

# 論文 高強度コンクリートの強度発現に及ぼすコンクリート中の水分の影響に関する研究

河上 浩司<sup>\*1</sup>・西本 好克<sup>\*2</sup>・梶田 佳寛<sup>\*3</sup>

要旨: 普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメント+シリカフェームという3種類の結合材を用いた高強度コンクリートについて、圧縮強度のほかに、単位容積質量、質量含水率を測定してみかけの結合水量の算出を行った。みかけの結合水量と単位結合材量との比により圧縮強度を評価すると、結合材種類や水結合材比ごとに一次式による相関関係が成立し、その傾きは結合材水比と相関性が高いことを確認した。

キーワード: 高強度コンクリート、強度発現、結合材、質量含水率、みかけの結合水率

## 1. はじめに

コンクリートは、水結合材比が小さいほど高強度となり、今日では水結合材比が20%以下の高強度コンクリートも製造されている。一方、完全に水和したポルトランドセメントペーストでは、蒸発しない水は質量で未水和セメントの約23%、ゲル空隙中の水は約21%であり、セメントが完全に水和するためには質量で約44%の水が必要である<sup>1)</sup>。高強度コンクリートでは、単位水量はセメントが完全に水和するのに必要とされる量より少ないにもかかわらず、低水結合材比になるほど得られる強度は高くなる。このような低水結合材比の高強度コンクリート内部の水分の影響についての研究は少ない<sup>2),3),4)</sup>。そこで今回、強度試験後の供試体片を使用して乾燥法による質量含水率を測定して、みかけの結合水率を算出し、水分が強度発現へ与える影響について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 概要と試験体形状

今回、検討に使用したデータは3シリーズの実験において収集した。各シリーズでの養生方法と試験体の概要、1調合あたりで作製した試験体数を表-1に示す<sup>2),3),4),5)</sup>。全てのシリーズで標準養生、20封かん養生および部材試験体(以下、試験体)から採取したコア供試体の圧縮強度を試験し、また、圧縮試験後の供試体片を集めて質量含水率を計測した。シリーズ1と2で用いた試験体は、大断面柱や壁から切出した状況を模擬し、周囲の4面を断熱材とビニールで覆い、両端面からのみ放熱し乾燥を受けるモデルであり、その平面を図-1に示す。シリーズ1では片側1列にはコンクリートを詰めた軽量型枠ごと埋め込み、水分移動を抑制し温度履歴のみを与えた埋込供試体

表-1 検討養生と製作試験体<sup>2),3),4),5)</sup>

	検討養生			
	標準水中	20封かん	小型試験体	
			コア	埋込
シリーズ1 <sup>2),3)</sup>				概要 (W×D×H, 脱型材齢) 900×300×250, 材齢7日, 3~4体
シリーズ2 <sup>4)</sup>			-	900×300×210, 材齢1,3,5,7,日, 6体
シリーズ3 <sup>5)</sup>			-	500×500×400, 材齢25日, 1~5体

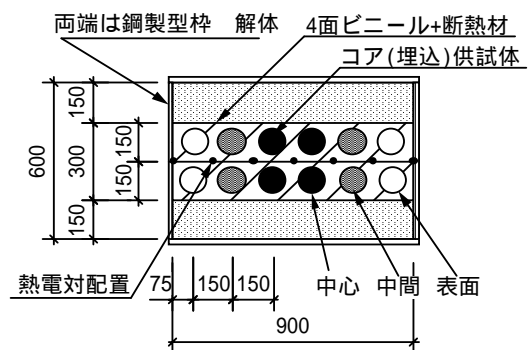


図-1 試験体平面(シリーズ1,2)

\*1 三井住友建設(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

\*3 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

とした<sup>2),3)</sup>。シリーズ2では、両端部の脱型材齢を4水準とし、脱型材齢の差による乾燥の影響とその影響深さについて比較を行った<sup>4)</sup>。シリーズ3の試験体は、より大断面の部材の内部を模擬したもので、ほぼ立方体のブロックの周囲6面を断熱材とビニールで覆っている<sup>5)</sup>。

## 2.2 コンクリート

各シリーズでの使用材料を表-2に示す。結合材は普通ポルトランドセメント(以下、Nセメント)と低熱ポルトランドセメント(Lセメント)、そしてLセメントの10%を内割りでシリカフェーム(SF)と置換したLSFである。化学混和剤は、水結合材比40%以上ではAE減水剤を、40%未満では高性能AE減水剤や超高強度コンクリート用の高性能減水剤を用いた。

コンクリート調合とフレッシュ時の水分率を表-3に示す。記号は結合材種類と水結合材比の組合せで示す。フレッシュ時の水分率とは、コンクリート単位水量と表乾状態での骨材の吸水量をコンクリート単位容積質量で除したものであり、

両者を足した全含水率は後の養生中の水分の出入りを評価するための初期値とした。コンクリート中の単位水量は、コンクリート質量の6.0~9.0%程度であり、また、骨材中の水分量は1.0~1.4%程度である。

## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度

標準養生 20 封かん養生および試験体より採取したコア供試体の強度発現を図-2に示す。なお、シリーズ1と2のコア強度は、中間と中心の結果である。また、材齢28日強度は白抜のロットで、91日強度は黒塗で示した。図中には、結合材種類と材齢ごとに算出した回帰線を併せて示したが、標準養生と20封かん養生のLSFでは、結合材水比6.0において頭打ちがみられたため、回帰線は結合材水比5.0以下で算出した。コアでは、明確な頭打ちを確認できないので、結合材水比6.0までの範囲で回帰を行った。養生方法と頭打ち現象との関係については不明確であり今後の課題である。

表-2 使用材料

シリーズ	材料名	物性	記号
シリーズ1	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3370cm <sup>2</sup> /g	N1
	川砂 (鬼怒川産)	表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.68% 粗粒率 2.75	S1
	硬質砂岩砕石 (葛生産)	表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.97% 実積率 60.1%	G1
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体	
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	
シリーズ2	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3300cm <sup>2</sup> /g	N2
	低熱ポルトランドセメント	密度 3.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3240cm <sup>2</sup> /g	L1
	シリカフェーム	密度 2.2g/cm <sup>3</sup> 比表面積 22.6m <sup>2</sup> /g	SF1
	川砂 (鬼怒川産)	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.68% 粗粒率 2.75	S2
	硬質砂岩砕石 (葛生産)	表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.97% 実積率 58.9%	G2
	高性能AE減水剤, AE減水剤	シリーズ1と同様	
シリーズ3	低熱ポルトランドセメント	密度 3.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3290cm <sup>2</sup> /g	L2
	シリカフェーム	密度 2.2g/cm <sup>3</sup> 比表面積 22.6m <sup>2</sup> /g	SF2
	骨材	シリーズ1と同様	G1
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	

表-3 コンクリート調合

シリーズ	調合記号	W/B (%)	B/W	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュ時の水分率(%)			
						W	C	SF	S	G	単位水量	骨材中	全含水率
シリーズ1	N60	60.0	1.7	45.8	4.5	175	292		813	995	7.69	1.38	9.07
	N40	40.0	2.5	40.6	4.5	183	458		657	995	7.98	1.19	9.17
	N30	30.0	3.3	43.8	3.0	160	533		724	963	6.72	1.21	7.93
シリーズ2	N30	30.0	3.3	44.8	3.0	160	533		750	937	6.72	1.23	7.95
	L40	40.0	2.5	42.1	4.5	183	458		693	968	7.95	1.22	9.17
	L30	30.0	3.3	45.2	3.0	160	533		762	937	6.69	1.23	7.92
	LSF30	30.0	3.3	50.8	3.0	150	450	50	873	858	6.30	1.33	7.63
シリーズ3	LSF30	30.0	3.3	52.8	2.0	150	450	50	907	842	6.25	1.35	7.61
	LSF25	25.0	4.0	50.4	2.0	150	540	60	824	842	6.21	1.25	7.46
	LSF20	20.0	5.0	46.3	2.0	150	675	75	699	842	6.15	1.10	7.25
	LSF16	16.7	6.0	41.5	2.0	150	810	90	575	842	6.08	0.96	7.04

標準養生では、回帰線は結合材の種類に関わらず同一材齢であれば概ね同一直線で回帰できる。一方、20封かん養生やコア供試体では結合材種類ごとに回帰線がまちまちとなったが、20封かん養生では十分な水の供給がないこと、更にコアでは温度履歴の差や乾燥の影響が加わることが原因の一つと考えられる。

### 3.2 質量含水率

コンクリートの質量含水率は、圧縮強度試験後の供試体の中心部から破片を集めて105で乾燥させて計測し、乾燥前後の質量変化から質量含水率を算出した。

シリーズ1での供試体の質量含水率の変化をフレッシュ時の含水率と共に図-3に示す。外部から水が供給される標準養生の質量含水率は他の養生を行った供試体より大きい。水セメント比が小さいと養生による質量含水率の差は小さい。コア供試体と埋込供試体の質量含水率を比較

すると、N60では埋込供試体のほうが高く、また材齢91日では水平方向での変動が小さい。一方、コアでは水平方向での変動がみられ、材齢91日では表面部のコアの質量含水率が低い。N40やN30では、コア供試体と埋込供試体の質量含水率の差は小さく、またコアでの水平方向の変動も小さい。

シリーズ2での供試体の質量含水率の変化を図-4に示す。N30では標準養生は材齢28日のみであるが、シリーズ1と同様に質量含水率はその他の養生より高い。コアでは温度や乾燥の条件が多様ではあるが、変動の範囲は1.0%程度であった。L40でも標準養生の質量含水率は高い。試験体では質量含水率の変動量が大きく、特に材齢1,3日で脱型を行った試験体では表面部のコアの質量含水率が大きく低下しており乾燥の影響が考えられる。L30やLSF30では質量含水率の変動幅はN30に比べ大きい。試験体の表面部のコアの質量含水率が極端に低下することはなく、試験体内

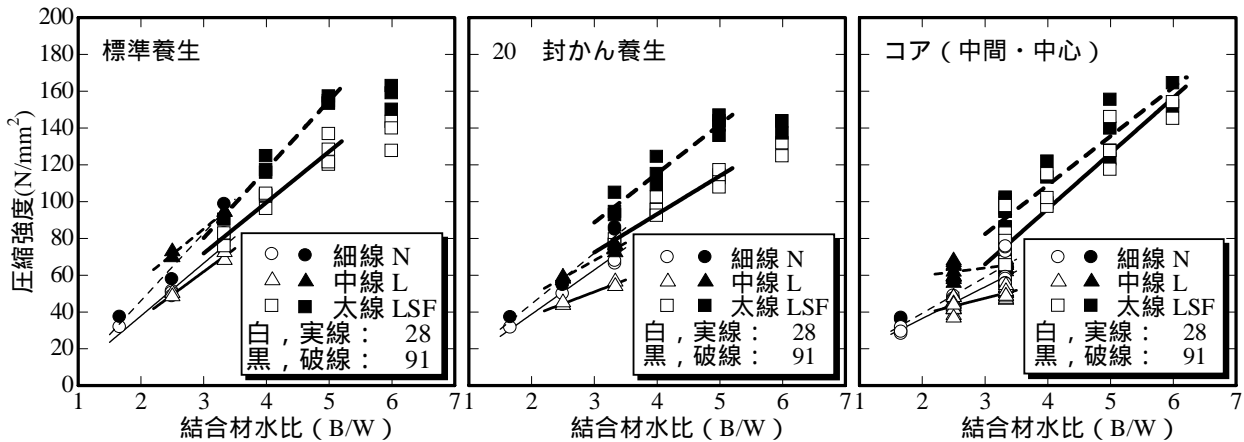


図-2 強度発現

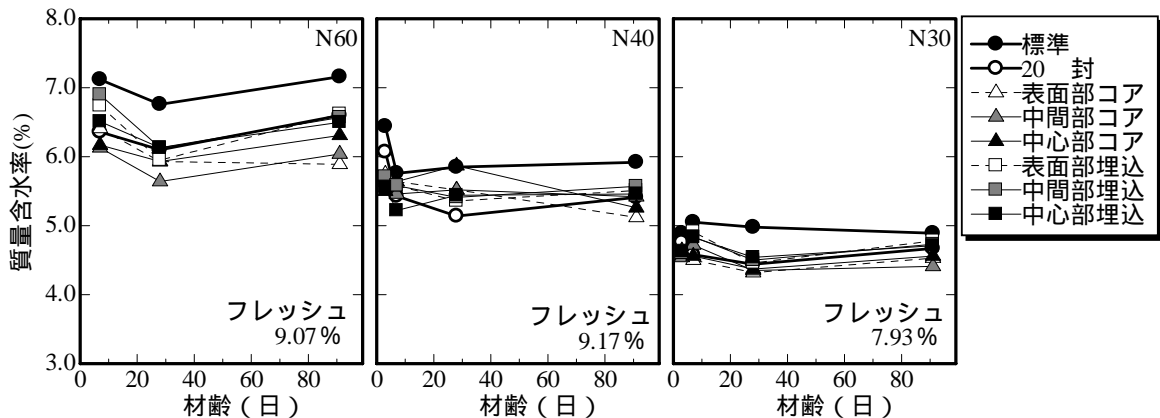


図-3 質量含水率の変化(シリーズ1)

で均一に近くなっている。水結合材比が低下すると試験体内の水分分布が均一になっていくこと傾向があることを確認できた。

シリーズ3での供試体の質量含水率の変化を図-5に示す。シリーズ3の一部の供試体では材齢180日まで確認を行った。全体的に水結合材比の減少に伴い質量含水率は低下する。また標準養生と20封かん養生の質量含水率は大きな差がないが、コアに比べ若干低くなった。

### 3.3 単位容積質量

単位容積質量の測定値の例を表-4に示す。シリーズ2の試験体は脱型材齢を1日と7日の試験体について測定値を示した。単位容積質量は個々の供試体や試験体で大きなばらつきがあるが全体の傾向として単位容積質量は水結合材比の低下に伴い増加し、また標準養生のほうが封かん養生より大きい。試験体の単位容積質量を検討すると、シリーズ1のN60ではコアの単位容積質量は埋込供試体より大きいが、N40やN30では両者

の差は小さい。また、シリーズ2のL40では、1日脱型の表面コアは内部のコアより単位容積質量が小さくなる。しかし、その他の試験体では水平方向の分布について明確な傾向は確認できない。

一部の配合では標準養生供試体の単位容積質量変化を長期にわたり計測しており、その結果を図-6に示す。標準養生では吸水するため単位容積質量は増加しているが、材齢28日以降の増加量は小さい。

## 4. 考察

### 4.1 質量含水率と圧縮強度

材齢28日と91日における、供試体の質量含水率と圧縮強度との関係を図-7に示す。結合材種類ごとに分布の領域が異なるが、水結合材比が小さいほど質量含水率は低く、圧縮強度は高強度になる傾向がある。結合材種類で比較すると、同一水結合材比で強度が等しい場合は、Nセメントの質量含水率はLセメントやLSFよりも小さい。

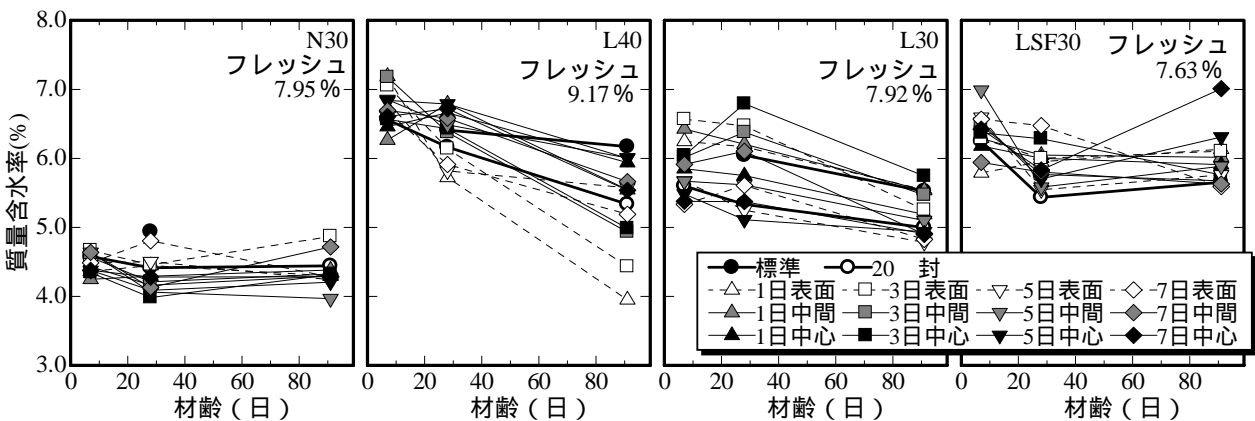


図-4 質量含水率の変化(シリーズ2)

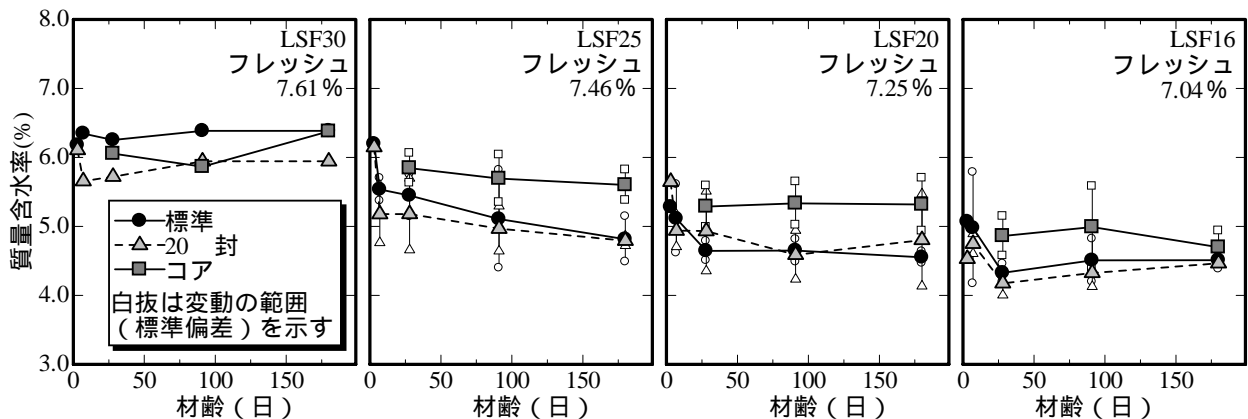


図-5 質量含水率の変化(シリーズ3)



4.2 結合水率と圧縮強度

コンクリートの調合とフレッシュ時の単位容積質量、テストピースの単位容積質量、骨材中の水分量および質量含水率をもとにみかけの結合水量を式(1)により算出した。

$$W_b = W_0 + W_g \pm W - W_c \quad (1)$$

W<sub>b</sub>: みかけの結合水量(kg/m<sup>3</sup>)

W<sub>0</sub>: 単位水量(kg/m<sup>3</sup>)

W<sub>g</sub>: 骨材に含まれる水分量(kg/m<sup>3</sup>)  
(調合上の骨材量 × 吸水率)

W: 吸水・乾燥による水分変化量(kg/m<sup>3</sup>)

(単位容積質量変化により評価)

W<sub>c</sub>: 質量含水量 (kg/m<sup>3</sup>)

みかけの結合水量を単位水量で除した みかけの結合水率と圧縮強度との関係を図 - 8 に示す。みかけの結合水率は広範囲にわたり層状に分布し、今回の検討ではその範囲は20 ~ 80%に及んだ。また 結合材種類や水結合材比により分布が異なるが 水結合材比が低いほど高強度側に分布する。

続いて みかけの結合水量と単位結合材量から、みかけの結合水結合材比を算出し、圧縮強度との関係を評価した結果を図 - 9 に示す。なお 図中に

表 - 4 単位容積質量

(単位 kg/m<sup>3</sup>)

シリーズ1					シリーズ2					シリーズ3								
	0	7	28	91		0	7	28	91		0	7	28	91				
N60	標準	2284	2306	2296	2321	N30	標準	2383	-	2409	-	LSF30	標準	2379	2410	2416	2401	
	封かん	2285	2302	2291	2312		封かん	2383	2394	2389	2393		封かん	2379	2393	2378	2384	
	表面コア	2285	2312	2323	2339		1日表面	2394	2442	2405	2404		コア	2379	-	2415	2436	
	中間コア	2285	2301	2337	2344		1日中間	2394	2436	2415	2401		標準	2419	2445	2446	2421	
	中心コア	2285	2308	2354	2342		1日中心	2394	2434	2416	2396		封かん	2419	2419	2424	2413	
	表面埋込	2285	2306	2313	2305		7日表面	2385	2408	2382	2382		コア	2419	-	2442	2437	
	中間埋込	2285	2301	2316	2297		7日中間	2385	2399	2365	2382		標準	2388	2445	2439	2412	
	中心埋込	2285	2309	2313	2300		7日中心	2385	2394	2373	2379		封かん	2390	2410	2415	2404	
	標準	2300	2336	2328	2337		標準	2315	-	2346	2339		コア	2388	-	2450	2434	
N40	封かん	2300	2345	2293	2299	L40	封かん	2315	2333	2337	2334	LSF25	標準	2449	2494	2483	2479	
	表面コア	2300	2339	2349	2334		1日表面	2315	2316	2305	2303		封かん	2449	2474	2467	2481	
	中間コア	2300	2347	2346	2331		1日中間	2315	2324	2313	2310		コア	2449	-	2470	2453	
	中心コア	2300	2338	2348	2341		1日中心	2315	2328	2326	2325		標準	2449	2494	2483	2479	
	表面埋込	2300	2332	2312	2304		7日表面	2318	2303	2313	2335		封かん	2449	2474	2467	2481	
	中間埋込	2300	2326	2318	2306		7日中間	2318	2309	2319	2334		コア	2449	-	2455	2457	
	中心埋込	2300	2339	2305	2312		7日中心	2318	2311	2313	2343		標準	2439	2519	2505	2476	
	標準	2425	2447	2432	2437		標準	2382	-	2403	2406		LSF20	封かん	2439	2454	2473	2467
	封かん	2425	2454	2425	2422		封かん	2382	2379	2381	2381		コア	2439	-	2503	2503	
N30	表面コア	2425	2455	2430	2436	L30	1日表面	2314	2307	2299	2337	LSF20	標準	2431	2482	2461	2453	
	中間コア	2425	2441	2426	2436		1日中間	2314	2312	2314	2333		封かん	2431	2457	2461	2452	
	中心コア	2425	2442	2438	2429		1日中心	2314	2296	2317	2327		コア	2431	-	2471	2467	
	表面埋込	2425	2439	2427	2425		7日表面	2311	2296	2336	2323		標準	2447	2488	2495	2497	
	中間埋込	2425	2437	2437	2427		7日中間	2311	2316	2329	2329		封かん	2447	2465	2470	2445	
	中心埋込	2425	2435	2426	2427		7日中心	2311	2313	2315	2330		コア	2447	-	2470	2471	
	標準	2382	-	2431	-		標準	2382	-	2431	-		標準	2482	2542	2513	2515	
	封かん	2382	2400	2405	2407		封かん	2382	2400	2405	2407		LSF16	封かん	2488	2505	2502	2510
	1日表面	2375	2400	2433	2439		1日表面	2375	2400	2433	2439		コア	2482	-	2508	2513	
1日中間	2375	2392	2413	2410	1日中間	2375	2392	2413	2410									
1日中心	2375	2398	2418	2416	1日中心	2375	2398	2418	2416									
7日表面	2388	2439	2432	2441	7日表面	2388	2439	2432	2441									
7日中間	2388	2430	2430	2444	7日中間	2388	2430	2430	2444									
7日中心	2388	2437	2431	2442	7日中心	2388	2437	2431	2442									

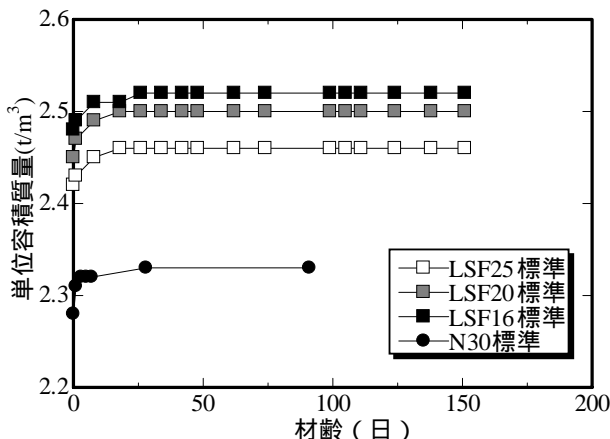


図 - 6 単位容積質量の変化

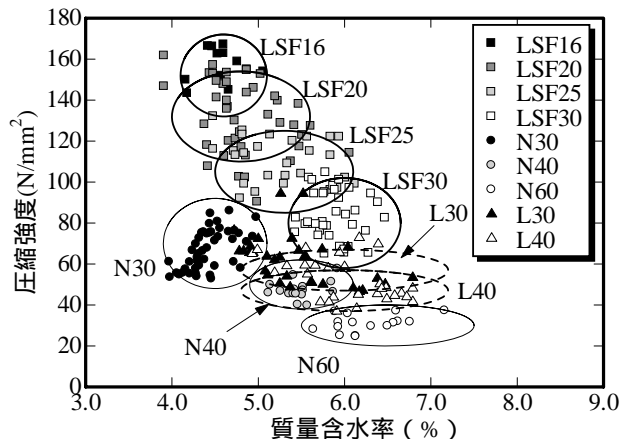


図 - 7 質量含水率と圧縮強度

は原点を通る直線により回帰を行った結果を併せて示す。同一のみかけの結合水結合材比のときは、調合上の水結合材比が小さいコンクリートほど高強度となる。また、みかけの結合水結合材比が大きい、すなわちみかけの結合水量が増加すると高強度化するが、水結合材比が小さいほど、回帰式の傾きは大きくなるため、わずかな結合水量の差が強度に大きな影響を与えることがわかる。

水結合材比と図 - 9 中の回帰式の傾きとの関係を示すと図 - 10 のようになり、連続性がみられる。すなわち、結合水量と水結合材比により、低強度から超高強度領域までコンクリートの強度を連続的に評価できる可能性が示唆された。

### 5. まとめ

今回の一連の実験により、高強度コンクリートの圧縮強度と内部水分との関係について以下の知見が得られた。

- 1) 水結合材比が小さいコンクリートでは、養生方法による質量含水率の変動は小さくなる。
- 2) みかけの結合水結合材比により、低強度領域から超高強度領域までのコンクリートの圧縮強度を評価することができた。
- 3) コンクリートの水結合材比が低下するほど結合水量が強度に与える影響が大きくなった。

本論は、限られた条件と試験結果から検討を行った結果である。今後は、データの収集を行い結合水と強度との関係を、更に検討する所存である。

### 参考文献

- 1) (社)コンクリート工学協会:コンクリート便覧「第二版」,技報堂出版,1996
- 2) 皆川淳ほか:構造体中でのコンクリート強度発現の変動に関する基礎的実験,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.24,No.1,pp.945-950,2002.6
- 3) 佐藤幸恵ほか:高強度コンクリートの構造体内部での含水率の変化と強度発現性に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.25, No.1,pp.1031-1036,2003.7

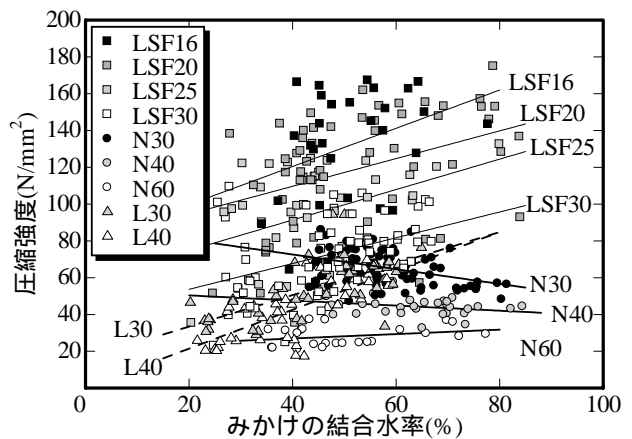


図 - 8 みかけの結合水率と圧縮強度

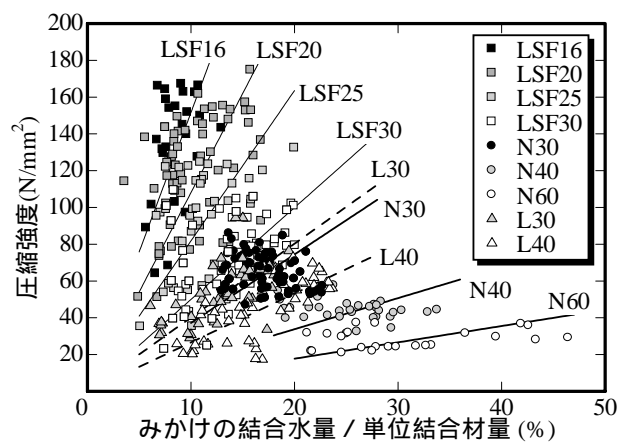


図 - 9 みかけの結合水結合材比と圧縮強度

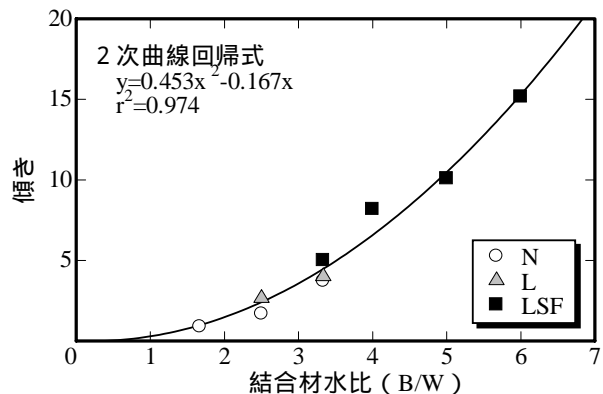


図 - 10 みかけの結合水結合材比の回帰線の傾き

- 4) 河上浩司ほか:型枠解体材齢が構造体コンクリート強度に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.25, No.1,pp.1025-1030,2003.7
- 5) 河上浩司,西本好克:Fc100/mm²級の超高強度コンクリートの強度発現に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.24,No.1,pp.369-374,2002.6