

論 文

[1045] 高強度流動化コンクリートの施工性と工学的特性に関する実験的研究

正會員 ○ 金 武漢 (韓国忠南大學校工科大学)

正會員 洪 悦郎 (関東学院大学工学部)

正會員 鎌田 英治 (北海道大学工学部)

正會員 秀島 節治 (日曹マスタービルダーズ)

1. まえがき

最近コンクリート構造物の大型化と高層化にともなう、コンクリートに要求される性能も多様化・高度化されて、韓国においても施工性がよい高強度コンクリートの開発は建設産業の新素材開発という側面ばかりでなく、建設工事の資源節約及び経費節減など建設経済的效果の増進という側面で時急な問題と登場してくるのである。

本研究は高性能減水剤の強力な減水作用に着目し、まだ固まらないコンクリートの高流動化による施工性の向上並びに高強度領域コンクリートの圧縮強度、引張強度、動弾性係数、静弾性係数及び反撥度などの高強度特性と工学的特性について実験的に比較分析してその適用性と実用性を検討したものである。

表1. 実験の要因と水準

要 因	水 準
水セメント比	0.25, 0.30, 0.35, 0.40
細・粗骨材	川砂, 川砂利, 碎石
SP剤	NL, RH
SP剤添加率(%)	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
ベースコンクリートのスランプ(cm)	0, 12
材 齢(日)	7, 28, 60, 90, 180

2. 実験計画及び実験方法

2・1 実験計画

本研究は表1のように実験の要因と水準を設定し、表5に示すような3シリーズに分けて行なった。Iシリーズは水セメント比3種類で、スランプ12 cmの中練リベースコンクリートをスランプ18 cmを目標に流動化させて、中練リコンクリートの流動化性能と強度特性を検討し、IIシリーズは水セメント比2種類でスランプ0 cmの硬練リベースコンクリートの流動化特性と工学的特性を検討した。またIIIシリーズでは水セメント比2種類で骨材要因による高性能減水剤の流動化効果と高強度化効果などの工学的特性などを比較検討した。

本研究で使用したセメントは表2のような韓国S社産の普通ポルトランドセメント、細粗骨材は表3のように川砂、川砂利及び碎石を使用した。混和剤は高性能減水剤として表4のようにM社製のNLとRHを用いた。

表2. セメントの物理的試験結果

シリーズ	種 類	比重	粉 末 度 ($\mu\text{m}/\text{g}$)	凝 結 (h-m)		安定性	圧縮強度 (kg/cm^2)		
				初結	終結		3日	7日	28日
I・II	普通ポルトランドセメント	3.15	3,240	5-6	7-20	良好	194	261	323
III	普通ポルトランドセメント	3.15	3,570	3-15	5-15	良好	256	352	420

表3. 細粗骨材の物理的試験結果

シリーズ	区 分	粒 径 (mm)	粗粒骨 (F・M)	比 重	吸水率 (%)	実積率 (%)	単 位 容積重量 (kg/m^3)
I	川 砂	2.5	2.87	2.60	1.01	67.3	1,504
	川砂利	25	8.10	2.62	1.50	63.0	1,623
II	川 砂	2.0	2.55	2.60	1.21	59.1	1,539
	川砂利	20	6.90	2.59	1.24	62.2	1,611
III	川 砂	2.5	2.55	2.60	1.21	59.1	1,539
	川砂利	20	6.90	2.59	1.24	62.2	1,611
	碎 石	20	6.74	2.84	1.26	59.2	1,680

2・2 コンクリートの調合、混練及び 実験方法

コンクリートの調合は日本建築学会の『コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説』¹⁾及び『流動化コンクリートの施工指針案・同解説』²⁾の参考調合表に基づき、水セメント比 0.25,

0.30, 0.35, 0.40 の4種類を選び、試し練りを行なつ

て表5のように決定した。実験項目はまだ固まらないコンクリートにおいてベース及び流動化後のコンクリートのスランプ、空気量、締固め係数、フロー値、単位容積重量および練り上り温度を測定し、硬化コンクリートの圧縮強度、引張強度、動弾性係数、静弾性係数及び反撥度は所定の材令まで20±3℃の水中標準養生した後それぞれJISとBSなどの実験方法ならびに規定³⁾に準じて実施した。

3. 実験結果の分析及び検討

3・1 まだ固まらないコンクリートの性状及び検討

まだ固まらないコンクリートの実験結果を表わした表5と圖1によるとSP剤の添加による空気量の大きな変化はほとんど見られず、コンクリートのコンシステンシーでは、川砂・川砂利コンクリートはSP剤の添加によって相當な流動化性能の改善と効果をもたらしコンクリートの施工性と作業性の向上が期待できるが、川砂・碎石コンクリートは相對的に流動化性能の改善が少なくなつて、コンクリートのコンシステンシーとワーカビリティの改善という側面でSP剤の種類・添加率ばかりでなくベースコンクリートの調合條件・骨材要因の影響に關する深度ある研究が必要であると思われる。

表5. コンクリートの調合とまだ固まらないコンクリートの試験結果

シリーズ	W/C (%)	骨材 種類	SP剤 種類	SP 剤 添加率 (%)	細骨 材率 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	絶対容積(ℓ/m ³)			スランプ (cm)		空気量 (%)	締固め 係 数 (C・F)	フロー値 (cm)	単位容積 重 量 (kg/m ³)	練 り 温 度 (℃)						
							セメント	細骨材	粗骨材	添加前	添加後											
I	30	川 砂	NL	0.0	23.9	200	212	138	440	10.5	—	1.5	0.90	37.0	2,374	20.0						
				0.5						10.3	12.0	1.3	0.92	40.8	2,384	20.5						
				1.0						10.5	16.0	1.5	0.98	44.0	2,378	20.5						
				1.5						9.5	22.5	1.2	0.99	57.5	2,410	20.0						
				2.0						9.5	23.5	1.5	0.98	74.5	2,419	20.0						
	35			0.0	27.6	214	194	161	421	13.0	—	1.4	0.99	38.5	2,410	24.0						
				0.5						11.5	14.0	1.5	0.97	43.5	2,335	23.5						
				1.0						10.5	18.0	1.3	0.99	44.0	2,354	24.0						
				1.5						10.5	23.5	1.2	0.99	46.3	2,334	24.0						
				2.0						10.0	24.0	1.3	0.99	54.0	2,338	23.5						
	40			0.0	34.5	222	177	204	387	12.0	—	1.6	0.90	44.0	2,341	21.0						
				0.5						12.0	14.5	2.0	0.99	46.5	2,336	21.0						
				1.0						13.0	17.5	1.4	0.99	48.0	2,347	21.0						
				1.5						12.5	19.5	1.5	0.99	67.5	2,363	21.5						
				2.0						13.0	23.5	1.6	0.99	72.5	2,358	21.0						
	II			25	川砂利	RH	0.0	35.0	171	222	207	386	0	—	1.9	0.73	25.0	2,072	13.5			
0.5		0	1.2				1.6						0.77	26.0	2,239	13.5						
1.0		0	2.6				1.8						0.82	30.0	2,271	13.0						
1.5		0	20.0				1.4						0.85	44.0	2,334	13.0						
2.0		0	22.0				1.6						0.98	47.0	2,301	13.0						
30		0.0	44.7	171			181	285	353	0	—	1.6	0.76	26.5	2,176	13.5						
		0.5								0	1.0	1.7	0.78	27.0	2,384	13.0						
		1.0								0	5.3	2.1	0.82	32.5	2,354	13.0						
		1.5								0	18.8	1.9	0.94	42.8	2,376	12.5						
		2.0								0	23.2	1.7	0.98	49.8	2,391	13.0						
		25								0.0	35.0	175	222	207	386	0	—	1.7	0.66	28.5	2,263	15.0
										1.5						0	15.5	1.2	0.90	46.3	2,385	15.0
0.0	0.5		—	1.5	0.72	28.5	2,269	14.0														
1.5	0		20.5	1.2	0.99	50.5	2,449	15.0														
0.0	0		—	1.0	0.71	24.5	2,154	15.0														
30	0.0	35.0	175	222	207	386	0	2.5	2.3	0.88	34.0	2,344	15.0									
	1.5						0	—	1.9	0.69	25.5	2,261	15.0									
	0.0						0	—	1.9	0.69	25.5	2,261	15.0									
	1.5						0	6.8	1.7	0.94	38.0	2,452	16.0									
	0.0						0	—	1.9	0.69	25.5	2,261	15.0									

3・2 硬化コンクリートの高強度特性

及び検討

各シリーズ別実験要因と水準によって硬化コンクリートの試験結果を表6に、材令別SP剤の添加率と圧縮強度及び引張強度の関係を各各圖2と圖3に示す。

表6と圖2によるとIシリーズの中練リベースコンクリートの場合にはSP剤の添加率が大きくなるほど圧縮強度が低下する傾向がみられるが、IIシリーズの硬練リベースコンクリートの場合ではSP剤の添加率1.5%までは圧縮強度の伸びが顕著である。なおIIIシリーズの場合骨材要因別圧縮強度發現の差異をみると川砂・碎石コンクリートが水セメント比 0.25、材令7日のことを除けば川砂・川砂利コンクリートに比べて $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上の大きな圧縮強度が發現されている。各材令での圧縮強度發現比率を分析してみると材令7日の圧縮強度は28日強度の76~87%を發現してParrott⁴⁾が報告した 80~90%の範囲とNilson⁵⁾などが共同に發表した73%の平均的な數値となる早強化傾向をみせている。また材令180日の圧縮強度が28日より45~185 kg/cm^2 (7~34%)以上高く發現されて高強度コンクリートにおいて後期材令の圧縮強度を合理的設計基準強度に設定する適合性及び妥當性に關する深度ある研究が必要であると思われる。

本實驗で得られた高強度領域コンクリートにおいて引張強度の圧縮強度に対する比率(F_t/F_c)はA.G.A.Saul⁶⁾の研究結果と一致しており、1/11~1/17で普通コンクリートの 1/9~1/13に比べ小さい傾向を示している。

圖4に示したように本實驗式はACI式よりは低く、Brooks⁷⁾式より高く、CEB-FIP⁸⁾

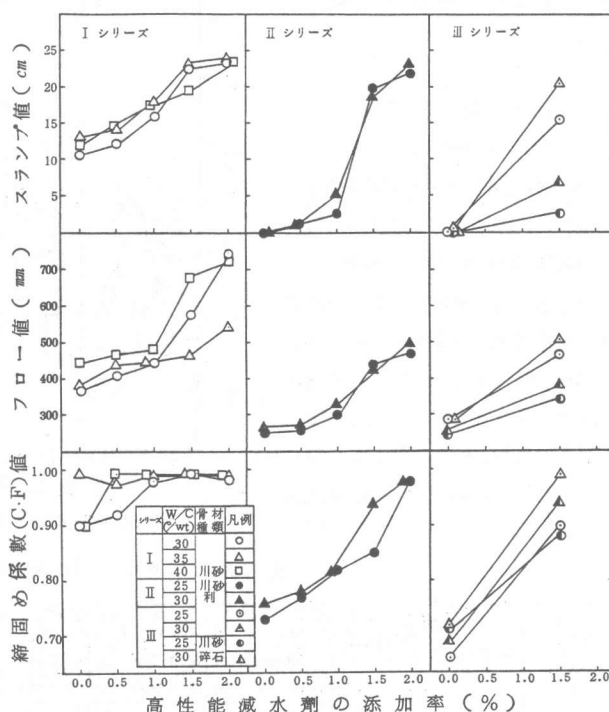


圖 1. 高性能減水剤の添加率とスランプ値、フロー値及び締固め係数の關係

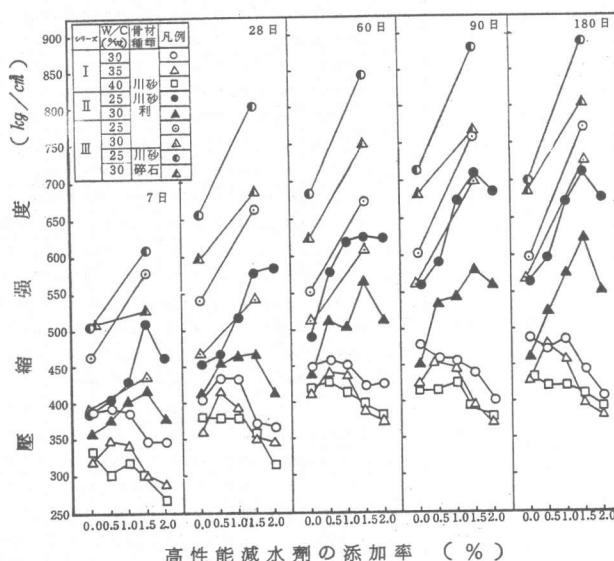


圖 2. 材令別 高性能減水剤の添加率と壓縮強度の關係

式とはほとんど類似な水準を現わしている。

3・3 高強度流動化コンクリートの工

学的特性及び検討

圧縮強度と動弾性係数の関係を示した図5のように川砂・碎石コンクリートの動弾性係数が川砂・川砂利コンクリートより同じ圧縮強度で 0.75×10^6 kg/cm² 程度大きい傾向を示しており、また川砂・碎石コンクリートの場合動弾性係数の値はLacroix-Jaugy⁹⁾式よりは少し低いがBritish Standard Code¹⁰⁾よりは高い値を現わしている。圧縮強

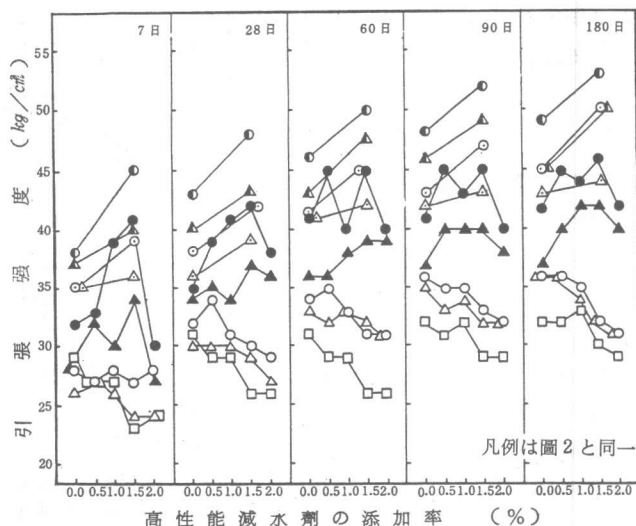


図 3. 材令別 高性能減水剤の添加率と引張強度の関係

表6. 硬化コンクリートの試験結果

シリーズ	W/C (%wt)	骨材 種類	SP剤 種類	SP剤 添加率 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)					引張強度 (kg/cm ²)					動弾性係数 (×10 ⁶ kg/cm ²)					静弾性係数 (×10 ⁶ kg/cm ²)					反 撥 度 (R・N)	単位容積重量 (kg/m ³)					弾性係数比 (Ed/Es)				
					7	28	60	90	180	7	28	60	90	180	7	28	60	90	180	7	28	60	90	180		7	28	60	90	180		28			
I	30	川 砂	NL	0.0	388	402	450	480	490	28	32	34	36	36	3.56	3.75	3.83	3.93	3.94	-	2.58	-	-	-	39	44	46	46	46	2404	2394	2394	2411	2418	1.45
				0.5	393	434	459	460	475	27	34	35	35	36	3.69	3.77	3.81	3.93	3.94	-	2.64	-	-	-	39	45	45	46	47	2407	2403	2410	2414	2420	1.43
				1.0	396	432	452	456	488	28	31	33	35	35	3.59	3.80	3.87	3.92	3.98	-	2.62	-	-	-	40	45	47	46	47	2387	2410	2438	2412	2403	1.51
				1.5	348	371	423	440	442	29	30	31	33	32	3.47	3.66	3.83	3.93	3.97	-	2.45	-	-	-	40	43	46	47	47	2389	2409	2408	2430	2421	1.49
				2.0	348	368	428	403	409	28	29	31	32	31	3.50	3.65	3.84	3.92	4.02	-	2.47	-	-	-	39	43	46	47	48	2401	2425	2427	2427	2435	1.48
				0.0	317	359	410	428	429	26	30	33	36	36	3.45	3.66	3.74	3.78	3.81	-	2.64	-	-	-	37	42	45	45	45	2387	2382	2385	2393	2389	1.39
	0.5			347	414	441	458	483	27	30	32	33	32	3.51	3.72	3.76	3.83	3.95	-	2.55	-	-	-	39	44	45	46	46	2404	2378	2401	2405	2385	1.45	
	1.0			342	393	439	449	460	26	30	33	34	34	3.50	3.70	3.80	3.83	3.92	-	2.61	-	-	-	38	44	45	45	45	2385	2389	2389	2403	2404	1.42	
	1.5			300	350	389	396	397	24	29	32	32	32	3.47	3.55	3.73	3.85	3.98	-	2.34	-	-	-	38	43	44	44	45	2405	2403	2385	2421	2435	1.52	
	2.0			288	347	372	373	380	24	27	31	32	32	3.40	3.51	3.73	3.83	3.91	-	2.31	-	-	-	37	41	43	44	44	2424	2389	2412	2437	2431	1.52	
	0.0			332	382	419	417	436	29	31	31	32	32	3.25	3.69	3.70	3.78	3.79	-	2.20	-	-	-	34	42	43	46	45	2386	2384	2396	2399	2395	1.68	
	0.5			301	378	428	419	423	27	29	29	31	32	3.26	3.47	3.62	3.75	3.79	-	2.35	-	-	-	34	39	43	44	44	2386	2385	2387	2394	2393	1.48	
1.0	316		379	413	427	424	27	29	29	32	33	3.32	3.52	3.58	3.71	3.77	-	2.23	-	-	-	35	38	43	44	42	2372	2388	2380	2377	2383	1.58			
1.5	302		360	399	393	412	23	26	26	29	30	3.22	3.45	3.64	3.74	3.79	-	2.28	-	-	-	33	38	43	43	43	2345	2383	2385	2395	2399	1.51			
2.0	267		315	379	385	392	24	26	26	29	29	3.20	3.46	3.62	3.78	3.84	-	2.30	-	-	-	33	40	44	44	45	2343	2384	2382	2417	2399	1.50			
25	川砂利		0.0	385	453	491	561	565	32	35	41	41	42	3.74	3.96	4.07	4.05	4.07	2.95	3.04	3.16	3.17	3.20	36	44	47	46	48	2410	2428	2428	2413	2424	1.30	
			0.5	406	468	580	592	598	33	39	45	45	45	3.69	3.88	4.06	4.10	4.10	2.77	2.97	3.04	3.08	3.11	36	43	46	47	47	2389	2410	2411	2418	2420	1.31	
			1.0	431	520	622	678	673	39	41	40	43	44	3.75	3.85	4.14	4.19	4.23	2.85	2.88	3.03	3.35	3.27	37	44	47	48	49	2424	2415	2403	2425	2434	1.34	
			1.5	513	581	632	712	714	41	42	45	45	46	3.78	3.98	4.10	4.14	4.25	2.92	3.09	3.12	3.16	3.22	38	45	48	50	2419	2421	2428	2419	2424	1.29		
			2.0	464	587	629	686	679	30	38	40	40	42	3.86	3.96	4.14	4.14	4.20	3.08	3.05	3.07	3.07	3.08	38	46	48	49	49	2438	2445	2423	2425	2424	1.30	
			0.0	357	409	440	462	463	28	34	36	37	37	3.46	3.58	3.87	3.90	3.97	2.52	2.85	2.97	3.03	3.05	33	40	43	44	44	2385	2385	2383	2373	2388	1.25	
0.5	377		453	511	536	528	32	35	36	40	40	3.51	3.79	4.01	4.04	4.10	2.45	2.87	2.92	3.11	3.17	34	41	45	45	45	2361	2382	2381	2387	2401	1.32			
1.0	403		463	503	547	583	30	34	38	40	42	3.51	3.78	3.91	3.94	4.15	2.58	2.86	3.10	3.10	3.15	34	41	41	45	45	2355	2388	2382	2388	2385	1.32			
1.5	418		469	567	582	625	34	37	39	40	42	3.56	3.76	4.02	4.11	4.16	2.50	2.98	3.08	3.15	3.20	34	42	44	44	44	2388	2371	2377	2385	2389	1.27			
2.0	378		411	515	562	552	27	36	39	38	40	3.42	3.70	3.88	3.98	4.07	2.82	2.70	2.79	2.92	3.02	35	42	46	46	46	2340	2385	2382	2385	2371	1.37			
25	RH		0.0	463	541	551	602	596	35	38	42	43	45	3.77	4.01	4.04	4.14	4.14	2.99	3.05	3.15	3.21	3.23	39	41	43	45	45	2408	2422	2415	2420	2431	1.31	
			1.5	578	665	674	758	771	39	42	45	47	50	4.09	4.22	4.34	4.38	4.38	3.08	3.23	3.37	3.60	3.62	45	41	47	49	51	2455	2443	2478	2470	2469	1.31	
			0.0	391	468	513	562	567	35	36	41	42	43	3.75	4.03	4.06	4.20	4.26	2.82	2.83	3.19	3.19	3.21	39	42	42	45	45	2389	2418	2413	2405	2412	1.41	
			1.5	435	542	609	705	727	36	37	42	43	44	3.84	4.03	4.10	4.28	4.30	2.76	2.95	3.26	3.40	3.45	43	47	48	49	50	2408	2436	2388	2411	2412	1.36	
			0.0	503	656	682	713	701	38	43	46	48	49	4.66	4.82	5.05	5.14	5.16	3.29	3.44	3.63	3.73	3.75	39	44	45	46	47	2488	2480	2503	2480	2504	1.40	
			1.5	608	802	846	881	890	45	48	50	52	53	4.93	5.22	5.31	5.44	5.47	3.44	3.74	3.78	3.91	3.97	44	49	50	50	52	2518	2530	2535	2535	2531	1.40	
30	碎 石		0.0	507	598	625	682	686	37	40	43	46	45	4.58	5.00	5.05	5.15	5.24	3.18	3.33	3.53	3.77	3.81	39	44	45	45	45	2488	2483	2488	2487	2485	1.49	
			1.5	528	687	746	767	804	40	43	46	49	50	4.76	5.06	5.25	5.31	5.33	3.43	3.63	3.72	3.80	3.91	42	46	48	48	49	2488	2480	2503	2489	2512	1.37	

度と静弾性係数の関係を示した図6によると本実験式はNilson⁹⁾の式と類似しているし、Parrott⁴⁾式とは差異を示している。また日本建築學會¹¹⁾の鉄筋コンクリート構造計算式とは圧縮強度が増加するほど大きな差異を示すので高強度領域のコンクリートで現行標準式の適合性を判定する爲の深い研究の必要性があることを示唆している。圧縮強度と反撥度の関係を示した図7によると同一反撥度での圧縮強度の差異が大きくなり、水セメント比・骨材などの実験要因と水準により相當に異なっている。また日本材料學會式¹²⁾は比較的にIシリーズの低い圧縮強度領域ではよく對應するが、IIIシリーズの高強度領域とは大きな差異を示しており高強度コンクリート領域での適用性を検討する必要がある。

4. まとめ

高強度流動化コンクリートの適用性と實用性を検討する爲に高強度領域コンクリートの施工性と工學的特性を比較分析した結果を要約すれば次のようになる。

1) 川砂・川砂利コンクリートではSP剤の添加によって相當な流動化性能の改善と効果をもたらし、コンクリートの施工性と作業性の向上が期待できるが、川砂・碎石コンクリートは相對的に流動化性能の改善が少なくなってコンクリートのコンシステンシーとワーカビリティの改善という側面でSP剤の種類・添加率、調合條件、骨材要因の影響に關する深度ある研究が必要であると考えられる。

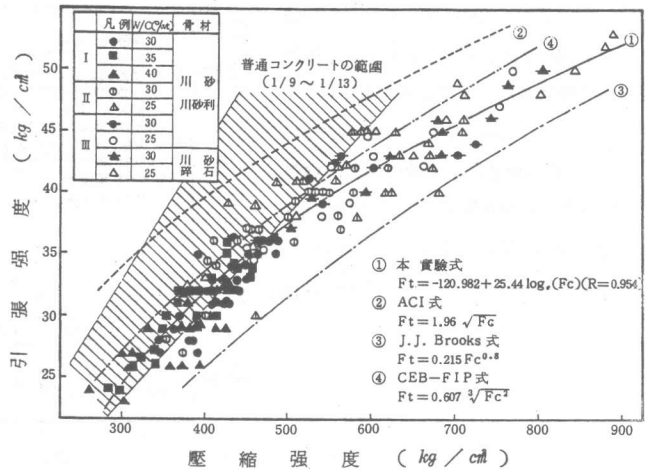


圖 4. 圧縮強度と引張強度の関係

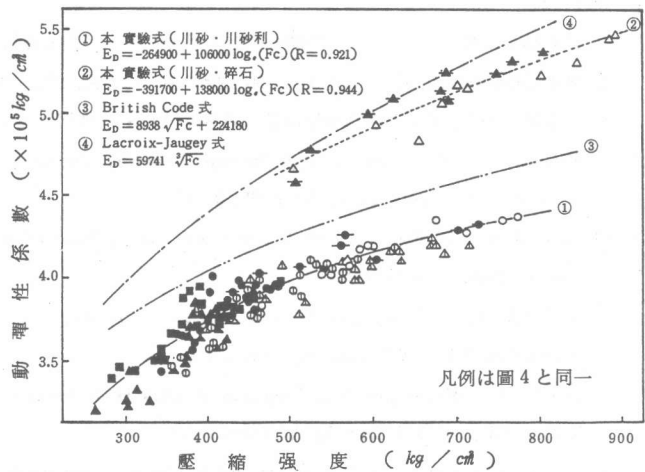


圖 5. 圧縮強度と動弾性係数の関係

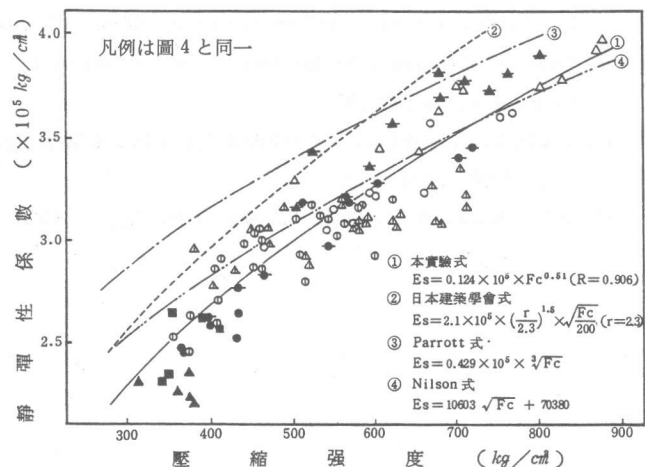


圖 6. 圧縮強度と静弾性係数の関係

2) 高強度流動化コンクリートの強度発現は早強化傾向をみせるし、引張強度の圧縮強度に対する比率は普通コンクリートに比べ小さい傾向を示している。また圧縮強度と動弾性係数・静弾性係数・反撥度関係などの工学的特性とその適用性を判定するためのもっと深い研究の必要性があると考えられる。

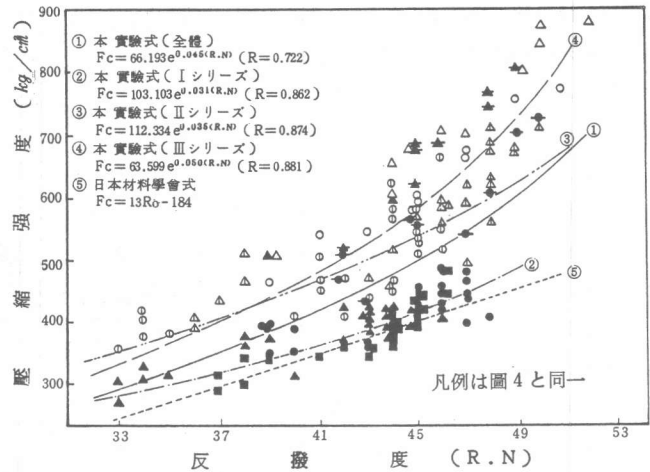


圖 7. 圧縮強度と反撥度の関係

参考文献

- 1) 日本建築學會, コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説, 昭 51, PP.145~192.
- 2) 日本建築學會, 流動化コンクリート施工指針案・同解説, 1983, PP.68~71.
- 3) 日本建築學會, 建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5 鉄筋コンクリート工事), 丸善, 1986, PP.445~536.
- 4) Parrott, L.J., Properties of High Strength Concrete, Technical Report NO.42, 417, Cement and Concrete Association, Wexham, Spring, 1969, PP.12~15.
- 5) State of the Art Report on High Strength Concrete, Reported by A.C.I. Committee 363, ACI Journal, July-August, 1984, PP.364~411.
- 6) Saul, A.G.A., A Comparison of the Compressive, Flexural, and Tensile Strength of Concrete, Cem. and Con. Association, TRA / 333, London, June, 1960.
- 7) Brooks, J.J., Wainwright, P.J., Properties of Ultra-High Strength Containing a Superplasticizer, Mag. of Con. Res., Vol.35, No 125, Dec. 1983, PP.205~213.
- 8) Comité Euro-International de Béton and Federation International de La Precontrainte, Model Code for Concrete Structures, Paris, 1978, PP.348~349.
- 9) Russell H.G. and others, High Strength Concrete, SP-87, A.C.I., Detroit, 1985.
- 10) British Standards Institution, The Structural Use of Concrete Part I, Design, Materials Workmanship, London CP 110, 1972, pp.154~155.
- 11) 高畑顯信ほか, 高強度コンクリートの諸性質に関する実験的研究(その1), 日本建築學會學術講演梗概集(北海道), 1986, PP.131~132.
- 12) 谷川恭雄ほか, 構造材料実験方法, 森北, 1980, PP.206~210.