

土木研究所資料

高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの品質に関する試験(1)

昭和51年 2 月

建設省土木研究所

地質化学部コンクリート研究室

要 旨

高炉水滓スラグ粉末をセメントの一部に置換えて用いたコンクリートの品質を明らかにするため、1工場産のスラグについてセメントとの置換率を0～90%の範囲に変えた場合の、コンクリートのワーカビリティ（単位水量、スランプ、空気量）および強度（圧縮、曲げ）について試験を行なった。

その結果、ここで試験したスラグに関しては、セメントの90%程度までをこれで置換えてもコンクリートのワーカビリティにはほとんど影響を与えないこと、スラグ置換率を大きくするほど初期強度は低下するが、材令91日程度の長期材令では置換率70%以上でもスラグを用いない場合に匹敵する強度が得られること、などが明らかになった。

目 次

序 言	1
1. 試験の目的	2
2. 試験内容	3
2.1 試験項目	3
2.2 使用材料	3
3. 試験方法	6
3.1 ワーカビリチーに関する試験	6
3.2 強度に関する試験	6
4. 試験結果	8
4.1 ワーカビリチーに関する試験	8
4.2 強度に関する試験	22
5. 試験結果の考察	38
5.1 スラグを用いたコンクリートのワーカビリチーおよび空気連行性 について	38
5.2 スラグを用いたコンクリートの強度について	39
結 言	41

序 言

製鉄所の溶鉱炉から排出されるスラグのごく一部は、従来からコンクリート用骨材や高炉セメント用水滓などに利用されてはきたが、大部分は埋立てや整地用材料として処理されてきたのが実情である。しかし、省資源の見地からは、かかる産業廃棄物のより高度な利用を図ることがのぞまれているところから、土木研究所では昭和50年度より「高炉スラグの土木材料への適用に関する研究」を課題としてとりあげ、調査研究をすすめている。

コンクリート研究室では上記課題のもとで「高炉スラグのコンクリート用材料への適用に関する研究」を担当している。高炉スラグのコンクリート用材料としての利用法としては、粗骨材として用いる方法、細骨材として用いる方法、および高炉スラグ粉末を混和材料として用いる方法があるが、当面は混和材料としての利用法に着目して研究をすすめている。とくに、燃料の経済効率から大型キルンによるセメントの生産が行なわれている今日、マスコンクリートに用いられる発熱量の少ないセメントを特別に注文することが生産効率上から好まれなくなっているため、スラグを混和材料として活用して発熱量の低下をはかったり、海水などに対する化学抵抗性を高めたりすることは、現在の国情から考えても好ましい方法と考える。

高炉水滓スラグ粉末（以下、単に「スラグ」とよぶ）は、従来、高炉セメントの原料として用いられてきたが、高炉セメントの大部分はB種として生産されているため、そのスラグ混入率は50%程度までであり、また70%以上に多量にスラグを混入した場合のコンクリートの品質については明らかでないため、スラグの広汎な活用をはかるためにはスラグを多量に混入したコンクリートの諸性質、すなわちワーカビリティ、強度、耐久性、収縮特性、熱的性質などを明らかにする必要がある。また、スラグの品質は原料や製造方法によってかなり異なることが知られているため、スラグの品質とそれを用いたコンクリートの諸性質との関係についても明らかにする必要がある。

そこで、研究の手はじめとして昭和50年度は1工場の製品を対象として、スラグ混入量とコンクリートのワーカビリティおよび強度との関係を調査するための試験を行なった。この報告は、この試験についてまとめたものである。

なお、この試験の実施にあたっては、新日本製鉄化学工業株式会社戸畑製造所・セメント研究所の阪本好史氏の御協力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

昭和51年2月

地質化学部 部長 柳 田 力
コンクリート研究室長 太 田 実

1. 試 験 の 目 的

研究の手はじめとして、高炉水滓スラグ粉末をコンクリートに用いた場合の、スラグ混入量とコンクリートのワーカビリティおよび強度との関係を求めることを目的とした。比較のために、混和材としてフライアッシュを用いた場合についても同時に試験を行なった。

なお、スラグを用いたコンクリートの品質はスラグ自体の品質によって左右されるので、さまざまな品質のスラグについて試験することがのぞましいが、この試験では、さしあたって1工場の製品のみを対象とした。

2. 試 験 内 容

2.1 試験項目

つぎの2項目について試験を行なった。

(1) スラグを用いたコンクリートのワーカビリティに関する試験

普通ポルトランドセメントの一部を、さまざまな割合でスラグに置換えた場合の、スラグ置換率とコンクリートのスランプおよび空気量ならびにそれらの経時変化との関係を求める試験。

(2) スラグを用いたコンクリートの強度に関する試験

普通ポルトランドセメントの一部をさまざまな割合でスラグに置換えた場合の、スラグ置換率とコンクリートの圧縮および曲げ強度との関係を求める試験。

なお、これら2項目について、比較のために混和材としてフライアッシュを用いた場合についても試験を行なった。

2.2 使用材料

試験に用いたセメント、スラグ、フライアッシュ、水、細・粗骨材および混和剤は、つぎのとおりである。

表-1 セメントの化学成分(%)

(1) セメント

普通ポルトランドセメントを使用した。その化学成分、物理的性質および強さは、それぞれ表-1、表-2および表-3のとおりである。

強熱減量	不溶残分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計
0.6	0.1	21.7	6.0	3.1	64.9	1.2	1.8	99.4

表-2 セメントの物理的性質

比重	粉末度		凝 結						安定性 (煮沸法)
	比表面積 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	室温 (°C)	湿度 (%)	水温 (°C)	水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	
3.16	3,100	0.5	20.0	95.0	20.0	29.3	3-15	4-25	良

(2) スラグ

新日本製鉄化学工業社製の水淬粉末を使用した。このスラグは、赤熱状の鉾淬に水を噴射して急冷

表-3 セメントの強さ

フロー	曲げ強さ (Kg/cm ²)			圧縮強さ (Kg/cm ²)		
	3日	7日	28日	3日	7日	28日
245	33.3	51.9	72.2	156	274	444

して水滓とした後、これを脱水してボールミルで粉碎する方法で製造されたもので、その物理的・化学的性質は表-4のとおりである。

表-4 高炉スラグ粉末の特性値

比重	ブレン 比表面積 (cm^2/g)	化 学 成 分 (%)								塩基度
		不溶残分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Mn_2O_3	CaO	MgO	S	
2.93	3,860	+ 0.10	33.5	15.0	0.9	1.0	42.5	5.3	1.0	1.87 > 1.4

(3) フライアッシュ

市販品（九州電力産）を使用した。その化学成分および物理的性質は、それぞれ表-5および表-6のとおりである。

表-5 フライアッシュの化学成分

化学成分	規格値 (%)	測定値 (%)
二酸化けい素	45 以上	62.1
湿 分	1 以下	0.09
強 熱 減 量	5 以下	1.3

(4) 水

コンクリートの練りまぜ水には、水道水を使用した。

表-6 フライアッシュの物理的性質

項 目	規格値	測定値
比 重	1.95 以上	2.25
粉末度（比表面積）(cm^2/g)	2,400 以上	3,840
単 位 水 量 比 (%)	102 以下	93.2
圧 縮 強 度 比 (%)	28日 60 以上	80.5
	91日 70 以上	112.0

(5) 細骨材

細砂および粗砂（いずれも海砂）を、土木学会のコンクリート標準示方書の「細骨材の粒度の標準」に適合するように混合・調製したものをを使用した。細骨材の粒度および物理的性質は、

表-7 細骨材の粒度

それぞれ表-7および表-8のとおりである。

ふるいに留るものの重量百分率 (%)								粗粒率*
5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.15 以下		
0	10.3	31.6	56.7	79.9	95.9	100.0		27.4

(6) 粗骨材

最大寸法 20mm の硬質砂岩碎石を使用した。粒

* 細砂粗粒率：1.84，粗砂粗粒率：3.19
細・粗砂の混合比率は 1：2 とした。

表-8 細骨材の物理的性質

比 重	吸水量 (%)	洗い試験損失重量 (%)	有機不純物	塩化物含有量 (%)	単位容積重量 (Kg/m^3)	実積率 (%)
2.54	1.61	1.6	良	0.004	1,692	66.4

度は表-9に示すとおりで、コンクリート標準示方書の「粗骨材の粒度の標準」に適合するものである。また、この粗骨材の物理的性質は、表-10に示すとおりである。

(7) 混和剤

市販のヴィンソルを使用した。

表-9 粗骨材(碎石)の粒度

ふるいに留るものの重量百分率 (%)									粗粒率
2.2	1.5	1.0	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
4.1	26.0	66.7	100	100	100	100	100	100	6.71

表-10 粗骨材(碎石)の物理的性質

岩 質	比 重	吸水量 (%)	洗い試験損失重量 (%)	単位容積重量 (Kg/m^3)	実積率 (%)
硬質砂岩	2.70	0.50	0.2	1,515	56.1

3. 試 験 方 法

3.1 ワーカビリチーに関する試験

表-11 に示すような混和材置換率と水セメント比 (W/C^* , ただし C^* : セメント+混和材) の組合せについて、つぎの2項目の試験を行なった。

(1) スランブを一定とした場合

の単位水量の変化

スランブ一定 ($8 \pm 1 \text{ cm}$) としたと

きの単位水量を求めた。ミキサーに、

表-11 ワーカビリチーに関する試験組合せ

スラグ 置換率 (%)	混和材 W/C^* (%)			スラグ粉末			フライアッシュ		
	50	70	90	50	70	90	50	70	90
0	○	○	○						
10	○	○	○	○	○	○			
30							○	○	○
50	○	○	○	○	○	○			
90	○	○	○						

C^* : セメント+混和材

粗骨材, 細骨材, セメントおよび混和材, 水の順に各材料を投入して1分間練り混ぜたのち, 所定の水セメント比のセメントペーストを徐々に加えてスランブ $8 \pm 1 \text{ cm}$, 空気量 $4 \pm 0.5 \%$ のコンクリートをつくり, はじめに投入した材料と追加したセメントペーストとの合計量から計算によって単位水量を求めた。

さらに, スランブおよび空気量の経時変化を求めるため, 練り混ぜ終了直後 (0分) のほか, 練り混ぜ後30分, 60分および90分経過後のスランブおよび空気量を測定した。

(2) 単位水量を一定とした場合のスランブの変化

(1)の試験において混和材を用いない場合 (置換率: 0%) に対して得られた単位水量を基準とし, 混和材を用いた他のすべての配合における単位水量をこれに合せた場合のスランブを求めた。この場合, 混和剤量も置換率0%の配合について(1)の試験で得られた値に合せた。

(1)の試験と同様に, 練り混ぜ直後 (0分) のほか, 30分, 60分および90分経過後のスランブおよび空気量の測定も行なった。

これらの試験は, 20°C の恒温実験室内において行なった。コンクリートの練り混ぜには可傾式3切ミキサーを使用した。なお, スランブ試験は JIS A 1101, 空気量試験は JIS A 1128 (空気室圧力方法) に従って行なった。

3.2 強度に関する試験

表-12 に示すような混和材置換率と水セメント比の組合せについて, 圧縮および曲げ強度試験を行なった。いずれの配合とも, コンクリートのスランブは $8 \pm 1 \text{ cm}$, 空気量は $4 \pm 0.5 \%$ とした。

表-12 に示す組合

せのうち、スラグ置換率 90*としたものは、セメントとして、普通ポルトランドセメントに人造石膏 (SO_3 含有 46%) を添加してセメントおよびスラグの合計重量中に占める SO_3 量が約 7% となるようにあらかじめ成分調整したものを使用した。

(1) 圧縮強度試験

1) 供試体寸法:

$\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 円柱

2) 材 令: 7 日,

28 日および 91 日

3) 養生方法:

20℃ 水中養生

4) 供試体数:

各配合および材令ごとに 3 個

(2) 曲げ強度試験

C*: セメント+混和材

1) 供試体寸法: 90*: 人造石膏を添加して SO_3 量を増加した特殊セメントを使用

10×10×40 cm 角柱

2) 材 令: 7 日, 28 日および 91 日

3) 養生方法: 20℃ 水中養生

4) 供試体数: 各配合および材令ごとに 3 個

5) 載荷方法: 3 等分点曲げ

強度試験は, JIS A 1108 (圧縮強度試験方法) および JIS A 1106 (曲げ強度試験方法) に従って行なった。

表-12 強度に関する試験組合せ

試験項目 スラグ置換率 W/C* 混和材 (%)		圧縮強度		曲げ強度	
		スラグ粉末	フライアッシュ	スラグ粉末	フライアッシュ
0	50	○		○	
	70	○		○	
	90	○		○	
10	50	○	○		
	70	○	○		
	90	○	○		
30	50	○	○	○	○
	70	○	○	○	○
	90	○	○	○	○
50	50	○	○		○
	70	○	○		○
	90	○	○		○
70	50	○		○	
	70	○		○	
	90	○		○	
90	50	○		○	
	70	○		○	
	90	○		○	
90*	50	○			
	70	○			
	90	○			

4. 試 験 結 果

4.1 ワーカビリチーに関する試験

(1) スランブを一定とした場合の単位水量の変化

練りまぜ試験の結果得られた、スランブ $8 \pm 1 \text{ cm}$ 、空気量 $4 \pm 0.5 \%$ を満足するコンクリートの配合は表-13 のとおりである。練りまぜ直後におけるスランブおよび空気量の実測

表-13 ワーカビリチー試験におけるコンクリートの配合（スランブ一定）

混和材	置換率 (%)	W/C [*] (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)						試験時のコン クリート温度 (°C)	
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混 和 材 料		0 分	90 分
				W	C	S	G	混和材	混和剤		
スラグ 粉 末	0	50	46	172	344	792	991	0	0.137	15.0	15.0
		70	50	172	246	902	959	0	0.093	15.0	15.0
		90	54	191	212	963	872	0	0.059	15.0	15.0
	10	50	46	172	310	792	988	34	0.148	17.5	17.5
		70	50	174	223	898	954	25	0.081	17.5	17.5
		90	54	185	185	973	880	21	0.058	17.5	17.5
	50	50	46	172	172	790	983	172	0.162	19.0	18.0
		70	50	170	122	902	959	121	0.102	19.0	18.5
		90	54	180	100	980	886	100	0.070	19.0	18.5
	90	50	46	167	33	795	991	301	0.184	18.0	18.0
		70	50	167	24	904	961	215	0.115	18.0	17.5
		90	54	178	20	980	888	178	0.093	18.0	18.0
フライ アッシュ	10	50	46	167	301	800	996	33	0.140	17.5	17.5
		70	50	176	226	892	948	25	0.090	17.5	17.5
		90	54	188	188	965	875	21	0.067	17.5	17.5
	30	50	46	146	204	833	1,040	88	0.248	18.0	18.0
		70	50	158	158	919	977	68	0.188	18.0	17.5
		90	54	169	132	996	902	56	0.152	18.0	18.0
	50	50	46	149	149	818	1,023	149	0.283	19.0	18.5
		70	50	160	115	908	960	114	0.206	19.0	18.0
		90	54	160	89	1,006	913	89	0.160	19.0	18.5

C*: セメント+混和材

値を、練りませ後 30 分、60 分および 90 分におけるそれらの実測値とともに示すと表-14 のようであり、これらを図示すると図-1 および図-2 のようである。

表-14 スランプおよび空気量の経時変化 (スランプ一定の場合)

混和材	置換率 (%)	W/C (%)	スランプ (cm)				空 気 量 (%)			
			0	30	60	90(分)	0	30	60	90(分)
スラグ 粉 末	0	50	8.5 (100)	5.9 (69.4)	4.3 (50.6)	3.9 (45.9)	4.8 (100)	4.6 (95.8)	4.4 (91.7)	4.3 (89.6)
		70	7.7 (100)	5.0 (64.9)	4.4 (57.1)	3.8 (49.4)	5.2 (100)	5.0 (96.2)	4.9 (94.2)	4.7 (90.4)
		90	8.6 (100)	8.5 (98.8)	6.8 (74.1)	4.8 (55.8)	4.9 (100)	4.7 (95.9)	4.7 (95.9)	4.5 (91.8)
	10	50	8.2 (100)	5.7 (69.5)	4.6 (56.1)	4.0 (48.8)	4.8 (100)	4.6 (95.8)	4.4 (91.7)	4.0 (83.3)
		70	7.4 (100)	6.5 (87.8)	4.5 (60.8)	3.8 (51.4)	4.9 (100)	4.6 (93.9)	4.4 (89.8)	4.4 (89.8)
		90	8.4 (100)	6.7 (79.8)	5.9 (70.2)	4.4 (52.4)	5.2 (100)	4.8 (90.8)	4.6 (88.5)	4.5 (86.5)
	50	50	8.9 (100)	7.5 (84.3)	7.5 (84.3)	6.1 (78.2)	5.0 (100)	4.6 (92.0)	4.4 (88.0)	4.2 (84.0)
		70	8.0 (100)	6.7 (83.7)	5.0 (62.5)	4.3 (53.7)	4.7 (100)	4.5 (95.7)	4.4 (93.6)	4.1 (87.3)
		90	8.2 (100)	5.7 (69.5)	5.5 (67.1)	4.4 (53.7)	4.4 (100)	4.3 (97.7)	4.2 (95.5)	4.0 (90.9)
	90	50	7.8 (100)	7.0 (89.8)	6.0 (76.9)	4.0 (51.3)	4.0 (100)	4.0 (100)	3.9 (97.5)	3.7 (92.5)
		70	7.5 (100)	6.7 (89.3)	6.5 (86.7)	4.0 (53.3)	4.2 (100)	4.2 (100)	4.1 (97.6)	3.8 (90.5)
		90	8.0 (100)	6.5 (81.2)	6.0 (75.0)	6.0 (75.0)	4.5 (100)	4.4 (97.8)	4.2 (93.3)	4.2 (93.3)
フライ アッシュ	10	50	8.5 (100)	7.3 (85.9)	5.7 (67.1)	4.9 (57.6)	4.0 (100)	3.8 (95.0)	3.6 (90.0)	3.4 (85.0)
		70	8.8 (100)	7.2 (81.8)	5.9 (67.0)	5.3 (60.2)	4.2 (100)	3.9 (92.9)	3.8 (90.5)	3.8 (90.5)
		90	8.7 (100)	8.3 (95.0)	7.0 (80.5)	6.4 (73.6)	4.3 (100)	4.0 (93.0)	4.0 (93.0)	3.8 (88.4)
	30	50	7.5 (100)	6.3 (84.0)	5.4 (72.0)	4.6 (61.3)	4.1 (100)	3.8 (92.7)	3.7 (90.2)	3.7 (90.2)
		70	7.9 (100)	7.1 (89.9)	6.5 (82.3)	4.3 (54.4)	4.5 (100)	4.3 (95.6)	4.3 (95.6)	4.2 (93.3)
		90	8.3 (100)	7.1 (85.5)	6.7 (80.7)	4.4 (53.0)	4.9 (100)	4.7 (95.9)	4.5 (91.8)	4.4 (89.8)
	50	50	8.2 (100)	7.8 (95.1)	6.7 (81.7)	5.5 (67.1)	4.0 (100)	3.4 (85.0)	3.1 (77.5)	3.1 (77.5)
		70	9.0 (100)	8.8 (97.8)	8.6 (95.6)	7.9 (87.8)	4.0 (100)	3.8 (95.0)	3.6 (90.0)	3.6 (90.0)
		90	8.6 (100)	6.7 (77.9)	6.5 (75.6)	6.3 (73.3)	5.2 (100)	4.2 (80.8)	4.2 (80.8)	4.0 (76.9)

()内数値は、スランプまたは空気量の減少率 (%)

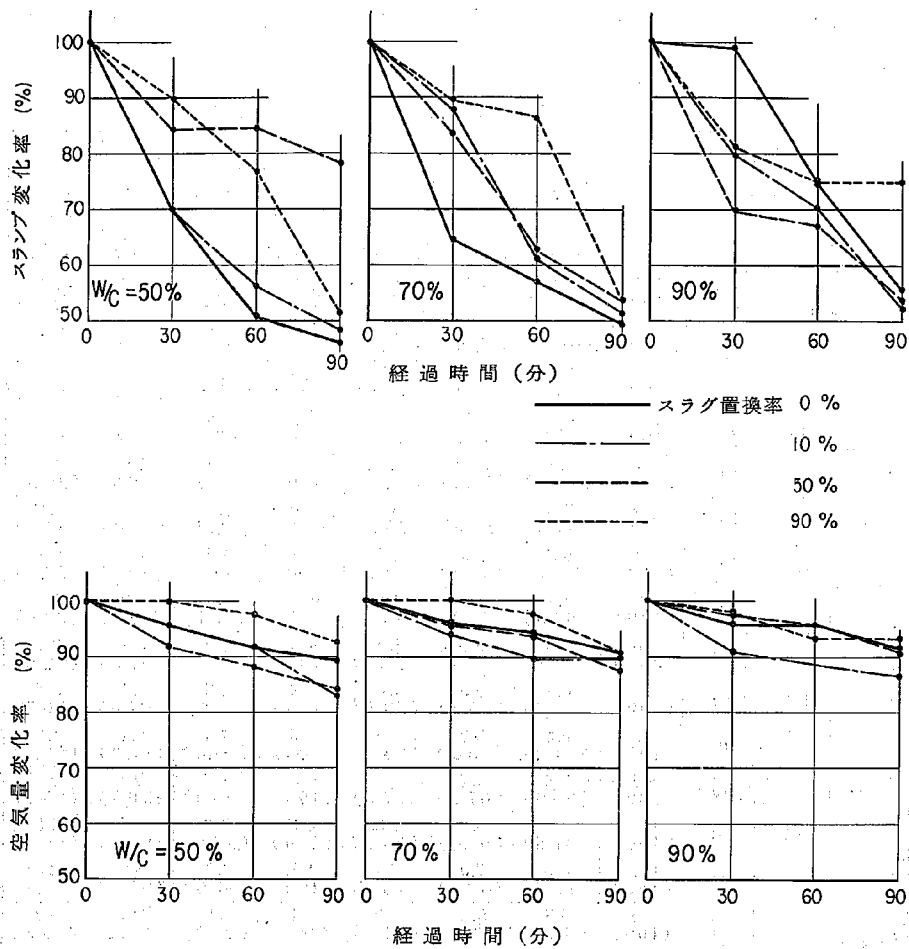


図-1. スランプおよび空気量の経時変化
(スラグ置換, スランプ一定の場合)

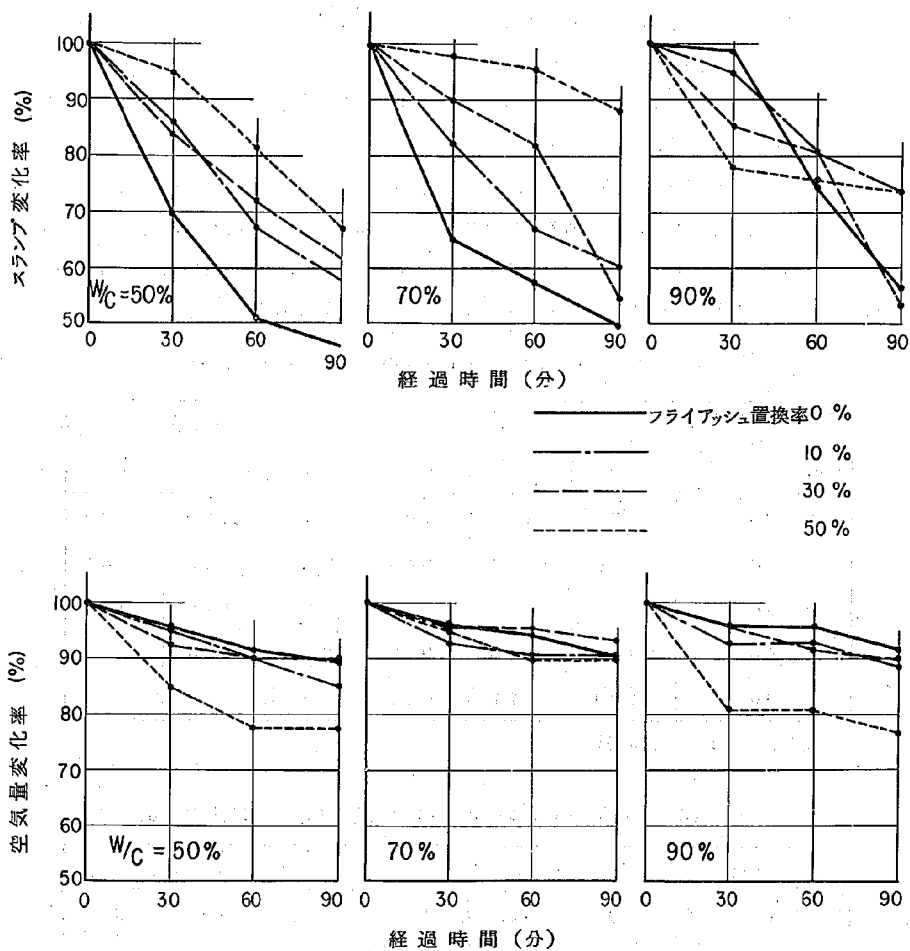


図-2. スランプおよび空気量の経時変化
(フライアッシュ置換, スランプ一定の場合)

表-13より、混和材置換率と単位水量との関係を図示すると、図-3のようである。同図中に示す「単位水量比」は、スランブ一定（ $8 \pm 1 \text{ cm}$ ）の条件のもとでの、混和材を用いない（置換率：0%）コンクリートの単位水量に対する混和材使用のコンクリートにおける単位水量の割合（表-15）である。

同様に、表-13より空気量一定（ $4 \pm 0.5 \%$ ）の場合の混和材置換率と単位混和剤量との関係を示すと、図-4のようである。同図中に示す「単位混和剤量比」は、空気量一定（ $4 \pm 0.5 \%$ ）の条件のもとでの混和材を用いないコンクリートにおける混和剤量に対する混和材使用のコンクリートにおける混和剤量の割合（表-16）である。

表-15 スランブ一定（ $8 \pm 1 \text{ cm}$ ）の場合の単位水量比（%）

混和材 W/C* 置換率 (%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
0	100	100	100	100	100	100
10	100	101.2	96.9	97.1	102.3	98.4
30	—	—	—	84.9	91.9	88.5
50	100	98.8	94.2	86.6	93.0	83.8
90	97.1	97.1	93.2	—	—	—

C*：セメント＋混和材

表-16 空気量一定（ $4 \pm 0.5 \%$ ）の場合の単位混和剤量比（%）

混和材 W/C* 置換率 (%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
0	100	100	100	100	100	100
10	108.0	87.1	98.3	102.2	96.8	113.6
30	—	—	—	181.0	202.2	257.6
50	118.2	109.7	118.6	206.6	221.5	271.2
90	134.3	123.7	157.6	—	—	—

C*：セメント＋混和材

なお、後述の強度試験用コンクリートの配合（表-21）から、スランブ一定（ $8 \pm 1 \text{ cm}$ ）の場合の混和材置換率と単位水量および単位水量比（表-22）との関係を示すと図-9のよう

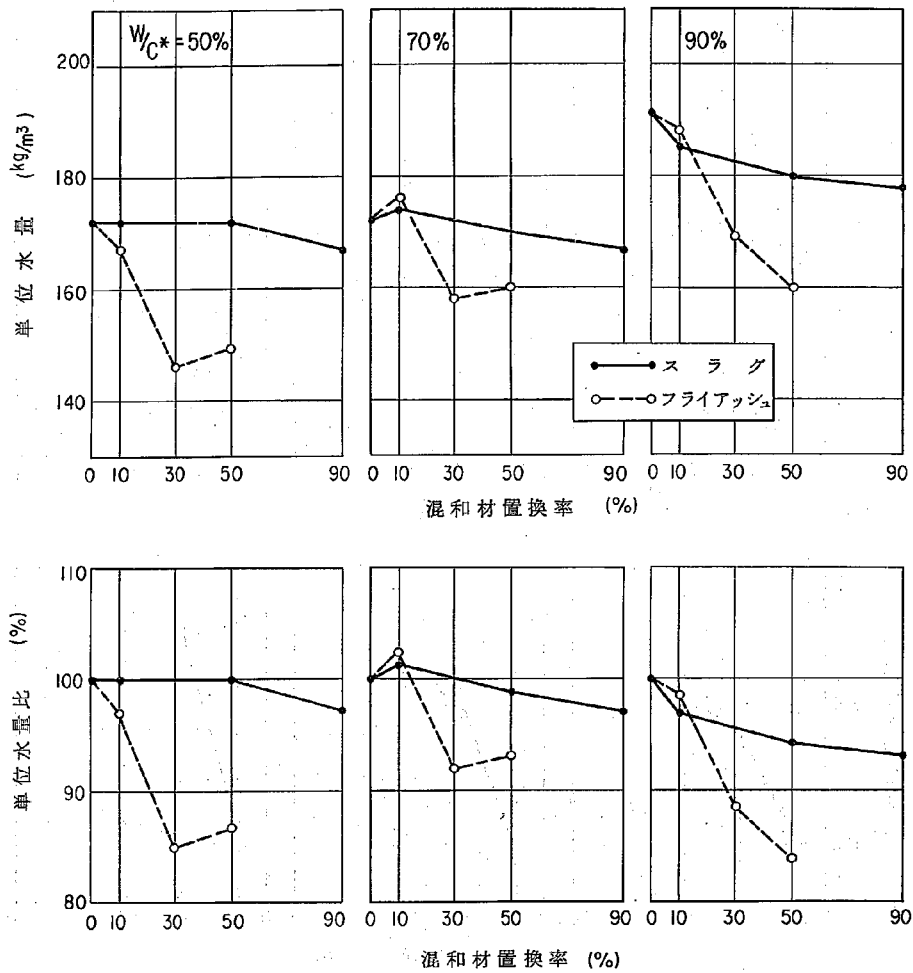


図-3. スランブ一定 ($8 \pm 1\text{cm}$) の場合の単位水量

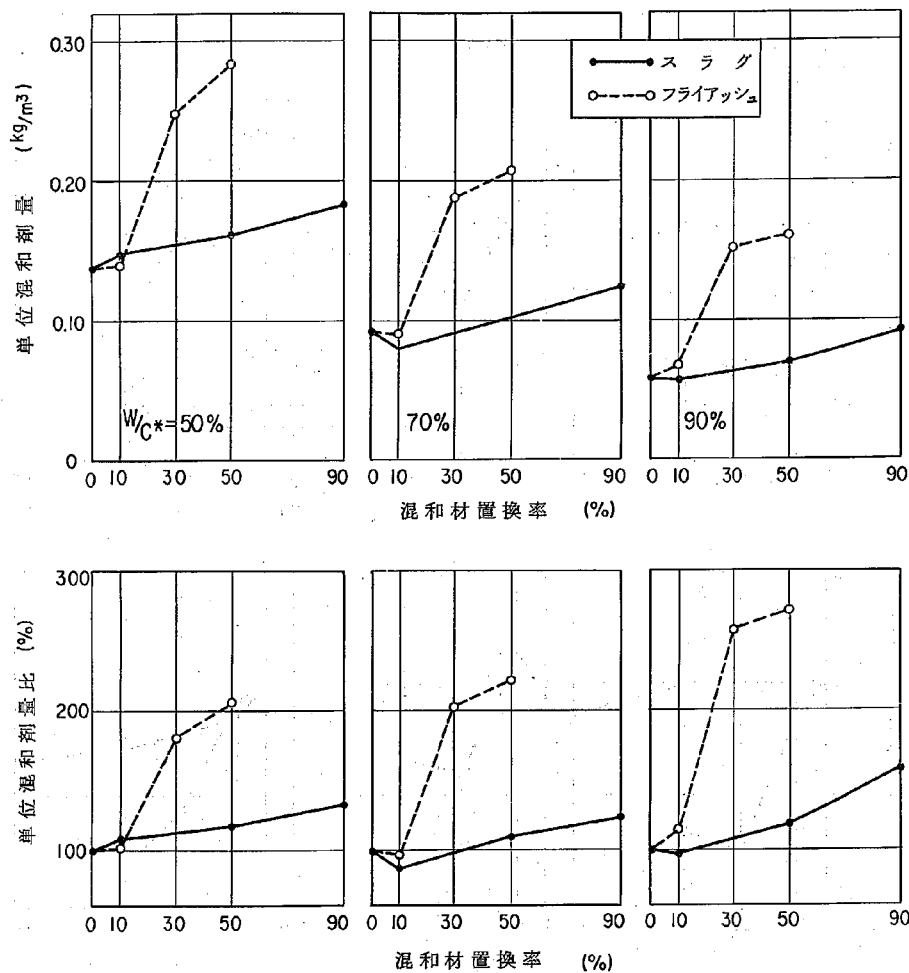


図-4. 空気量一定 ($4 \pm 0.5\%$) の場合の単位混和剤量

であり、空気量一定（ $4 \pm 0.5\%$ ）の場合の混和材置換率と単位混和剤量および単位混和剤量比（表-23）との関係を示すと、図-10のようである。

(2) 単位水量を一定とした場合のスランブの変化

3.1.(2)に示した条件にしたがって得られたコンクリートの配合は、表-17のとおりである。練りまぜ直後におけるスランブおよび空気量の実測値を、練りまぜ後30分、60分および90分におけるそれらの実測値とともに示すと表-18のようであり、これを図示すると図-5および図-6のようである。

表-17 ワーカビリティー試験におけるコンクリートの配合（単位水量一定）

混和材	置換率 (%)	W/C* (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)						試験時のコンクリート温度 (°C)	
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材料		0分	90分
				W	C	S	G	混和材	混和剤		
スラグ 粉 末	0	50	46	172	344	792	991	0	0.137	15.0	15.0
		70	50	172	246	902	959	0	0.093	15.0	15.0
		90	54	191	212	963	872	0	0.059	15.0	15.0
	10	50	46	172	310	792	988	34	0.137	18.0	17.5
		70	50	172	221	902	959	25	0.093	18.0	18.0
		90	54	191	191	963	869	21	0.059	18.0	17.5
	50	50	46	172	172	790	986	172	0.137	17.0	17.0
		70	50	172	123	898	954	123	0.093	17.0	17.0
		90	54	191	106	958	869	106	0.059	17.0	17.0
	90	50	46	172	34	785	977	310	0.137	16.0	16.0
		70	50	172	25	895	952	221	0.093	16.0	15.5
		90	54	191	21	955	867	191	0.059	16.0	16.0
フライ アッシュ	10	50	46	172	310	790	986	34	0.137	16.5	16.5
		70	50	172	221	899	956	25	0.093	16.5	16.5
		90	54	191	191	960	869	21	0.059	16.5	16.5
	30	50	46	172	241	782	975	103	0.137	19.0	18.5
		70	50	172	172	893	949	74	0.093	19.0	19.0
		90	54	191	148	955	864	64	0.059	19.0	18.0
	50	50	46	172	172	772	964	172	0.137	18.0	18.0
		70	50	172	123	885	941	123	0.093	18.0	18.0
		90	54	191	106	947	856	106	0.059	18.0	17.5

C*: セメント+混和材

表-18より、混和材置換率とスランブとの関係を示すと、図-7のようである。同図中に示す「スランブ比」は、単位水量一定の条件のもとでの混和材を用いない（置換率：0%）コンクリートのスランブに対する混和材使用のコンクリートにおけるスランブの割合（表-19）である。

表-18 スランプおよび空気量の経時変化(単位水量一定の場合)

混和材	置換率 (%)	W/C (%)	ス ラ ン プ (cm)				空 気 量 (%)			
			0	30	60	90(分)	0	30	60	90(分)
スラグ 粉 末	0	50	12.6 (100)	10.5 (83.3)	8.5 (67.5)	7.9 (62.7)	6.8 (100)	6.5 (95.6)	5.9 (86.8)	5.3 (77.9)
		70	9.3 (100)	8.4 (90.3)	6.7 (72.0)	6.5 (69.9)	7.1 (100)	6.6 (93.0)	6.0 (84.5)	5.6 (78.9)
		90	14.0 (100)	9.1 (65.0)	9.0 (64.3)	8.2 (58.6)	6.2 (100)	5.9 (95.1)	5.5 (88.7)	5.1 (82.3)
	10	50	8.9 (100)	7.7 (86.5)	5.8 (65.2)	5.6 (62.9)	5.4 (100)	5.2 (96.3)	4.8 (88.9)	4.6 (85.2)
		70	9.8 (100)	7.6 (77.6)	7.0 (71.4)	5.0 (51.0)	6.3 (100)	6.1 (96.8)	5.7 (90.5)	5.2 (82.5)
		90	14.7 (100)	13.0 (88.4)	9.0 (61.2)	8.0 (54.4)	6.1 (100)	5.7 (93.4)	5.3 (86.9)	5.3 (86.9)
	50	50	11.1 (100)	9.4 (84.7)	8.4 (75.7)	7.0 (63.1)	4.8 (100)	4.5 (93.7)	4.3 (89.6)	3.8 (79.2)
		70	11.8 (100)	10.3 (87.3)	8.6 (72.9)	7.1 (60.2)	5.6 (100)	5.4 (96.4)	4.9 (87.5)	4.8 (85.7)
		90	13.9 (100)	13.7 (98.6)	9.1 (65.5)	8.3 (59.7)	4.2 (100)	4.0 (95.3)	4.0 (95.3)	3.8 (90.5)
	90	50	10.8 (100)	8.8 (81.5)	8.6 (79.6)	6.9 (63.9)	3.7 (100)	3.5 (94.6)	3.3 (89.2)	3.2 (86.5)
		70	10.4 (100)	9.0 (86.5)	8.0 (76.9)	5.8 (55.8)	3.8 (100)	3.8 (100)	3.7 (97.4)	3.7 (97.4)
		90	16.6 (100)	16.2 (97.6)	13.9 (83.7)	10.4 (62.7)	3.0 (100)	3.0 (100)	3.0 (100)	3.0 (100)
フライ アッシュ	10	50	12.4 (100)	9.7 (78.2)	8.5 (68.5)	8.3 (66.9)	4.5 (100)	4.1 (91.1)	3.9 (86.7)	3.7 (82.2)
		70	11.1 (100)	9.2 (82.9)	8.0 (72.1)	7.3 (65.8)	5.3 (100)	5.0 (94.3)	4.7 (88.7)	4.5 (84.9)
		90	15.0 (100)	12.1 (80.7)	11.4 (76.0)	11.0 (73.3)	4.0 (100)	3.9 (97.5)	3.8 (95.0)	3.8 (95.0)
	30	50	16.2 (100)	13.5 (83.3)	11.9 (73.5)	11.0 (67.9)	3.2 (100)	3.2 (100)	3.0 (93.7)	2.9 (90.6)
		70	15.8 (100)	13.2 (83.5)	11.8 (74.7)	10.7 (67.7)	2.3 (100)	2.3 (100)	2.3 (100)	2.3 (100)
		90	14.5 (100)	12.1 (83.4)	10.1 (69.7)	8.1 (55.9)	2.9 (100)	2.9 (100)	2.9 (100)	2.9 (100)
	50	50	19.1 (100)	18.0 (94.2)	16.5 (86.4)	15.3 (80.1)	1.0 (100)	1.1 (110)	1.1 (110)	1.0 (100)
		70	19.7 (100)	17.1 (86.8)	16.8 (85.3)	16.2 (82.2)	0.9 (100)	1.2 (133)	1.3 (144)	1.3 (144)
		90	22.2 (100)	20.1 (90.5)	20.0 (90.1)	19.5 (87.8)	1.1 (100)	1.1 (100)	1.1 (100)	1.1 (100)

() 内数値は、スランプまたは空気量の減少率

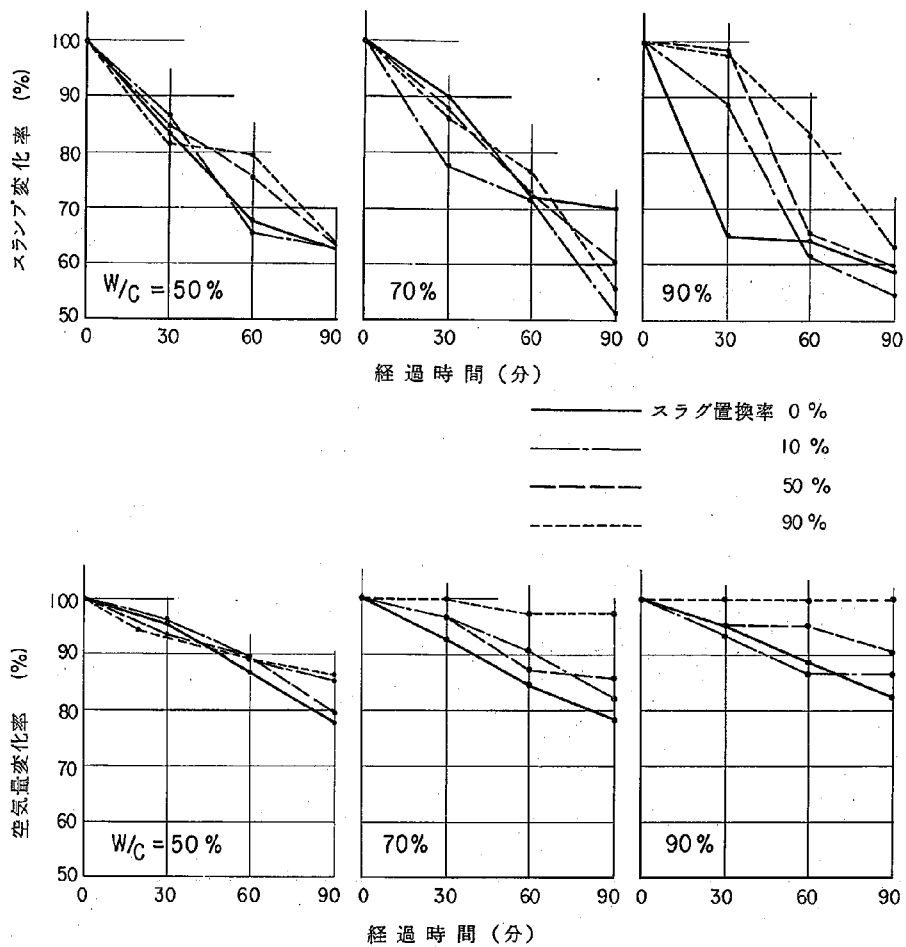


図-5. スランプおよび空気量の経時変化
(スラグ置換, 単位水量一定の場合)

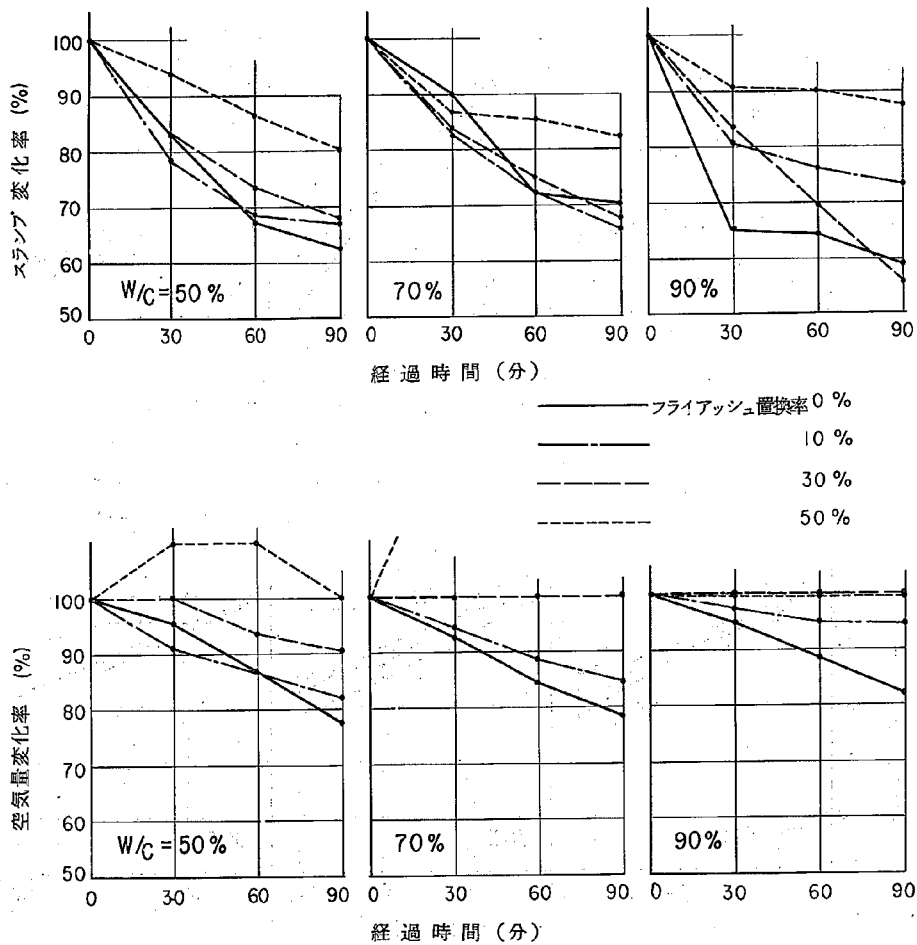


図-6. スランプおよび空気量の経時変化
(フライアッシュ置換, 単位水量一定の場合)

同様に、表-18より混和剤量一定の場合の混和材置換率と連行空気量との関係を示すと図-8のようである。同図中に示す「連行空気量比」は、混和剤量一定の条件のもとでの混和材を用いないコンクリートの空気量に対する混和材使用のコンクリートにおける空気量の割合(表-20)である。

表-19 単位水量一定の場合のスランプ比(%)

混和材 $\frac{W}{C^*}(\%)$ $\frac{W}{(kg/m^3)}$ 混和材置換率(%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
	172	172	191	172	172	191
0	100	100	100	100	100	100
10	70.6	105.4	105.0	98.4	119.4	107.1
30	—	—	—	128.6	169.9	103.6
50	88.1	126.9	99.3	151.6	211.8	158.6
90	85.7	111.8	118.6	—	—	—

C*: セメント+混和材

表-20 混和剤量一定の場合の空気量比(%)

混和材 $\frac{W}{C^*}(\%)$ $\frac{W}{(kg/m^3)}$ 混和材置換率(%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
	0.137	0.093	0.059	0.137	0.093	0.059
0	100	100	100	100	100	100
10	79.4	88.7	98.4	66.2	74.6	64.5
30	—	—	—	47.1	32.4	46.8
50	70.6	78.9	67.7	14.7	12.7	17.7
90	54.4	53.5	48.4	—	—	—

C*: セメント+混和材

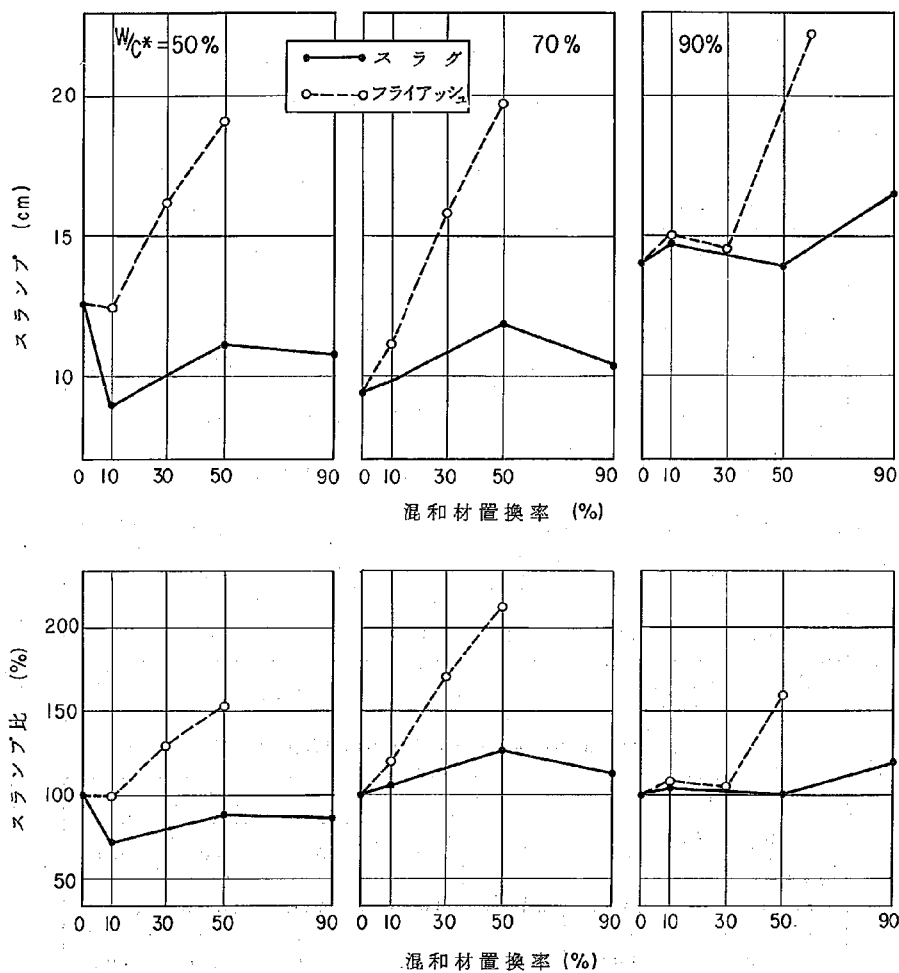


図-7. 単位水量一定の場合のスランプ

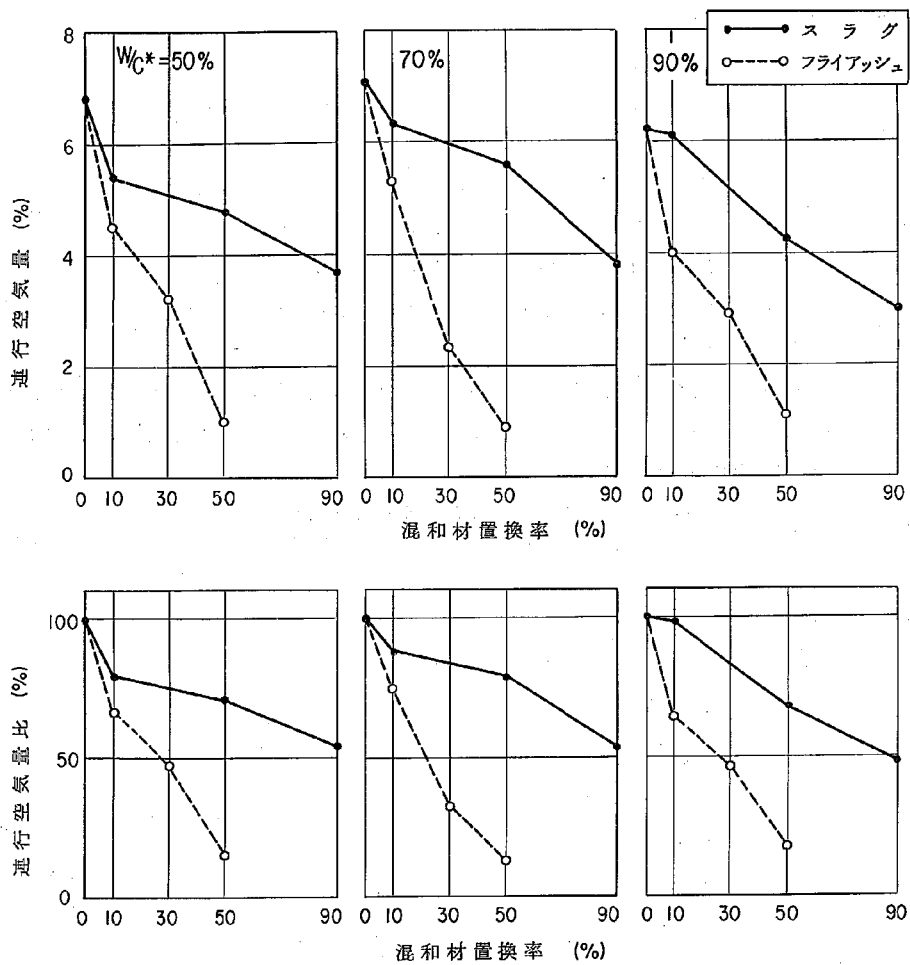


図 - 8. 混和剤量一定の場合の進行空気量

4.2 強度に関する試験

強度試験におけるコンクリートの配合は、表-21のとおりである。3.2にのべたとおり、水セメント比 W/C^* (C^* :セメント+混和材)は50%, 70%および90%の3種とし、いずれの配合ともスランプ一定 ($8 \pm 1 \text{ cm}$), 空気量一定 ($4 \pm 0.5 \%$)とした。

材令7日, 28日および91日における圧縮強度試験結果および曲げ強度試験結果は、それぞれ表-24および表-25のとおりである。これから、各水セメント比ごとに混和材置換率と圧縮強度および曲げ強度との関係を示すと、それぞれ図-11および図-12のとおりである。また、圧縮強度および曲げ強度の混和材置換率による強度比を示すと、表-26および図-13のとおりである。

つぎに、表-24および表-25より、各材令および混和材置換率ごとにセメント水比(C^*/W)と強度との関係を図示すると、図-14~図-16のようであり、 $C^*/W \sim \sigma$ 関係式を求めると表-27のようである。

さらに、圧縮強度と曲げ強度との関係を示すと、図-17のようである。

表-21 強度試験におけるコンクリートの配合

混和材	混和材 置換率 (%)	W/C [*] (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)						スラ ンプ (cm)	空 気 量 (%)	コンク リートの単 位容積重 量 (Kg/m ³)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混 和 材 料				
								混和材	混和剤			
スラグ	0	50	46	166	332	805	1,004	0	0.143	8.3	4.5	2,284
		70	50	172	246	902	959	0	0.098	7.8	4.8	2,250
		90	54	181	201	980	888	0	0.066	7.9	5.0	2,249
	10	50	46	173	312	790	986	35	0.149	8.2	4.6	2,311
		70	50	174	224	898	954	25	0.087	8.1	5.0	2,280
		90	54	186	186	970	880	21	0.062	8.2	5.0	2,256
	30	50	46	170	238	795	991	102	0.153	7.9	5.1	2,290
		70	50	172	172	899	956	74	0.086	7.6	4.8	2,292
		90	54	184	143	973	883	61	0.061	8.2	4.6	2,271
	50	50	46	180	180	773	965	180	0.162	7.8	4.0	2,314
		70	50	178	127	888	944	127	0.102	8.5	4.3	2,282
		90	54	185	103	970	880	103	0.072	8.3	4.5	2,251
	70	50	46	166	100	798	996	232	0.149	7.3	4.3	2,294
		70	50	167	72	906	963	167	0.088	7.5	4.2	2,287
		90	54	182	61	975	883	141	0.065	8.5	4.2	2,261
	90	50	46	169	34	790	986	304	0.179	8.0	4.1	2,295
		70	50	168	24	903	960	216	0.108	8.9	4.0	2,284
		90	54	179	20	980	886	179	0.090	8.8	4.1	2,243
	90 [*]	50	46	179	62	765	956	296	0.215	7.8	4.2	2,261
		70	50	169	42	897	953	199	0.133	8.5	5.0	2,240
		90	54	178	34	973	886	164	0.103	8.5	4.8	2,219
	10	50	46	165	297	803	1,004	33	0.132	7.8	4.2	2,314
		70	50	164	211	914	972	23	0.084	7.8	4.8	2,264
		90	54	182	182	975	886	20	0.061	7.8	4.2	2,250
フライ アッシュ	30	50	46	149	209	828	1,031	89	0.253	7.6	4.9	2,284
		70	50	152	152	931	990	65	0.174	7.5	5.0	2,261
		90	54	164	127	1,006	910	55	0.140	8.2	4.6	2,250
	50	50	46	140	140	836	1,045	140	0.252	7.7	4.1	2,306
		70	50	147	105	933	994	105	0.179	7.9	5.0	2,278
		90	54	159	89	1,008	913	88	0.142	8.4	4.2	2,273

C* : セメント+混和材

90* : 人造石膏を添加してSO₃量を増加した特殊セメントを使用

表-22 スランブ一定 ($8 \pm 1 \text{ cm}$) の場合の単位水量比 (%) [表-21より]

混和材 WC* 混和材置換率 (%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
0	100	100	100	100	100	100
10	104.2	101.2	102.8	99.4	95.3	100.6
30	102.4	100.0	101.7	89.8	88.4	90.6
50	108.4	103.5	102.2	84.3	85.5	87.8
70	100.0	97.1	100.6	—	—	—
90	101.8	97.7	98.9	—	—	—

表-23 空気量一定 ($4 \pm 0.5 \%$) の場合の単位混和剤量比 (%) [表-21より]

混和材 WC* 混和材置換率 (%)	ス ラ グ			フ ラ イ ア ッ シ ュ		
	50	70	90	50	70	90
0	100	100	100	100	100	100
10	104.2	88.8	93.9	92.3	85.7	92.4
30	107.0	87.8	92.4	176.9	177.6	212.1
50	113.3	104.1	109.1	176.2	182.7	215.2
70	104.2	89.8	98.5	—	—	—
90	125.2	110.2	136.4	—	—	—

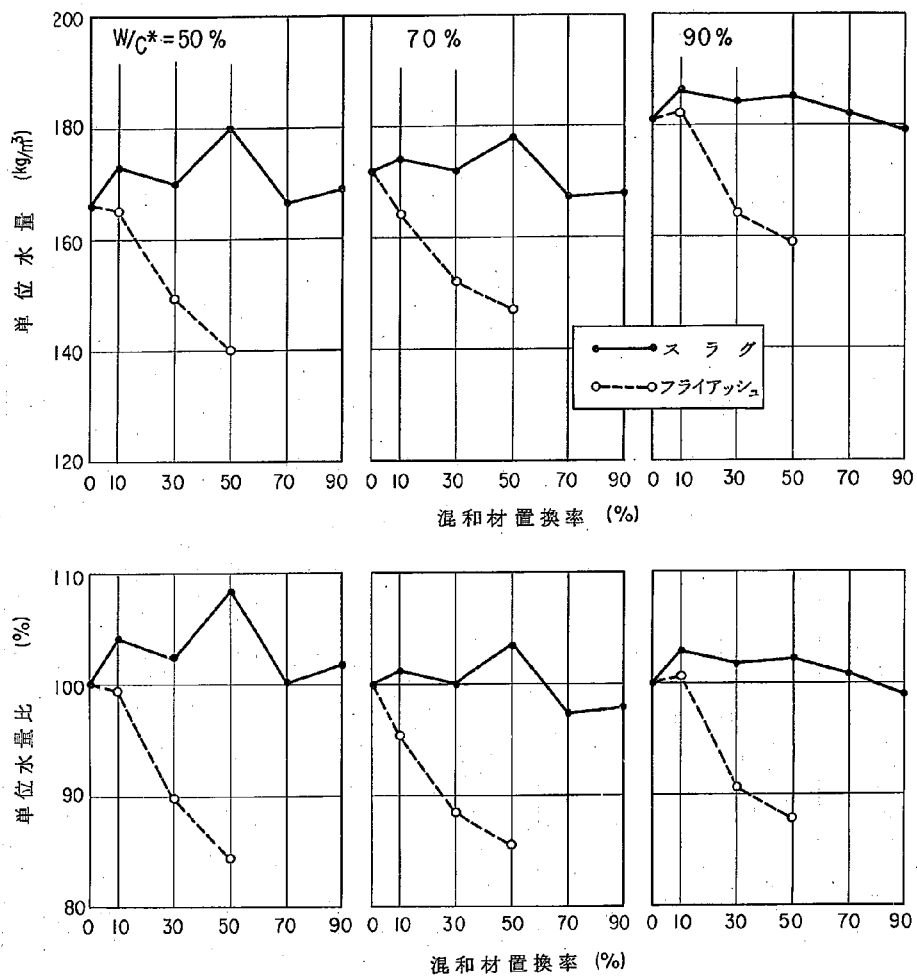


図-9. スラブル一定 ($8 \pm 1 \text{ cm}$) の場合の単位水量 (表-21より)

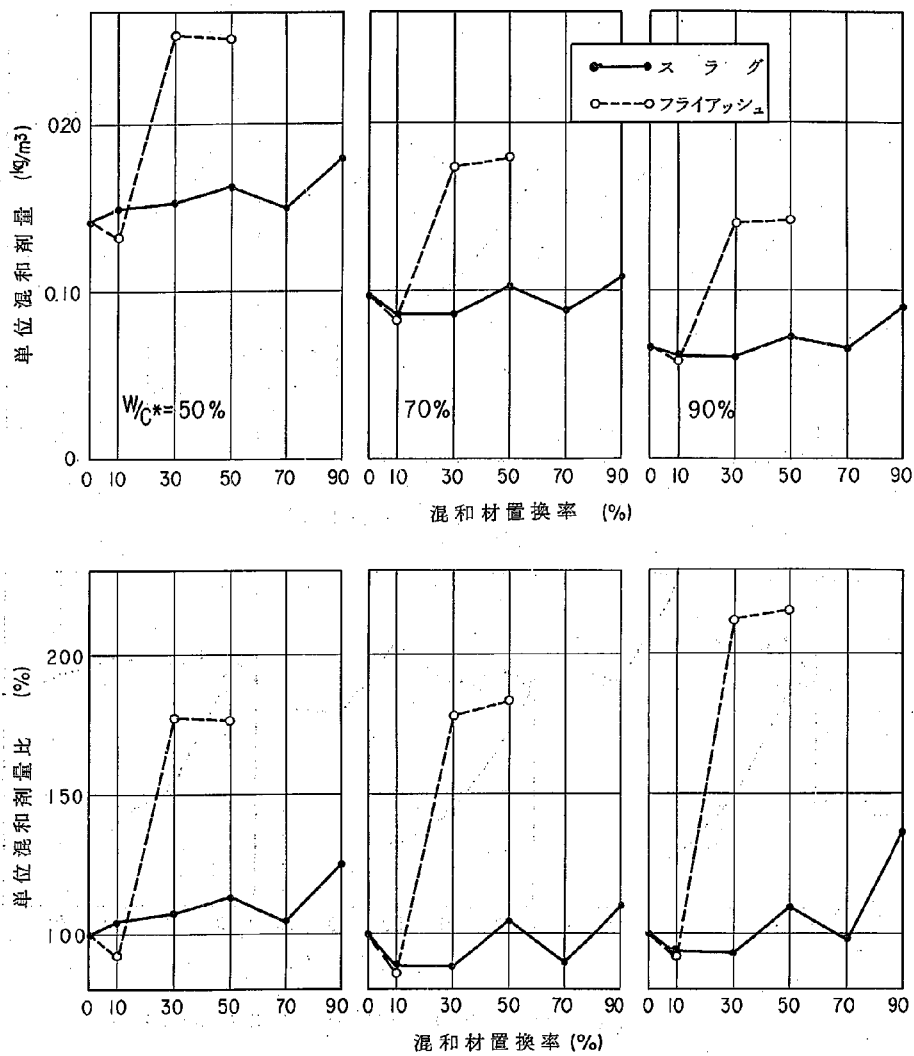


図-10. 空気量一定 ($4 \pm 0.5\%$) の場合の単位混和剤量
(表21より)

表-24 コンクリートの圧縮強度試験結果

混和材	混和材 置換率 (%)	W/C*	s/a	圧縮強度(Kg/cm ²) ^{注1)}			コンクリート重量(Kg/m ³) ^{注2)}		
				材 令 (日)			材 令 (日)		
				7	28	91	7	28	91
スラグ	0	50	46	276	371	403	2,321	2,340	2,350
		70	50	178	245	280	2,328	2,296	2,303
		90	54	113	164	188	2,281	2,288	2,291
	10	50	46	273	380	437	2,348	2,335	2,346
		70	50	171	255	293	2,296	2,326	2,293
		90	54	122	188	233	2,283	2,270	2,286
	30	50	46	221	361	430	2,307	2,311	2,321
		70	50	145	241	328	2,308	2,309	2,331
		90	54	112	181	244	2,295	2,286	2,302
	50	50	46	210	376	489	2,332	2,351	2,355
		70	50	125	277	343	2,328	2,324	2,324
		90	54	83	191	255	2,307	2,288	2,295
	70	50	46	139	284	399	2,323	2,326	2,330
		70	50	87	209	294	2,313	2,310	2,306
		90	54	59	153	208	2,283	2,294	2,288
	90	50	46	113	197	238	2,323	2,338	2,317
		70	50	73	130	157	2,310	2,328	2,317
		90	54	53	95	116	2,282	2,291	2,294
	90*	50	46	195	316	410	2,295	2,317	2,310
		70	50	144	289	348	2,282	2,303	2,286
		90	54	91	218	295	2,275	2,286	2,299
フライ アッシュ	10	50	46	274	354	440	2,346	2,351	2,349
		70	50	161	234	296	2,331	2,349	2,337
		90	54	114	168	223	2,307	2,327	2,307
	30	50	46	192	285	398	2,327	2,341	2,340
		70	50	114	185	262	2,322	2,317	2,330
		90	54	67	111	166	2,296	2,300	2,321
	50	50	46	130	227	340	2,342	2,346	2,360
		70	50	65	125	206	2,301	2,313	2,332
		90	54	45	86	152	2,290	2,302	2,303

C* : セメント+混和材

90* : 人造石膏を添加してSO₃量を増加した特殊セメントを使用

注 1) それぞれの値は、供試体3個の平均値

注 2) コンクリート重量は、供試体の水切直後の重量より算定

表-25 コンクリートの曲げ強度試験結果

混和材	混和材 置換率 (%)	W/C*	s/a	曲げ強度(Kg/cm ²) ^{注1)}			コンクリート重量(Kg/cm ³) ^{注2)}		
				材 令 (日)			材 令 (日)		
				7	28	91	7	28	91
スラグ	0	50	46	41.2	53.8	50.9	2,350	2,358	2,371
		70	50	30.7	41.1	41.2	2,313	2,300	2,329
		90	54	22.4	31.6	31.9	2,288	2,275	2,275
	30	50	46	31.7	49.0	59.8	2,329	2,308	2,325
		70	50	27.4	40.0	44.2	2,317	2,313	2,304
		90	54	18.1	30.0	37.1	2,279	2,283	2,288
	70	50	46	22.9	45.4	57.0	2,354	2,367	2,375
		70	50	17.4	30.0	44.7	2,329	2,321	2,333
		90	54	12.3	25.8	37.3	2,271	2,296	2,292
	90	50	46	16.7	33.7	45.0	2,371	2,358	2,358
		70	50	14.0	23.2	35.2	2,342	2,317	2,342
		90	54	12.1	20.7	28.1	2,338	2,313	2,313
フライ アッシュ	30	50	46	31.8	42.9	50.3	2,338	2,342	2,338
		70	50	22.4	33.9	47.1	2,308	2,304	2,313
		90	54	15.2	24.2	35.0	2,279	2,279	2,292
	50	50	46	22.6	36.7	50.8	2,350	2,354	2,363
		70	50	15.3	25.7	42.5	2,338	2,321	2,325
		90	54	10.9	19.9	31.1	2,283	2,292	2,288

C*: セメント+混和材

注1) それぞれの値は、供試体3個の平均値

注2) コンクリート重量は、供試体の水切直後の重量より算定

表-26 混和材を用いたコンクリートの強度比

項目	置換率 (%)	混和材 W/C* 材令(日)		ス ラ グ									フ ラ イ ア ッ シ ュ								
				50			70			90			50			70			90		
				7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91
圧縮強度	0			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	10			98.9	102.4	108.4	96.1	104.1	114.6	108.0	114.6	123.9	99.2	95.4	109.2	90.4	95.5	105.7	100.9	102.4	118.6
	30			80.1	97.3	106.7	81.5	98.4	110.4	99.1	110.4	129.8	69.6	76.8	98.8	64.0	75.5	93.6	59.3	75.5	88.3
	50			76.1	101.3	121.3	70.2	113.1	116.5	73.4	116.5	135.6	47.1	61.2	84.4	36.5	51.0	73.6	39.8	51.0	80.9
	70			50.4	76.5	99.0	48.9	85.3	93.3	52.2	93.3	110.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	90			40.9	53.1	59.6	41.0	53.1	57.9	46.9	57.9	61.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	90*			70.6	85.2	101.7	80.9	118.0	132.9	80.5	132.9	156.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
曲げ強度	0			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	30			76.9	91.1	117.5	89.2	97.3	107.3	80.8	94.9	116.3	77.2	79.7	98.8	73.0	82.5	114.3	67.8	76.5	109.7
	50			—	—	—	—	—	—	—	—	—	54.9	68.2	99.8	49.8	62.5	103.2	48.7	63.0	97.5
	70			55.6	84.3	112.0	56.7	73.0	108.5	54.9	81.6	116.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	90			40.5	62.6	88.4	45.6	56.4	85.4	54.0	65.5	88.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

90*: 人造石膏を添加してSO₃を増加した特殊セメントを使用

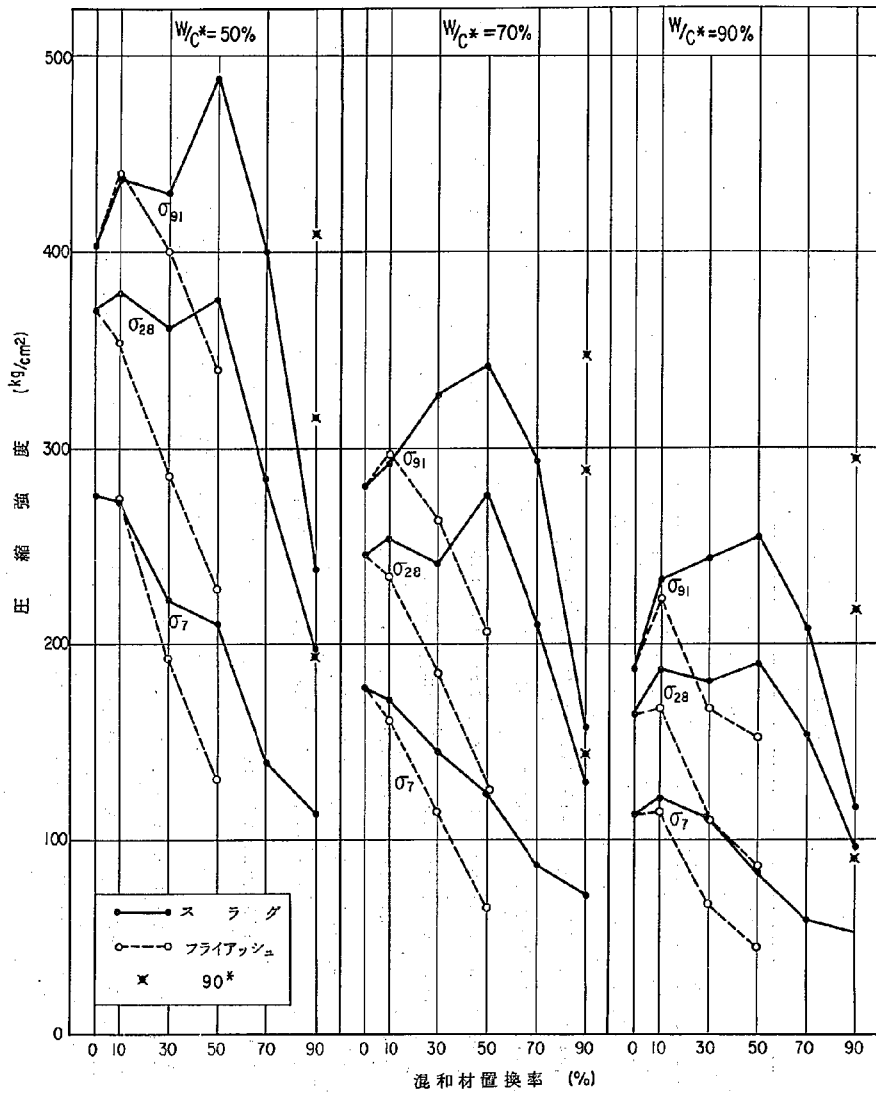


図-1.1. 圧 縮 強 度

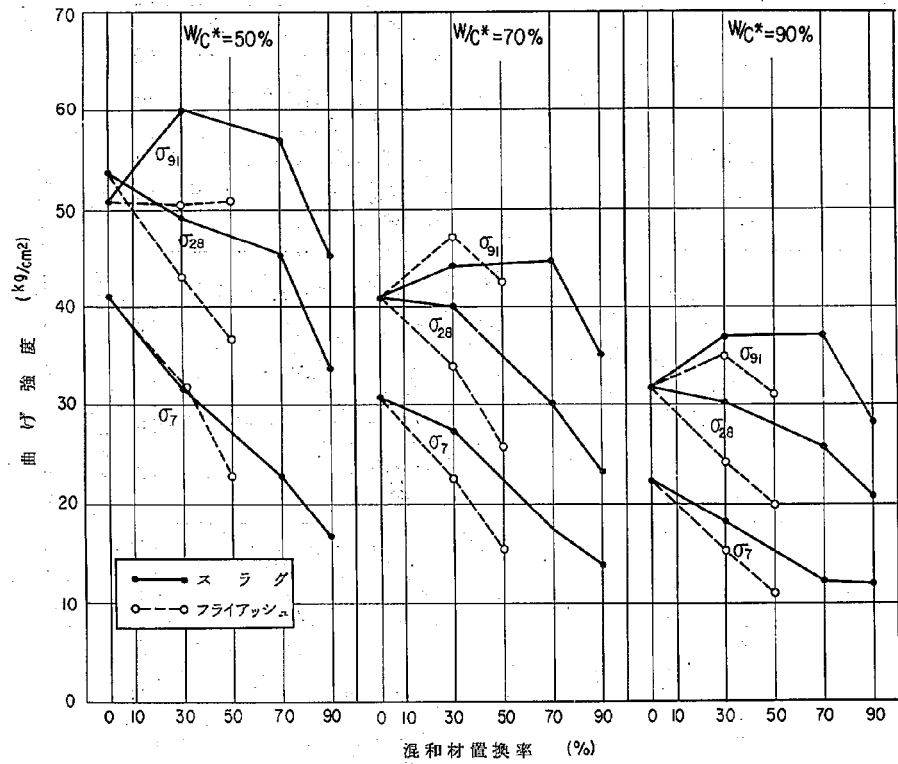


図-1.2. 曲げ強度

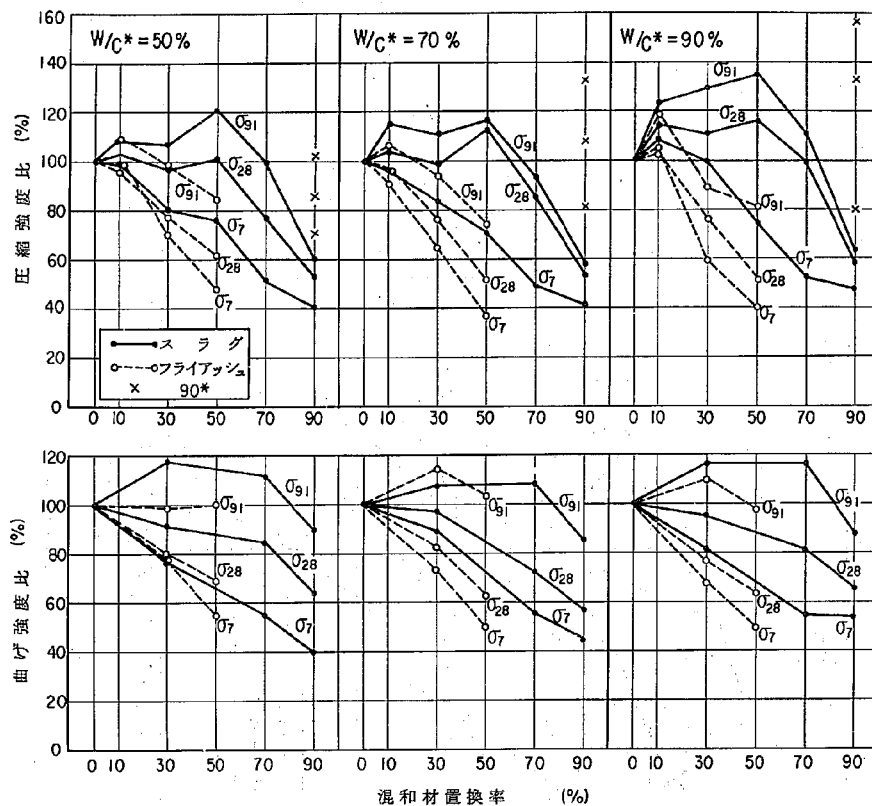


図-13. 混和材を用いたコンクリートの強度比

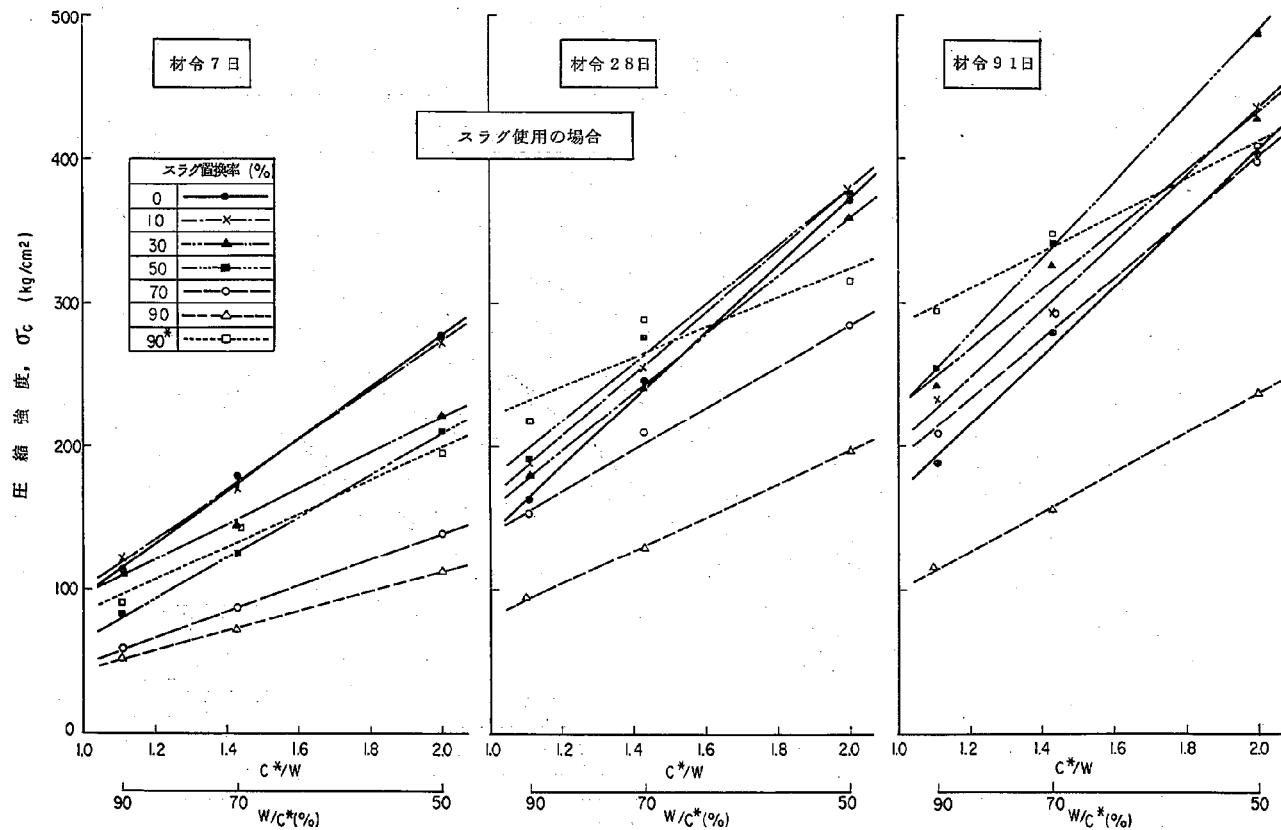


図-14. $C/W \sim \sigma_c$ 関係 (スラグ)

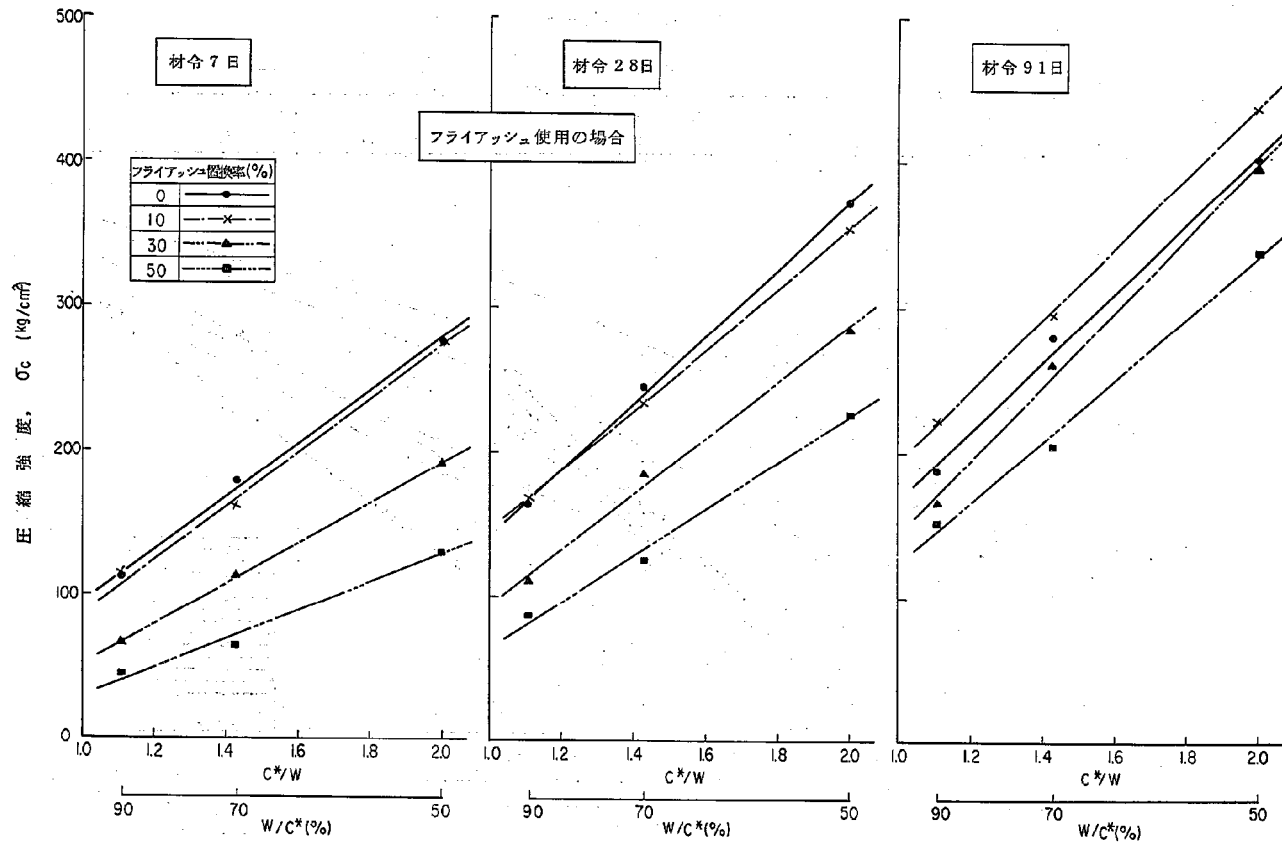


図-15. $C/W \sim \sigma_c$ 関係 (フライアッシュ)

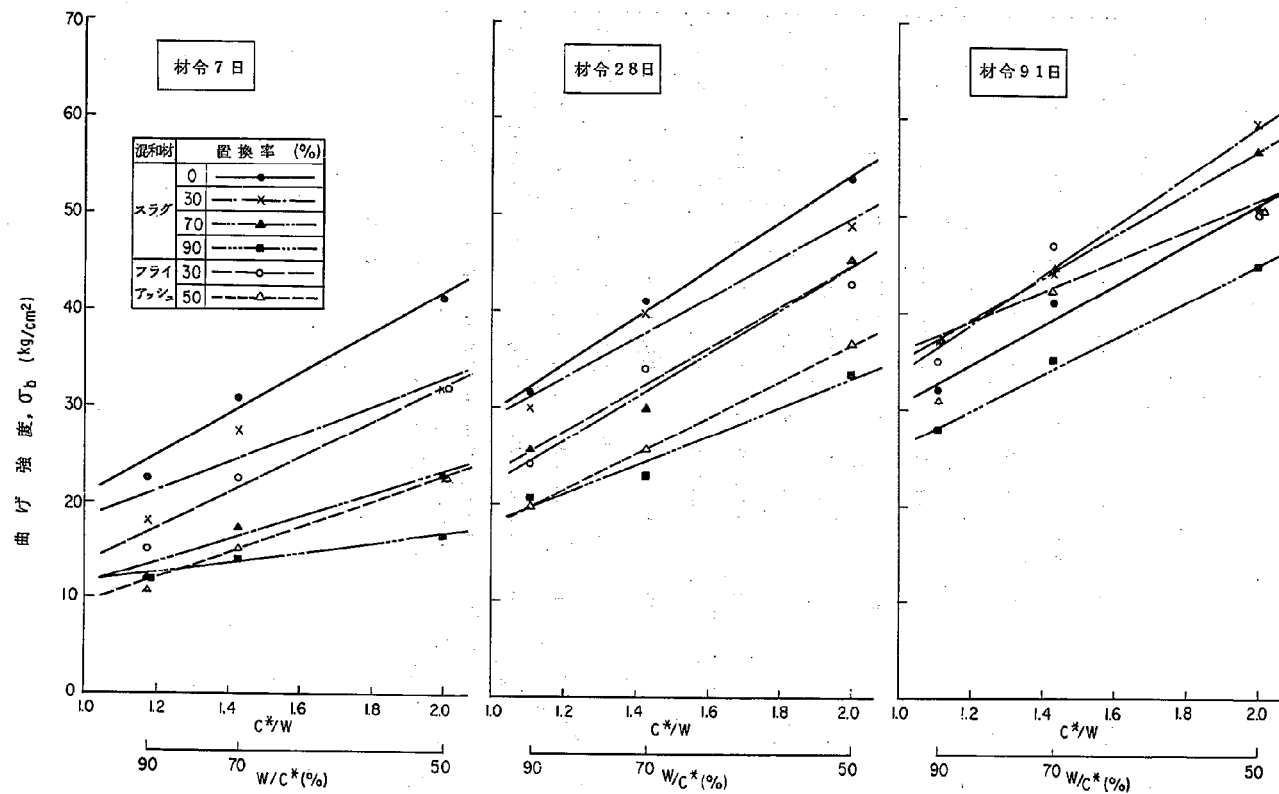


図-16. $C/W \sim \sigma_b$ 関係

表-27 C/W~ σ 関係

項 目	混和材	置換率 (%)	σ_7	σ_{28}	σ_{91}
圧縮強度	スラグ	0	182 C/W-86	231 C/W-90	239 C/W-71
		10	171 C/W-70	216 C/W-53	232 C/W-30
		30	124 C/W-28	203 C/W-47	205 C/W+23
		50	143 C/W-78	204 C/W-27	262 C/W-34
		70	90 C/W-41	145 C/W- 5	211 C/W-19
		90	68 C/W-23	115 C/W-33	138 C/W-38
		90*	114 C/W-29	103 C/W+119	127 C/W+159
	フライ アッシュ	10	182 C/W-92	209 C/W-64	245 C/W-51
		30	140 C/W-88	193 C/W-99	258 C/W-115
		50	98 C/W-68	161 C/W-97	214 C/W-91
曲げ強度	スラグ	0	20.8 C/W	24.6 C/W+4.9	20.8 C/W+9.8
		30	14.4 C/W+4.0	20.7 C/W+8.3	25.7 C/W+8.1
		70	11.6 C/W-0.1	22.6 C/W-0.5	22.1 C/W+12.9
		90	5.1 C/W+6.5	15.0 C/W+3.1	18.8 C/W+7.7
	フライ アッシュ	30	18.4 C/W-4.7	20.4 C/W+2.8	15.8 C/W+20.2
		50	13.1 C/W-3.6	18.9 C/W-1.2	21.2 C/W+9.3

90*: 人造石膏を添加して SO₃ を増加した特殊セメントを使用

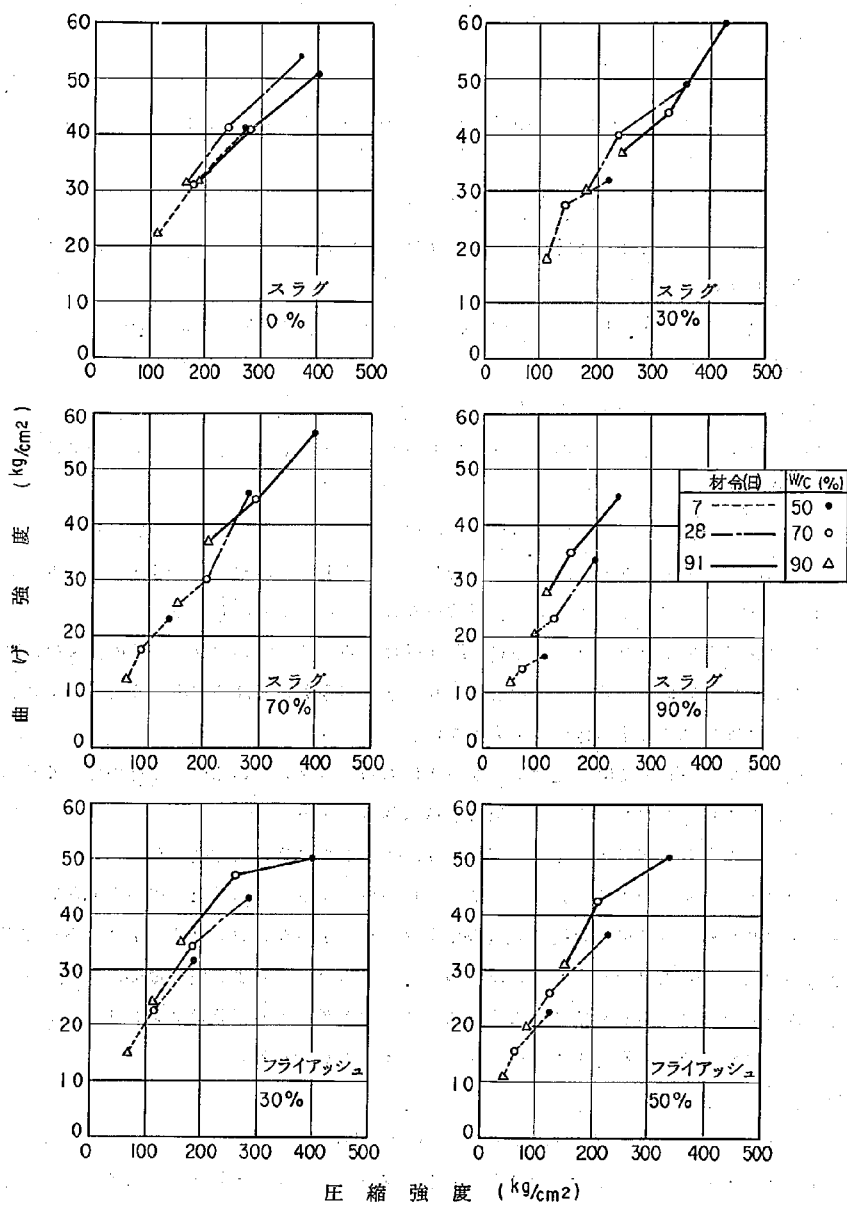


図-17. 圧縮強度と曲げ強度の関係

5. 試験結果の考察

5.1 スラグを用いたコンクリートのワーカビリティおよび空気連行性について

(1) ワーカビリティ

図-3および図-9より、つぎのことがわかる。

- 1) スランブを一定とした場合、スラグ置換率を90%まで高めても単位水量はほとんど変動しない。
- 2) フライアッシュを用いた場合は、置換率30~50%で単位水量は10~15% (20~30 Kg/m³) 減少する。

つぎに、図-7よりつぎのことがわかる。

- 1) 単位水量を一定とした場合、スラグ置換率を90%まで高めてもスランブはほとんど変動しない。
- 2) フライアッシュを用いた場合は、置換率の増加につれてスランブは増大し、置換率50%ではフライアッシュを用いない場合にくらべて1.5~2.0倍 (7~10 cm) 大きくなる。また、図-1, 図-2, 図-5および図-6よりつぎのことがわかる。
 - 1) スラグを用いたコンクリートの時間経過によるスランブおよび空気量の損失は、スラグを用いないコンクリート (置換率: 0%) と同等もしくはやや小さくなる傾向にあり、スラグ置換による悪影響は認められない。
 - 2) フライアッシュを用いたコンクリートにおけるスランブおよび空気量の経時変化も、スラグを用いたコンクリートの場合とほぼ同様である。

以上の結果より、普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換えたコンクリートの場合、フライアッシュで置換えたコンクリートにおけるような減水効果は認められないが、セメントの90%をスラグに置換えた場合でもスラグを用いないコンクリートにくらべて単位水量が増加することはない、また、時間経過によるスランブおよび空気量の損失もスラグを用いない場合と同等もしくはそれ以下であって、スラグによる置換はコンクリートのワーカビリティにはほとんど影響をおよぼさないとみることができる。

(2) 空気連行性

図-4, 図-8および図-10よりつぎのことがわかる。

- 1) 混和剤 (AE剤) 量を一定とした場合、スラグの置換率を増すにつれて連行空気量は減少する傾向がある。空気量は、スラグ置換率30%当り約1%減少し、置換率90%では約3%減少する。従って、スラグ置換率を大きくするほど所定の空気量を連行するた

めの混和剤量は増加し、置換率 90% の場合には置換率 0% の場合の約 50% 増しとする必要がある。

- 2) フライアッシュを用いたコンクリートの場合は、置換率の増加にともなう連行空気量の減少が著しく、置換率が 50% になると標準量の AE 剤では空気連行はほとんど期待できなくなる。置換率 50% の場合に所定の空気量を連行するためには、標準量の 2 倍前後の AE 剤を用いる必要がある。

以上の結果より、普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換えたコンクリートの場合、置換率の増加とともに空気連行性は低下するが、フライアッシュ置換の場合にくらべれば空気連行性ははるかに良いといえる。

5.2 スラグを用いたコンクリートの強度について

(1) 圧縮強度

図-11 および図-13 より、つぎのことがわかる。

- 1) スラグを用いたコンクリートの圧縮強度は、

- a) 材令 7 日では、スラグ置換率にはほぼ逆比例して低下している。
- b) 材令 28 日では、置換率 50% 程度まではスラグを用いない場合とほぼ同等で、置換率がそれ以上になると強度は急激に低下する。
- c) 材令 91 日では、置換率 50% 程度までは置換率の増大とともに圧縮強度は増大し、置換率がそれ以上になると強度は低下するが、置換率 70% でもスラグを用いない場合とほぼ同等の強度が得られる。置換率 90% の場合には、スラグを用いない場合にくらべて強度はほぼ半減している。

- 2) セメントとして、石膏を加えて SO_3 を増加した特殊成分のものをを用いた場合には、スラグ置換率 90% の場合でも材令 28 日以上ではスラグを用いないものと同等もしくはそれを上まわる強度が得られる。この、特殊セメント使用による強度増伸の効果は、水セメント比の大きい場合ほど顕著である。

- 3) フライアッシュを用いたコンクリートの場合は、材令にかかわらず置換率 10% 程度では圧縮強度は置換率 0% の場合とほぼ同等であるが、置換率がそれ以上になると置換率にはほぼ逆比例して強度は低下する。置換率 50% の場合、置換率 0% の場合にくらべて材令 28 日における圧縮強度は 50~60% 程度、材令 91 日では 80% 前後となっている。

また、図-14 および図-15 より、スラグおよびフライアッシュを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係は、混和材置換率や材令にかかわらずほぼ直線関係を保持していることがわかる。

(2) 曲げ強度

図-12 および図-13 より、つぎのことがわかる。

1) スラグを用いたコンクリートの曲げ強度は、

- a) 材令 7 日では、スラグ置換率にほぼ逆比例して強度は低下している。
- b) 材令 28 日では、スラグ置換率の増大とともに強度は低下するが、置換率 70 % 程度までは低下率は比較的ゆるやかである。
- c) 材令 91 日では、置換率 70 % までは置換率 0 % の場合よりも 10 ~ 20 % 大きくなり、置換率 90 % はやや低下するが、低下率は 10 % 程度である。

2) フライアッシュを用いたコンクリートの場合は、材令 7 日および材令 28 日では置換率にほぼ逆比例して曲げ強度は低下しているが、材令 91 日では置換率 50 % までの範囲で曲げ強度は置換率 0 % の場合とほぼ同等である。

また、図-16 より、スラグおよびフライアッシュを用いたコンクリートのセメント水比と曲げ強度との関係は、圧縮強度の場合と同じくほぼ直線関係にあることがわかる。

さらに、圧縮強度との相関をみると、図-17 より明らかなように、スラグまたはフライアッシュの置換率やコンクリートの材令にかかわらず、圧縮強度 300 Kg/cm^2 程度までの範囲において曲げ強度は圧縮強度のほぼ $1/6$ 程度となっていることがわかる。

以上の結果より、普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換えたコンクリートの強度についてまとめると、圧縮強度、曲げ強度とも、短期材令 (7 日) ではスラグ置換率が高いほど強度の発現が遅いが、長期材令 (91 日) ではスラグ置換率 70 % でもスラグを用いない場合とほぼ同程度の圧縮強度が得られ、セメントに石膏を補なって SO_3 を増加させた場合には、置換率 90 % でもスラグを用いない場合と同等ないしそれ以上の圧縮強度が得られること、また、曲げ強度は、スラグ置換率 70 % 程度までは長期材令においてスラグを用いない場合よりもやや大きな強度となり、スラグ置換率が 90 % の場合でもスラグを用いない場合と同程度にちかい強度が得られることがわかった。

フライアッシュを用いた場合と比較して、スラグの場合はセメントの置換率をかなり高めても強度をあまり損なわない点の一つの大きな利点といえる。

結 言

1 工場産の高炉水滓スラグ粉末を用いたコンクリートのワーカビリティおよび強度について試験を行なった結果、つぎのことが明らかになった。

- 1) 普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換えた場合、フライアッシュで置換えたコンクリートにみられるような単位水量減少の効果はほとんど認められないが、たとえばセメント重量の90%をスラグに置換えた場合でもスラグを用いないものにくらべて単位水量が増加することはなく、また、コンクリート練り混ぜ後の時間経過によるスランプおよび空気量の損失もスラグを用いないものと同等もしくはそれ以下であって、スラグによる置換を行なってもコンクリートのワーカビリティにはほとんど影響をおよぼさない。
- 2) 普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換えた場合、置換率の増加とともに空気連行性は低下するが、フライアッシュ置換の場合にくらべれば空気連行性はかなりよい。スラグ置換率90%の場合で、所定の連行空気量を得るための所要AE剂量は標準量の1.5倍程度である。
- 3) 普通ポルトランドセメントの一部をスラグで置換した場合、圧縮強度、曲げ強度ともスラグ置換率を大きくするほど材令7日程度の初期強度は低くなるが、材令91日程度の長期強度はスラグ置換率70%程度でもスラグを用いないものと同等もしくはそれ以上となり、置換率90%の場合でも曲げ強度は実用上十分な水準に達する。フライアッシュを用いた場合と比較して、スラグの場合はセメントとの置換率をかなり高めても強度をあまり損なわないことが大きな特徴である。
- 4) 普通ポルトランドセメントを用いる場合、スラグ置換率を90%とするとスラグを用いない場合にくらべて圧縮強度はほぼ半減するが、このような場合でも SO_3 分を増量することにより強度を著しく増伸させることが可能で、セメントとスラグの合計量に対して SO_3 分が約7%となるように調製したセメントを用いた本実験の場合には、置換率90%でも材令28日程度以上ではスラグを用いないものと同等もしくはそれを上回る強度が得られた。このような特殊セメント使用による強度増伸の効果は、水セメント比の大きい場合ほど顕著であった。

以上のことから、今回試験に用いたスラグについてみるかぎり、少なくともコンクリートのワーカビリティおよび強度の面からは、混和材としての多量使用が十分可能と考えられる。ただし、スラグを多量に用いた場合のコンクリートの耐久性、収縮性、熱的性質などについても明らかにする必要がある、当研究室では現在これらの試験の一部を実施中である。

今回、試験の対象としたスラグはわずか1工場の製品のみであるが、スラグ自体の品質によってそれをういたコンクリートの品質は大きく左右されと考えられるので、今後はさらにさまざまな品質のスラグについても調査をすすめ、全国各所に産するスラグ全般を対象とした、コンクリート用材料としての利用法を明らかにしてゆく必要があろう。