

論文 コンクリートの圧縮強度に及ぼすアンボンドキャッピングの適用要因に関する基礎的研究

辻本 一志^{*1}・黒井 登起雄^{*2}・松村 仁夫^{*3}・鈴木 一雄^{*4}

要旨：本研究は、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用範囲を再確認することを目的に、コンクリートの圧縮強度および静弾性係数の試験とともに、端面の圧力測定フィルムによる圧力分布の測定を実施した。また、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験時のゴムパッドの使用限度を検証、 h/d （高さ直径比）の適用可否とその限界についても実験的検証を試みた。その結果、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用範囲を圧力分布測定結果から推測した場合、その上限値は圧縮強度 $50\sim60\text{N/mm}^2$ の間にあると考えられる。また、アンボンドによる圧縮強度試験においても、JIS A 1107 の補正表の適用が可能である。

キーワード：圧縮強度試験、アンボンドキャッピング、上端面の仕上げ、高さ直径比、圧力分布図

1. はじめに

近年の高強度コンクリートの技術の開発と向上とともに、コンクリートの品質管理と検査の技術の向上も非常に重要になってきている。特に、硬化コンクリートの圧縮強度試験方法における端面処理の影響、すなわち、平面度および直角度の強度に及ぼす影響は大きくなる。また、JIS 規格(JIS A 1108, 1132, 1106, 1113 など)には、具体的に平面度および直角度の測定方法などについて記述されていない。著者らは、供試体の端面処理とコンクリートの圧縮強度との関連を明らかにすることを目的に、①コンクリートの圧縮強度に及ぼす端面研磨の影響、②コンクリートの圧縮強度に及ぼすアンボンドキャッピングの影響についての実験的な研究に取り組んでいる。

コンクリートの圧縮強度試験におけるアンボンドキャッピングの適用範囲は、JIS A1108 附属書 1(規定)および JIS A5308 に規定されている。そこには、アンボンドキャッピングを用いて、圧縮強度が $10\sim60\text{N/mm}^2$ のコンクリートに適用し、なおかつ、供試体の上端面に限定と記述されている。また、2009 年改正の JIS A5308 では、アンボンドキャッピングの両端面への適用も可能になっている。しかし、アンボンドキャッピング方法による圧縮強度試験は、JIS A 1108, JIS A 5308 だけではなく、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）においても適用を規定している。アンボンドキャッピング方法による圧縮強度試験の適用範囲や、ゴムパッドの使用限度、コア供試体の高さ-直径比 (h/d) の影響などについては、不明確な部分も見受けられる。特に、コア供試体の高さの補正係数の適用は、適用データがない状況であり、高さ補正の可否を含めて不明である。そこで、本研究では、アンボンドキャッピングによ

る圧縮強度試験時に、端面の圧力測定フィルムによる圧力分布の測定を実施し、その結果と圧縮強度、静弾性係数の評価とから、適用範囲およびゴムパッドの使用限度を検証するとともに、 h/d （高さ直径比）の適用可否とその上限値についても実験的に検証した。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画および実験要因

実験は以下の 3 つのシリーズに分けて行った。

シリーズ 1；アンボンドキャッピングの適用強度限界（適用範囲）に関する実験

シリーズ 2；ゴムパッドの使用限度に関する実験

シリーズ 3； h/d （高さ-直径比）による強度補正の適用可否とその限界に関する実験

それぞれの実験における実験要因は、表 1 に示すように、水セメント比、材齢、平面度（表面仕上げ）、高さ-直径比などの組み合わせとした。シリーズ 1 の場合、要因は、水セメント比 ($W/C=30, 40, 45$ および 50%) と平面度 (0% 研磨), 0.1 および 1.0% (または 0.5%) の組み合わせとした。シリーズ 2 の場合は、主に、ゴムパッドの使用履歴(No.1~No.7 の 7 水準)とした。また、シリーズ 3 の場合は、水セメント比と高さ・直径比 ($h/d=2.0, 1.75, 1.5, 1.0$) の組み合わせとした。コンクリートは、全てのシリーズにおいて、スランプ $10\pm1\text{cm}$ 、空気量 (5 ± 1) %の AE コンクリートとした。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質を表 2 に示す。

2.2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度； 3.16g/cm^3 ）を用いた。細骨材は、普通の粒度の川砂（鬼

*1 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科 教授 博士 (工学) (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)

*4 全国生コンクリート工業組合連合会 事務局次長 工学博士 (正会員)

怒川産，密度：2.61，2.62g/cm³，吸水率：1.87，2.49%，F.M.：2.78，2.68）とし，粗骨材は，最大寸法 20mm の碎石（佐野市（旧葛生町）産硬質砂岩，密度：2.58，2.66g/cm³，吸水率：0.77，0.54%）を主に使用した。混和剤は AE 減水剤（Y 社製）を用い，空気量の調整を AE 剤で行った。

2.3 実験方法

(1) 供試体の作製と圧縮強度試験

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を用いて行った。

① シリーズ 1

強度試験用供試体は，要因・水準ごとにφ100×200mm 円柱形供試体 18 個を作製した。コンクリート供試体の養生は，20±3℃水中養生とし，圧縮強度は，JIS A 1108 および附属書 1（規定）に従って材齢 28 日で試験した。供試体端面の基本的な仕上げは，研磨とした（目標平面度 0%）。アンボンドキャッピング用供試体上端面は，目標平面度 0.1%，1.0%（一部 0.5%）になるように，内径 50mm のドーナツ型に加工した厚さ 0.1，0.5 および 1.0mm のアクリル板を挟んで，セメントペーストキャッピングで仕上げた。圧縮強度試験と同時に，ひずみ測定および圧力分布の測定・解析も行った。ひずみ測定は，ひずみゲージ（検長 60mm）を供試体の軸方向（高さ中央）に 2 箇所，円周方向（高さ方向の上中下 3 箇所の位置）に 6 箇所貼り付けて行った（図－1 参照）。その結果から，静弾性係数とポアソン比を求めた。

② シリーズ 2

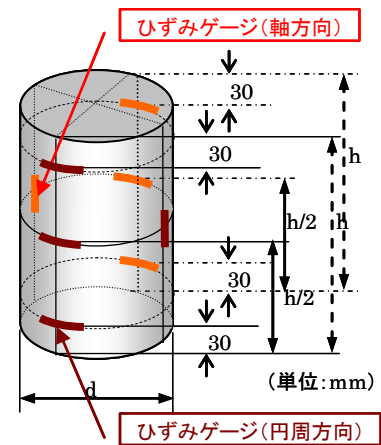
強度試験用供試体は，要因・水準ごとにφ100×200mm 円柱形供試体 17 個（研磨供試体 3 個，アンボンド供試体 14 個）を作製した。供試体の上端面の仕上げ，養生および圧縮強度試験は，シリーズ 1 と同様に行った。

③ シリーズ 3

コンクリート供試体は，シリーズ 1 と同様に，水セメント比の各水準について 24 個作製し，強度試験は，材齢 28 日および 56 日で行った。なお，供試体は，養生期間中にコンクリートカッターで， $h/d=1.75$ ，1.50 および 1.00 に切断して成型した。各供試体の表面仕上げは，コンクリートカッターによる切断仕上げとした。標準供試体 12 個（ $h/d=2.0$ ，1.75，1.50 および 1.00 の各 3 個）は，切断成型した供試体を研磨して上端面を仕上げた。各供試体の圧縮強度試験は，JIS A 1108 附属書 1（規定）に従ってアンボンドキャッピング方法により実施した。また，ひずみ測定および圧力分布測定・解析も行った。コンクリートのひずみ測定は，ひずみゲージ（検長 60mm）を高さ中央部の円周方向に 2 箇所貼り付けて行った。

(2) 平面度測定

シリーズ 1～3 の供試体の平面度は，平面度測定器具（ダイヤルゲージの測定精度；1/1000mm）を用いて測定し



図－1 ひずみゲージの貼付位置（略図）

表－1 実験要因と水準

#	要因	水準
シリーズ 1	水セメント比	0.30，0.40，0.45，0.50
	目標平面度	0%（研磨），0.1% 1.0%（または 0.5%）
シリーズ 2	水セメント比	0.40，0.60
	目標平面度	0%（研磨），0.1%，0.5%
	ゴムパッドの使用履歴	No.1 未使用（2005 年） No.2 2,000 回使用（1998 年） No.3 800 回使用（1998 年） No.4 200 回使用（1998 年） No.5 150 回使用（2008 年） No.6 180 回使用（1998 年） No.7 300 回使用（不明）
シリーズ 3	水セメント比	0.40，0.50
	材 齢（日）	28，56
	表面仕上げ	上端面の切断仕上げ
	高さ・直径比	1.0，1.5，1.75，2.0

表－2 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性質

シリーズ	#	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤			
1	1	30	40.4	216	720	542	803	2.880*	0.180	9.9	4.0	23.0
	2	40	42.4	176	440	713	973	1.760	0.110	10.9	5.1	22.0
	3	45	43.4	170	378	760	994	1.512	0.095	10.8	5.7	16.0
	4	50	44.4	165	330	801	1006	1.320	0.083	9.3	4.8	18.0
2	5	40	42.4	176	440	713	973	1.760	0.110	9.2	4.3	20.5
	6	40	42.4	176	440	713	973	1.760	0.110	9.8	4.2	18.0
	7	60	48.9	160	267	914	959	1.068	0.053	9.7	4.1	18.0
	8	40	42.2	185	463	684	951	1.389	0.116	9.0	6.0	16.5
3	9	40	42.2	185	463	684	951	1.389	0.116	10.4	5.8	18.6
	10	50	44.2	170	340	779	998	1.020	0.068	10.8	4.6	17.5
	11	50	44.2	174	348	771	988	1.044	0.070	10.8	5.2	24.1

* 高性能 AE 減水剤

た。測定は，養生期間中に，図－2 に示すように，供試体上端面の No.1～No.17 の位置の 17 点についてダイヤルゲージの読取値を記録して行った¹⁾。JIS A 1132 に基づく平面度(mm)は，17 点の測定点数から最高点位置におけるダイヤルゲージの読みと最低点位置における読みとの差で求めた。強度試験用供試体の平面度(%)は，式(1)によって算出した。

$$\text{平面度(}\%) = \{\text{最高点}-\text{最低点(mm)}\} / \text{直径(mm)} \times 100 \quad (1)$$

(3) 端面の圧力分布測定

アンボンドキャッピング用供試体の試験時の圧力分布は、材齢 28 日の圧縮強度試験時に、図-3 に示す鋼製キャップとゴムパッドの間に圧力測定フィルム（F 社製）を挿入して測定した。研磨した供試体の場合は、上端面と加圧板の間に圧力測定フィルムを挟んで行った。圧力測定フィルムは、中圧用(MS, 10~50MPa)と高圧用(HS, 50~130MPa)の 2 種類を圧縮強度レベルに応じて換えるようにした。載荷面の圧力分布の画像解析は、「圧力画像解析ソフトシステム FPD-9210S」で読み取った「基本圧力断面図」から載荷面の直交する X, Y 軸 2 方向断面の圧力分布図（解像度 1mm）を作成して行った²⁾。

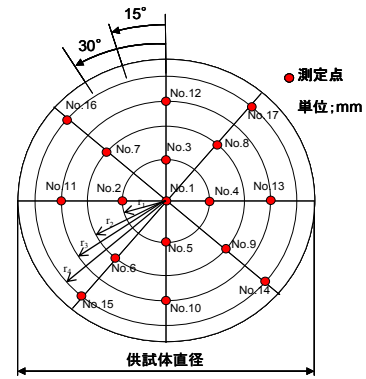


図-2 端面の平面度測定位置

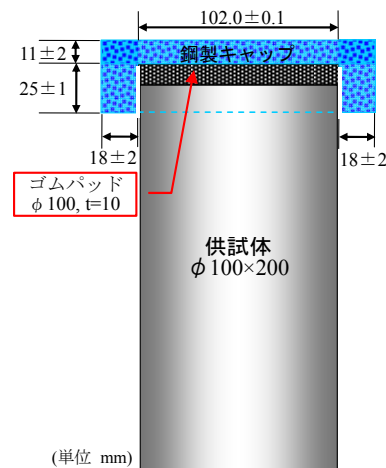


図-3 アンボンドキャッピングの鋼製キャップなどの寸法

3. アンボンドキャッピングの適用範囲に関する検討

3.1 圧縮強度および応力-ひずみ曲線

(1) 圧縮強度

図-4 は、W/C=30~50%のコンクリートの圧縮強度および変動係数を示す。図-5 は、研磨供試体とアンボンド供試体の圧縮強度の相関を示す。図-4 より、コンクリートの圧縮強度は、44.7~83.9N/mm²の範囲であり、目標とした高強度領域の強度範囲のものとなっている。また、コンクリートは、変動係数が 5%程度以下であり、良質なものとなっている。図-5 より、研磨供試体とアンボンド供試体の圧縮強度は、60 N/mm²以下の場合、良好な相関関係が認められる。しかし、60 N/mm²を超えるコンクリートになると、アンボンドキャッピングによる圧縮強度は、研磨供試体の場合より、若干小さくなる傾向が認められる。上端面の平面度と圧縮強度比（=アンボンド供試体の強度/研磨供試体の強度）との関係で示した図-6 からも同様の傾向が認められる（最も平面度の良い研磨供試体の強度を 1.0 とする強度比で表示）。すなわち、W/C=45~50% のコンクリートの圧縮強度は、1.0 前後の強度比に分布し、研磨供試体とアンボンド供試

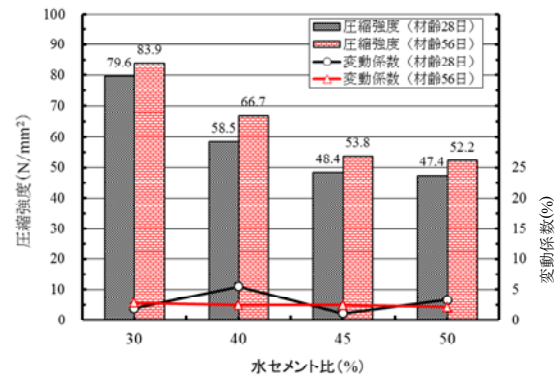


図-4 コンクリートの圧縮強度試験結果

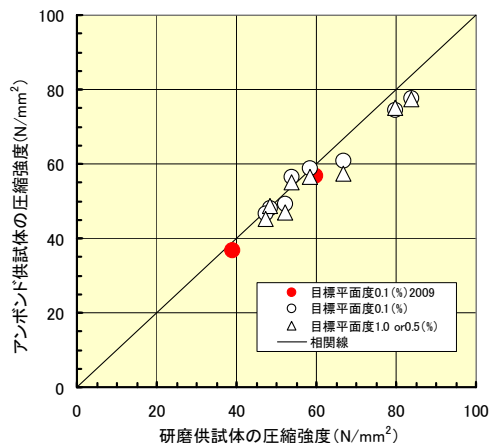


図-5 アンボンドと研磨供試体のコンクリートの圧縮強度との関係

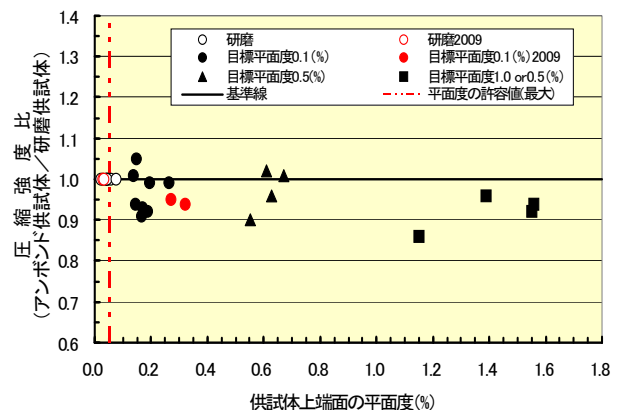


図-6 研磨供試体の圧縮強度とアンボンド供試体の強度比との関係

体でほぼ同じになるようである。これに対して、 60N/mm^2 以上の圧縮強度 ($W/C=30\sim 40\%$) の高強度コンクリートの場合、アンボンド供試体の圧縮強度は、研磨供試体より約 10%小さくなる。また、供試体上端面の平面度が大きいほど、アンボンド供試体の強度が小さくなる傾向も認められる。以上より、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用範囲は、圧縮強度 60N/mm^2 以下のコンクリートであることが確認できた。

(2) 応力-ひずみ曲線

図-7 および図-8 は、シリーズ 1 における応力ひずみ曲線の結果 ($W/C=40\%$, 50%) を示す。図より、いずれのコンクリートともに、軸方向および円周方向のひずみは、研磨およびアンボンド供試体ともほぼ同じ傾向を示している。これは、載荷面における拘束の影響がアンボンドキャッピング供試体と研磨供試体で同程度であることを示している。また、表-3 は、図-7 および図-8 の応力-ひずみ曲線で算定した静弾性係数とポアソン比の結果である。表より、アンボンド供試体の静弾性係数およびポアソン比は、値が研磨供試体よりいずれも若干大きくなる傾向が認められる。

3.2 圧縮強度と上端面の平均圧力

図-9 は、研磨およびアンボンドキャッピング (目標平面度 0.1% と 0.5%) における載荷面の基本圧力断面図の一例 ($W/C=50\%$)、図-10 は $W/C=45\%$ としたときの研磨およびアンボンドキャッピングにおける載荷面の基本圧力断面図を示したものである。また、図-11 は、図-10 に対応した載荷端面の圧力分布 (直径方向) を示したものである ($W/C=45\%$)。図より、アンボンドキャッピングにおける圧力分布は、材齢 28 日の場合と 56 日の場合で異なっている。すなわち、材齢 28 日 (圧縮強度 48N/mm^2 以下) の場合のゴムパッドと鋼製キャップ間の圧力分布は、若干凸形の形状を示している。これに対し、材齢 56 日の場合の圧力分布は、圧縮強度が 55N/mm^2 以上にもなり、均一な直線状 (圧力一定) になるようである。 $W/C=30$, 40 および 50% のコンクリートのアンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の場合においても同様の傾向が認められる。凸形の応力分布は、ゴムパッドの硬度との関連からコンクリート上端面の凹凸の影響を吸収できる状況になっているものと考えられる。しかし、高強度コンクリートになると圧力分布は、ゴムパッドの硬度の限界以上の圧力を受けることになり (鋼製キャップによって円周方向の拘束を受ける)、これが一直線になる原因と考えられる。また、図-12 は、コンクリートの圧縮強度と上端面の平均圧力との関係を示す。図より、アンボンドキャッピングを適用した場合に供試体を受ける圧力の平均は、コンクリートの圧縮強度が $50\sim 70\text{N/mm}^2$

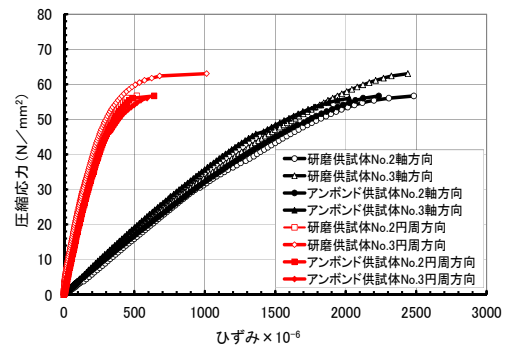


図-7 応力-ひずみ曲線 ($W/C=40\%$)

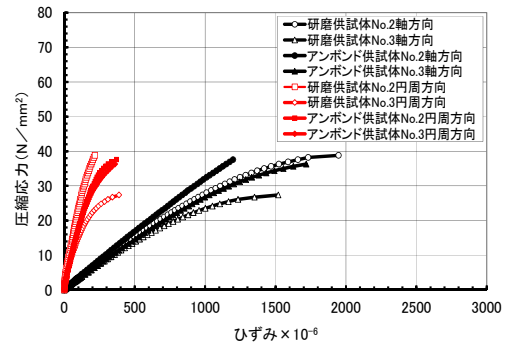


図-8 応力-ひずみ曲線 ($W/C=50\%$)

表-3 弾性係数およびポアソン比

W/C (%)	静弾性係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)				ポアソン比			
	研磨	平均値	アンボンド	平均値	研磨	平均値	アンボンド	平均値
40	3.01	2.88	3.03	3.22	0.132	0.135	0.182	0.195
	2.74		3.41		0.137		0.208	
50	2.70	2.55	2.72	2.65	0.159	0.158	0.164	0.159
	2.40		2.58		0.157		0.153	

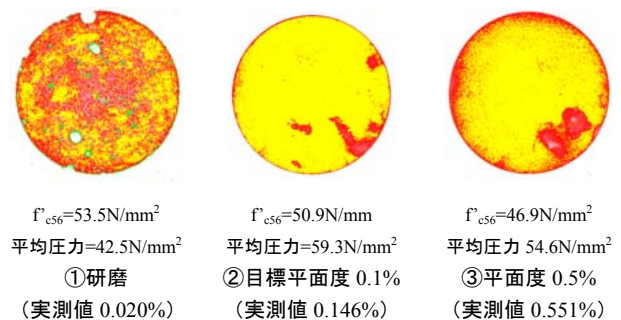


図-9 載荷上端面の基本圧力断面図の一例 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$, $W/C=50\%$)

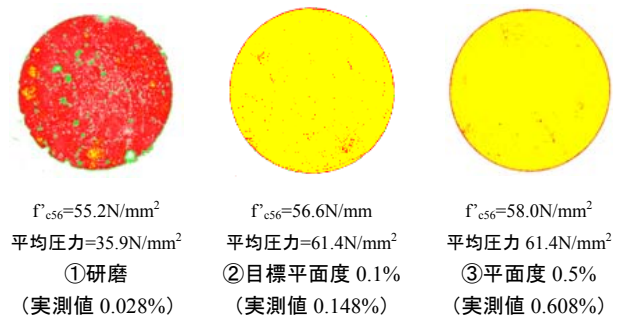
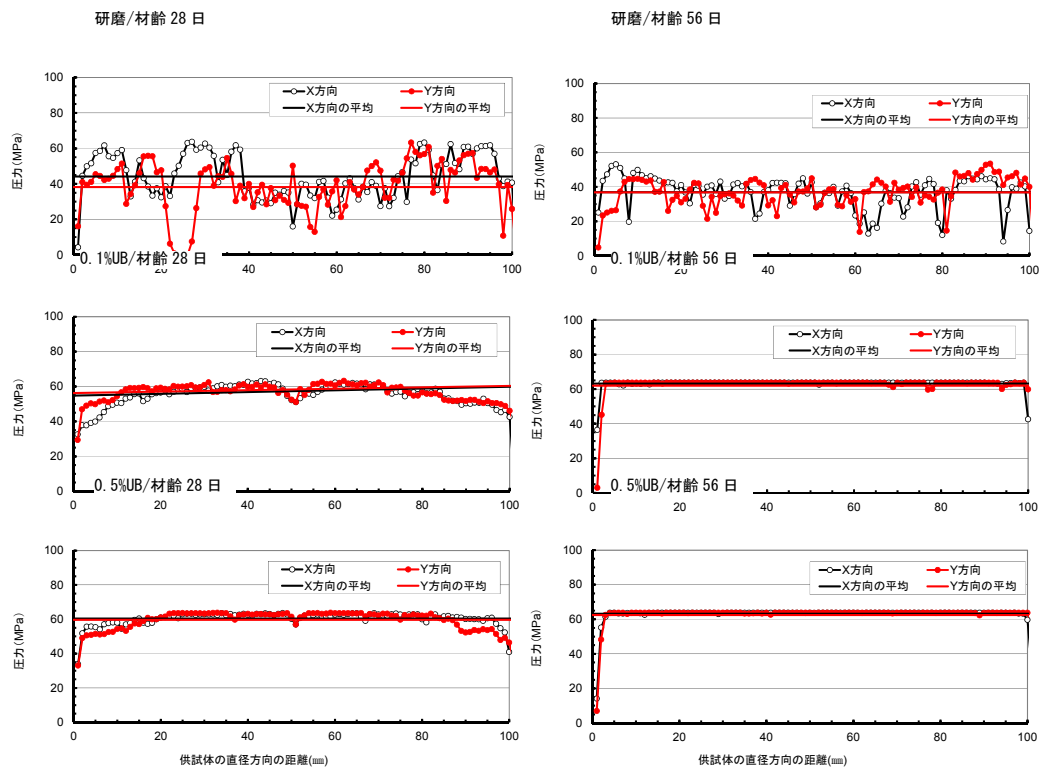


図-10 載荷上端面の基本圧力断面図の一例 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$, $W/C=45\%$)



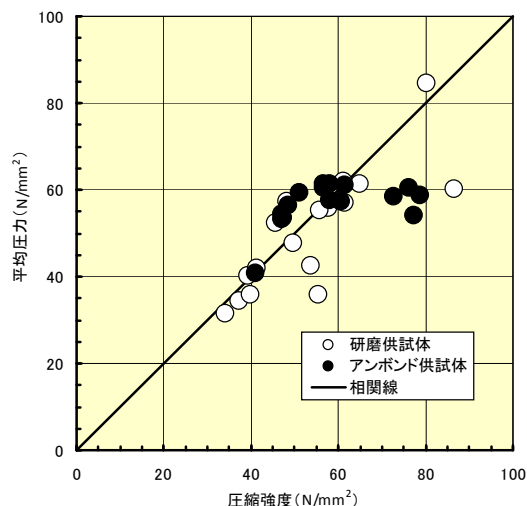
図－１１ 供試体端面の圧力分布の一例（W/C=45%，研磨およびアンボンド＜目標平面度0.1%，0.5%＞）

の範囲で 60N/mm^2 程度のほぼ一定値を示している。

以上の結果から、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用範囲を載荷面の圧力分布から推測すると、圧力分布がほぼ一定値となる圧縮強度 $50\sim 60\text{N/mm}^2$ にその上限値があると考えられる。なお、今後、圧縮強度試験時における載荷端面の圧力分布が強度の増大とともに一定になる原因、すなわち、なぜ一定の圧力になるのかについて詳細に検討する必要もある。

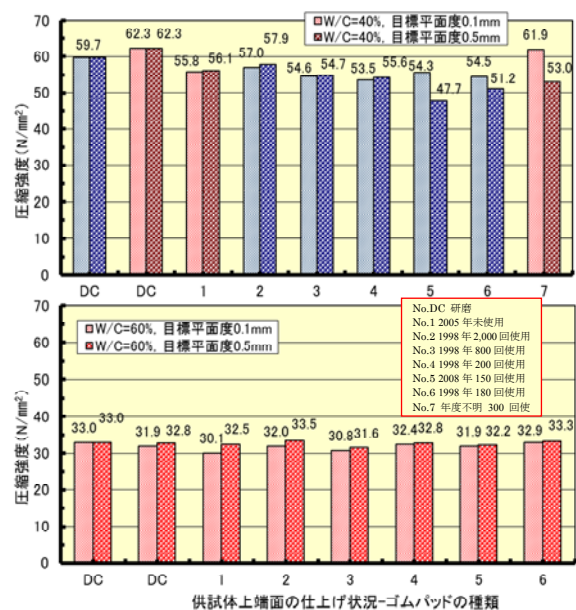
4. ゴムパッドの使用限度の検討³⁾

図－１３は、使用履歴の異なるゴムパッドによって試験したコンクリートの圧縮強度試験結果を示す（シリーズ2）。図より、時間経過したゴムパッド（150回以上繰返し使用）を使用したときのコンクリートの圧縮強度は、



図－１２ 圧縮強度と上端面の平均圧力との関係

強度レベルによって違いが見られる。すなわち、 30N/mm^2 程度のコンクリートの場合、圧縮強度は、研磨供試体と、ほぼ同じ強度である。しかし、 60N/mm^2 程度のコンクリートの場合、アンボンドキャッピングによる強度は、 $10\sim 20\%$ の低下が認められる。この強度低下は、アンボンドキャッピングの適用限界のコンクリートの圧縮強度レベルの結果であり、ゴムパッドの劣化と適用限界の両方の影響が含まれている。したがって、今後、ゴムパッドの使用限界は、アンボンドキャッピングの適用範囲を超えない強度レベルのデータを蓄積し、再度検討する必要がある。なお、No.1～No.7 のゴムパッドの測



図－１３ 上端面のゴムパッドの使用履歴と圧縮強度

定硬度は、No.4を除いて新しいゴムパッドより2以上大きくなっていた。

5 高さ-直径比 (h/d) による強度補正

5.1 高さ-直径比 (h/d) と圧縮強度

図-14は、高さ-直径比 (h/d) と圧縮強度比 ($h/d=2.0$ の時の強度を1.00とした) との関係で整理した結果を示す(シリーズ3)。なお、試験に供したコンクリートは、圧縮強度の範囲が $36.8 \sim 60.3 \text{ N/mm}^2$ ($h/d=2.0$) で、試験条件ごとに作製した3本の供試体は、圧縮強度の変動係数が5%以下でばらつきの小さなものであった。図-14より、コンクリートの圧縮強度が 60 N/mm^2 程度以下の場合、アンボンド供試体の強度比は、 h/d が小さくなるほど大きくなり、JIS A 1107の補正係数から算出される強度比の値とほぼ同じになることが認められる。したがって、アンボンド供試体においても、 h/d による強度補正が可能と考えられる。

5.2 円周方向ひずみおよび圧力分布

図-15は、図-14の圧縮強度試験における h/d の異なる供試体の高さ中央箇所の円周方向ひずみと圧縮応力との関係の一例を示す。図より、圧縮強度が 60 N/mm^2 程度 ($W/C=40\%$) あるいは超える場合、 h/d が大きいときの円周方向ひずみは、鋼製キャップおよびゴムパッドによる拘束の影響がないようであるが、 $h/d=1.5$ 以下になると拘束の影響が表れ、若干小さくなる傾向が認められる。また、圧縮強度が 40 N/mm^2 程度 ($W/C=50\%$) の場合(実験結果省略)、 $h/d=1.0 \sim 2.0$ の円周方向ひずみは、研磨供試体 ($h/d=2.0$) とほぼ同一であり、鋼製キャップおよびゴムパッドによる拘束の影響が認められないようである。 $h/d=1.5$ 以下における供試体上端部の拘束の影響は、研磨供試体およびアンボンド供試体の上端部の圧力分布図 ($W/C=40\%$) から認められる。しかし、 $h/d=1.75$ 以下のアンボンド供試体の圧力分布は、変動の少ない、一定の圧力に近づいてくる傾向が認められる。これは、ゴムパッドの硬度の限界以上の圧力を受けることに起因していると考えられる。

以上より、アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験においても、JIS A 1107の補正表の適用は可能と考えられる。ただし、圧縮強度が 60 N/mm^2 を超える、 $h/d=1.5$ 以下の供試体の場合、圧縮強度の適用限界を設定することについて、さらに検討が必要と考えられる。

6. まとめ

アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用範囲、ゴムパッドの使用限度などを検証した結果、以下の各点が明らかになった。

(1) アンボンドキャッピングによる圧縮強度試験の適用

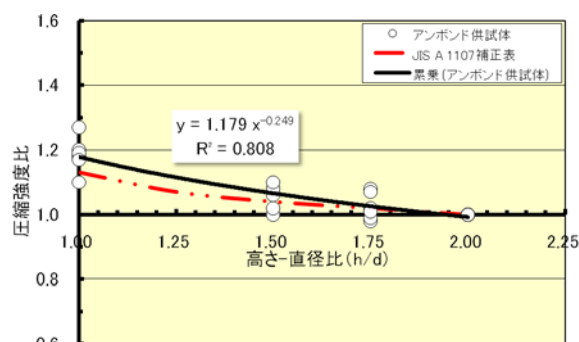


図-14 h/d と圧縮強度との関係
(アンボンド供試体)

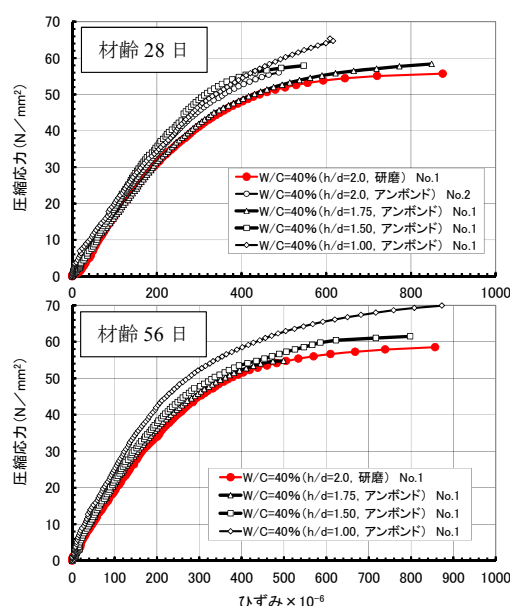


図-15 円周方向ひずみ
($W/C=40\%$, $h/d=2.0 \sim 1.0$)

限界を載荷面の圧力分布から推測すると、圧縮強度 $50 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ の間にその上限値があると考えられる。

- (2) ゴムパッドの使用回数や適用した圧縮度の履歴とアンボンドキャッピングを適用した場合に供試体を受ける圧力の分布との間には明確な関係が認められず、本実験の結果からは、ゴムパッドの使用限界を圧力分布から判定することはできなかった。
- (3) アンボンド供試体の圧縮強度試験においても、JIS A 1107の補正表の適用は可能である。

参考文献

- 1) 松村, 黒井; コンクリート供試体上端部の表面仕上げと平面度, 圧縮強度との関連性, 第36回関東支部技術研究発表会, 土木学会, 2009.3
- 2) 松村, 黒井, 宮澤; 硬化コンクリートの加圧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, 2007.11
- 3) 黒井, 宮澤, 松村, 辻本, 鈴木; コンクリートの圧縮強度試験におけるアンボンドキャッピングの適用限界, 第36回セメント・コンクリート研究討論会論文集, 2009.10 など