

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第3280号

土木研究所資料

ダムコンクリートの長期材齢強度に関する 実験的検討

平成6年5月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ダムコンクリートの長期材齢強度に関する実験的検討

ダム構造研究室 室 長 永山 功
主任研究員 渡辺 和夫
研 究 員 小沢 裕二
(前)研究員 大槻 英治*
(前)研究員 菊永 和久**

* 九州地方建設局熊本工事事務所

**九州地方建設局武雄工事事務所

要旨

近年、RCD工法が広く普及し、ダムコンクリートに使用するセメントの一部をフライアッシュで置換する例が増えてきている。フライアッシュを用いたコンクリートは、従来のコンクリートに比べて初期の強度発現が遅いが、長期的な強度の伸びが大きいという特徴を有している。そこで、本検討は、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートの長期材齢強度について検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：ダムコンクリート、フライアッシュ、長期材齢強度

はじめに

近年、コンクリートダムの合理化施工法としてRCD工法が広く普及している。RCD工法に用いる貧配合超硬練りのコンクリートをRCD用コンクリートというが、RCD用コンクリートではセメントの水和熱を抑制するため、セメントの一部をフライアッシュで置換することが一般的になっている。このようにセメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートでは、初期の強度発現は従来のコンクリートよりも遅いが、長期的な強度の伸びは従来のコンクリートよりも大きくなることが知られている。一方、ダムコンクリートの設計強度の基準材齢は91日としているが、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートについては、その長期的な強度の伸びを考慮して、基準材齢としてより長期材齢を採用した方が現実的かつ合理的ではないかとの意見がある。

そこで、本論文は、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートの長期材齢強度について検討した結果をとりまとめたものである。

目 次

はじめに

1. コンクリート供試体の試験	1
1.1 試験方法	1
1.2 試験結果	1
1.2.1 試験結果	1
1.2.2 フライアッシュ置換率と圧縮強度の伸びの関係	4
1.2.3 水結合材比と圧縮強度の伸びの関係	9
1.2.4 単位結合材量と圧縮強度の伸びの関係	14
1.3 試験結果の分析	17
1.3.1 結合材比と圧縮強度の関係	17
1.3.2 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係	23
1.3.3 結合材水比と圧縮強度の増加率の関係	26
1.3.4 フライアッシュ置換率と圧縮強度の増加率の関係	29
2. まとめ	32

1. コンクリート供試体の試験

1.1. 試験方法

試験を行った配合は、表－1.1に示すように水結合材比 $W/(C+F)$ を47.6%としたA配合、55.6%としたGⅠ配合、66.7%としたGⅡ配合、83.3%としたR配合の4種類とし、それぞれフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ を0、15、30、45%の4種類に設置した。なお、各配合は、骨材の最大寸法を150mmとした配合を40mmのふるいでウェットスクリーニングした配合を想定して設計した。また、元配合（骨材の最大寸法150mm）で単位水量を一定として設計したため、単位結合材量の関係でA配合、GⅠ配合、GⅡ配合は有スランブコンクリート、R配合はRCD用コンクリートとなった。また、GⅠ配合、GⅡ配合については、単位結合材量を2種類に設定し、単位結合材量の差がコンクリートの強度に及ぼす影響についても検討した。

コンクリート供試体は、有スランブコンクリート（A、GⅠ、GⅡ配合）についてはJIS A 1132に基づいて作製した。また、RCD用コンクリート（R配合）については、ボッシュタンパーを用いて、1層の締固め時間を15秒として3層に締固めて作製した。なお、作製した供試体は約20℃の水で水中養生した。

圧縮強度試験を実施する材齢は28日、91日、182日、365日（1年）、1095日（3年）の5材齢とし、各材齢において3本の供試体に対して圧縮強度試験を実施した。

なお、参考までにコンクリートの各材料の物性値を表－1.2に示す。

表－1.1 試験を実施した配合

配合名	骨材最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	フライアッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)			
					水	結合材	細骨材	粗骨材
A	40	47.6	0, 15, 30, 45	42.6	150	315	825～850	1114～1147
GⅠ	40	55.6	0, 15, 30, 45	42.6	150	270	843～865	1139～1167
GⅠ'	40	55.6	0, 15, 30, 45	42.6	161	290	829～845	1119～1140
GⅡ	40	66.7	0, 15, 30, 45	42.6	150	225	862～879	1164～1188
GⅡ'	40	66.7	0, 15, 30, 45	42.6	163	245	843～857	1139～1157
R	40	83.3	0, 15, 30, 45	41.4	120	144	904～916	1281～1298

表－1.2 材料の物性

セメント	中庸熟ポルトランドセメント、比重：3.21、比表面積：3700cm²/g
フライアッシュ	常磐共同勿来発電所産、比重：2.08、比表面積：3020cm²/g 強熱減量：2.1%、単位水量比：98% 圧縮強度比（28日）：73%、（91日）：88%
細骨材	笠間産の砂岩、比重：2.68、吸水率：0.39%
粗骨材	笠間産の砂岩、比重：2.61、吸水率：0.68%

1.2. 試験結果

1.2.1. 試験結果

試験結果の一覧表を表－1.3に示す。

表-1.3 圧縮強度試験結果

(a) A配合 (水結合材比: 47.6%)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kgf / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	406	385	463	453	541	525	550	598	531	542
	346		420		553		610		570	
	404		476		481		634		526	
15	298	309	433	424	456	478	616	636	600	618
	330		419		482		659		631	
	298		420		498		632		621	
30	278	272	352	365	434	441	607	617	671	672
	270		365		434		602		684	
	268		377		456		641		661	
45	179	182	238	248	347	350	510	527	562	594
	183		255		358		525		598	
	184		251		345		546		624	

(b) G I 配合 (水結合材比: 55.6%)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kg f / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	323	313	376	390	441	442	492	476	461	463
	295		398		438		461		472	
	321		396		447		476		456	
15	249	254	305	333	411	406	526	525	529	534
	251		340		416		532		533	
	261		356		392		517		539	
30	214	208	263	269	357	331	465	462	505	536
	207		277		305		466		551	
	203		266		333		456		553	
45	147	142	191	191	279	275	425	430	505	530
	142		190		265		436		529	
	138		193		282		428		556	

(c) G I' 配合 (水結合材比: 55.6%)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kgf / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	256	265	319	335	425	411	462	459	440	458
	265		338		399		452		473	
	273		349		408		462		443	
30	159	164	225	225	331	337	486	469	532	524
	162		225		347		447		533	
	172		224		333		475		508	

(d) GⅡ配合 (水結合材比 : 66.7 %)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kgf / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	197	197	264	265	299	309	341	336	316	341
	197		270		321		322		340	
	197		262		307		345		367	
15	160	160	215	219	271	290	357	355	368	362
	162		230		302		364		347	
	158		212		296		345		372	
30	122	118	166	169	267	258	357	349	379	380
	116		171		253		340		386	
	116		170		254		350		375	
45	75	77	114	114	186	179	323	330	395	403
	77		113		175		337		410	
	79		115		177		330		405	

(e) GⅡ'配合 (水結合材比 : 66.7 %)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kgf / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	188	192	284	276	331	333	378	369	370	367
	197		270		329		374		366	
	193		275		338		355		365	
30	117	115	154	152	239	238	338	336	380	387
	112		154		239		318		388	
	117		149		236		353		392	

(f) R配合 (水結合材比 : 83.3 %)

フライアッシュ置換率 (%)	材齢28日		材齢91日		材齢182日		材齢365日		材齢1095日	
	圧縮強度 (kgf / cm ²)									
	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
0	156	142	191	189	225	215	243	232	246	235
	137		194		221		229		234	
	134		181		198		223		225	
15	118	116	167	162	201	196	248	247	265	267
	112		160		191		244		263	
	117		160		196		249		274	
30	83	87	125	128	167	168	228	227	277	279
	87		129		168		219		279	
	90		129		169		234		280	
45	64	68	97	98	136	134	225	221	278	276
	72		99		132		218		289	
	69		99		133		220		263	

1.2.2. フライアッシュ置換率と圧縮強度の伸びの関係

図-1.1はA配合の圧縮強度試験結果を示したものである。図によれば、材齢182日まではフライアッシュ置換率が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示しているが、材齢1年以降はフライアッシュ置換率が高い配合ほど圧縮強度が大きくなる傾向を示している。また、図-1.2は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。図によれば、フライアッシュ置換率が高い配合ほど材齢91日以降の強度増加が大きく、例えば、フライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ が45%の配合では、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は2.4倍になっている。一方、フライアッシュ置換率が $F/(C+F)$ 0%および15%の配合では、材齢1年以降の圧縮強度の伸びはほとんど認められない。

次に、図-1.3はG I配合の圧縮強度試験結果を示したものである。A配合の結果と同様に、材齢182日まではフライアッシュ置換率が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示しているが、材齢1年以降はフライアッシュ置換率が高い配合ほど圧縮強度が大きくなる傾向を示している。また、図-1.4は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。A配合の結果と同様に、フライアッシュ置換率が高い配合ほど材齢91日以降の強度増加が大きく、例えば、フライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ が45%の配合では、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は2.8倍になっている。一方、フライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ が0%および15%の配合では、材齢1年以降の圧縮強度の伸びはほとんど認められない。

さらに、図-1.5、図-1.6はG II配合の圧縮強度試験結果、図-1.7、図-1.8はR配合の圧縮強度試験結果を示したものである。この場合も、A配合、G I配合の場合と同様な結果が得られている。

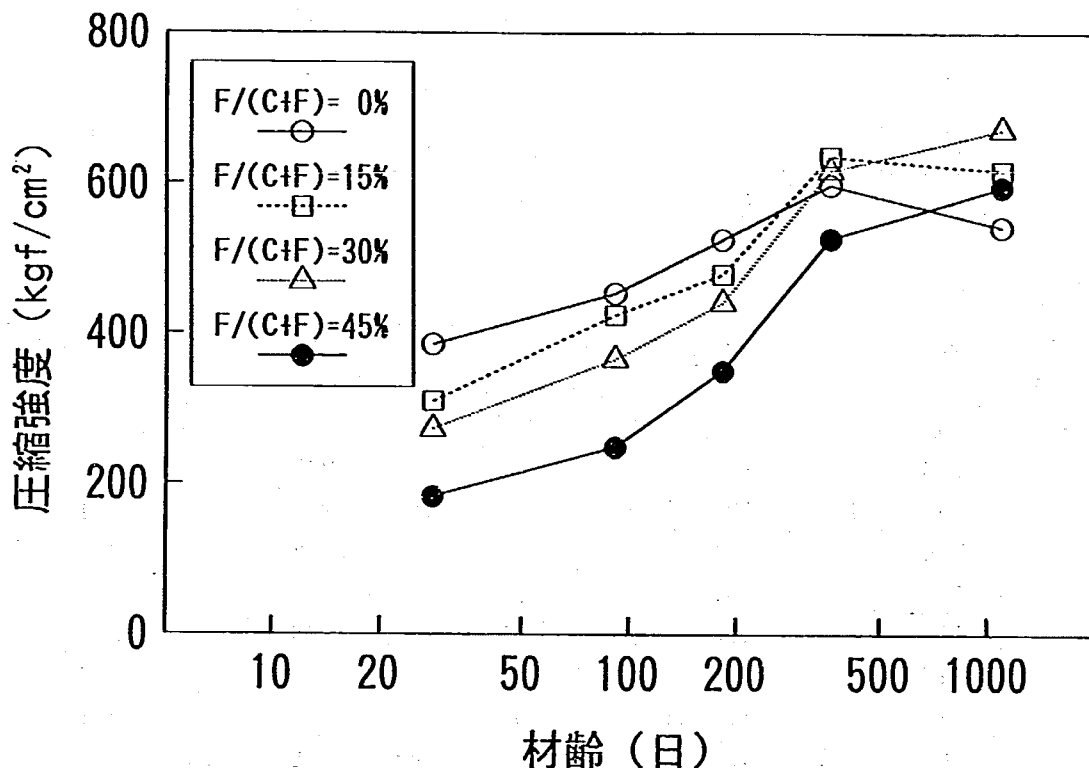
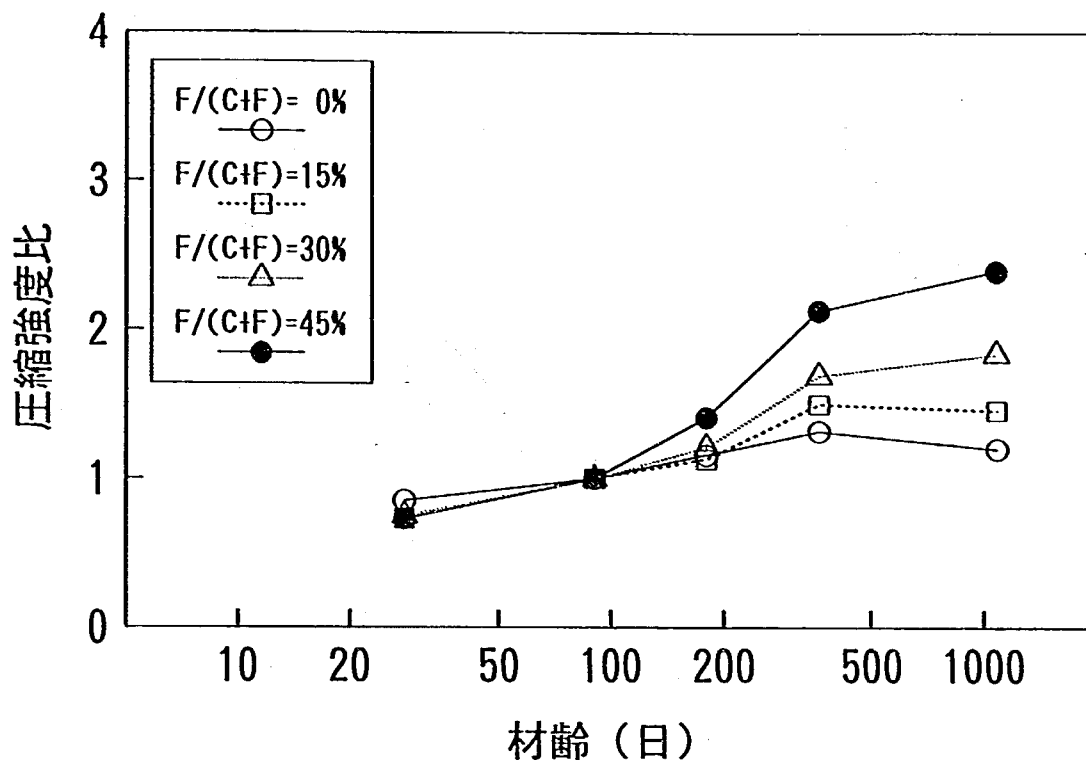
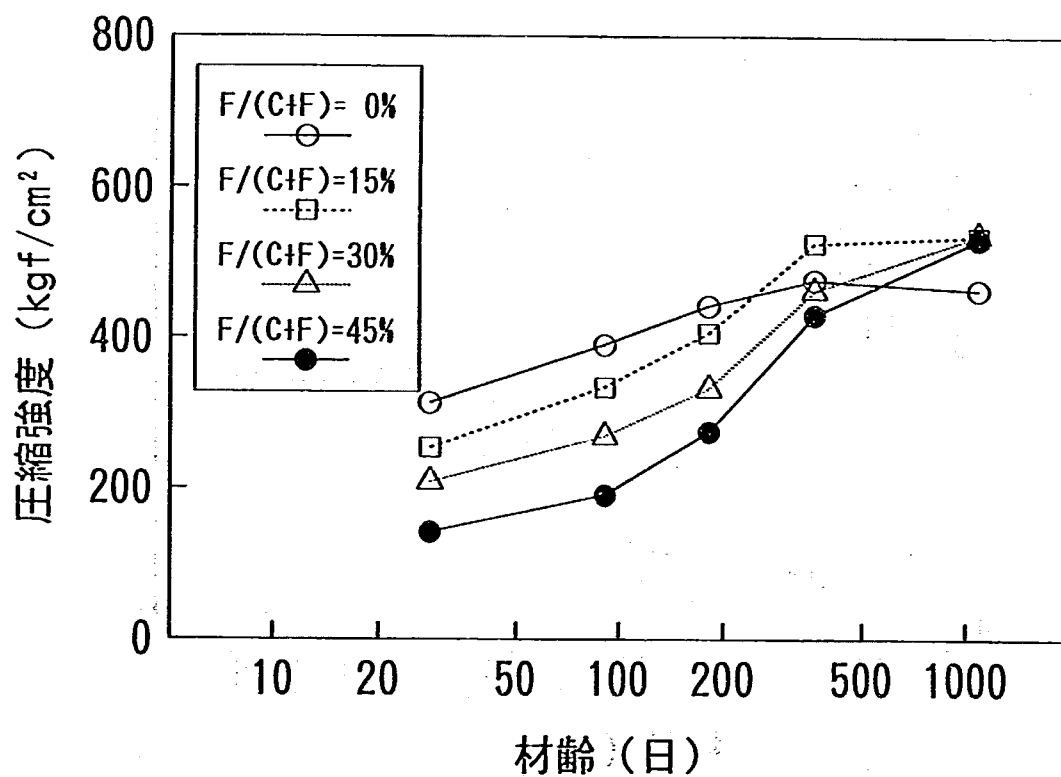


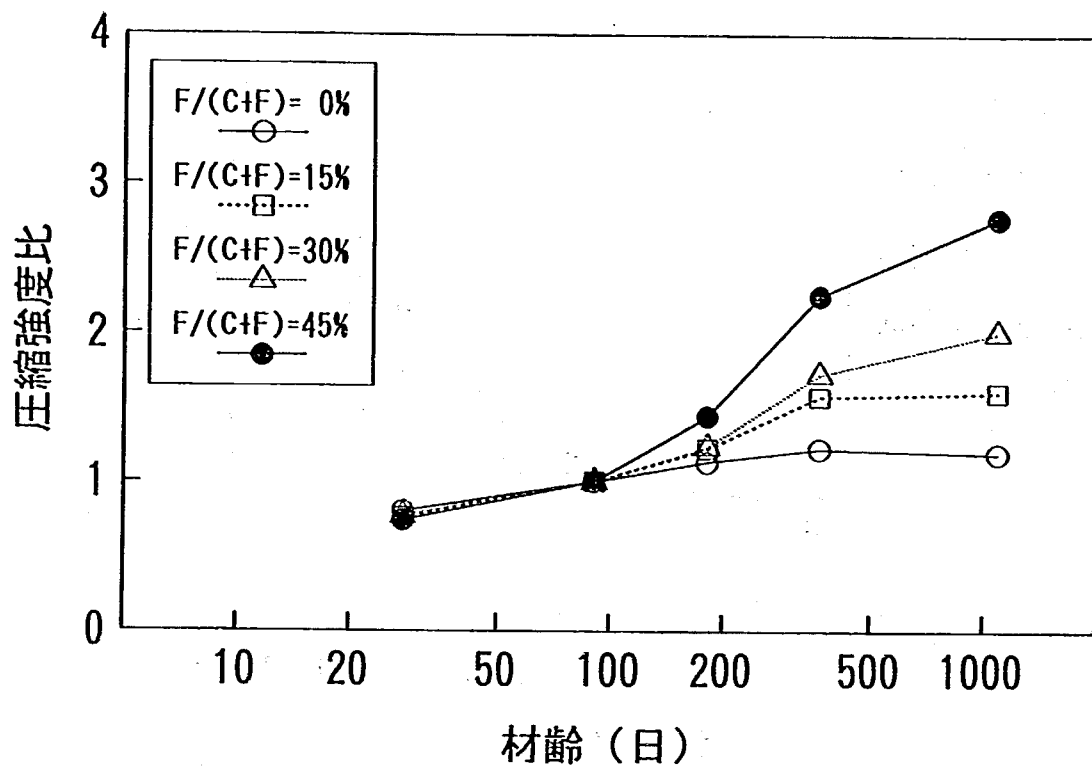
図-1.1 材齢と圧縮強度の関係
A配合 ($W/(C+F) = 47.6\%$)



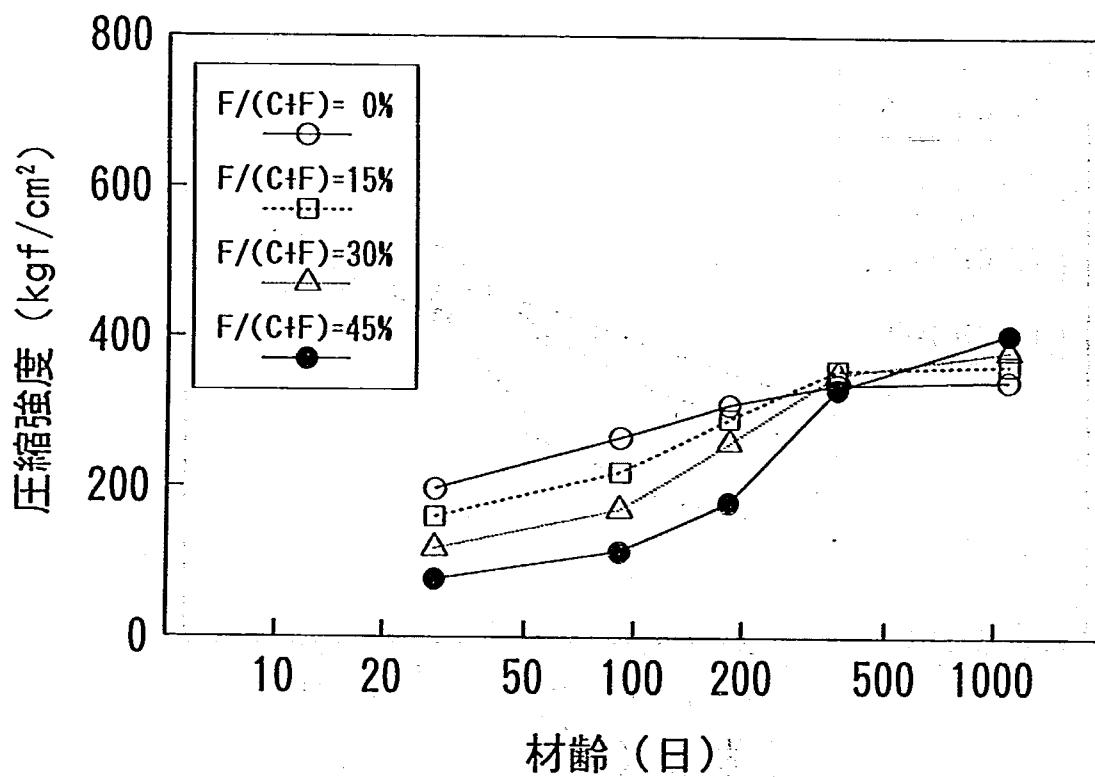
図一 1.2 材齢と圧縮強度比の関係
A配合 ($W/(C+F) = 47.6\%$)



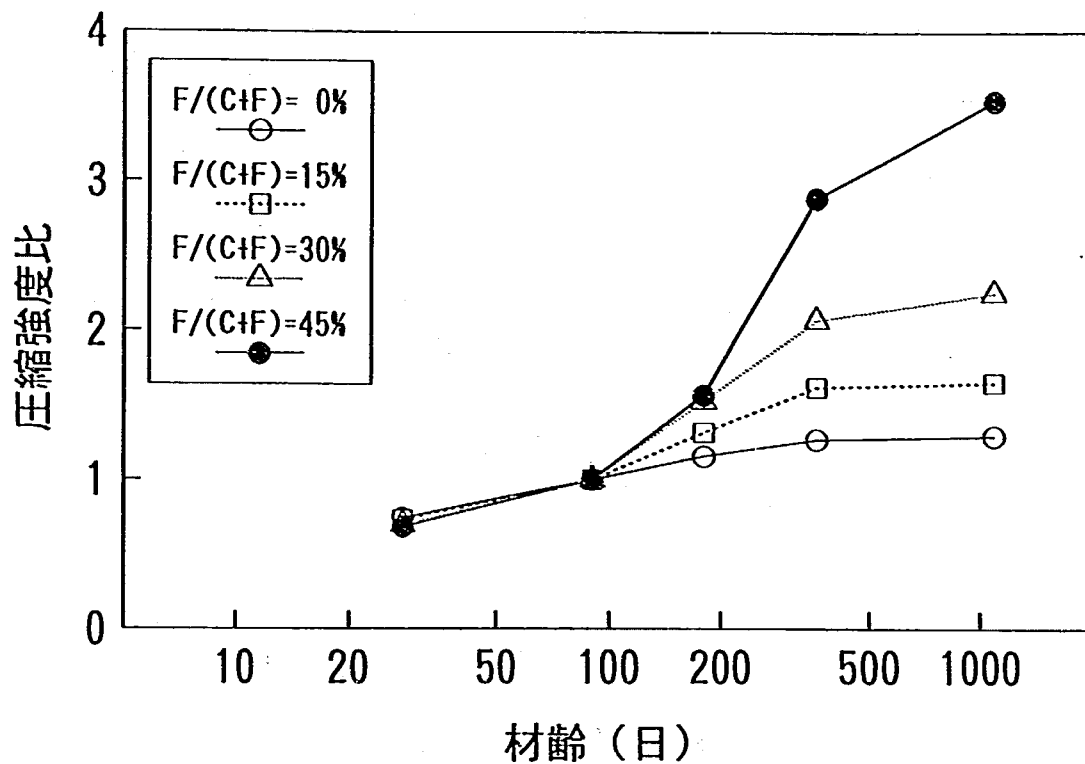
図一 1.3 材齢と圧縮強度の関係
G I 配合 ($W/(C+F) = 55.6\%$)



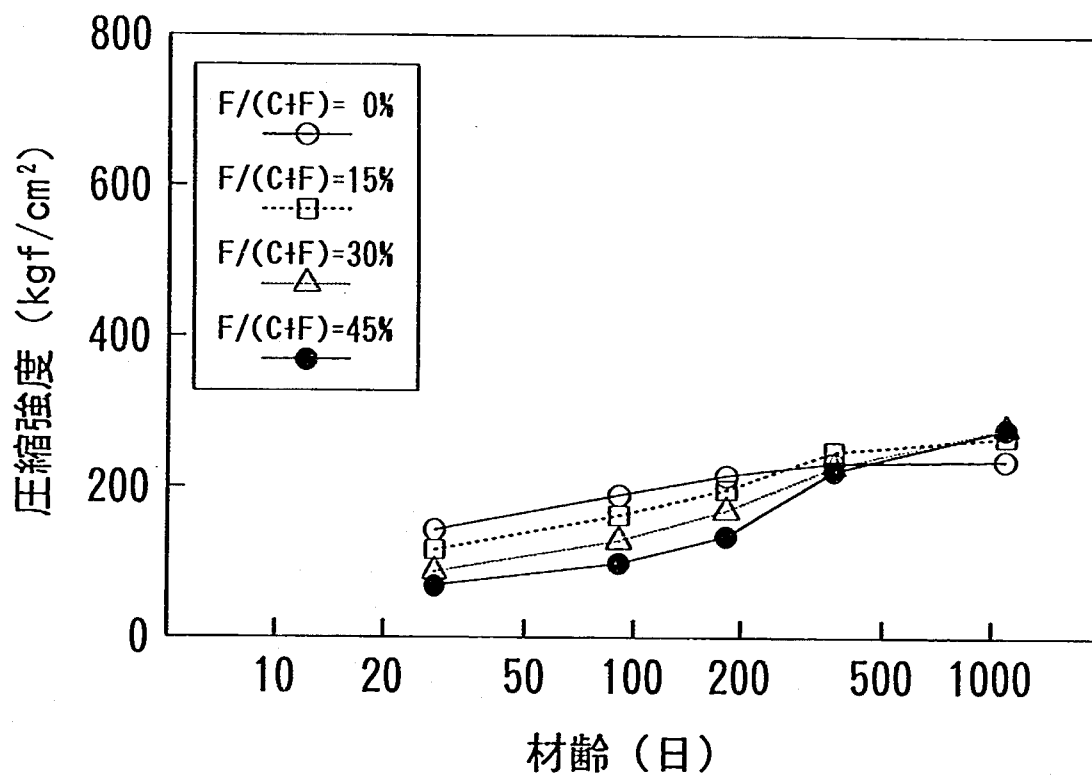
図一 1.4 材齢と圧縮強度比の関係
G I 配合 ($W/(C+F) = 55.6\%$)



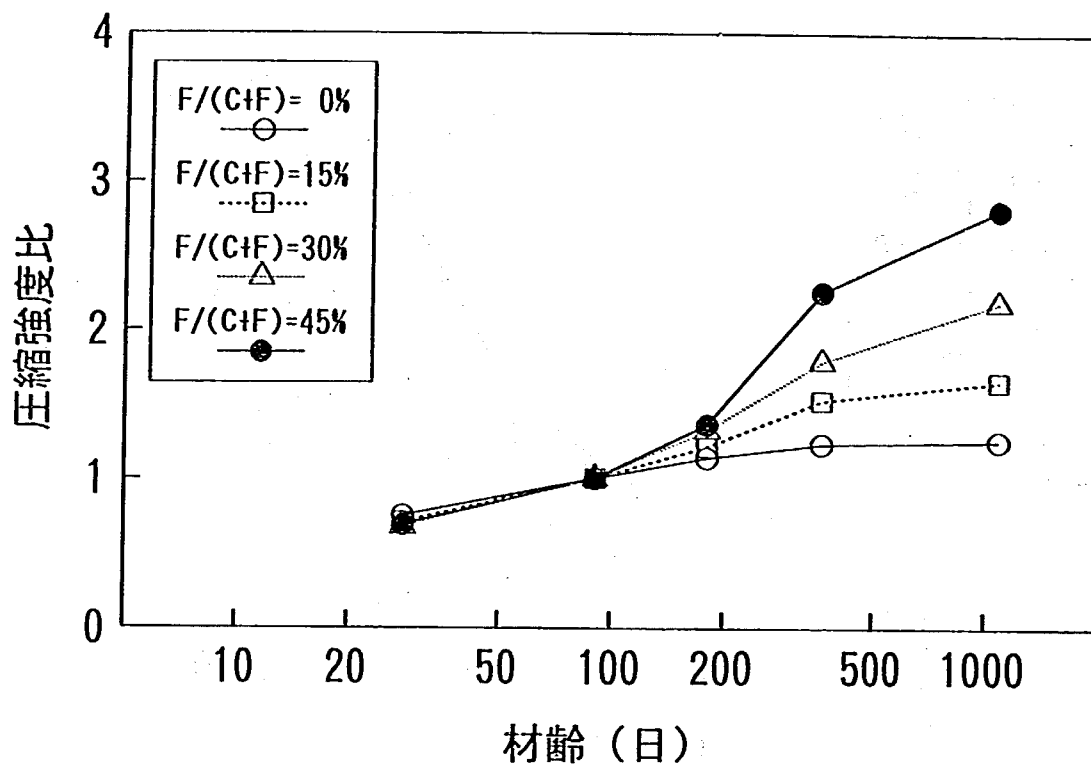
図一 1.5 材齢と圧縮強度の関係
G II 配合 ($W/(C+F) = 66.7\%$)



図一 1.6 材齢と圧縮強度比の関係
G II 配合 ($W/(C+F) = 66.7\%$)



図一 1.7 材齢と圧縮強度の関係
R 配合 ($W/(C+F) = 83.3\%$)



図一 1.8 材齢と圧縮強度比の関係
R配合 ($W/(C+F) = 83.3\%$)

1.2.3. 水結合材比と圧縮強度の伸びの関係

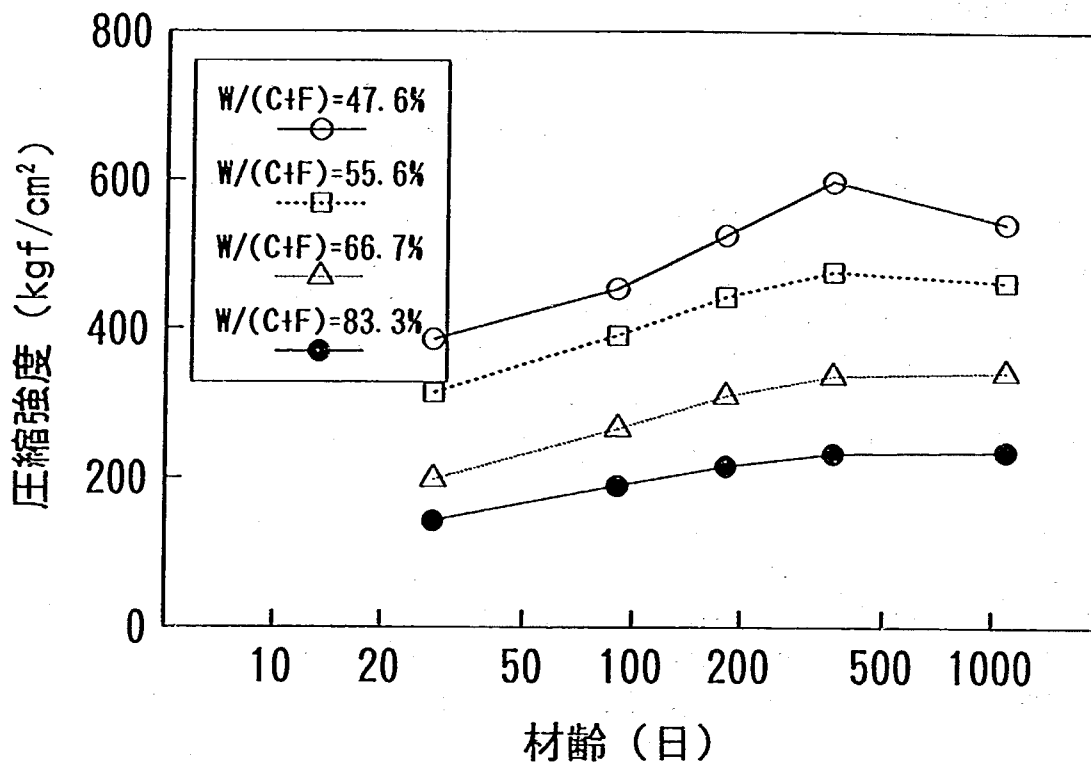
図-1.9はフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ を0%とした各配合(A、G I、G II、R配合)の圧縮強度試験結果を示したものである。図によれば、いずれの材齢においても水結合材比が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示している。また、図-1.10は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。図によれば、圧縮強度の伸びは水結合材比の大小に係わらず概ね一定となっている。なお、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は1.2～1.3倍である。

次に、図-1.11はフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ を15%とした各配合の圧縮強度試験結果を示したものである。フライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ が0%の場合と同様に、いずれの材齢においても水結合材比が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示している。また、図-1.12は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。図によれば、圧縮強度の伸びは水結合材比の大小に係わらず概ね一定となっている。なお、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は1.5～1.7倍である。

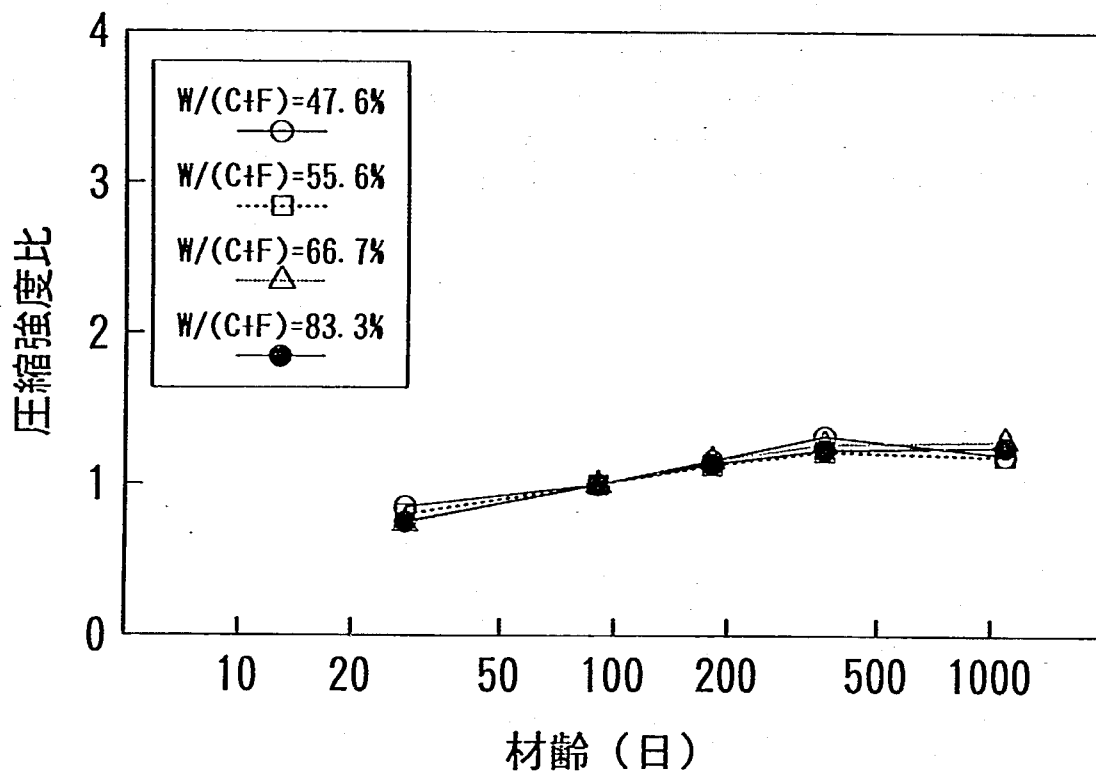
次に、図-1.13はフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ を30%とした各配合の圧縮強度試験結果を示したものである。上記の場合と同様に、いずれの材齢においても水結合材比が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示している。また、図-1.14は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。図によれば、圧縮強度の伸びに配合による差が認められるように見えるが、水結合材比と圧縮強度の相関関係は必ずしも明確でなく、実験誤差の可能性も考えられる。なお、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は1.8～2.3倍である。

次に、図-1.15はフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ を45%とした各配合の圧縮強度試験結果を示したものである。上記の場合と同様に、いずれの材齢においても水結合材比が小さい配合ほど大きな圧縮強度を示している。また、図-1.16は材齢91日の圧縮強度を基準として各材齢時の圧縮強度の比率を示したものである。図によれば、圧縮強度の伸びに配合による差が認められるように見えるが、図-1.15によれば、水結合材比 $W/(C+F)$ 66.7%の配合の材齢91日の圧縮強度がたまたま小さくなっており図-1.16の水結合材比 $W/(C+F)$ の結果はそれを反映したものと考えられる。したがって、配合の違いによる圧縮強度の伸びの差は図-1.14の場合と同様に、実験誤差の可能性も考えられる。なお、材齢91日の圧縮強度に比べて材齢3年の圧縮強度は2.4～3.5倍である。

なお、これらの関係については、1.3.4節において改めて考察する。



図一 1.9 材齢と圧縮強度の関係
 $F/(C+F) = 0\%$



図一 1.10 材齢と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F) = 0\%$

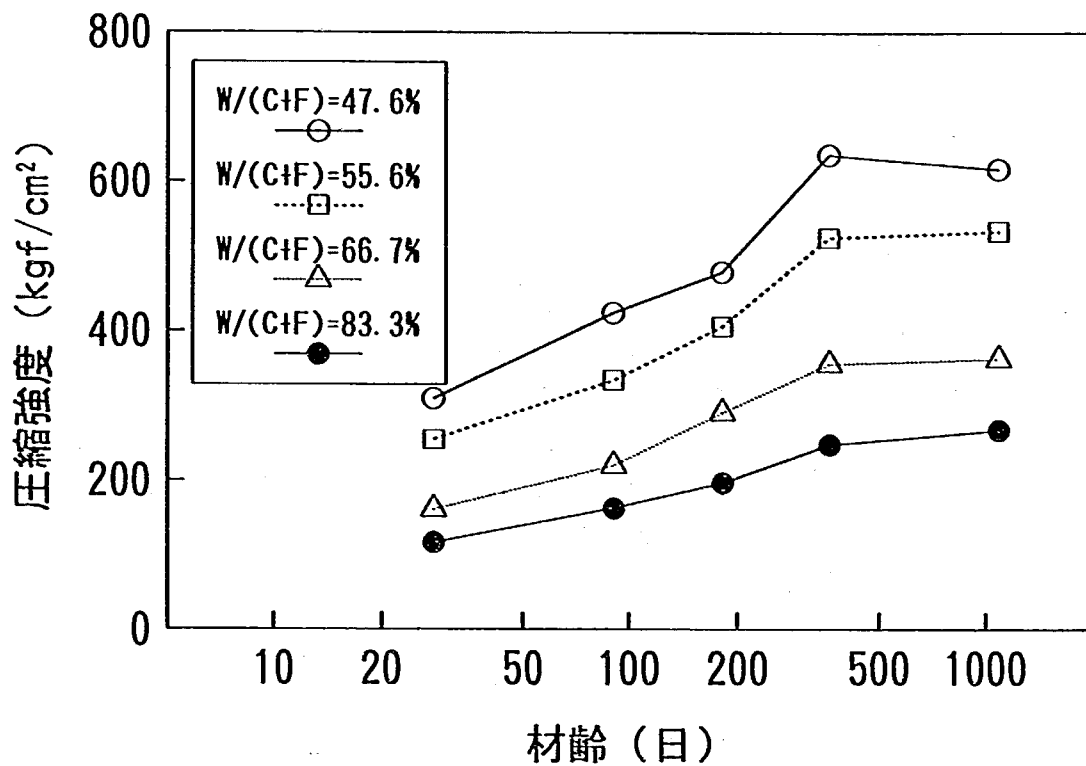


図- 1.11 材齢と圧縮強度の関係
 $F/(C+F) = 15\%$

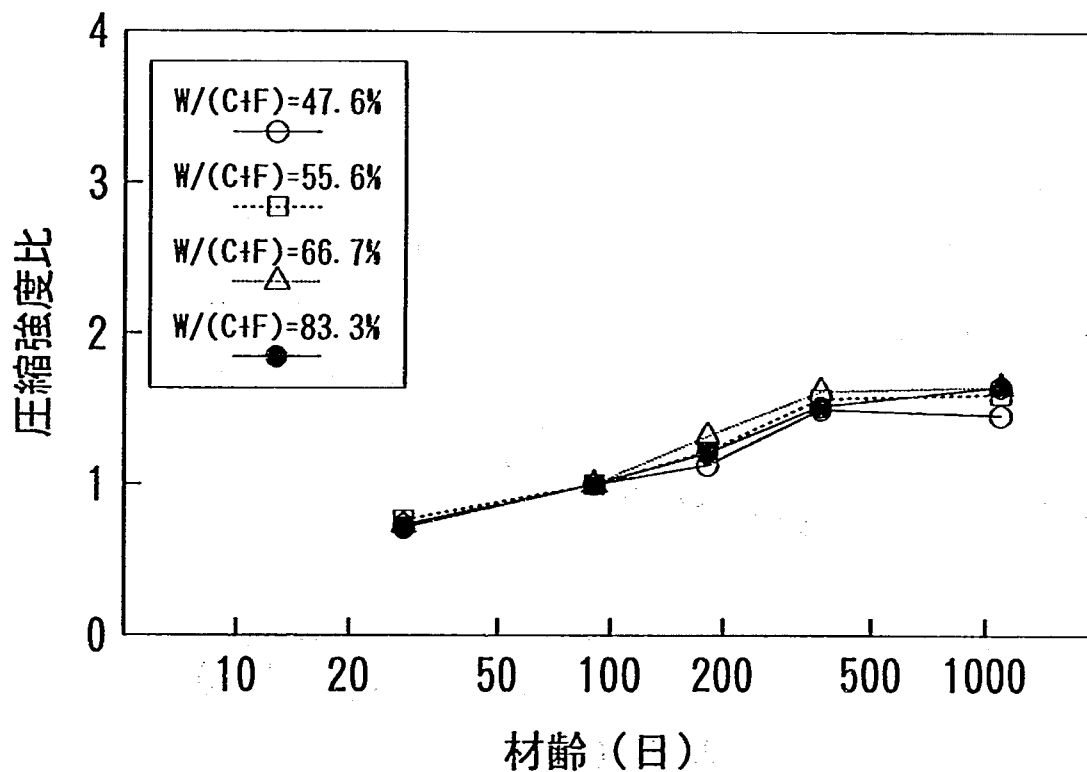
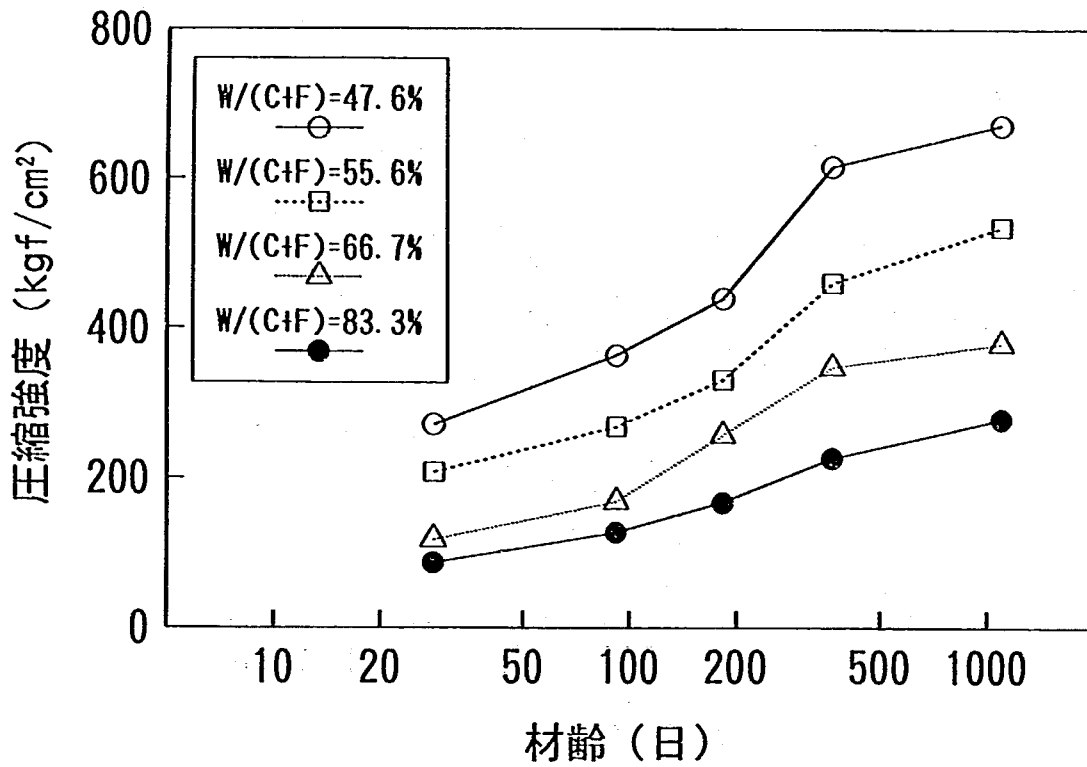
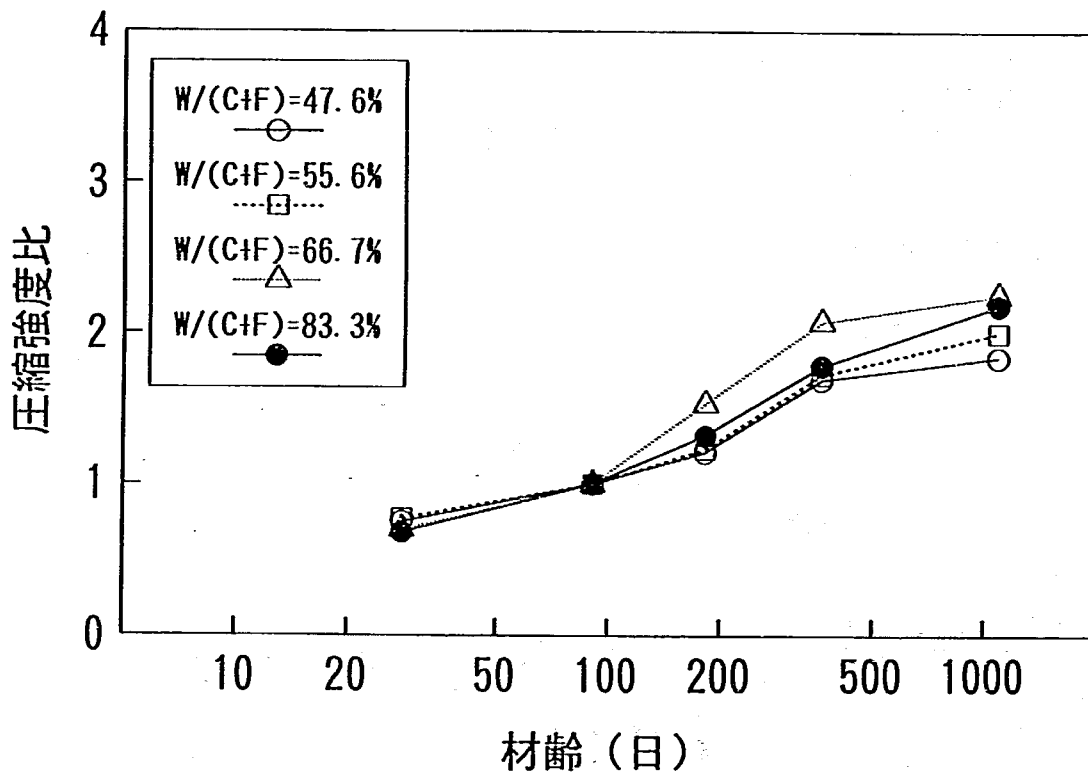


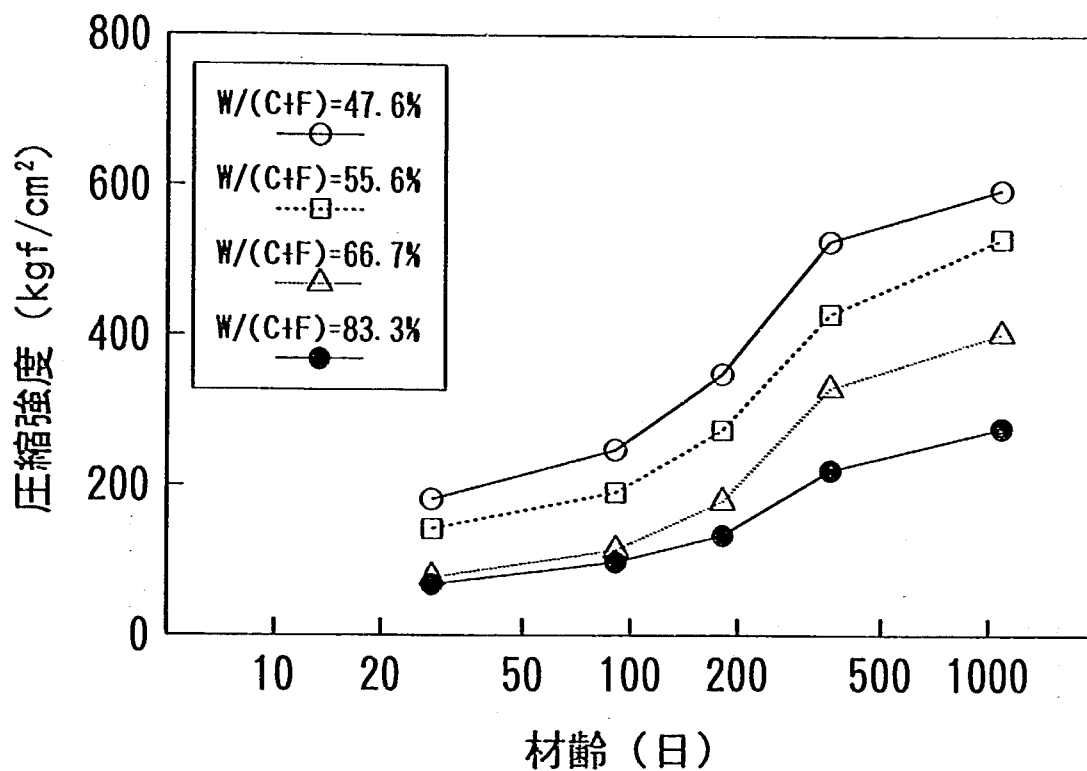
図- 1.12 材齢と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F) = 15\%$



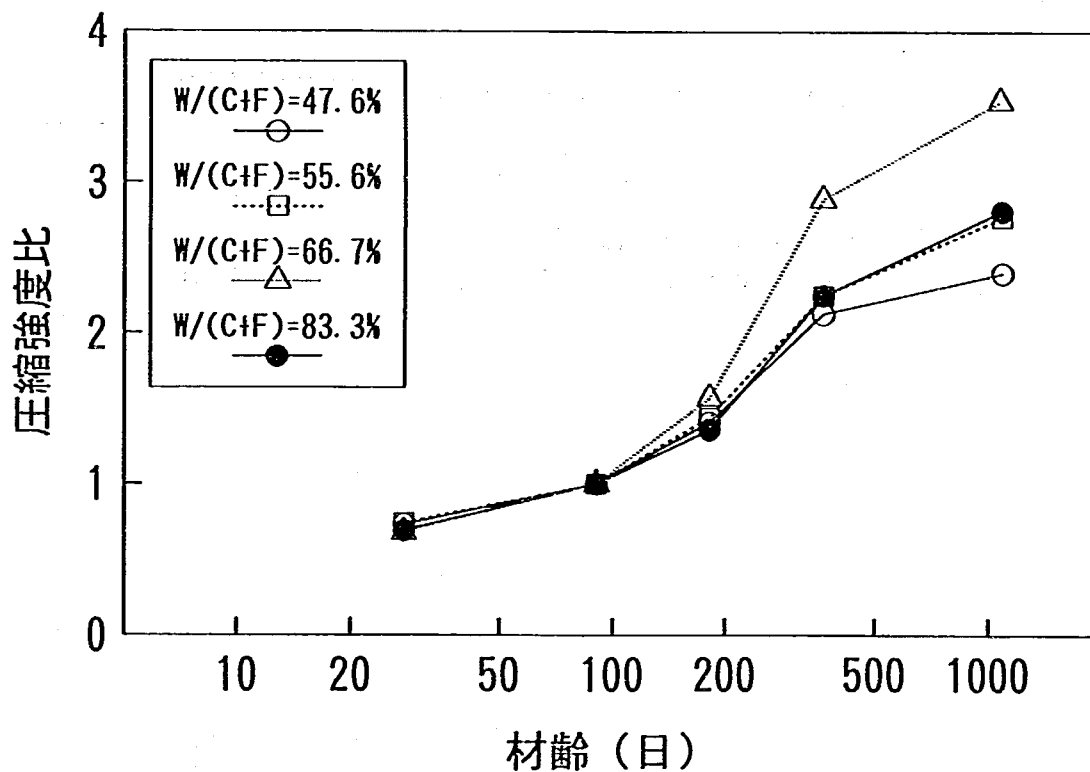
図一 1.13 材齢と圧縮強度の関係
F/(C+F)=30%



図一 1.14 材齢と圧縮強度比の関係
F/(C+F)=30%



図一 1.15 材齢と圧縮強度の関係
 $F/(C+F) = 45\%$



図一 1.16 材齢と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F) = 45\%$

1.2.4. 単位結合材量と圧縮強度の伸びの関係

図-1.17、図-1.18は水結合材比 $W/(C+F)$ を55.6%として単位結合材量を変化させた配合(G I、G I' 配合)の圧縮強度試験結果を示したものである。また、図-1.19、図-1.20は水結合材比 $W/(C+F)$ を66.7%として単位結合材量を変化させた配合(G II、G II' 配合)の圧縮強度試験結果を示したものである。水結合材比 $W/(C+F)$ が55.6%の場合に初期材齢で若干の強度差が生じているが、これは実験誤差による可能性が高く、これを除くと、単位結合材量の差による圧縮強度の差は認められない。

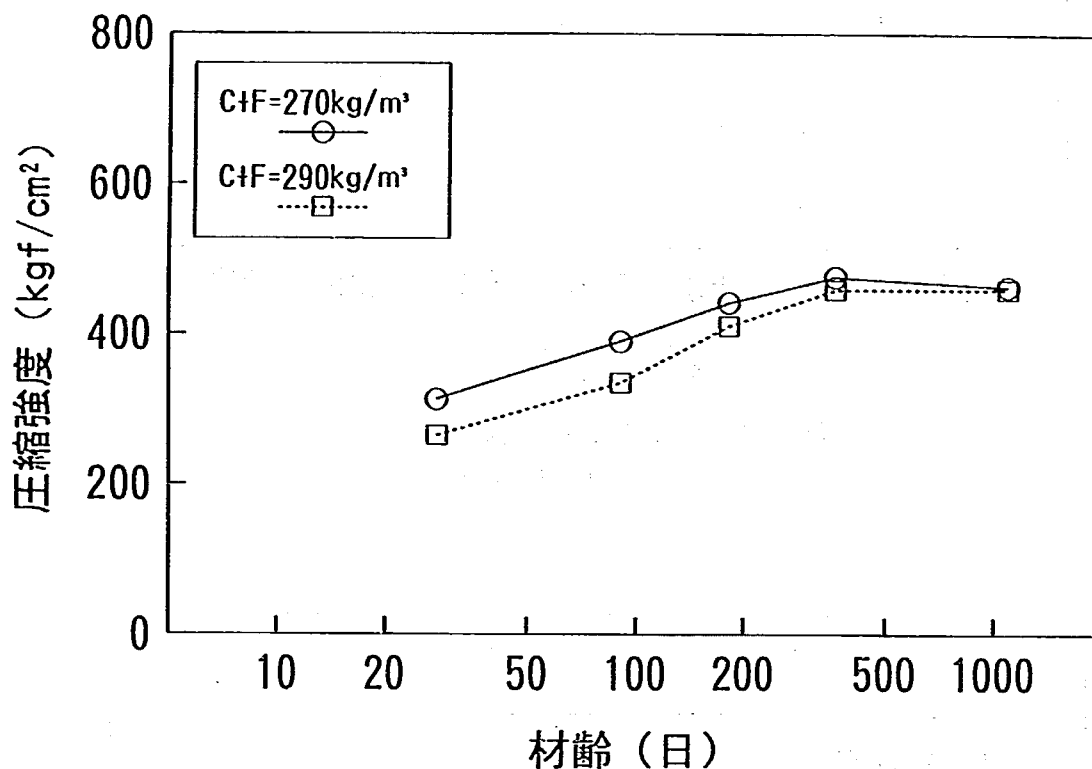


図-1.17 単位結合材量と圧縮強度の関係

G I 配合 ($W/(C+F)=55.6\%$ 、 $F/(C+F)=0\%$)

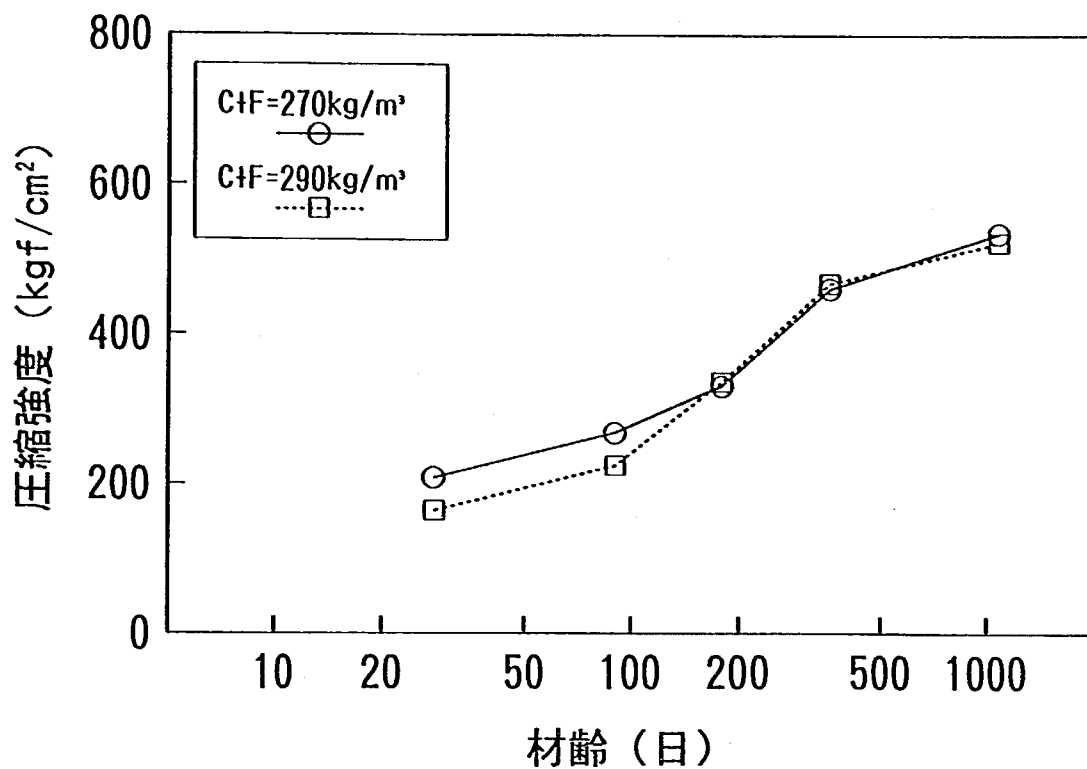


図-1.18 単位結合材量と圧縮強度の関係
G I 配合 ($W/(C+F)=55.6\%$ 、 $F/(C+F)=30\%$)

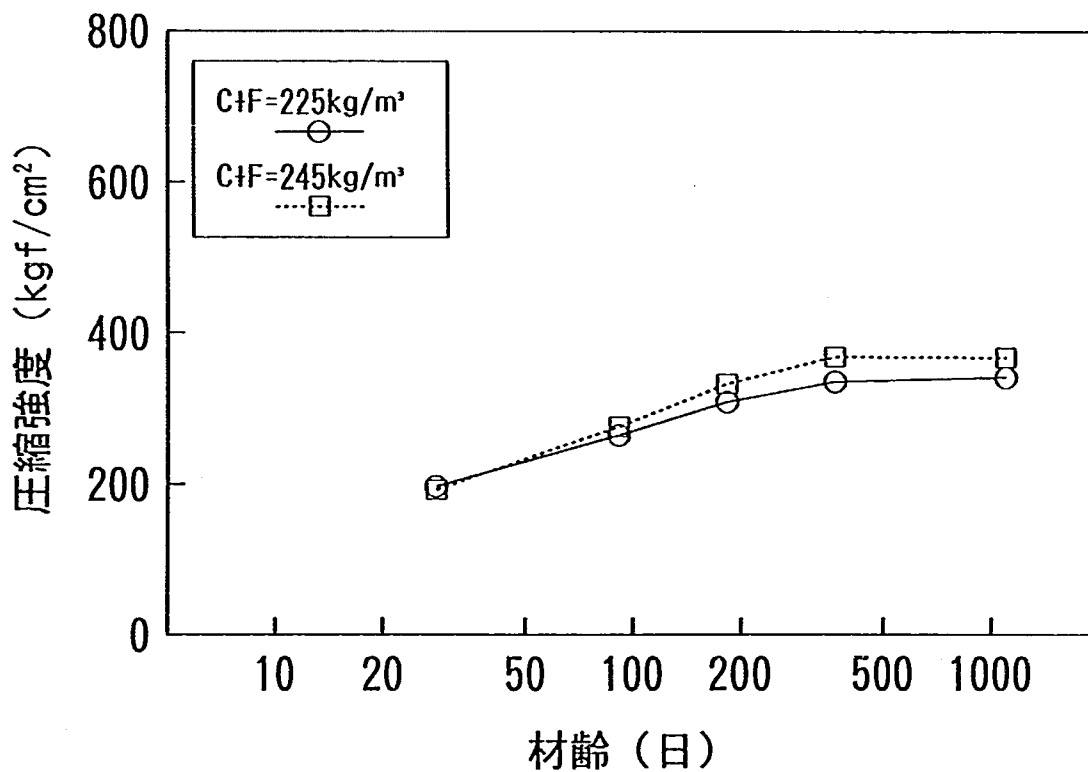
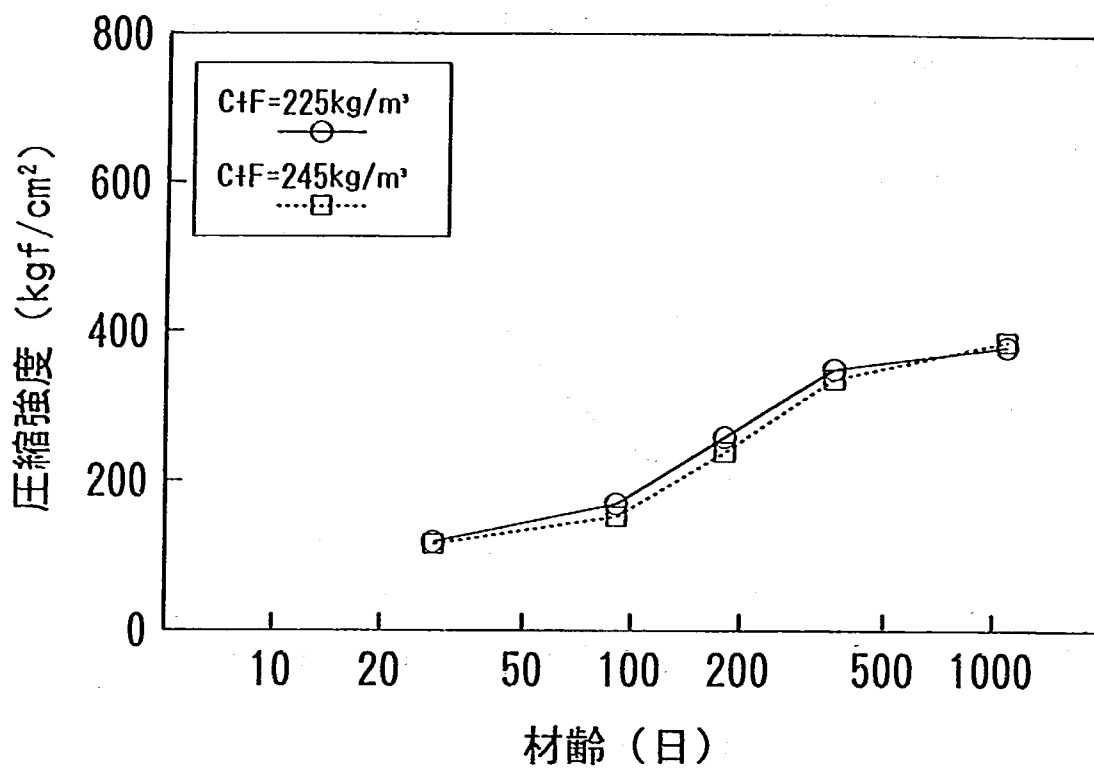


図-1.19 単位結合材量と圧縮強度の関係
G II 配合 ($W/(C+F)=66.7\%$ 、 $F/(C+F)=0\%$)



図一 1.20 単位結合材量と圧縮強度の関係
 G II 配合 ($W/(C+F) = 66.7\%$ 、 $F/(C+F) = 30\%$)

1.3. 試験結果の分析

1.3.1. 結合材水比と圧縮強度の関係

図-1.21～図-1.24は、それぞれのフライアッシュ置換率毎に結合材水比と圧縮強度の関係を示したものである。いずれのフライアッシュ置換率、材齢においても、結合材水比と圧縮強度の関係は線形関係にある。すなわち、水セメント比の法則は、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートに対しても、材齢の大小に係わらず成立することが分かる。なお、それぞれの状態におけるフライアッシュ置換率 $F/(C+F)$ と圧縮強度 f_c の回帰式を求めると、次のようになる。

①フライアッシュ置換率 $F/(C+F) = 0\%$ の場合

$$\begin{aligned}\text{材齢28日} &: f_c = 281.7 (C+F) / W - 205.3 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢91日} &: f_c = 305.9 (C+F) / W - 180.5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢182日} &: f_c = 354.7 (C+F) / W - 212.5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢365日} &: f_c = 413.1 (C+F) / W - 271.1 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢1095日} &: f_c = 348.0 (C+F) / W - 178.9 \quad (\text{kgf/cm}^2)\end{aligned}\tag{1.1}$$

②フライアッシュ置換率 $F/(C+F) = 15\%$ の場合

$$\begin{aligned}\text{材齢28日} &: f_c = 224.2 (C+F) / W - 160.5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢91日} &: f_c = 299.9 (C+F) / W - 210.1 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢182日} &: f_c = 321.6 (C+F) / W - 187.9 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢365日} &: f_c = 445.2 (C+F) / W - 293.9 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢1095日} &: f_c = 407.1 (C+F) / W - 226.6 \quad (\text{kgf/cm}^2)\end{aligned}\tag{1.2}$$

③フライアッシュ置換率 $F/(C+F) = 30\%$ の場合

$$\begin{aligned}\text{材齢28日} &: f_c = 215.3 (C+F) / W - 184.1 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢91日} &: f_c = 270.2 (C+F) / W - 213.3 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢182日} &: f_c = 297.9 (C+F) / W - 191.8 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢365日} &: f_c = 427.4 (C+F) / W - 291.5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢1095日} &: f_c = 445.4 (C+F) / W - 268.2 \quad (\text{kgf/cm}^2)\end{aligned}\tag{1.3}$$

④フライアッシュ置換率 $F/(C+F) = 45\%$ の場合

$$\begin{aligned}\text{材齢28日} &: f_c = 135.4 (C+F) / W - 106.1 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢91日} &: f_c = 175.4 (C+F) / W - 126.6 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢182日} &: f_c = 248.3 (C+F) / W - 175.2 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢365日} &: f_c = 339.2 (C+F) / W - 182.8 \quad (\text{kgf/cm}^2) \\ \text{材齢1095日} &: f_c = 360.2 (C+F) / W - 143.2 \quad (\text{kgf/cm}^2)\end{aligned}\tag{1.4}$$

ここで、これらの回帰式の係数はフライアッシュ置換率の関数と考えられる。そこで、この係数をその形から2次式で回帰すると、次式が得られる。

①材齢28日：

$$f_c = [275.7 - 187 F / (C+F) - 249 \{ F / (C+F) \}^2] (C+F) / W - [196.8 - 17 F / (C+F) - 369 \{ F / (C+F) \}^2] \quad (\text{kgf/cm}^2)\tag{1.5}$$

②材齢91日：

$$f_c = [303.8 + 163 F / (C+F) - 987 \{ F / (C+F) \}^2] (C+F) / W - [177.3 + 476 F / (C+F) - 1292 \{ F / (C+F) \}^2] \quad (\text{kgf/cm}^2)\tag{1.6}$$

③材齢182日：

$$f_c = [352.9 - 146 F / (C+F) - 183 \{ F / (C+F) \}^2] (C+F) / W - [210.1 - 112 F / (C+F) + 89 \{ F / (C+F) \}^2] \quad (\text{kgf/cm}^2)\tag{1.7}$$

④材齢365日：

$$f_c = [412.1 + 442 F / (C + F) - 1337 \{ F / (C + F) \}^2] (C + F) / W - [267.0 + 479 F / (C + F) - 1461 \{ F / (C + F) \}^2] \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1.8)$$

⑤材齢1095日：

$$f_c = [342.9 + 771 F / (C + F) - 1603 \{ F / (C + F) \}^2] (C + F) / W - [170.9 + 820 F / (C + F) - 1919 \{ F / (C + F) \}^2] \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1.9)$$

この回帰式を試験結果とともに示すと、図-1.25～図-1.28のようになる。

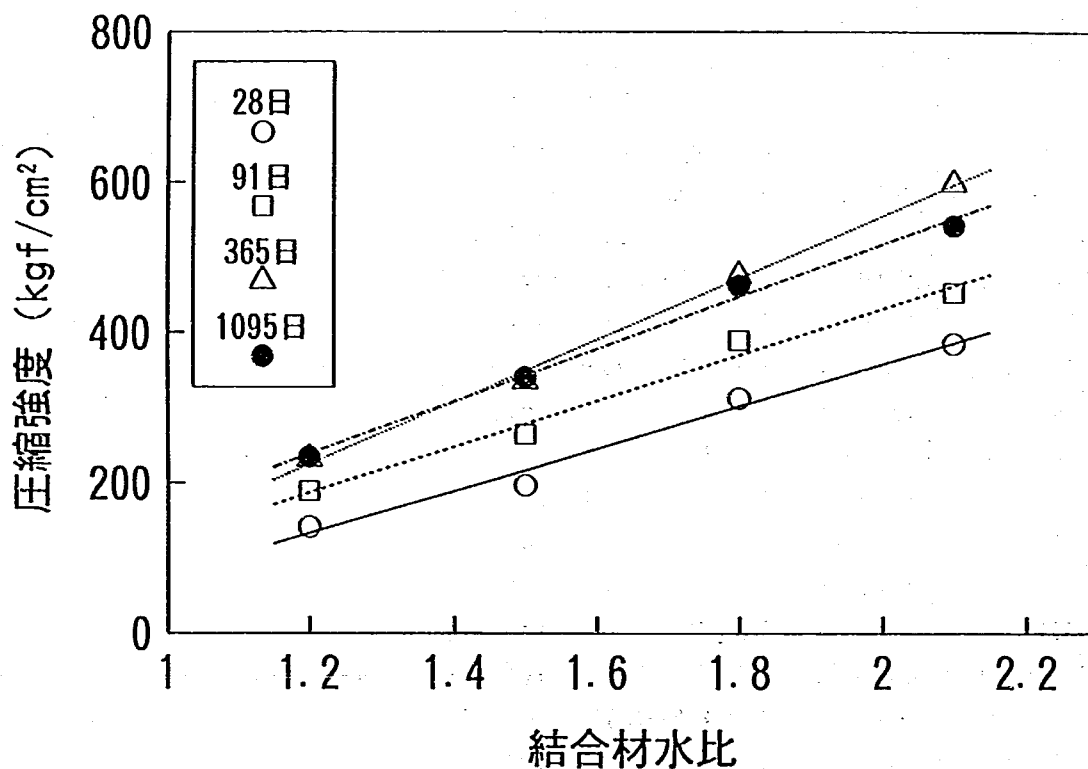


図-1.21 結合材水比と圧縮強度の関係
F / (C + F) = 0 %

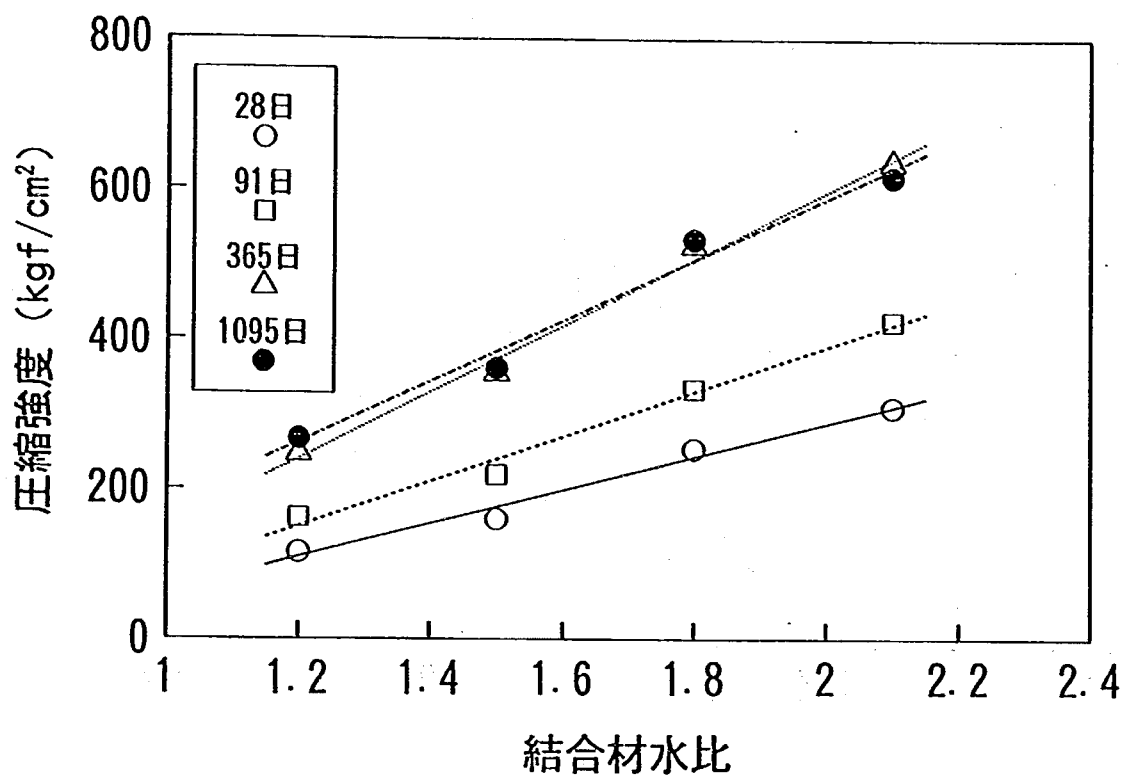


図- 1.22 結合材水比と圧縮強度の関係
F/(C+F)=15%

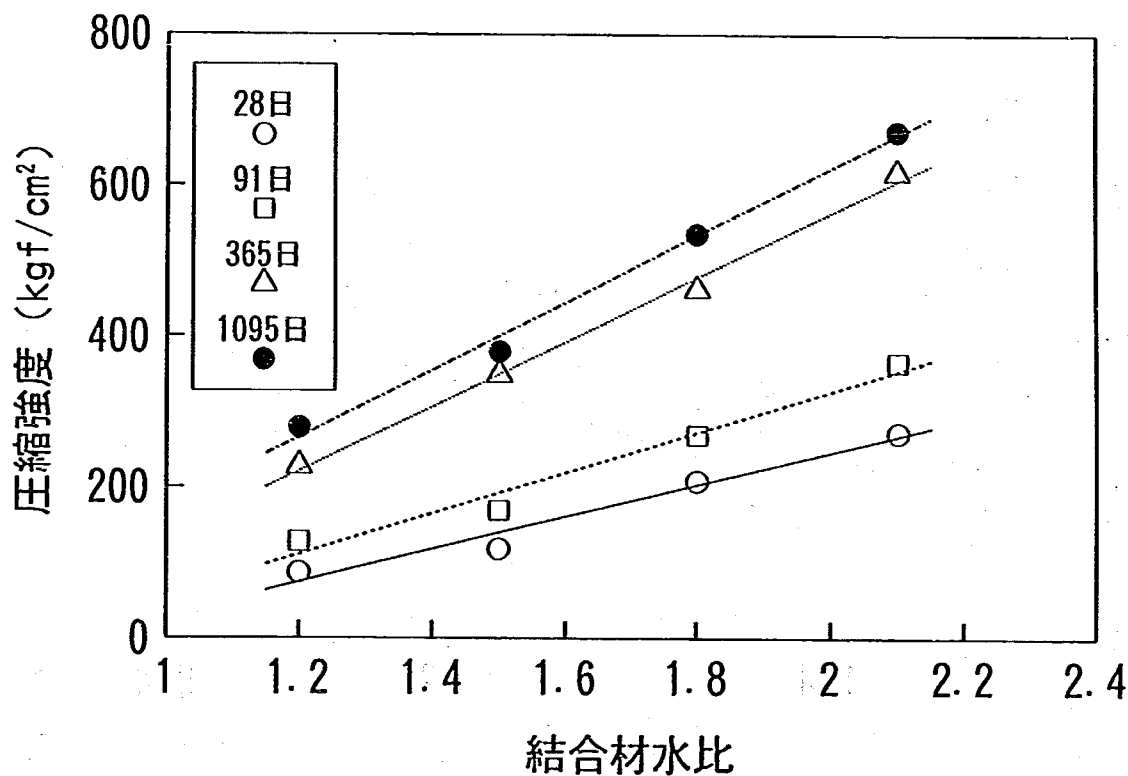


図- 1.23 結合材水比と圧縮強度の関係
F/(C+F)=30%

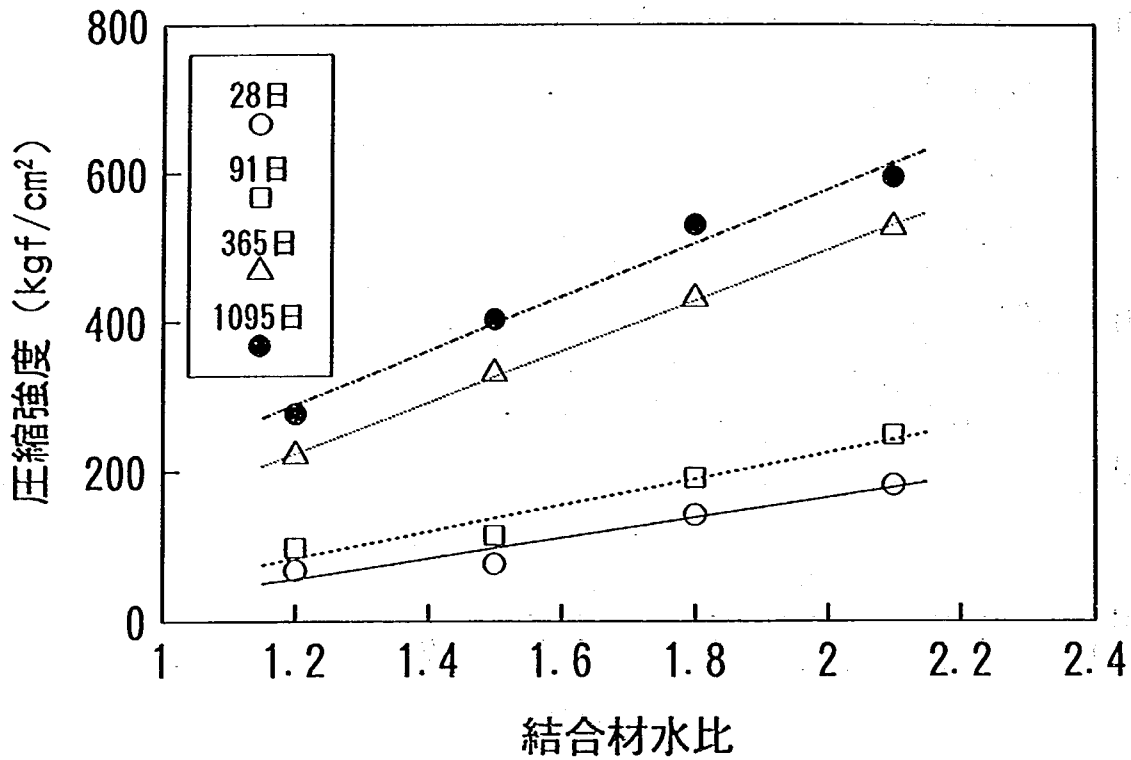


図- 1.24 結合材水比と圧縮強度の関係
F/(C + F) = 45%

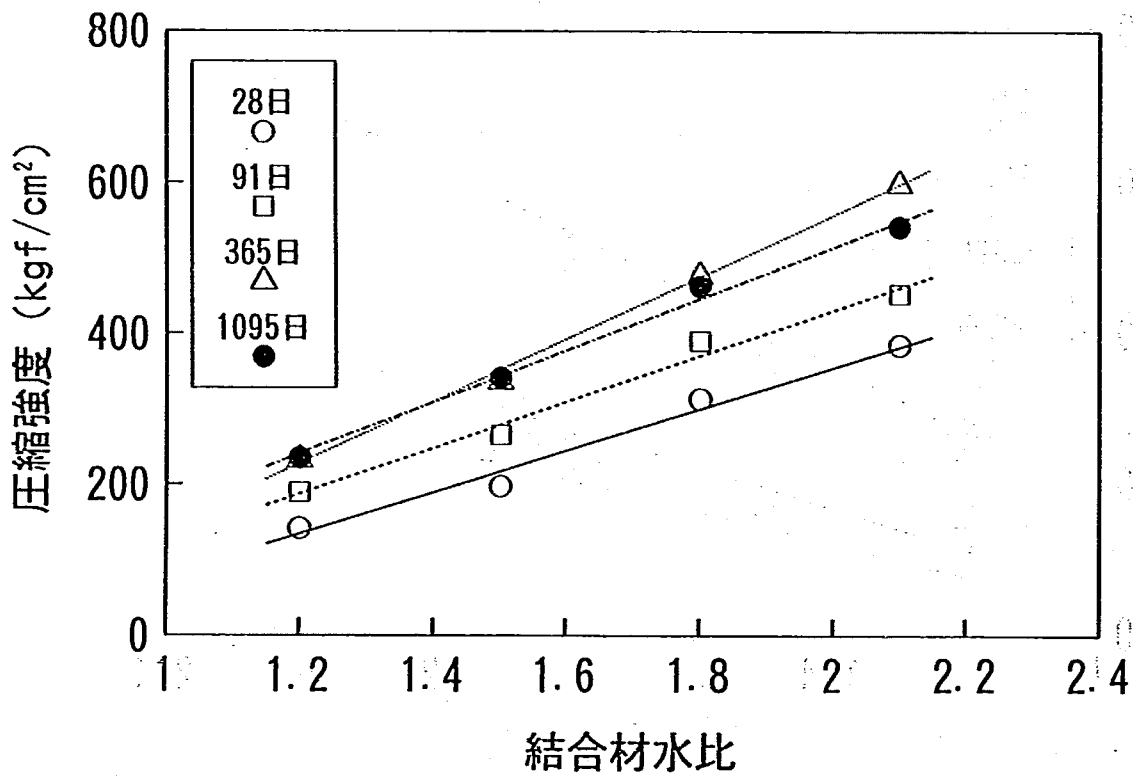
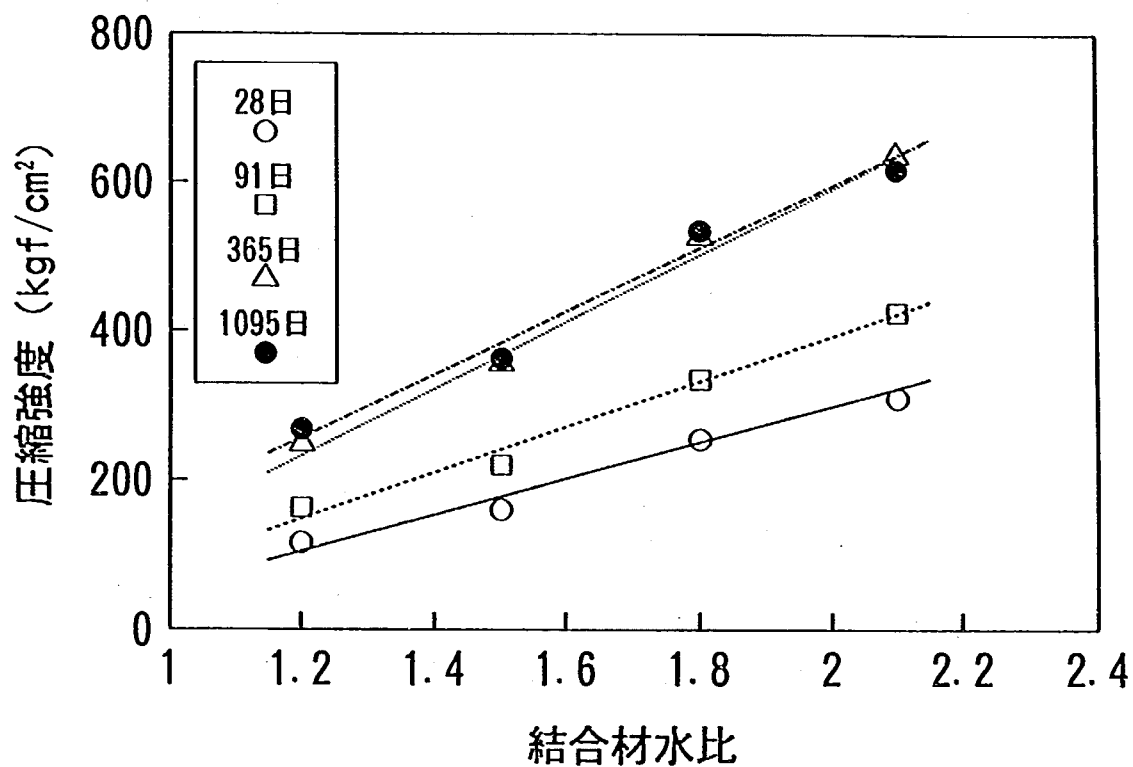
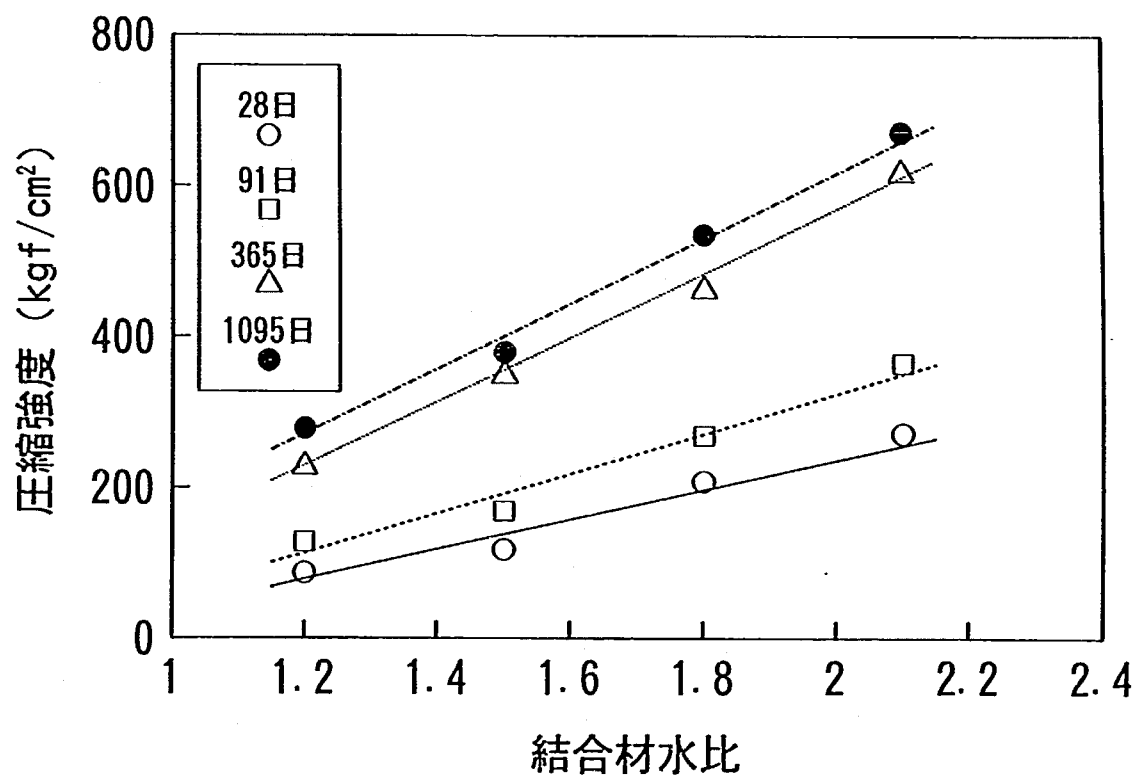


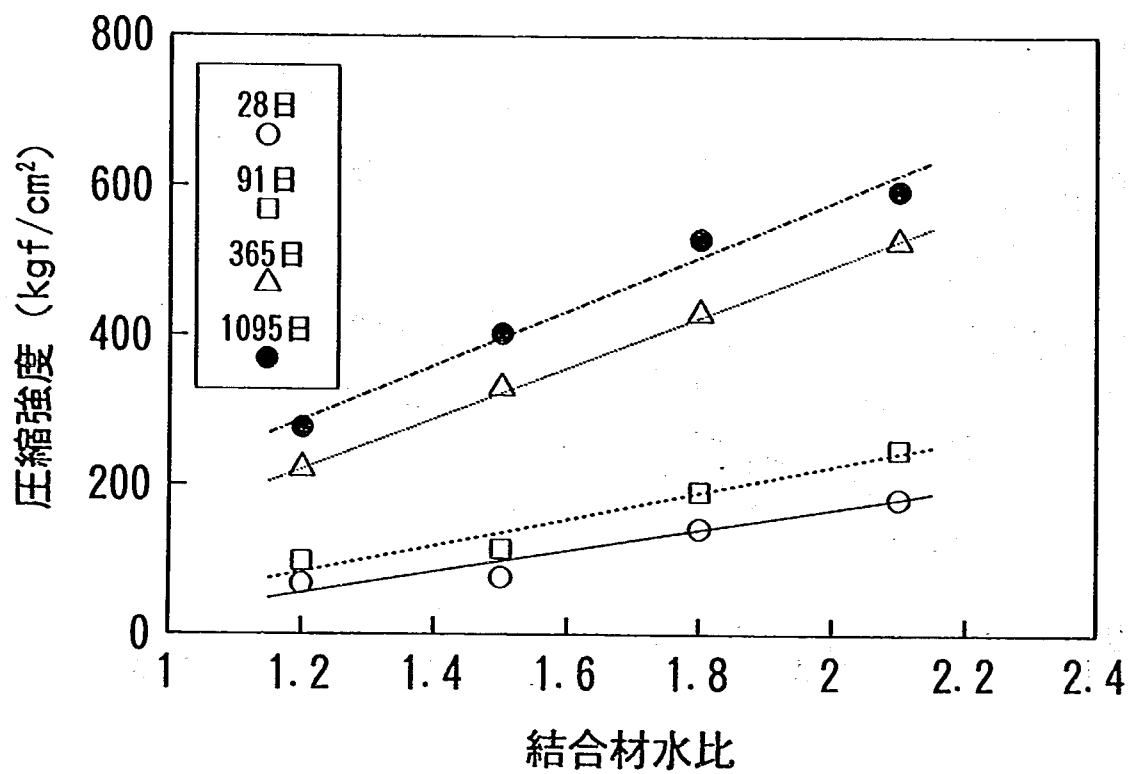
図- 1.25 結合材水比と圧縮強度の関係
F/(C + F) = 0%



図一 1.26 結合材水比と圧縮強度の関係
 $F/(C+F) = 15\%$



図一 1.27 結合材水比と圧縮強度の関係
 $F/(C+F) = 30\%$



図一 1.28 結合材水比と圧縮強度の関係
 $F/(C+F)=45\%$

1.3.2. フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係

次に、図-1.29～図-1.32は、(1.5)式～(1.9)式の結果を基に、それぞれの結合材水比毎に、フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係を示したものである。図によれば、水結合材比が小さく圧縮強度が大きくなる場合、材齢が大きく圧縮強度が大きくなる場合に、フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係を表すグラフは上に凸となる傾向が見られるが、その他の場合についてはフライアッシュ置換率と圧縮強度の関係はほぼ線形関係にある。なお、これらの図からフライアッシュ置換率が圧縮強度に及ぼす影響をとりまとめると次のようになる。

すなわち、材齢28日、材齢91日では、フライアッシュ置換率が大きい配合ほど圧縮強度は小さくなる。しかし、材齢365日になると、フライアッシュ置換率の大小に係わらず圧縮強度はほぼ一定となる。さらに、材齢1095日では、フライアッシュ置換率の大小に係わらず圧縮強度はほぼ一定となるか、またはフライアッシュ置換率が大きい配合の方が圧縮強度も大きくなる傾向がある。ただし、圧縮強度が500 kgf/cm²を超えるような強度の極めて高いコンクリートについては、フライアッシュ置換率が大き過ぎる ($F/(C+F)=45\%$) と圧縮強度がかえって低下する傾向も認められる。

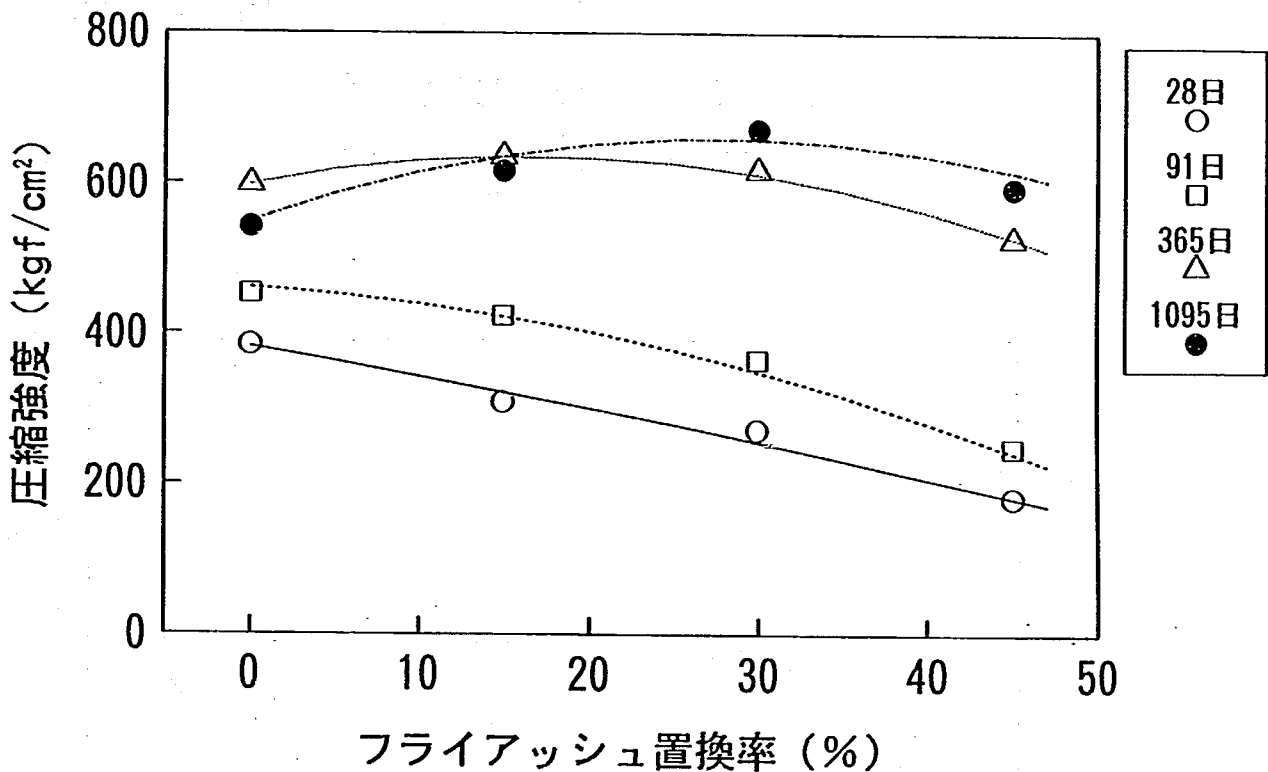


図-1.29 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係
 $W/(C+F)=47.6\%$

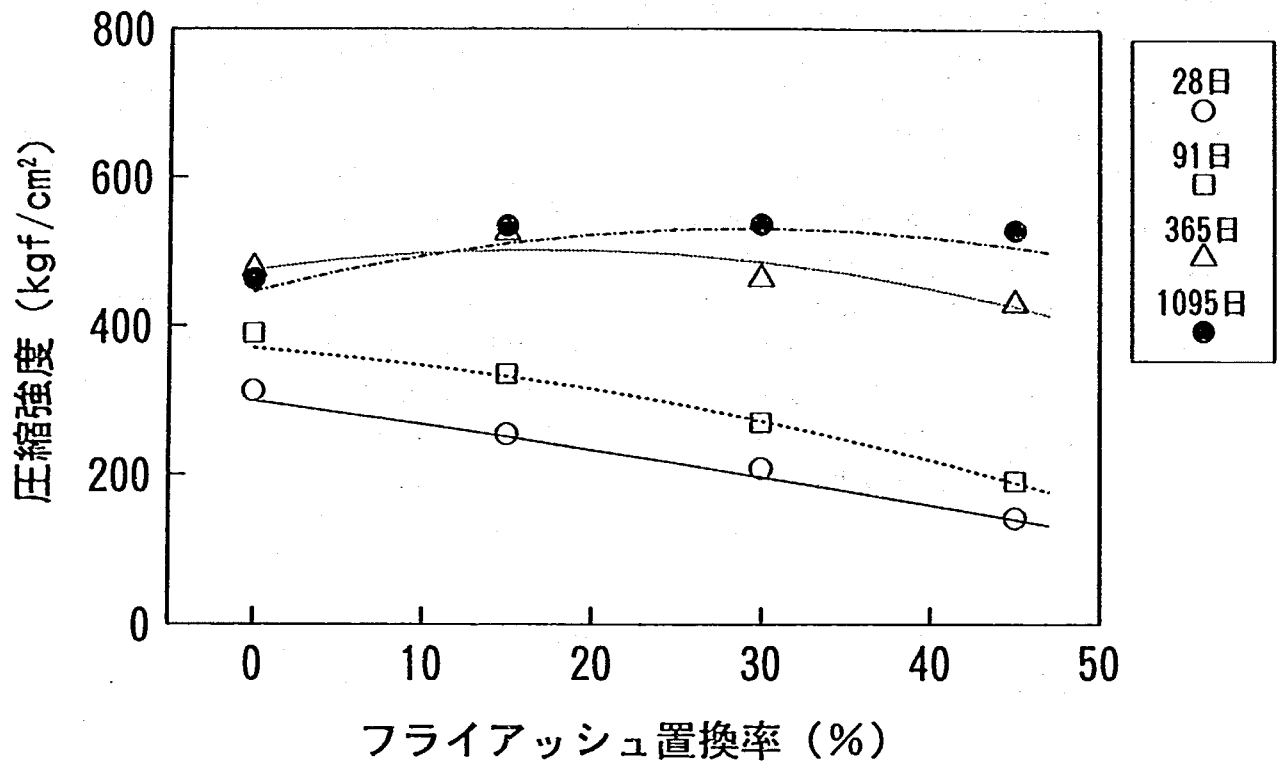


図- 1.30 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係
W/(C+F)=55.6%

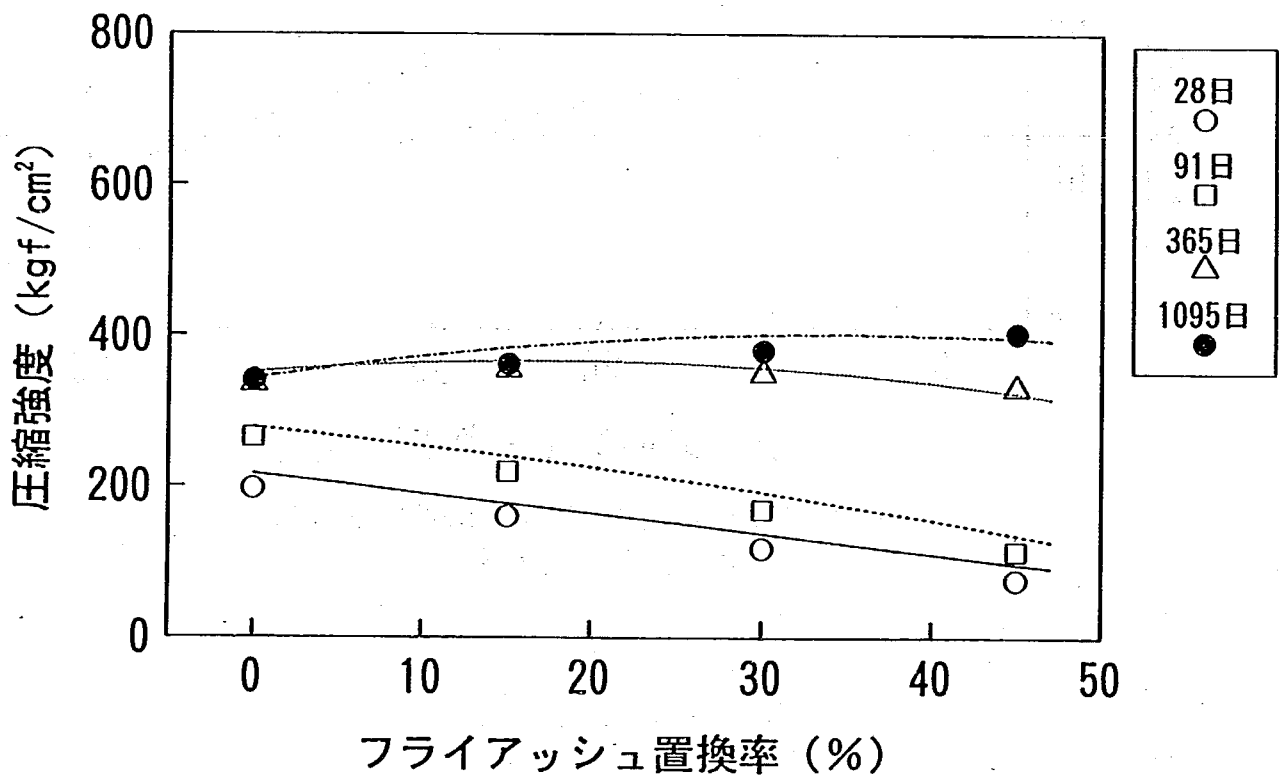


図- 1.31 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係
W/(C+F)=66.7%

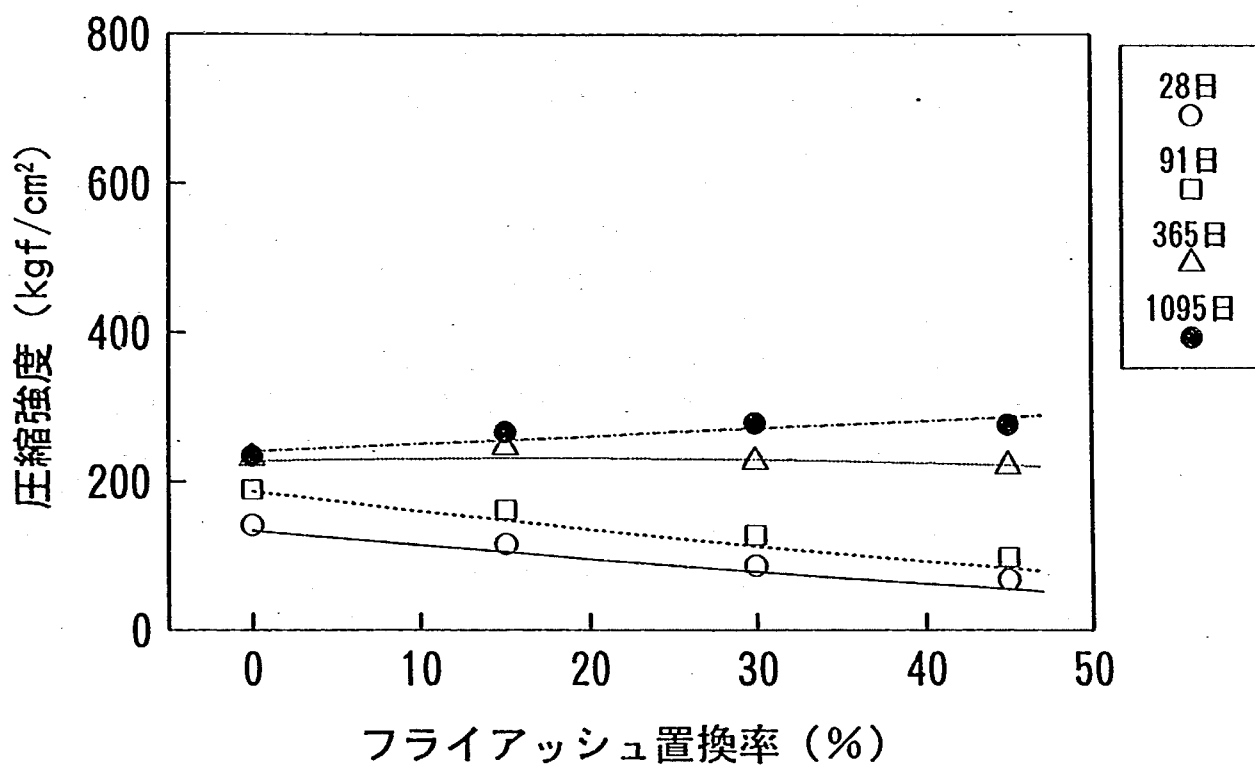


図-1.32 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係
 $W/(C+F) = 83.3\%$

1.3.3. 結合材水比と圧縮強度の増加率の関係

図-1.33～図-1.36は、それぞれのフライアッシュ置換率毎に、結合材水比と圧縮強度の増加率、すなわち材齢91日を基準とした圧縮強度の比率の関係を示したものである。なお、図中の線は(1.5)式～(1.9)式から求めた回帰値を示している。

まず、図-1.33はフライアッシュ置換率0%の場合の結果である。1年以降の長期材齢における圧縮強度の増加率は1.2～1.3倍と小さい。また、圧縮強度の増加率は結合材水比によらずほぼ一定である。また、図-1.34はフライアッシュ置換率15%の場合の結果である。材齢1年における圧縮強度の増加率は1.5～1.6倍とやや大きくなっている。しかし、材齢1年以降の圧縮強度の増加はほとんど認められない。また、圧縮強度の増加率は結合材水比によらずほぼ一定である。

次に、図-1.35はフライアッシュ置換率30%の場合の結果である。材齢1年における圧縮強度の増加率は1.8～2.0倍とかなり大きくなっている。また、材齢3年における圧縮強度の増加率は1.9～2.4倍とさらに大きくなっている。なお、圧縮強度の増加率は、結合材水比が小さく、圧縮強度が小さい配合で大きくなる傾向がある。また、図-1.36はフライアッシュ置換率45%の場合の結果である。材齢1年における圧縮強度の増加率は2.2～2.7倍と極めて大きくなっている。また、材齢3年における圧縮強度の増加率は2.5～3.5倍とさらに大きくなっている。なお、圧縮強度の増加率は、結合材水比が小さく、圧縮強度が小さい配合で大きくなる傾向がある。

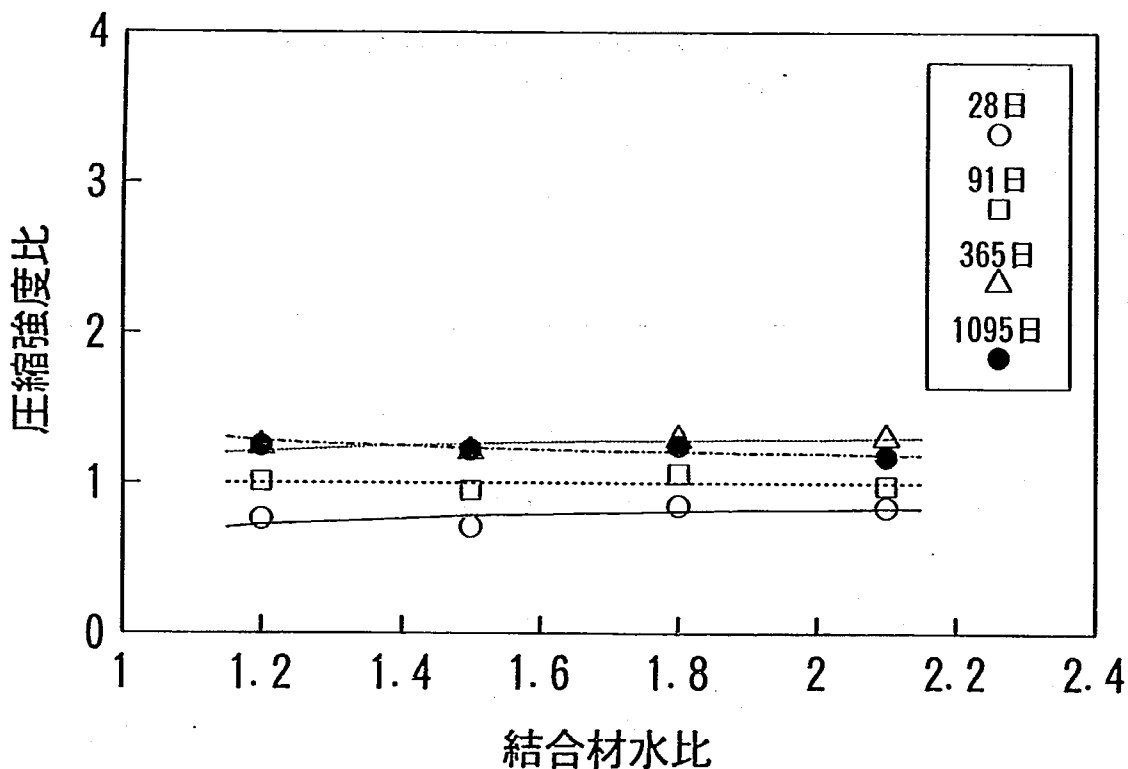
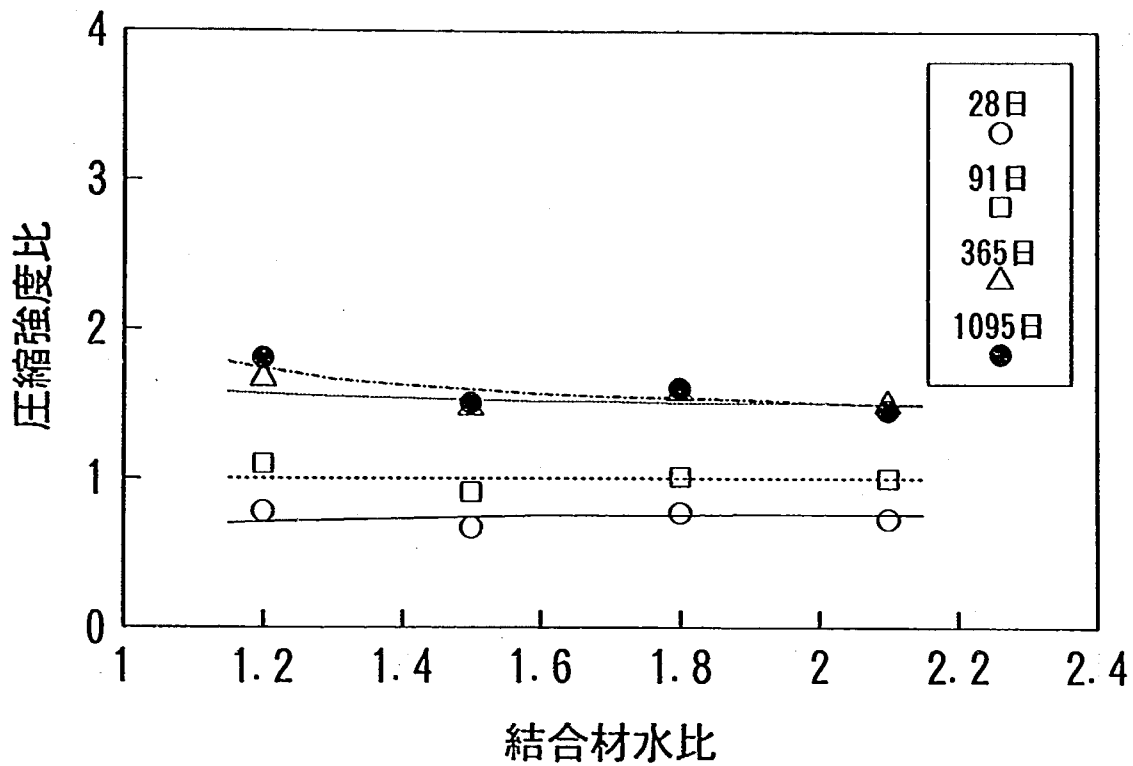
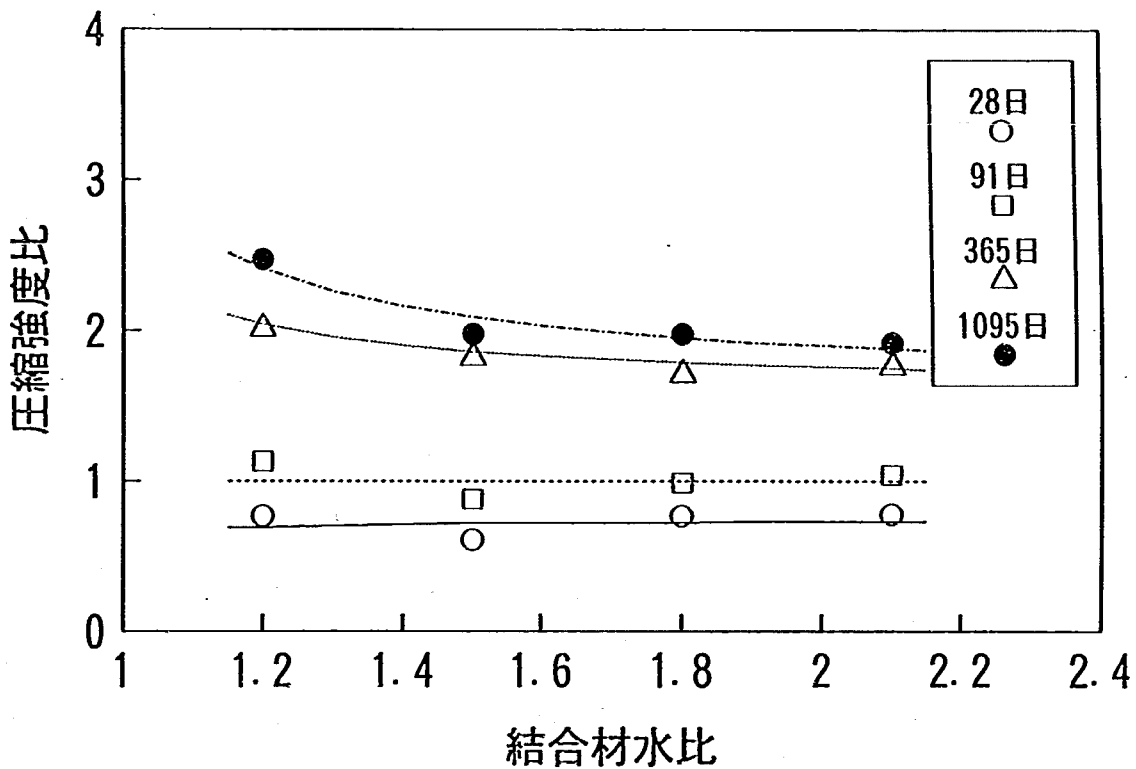


図-1.33 結合材水比と圧縮強度比の関係
F/(C+F)=0%



図一 1.34 結合材水比と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F)=15\%$



図一 1.35 結合材水比と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F)=30\%$

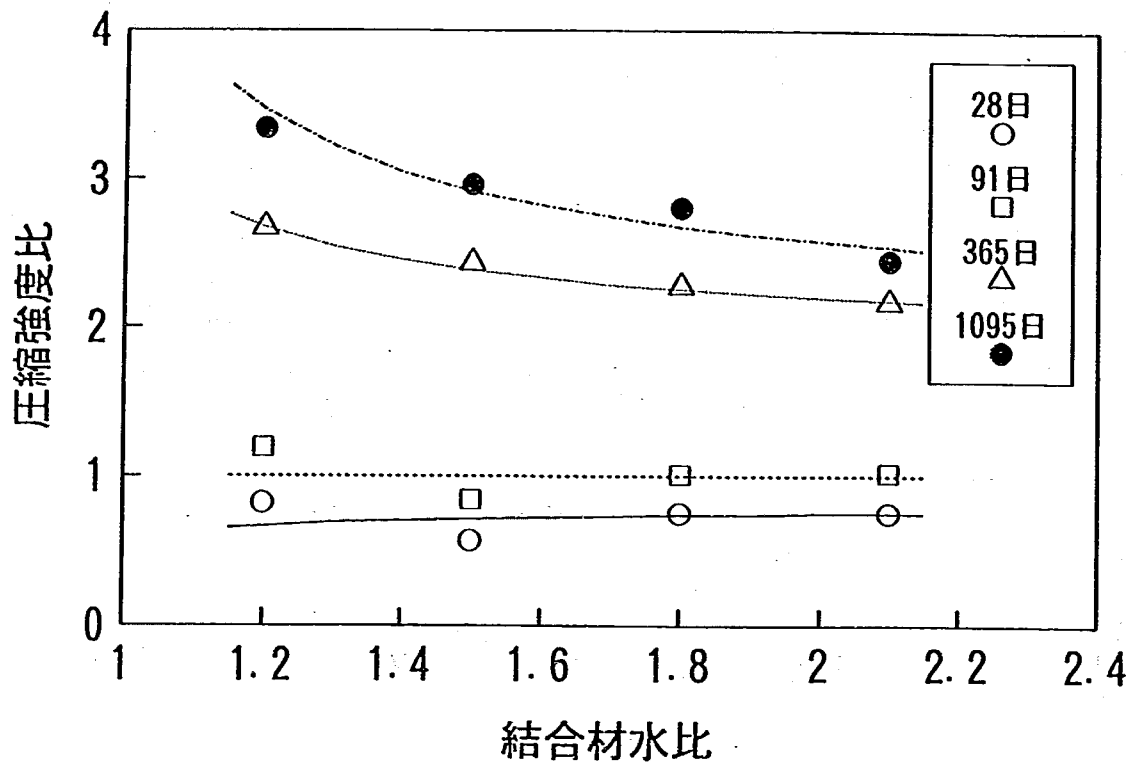


図-1.36 結合材水比と圧縮強度比の関係
 $F/(C+F)=45\%$

1.3.4. フライアッシュ置換率と圧縮強度の増加率の関係

図-1.37～図-1.40は、それぞれの水結合材比（結合材水比）毎に、フライアッシュ置換率と圧縮強度の増加率、すなわち材齢91日を基準とした圧縮強度の比率の関係を示したものである。なお、図中の線は（1.5）式～（1.9）式から求めた回帰値を示している。

まず、図-1.37は水結合材比 47.6 %の場合の結果である。1年以降の長期材齢における圧縮強度の増加率はフライアッシュ置換率によって大きく異なり、例えば、材齢1年における圧縮強度の増加率は、フライアッシュ置換率が0 %の場合で1.2倍であるのに対して、フライアッシュ置換率が45 %の場合で2.2倍となっている。また、フライアッシュ置換率が30～45 %以上の配合では材齢1年以降もさらに圧縮強度の増加が認められる。

次に、図-1.38は水結合材比 55.6 %の場合の結果、図-1.39 は水結合材比 66.7 %の場合の結果、図-1.40は水結合材比 83.3 %の結果であるが、図-1.37の場合と同様に、フライアッシュ置換率が大きくなるほど圧縮強度の増加率が大きくなっている。また、それぞれの図を比較すると、材齢1年またはそれ以降の圧縮強度の増加率はフライアッシュ置換率が小さい場合にはいずれの配合でも1.2倍程度であるが、フライアッシュ置換率が大きな場合には、水結合材比が大きい配合（結合材水比が小さい配合）ほど圧縮強度の増加率が大きくなる傾向があり、例えば、水結合材比が47.6 %の配合では材齢1年、材齢3年の圧縮強度の増加率が2.2、2.5であるのに対して、水結合材比が83.3 %の配合では材齢1年、材齢3年の圧縮強度の増加率は2.7、3.5となっている。

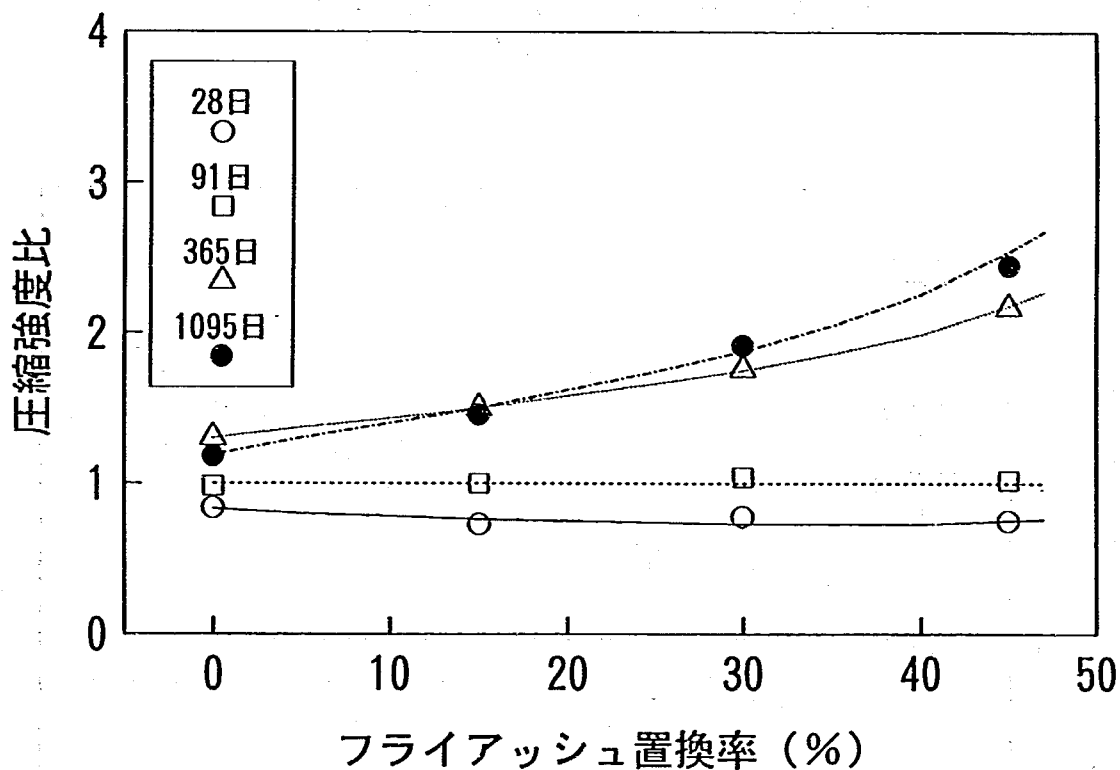
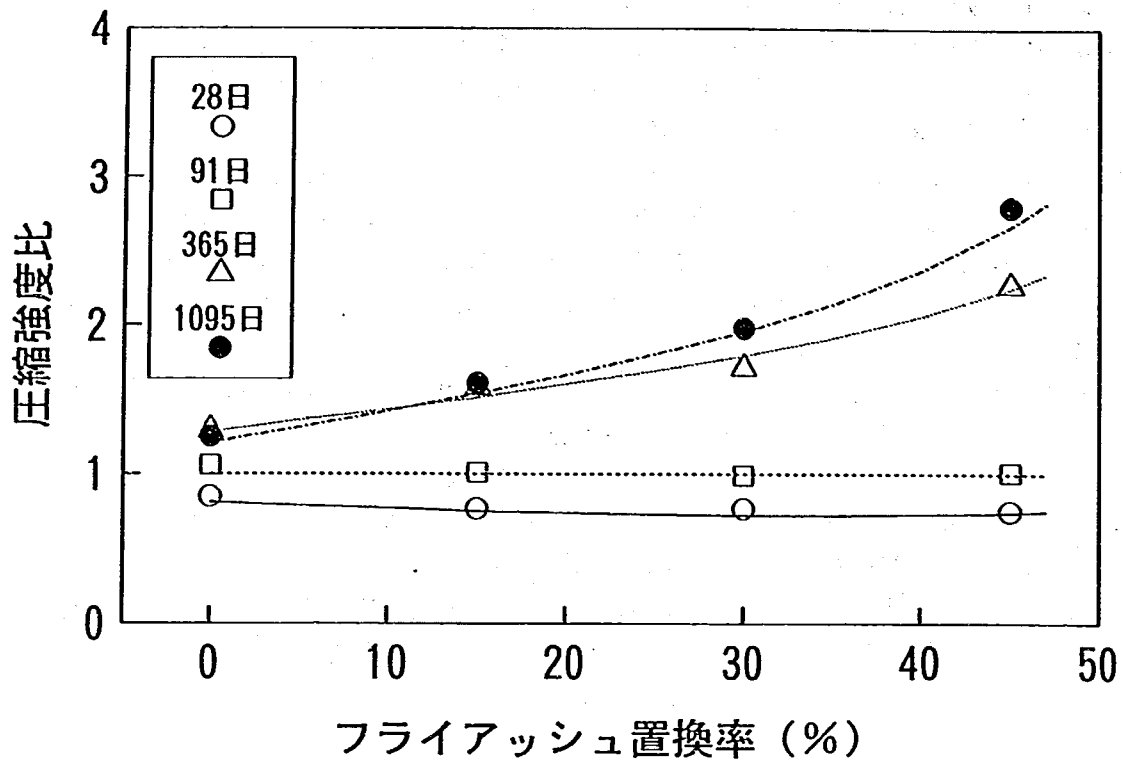
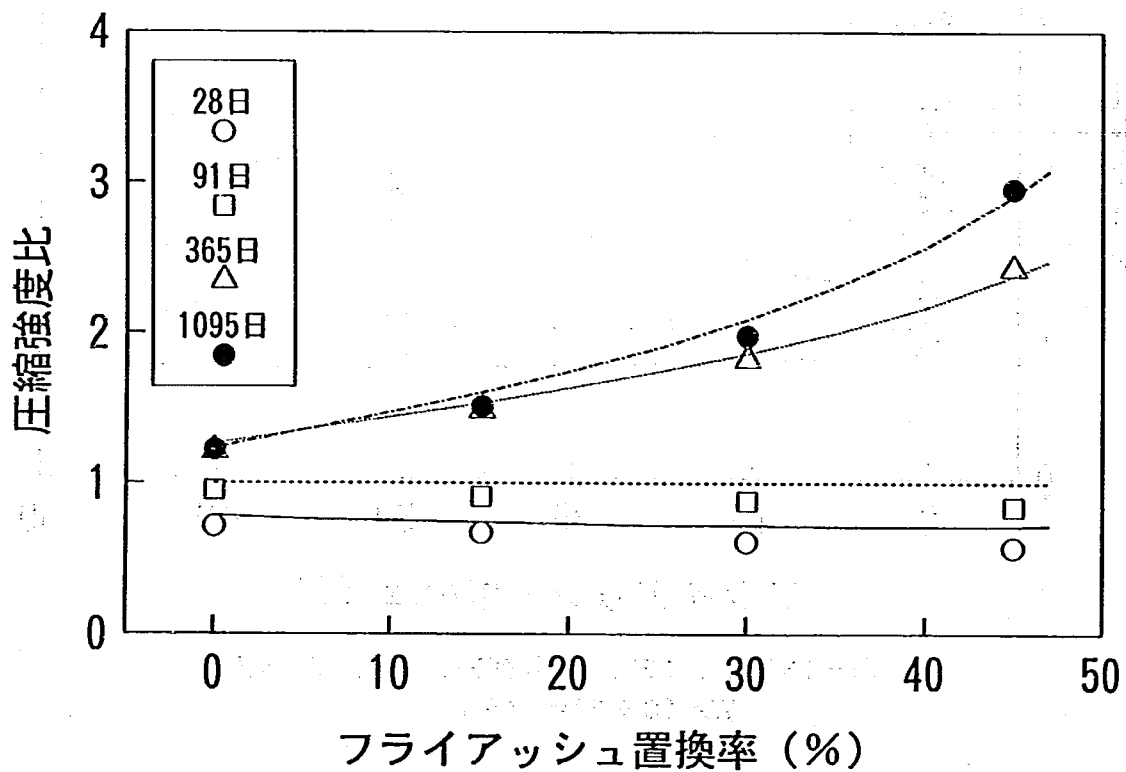


図-1.37 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係
 $W/(C+F) = 47.6 \%$



図一 1.38 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係
 $W/(C+F) = 55.6\%$



図一 1.39 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係
 $W/(C+F) = 66.7\%$

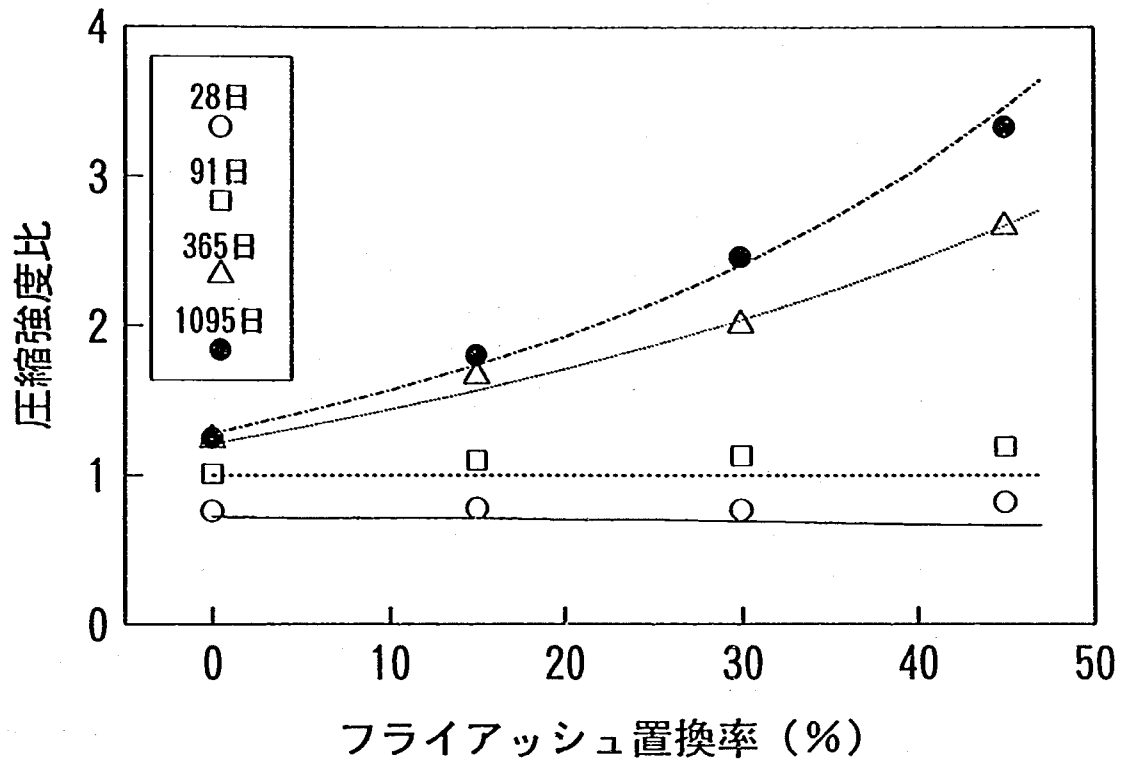


図-1.40 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係
W/(C+F) = 83.3 %

2. まとめ

以上の実験結果とその分析結果をとりまとめると次のようになる。

- ① セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートは、フライアッシュ置換をしないコンクリートに比べて初期材齢の圧縮強度が小さくなるが、長期材齢（材齢1年以降）の圧縮強度はフライアッシュ置換をしないコンクリートと同程度の値を有する。
- ② 水セメント比の法則は、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートについても、材齢の大小に係わらず同様に成立する。すなわち、結合材水比と圧縮強度の間には線形の関係がある。
- ③ 圧縮強度が極めて高い（500 kgf/cm²以上）コンクリートを除くと、セメントのフライアッシュ置換率と圧縮強度の間には線形の関係がある（この線形性はフライアッシュ置換率45%までの範囲で確認されている）。
- ④ 材齢91日を基準とした圧縮強度の増加率（圧縮強度比）はセメントのフライアッシュ置換率が大きくなるほど大きくなる。すなわち、材齢1年における圧縮強度比は、フライアッシュ置換をしないコンクリートでは1.2程度であるのに対して、フライアッシュ置換率が45%のコンクリートでは2.2～2.8程度（水結合材比47.6～83.3%）になる。
- ⑤ 材齢91日を基準とした圧縮強度の増加率（圧縮強度比）は、セメントのフライアッシュ置換率が小さな（0～15%）場合には水結合材比に依存しないが、フライアッシュ置換率が大きな（30～45%）場合には水結合材比の影響が現れ、水結合材比が80%を超えると圧縮強度の増加率が大きくなる傾向がある。

以上の結果より、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートは材齢91日以降の圧縮強度の伸びが大きく、コンクリートの設計基準強度を91日とすると、フライアッシュ置換を行ったコンクリートはフライアッシュ置換を行わないコンクリートに比べて設計上不利となることが改めて確認された。したがって、セメントの一部をフライアッシュで置換した場合には、設計基準強度としてさらに長期材齢の値をとることが合理的と考えられる。なお、フライアッシュ置換率が30%程度以下の範囲では材齢1年以降の圧縮強度の増加が比較的小さいことから、設計基準強度を定める材齢としては1年とすることが適当と考えられる。ただし、設計基準強度を定める材齢を長くすることはコンクリートの配合設計に必要な時間を長くすることになるため、「フライアッシュ置換率が大きなコンクリートについては、設計基準強度を定める材齢として1年材齢とすることもできる」という規定に止めておくのが適切と考える。

なお、本論文では特に取り上げなかったが、長期的なコンクリートの強度増加にはコンクリート温度が大きな影響を持ち、コンクリート温度が高い場合には長期的な圧縮強度の伸びが期待できないことが現在実施中の実験結果で確認されている。マスコンクリートの場合、特別なクーリングを行わない場合、コンクリート温度は長期間にわたって標準養生温度20℃よりも著しく高くなる。このような場合、フライアッシュ置換を行ったコンクリートの長期的な強度増加をどこまで期待できるかについては疑問の余地がある。したがって、設計基準強度を材齢1年とすることについては十分に慎重な配慮が必要と思われる。なお、養生温度と長期強度の関係については、現在実施している実験結果が得られた段階で報告する予定である。

ダムコンクリートの長期材齢
強度に関する実験的検討

I S S N 0 3 8 6 - 5 8 7 8
土木研究所資料第3280号
平成6年5月(1994. 5)

永山 功, 渡辺 和夫
小沢 裕二, 大槻 英治
菊永 和久

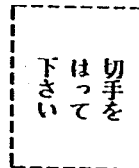
要旨

近年, RCD工法が広く普及し, ダムコンクリートに使用するセメントの一部をフライアッシュで置換する例が増えてきている。フライアッシュを用いたコンクリートは, 従来のコンクリートに比べて初期の強度発現が遅いが, 長期的な強度の伸びが大きいという特徴を有している。そこで, 本検討は, セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートの長期材齢強度について検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード: ダムコンクリート, フライアッシュ, 長期材齢強度

郵便はがき

3 0 5 - □ □



茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
ダム構造研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第3280号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

