論文　コンクリートの圧縮強度に及ぼす上端面摩擦の影響に関する実験的研究

松村　仁夫*1・黒井　登起雄*2

要旨：著者らは，2006 年から，圧力測定フィルムを用いて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・引張強度試験で検討してきた。本研究は，普通強度から高強度の範囲のコンクリートの圧縮強度試験における供試体上端面（研磨仕上げ）と加圧板との摩擦減有の影響をコンクリートの圧力分布測定の結果から明らかにすることを目的とした。実験結果から，①摩擦を減少した供試体の圧縮強度は，通常試験より小さくなること，②強度の及ぼす摩擦の影響は，高強度コンクリートほど大きくなること，③圧力測定フィルムは，載荷部の新しい情報把握（圧力分布，圧力状態）に有効であるなどの知見が得られた。

キーワード：圧縮強度試験，端面摩擦，高強度コンクリート，圧力測定フィルム，圧力分布

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，施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。一方，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。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試験および引張強度試験で検討を行ってきた [1)]。そこで，本研究は，普通強度から高強度の範囲のコンクリートの圧縮強度試験における供試体上端面（研磨仕上げ）と加圧板との摩擦減有の影響をコンクリートの圧力分布測定の結果から明らかにすることを目的とした [2)]。また，その結果に基づいて，圧力測定フィルムの活用の有効性なども報告する [2)]。

２．実験概要

2.1 実験計画および実験要因と水準

実験は，普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートの広い範囲にわたって圧縮強度試験における供試体上端面（研磨仕上げ）と加圧板との摩擦減有の影響を強度（応力）レベルごとに実験を行い，コンクリートの圧力分布測定の結果から検討した。

実験要因および水準は，**表-1** に示すように，水セメント比と上端面の摩擦の有無とし，水セメント比は，W/C=13%，20%，30%（高強度コンクリート），および40%，50%，60%（普通強度コンクリート）の 6 水準と，上端面の摩擦はテフロンシート有り，なしの 2 水準とした。

表－1　実験要因と水準

	要　　因	水　　準
1	水セメント比 (%)	13，20，30（高強度コンクリート） 40，50，60（普通強度コンクリート）
2	上端面の摩擦	テフロンシート（TEFS） 有り；摩擦減 なし；通常試験

2.2 使用材料

セメントは，シリカフュームセメント（密度：3.07g/cm^3）と普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3）を使用した。細骨材は，川砂（鬼怒川産，密度：2.63 g/cm^3，吸水率：1.93%，粗粒率：2.90）を使用した。粗骨材は，硬質砂岩砕石（佐野市産，最大寸法：20mm，密度：2.64 g/cm^3，吸水率：0.76%，粗粒率：6.80）を使用した。混和剤は， AE 減水剤，高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いた。

2.3 実験方法

(1) コンクリートの配合および供試体作製

コンクリートは，高強度コンクリート（W/C=13%，W/C=20%，W/C=30%）の場合，スランプフロー65±10cm，空気量（5±1）%，普通強度コンクリート（W/C=40%，W/C=50%，W/C=60%）の場合，スランプ 10±1cm，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ッシュコンクリートの性質を，**表-2** に示す。コンクリート供試体の形状は，φ100×200mm の円柱形とした。供試体数は，水セメント比ごとに 2～6 個とし，試験まで 20±2℃の水中養生とした。上端面は，研磨仕上げとした。試験材齢は，28 日以降とし

*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)

表－2　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

種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad_{wrae}	混和剤 Ad_{AE}	スランプ (cm)	空気量 (%)
高強度コンクリート	13	36.0	150	1154	439	784	23.42*1	-------	76×79*2	--------
	20	39.3	174	870	518	802	17.40*1	0.139	68×67*2	5.5
	30	41.3	174	580	644	918	6.96*1	0.058	58×58*2	4.2
普通強度コンクリート	40	42.3	189	473	680	931	--------	0.142	9.1	4.2
	50	44.3	185	370	755	952	--------	0.111	9.1	5.7
	60	46.3	178	297	826	961	--------	0.089	9.2	5.9

*1 高性能 AE 減水剤を使用，*2 スランプフロー（cm）を示す。目標スランプ：10±1cm，目標空気量：(5±1) %

（W/C=13%：材齢 258 日，W/C=20%および 30%：材齢 37 日および 33 日，W/C=40%～60%：材齢 80 日），十分養生されたものを試験対象とした。

(2) 供試体上端面の平面度測定

供試体上端面の平面度(mm)は，平面度測定器（ダイヤルゲージの測定精度；1/1000mm）を用いて，**図-1** に示すように，供試体上端面の測定点数 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。平面度（mm）の結果は，JIS A 1132（最大値と最小値の差）に基づいて求め，平面度(%)は，式(1)によって算出した。

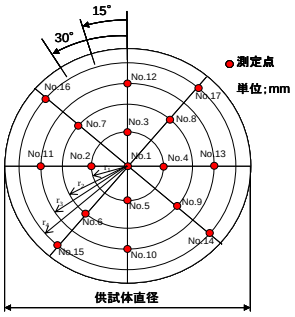
平面度(%)=｛平面度(mm)／直径(mm)｝×100　　(1)

(3) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験は，JIS A 1108 に従って実施した。静弾性係数試験の変形測定は，圧縮強度試験と同時に，JIS A 1149 に従ってひずみゲージ（検長 60mm）を用いて行った。圧縮強度試験の際の供試体上端面は，摩擦有り（通常状態，テフロンシートなし〈Non-TEFS〉）の状態と摩擦減（テフロンシートを 2 枚挿入〈TEFS〉）の状態の 2 種類とした（**写真-1**）。№1 または№4 供試体は，圧力段階①および②を決定するために，通常の圧縮強度試験を行った。圧縮強度・静弾性係数試験は，**表-3** に示すように，圧力段階①（圧縮強度試験の最大荷重×0.1），圧力段階②（圧縮強度試験の最大荷重×0.4）および圧力段階③（最大荷重，P_{MAX}）の 3 段階の載荷を繰り返し行い，軸方向ひずみ（=静弾性係数），荷重（=圧縮応力，圧縮強度）および上端面の圧力分布の各測定データを記録した。軸方向ひずみの測定は，圧力段階②および③の載荷の際に行った。試験は，W/C および摩擦の減有において，それぞれ 2 個の供試体で実施し（供試体 4 個×3 回繰り返し=12 データ），再現性の確認も併せて行った。

(4) 圧力分布の測定と解析

コンクリート供試体の上端面の圧力分布は，試験機と加圧板との間に圧力測定フィルムを挟み，圧力段階①，②および③において，圧力測定フィルムを新しいものと交換して測定を行った。圧力測定フィルムは，高強度コンクリート（W/C=13%～30%）の場合，高圧用（HS，測定圧力範囲；50～130MPa）を用い，普通強度コンクリート（W/C=40%～60%）の場合，中圧用（MS，測定圧力範囲；10～50MPa）を用いた。なお，圧力段階①および②の測定に当たっては，荷重を約 10 秒間持続させたのちに除荷した（荷重除荷の最終圧力を安定させるため）。強度試験後の各供試体の上端面の圧力分布は，「プレスケール圧力画像解析ソフトシステム」を起動させて「基本応力断面図」を読み取って画像解析（面分析結果）し，表計算ソフトを用いて、各供試体の載荷面に直行する直径方向（X 方向と Y 方向）の線分析を行い，圧力分布図を作成して評価した[1)]。



供試体の種類	測定位置の半径(mm) r_1	r_2	r_3	r_4
φ100×200mm	12.5	25.0	37.5	47.5

図-1　端面の平面度測定位置

写真-1　　圧縮強度試験
（上端面の研磨を減少された場合）

表－3　実験供試体と実験要因と水準

供試体	端面の摩擦	載荷荷重（比率）	備考
圧縮№1（№4）	---------	P_{max}	荷重決定試験
圧縮－ひずみ 2，3 4，5 （5，6）	---------	P_{max}×0.1	各試験体 3 回繰り返し（供試体 4 個）
		P_{max}×0.4	
		P_{max}	
	減摩擦	P_{max}×0.1	
		P_{max}×0.4	
		P_{max}	

3．コンクリートにおける上端面摩擦の影響

3.1 普通強度コンクリート

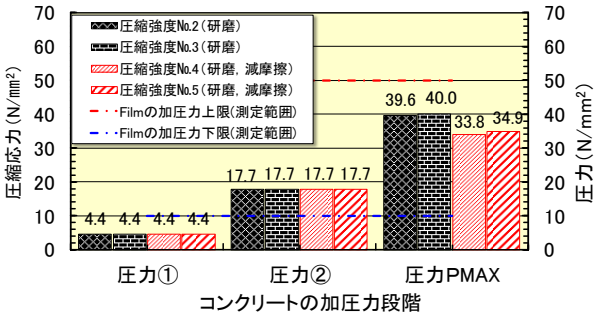


図-2 普通強度コンクリートの圧縮強度（W/C=50%）

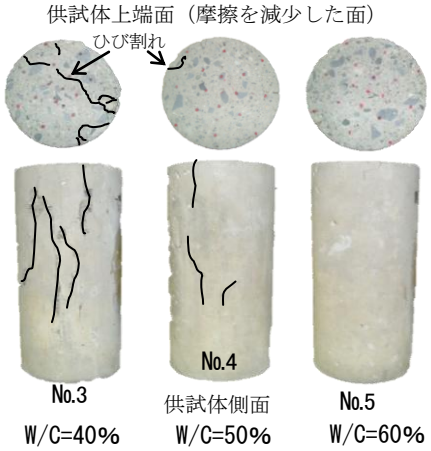


写真-2 普通強度コンクリート供試体の圧縮強度試験（上端面摩擦減の場合）

表－4 圧縮強度に及ぼす上端面摩擦の影響

W/C (%)	端面仕上げ	コンクリートの圧縮強度（N/mm²）		
		通常	端面摩擦減*1	強度比*2
40	研　磨	49.3	43.7	0.89
50		41.3	34.4	0.83
60		31.1	27.0	0.87

*1 上端面にテフロンシート 2 枚を挿入
*2 強度比=〔端面摩擦減の試験／通常試験〕

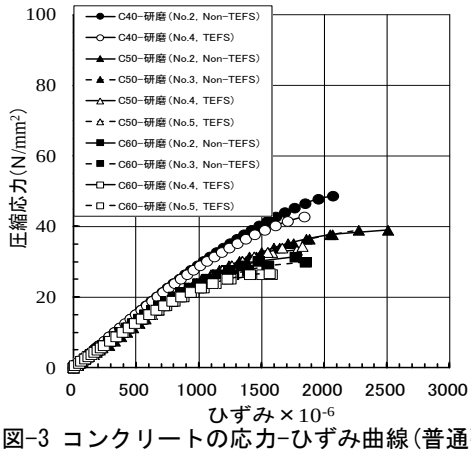


図-3 コンクリートの応力-ひずみ曲線（普通強度）

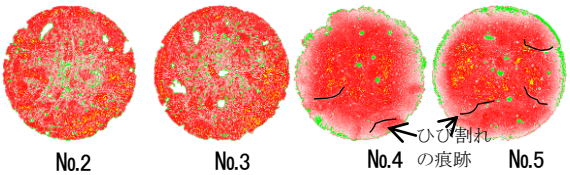


図-4 供試体上端面の基本応力断面図の画像（W/C=50%）

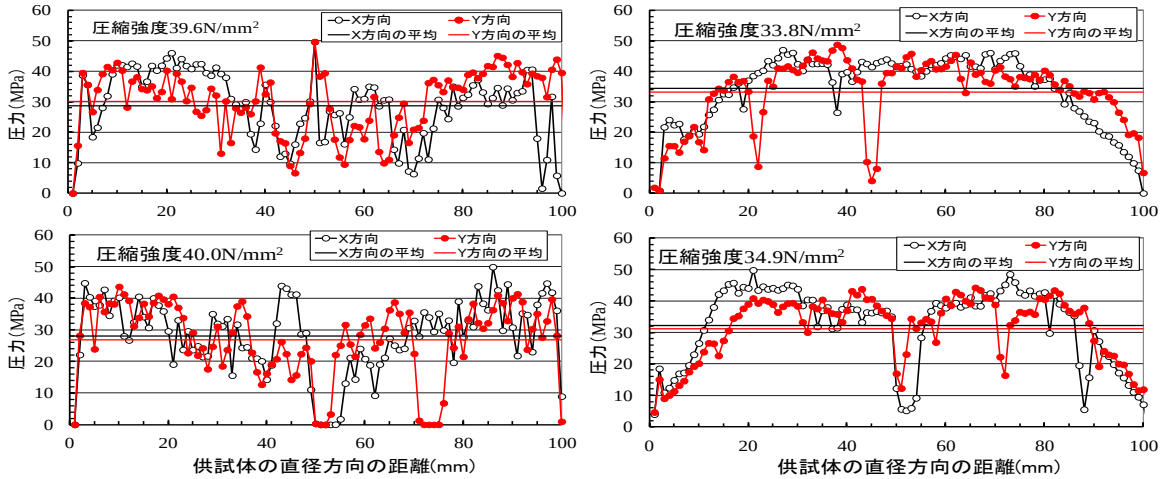
(1) コンクリートの圧縮強度

図-2 は，普通強度コンクリートにおける上端面と試験機の加圧板間の摩擦を減少（TEFS，テプロンシートを挟む）させたときと通常試験（Non-TEFS，摩擦有り）のときの圧縮強度（応力）結果の一例（W/C=50%）を示す。横軸は，圧力 3 段階に分けた圧力段階①，②および圧力 P_{MAX}（③）を示す。**図-2** より，コンクリートの圧縮強度は，圧力 P_{MAX}（圧力段階③）において端面摩擦減有による差異が認められ，テフロンシート有り（TEFS，摩擦減）の場合，通常試験より強度が小さくなる（圧力①，②は，同一荷重を載荷）。また，**表-4** は，端面摩擦減試験に対する通常試験の強度比を示す。**表-4** より，普通強度コンクリート（W/C=40%～60%）の場合，強度比は，0.83～0.89 の範囲であり，端面摩擦減試験は，通常試験より，若干小さくなる傾向を示した。これは，テフロンシートを挟むことにより，端面の摩擦小さくなり，上端面の拘束力が減少したため圧縮強度低下が起きたと考えられる。**写真-2** は，普通強度コンクリート（W/C=40%～60%）の圧縮強度試験後の供試体（上端面摩擦減）の破壊状況を示す。**写真-2** より，通常試験後の破壊は，供試体側面に斜め 45° にひび割れるが生じるが，端面摩擦減の場合，上端面の拘束力が減少したため，ひび割れは，供試体の縦軸（高さ）に沿って生じ，上端面まで達している。同時に，上端面のひび割れも，確認できる。また，普通強度コンクリートにおいて，強度が大きい（W/C=40%）程，ひび割れが広がっている。なお，W/C=60%のコンクリートには，上端面のひび割れが認められない。W/C=60%の場合には，強度および静弾性係数が小さいことから，通常試験（Non-TEFS，摩擦有）およびテフロン挿入時ともに，上端面までひび割れが達しないものと考えられる。平面度の結果は，普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートにおいて，いずれの場合も，JIS 規定の許容値 0.05%以内（0.001%～0.027%）であった。

(2) 応力-ひずみ曲線（静弾性係数）

図-3 は，普通強度コンクリート（W/C=40%～60%）の通常試験（Non-TEFS，摩擦あり）および摩擦減（TEFS）における応力-ひずみ曲線を示す。**図-3** より，普通強度コンクリートの応力-ひずみ曲線の形状と傾き（静弾性係数）は，圧力が加わるに連れ，ひずみ（変形）が進んでいて，勾配は小さくなるが，上端面摩擦の減有に関係なく，同程度である。その際の静弾性係数は，W/C=40%の場合，3.02～3.07×10^4N/mm²，W/C=50%の場合，2.37～2.79×10^4N/mm² および W/C=60%の場合，2.54～2.64×10^4 N/mm² となり，W/C が小さくなる程，大きくなる。また，上端面摩擦の減有による静弾性係数は，各 W/C とも同程度である。

(3) 上端面の圧力分布



a）通常試験（Non-TEFS），上段№2，下段№3　　b）摩擦減（TEFS），上段№4，下段№5

図-5 普通強度コンクリートの圧縮破壊時における圧力分布（W/C=50%，端面研磨）

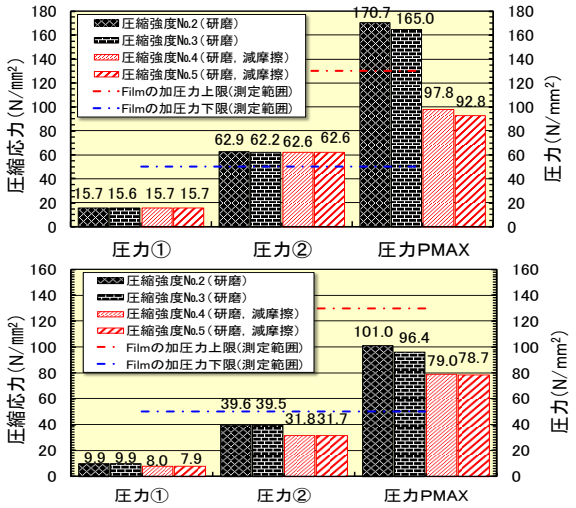


図-6 高強度コンクリートの圧縮強度
（上段：W/C=13%，下段：W/C=20%）

ここでは，端面の摩擦の減有（TEFS，Non-TEFS）による圧縮強度試験時に得られた圧力測定フィルムの圧力情報（圧力分布）を検討した。**図-4** は，普通強度コンクリートにおける載荷上端面の基本応力断面図の一例（W/C=50%）を示す。**図-4** より，№2 および№3（Non-TEFS）の基本応力断面図（面分析結果）は，円周の外縁部分に圧力の高い領域（濃い部分）と，中心部分に圧力が低い領域（白色部分）が認められる。これに対して，№4 および№5（TEFS）は，通常試験（Non-TEFS）で得られた結果（情報）とで差異が認められる。№4 および№5（TEFS）の基本応力断面図（面分析結果）は，円周の外縁部分に圧力が低い領域（白色部分）が認められる。すなわち，供試体端面の摩擦による拘束力の減少による円周の外縁部分の圧力低下の情報が得られる。また，ひび割れの痕跡も認められる。この事は，W/C=40% および W/C=60%の場合も，同様である。**図-5** は，普通強度コンクリートの圧縮破壊時における圧力分布の一例（W/C=50%）を示す。**図-5** より，通常試験（Non-TEFS）時の圧力分布は，円周方向の圧力が大きく，中心部分の

表－5　圧縮強度に及ぼす上端面摩擦の影響

W/C (%)	端面仕上げ	コンクリートの圧縮強度（N/mm²）		
		通常	端面摩擦減*1	強度比*2
13	研　磨	164.1	95.3	0.58
20		98.7	79.0	0.80
30		88.7	77.1	0.87

*1 上端面にテフロンシート 2 枚を挿入
*2 強度比=〔端面摩擦減の試験／通常試験〕

圧力が小さく谷形の形状を示している。これは，摩擦の影響により，上端面の拘束力が供試体の円周の外縁部分に働くことに起因すると考えられる。これに対して，端面摩擦減（TEFS）時の圧力分布は，外縁部分の圧力が極端に小さく，中心部分（直径方向の距離 20mm～80mm）が山形あるいは平らな形状を示している。これは，供試体円周の外縁部分がテフロンシートを挟むことにより，摩擦による拘束力が無くなることで圧力低下したと考えられる。また，低い応力が作用した圧力段階②（最大荷重の 40%）での圧力分布は，通常試験（Non-TEFS）時の場合，圧縮破壊時と同じである。端面摩擦減（TEFS）時の場合，中心部分が谷形の形状を示しているが，これは，若干摩擦の影響が，残っているためと考えられる。

以上より，圧力分布図から面分析および線分析を行った結果，円周の外縁部分の圧力経過をする情報が圧力測定フィルムから得られた。その原因は，摩擦が主たる原因であると確認できた。

3.2 高強度コンクリート

(1) コンクリートの圧縮強度

図-6 は，高強度コンクリートにおける上端面と試験機の加圧板間の摩擦を減少（TEFS，テフロンシートを挟む）させたときと通常試験（Non-TEFS，摩擦有り）のときの圧縮強度（応力）結果（上段：W/C=13%，下段：W/C＝20%）を示す。**図-6** より，高強度コンクリートの場合，普通強度コンクリート（**図-2**）と同様にコンクリートの圧縮強度は，端面摩擦の減有による差異が認められ，端面摩擦減（TEFS）の場合，通常試験の強度より，

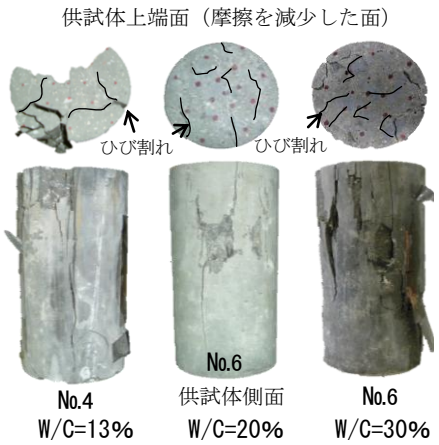


写真-3 高強度コンクリート供試体の圧縮強度試験（上端面摩擦減の場合）

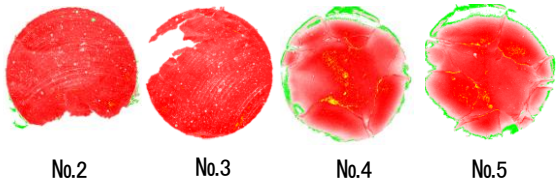


図-8 供試体上端面の基本応力断面図の画像(W/C=13%)

小さくなる。表-5 は，端面摩擦減試験に対する通常試験の強度比を示す。表-5 より，W/C=20%および W/C=30%の高強度コンクリートの場合の強度比は, 0.80 および 0.87 と普通強度コンクリート（表-4）と同程度であるが，W/C=13%の高強度レベルの場合, 0.58 と著しく小さくなる。これは，テフロンシートを挟むことにより，供試体端面の摩擦が著しく小さくなったため，上端面の拘束力の減少に伴う圧縮強度低下と考えられる。写真-3 は，高強度コンクリート（W/C=13%～30%）の圧縮強度試験後の供試体破壊状況を示す。写真-3 より，普通強度コンクリート（写真-2）と同様に，上端面の拘束力が減少したため，ひび割れは，縦方向に沿って上端面に広がっている。しかし，上端面のひび割れは，普通強度コンクリートより，強度が大きいため，上端面の断面全域に広がっている。

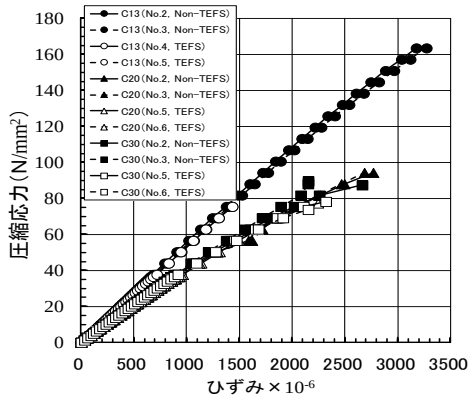


図-7 コンクリートの応力-ひずみ曲線(高強度)

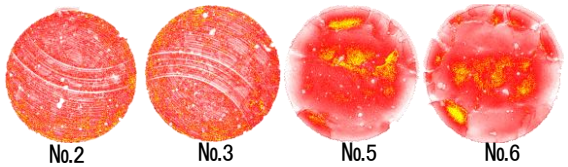


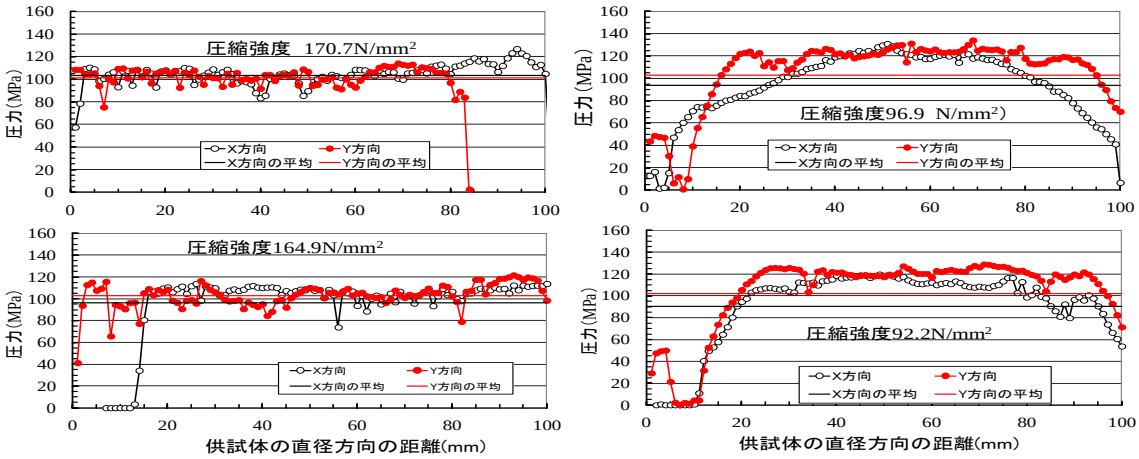
図-9 供試体上端面の基本応力断面図の画像（W/C=20%）

(2) 応力-ひずみ曲線（静弾性係数）

図-7 は，高通強度コンクリート（W/C=13%～30%）の通常試験（Non-TEFS，摩擦あり）および摩擦減（TEFS）における応力-ひずみ曲線を示す。図-7 より，高強度コンクリート応力ひずみ曲線の形状と傾き（静弾性係数）は，W/C=13%の場合，ほぼ直線状を示し，W/C=20%および 30%の場合，形状が若干曲線状になるが，いずれの場合も端面摩擦の減有に関係なく, 同程度である。また，静弾性係数は，W/C=13%の場合，5.36～5.74×10^4N/mm^2，W/C=20% の 場 合 ， 3.83 ～ 3.99 × 10^4N/mm^2 お よ び W/C=30%の場合，3.97～4.17×10^4N/mm^2 である。

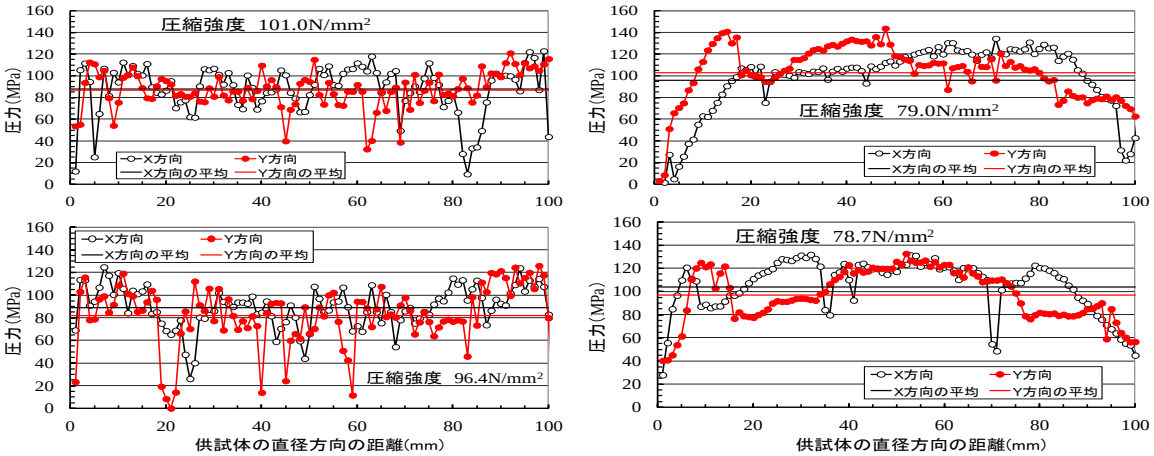
(3) 上端面の圧力分布

図-8，および図-9，は，高強度コンクリートにおける載荷上端面の基本応力断面図を，図-10 および図-11 は，圧縮破壊時における圧力分布（W/C=13%，W/C=20%）を示す。図-8，図-9 より，普通強度コンクリートと同様に，No.2 および No.3（Non-TEFS）の基本応力断面図は，



a) 通常試験（Non-TEFS），上段No.2，下段No.3　　b) 摩擦減（TEFS），上段No.4，下段No.5

図-10 高強度コンクリートの圧縮破壊時における圧力分布（W/C=13%，端面研磨）



a) 通常試験（Non-TEFS），上段№2，下段№3　　b) 摩擦減（TEFS），上段№5，下段№6

図-11 高強度コンクリートの圧縮破壊時における圧力分布（W/C=20%，端面研磨）

外縁部分に圧力の高い領域と中心部分に圧力が低い領域が認められる。№4 および№5（TEFS）の基本応力断面図は，外縁部分に圧力が低い領域が認められる。すなわち，高強度コンクリートの場合も，供試体端面の摩擦による拘束力の減少による円周の外縁部分の圧力低下の情報と，ひび割れの痕跡も認められる。**図-10** および**図-11** においても，普通強度コンクリートと同様に，通常試験（Non-TEFS）時の圧力分布は，外縁部分の圧力が大きく，中心部分の圧力が小さく谷形の圧力分布が得られる。端面摩擦減（TEFS）時の圧力分布は，外縁部分の圧力が極端に小さく，中心部分が山形あるいは平らな形状を示している。　以上より，端面の面分析（基本応力断面図）および EXCEL よる圧力分布の線分析は，コンクリートの載荷部分の新しい知見情報を提供することに繋がり，圧力測定フィルムの活用は，試験における新しい知見を得るのに有効と考えられる。

3.3 供試体の上端面摩擦の影響

図-12 は，上端面研磨仕上げにおける上端面の摩擦有より，上端面摩擦を減した場合の圧縮強度は，いずれの減によるコンクリートの圧縮強度の相関を示す。**図-12** 強度レベルにおいても，通常試験の圧縮強度より，小さく（若干）なり，W/C=13%の高強度レベルの場合，著しく小さくなる。 W/C=13%の場合，圧力②の段階で，すでに最大荷重の 70%の圧縮応力（**図-6**）がかかっていたため，ひび割れが生じ，載荷を繰り返し行った際に，最大荷重時（P_{MAX}）に影響を受け，極端に小さくなったと考えられる。

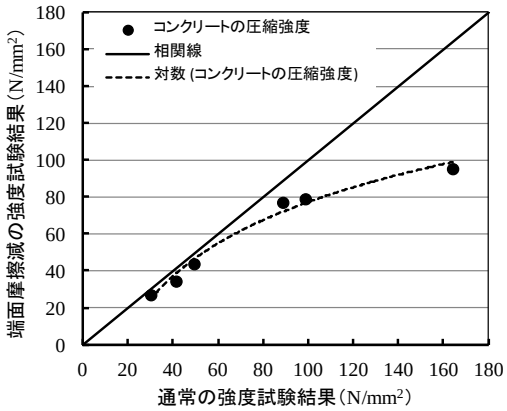


図-12 上端面の摩擦有減による圧縮強度の相関

4．まとめ

本研究は，コンクリートの圧縮強度に及ぼす上端面摩擦の減有について，実験的に検討した。その結果，以下の各点を明らかにすることができた。

(1) コンクリートの圧縮強度試験における上端面の減有は，強度に影響し，摩擦を減少した場合の強度は，摩擦の拘束力が影響する通常試験の圧縮強度の場合より小さくなる。上端面の摩擦の減少による強度への影響は，高強度コンクリートの場合に，より大きくなる。

(2) 普通・高強度コンクリートの応力-ひずみ曲線の形状と傾き（静弾性係数）は，上端面摩擦の減有に関係なく，同程度である。

(3) 圧力測定フィルムは，端面の分析および表計算ソフトによる圧力分布の線分析などの情報活用に用いることで，コンクリートの圧縮強度試験の載荷部分の新しい知見（圧力分布，圧力状態など）を得るのに有効である。

参考文献：

1) 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大会 2013，コンクリート工学年次論文集 第 35 巻（CD-ROM），pp.397-402，2013.7

2) 黒井登起雄；コンクリートの圧縮強度および圧力分布に及ぼす端面摩擦の影響，第 40 回セメント・コクリート研究討論会論文集，pp39-44，2013.11