊面は、それが端部の加圧面にまで到達し、摩擦拘束の影響を受ける状況になっているのに対して、h/d=3.0 の供試体の場合

には、そのような状況が認められないことから、高強度領域のコンクリートにおける圧縮強度試験結果は、供試体が $h/d=2.0$ であったとしても、供試体端部における摩擦の影響を強く受けている圧縮強度を示している可能性がある。

4.3 圧力測定フィルムによる圧力測定・解析

図-7 は、圧縮強度試験時における供試体上端部の圧力分布を示す。図-7 より、高強度コンクリートの圧縮強度試験時の供試体上端部の圧力分布は、一部に供試体研磨時の研磨傷による欠損が見られるものの、何処か一箇所に偏心する状況もなく、ほぼ一様になっている。解析画像の図を詳細に観察すると、赤色の濃い(圧力の高い)部

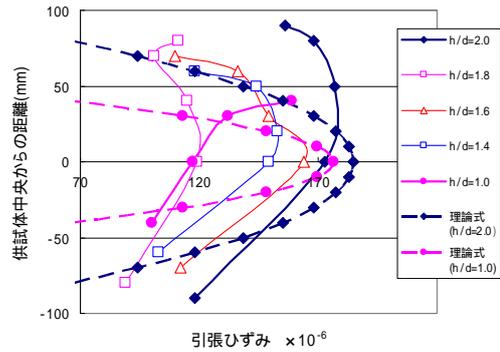


図-6 各供試体の円周方向ひずみ分布(W/C=20%)と計算値との比較³⁾

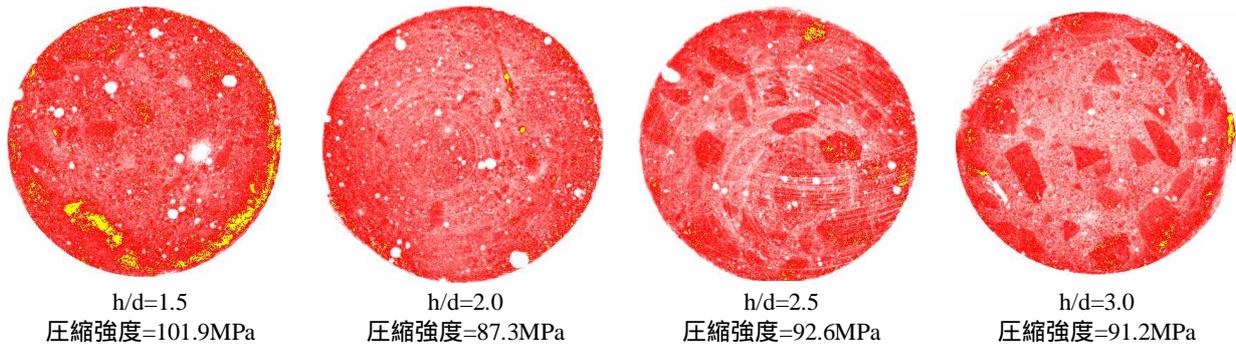


図-7 供試体上端部の基本応力断面図 (W/C=25%)

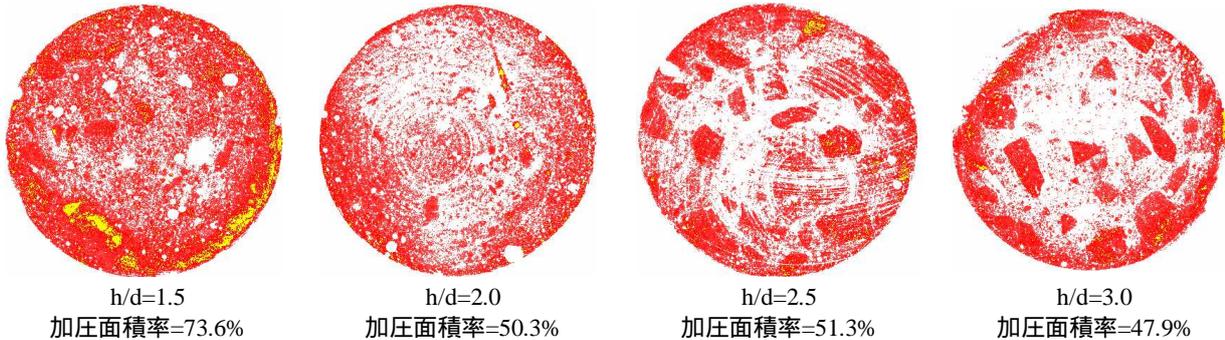


図-8 供試体上端部の定圧線圧力分布 (W/C=25%)

分は、供試体中央部分よりは外周部分にやや多く認められる。また、濃色(圧力の高い)部分の割合は、 h/d が小さくなり、圧縮強度が増加すると多くなり、 h/d 2.0 の場合にはほぼ全域に広がっていることが認められる。これは、前述した様に、圧縮試験機と供試体との間の摩擦抵抗力により、加圧圧力が増大したものと考えられる。

図-8 は、図-7 の圧縮強度試験時における供試体上端部の圧力分布(基本応力断面図)から、 $h/d=2.0, 2.5$ および 3.0 における平均圧力未満を取り除き、平均圧力以上の圧力分布(定圧線圧力分布)を示している。図-8 より、図-6 同様に圧縮強度試験時の供試体上端部の圧力分布は供試体端部の中心部より、外周部に大きな圧力が分布していることがわかる。さらに、図-9 は、供試体上端面における h/d と $h/d=2.0 \sim 3.0$ の平均圧力以上の加圧面積

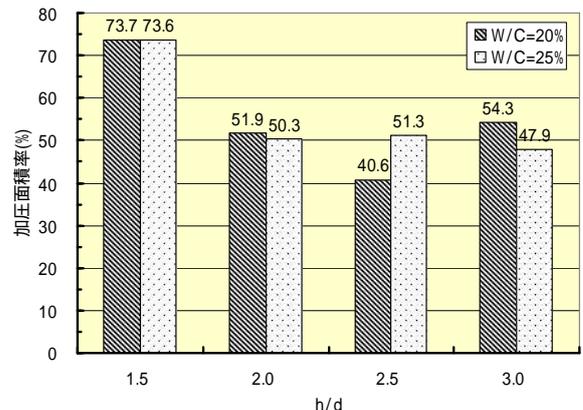


図-9 h/d と $h/d=2.0 \sim 3.0$ の平均圧力以上の加圧面積率との関係

率との関係を示す。図より、 $h/d=2.0 \sim 3.0$ の加圧面積率は、 $h/d=1.5$ の場合より小さくなり、ほぼ一定に収束する

傾向があることから、圧縮強度試験における試験機の加圧板と供試体上端面との間の摩擦抵抗力は、供試体高さが小さくなると大きくなることが認められる。また、 $h/d=2.5$ や 3.0 の供試体のように研磨傷部分に圧力に小さい部分があることや、供試体端部表面の粗骨材部分に大きな圧力がかかっていることから、高強度コンクリートの圧縮強度試験における強度の変化には、供試体の高さだけではなく、若干ではあるものの、供試体端部(加圧面)の表面形状(粗滑や粗骨材の多少等)が影響してくるのではないかと考えられる。なお、本研究では、供試体下端部が型枠底面の平滑度に対応しており、端面の研磨処理の影響がないと考え、高強度コンクリートの圧縮強度試験時の供試体端部の圧力分布測定は省略した。

5. まとめ

本研究の高強度コンクリートの圧縮強度試験における供試体高さの影響をコンクリートの強度試験、軸方向と上下端部近傍の円周方向のひずみ測定、圧力測定フィルムによる加圧面の圧力分布の解析などによって検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) h/d 2.0 の範囲における高強度領域の圧縮強度変化は、普通強度領域と同様に拘束の影響によって増大する。しかし、 $h/d>2.0$ 以上の場合、高強度コンクリートの供試体高さの変化による圧縮強度は、 $h/d=3.0$ でほぼ一定になるものと考えられる。
- (2) 高強度コンクリートの円周方向ひずみの高さ方向分布は、上端部に比べて下端部の摩擦拘束力がより大きくなるので、上端部に比べて下端部のひずみが小さくな

る。この傾向は強度が大きくなるほど顕著である。

- (3) 高強度コンクリートの圧縮強度試験時の供試体の破壊性状は、普通強度領域のコンクリートと大きく異なるが、 $h/d>2.0$ になると普通強度領域のコンクリートと同様の破壊性状を示す。
- (4) 破壊面の形状から判断すると、 $h/d=2.0$ の高強度コンクリート圧縮強度試験においては、供試体端部における摩擦の影響を強く受けている圧縮強度を示している可能性がある。
- (5) 圧力測定フィルムの解析による加圧面積率は h/d が大きくなるとともに小さくなっていることから、圧縮強度試験における試験機の上下加圧板と供試体上下面との間の摩擦抵抗力は、供試体高さの影響を強く受けていることが認められる。
- (6) 高強度コンクリートの圧縮強度試験における圧縮強度の変化は、供試体の高さだけではなく、供試体端部(加圧面)の表面形状(粗滑や粗骨材の多少等)も関係する。

参考文献

- 1) 松村仁夫・黒井登起雄・宮澤伸吾：硬化コンクリートの加圧力推定における圧力測定フィルムの活用，第 34 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告書 2007 P.15~18
- 2) 村田二郎：コンクリート技術 100 講 P.134 1990.9.30
- 3) 入江一次・黒井登起雄・松村仁夫：高強度コンクリートの h/d と圧縮破壊性状，第 3 回とちぎ大学連携サテライトオフィス学生&企業研究発表会 2006.12.2