

論文 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

松村 仁夫*¹・黒井 登起雄*²

要旨: 圧力測定フィルムは、自動車、建設機械などの部品接合部の面圧力の均一性の確認などに用いられている。本研究は、コンクリートの圧縮強度試験における加圧面に圧力測定フィルムを用いたときの解析システムによる画像取得の再現性、圧力測定フィルムの保存期間と取り扱い、すなわち、解析までの保存期間（画像取得の有効期間）、フィルムの有効期間（劣化の有無）、適正な圧力範囲のフィルムの選定などについて実験的に検討した。実験結果から、画像取得の再現性が良好であること、適正なフィルム選択によって、解析までの保存期間の影響が少ないこと、フィルムが1年程度まで有効に活用できることなどを明らかにした。

キーワード: 圧力測定フィルム、画像解析、再現性、輸送・保存期間、経年劣化（有効期間）

1. はじめに

圧力測定フィルムは、自動車、建設機械、二輪車、船舶、航空機、電子機器、医療などにおける部品接合部の面圧力、密封性、接触部分の面積と圧力値の均一性、タイヤなどの接地圧、物体の衝撃圧や衝撃力、旋盤加工面の平面性など圧力とその均一性の簡便な確認に多分野で用いられている。また、硬化コンクリートの強度試験、特に圧縮強度試験においても、近年の高強度および超高強度コンクリートの開発に伴って加圧部端面の平面性、加圧力分布の均一性などを把握することが重要になってきている。このような硬化コンクリートの強度試験の面加圧力の解析にも利用が可能と考えられる。なお、圧力測定フィルムによる加圧による発色は、定性的な情報（色の濃淡比較）としての活用（加圧の均一性の観察など）と、発色濃度の定量的な情報（数値比較）としての活用（EXCEL データからの圧力分布図の作成など）の両方に活用できる。著者ら¹⁾は、2007年から、圧力測定フィルムの解析の基本的な原理、コンクリートの強度試験への適用事例について実験によって確認した。しかし、試験後の圧力測定フィルムの解析の精度、時期（保存期間）、フィルムの取り扱いなど、不明な点も多くある。そこで、

本研究では、圧力測定・解析システムによる画像取得の再現性、測定後の圧力測定フィルムの種類（圧力範囲）と保存期間との関連性、圧力測定フィルムの保存と輸送の取り扱い、フィルム自体の経年劣化（有効期間）の有無などを、主にコンクリートの圧縮強度試験データから検討した。また、断面平均圧力と圧縮応力との比較なども併せて検討した。本研究は、その結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 圧力フィルムの種類と測定解析の原理

表-1 圧力測定フィルムの種類

フィルムの種類	略号	測定範囲 (MPa)
低圧用	LW	2.5~10
中圧用	MS	10~50
高圧用	HS	50~130
超高圧用	HHS	130~300

他に、極超低圧用、超低圧用がある。

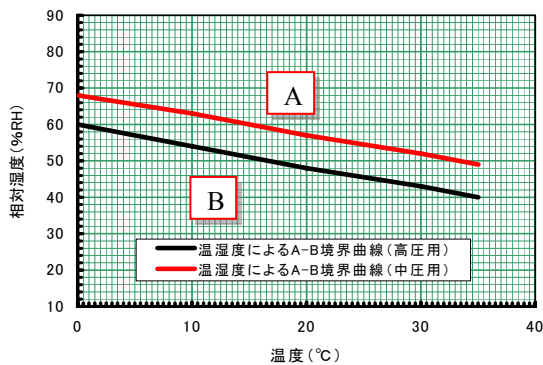


図-1 圧力測定フィルムの温湿度条件²⁾
(中圧, 高圧用)

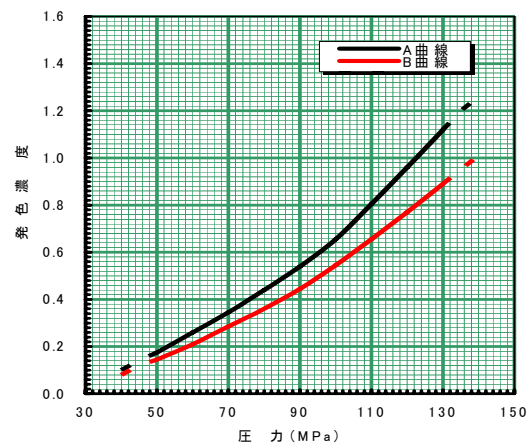


図-2 圧力と発色濃度との関係²⁾
(持続圧標準チャート, 高圧用)

*1 足利工業大学助手 工学部創生工学科 建築・社会基盤学系 (正会員)

*2 足利工業大学教授 工学部創生工学科 建築・社会基盤学系 博士(工学) (正会員)

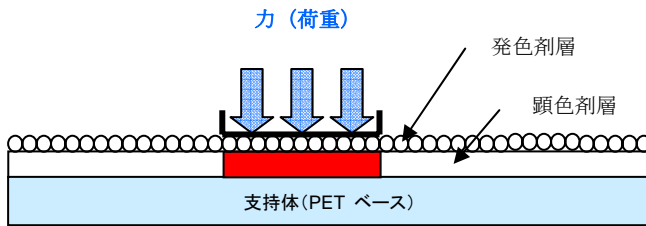


図-3 圧力測定フィルムの発色原理

(1) 圧力測定フィルムの種類²⁾ 圧力測定フィルムは、表-1に示すように、低圧用から超高压用の4種類がある。一般的に、コンクリートの圧力測定に使用できるフィルムは、中圧用 (MS, 10~50MPa) および高压用 (HS,

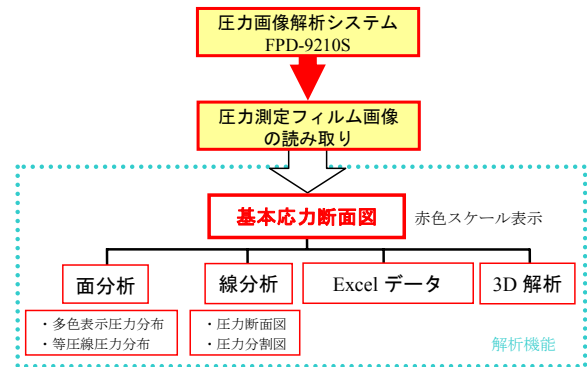


図-4 画像解析システムの手順と解析機能

表-2 各実験ケースにおける要因と水準

要因		水準	コンクリートの種類と試験
Case 1	繰り返して画像取得 ^{*1)}	5回	水セメント比 (W/C=40%, 50%) 圧縮強度試験 (φ100×200mm, アンボンドキャッピング) 圧力測定フィルム; 中圧用 (MS)
Case 2	輸送地域 (宅配便による輸送)	①関東地域 (約20km圏内) ②遠方地域 (500km以上)	
	保存方法	①クリアシート ②クリアファイル ③CD ケース	
	保存期間 ^{*2)}	①1週間後 (500km以上) ②3週間後 (約20km圏内)	
Case 3.1	保存期間 ^{*2)}	測定直後 1W, 4W, 8W, 12W 後	圧縮強度; 40.5~52.8N/mm ² 圧縮強度試験 (φ100×200mm, セメントペーストキャッピング) 圧力測定フィルム; 中圧用 (MS)
Case 3.2	測定フィルム	①高压用 (HS) ②中圧用 (MS)	①高強度コンクリート (W/C=15%) ②普通強度コンクリート (W/C=40%, 60%) 圧縮強度試験 (φ100×200mm, 研磨およびセメントペーストキャッピング) 圧力測定フィルム; 中圧用 (MS) 高压用 (HS)
	圧縮载荷レベル	①規定値の下限以下 ②規定値の範囲内 ③規定値の上限以上 (最大荷重時)	
	保存期間 ^{*2)}	測定直後 1W, 2W, 3W, 4W, 8W 後	
Case 3.3	フィルムの新旧	①1年経過後のフィルム ②新規購入のフィルム	普通強度コンクリート (W/C=40%) 圧縮強度試験 (φ100×200mm, セメントペーストキャッピング) 圧力測定フィルム; 中圧用 (MS)
	圧縮载荷レベル	①規定値の下限以下 ②規定値の範囲内 ③規定値の上限以上 (最大荷重時)	
	保存期間 ^{*2)}	測定直後 1W, 2W, 4W, 8W 後	

*1) 測定フィルムを繰り返してスキャナーで画像を読み取り、圧力断面図を作成する。

*2) 測定直後および保存期間 (箱に入れて無圧状態で保存) 後に、測定フィルムを繰り返してスキャナーで画像を読み取り、圧力基礎断面図を作成する。

50~130MPa) の 2 種類である。本研究でも、これら 2 種類のフィルムを用いた。

(2) 測定・解析の原理¹⁾ 圧力測定は、1 枚の支持体の発色剤層と顕色剤層を塗布したフィルムを試験の加圧部分に挟んで実施する。また、圧力測定フィルムは、測定時の温度・湿度によって発色濃度に影響を受けるので、図-1に示すように、解析のための A および B 曲線領域の温度、湿度の境界条件を確かめる必要がある。したが

って、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 (高压用) で解析することになるので、温度と湿度の測定が必須である。発色の原理は、図-3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、いろいろな大きさ・強度に調整され、均一に

塗布されているため、圧力に応じた発色（赤色）濃度が得られる。

(3) 圧力の画像解析 圧力測定フィルムの画像解析は、圧力画像解析システム (FPD-9210S) を起動させて、「基本応力断面図」の読み取り作業で開始し、線分析、面分析、Excel データなどによって整理した。図-4 に画像解析システムの手順と解析機能を示す。

2.2 実験要因と水準

実験は、表-2 に示す要因と水準で、Case 1 から Case3 に分けて行った。

Case 1 ; 圧力分布の繰り返し取得による基本応力断面図の作成 (画像取得の再現性)。

Case 2 ; 郵送・宅配による保存方法と、時間経過の基本応力断面図、圧力分布に及ぼす影響 (郵送の可否)

Case3 ; 载荷レベル、フィルムの新旧と、測定フィルムの基本応力断面図、圧力分布に及ぼす影響 (画像取得時期、フィルムの有効期間)。

2.3 コンクリートの種類と試験

Case 1, Case 2 のコンクリートの種類は、普通骨材コンクリートとし、供試体上端面の表面仕上げを研磨、凹形端面 1mm, 3mm および 5mm の供試体 (アンボンドキャッピング圧縮強度試験供試体を用いて行った。) とした。コンクリート供試体上端面における圧力分布は、中圧用の圧力測定フィルム (MS, 10~50MPa) を用いて、JIS A 1108 の圧縮強度試験における圧縮強度の加圧面に挟んで測定した。Case 3 は、圧縮強度 40.5~52.8N/mm² の範囲の普通骨材コンクリート (Case 3.1) と、W/C=40%, 60% の普通骨材コンクリートおよび W/C=15% の高強度コンクリート (Case 3.2, 3.3) を対象とし、別々に測定した。圧力分布は、Case 1 および Case 2 と同様に、W/C=40%, 60% (または、50N/mm²) の場合、中圧用 (MS), W/C=15% の場合、高圧用 (HS) を用い、圧縮強度の加圧面に挟んで測定した。圧力の解析は、各時期における基本応力断面図から円断面における直角 2 方向 (X および Y 方向) の EXCEL データによる圧力分布図の作成を主体にして行った。結果は、線分平均圧力 (=平均圧力値, X, Y 方向の線分析) および断面平均圧力 (=全圧力値 (圧力 0MPa を超える値の平均), 断面の面分析) で評価・検証した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧力解析値の再現性³⁾

圧力測定フィルムによる圧力解析の画像スキャンの再現性を確認するために、研磨およびアンボンドによる圧縮強度試験で得られた測定フィルムで、スキャン回数と断面平均圧力、または、線分平均圧力との関係を調べ、

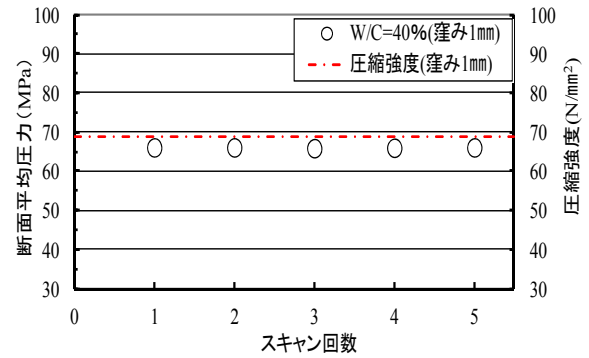


図-5 繰り返し取得による圧力変化の一例 (W/C=40%, 窪み 1mm)

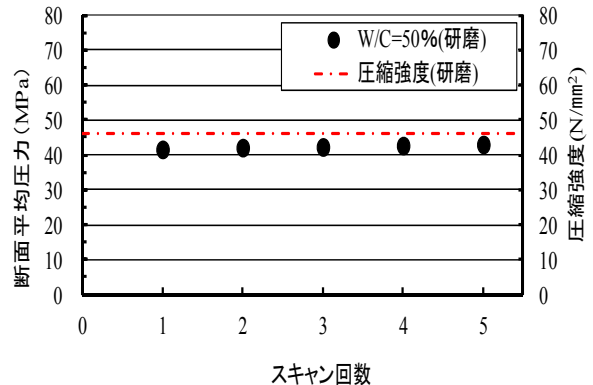


図-6 繰り返し取得による圧力変化の一例 (W/C=50%, 研磨)

検証した。図-5 (W/C=40%, 窪み 1mm) および図-6 (W/C=50%, 研磨) は、5 回 (スキャン回数) 繰り返し画像取得による断面平均圧力の圧力変化の一例を示す。図-5, 図-6 より、いずれの結果の場合とも、繰り返し画像取得による圧力値 (=断面平均圧力) の変化は、認められない (最大-最小の差; 約 0.5N/mm²)。したがって、圧力測定フィルムのデータの画像スキャンは、再現性が高いことから、1 回で十分であると考えられる。

3.2 測定後のフィルムの保存期間と取り扱い³⁾

(1) 圧力解析の保存期間

図-7 は、中圧用圧力測定フィルムの下限 10MPa 以下 (圧力①), 範囲内 10~50MPa (圧力②), 上限 50MPa 以上 (最大荷重時: 圧力 PMax) の加圧力段階に設定した時

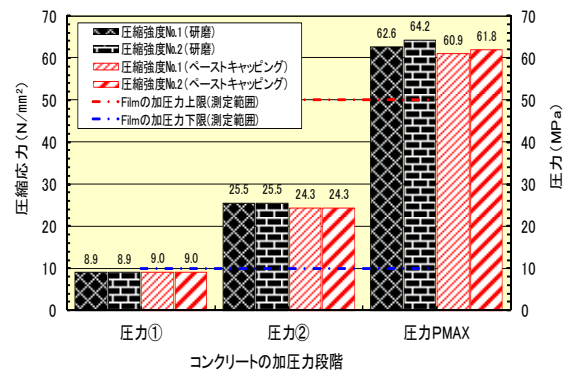


図-7 加圧力段階における圧縮応力および圧力測定フィルムの測定範囲

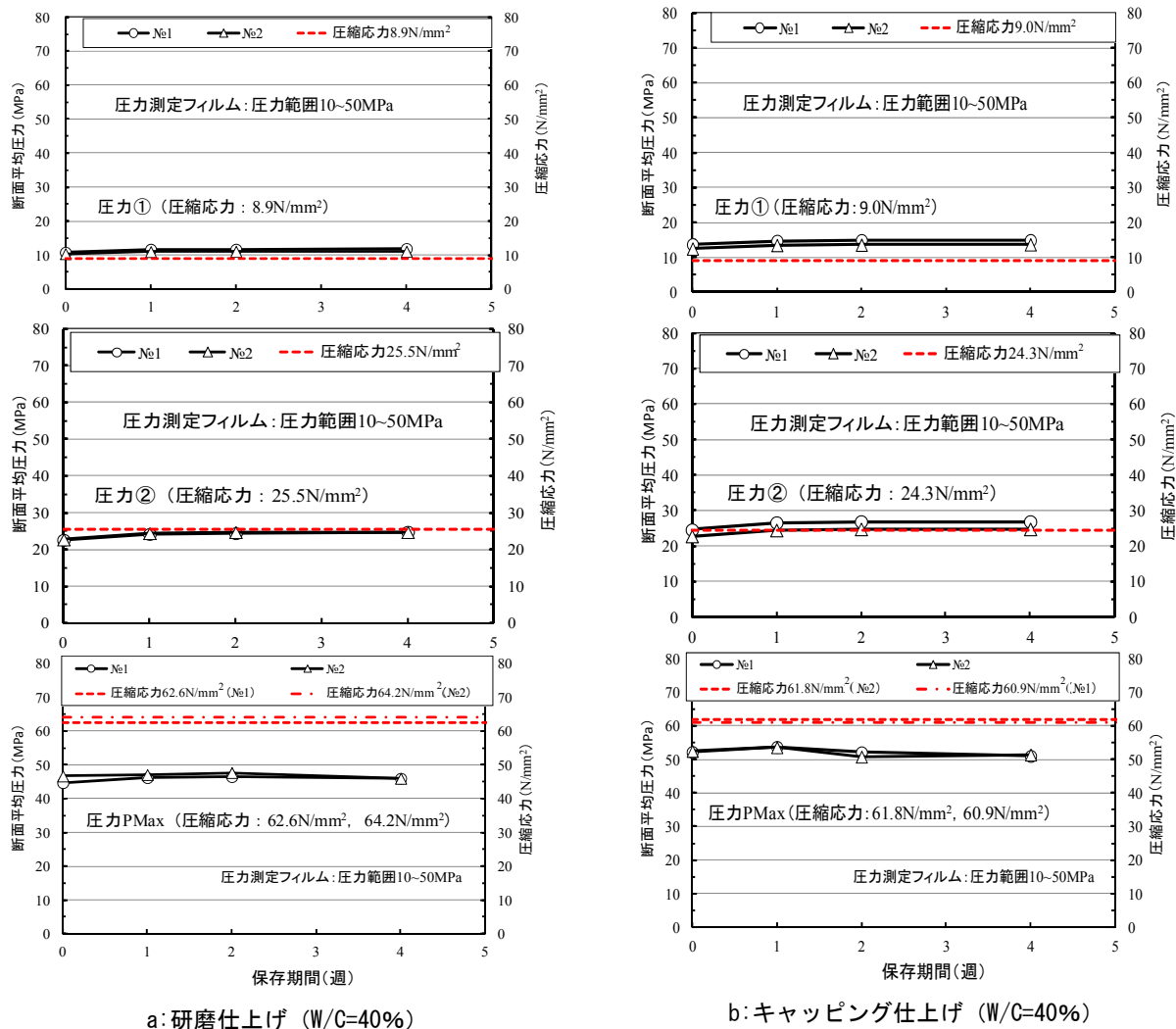


図-8 加圧力段階における圧縮応力と断面平均圧力および保存期間

の圧縮応力の結果を示す。図-7より、3段階における圧縮応力は、圧力①の場合 8.9, 9.0N/mm²、圧力②の場合 25.5, 24.3N/mm²および圧力 PMax の場合 62.6, 64.2 N/mm²、60.9, 61.8 N/mm²となり、設定値の下限以下、範囲内および上限以上を示している。図-8(a: 研磨仕上げ, b: キャッピング仕上げ, W/C=40%) は、圧縮応力を 3段階 (圧力①, 圧力②, 圧力 PMax) に分けて加えた時の断面平均圧力と保存期間への影響を調べた結果を示す。図-8より、研磨仕上げおよびキャッピング仕上げの場合、圧力①, 圧力②および圧力 PMax において、保存期間 1, 2, 4 週と経過するごとにマイクロカプセルの色素 (赤色) が時間経過により反応が進み (滲む) 若干大きくなるものの、断面平均圧力は、解析直後 (0 週) と殆ど変わらない。また、圧力① (10MPa 以下) の場合、時間経過とともに圧力が若干大きく、圧力② (10~50MPa の圧力範囲) の場合、圧力は、ほぼ同じになる。圧力 PMax (50MPa 以上) の場合、圧力測定フィルムに限界があり、圧力が小さくなっていることから、圧縮応力のレベルに応じて適正な圧力測定フィルムを選定する必要がある。

表-3 新旧測定フィルムにおける加圧力段階と断面平均圧力値

保存期間 (週)	加圧力段階	断面平均圧力 (MPa)	
		新	旧
0 (直後)	圧力①	4.1	4.6
	圧力②	10.7	11.6
	圧力 PMax	30.8	29.0
1	圧力①	4.7	5.2
	圧力②	12.0	12.0
	圧力 PMax	30.9	28.4
2	圧力①	4.9	5.3
	圧力②	12.2	12.6
	圧力 PMax	30.9	28.0
4	圧力①	5.1	5.5
	圧力②	12.5	12.7
	圧力 PMax	31.2	28.0
8	圧力①	5.1	5.4
	圧力②	12.5	12.7
	圧力 PMax	31.1	28.2

(2) 圧力測定フィルムの有効期間⁴⁾ 表-3は、新旧(新規購入, 1年経過)圧力測定フィルムにおける加圧段階(圧縮応力)と断面平均圧力および保存期間(解析直後, 1, 2, 4, 8週間)を示す。表-3より, 1年経過した圧力測定フィルム(中圧用, 圧力範囲10~50N/mm²)を用いた場合の断面平均圧力は, 低圧力段階(圧力①(9.0MPa))の場合, 新しいフィルムの断面平均圧力とほぼ同じである(新フィルム:4.9MPa, 旧フィルム:5.2MPa 平均値)。規定範囲内(圧力②(17.3N/mm²), 圧力③(41.7N/mm²))における新旧のフィルムの断面平均圧力も, 値の差異(圧力②新フィルム:12.0MPa, 旧フィルム:12.3MPa 平均値, 圧力③新フィルム:31.0MPa, 旧フィルム:28.3MPa 平均値)が若干あるものの, フィルムの新旧に起因する差異と特定できないようである。また, 保存期間の影響は認められない。したがって, 1年以上経過したフィルムと新しいフィルムの断面平均圧力を確認した結果より, フィルムの新旧による差異は, 認められないことから, 1年程度の場合, 圧力測定フィルムの有効期間を特に限定する必要がないものと考えられる。

(3) 輸送の可否 図-9は, 約20km圏内から圧力測定フィルムを送付(3週間保管後)し, 解析した保存方法別(クリアシート, クリアファイル, CDケース)のX方向の圧力分布図(W/C=50%, 窪み1mm, 上段:送付前, 下段:送付後)を示す。図-9より, 保存方法に関係なく, 送付後のX方向の圧力は, 送付前に比べて大きく, 断面平均圧力および圧力変動(細かく分布)も大きくなっている。これは, 輸送による影響あるいは保存期間の影響が不明である。この結果は, Y方向の圧力分布図も同様である。また, 図-10に示す圧力測定フィルムを500km以上から1週間保管後に送付し, 解析したX方向の圧力分布図(W/C=40%窪み1mm)の結果からは, 輸送による送付前と送付後の影響は, 圧力分布図から認められない。図-9および図-10より, 圧力測定フィルムによる圧力分布は, 保存期間や測定範囲の影響を受けることから, 輸送の可否については今後再検討する必要がある。

3.3 圧力分布の検討

上端面の表面仕上げによって圧力分布の形状変動に違いが認められたため, 圧力分布の検討を行った。図-11は, 上端面を研磨仕上げ(上段:W/C=15%, 下段:W/C=40%), 図-12は, アンボンドキャッピング仕上げ(W/C=40%)および図-13は, セメントペーストキャッピング(W/C=40%)における端面のX, Y方向圧力分布および線分平均圧力(平均圧力値)の一例を示す。あわせて, 圧縮応力(圧縮強度)も示す。図-11より, 高強度コンクリート(W/C=15%, 圧縮強度:185.5N/mm²)の研磨仕上げの場合, 普通コンクリート(W/C=40%, 圧縮

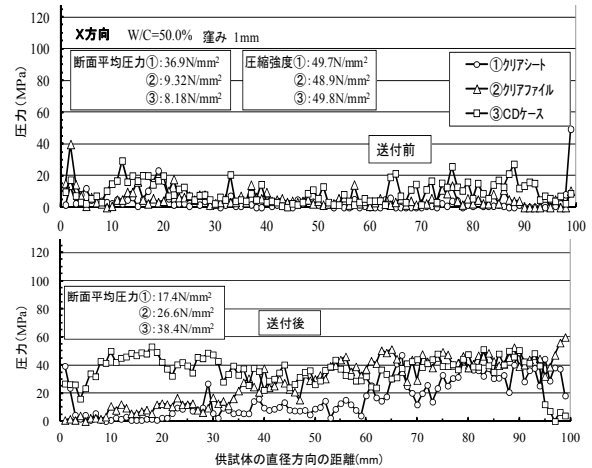


図-9 X方向の圧力と保存方法別における圧力分布図(約20km圏内 3週間後送付)

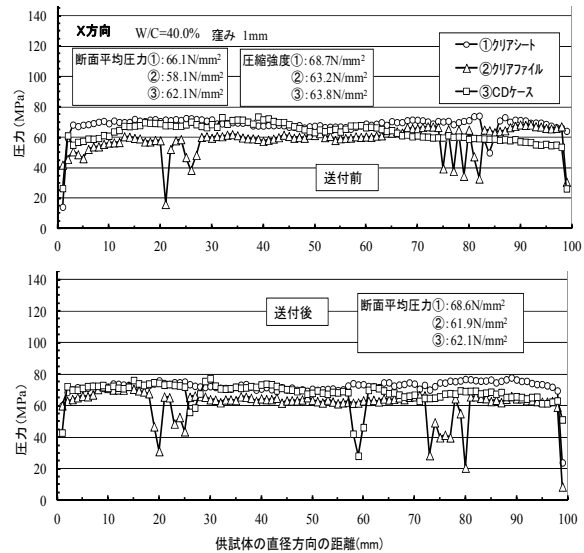


図-10 X方向の圧力と保存方法別における圧力分布図(500km以上 1週間後送付)

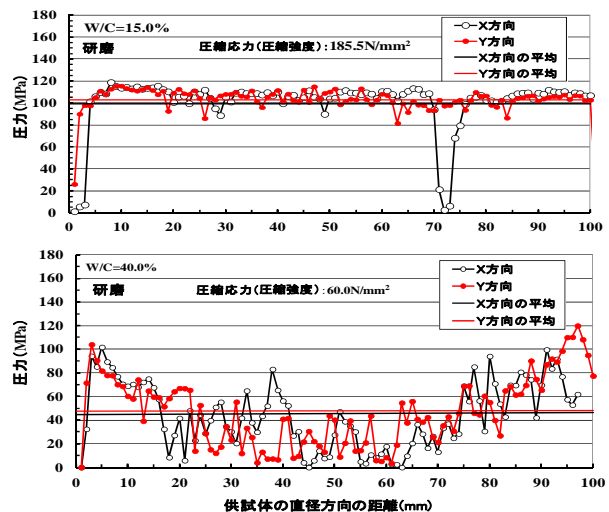


図-11 研磨仕上げによる端面の圧力分布の一例(上段:W/C=15%, 下段:W/C=40%)

強度:60.0N/mm²)に比べ, 圧力分布の変動は少なく, ほぼ均一になっている。これは, 高強度(W/C=15%, 圧縮強度:185.5N/mm²)のため, 圧縮面の全断面の広い部

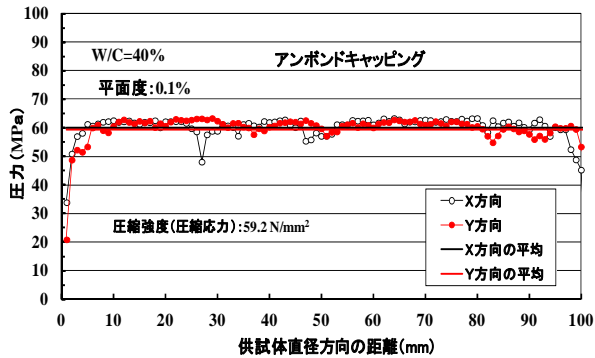


図-12 アンボンドキャッピングによる端面の圧力分布の一例 (W/C=40% 平面度 0.1%)

分で摩擦力の影響を受けているためと考えられる。これに対して、普通コンクリート (W/C=40%, 圧縮強度: 60.0N/mm²) の場合、摩擦力による拘束が作用して円周方向の圧力が大きくなっている。しかし、中心部分の圧力は、0MPa または 0MPa に近い値となり、摩擦力の影響が圧縮面の中心部分まで広がっていない。また、図-12 より、アンボンドキャッピングの場合は、ゴムパットと鋼製キャップ面の間の圧力である。ゴムパットが圧力を吸収しているため、圧力分布は細かく変動し、摩擦力の影響を受けるもの的高強度コンクリート (W/C=15%, 圧縮強度: 185.5N/mm²) の研磨仕上げの場合と同様にほぼ均一になっている。また、ゴムパットが変形しやすく、上端面の形状を吸収し、ゴムパットが変形できている間は、圧力を加圧板に正しく伝えることができる。図-13 より、セメントペーストキャッピングの場合は、加圧板とコンクリートの間にセメントペーストが挟まっていたため、加圧板およびコンクリートとも違う弾性係数であり変形しやすく、横に広がるため、圧力分布の形状変動が緩やかになり、連続する圧力 0MPa も存在する。

以上より、圧力測定フィルムによる圧力分布図は、圧縮端面の摩擦力の影響などの情報が得られる。また、圧力分布の検討は、分布形状等の相対的なデータを調べた結果であり、圧力の絶対値を把握するには、今後、その影響要因を細かく検討する必要があると思われる。

4. まとめ

本研究は、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取得の再現性および画像処理の取り扱い等に関して実験的に検証した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 圧力測定フィルムによる圧力解析の画像スキャンの繰り返し画像取得による圧力変化は、認められない。したがって、再現性は、良好であり、1回のスキャンで十分である。
- (2) 圧力測定フィルムによる圧力解析の保存期間の影響は、保存期間が経過するごとに若干大きくなるものの、

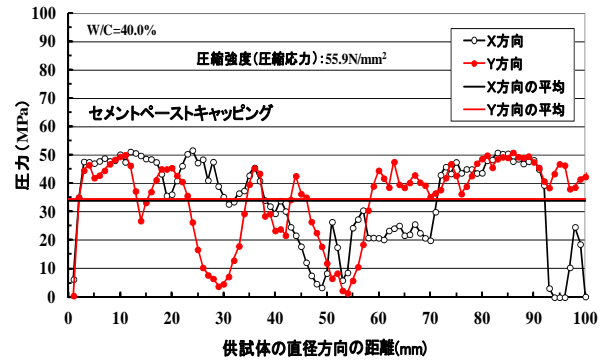


図-13 セメントペーストキャッピングによる端面の圧力分布の一例 (W/C=40%)

断面平均圧力は、解析直後と殆ど変わらない。また、圧縮応力のレベルに応じて適正な圧力測定フィルムを選定する必要がある。

- (3) 新旧 (新規購入および 1 年程度) の圧力測定フィルムを使用して行った結果、1 年程度経過した圧力測定フィルムの有効期間 (使用期限) は、特に定める必要はない。
- (4) 圧力測定フィルムの輸送については、保存方法および輸送距離よりも圧力の測定範囲や保存期間が卓越するので、今後再検討する必要がある。
- (5) 圧力測定フィルムの画像解析で得られた圧力分布は、上端面の表面仕上げの種類 (研磨、アンボンキャッピング、セメントペーストキャッピング) によって圧力分布の形状変動に違いが認められる。また、圧力分布図から、圧縮面の摩擦力の影響などの情報が得られ、このような情報把握に圧力測定フィルムが活用できるようである。

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集, pp.15-18, 2007.11
- 2) FUJIFILM 圧力測定フィルム製品パンフレットおよび取り扱い説明書
- 3) 松村仁夫, 黒井登起雄; 圧力測定フィルムによる圧力画像解析の取り扱い, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-455, pp.909-910, 2012.9
- 4) 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取り扱い, 第 39 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.27-32, 2012.10