

高強度コンクリートの諸性状に関する研究

PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE

近 藤 時 夫*

By Tokio KONDO

表-1 コンクリートの配合種別

配 合 別	細 骨 材	粗 骨 材	混 和 剤 減水剤 (WR) AE 剤 (AE)	目 標 空気量 (%)
No.1	川 砂	砕 石	WR (C×0.75%)	—
No.2	"	クリンカー	WR (C×0.75%)	—
No.3	クリンカー+川砂	"	WR (C×0.75%)	—
No.4	川 砂	砕 石	WR (C×0.75%)+ AE (C×0.003%)	2.5
No.5	"	"	WR (C×0.75%)+ AE (C×0.005%)	4.0

1. ま え が き

この数年来、高強度コンクリートへの関心が高まっております。新たに開発された高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの建設工事への適用がなされつつある。

わが国における減水剤にはきわめて多くの種類があるが、高強度コンクリートを造るのに適した減水剤はこれらすべてが適しているとはいえず、減水性、空気連行性、硬化遅延作用、塩化物含有の有無などからみて、多環アロマスルホン酸塩系減水剤およびナフタリンスルホン酸塩のホルマリン縮合物系減水剤が高強度コンクリートの製造に適していると考えられる。

これら高性能減水剤あるいはこれを用いた高強度コンクリートの諸性状については他にも報告がなされており、そのいくつかを参考文献に掲げた^{1)~6)}。

本研究は、高強度コンクリートの諸性状をさらに明らかにする目的で、高性能減水剤として主として多環アロマスルホン酸塩系減水剤を使用し、骨材として天然骨材および（または）高強度化に有効と考えられるセメントクリンカーを使用した高強度コンクリートならびに強度低下の欠点はあるが施工性、耐久性の向上への検討のために空気連行を行った高強度コンクリートについて、各種養生条件下での各種強度、変形に関する諸性質および耐久性ならびに温度、高性能減水剤添加方法が施工性に及ぼす影響について試験を行って、高強度コンクリートによる構造物の設計施工にあたっての問題点を検討した結果について論ずるものである。

2. 試験概要

(1) 実験項目

実験に用いたコンクリート種別は、骨材の種別、目標

空気連行量によって、表-1 に示す 5 種類である。

硬化した高強度コンクリートの諸性状に関する実験では、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、静および動弾性係数の 4 種類の養生条件下での材令 1 年までの諸特性についての試験、ポアソン比の標準養生の下での材令 1 年までの試験、2 種類の養生条件下で製造した 2 種類の高強度コンクリートの乾燥収縮、クリープの 3 種類の環境温度下における材令約 250 日にいたるまでの変形についての試験、4 種類のコンクリート種別について 2 種類の養生条件下における高強度コンクリートの凍結融解に対する抵抗性の試験を行った。

高強度コンクリートのワーカビリティに関する実験では、天然骨材を使用した空気連行と非連行のコンクリートについて、温度がワーカビリティに及ぼす影響などについての試験および高性能減水剤の添加方法の差がワーカビリティに及ぼす影響などについての試験を行った。

(2) 目標品質

本試験で目標とした高強度コンクリートの品質は、施工性を考慮して目標スランプを 10~13 cm とし、まず水セメント比を変化させて行った配合選定試験をもととして、現時点で実用可能と考えられる設計基準強度の目標を $\sigma_{ck}=800 \text{ kg/cm}^2$ (材令 28 日) として配合強度を $\sigma_r=850 \text{ kg/cm}^2$ とした。なお、空気連行コンクリートに対しては、同一目標強度とすると単位セメント量が過大となるため、配合強度を 800 kg/cm^2 とした。

* 正会員 工博 日本鉄道建設公団設計室長

表-2 セメントの物理試験結果

種類	比重	粒末度 (cm ² /g)	凝結時間 (時:分)		安定性	フロー (mm)	曲げ強度 (kg/cm ²)				圧縮強度 (kg/cm ²)			
			始発	終結			1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
日本社早強	3.14	3960	3:15	4:49	良	217	33.0	54.5	70.4	79.4	129	280	388	481
小野田社早強	3.12	4030	2:13	3:08	良	228	33.2	49.6	64.1	76.8	121	221	334	433
小野田社普通	3.16	3030	2:54	3:48	良	251	—	34.5	53.4	71.5	—	142	256	441

表-3 細粗骨材の物理試験結果

種類	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	粒 度 分 布 (残 留 率 %)										粗粒率
					25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	
鬼怒川砂	2.60	2.30	1660	—	—	—	—	—	1	9	16	36	70	92	2.24
クリンカー	2.83	2.46	1720	—	—	—	—	—	0	78	86	98	99	100	4.61
クリンカー、鬼怒川砂 (重量比 1:1 混合)	2.72	2.38	1850	—	—	—	—	—	0	39	43	65	84	96	3.27
鬼怒川玉砕	2.61	1.60	1580	61.5	0	5	30	70	100	—	—	—	—	—	6.80
クリンカー	2.68	2.77	1600	61.3	0	16	33	77	100	—	—	—	—	—	6.93

表-4 コンクリートの配合

配合種別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
			セメント	水	細骨材	粗骨材		
No.1	33.4	31	530	177	515	1151	13.7	1.4
No.2	37.5	35	400	150	662	1214	13.3	0.5
No.3	39.7	47	360	143	930	1033	9.9	0.8
No.4	30.9	28	580	179	455	1175	11.0	2.6
No.5	30.0	25	630	189	371	1117	11.0	3.7

(3) 使用材料

a) セメント

セメントは早強ポルトランドセメント（日本社製）を用いたが、ワーカビリティに関する実験には早強および普通ポルトランドセメント（ともに小野田社製）を使用した。セメントの物理試験の結果を表-2 に示す。

b) 骨 材

細粗骨材には、天然骨材として鬼怒川産の川砂および玉石砕石を、一部試験には反応性骨材を用いた高強度化のために人工骨材である早強セメントクリンカー（小野田社藤原工場製）を使用した。

クリンカー 細骨材は細粒のものが得られず、FM=4.61 で標準粒度範囲 から大きく外れるため、人工骨材の細骨材としてクリンカー（5 mm 以下）と鬼怒川産川砂（1.2 mm 以下）とを重量比で等量混合したものを使用した。

これら細粗骨材の物理試験結果を表-3 に示す。

c) 混 和 剤

高強度コンクリート用減水剤として、特に断らない限り多環アロマスルホン酸塩系の高性能減水剤（以下 A 剤という）を使用した。空気連行高強度コンクリートに対しては、さらにアニオン系の AE 剤を使用した。

(4) コンクリートの配合

単位セメント量を 500, 600, 700 kg（クリンカー粗骨材使用の場合には 350, 400 kg を追加）として水セメント比を変化させて行った配合選定試験の結果に基づき、示方配合を表-4 に示す 5 種類に定め、試験項目によって全種類または数種類を選択した。

(5) 養生方法

養生方法の差による影響を検討するために選定した養

生条件は、次の 4 種類である。

- ① 標準養生：温度 21°C、湿度 100% の恒温霧室中養生
- ② 気中養生：温度 21°C、湿度 80% の恒温恒湿室中養生
- ③ 蒸気養生：型わく打込み後 2 時間経過してから蒸気養生を開始し、2.5 時間で 75°C まで昇温して 5 時間保持したのち徐冷し、脱型後は気中養生
- ④ オートクレーブ養生：蒸気養生後 1 日経過してから、オートクレーブ養生室内で 2 時間で 180°C に昇温し 5 時間保持したのち徐冷し、その後は気中養生

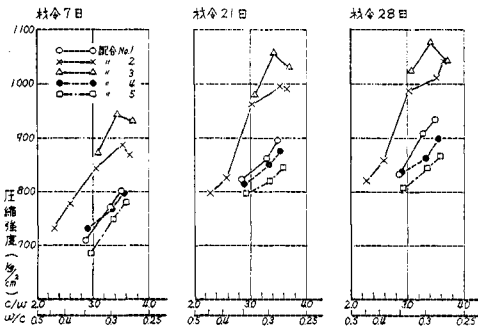
これら 4 種類の養生条件を試験項目によって全種類または数種類を選択した。

3. 硬化した高強度コンクリートの諸性状

(1) 配合選定試験

目標圧縮強度 $\sigma_r = 850 \text{ kg/cm}^2$ を得る目的で単位セメント量を変化して配合選定試験を行った。その結果得られた材令 7 日、21 日および 28 日における圧縮強度とセメント水比との関係は、図-1 のとおりである。

これによれば、圧縮強度とセメント水比との関係は一部を除いてほぼ直線と近似すると考えられ、Abrams の水セメント比説⁷⁾ がこの種の高強度コンクリートにも成



図一 圧縮強度とセメント水比との関係

り立つことが分かる。

また、クリンカー骨材使用コンクリートの圧縮強度は同一セメント水比の天然骨材使用のものより約 100 kg/cm² 大で、本試験では材令 28 日において最大 1077 kg/cm² が得られたが、クリンカー骨材には Ansatz (焼成窯착物) が混在してダスチングにより体積膨張してコンクリートを内部から破壊することがあり、これがクリンカー骨材使用上のひとつの問題点である。

(2) 各種強度

表一に示す 5 種類の配合種別について 4 種類の養生を行ったコンクリートの材令 1 年までの圧縮強度および

表一 圧縮強度

配合種別	養生条件	圧縮強度 (kg/cm ²)					
		1 日	3 日	7 日	28 日	180 日	365 日
No. 1	標準	493 (100)[57]	655 [76]	738 (100)[85]	864 (100)[100]	994 (100)[115]	1001 (100)[116]
	気中	—	—	694 (94)[81]	857 (99)[100]	921 (93)[107]	936 (94)[109]
	蒸気	522 (106)[68]	—	713 (97)[92]	773 (89)[100]	—	889 (89)[115]
	オートクレーブ	937 (190)[107]	—	893 (121)[102]	879 (102)[100]	—	899 (90)[102]
No. 2	標準	425 (100)[46]	685 [74]	802 (100)[87]	920 (100)[100]	1010 (100)[110]	1107 (100)[120]
	気中	—	—	797 (99)[90]	886 (96)[100]	964 (95)[109]	1006 (91)[114]
	蒸気	507 (119)[67]	—	652 (81)[86]	759 (83)[100]	—	852 (77)[112]
	オートクレーブ	674 (159)[87]	—	665 (83)[86]	771 (84)[100]	—	785 (71)[102]
No. 3	標準	355 [41]	609 [71]	708 (100)[83]	856 (100)[100]	968 (100)[113]	1035 (100)[121]
	気中	—	—	691 (98)[91]	763 (89)[100]	844 (87)[111]	880 (85)[115]
No. 4	標準	525 (100)[64]	699 [82]	713 (100)[88]	814 (100)[100]	922 (100)[113]	959 (100)[118]
	気中	—	—	708 (99)[89]	799 (98)[100]	866 (94)[108]	893 (93)[112]
	蒸気	544 (104)[68]	—	667 (94)[84]	798 (98)[100]	—	870 (91)[109]
	オートクレーブ	977 (186)[106]	—	926 (130)[101]	920 (113)[100]	—	935 (97)[102]
No. 5	標準	525 (100)[66]	657 [83]	714 (100)[90]	794 (100)[100]	892 (100)[112]	958 (100)[121]
	気中	—	—	702 (98)[91]	768 (97)[100]	826 (93)[108]	854 (89)[111]
	蒸気	543 (103)[71]	—	635 (89)[83]	765 (96)[100]	—	789 (82)[103]
	オートクレーブ	753 (143)[90]	—	859 (120)[102]	841 (106)[100]	—	853 (89)[101]

注：オートクレーブ養生の材令 1 日強度は、養生直後におけるものである。

表二 引張強度および曲げ強度

配合種別	養生条件	引張強度 (kg/cm ²)			曲げ強度 (kg/cm ²)		
		7 日	28 日	365 日	7 日	28 日	365 日
No. 1	標準	49.7 (100)[93]	53.4 (100)[100]	58.5 (100)[110]	80.2 (100)[85]	94.4 (100)[100]	110.9 (100)[117]
	気中	47.3 (95)[96]	49.4 (93)[100]	52.9 (90)[107]	71.5 (89)[100]	71.7 (76)[100]	84.2 (76)[117]
	蒸気	—	51.0 (96)[100]	51.6 (88)[101]	—	69.5 (74)[100]	82.6 (74)[119]
	オートクレーブ	—	58.8 (110)[100]	63.0 (108)[107]	—	78.5 (83)[100]	83.9 (76)[107]
No. 2	標準	53.7 (100)[84]	63.6 (100)[100]	64.8 (100)[102]	92.4 (100)[101]	91.5 (100)[100]	90.8 (100)[99]
	気中	48.6 (91)[95]	51.2 (81)[100]	58.9 (91)[115]	71.7 (78)[94]	76.5 (84)[100]	83.0 (91)[108]
	蒸気	—	52.3 (82)[100]	56.2 (87)[107]	—	77.0 (84)[100]	79.5 (88)[103]
	オートクレーブ	—	60.2 (95)[100]	63.2 (98)[105]	—	83.5 (91)[100]	79.1 (87)[95]
No. 3	標準	51.7 (100)[88]	58.9 (100)[100]	61.7 (100)[105]	87.7 (100)[103]	85.5 (100)[100]	95.0 (100)[111]
	気中	44.5 (86)[92]	48.4 (82)[100]	53.4 (86)[110]	64.0 (73)[86]	74.8 (87)[100]	80.2 (84)[107]
No. 4	標準	50.7 (100)[95]	53.1 (100)[100]	62.1 (100)[117]	90.1 (100)[95]	95.3 (100)[100]	96.1 (100)[101]
	気中	48.3 (95)[93]	51.7 (97)[100]	58.1 (94)[112]	65.5 (73)[92]	71.3 (75)[100]	78.0 (81)[109]
	蒸気	—	50.5 (95)[100]	55.5 (89)[110]	—	67.7 (71)[100]	78.5 (82)[116]
	オートクレーブ	—	58.9 (111)[100]	65.0 (105)[110]	—	86.1 (90)[100]	90.1 (94)[105]
No. 5	標準	48.0 (100)[99]	48.4 (100)[100]	52.1 (100)[108]	87.3 (100)[99]	88.0 (100)[100]	89.1 (100)[101]
	気中	45.6 (95)[95]	48.0 (99)[100]	56.7 (109)[118]	67.9 (78)[103]	66.2 (75)[100]	75.9 (85)[115]
	蒸気	—	47.4 (98)[100]	53.9 (103)[114]	—	65.6 (75)[100]	75.4 (85)[115]
	オートクレーブ	—	53.9 (111)[100]	56.9 (109)[106]	—	73.3 (83)[100]	79.1 (89)[108]

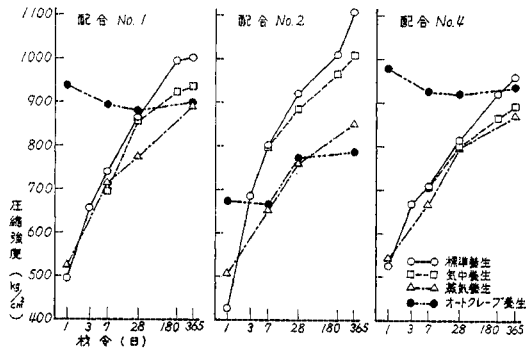


図-2 圧縮強度と材令との関係

引張・曲げ強度を、それぞれ表-5 および 第-6 に示す。表中の () は対応する標準養生の強度を 100 とした場合の相対値であり、[] は各養生ごとに材令 28 日の強度を 100 とした場合の相対値である。

a) 圧縮強度

配合種別 No. 1, No. 2 および No. 4 について、圧縮強度と材令との関係を 図-2 に示す。

表-5 および 図-2 によれば、圧縮強度は材令とともに増加し、標準養生を例にとると、材令 28 日から材令 1 年にかけて約 20% の増加率であるが、オートクレーブ養生においては、材令 28 日まではむしろ減少気味に推移し、その後は幾分増加しているがその増加率は非常に小さい。

養生条件別にみると、長期材令の圧縮強度増加率は、配合種別に関係なく標準養生がもっとも大きく、気中養生、蒸気養生、オートクレーブ養生の順に小さくなる。

標準養生と蒸気養生とを比べると、材令 1 日では蒸気養生の圧縮強度がわずかに大きいですが、材令 7 日では標準養生の方が大きく、この種の高強度コンクリートでは材令 1 日を問題にする場合以外は蒸気養生はあまり有利ではない。

AE コンクリートでも、材令 1 年の圧縮強度は材令 28 日のそれより標準養生で約 150 kg/cm²、気中養生で約 100 kg/cm² 増加しており、長期の強度増加が十分期待できる。

b) 引張強度

配合種別 No. 1, No. 2 および No. 4 について、引張強度と材令との関係を 図-3 に示す。

表-6 および 図-3 によれば、圧縮強度の場合と比べて傾向が幾分異なっており、材令とともに引張強度は増加しているが、材令 28 日から材令 1 年までの引張強度増加率は、配合種別により若干の差はあるものの養生条件にあまり関係なく約 10% 程度である。

各配合種別の材令ごとの圧縮強度と引張強度との比(ぜい度係数)は、普通強度のコンクリートでは 10~13 程度で、一般に圧縮強度が大きくなるにつれて大とな

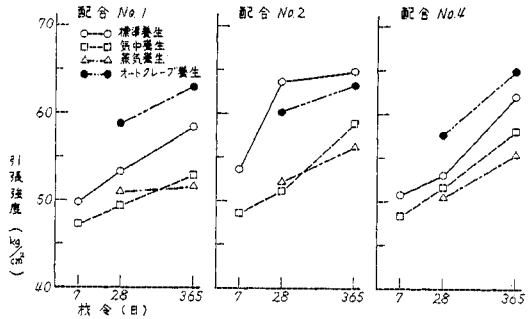


図-3 引張強度と材令との関係

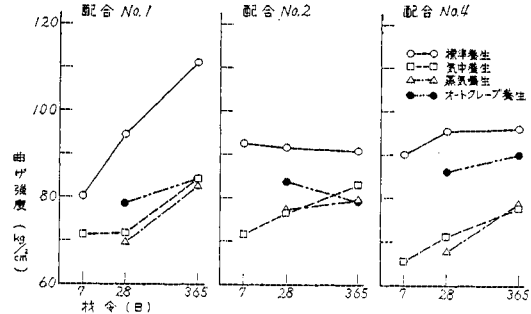


図-4 曲げ強度と材令との関係

る。本実験では、材令 7 日で 14~16, 材令 28 日で 15~17, 材令 1 年ではあまり増加せず 15~18 であって、養生方法ではオートクレーブ養生のものが小さい値を示している。

c) 曲げ強度

配合種別 No. 1, No. 2 および No. 4 について、曲げ強度と材令との関係を 図-4 に示す。

表-6 および 図-4 によれば、各配合種別、養生条件ごとに材令による曲げ強度増進の傾向は引張強度と類似している。ただし、引張強度の場合と異なり、曲げ強度はオートクレーブ養生を除いて配合種別 No. 1 が材令 28 日から材令 1 年にかけて 17~19% の増加率を示しているが、他の配合種別のものはほとんどが 10% 以下で、特に配合種別 No. 2 が小さい。オートクレーブ養生では、材令 28 日から材令 1 年までの曲げ強度増加率が他の養生のものより小さい傾向が認められる。

配合種別および材令にかかわらず、標準養生したものが他の養生のものより大きい曲げ強度を示している。

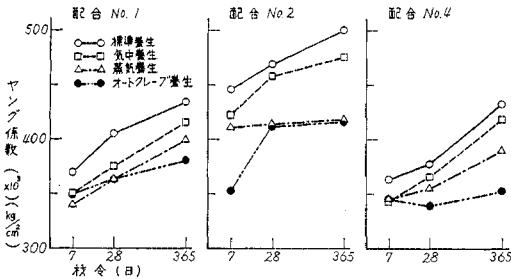
普通強度のコンクリートでは圧縮強度と曲げ強度との比は 5~8 であるが、この種の高強度コンクリートでは 8~12 ではば 50% 大きい数値である。しかし、材令によるこの比に顕著な傾向は認められない。

(3) 弾性係数

表-1 に示す 5 種類の配合種別について 4 種類の養生を行ったコンクリートの材令 1 年までの静および動弾性

表一7 静弾性係数および動弾性係数

配合種別	養生条件	静弾性係数 (×10 ³)(kg/cm ²)			動弾性係数 (×10 ³)(kg/cm ²)		
		7日	28日	365日	7日	28日	365日
No. 1	標準	369 (100)[91]	405 (100)[100]	434 (100)[107]	439 (100)[92]	476 (100)[100]	501 (100)[105]
	気中	350 (95)[93]	375 (93)[100]	416 (96)[111]	418 (95)[97]	433 (91)[100]	458 (91)[106]
	蒸気	339 (92)[93]	363 (90)[100]	399 (92)[110]	—	445 (93)[100]	449 (90)[101]
	オートクレーブ	349 (95)[96]	363 (90)[100]	381 (88)[105]	—	416 (87)[100]	420 (84)[101]
No. 2	標準	447 (100)[95]	469 (100)[100]	501 (100)[107]	486 (100)[93]	522 (100)[100]	534 (100)[102]
	気中	422 (94)[92]	458 (98)[100]	476 (95)[104]	438 (90)[96]	458 (88)[100]	456 (85)[100]
	蒸気	411 (92)[99]	414 (88)[100]	418 (83)[101]	—	485 (93)[100]	478 (90)[99]
	オートクレーブ	353 (79)[86]	412 (88)[100]	417 (83)[101]	—	459 (88)[100]	465 (87)[101]
No. 3	標準	447 (100)[93]	482 (100)[100]	504 (100)[105]	503 (100)[96]	523 (100)[100]	543 (100)[104]
	気中	426 (95)[96]	446 (93)[100]	466 (92)[104]	468 (93)[98]	478 (91)[100]	504 (93)[105]
No. 4	標準	364 (100)[96]	378 (100)[100]	433 (100)[115]	435 (100)[95]	459 (100)[100]	498 (100)[108]
	気中	343 (94)[93]	367 (97)[100]	419 (97)[114]	406 (93)[96]	424 (92)[100]	472 (95)[111]
	蒸気	345 (95)[97]	356 (94)[100]	390 (90)[110]	—	443 (97)[100]	454 (91)[102]
	オートクレーブ	345 (95)[101]	340 (90)[100]	354 (82)[104]	—	413 (90)[100]	424 (85)[103]
No. 5	標準	344 (100)[95]	364 (100)[100]	410 (100)[113]	410 (100)[96]	427 (100)[100]	456 (100)[107]
	気中	336 (98)[95]	355 (98)[100]	394 (96)[111]	392 (96)[95]	413 (97)[100]	504 (111)[122]
	蒸気	321 (93)[98]	326 (90)[100]	372 (91)[114]	—	406 (95)[100]	423 (93)[104]
	オートクレーブ	340 (99)[103]	330 (91)[100]	347 (85)[105]	—	386 (90)[100]	413 (91)[107]



図一5 ヤング係数と材令との関係

係数, ポアソン比に関する試験 (ただし, ポアソン比については標準養生のみ) を行った. その結果のうち, 静および動弾性係数の試験結果を表一7に示す. 表中の()および[]の意味は表一5と同じである.

a) ヤング係数

ヤング係数は圧縮強度の1/3点の割線ヤング係数として求めた.

配合種別 No. 1, No. 2 および No. 4 について, ヤング係数と材令との関係を 図一5 に示す.

表一7 および 図一5 によれば, ヤング係数は各配合種別とも標準養生の場合が最大で気中養生, 蒸気養生, オートクレーブ養生の順に低下するが, 材令7日における差は一般に小さい.

配合種別によるヤング係数を比べると, クリンカー骨材使用の No. 3 が最大であり, AE コンクリートでは連行空気量の増加につれて小さい値となっている.

オートクレーブ養生高強度コンクリートのヤング係数が小さいことは他にも指摘がされている⁴⁾が, 本実験によれば, クリンカー骨材使用のオートクレーブ養生の場合にヤング係数の長期材令における増加率が小さく, ま

た, 他の配合種別においてもオートクレーブ養生の場合には標準養生の場合に比して全材令にわたってヤング係数の低下がみられた. 一般に, オートクレーブ養生コンクリートには微細で緻密な水和生成物を生ずるといわれているが, ヤング係数が低いことに加えて後述の凍結融解に対する抵抗性が劣ることから, その組織は必ずしも緻密であるとは結論できず, 今後の一つの検討課題である.

材令28日から材令1年にかけて, 各配合種別ともヤング係数は増加しているが, その増加率はオートクレーブ養生のものが最も小さく5%以内である. また, 配合種別では, 空気連行した No. 4, No. 5 のヤング係数の増加率が大きく, オートクレーブ養生のものを除けば10~15%の伸びである.

クリンカー骨材使用のコンクリートにおいて高いヤング係数が得られたことは興味深い, その理由がクリンカー自体のヤング係数によるものかクリンカーとセメントペーストとの結合の良好さによるものかは今後の検討が必要と思われる.

b) ポアソン比

標準養生を行った5種類の配合種別について, 材令28日および材令1年においてポアソン比を求めた.

圧縮強度の1/3以下の応力レベルにおけるポアソン比は, 各配合種別とも0.20~0.25で材令による差は顕著ではなく, この値は普通強度レベルのコンクリートに比してやや大きい. また, 配合種別による差は明確ではない.

配合種別 No. 1 の各応力レベルにおけるポアソン比を 図一6 に例示している.

c) 動弾性係数

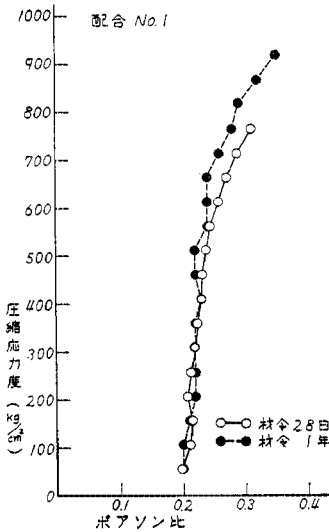


図-6 各応力レベルにおけるポアソン比

共振法によって求めた動弾性係数を表-7に示す。

表-7によれば、配合種別および養生条件が動弾性係数に及ぼす影響は、ヤング係数における場合と同様である。また、材令に伴う動弾性係数の伸び率は、一般にヤング係数の伸び率よりやや小さい傾向がみられる。

動弾性係数に対するヤング係数の比は、長期材令になるに従って低下する傾向

にあり、クリンカー骨材使用のコンクリートではこの比が小さいが、その他の配合種別のコンクリートでは材令7日でほぼ1.2、材令1年でほぼ1.1~1.2である。養生条件によるこの比の差は顕著ではない。

(4) 乾燥収縮およびクリープ

表-1に示す5種類の配合種別のうちNo. 1およびNo. 4について標準養生およびオートクレーブ養生を行ったコンクリート供試体(10×10×42cm)を湿度100%、80%および50%の環境条件下(気温はいずれも21°C)に静置して、材令約250日までの乾燥収縮およびクリープによる変形量をフーゲンベルガー型ひずみ計で測定した。なお、標準養生の供試体は材令7日まで21°Cの霧室中に、オートクレーブ養生のものは養生終了後材令7日まで温度21°C、湿度80%の恒温恒湿室中に保管した。

a) 乾燥収縮

材令7日における測定値を原点とした材令による乾燥

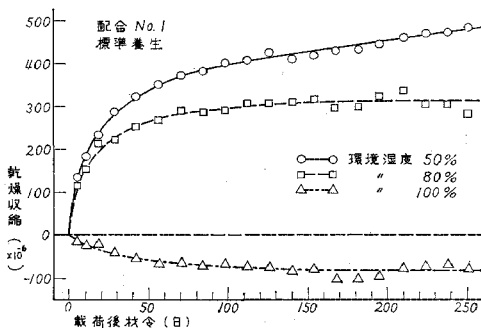


図-7 乾燥収縮

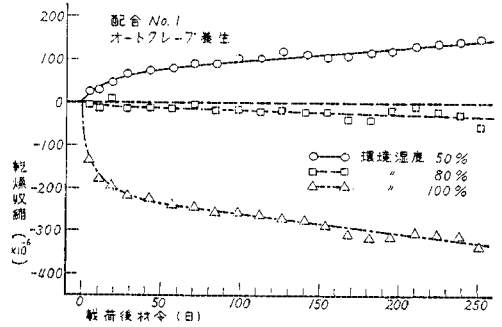


図-8 乾燥収縮

収縮のうち、配合種別 No. 1 を養生別に図示したものが図-7 および 図-8 である。

測定結果からみられる特徴的な諸点を述べれば、同一配合コンクリートにおいても環境湿度の差によって乾燥収縮は異なり、湿度 100% ではすべて膨張を示した。

同一配合でも、オートクレーブ養生したコンクリートの乾燥収縮は標準養生したものと比べるとかなり小さい。

環境湿度、環境湿度および養生条件が同一の場合には、配合種別 No. 1、と No. 4 との間に乾燥収縮の差は認められない。

b) クリープ

クリープ性状を調べるための供試体として 10×10×42 cm の角柱供試体の中央に軸方向に φ30 mm の薄鉄板製 シース を埋め込み所定の養生ののち φ24 mm の P C 鋼棒で破壊強度の 15% および 30% の圧縮応力を導入したものを、所定の環境湿度の養生室に静置してクリープの測定を行った。なお、応力導入後 28 日目および約 230 日目に応力低下補正のため再導入を行った。

クリープの測定結果に応力再導入および乾燥収縮による変形量の補正計算を行ってクリープひずみを求めたが、そのうち配合種別 No. 1 についてクリープと材令との関係を環境湿度別に図示したものが図-9~11 である。また、各材令のクリープ係数を表-8 に示す。

試験結果によれば、天然骨材コンクリート No. 1 と

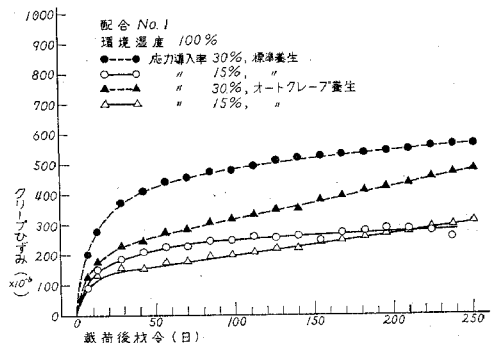


図-9 クリープひずみの経時変化

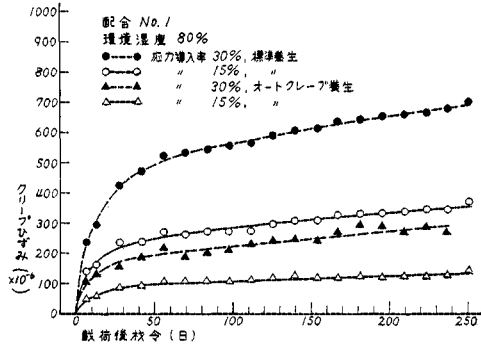


図-10 クリープひずみの経時変化

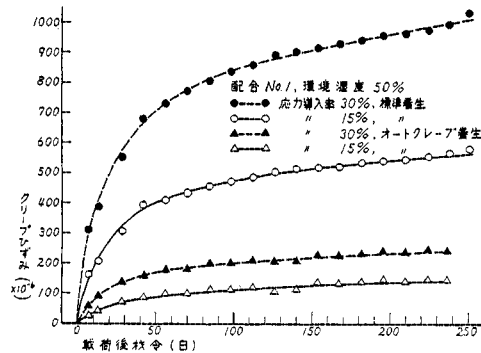


図-11 クリープひずみの経時変化

天然骨材 AE コンクリート No. 4 とでは、クリープひずみおよびクリープ係数は環境湿度が同一ならばほぼ等しい。また、養生条件別にみると、同一湿度の下ではオートクレーブ養生した場合のクリープひずみおよびクリープ係数は標準養生の場合より小さく、この傾向は環境湿度が低いほど顕著である。

同一配合、同一養生条件のコンクリートでも、環境湿度の変化によってクリープひずみおよびクリープ係数が大きく異なる。荷重後材令約 250 日におけるクリープ係数は、環境湿度 100% で標準養生が約 1.0、オートクレーブ養生が約 0.8、80% でそれぞれ約 1.4 および約 0.4、50% でそれぞれ約 2.0 および約 0.4 であって、オートクレーブ養生では環境湿度が低くなるとクリ

表-8 クリープ係数

環境湿度 (%)	荷重後材令 (日)	配合種別 No. 1				配合種別 No. 4			
		標準養生		オートクレーブ養生		標準養生		オートクレーブ養生	
応力導入率		15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%
100	28	0.58	0.68	0.34	0.36	0.82	0.68	0.63	0.46
	56	0.71	0.80	0.38	0.42	0.95	0.79	0.69	0.53
	84	0.77	0.86	0.43	0.48	0.99	0.83	0.75	0.58
	112	0.81	0.89	0.46	0.52	1.01	0.85	0.80	0.63
	140	0.83	0.94	0.48	0.55	1.05	0.88	0.84	0.66
	168	0.85	0.97	0.54	0.61	1.11	0.91	0.90	0.71
	196	0.90	0.99	0.59	0.66	1.13	0.93	0.95	0.76
	224	0.87	1.01	0.64	0.71	1.11	0.93	1.01	0.78
80	28	0.83	0.81	0.22	0.23	0.98	0.73	0.32	0.22
	56	0.95	1.00	0.28	0.32	1.22	0.93	0.35	0.26
	84	0.96	1.04	0.28	0.30	1.26	0.98	0.36	0.28
	112	0.98	1.08	0.29	0.34	1.30	1.03	0.37	0.30
	140	1.09	1.16	0.33	0.37	1.38	1.10	0.40	0.32
	168	1.15	1.21	0.31	0.40	1.45	1.16	0.41	0.34
	196	1.17	1.25	0.32	0.43	1.48	1.19	0.41	0.35
	224	1.22	1.27	0.33	0.43	1.54	1.20	0.42	0.37
50	28	1.18	0.99	0.20	0.22	1.12	1.00	0.19	0.19
	56	1.56	1.31	0.28	0.28	1.53	1.20	0.25	0.26
	84	1.74	1.44	0.33	0.31	1.68	1.31	0.26	0.28
	112	1.85	1.54	0.35	0.33	1.78	1.39	0.26	0.29
	140	1.97	1.62	0.33	0.33	1.89	1.46	0.27	0.31
	168	1.98	1.66	0.38	0.35	1.95	1.51	0.28	0.33
	196	2.06	1.71	0.42	0.38	1.99	1.54	0.30	0.35
	224	2.11	1.74	0.42	0.38	2.01	1.56	0.30	0.35
251	2.21	1.85	0.43	0.39	2.09	1.64	0.30	0.37	

ープ係数が小さくなる現象を示している。

(5) 凍結融解に対する抵抗性

配合種別 No. 1, No. 2, No. 4 および No. 5 の 4 種類のコンクリートをそれぞれ標準養生およびオートクレーブ養生して、これを ASTM C 290 に準じて凍結融解に対する抵抗性を試験した。その結果を表-9, 10 および 図-12, 13 に示す。

これらの図表からみられるように、標準養生を行ったいずれの配合種別のコンクリートも満足すべき抵抗性を示しているが、オートクレーブ養生を行った場合には明らかに抵抗性の劣化を示し、しかも空気連行のない

表-9 30 サイクルごとの動弾性係数百分率

養生条件	配合種別	試験前の動弾性係数 (x10^4) (kg/cm^2)	動弾性係数百分率 (%)									
			30 サイクル	60	90	120	150	180	210	240	270	300
標準養生	No. 1	478	99	99	98	99	98	98	98	98	98	97
	No. 2	523	100	101	100	100	101	101	101	101	101	101
	No. 4	458	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
	No. 5	426	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
オートクレーブ養生	No. 1	416	91	88	78	70	61	52	38	測定不能	—	—
	No. 2	460	92	88	81	68	53	33	測定不能	—	—	—
	No. 4	403	98	96	95	94	94	93	92	91	91	90
	No. 5	369	98	98	96	96	96	95	94	93	92	91

表-10 30 サイクルごとの重量変化率

養生条件	配合種別	試験前の 供試体重量 (kg)	重量変化率 (%)										
			30 サイクル	60	90	120	150	180	210	240	270	300	
標準養生	No. 1	10.242	-0.1	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0
	No. 2	10.440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	No. 4	10.142	-0.1	-0.1	0	0	-0.1	0	-0.1	0	-0.1	0	
	No. 5	9.964	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	
オートクレーブ養生	No. 1	9.908	+2.4	+2.7	+2.8	+2.7	+2.5	+2.2	-1.9	中止	--	--	
	No. 2	10.099	+2.2	+2.6	+2.6	+2.8	+2.8	+2.8	+2.6	+1.6	中止	--	
	No. 4	9.956	+2.0	+2.4	+2.5	+2.5	+2.4	+2.4	+2.3	+2.3	+2.1	+2.0	
	No. 5	9.690	+2.4	+2.7	+2.9	+2.9	+2.8	+2.8	+2.7	+2.6	+2.4	+2.4	

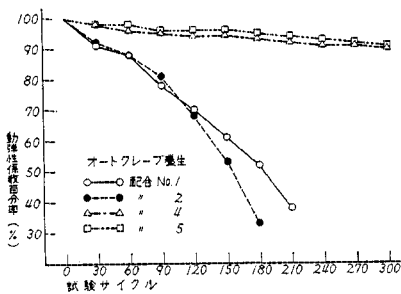


図-12 試験サイクルによる動弾性係数百分率の変化

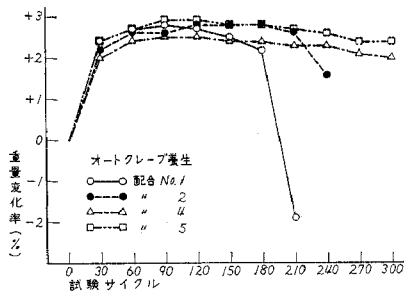


図-13 試験サイクルによる供試体重量の変化率

No. 1 および No. 2 は大幅な相対動弾性係数の低下を示して普通強度のプレーンコンクリートとほぼ同等かそれ以下の抵抗性と判断される。しかし、2.5 ないし 4% の空気を連行させた No. 4 および No. 5 は大幅に抵抗性が改善され、標準養生のものよりは劣るが相対動弾性係数の低下は 300 サイクルで約 10% であって、ほぼ普通強度の AE コンクリートなみの抵抗性を示している。

また、標準養生したコンクリートはいずれも表面スケールリングがほとんどないのに対し、オートクレーブ養生したものはいずれの配合種別のコンクリートも表面がかなりスケールリングされているにもかかわらず、吸水により 2~3% の重量増加を示している。この吸水による重量増加は大部分が 30 サイクルまでに起こっており、また、表面のスケールリングは空気量の少ないものほど大で

ある。このことは、ヤング係数のところでも述べたように、オートクレーブ養生したコンクリートの組織が必ずしも緻密であるとは限らないことを示唆するものと思われる。これは、オートクレーブ養生によって内部構造に強度までは影響しない程度のみわめて微細なひびわれが発生し、これによってヤング係数や凍結融解に対する抵抗性の低下をきたすためと考えられ、今後の研究が必要と思われる。

4. 高強度コンクリートのワーカビリティ

高性能減水剤を使用した高強度コンクリートのワーカビリティは普通強度のコンクリートより経時変化の大きいことが指摘されており⁸⁾、このことが施工上の問題点の一つになっている。

この問題に対しては、現在のところ適切な対策に乏しく、打設時のスランプ低下を見越して減水剤添加量を多くする方法や、スランプが低下したコンクリートへの減水剤添加によるリテンパリングの方法がとられている。

ワーカビリティの経時変化に影響を及ぼす要因として、セメントの種類、減水剤の種類・添加量・添加方法、コンクリートの配合・空気量、温度、湿度などが考えられるが、これらのうち、温度による影響および減水剤の添加方法について行った試験について述べる。

(1) 温度の影響

普通強度のコンクリートは温度が高くなるとスランプが低下するが、高性能減水剤を使用した高強度コンクリートにおいて早強セメントを用いた場合に、温度上昇につれてスランプが増大するという逆の現象が認められたので、この究明のためにモルタルによる基本的な実験を行い、次にコンクリートが温度によってそのコンシステンシーにどのような影響をうけるかについて試験を行った。

a) モルタルのコンシステンシー

試験に使用した 細骨材は 鬼怒川産川砂 (比重 2.60,

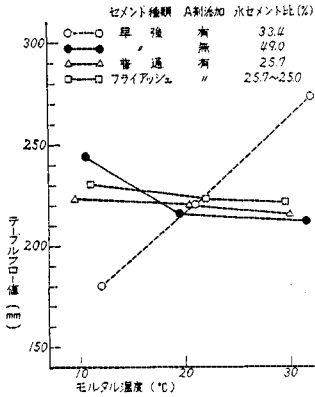


図-14 セメントの種類とA剤添加の有無によるモルタルの流動性比較

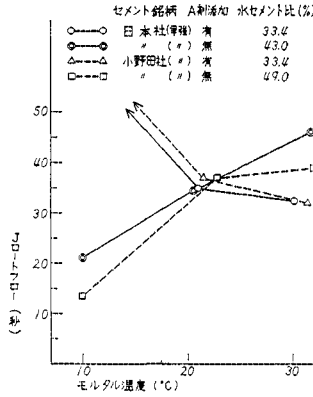


図-15 セメント銘柄によるモルタルの流動性比較

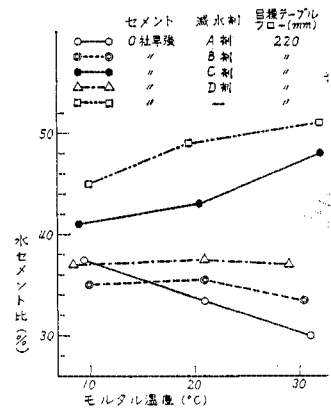


図-16 減水剤の差によるモルタルの流動性比較

FM 2.73) である。セメント砂比は高強度コンクリート中のモルタルとほぼ等しい 1.0 とした。特に断らない限り減水剤は A 剤でその添加量はセメント重量の 0.75 % である。

① セメントの種類による影響

モルタル温度を 30°C, 20°C, 10°C とした場合のセメントの種類と A 剤添加の有無によるモルタルのコンシステンシーの変化を測定した。

セメントは、早強セメントと普通セメント（ともに小野田社製、物性を表-2 に示す）で、早強セメントについては A 剤添加と無添加の 2 種類とし、さらにセメントの代りにフライアッシュを用いた比較試験も行った。

テーブルフロー値 (JIS R 5201 に準じる) は各配合ごとに 20°C で 220 mm を基準とし、この水セメント比を一定として温度変化によるフロー値の変化を測定した。

試験結果は、図-14 に示すように、早強セメントに A 剤を添加したモルタルのみが温度上昇に比例してフローが大きくなり、他のモルタルと比べて逆の傾向を示している。しかも、この増加率は非常に大きく、1 deg の上昇によってフローが 4.7 mm 大きくなっている。

② セメントの銘柄による影響

① に述べた現象は早強セメントと A 剤との組合せのみに認められたので、次にセメントの銘柄がモルタルのコンシステンシーに及ぼす影響を調べるために 30°C, 20°C, 10°C のモルタルについて試験を行った。

セメントは日本社製と小野田社製の早強セメントを使用した。

流動性の測定方法として J ロートによる流下時間によることとし、20°C のモルタルの流下時間 35 秒の時の水セメント比を各配合ごとに一定とした。

試験結果は、図-15 に示すように、プレーンモルタルでは温度降下につれて流下時間が短くなるのに対し、

A 剤添加モルタルでは両銘柄とも同じ傾向を示し、温度降下につれて流下時間が長くなり 10°C では流下しない状態であった。

③ 減水剤の種類による影響

①, ② の試験は A 剤を添加した場合のものであるが、他の減水剤を添加したモルタルがどのようなコンシステンシーの変化を示すかを調べるため、A 剤のほかにナフタリンスルホン酸塩のホルマリン縮合物系減水剤 (B 剤という)、ポリオール系非空気連行性減水剤 (C 剤という)、高縮合トリアジン系化合物 (D 剤という) をそれぞれ添加した 30°C, 20°C, 10°C のモルタルおよび比較のためのプレーンモルタルについて流動性比較試験を行った。

セメントは早強セメント (小野田社製) を使用した。各減水剤の添加量は、B 剤はセメント重量の 1.2%, C 剤はセメント 100 kg 当り 250 cc, D 剤はセメント 100 kg 当り 3000 cc である。

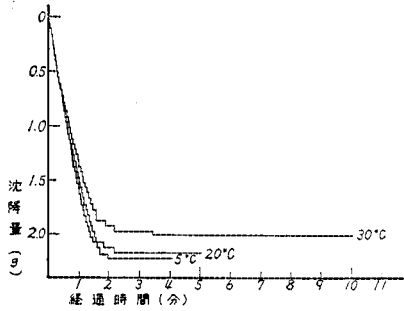
試験は、テーブルフロー値が 220 mm になるようにして、水セメント比の変化を調べる方法をとった。

試験結果は、図-16 に示すように、温度上昇につれて C 剤添加モルタル、D 剤添加モルタル、プレーンモルタルでは水セメント比が不変ないし増大するのに対し、A 剤添加モルタル、B 剤添加モルタルでは水セメント比が減少する傾向、すなわちコンシステンシーがよくなる傾向を示している。

④ その他

①~③ にみられる特異な性状をさらに検討するため、早強セメントに A 剤を添加して水に懸濁させた 30°C, 20°C, 5°C の分散系についてのセジメントグラフによる分散性能試験、および①で行ったのと同じ材料 (セメントは早強のみ)、配合による 30°C, 20°C, 10°C のモルタルについての断熱温度上昇試験を行った。

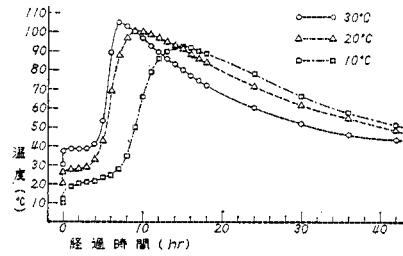
セジメントグラフによる分散性能試験によれば、一般



図一17 セジメントグラフ

には分散系の温度が高くなれば沈降量が多くなるのに対し、この分散系では高温になるにつれて沈降量は減少し、しかも 20°C から 30°C になった場合の沈降量の減少傾向が顕著である (図一17 参照)。

断熱温度上昇試験は、適当な微小熱量計がなかったた



図一18 モルタルの断熱温度上昇

め、内側寸法 $\phi 12 \times 29$ cm の魔法びんを使用して行った。このため、セメントと水が接触してから約 10 分間は水和熱の測定はできなかったが、測定結果からは通常と異なる傾向は認められなかった (図一18 参照)。

これらの結果から、早強セメントに A 剤を添加した場合に見られる特殊性状は、減水剤の分子構造による影響

表一11 コンクリートの配合

目標温度 (°C)	配合種別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
						減水剤	AE 剤			
30	No. 1	33.4	36	434	145	0.75	—	10.5	1.7	30.7
	No. 4	30.9	33	485	150	0.75	0.003	11.2	3.3	30.8
20	No. 1	33.4	31	539	180	0.75	—	12.2	1.8	20.5
	No. 4	30.9	28	582	180	0.75	0.003	11.5	2.5	21.0
10	No. 1	33.4	31	599	200	0.75	—	11.8	1.9	12.8
	No. 4	30.9	28	680	210	0.75	0.003	12.5	3.5	13.8

表一12 ワークビリティの経時変化および強度

目標温度 (°C)	配合種別	測定種別	練りませ後経過時間 (分)					圧縮強度 (kg/cm ²)			引張強度 (kg/cm ²)	
			0	15	30	45	60	直後採集		60分間アジテート後採集		
								材令28日	材令7日	材令28日	材令7日	
												材令28日
30	No. 1	スランブ (cm)	7.5	3.2	1.3	—	0.2	816 (100)	759	898 (110)	45.1	52.8
		V F 値 (cm)	5.0	—	5.1	—	3.9					
		空気量 (%)	1.5	—	1.9	—	2.1					
		温度 (°C)	30.5	29.8	29.5	—	29.5					
30	No. 4	スランブ (cm)	10.8	7.4	6.5	5.0	3.7	903 (100)	833	952 (105)	50.0	56.9
		V F 値 (cm)	7.4	—	4.6	—	4.6					
		空気量 (%)	2.9	—	1.9	—	2.2					
		温度 (°C)	30.6	29.5	29.7	29.3	29.7					
20	No. 4	スランブ (cm)	11.8	10.0	9.7	9.1	8.4	812 (100)	717	885 (109)	49.8	53.7
		V F 値 (cm)	10.7	—	7.3	—	6.7					
		空気量 (%)	1.9	—	1.6	—	1.5					
		温度 (°C)	21.0	20.0	20.0	20.0	20.0					
10	No. 1	スランブ (cm)	12.5	10.1	9.2	8.9	7.5	765 (100)	727	840 (110)	45.5	49.2
		V F 値 (cm)	7.9	—	7.3	—	7.1					
		空気量 (%)	1.6	—	1.8	—	1.7					
		温度 (°C)	13.0	13.0	13.1	13.1	13.2					
10	No. 4	スランブ (cm)	13.2	11.6	10.4	10.1	8.5	815 (100)	741	891 (109)	47.0	55.7
		V F 値 (cm)	12.5	—	8.2	—	7.0					
		空気量 (%)	3.0	—	1.9	—	1.8					
		温度 (°C)	14.0	14.0	14.2	13.5	13.5					

や拡散二重電位層、 ζ 電位に関する界面科学的な面からの影響などが考えられ、今後この方面の研究が望まれる。

b) コンクリートのワーカビリティ

スランプ 10~13 cm 程度で天然骨材使用の AE 剤添加と無添加の 2 種類のコンクリートについて、目標温度 30°C, 20°C, 10°C の下で時間経過につれてワーカビリティがどのような変化をするかを 60 分間経過まで測定した。

材料として、早強セメント（小野田社製）、鬼怒川産玉石砕石（最大寸法 20 mm）、鬼怒川産川砂、減水剤 A 剤を使用し、AE コンクリートにはさらにアニオン系 AE 剤を使用した。

配合は表-11 のとおりである。

練りまぜは、強制練りミキサ（容量 100 l）にまず細骨材とセメントを投入して 15 秒間空練りしたのち A 剤（および AE 剤）を混ぜた水を加え、続いて粗骨材を投入したあと 1 分 30 秒間練りまぜた。練りまぜ終了後は重力式ミキサにコンクリートを移して 4 rpm（外周速度 0.175 m/sec）でアジテートし、所定の時間経過ごとにスランプ値、VF 値（VF 試験器による下がり量）、コンクリート温度および空気量を測定した。さらに、練りまぜ直後および 60 分経過時に供試体を採取して標準養生を行い、圧縮強度および引張強度試験を行った。

試験結果は表-12 のとおりで、コンクリート温度が高いほどスランプの経時変化は大きく、また、AE コンクリートのスランプ低下は AE 剤無添加コンクリートより小さい。

特異な性状として、A 剤の添加量が同一のコンクリートでも、温度が上昇し特に 30°C にもなるとダイラタンシー的挙動が著しくなり、スランプコーン引き上げ直後から数秒ないし十数秒間コンクリートの流動がみられた。この場合のスランプ値の測定時期としては、配合の異なる数種類のコンクリートについて測ったスランプの経時変化の連続性からみて、スランプコーンの引き上げ直後が適当と思われる。

練りまぜ直後採取のコンクリートの圧縮強度と 60 分間アジテート後採取のそれとを比較すると、同一配合であるにもかかわらず後者の方が大きく、最大 9% 大き

い値となった。

なお、同一配合のコンクリートでも温度が上がると次第に粗々しくなり、表-11 の 30°C の欄に見られるように、同一水セメント比でかつプラスチックでワーカブルなコンクリートにするためには、細骨材率を大きくしなければならない。

(2) 高性能減水剤の添加方法

同一配合の高強度コンクリートにおいて、減水剤の添加方法を変えると、コンクリートの性状に差のあることが認められたので、2 種類の添加方法について配合、ワーカビリティおよび強度に関する試験を行った。

高性能減水剤の添加方法として、次の 2 種類を用いた。

- ① 同時添加：減水剤（および AE 剤）を混ぜた水を細骨材とセメントとを空練りしたものに加え、続いて粗骨材を投入して 1 分 30 秒間練りまぜる方法
- ② 後添加：細骨材とセメントとを空練りしたものに水（および AE 剤）を加え、続いて粗骨材を投入して 30 秒間練りまぜて最後に減水剤を加えて 1 分間練りまぜる方法

a) 同時添加と後添加がコンクリートの配合に及ぼす影響

試験に使用した材料は (1)-b) と同じである。

試験は目標温度 30°C, 20°C, 10°C の場合にスランプ 10~13 cm でかつ必要なプラスチックを有する高強度コンクリートの配合が同時添加と後添加とでどのように異なるかを調べた。

配合種別は、天然骨材使用コンクリート (No. 1) と天然骨材使用 AE コンクリート (No. 4) の 2 種類である。

配合設計を行った場合の水セメント比、細骨材率、材料単位量などは、同時添加については表-11、後添加については表-13 のとおりである。

表-11 および表-13 からの考察として、同一温度、同一配合種別、同一水セメント比でかつ同一スランプとした場合、後添加の場合には同時添加より単位セメント量が No. 1 で 54~60 kg/m³、No. 4 で 42~59 kg/m³ 少なく、また、単位水量がそれぞれ 18~20 kg/m³、13~

表-13 コンクリートの配合（減水剤後添加）

目標温度 (°C)	配合種別	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
						減水剤	AE 剤			
30	No. 1	33.4	31	374	125	0.75	—	7.5	1.5	30.5
	No. 4	30.9	33	443	137	0.75	0.003	10.8	2.9	30.6
20	No. 4	30.9	28	531	164	0.75	0.003	11.8	1.9	21.0
10	No. 1	33.4	31	545	182	0.75	—	12.5	1.6	13.0
	No. 4	30.9	28	621	192	0.75	0.003	13.2	3.0	14.0

表-14 ワーカビリチーの経時変化および強度（減水剤後添加）

目標温度 (°C)	配合種別	測定種別	練りませ後経過時間 (分)					圧縮強度 (kg/cm ²)			引張強度 (kg/cm ²)	
			0	15	30	45	60	直後採集	60分間アジテート後採集		60分間アジテート後採集	
								材令28日	材令7日	材令28日	材令7日	材令28日
30	No. 1	スランプ (cm)	10.5	7.7	6.0	3.4	1.4	848 (100)	806	904 (107)	46.0	51.4
		V F 値 (cm)	9.2	—	6.2	—	4.4					
		空気量 (%)	1.7	—	1.7	—	2.1					
		温度 (°C)	30.7	30.5	30.2	30.0	29.8					
	No. 4	スランプ (cm)	11.2	9.5	8.2	6.9	4.9	892 (100)	817	934 (105)	51.6	55.9
		V F 値 (cm)	8.1	—	6.5	—	5.9					
		空気量 (%)	3.3	—	2.3	—	2.4					
		温度 (°C)	30.8	30.3	30.6	30.5	30.5					
20	No. 1	スランプ (cm)	12.2	9.8	9.5	7.0	7.0	785 (100)	637	804 (102)	46.9	49.9
		V F 値 (cm)	8.9	—	8.3	—	6.9					
		空気量 (%)	1.8	—	2.0	—	2.1					
		温度 (°C)	20.5	20.7	21.0	21.0	21.0					
	No. 4	スランプ (cm)	11.5	9.5	9.8	6.6	6.0	841 (100)	714	834 (99)	48.6	53.6
		V F 値 (cm)	11.2	—	7.5	—	7.0					
		空気量 (%)	2.5	—	2.1	—	2.0					
		温度 (°C)	21.0	21.0	21.2	22.0	21.0					
10	No. 1	スランプ (cm)	11.8	9.5	7.9	6.9	7.0	770 (100)	722	840 (109)	41.8	48.3
		V F 値 (cm)	11.7	—	7.9	—	7.6					
		空気量 (%)	1.9	—	2.0	—	2.0					
		温度 (°C)	12.8	13.1	13.3	13.0	13.0					
	No. 4	スランプ (cm)	12.5	9.9	10.0	9.4	9.7	756 (100)	696	799 (106)	46.0	47.8
		V F 値 (cm)	16.0	—	9.3	—	8.8					
		空気量 (%)	3.5	—	2.6	—	2.2					
		温度 (°C)	13.8	14.2	14.2	13.5	13.5					

18 kg/m³ 少なくなっており、この減少量は単位セメント量、単位水量のおよそ 10% にあたる大きい量である。この現象の理由は明らかではないが、セメント粒子の表面の活性に対して水が先にある程度吸着されるため、結果的に減水剤を多量添加したのと同様な効果を発揮して流動性が良くなるためではないかと考えられる。

また、コンクリート温度の変化が配合に及ぼす影響は、同一配合種別（同一水セメント比）のコンクリートでは高温になるに従って単位セメント量、単位水量とも大きく減少し、その減少量は同時添加、後添加ともほぼ同程度で、1 deg の上昇についてセメント量は 9.7~11.5 kg/m³、水量は 3.2~3.5 kg/m³ である。

b) 同時添加と後添加がコンクリートのワーカビリチーおよび強度に及ぼす影響

同一配合種別（同一水セメント比）の高強度コンクリートにおいて、同一スランプ、同程度のプラスチックでも、a) に述べたように、減水剤の添加方法が単位セメント量、単位水量にかなり影響を及ぼすことが分かった。このことから、配合設計上の条件（水セメント比、スランプ）を一定にした場合に、減水剤の同時添加と後添加がワーカビリチーの経時変化および強度にどのような影響を及ぼすかを、目標温度 30°C、20°C、10°C の下で試験を行った。

材料および配合は a) の場合と同じである。

所定の練りませ後、(1)-b) 「コンクリートのワーカビリチー」で行ったのと同じ測定および供試体の作製、養生、強度試験を行った。

試験結果は、同時添加の場合は表-12 に、後添加の場合は表-14 に示すとおりである。

これらの表を比較すると、同一配合のコンクリートに減水剤を同時添加した場合と後添加した場合とでは、いずれもワーカビリチーは時間とともに低下し、その傾向は両者ともほとんど同じである。また、温度が高いコンクリートの時間経過によるスランプの低下は、低温のものより幾分大きい。

強度については、同時添加のコンクリートと後添加のコンクリートとでは、コンクリート温度または供試体採取時期（練りませ直後と 60 分間アジテート後）による圧縮強度の差はほとんど認められない。また、同時添加あるいは後添加の場合とも、練りませ直後に採取したコンクリートの 28 日圧縮強度に対して 60 分間アジテート後採取したものの方がコンクリート温度にかかわらず大きく、その増大率は同時添加の場合に 0~9% 程度、後添加の場合に 5~10% 程度である。

5. 結 論

混和剤として多環アロマスルホン酸塩系減水剤を使

用し、一部実験にアニオン系 AE 剤をも添加した高強度コンクリートについて、骨材として天然骨材のほかクリンカー骨材を用いた数種類の配合種類のコンクリートの養生方法を変化させた場合の硬化したコンクリートの諸性状、ならびに天然骨材を用いたコンクリートの温度による影響および減水剤の添加方法の差による影響、につき試験した結果を要約すると、次のとおりである。

(1) 高性能減水剤の使用により、スランプ 10~13 cm のコンクリートにおいて水セメント比を 40% 以下にでき、材令 28 日で 800 kg/cm^2 以上の圧縮強度が得られ、しかも圧縮強度はセメント水比とほぼ直線関係で近似できる。

(2) 4種類の養生条件のもとで、コンクリートの強度は材令とともに増加する。しかし、その増加率は異なり、材令 28 日から材令 1 年にいたる間の圧縮強度の増加率は、標準養生の場合には約 20% であるが、オートクレーブ養生の場合には非常に小さい。

また、引張強度、曲げ強度の増加率は圧縮強度のものより小さく、ぜい度係数、すなわち圧縮強度と引張強度との比は高強度コンクリートの場合 14~18 であり、普通強度コンクリートの場合より大である。

(3) クリンカー骨材コンクリートでは、同一圧縮強度および同一ワーカビリティを得るための単位水量、単位セメント量は、天然骨材コンクリートに比して小さくなる。一方、AE コンクリートでは単位水量、単位セメント量が大きくなる。

(4) ヤング係数は、養生条件については標準養生の場合がもっとも大きい。天然骨材コンクリートの材令 28 日で $405 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、材令 1 年で $434 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ で圧縮強度の伸びに対してヤング係数の伸びは小さい。しかし、クリンカー骨材コンクリートでは、材令 1 年で $501 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ の高い値が得られた。

オートクレーブ養生を行った場合のヤング係数は、他の養生に比べて特に長期材令において低く、材令による増進があまり見られない。

(5) 乾燥収縮、クリープに関しては、天然骨材コンクリートと天然骨材 AE コンクリートについて試験した結果、コンクリート配合の差による影響はほとんど認められないが、コンクリートの養生条件、環境湿度が大きく影響する。

養生条件がクリープに及ぼす影響としては、オートクレーブ養生したコンクリートのクリープひずみおよびクリープ係数は、標準養生のものより小さい。この傾向は環境湿度が小さくなるにつれて顕著になる。

環境湿度が変化すると、同一配合、同一養生条件でもクリープひずみおよびクリープ係数は大きく異なり、環境湿度が高くなるにつれて標準養生したコンクリートで

はクリープひずみおよびクリープ係数は小さくなり、オートクレーブ養生コンクリートでは逆に大きくなる傾向を示すが、いずれも普通強度のコンクリートよりもかなり小さい値である。

(6) 凍結融解に対する抵抗性試験の結果、オートクレーブ養生したコンクリートは抵抗性の劣化を示し、普通強度のプレーンコンクリートと同程度またはそれ以下しかなく、特に空気連行のないコンクリートの抵抗性は大幅に低下する。一方、空気連行のあるオートクレーブ養生のコンクリートおよび空気連行の有無にかかわらず標準養生のコンクリートの抵抗性は満足すべきもので、普通強度の AE コンクリートと同等ないしはそれ以上の抵抗性を有している。

(7) コンクリートのワーカビリティは時間経過につれて低下し、その傾向は普通強度のコンクリートより著しい。

早強セメントおよび天然骨材を使用した空気連行のあるコンクリートと無いコンクリートについての試験によれば、いずれも高温になるほどスランプの経時変化は大きく、かつ AE コンクリートより AE 剤無添加のコンクリートの方がスランプの経時変化は大きい。

特異な性状として、コンクリートが 30°C 程度以上の高温になるとダイラタンシー的挙動が著しくなるが、この時のスランプ値はスランプコーン引き上げ直後の値をとるのが適当と思われる。

(8) 多環アロマスルホン酸塩系減水剤またはナフタリンスルホン酸塩のホルマリン縮合物系減水剤と早強セメントを用いたモルタルについての試験によれば、通常モルタルとは逆に、温度の上昇につれてコンシステンシーが良くなる性質を有することが分かった。その原因について調べたが水和熱の異常発生も認められず、減水剤の分子構造からくるものか拡散二重電位層や電位に関する界面科学的な面からの影響と考えられる。

(9) コンクリート練りませ時の高性能減水剤の同時添加と後添加とでは、コンクリートの配合およびワーカビリティは大きな影響をうけ、後添加の場合には同時添加と比べて同一スランプとするための単位水量および単位セメント量は大幅に減少する。

(10) 練りませ後 60 分間アジテートしてから採取したコンクリートの 28 日圧縮強度は、配合種別、減水剤添加方法、温度にかかわらず、練りませ直後に採取したものより大きく、最大 10% 大きい値を示した。

以上述べたように、本研究の結果から高強度コンクリートに関して多くの特性が明らかとなった。この種のコンクリートによる構造物の設計施工は今後ふえることと思われるが、このコンクリートは本質的には従来から用いられている普通強度のコンクリートと異なるものでは

ないので、高強度コンクリートによる構造物の設計施工にあたっては、本論文で指摘した諸点について配慮し、その特性を知って使用すれば、十分に目的を達することができる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、終始ご懇篤なご指導を賜った京都大学岡田清教授、同小柳 治助教授および試験にあたり多くの援助と便宜を与えていただいた関係の方々に厚く謝意を表します。

本論文は、京都大学審査学位論文である。

参考文献

- 1) 近藤時夫・小柳 治・児玉和巳：高強度コンクリートの諸特性と耐久性について，材料，Vol. 24, No. 260, pp. 432~440, 1975年5月。
- 2) 児玉和巳・福島直昭・御所窪邦男：高強度用減水剤について，材料，Vol. 22, No. 232, pp. 11~17, 1973年1月。
- 3) 西岡思郎・橋本正幸：高性能減水剤の利用に関する試験，セメント・コンクリート，No. 311, pp. 19~26, 1973年1月。
- 4) 六車 熙・田中進三：高強度コンクリートの力学的特性について，セメント技術年報27巻，pp. 243~247, 1973年。
- 5) 吉田弥智・赤井 登・飯坂武男：高性能混和剤に関する基礎的研究，セメント技術年報27巻，pp. 153~157, 1973年。
- 6) コンクリート橋の長大化に関する調査研究報告書，同資料，プレストレストコンクリート技術協会，昭和45年度，46年度，47年度。
- 7) Abrams, D.A. : Design of Concrete Mixture, Structural Materials Research Lab., Lewis Institute, Bulletin 1, Chicago, 1919.
- 8) たとえば，東京工業大学長滝研究室：高強度コンクリートに関する実験研究（参考文献7）の昭和46年度報告書資料に掲載，1972年4月。

(1976.9.18・受付)