

論文 コンクリートの圧縮強度に及ぼす円柱供試体の上面仕上げの影響

松村 仁夫*1・黒井 登起雄*2・宮澤 伸吾*3

要旨：本研究は、各種キャッピングにおけるコンクリート上端面形状（表面仕上げ）の影響を圧縮強度試験データから明らかにし、その有効性と適用限界を検討した。また、コンクリート強度の上下限や平面度、キャッピング強度の適用条件を圧力測定フィルムによる圧力測定・解析により明らかにした。その結果、セメントペーストキャッピングによる上面仕上げは、コンクリートの圧縮強度 30～60N/mm² で有効。圧力分布図・画像は、供試体上端面におけるペーストキャッピングの有効性と限界の判定に利用できる。UB キャッピング供試体のコンクリートの圧縮強度は、上端面 1mm 程度の凹凸、傾斜の場合、研磨供試体と同程度。

キーワード：圧縮強度、上面仕上げ、ペーストキャッピング、UB キャッピング、平面度、圧力分布

1. はじめに

普通強度領域（約 20～60N/mm²）のコンクリートの圧縮強度試験における供試体の載荷面（上面と称す）の仕上げは、研磨、キャッピング、アンボンドキャッピング（以降、UB キャッピングと称す）などが実施される。キャッピング仕上げの適用範囲は、経験的におおよそ明らかとなっていると思われるが、不明な点も多い。とくに、1960 年代以降、コンクリートは、高強度コンクリートの開発などによって圧縮強度が広範になるとともに、端面の研磨技術の進歩もあり、研磨仕上げの適用が一般化してきている。その一方で、ペーストキャッピング仕上げの適用範囲の明確化も重要になってきている。著者らは、2006 年度から、圧力測定・解析システムによる硬化コンクリートの加圧部端面の圧力分布測定とその活用の可能性を圧縮強度、引張強度の各試験に適用し、検討してきた¹⁾²⁾。本研究では、ペーストキャッピングおよび UB キャッピングにおけるコンクリート上面形状（表面仕上げ）の影響をコンクリートの圧縮強度試験データから明らかにして、両キャッピングの有効性と適用限界を検討した。また、コンクリート強度の上下限や平面度、キャッピング強度の適用条件を圧力測定フィルムによる圧力測定・解析により、圧力分布などの視覚画像で明らかにすることも併せて検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験計画

コンクリートの上端面の上面仕上げの影響に関する実験を 2 つに分けて実施した。

- (1) 圧縮強度試験における各種ペーストキャッピングの有効性と適用限界（実験 1）
- (2) 圧縮強度試験における UB キャッピングの適用範囲

（実験 2）

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/cm³）を用いた。細骨材は、川砂（鬼怒川産、密度；2.63 (2.62) 吸水率；1.93 (2.49) %、粗粒率；2.90 (2.68)）、粗骨材は、硬質砂岩碎石（佐野市産、最大寸法；20mm、密度；2.64 (2.68) 吸水率；0.76 (0.53) %、粗粒率；6.86 (6.80)）を用いた。また、かつこ内の数値は、実験 2 における密度、吸水率および粗粒率を示す。混和剤は、一般的な AE 減水剤を用い、空気量（5±1）%を目標としているため AE 剤で空気量の調整を行った。

2.3 実験要因と水準

実験 1 は、キャッピング材料の特性効果が表れやすいように、供試体の上端部に厚さ 2mm 程度の凸形突起を作製したものと、平坦に仕上げたものとの影響について行った。実験 2 は、UB キャッピングにおける供試体上端面の仕上げの影響を明らかにするために、凹形窪み深さの影響と凸形突起高さの影響および傾斜形の高さと傾きの影響について行った。実験における要因と水準は、表-1、表-2 および下地コンクリートの上面形状を図-1、図-2 に示す。実験 1 の水セメント比は、W/C=30%、40%、50%、60%の 4 水準、実験 2 は、W/C=40%、50%の 2 水準とした。また、実験 1 および実験 2 においては、上面仕上げを研磨で仕上げたものを比較基準とした。

3. ペーストキャッピングの有効性と適用限界

3.1 コンクリートの練混ぜおよび供試体の作製

コンクリートの練混ぜは、容量 100ℓ パン型強制練りミキサーを用いて行った。フレッシュコンクリートの性質は、スランプ（JIS A 1101）、空気量（JIS A 1128）の各試験に従って確認した。コンクリート供試体は、水セメント比

*1 足利工業大学 工学部創生工学科助教（正会員）

*2 足利工業大学 総合研究センター 博士（工学）（正会員）

*3 足利工業大学 工学部創生工学科教授 博士（工学）（正会員）

表-1 実験要因と水準（実験 1 キャッピング）

要 因	水 準	備 考
下地コンクリートの上面形状	平坦仕上げ 凸形突起 2mm	キャッピングの厚さは、1mm
キャッピングにおける上面の仕上げ方法	セメントペースト (W/C=0.30) 硬質石膏ペースト (W/Gy=0.25) (セメント+硬質石膏) ペースト (W/B=0.30)	

注) コンクリートの水セメント比は、0.30、0.40、0.50、0.60 とした。

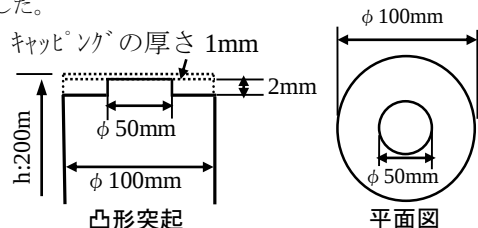


図-1 実験 1 における上面形状 (凸形) および平面図

毎に 18 個作製した。供試体のコンクリートの上端面は、上端面成型器具を用いて凸形突起を作製し（下地処理）、厚さ 2mm とした。凸形状に仕上げた後 3 種類のペーストキャッピングを行い、キャッピングの厚さを 1mm に仕上げた。供試体は、脱型したのち、材齢 28 日まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生とした。なお、硬質石膏キャッピング供試体は、3 時間経過後圧縮強度試験を行った。また、3 種類のペーストキャッピング面および研磨仕上げの平面度の測定も行った。

3.2 実験方法

(1) 供試体上面の変面度測定

平面度は、平面度測定器具を用いて、供試体上面の測定点数 17 点のダイヤルゲージ（測定精度；1/1000mm，1/100mm）の読取値を記録して行った³⁾。平面度(mm)は、JIS A 113 2 に基づき最大値と最小値の差から評価した。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

コンクリートの圧縮強度試験は、材齢 28 日において JIS A 1108 に従って実施し、それぞれ 3 個の平均値で評価した。また、各水準における供試体の軸・円周方向ひずみ（高さの中央部分、上下部 10 mm 対角 2 箇所）の測定も行い、その結果から、JIS A 1149 に従って静弾性係数とポアソン比を求めた。

(3) 圧力分布の測定

圧縮強度試験機の加圧板と供試体上面の間に圧力測定フィルムを挟み荷重をかけたときの供試体表面の圧力分布を測定した。圧力分布の解析は、画像処理により載荷面に直行する XY 軸方向断面の線分析を行い、圧力分布図を作成し、評価・検討した。

3.3 実験結果および考察

表-2 実験要因と水準（実験 2 アンボンドキャッピング）

要 因	水 準	備 考
下地コンクリートの上面形状	凸形突起 1mm 凸形突起 3mm 凸形突起 5mm	*1 傾斜 3mm を 1mm 研磨して 高さ 2mm 平坦部分は、直径の 1/3
	凹形端面 1mm 凹形端面 3mm 凹形端面 5mm	
	傾斜 (研磨) *1 3mm (1mm) 3mm (0mm) *2 5mm (2mm) 5mm (0mm)	*2 傾斜 5mm を 2mm 研磨して、高さ 3mm 平坦部分は、直径の 2/5)

注) コンクリートの水セメント比は、0.40、0.50 とした

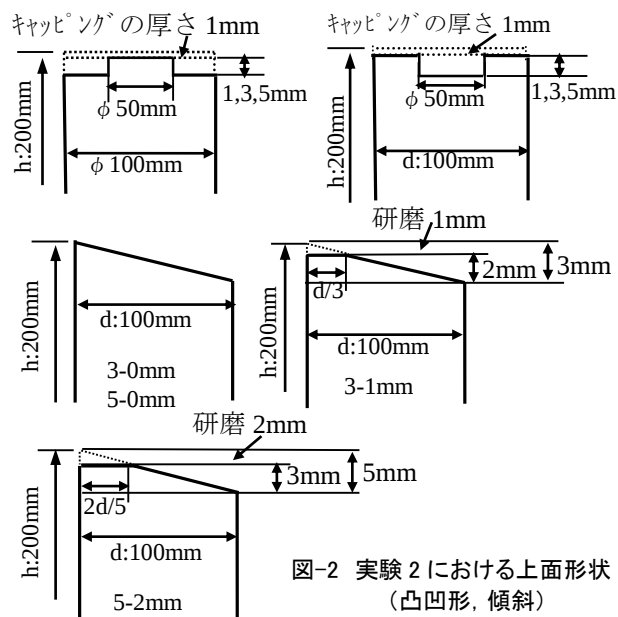


図-2 実験 2 における上面形状 (凸凹形, 傾斜)

(1) 下地を平坦に仕上げた圧縮強度および平面度

図-2、図-3 は、既往の研究³⁾における研磨仕上げ（比較基準）およびキャッピング材料を変えて行ったときのコンクリートのセメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係を示す。この時のキャッピングは、下地コンクリート上面を平坦に仕上げて、厚さ 2～3mm，5mm（図-2）および厚さ 2mm 程度とした（図-3）。図-2 より、ペーストキャッピング供試体におけるコンクリートの圧縮強度は、研磨仕上げ供試体のコンクリートの圧縮強度と同程度あるいは若干低下している（メタルキャッピング W/C=40%を除く）。その時の平面度は、0.15～0.29%（JIS 規定 0.05%）である。図-3 より、セメントペーストキャッピングおよびセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピングの場合もコンクリートの圧縮強度は、研磨仕上げと同程度あるいは若干低下していて、図-2 と同様の傾向が認められる。この時の平面度は、0.05～0.19%（JIS 規定 0.05%）である。

(2) 下地を凸形に仕上げた圧縮強度および平面度

図-4 は、各種ペーストキャッピング（既往の研究³⁾の

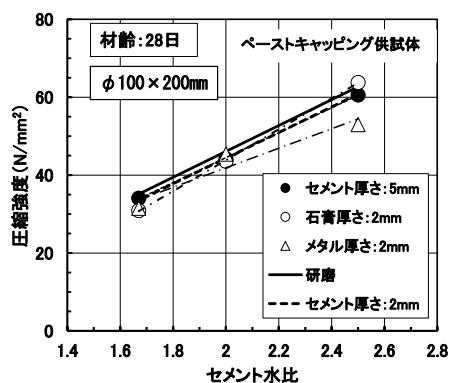


図-2 セメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係³⁾

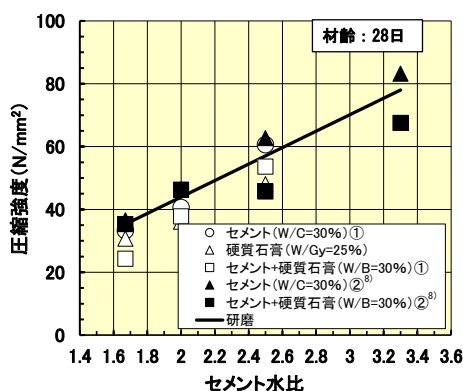


図-4 セメント水比と各種キャッピングのコンクリートの圧縮強度

結果も含む)におけるコンクリートのセメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係を示す。図-4におけるコンクリート上面は、凸形突起(2mm)のある下地コンクリート面にキャッピング仕上げを行った。なお、セメントペーストキャッピング(W/C=30%)①の場合は、キャッピング面を研磨して平面度を0.025~0.037%の範囲に仕上げた。しかし、硬質石膏およびセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピング(W/B=30%)①の場合は、キャッピング用ペーストの圧縮強度が17.0N/mm²と極めて小さかったため、平面度の研磨調整を行わなかった。図-4より、既往の研究⁹⁾において各種セメントペーストキャッピング供試体のコンクリートの圧縮強度は、W/C=30%および40%のセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピング(W/B=30%)②を除いて研磨仕上げと同程度の値を示した。W/C=30%および40%におけるセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピング(W/B=30%)②の強度低下は、キャッピングの材料の強度が、36N/mm²程度(図-5参照)であり、強度が小さいために、コンクリート基部の突起によって集中荷重を受け強度低下していると考えられる。今回の実験からは、セメントペーストキャッピング(W/C=30%)①のコンクリートの圧縮強度は、33.3~60.6N/mm²であり、既往の研究³⁾(図-2、図-3)の場合の供試体と同等の結果が得られている。このときのセメントペーストキャッピング(W/C=30%)①の圧縮強度は、材齢7日から、材齢28日において73.7

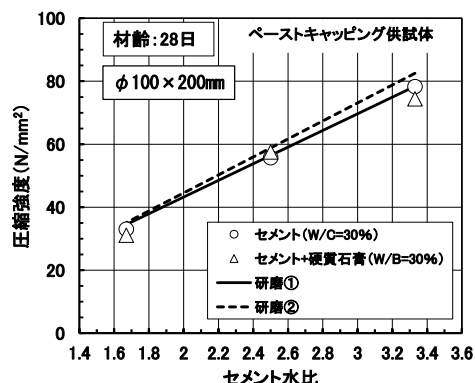


図-3 セメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係³⁾

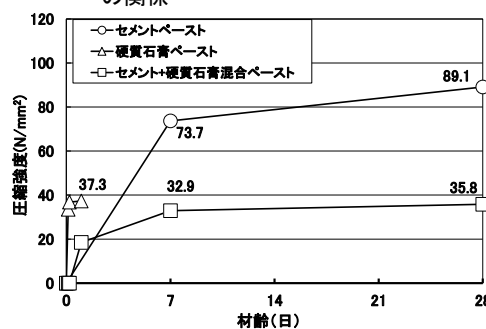


図-5 キャッピング用ペーストの圧縮強度³⁾

~89.1N/mm²(図-5参照)であり、コンクリートの予想される強度よりも明らかに大きくなっている。これに対して、硬質石膏キャッピング供試体およびセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピング(W/B=30%)①のコンクリートの圧縮強度は、セメントペーストキャッピング(W/C=30%)①の場合より20%程度小さくなる傾向が認められる。これは、硬質石膏の圧縮強度が小さいため、圧縮強度試験時におけるコンクリートの凸形突起の影響

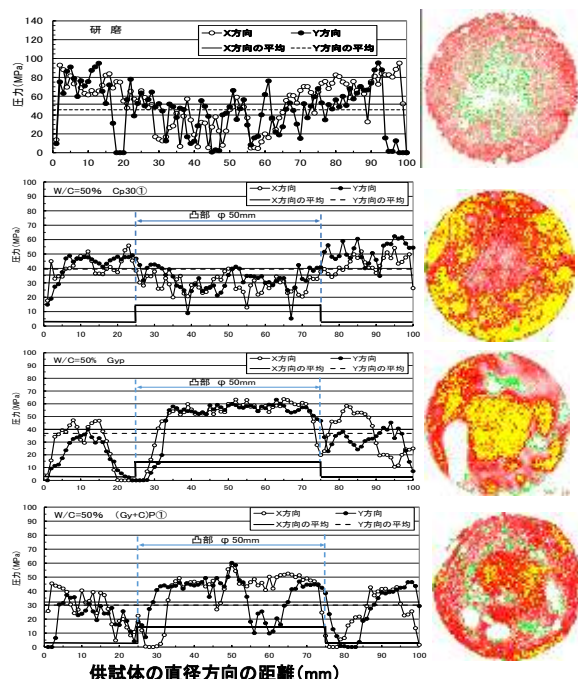


図-6 供試体上端面の最大荷重時での圧力分布図および上端面の圧力画像(W/C=50%)

を抑制することができなかったことによると考えられる。今後、35N/mm²程度の強度の硬質石膏（図-5 参照）を使用し、再実験する必要がある。その時の平面度は、硬質石膏キャッピングおよびセメント+硬質石膏キャッピング（W/B=30%）①の場合、0.10%程度である。以上より、ペーストキャッピング W/C=30%およびセメントと硬質石膏混合ペーストの場合、70N/mm²程度の強度レベルに対応できるようである。しかし、ペーストキャッピングでのコンクリートの圧縮強度が 30～60N/mm²の範囲であっても、圧縮強度試験において供試体の平面度が 0.05%以下（良い）あるいは 0.05%以上（悪い）でも研磨仕上げの圧縮強度と同程度であり、ペーストキャッピングの適用限界の判定は、難しいようである。

(3) 供試体上面の圧力分布図⁴⁾

図-6 は、今回の実験における各種ペーストキャッピングのコンクリート供試体上面の最大荷重時での圧力分布図および上面の圧力画像の一例（W/C=50%）を示す。図-6 より、セメントペーストキャッピング（Cp30）①の場合は、ペーストキャッピング後、研磨することで平面度が 0.03%となり、研磨仕上げのコンクリートの圧縮強度と同程度（図 4-参照）であり、圧力分布図においても、圧力変動も同様の傾向を示した。研磨仕上げの圧力分布図は、圧力値が細かく変動し、上面に摩擦力による拘束力が大きくなることで、円周の外縁部分の圧力が大きくなる。また、硬質石膏およびセメントと硬質石膏混合ペーストキャッピング（W/B=30%）①のコンクリートの圧力分布図は、凸形突起付近の領域において突起の影響と考えられる圧力変動の乱れが認められる。これも、硬質石膏の圧縮強度が 17.0N/mm²でコンクリートの強度よりも極めて小さいことに起因していると考えられる。表-3 は、コンクリートの破壊時の上面写真と圧力画像図およびキャッピングの有効判定を水セメント比ごとにまとめて示した。この時の供試体上面形状は、凸形である。表-3 より、各種ペーストキャッピングの有効性は、破壊時の上端面写真（視覚判定）から確認することができないが、圧力画像図から白色部の圧力 0N/mm²領域、緑色部の圧力が低い領域および赤・黄色部の圧力が高い領域が認められる。このような圧力分布の乱れなどから判定することができる。また、セメントペーストキャッピングの場合は、W/C=40～60%（約 30～60N/mm²）の範囲で効果的であることも確認した。以上より、圧縮強度および平面度における影響は認められないが圧力分布図から判断することができる。また、上面の圧力分布図（線分析）および圧力画像（面分析）は、圧縮強度試験における供試体上面のペーストキャッピングの有効性と限界の判定利用に有効と考えられる。

表-3 供試体上端面のペーストキャッピングの強度レベルに対する有効性と適性限界

W/C(%)	セメント	硬質石膏	硬質石膏+セメント
40 圧縮強度 45.6～62.1 (N/mm ²)			
判定	△良好	×不適切	×不適切
50 圧縮強度 39.4～41.7 (N/mm ²)			
判定	○良好	×不適切	×不適切
60 圧縮強度 32.5～34.1 (N/mm ²)			
判定	◎良好	×不適切	○良好

上段：上端面の外観写真、下段：上端面の画像（面分析画像）

4. 圧縮強度試験における UB キャッピングの適用範囲

4.1 供試体の作製

コンクリート供試体は、φ100×200mm 円筒型枠を用いて各水準 3 個 1 組とし、凹凸形状の場合、水セメント比毎に 12 個および傾斜形状の場合、15 個作製した。供試体の内の 9 個および 12 個は、上端面成型器具を用いて 1, 3, 5mm の 3 水準の凹凸形状および 3-0mm, 3-1mm, 5mm, 5-2mm の 4 水準の傾斜形に仕上げた。なお、3-1mm および 5-2mm の仕上げは、傾斜形 3mm および 5mm の供試体を研磨機によって所定の高さに調整（1mm または 2mm を研磨）して成形した。それぞれ残りの 3 個は、上端面を研磨仕上げとし、UB キャッピングとの比較試験に用いた。

4.2 実験方法

供試体上端面の平面度測定は、実験 1 と同様に行った。圧縮強度試験は、研磨供試体の場合、J ISA 1108 に従い、UB キャッピング供試体の場合、A 1108 附属書 1（規定）に従って実施した。静弾弾性係数試験における供試体の軸・円周方向ひずみゲージの貼り付け位置は、高さ方向の中央部分の対角 2 箇所で行った。また、圧力分布の測定は、鋼製キャップとゴムパットの間に圧力測定フィルムを挟み測定を行った。圧力分布の解析は、3.2(3)と同様に行った。

4.3 実験結果および考察^{5),6),7)}

(1) コンクリートの圧縮強度

図-7 は、既往の研究⁵⁾における研磨およびキャッピング供試体と UB キャッピングの圧縮強度との関係を示す。なお、UB キャッピング供試体の圧縮強度は、下地

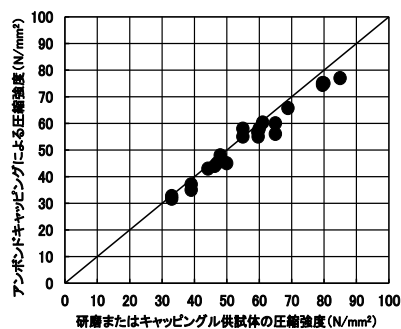


図-7 研磨またはキャッピング供試体と UB キャッピング供試体の圧縮強度との関係

コンクリートの上面を平坦に仕上げて試験した。図-7 より、コンクリートの圧縮強度は、約 32～85N/mm² の範囲であり、研磨供試体と UB 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⁵⁾。UB キャッピングの圧縮強度の範囲は、JIS A 1108 附属書 1 (規定) に規定の 60N/mm² とほぼ同様である。また、UB キャッピング供試体上面の圧力分布図は、UB キャッピングの場合、ゴムパットと鋼製キャップ面の間の圧力であり、ゴムパットが圧力を吸収している間は、圧力分布は細かく変動するが、圧力を吸収できなくなる(限界を超える)と圧力分布は直線になる傾向(特徴)が認められる²⁾。図-8 は、UB キャッピング供試体(凸凹形および傾斜 $\angle$)およびキャッピングの厚さ 2mm (図-2 参照)も含めたセメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係を示す⁶⁾。また、図中の破線は、凸凹形および傾斜形状のセメント水比での線形近似を示す。図-8 より、UB キャッピングのコンクリートの圧縮強度は、凸凹形 3mm の場合、研磨仕上げと同程度であり、キャッピング厚さ 2mm より大きくなる傾向が認められる⁶⁾。しかし、C/W=2.5 の凹形 5mm の場合、若干低下する。これは、圧力が上端面に均一に加わらず、強度低下したと考えられる。傾斜のコンクリートの圧縮強度は、傾斜高さ(傾き) 1mm 程度の場合、研磨仕上げおよびキャッピング厚さ 2mm と同程度であり、殆ど傾斜高さ(傾き)の影響が認められない⁷⁾。しかし、傾斜高さ 3mm 程度以上においては、圧縮強度が若干小さくなる傾向が認められる。また、そのときの平面度は、凸形の場合、1.0～3.2%、凹形の場合、1.0～5.0%、傾斜の場合、2.5～4.8%と大きいにもかかわらず圧縮強度に影響は認められない。静弾性係数およびポアソン比は、UB キャッピング供試体の上端面形状による違いの影響が殆ど認められない。

(2) 上面の圧力分布図^{6),7)}

図-9 は、研磨供試体および UB キャッピング供試体(凸形の 1mm, 3mm, 5mm, 凹形の 1mm, 3mm, 5mm, 傾斜形の 3-1mm, 3-0mm, 5-2 mm および 5-0mm)の上面の圧力分布図の結果を示す。図-9 より、研磨供試体の圧力分布は、供試体の拘束力の影響が出ているため、断面

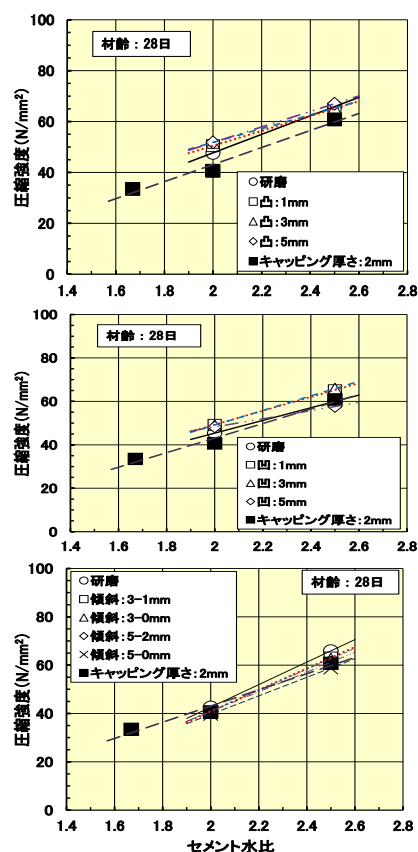


図-8 セメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係(下地処理:凸凹形, 傾斜 $\angle$)

の外周部分が大きな値となり、細かく変動する(摩擦に起因する)。これに対して、凸凹形 1mm および傾斜 3-0mm, 3-1mm の圧力分布は、直径方向の全体にほぼ均一な値になっている。しかし、凸形 3mm および 5mm の場合、突起部分の圧力が大きく(山なり)なる。凹形の 3mm および 5mm の場合、圧力が極端に小さく、外側の圧力が大きくなる(谷形)傾向が認められる。また、傾斜形状が大きくなる(3-1mm, 3-0mm, 5-2mm, 5-0mm)と圧力分布は、様にならず、圧力は、供試体に傾いて作用するようになる傾向が認められる。これらの圧力分布の傾向は、供試体上面の形状(凹, 凸, 傾斜)の影響により、圧縮試験時の荷重増加とともに鋼製キャップ内のゴムパットに偏った変形が作用するためと考えられる。以上より、UB キャッピング供試体のコンクリートの圧縮強度は、上端面の凹凸形の深さ・高さおよび傾斜形の高さ(傾き)が 1mm 程度であれば研磨仕上げ供試体と同程度である。しかし、供試体上端部の凹凸形や傾斜形が 3mm 程度以上になると、研磨仕上げ供試体と同程度であるが、若干ばらつき、圧力値の減少あるいは増加や、変動などの変化が認められる。また、試験時の最大荷重付近に到達する際に、供試体上端部が鋼製キャップの拘束を受ける状況が認められるので、注意(特に傾斜)が必要である。

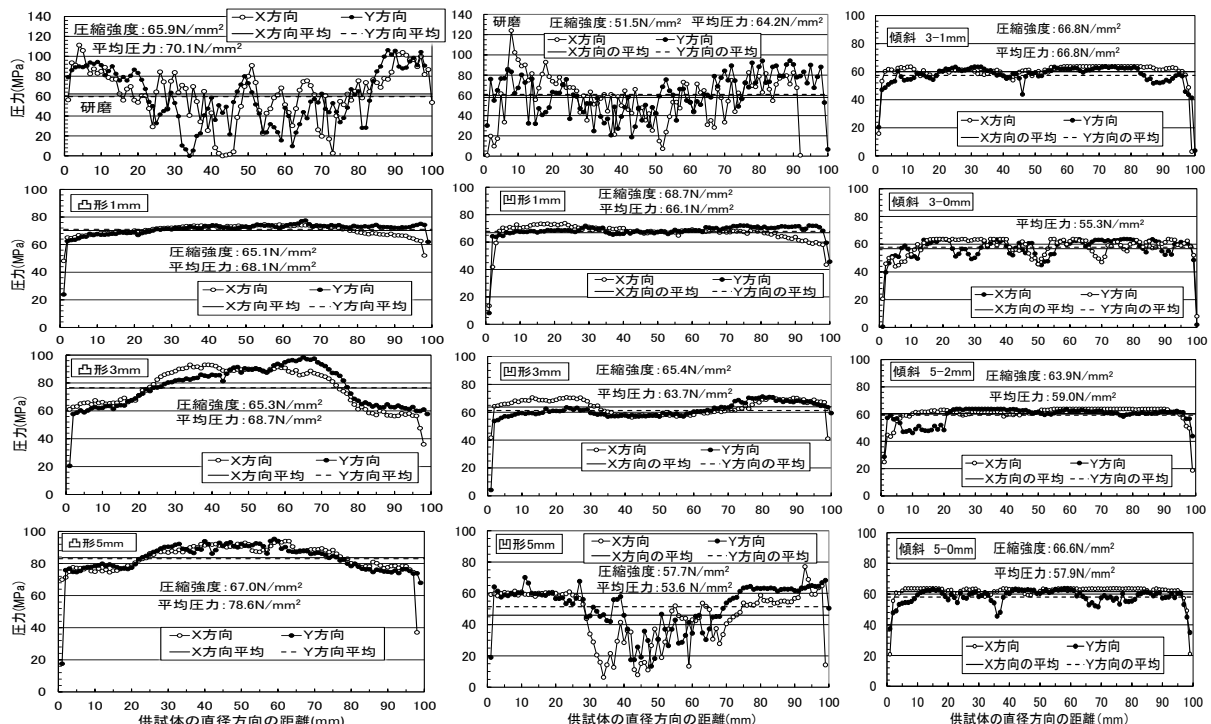


図-9 アンボンドキャッピングによる端面の圧力分布図(左:凸形、中:凹形、右:傾斜 W/C=40%)

5. まとめ

本研究において実験的に検討した結果は、以下の各点が明らかになった。

- (1) セメントペーストキャッピングによる上面仕上げは、圧力解析による圧力分布図からコンクリートの圧縮強度 $30 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ (普通強度コンクリート) 領域で有効であるが、そのコンクリートの圧縮強度は、研磨仕上げの場合の強度より若干小さくなる。
- (2) 上面の圧力分布図(線分析)および圧力画像(面分析)は、圧縮強度試験における供試体上端面におけるペーストキャッピングの有効性と限界の判定に利用できるものと考えられる。
- (3) UB キャッピング供試体のコンクリートの圧縮強度は、上端面 1mm 程度の凹凸および傾斜があっても、研磨仕上げ供試体の場合と同程度である。しかし、凹凸形、傾斜形高さ(深さ)、傾きが 3mm 程度以上になると、コンクリートの圧縮強度は、研磨供試体と同程度であるが、強度のばらつきが若干大きくなる。

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・コンクリート研究会討論会論文集, pp.15-18, 2007.11
- 2) 松村仁夫, 黒井登起雄: コンクリートの圧力解析における圧力測定フィルムの画像処理方法, コンクリート工学年次論文集 第 35 巻 (CD-ROM),

pp.397-402, 2013.7

- 3) 松村仁夫, 黒井登起雄: 供試体の表面仕上げ方法がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp. 169-176, 2011.3
- 4) 黒井登起雄, 辻本一志, 松村仁夫: コンクリートの圧縮強度試験におけるペーストキャッピングの有効性と限界, 足利工業大学総合研究センター年報, 第 17 号, pp.77-82, 2016.8
- 5) 黒井登起雄, 宮澤伸吾, 松村仁夫, 鈴木, 辻本一志: 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, 第 36 回セメント・コンクリート研究会討論会論文集, pp.29-34, 2009.11
- 6) 黒井登起雄, 辻本一志, 松村仁夫, 宮澤伸吾, 鈴木一雄: アンボンドキャッピングによるコンクリートの圧縮強度試験に及ぼす表面仕上げの影響, 足利工業大学総合研究センター年報, 第 13 号, pp.101-106, 2012.7
- 7) 黒井登起雄, 辻本一志, 松村仁夫, 鈴木一雄: アンボンドキャッピングによるコンクリートの圧縮強度試験に及ぼす表面仕上げの影響(その 2), 足利工業大学総合研究センター年報, 第 14 号, pp.73-78, 2013.7
- 8) 松村仁夫, 黒井登起雄: コンクリートの圧縮強度レベルと供試体表面仕上げとの関係の一考察, 第 38 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp. 31-36, 2011.11