

コンクリート専門委員会

委員会報告ダイジェスト版
DIGEST REPORT
OF
THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE

2011年3月

(March 2011)

社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

序

本委員会は、セメント・コンクリートの学術的・技術的調査・試験・研究などを目的に1951年に設置され、60年間にわたる活動で合計56冊の報告書を発刊してきた。その内容は、コンクリートの強度、ひび割れや耐久性など多岐にわたり、また、現在、社会的に求められている技術ニーズを多く含んでいる。

今般、これらの委員会成果を、より有効に活用していただけるよう、ダイジェスト版として取り纏めた。

2011年 3月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会

コンクリート専門委員会

委員長	三菱マテリアル株式会社	中山 英 明	
	太平洋セメント株式会社	(横 山 良	2009年9月交替)
	〃	(栩 木 隆	2008年6月交替)

委 員	日鐵セメント株式会社	小 倉 束	
	株式会社トクヤマ	加 藤 弘 義	
		(土 井 宏 行	2008年3月交替)
	太平洋セメント株式会社	石 川 雄 康	
	宇部興産株式会社	大 和 功 一 郎	
		(大 西 利 勝	2008年4月交替)
	電気化学工業株式会社	川 原 正 秀	
	新日鐵高炉セメント株式会社	植 木 康 知	
		(伊代田 岳 史	2009年3月交替)
	住友大阪セメント株式会社	草 野 昌 夫	

事務局	社団法人セメント協会	佐 藤 智 泰	
		(村 田 芳 樹	2010年4月交替)
		島 崎 泰	
		泉 尾 英 文	

(敬称略 順不同)

目次

1	まえがき	1
2	単位水量	3
2.1	各種要因の影響	3
2.1.1	練混ぜ温度	3
2.1.2	水セメント比	5
3	圧縮強度	7
3.1	各種要因の影響	7
3.1.1	セメントの種類および水セメント比	7
3.1.2	養生温度および養生条件	9
3.1.3	初期の乾燥	27
3.2	長期暴露	29
4	断熱温度上昇	33
4.1	セメントの種類を要因としたコンクリートの断熱温度上昇量	33
5	乾燥収縮	37
5.1	各種要因の影響	37
5.1.1	単位セメント量および単位水量	37
5.1.2	水セメント比	39
5.1.3	スランプ	40
5.1.4	セメントの種類	41
5.1.5	混和剤の種類	43
5.1.6	骨材の種類	45
5.1.7	初期養生条件	48
5.1.8	アジテート時間	50
5.2	長期暴露	51
6	ひび割れ抵抗性	53
6.1	各種要因の影響	53
6.1.1	水セメント比	53
6.1.2	スランプ	55
6.1.3	混和剤の種類	56
6.1.4	骨材の種類	57
6.1.5	初期養生条件	59

6.1.6	アジテート時間	61
7	塩害	63
7.1	セメントの種類および水セメント比を要因とした塩化物イオン浸透性	63
7.1.1	発色法による塩化物イオン浸透深さ	63
7.1.2	浸漬による塩化物イオンの見掛けの拡散係数	64
7.1.3	電気泳動による実効拡散係数	66
7.2	長期暴露	67
8	中性化	79
8.1	各種要因の影響	79
8.1.1	セメントの種類および水セメント比	79
8.1.2	初期の乾燥	82
8.2	長期暴露	83
9	凍害	87
9.1	各種要因の影響	87
9.1.1	セメントの種類および水セメント比	87
9.1.2	初期の乾燥	89
9.2	長期暴露	91
10	アルカリ骨材反応	95
10.1	各種要因の影響	95
10.1.1	骨材の種類	95
10.1.2	総アルカリ量	99
10.1.3	暴露環境	102
10.2	アルカリシリカ反応抑制対策	107
11	高炉スラグ微粉末	111
11.1	混合率がコンクリートの各種特性に及ぼす影響	111
11.1.1	単位水量	111
11.1.2	圧縮強度	113
12	石灰石骨材	117
12.1	コンクリートの各種特性に及ぼす影響	117
12.1.1	単位水量	118
12.1.2	ブリーディング率	119
12.1.3	凝結時間	120
12.1.4	圧縮強度	121

12.1.5	弾性係数	122
12.1.6	乾燥収縮	123
12.1.7	促進中性化深さ	124
12.1.8	凍結融解抵抗性	124
12.1.9	熱膨張係数	125
12.1.10	耐火性状	125
12.1.11	アルカリ炭酸塩岩反応	126
13	あとがき	129

目次

2.1	練混ぜ温度とコンクリートの単位水量比 (20 を基準)(N)	3
2.2	練混ぜ温度とコンクリートの単位水量比 (20 を基準)(H, BB, FB)	4
2.3	水セメントと単位水量	5
3.1	材齢と圧縮強度	8
3.2	材齢と圧縮強度 (N, スランプ 8cm)	12
3.3	材齢と圧縮強度 (H, スランプ 8cm)	13
3.4	材齢と圧縮強度 (N, スランプ 18cm)	14
3.5	材齢と圧縮強度 (H, スランプ 18cm)	15
3.6	材齢と圧縮強度 (BB, スランプ 8cm)	16
3.7	材齢と圧縮強度 (FB, スランプ 8cm)	17
3.8	材齢と圧縮強度 (BB, スランプ 18cm)	18
3.9	材齢と圧縮強度 (FB, スランプ 18cm)	19
3.10	養生条件と圧縮強度 (W/C=60%, スランプ 8cm)	22
3.11	養生条件と圧縮強度 (W/C=50%, スランプ 8cm)	23
3.12	養生条件と圧縮強度 (W/C=60%, スランプ 18cm)	24
3.13	養生条件と圧縮強度 (W/C=50%, スランプ 18cm)	25
3.14	コンクリートの種類と圧縮強度比	27
3.15	セメントの種類と圧縮強度比	27
3.16	乾燥開始材齢と圧縮強度比	28
3.17	材齢 91 日の圧縮強度比 (標準水中材齢 28 日強度基準) と乾燥開始材齢	28
3.18	セメント種類別の強度増進状況 (海砂の塩分含有量 0.00 ~ 0.01%)	29
3.19	セメント水比と圧縮強度 (セメントの種類)	30
3.20	材齢と圧縮強度 (水結合材比 50%, 前養生期間 28 日)	32
4.1	単位セメント量と K,	34
5.1	単位セメント量と乾燥収縮率	37
5.2	単位水量と乾燥収縮率 (乾燥期間 14 日)	38
5.3	水セメント比と乾燥収縮率	39
5.4	スランプと乾燥収縮率	40
5.5	各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率	42
5.6	各種混和剤を用いたコンクリートの乾燥収縮率	44
5.7	単位水量と乾燥収縮率	44
5.8	各種細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率	45
5.9	各種岩種の粉砕骨材を用いたモルタルの乾燥収縮率	46
5.10	各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率	47

5.11	初期養生期間とコンクリートの乾燥収縮率	48
5.12	初期養生方法別の乾燥期間と乾燥収縮率	49
5.13	アジテート時間と乾燥収縮率	50
5.14	感潮部に暴露したコンクリートの長さ変化	52
6.1	水セメント比とひび割れ発生日数	54
6.2	自由収縮および拘束枠ひずみとひび割れ発生日数	54
6.3	スランプとひび割れ発生日数	55
6.4	自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数	55
6.5	混和剤種類とひび割れ発生日数	56
6.6	自由収縮ひずみとひび割れ発生日数	57
6.7	粗骨材の種類とひび割れ発生日数の範囲	57
6.8	表乾密度とひび割れ発生日数	58
6.9	吸水率とひび割れ発生日数	58
6.10	単位容積質量とひび割れ発生日数	58
6.11	破碎値とひび割れ発生日数	58
6.12	初期養生期間とひび割れ発生日数	59
6.13	初期養生方法とひび割れ発生日数	60
6.14	アジテート時間とひび割れ発生日数	61
6.15	自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数	61
7.1	発色法による塩化物イオンの浸透深さ結果	63
7.2	コンクリート表面からの深さと全塩化物イオン	65
7.3	表面全塩化物イオン濃度 (C_{a0})	65
7.4	見掛けの拡散係数 (D_{ap})	65
7.5	セメントの種類と実効拡散係数	66
7.6	セメント水比と実効拡散係数	66
7.7	コンクリート表面からの深さと塩分量	68
7.8	鉄筋の形状・寸法及び配筋状態	69
7.9	セメントの種類と孔食深さ	69
7.10	セメントの種類別にみた海砂の塩分量と発錆面積率および質量減少率	70
7.11	供試体表面からの深さと塩分量	72
7.12	養生条件が塩分浸透に与える影響	72
7.13	封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (海浜部)	73
7.14	封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (感潮部)	74
7.15	封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (海中部)	75
7.16	見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度 (材齢 10 年)	77
7.17	セメントの種類と発錆面積率	78
8.1	各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化深さ	80

8.2	圧縮強度と促進中性化期間 26 週の中性化深さ	81
8.3	水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数	81
8.4	乾燥開始材齢と中性化深さ	82
8.5	相対湿度と中性化深さ	82
8.6	中性化深さと材齢	83
8.7	水セメント比と中性化深さ (暴露材齢 20 年)	83
8.8	材齢と中性化深さ (水結合材比 50 % , 前養生期間 28 日)	85
9.1	セメントの種類と相対動弾性係数および質量減少率	88
9.2	凍結融解開始時の圧縮強度と相対動弾性係数および質量減少率	88
9.3	初期の乾燥が凍害抵抗性 (相対動弾性係数) に及ぼす影響	90
9.4	初期の乾燥が凍害抵抗性 (質量減少率) に及ぼす影響	90
9.5	凍害調査の暴露地	91
9.6	相対動弾性係数の経年変化 (たわみ振動)	92
9.7	質量の経年変化	93
10.1	ASTM の判定区分による判定結果	95
10.2	非反応性骨材 N のモルタルバー膨張率	96
10.3	反応性骨材 A のモルタルバー膨張率	97
10.4	反応性骨材 B のモルタルバー膨張率	97
10.5	反応性骨材 C のモルタルバー膨張率	97
10.6	反応性骨材 D のモルタルバー膨張率	98
10.7	反応性骨材 E のモルタルバー膨張率	98
10.8	反応性骨材 F のモルタルバー膨張率	98
10.9	40 湿空におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張量	100
10.10	反応性骨材混合率と膨張量 (40 湿空)	101
10.11	総アルカリ量とひび割れ発生日数 (40 湿空)	101
10.12	ひび割れ発生時の膨張量の度数分布	101
10.13	屋外暴露におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率	103
10.14	20 海水反復浸漬におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率	104
10.15	暴露条件別の反応性骨材混合率と膨張率	105
10.16	暴露環境別の総アルカリ量とひび割れ発生日数	106
10.17	セメントの種類と膨張率 (材齢 18 ヶ月)	108
10.18	総アルカリ量と膨張率 (材齢 18 ヶ月)	109
11.1	セメントの種類とスラグ混合率による単位水量の変化 (N , H)	111
11.2	セメントの種類とスラグ混合率による単位水量の変化 (FA , FB , FC)	112
11.3	スラグ混合率と単位水量比	112
11.4	セメントの種類およびスラグ混合率と圧縮強度	114
11.5	初期養生温度と圧縮強度	115

12.1	骨材の種類と単位水量	118
12.2	石灰石砕砂および砂岩砕砂の微粉量と単位水量	118
12.3	石灰石砕砂の微粉量と単位水量一定におけるスランプおよび空気量	118
12.4	骨材の種類とブリーディング率	119
12.5	石灰石砕砂の微粉量とブリーディング率	119
12.6	骨材の種類と凝結時間	120
12.7	石粉量と凝結時間	120
12.8	石灰石砕砂の微粉量と凝結時間	120
12.9	材齢と圧縮強度	121
12.10	粗骨材の石粉量と圧縮強度	121
12.11	材齢と静弾性係数	122
12.12	粗骨材の石粉量と静弾性係数	122
12.13	粗骨材の種類と乾燥収縮率	123
12.14	細骨材の種類および石粉量と乾燥収縮率	123
12.15	石粉量と乾燥収縮率	123
12.16	粗骨材の種類とコンクリートの中性化深さ(促進試験)	124
12.17	粗骨材の種類と耐久性指数	124
12.18	細骨材の種類と耐久性指数	124
12.19	粗骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数	125
12.20	細骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数	125
12.21	膨張率測定結果	127

表目次

3.1	普通セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を 100 としたときの強度比	7
3.2	各種セメントの材齢 28 日の圧縮強度を 100 としたときの強度比	8
3.3	各材齢における圧縮強度(N, H)	10
3.4	各材齢における圧縮強度(BB, FB)	11
3.5	標準養生 28 日強度を基準とした封緘養生の強度比(スランプ 8cm)	21
3.6	標準養生 28 日強度を基準とした封緘養生の強度比(スランプ 18cm)	21
3.7	水中養生と封緘養生の強度比の比較	26
4.1	各試験所で実施したコンクリートの配合	33
4.2	断熱温度上昇試験結果(その 1)	35
4.3	断熱温度上昇試験結果(その 2)	35
4.4	断熱温度上昇式における係数の算定式	36
5.1	ポルトランドセメントの組成化合物量	42
8.1	各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化速度係数($mm/\sqrt{\text{年}}$)	79

8.2	有効結合材比と中性化速度係数の直線回帰定数	81
10.1	使用骨材の粉末 X 線回折法結果	95
10.2	反応性骨材混合率別のひび割れ限界総アルカリ量 (40 湿空)	101
10.3	暴露環境とひび割れ発生時期およびひび割れ発生時の平均膨張量	106
10.4	暴露環境別のひび割れ限界総アルカリ量	106
12.1	耐火試験前後の圧縮強度, 静弾性係数および残存率	125
12.2	化学分析結果	126

1 まえがき

社団法人セメント協会は、ポルトランドセメントおよび各種セメントの生産、流通および消費の増進ならびに改善を図り、わが国産業の発展と国民生活の向上に寄与することを目的として、1948年（昭和23年）に設立された。また、コンクリート専門委員会は、セメント・コンクリートの学術的・技術的調査・試験・研究やセメント・コンクリートの品質向上に関する事項について取り組むことを目的として、1951年（昭和26年）に旧社団法人日本セメント技術協会（昭和41年4月社団法人セメント協会に合併）の委員会の一つとして設置された。

本委員会では、現在まで60年間に亘り延べ400回を超える委員会活動を継続し、その成果を委員会報告として取りまとめ、これまでに合計56冊の報告書を発刊している。

委員会報告は、セメント・コンクリートの技術的課題に対応したテーマに取り組んだものであり、コンクリートの強度発現性、ひび割れ、耐久性およびリサイクル関連技術等、内容は多岐に亘っている。また、これらの報告書には、現在社会的に求められている情報やニーズも含んだ内容が数多く記載されており、現時点でもその技術的価値は減じていない。しかしながら、現状では、各報告書に記載された内容がセメントユーザーに対して十分に認知されているとは言い難い。そこで、これらの報告書を有効に活用してもらうことを目的として、既往報告書からエッセンスを抽出したダイジェスト版を刊行することとした。なお、本ダイジェスト版は以下の点に留意して取り纏めた。

- コンクリート専門委員会の委員会報告をメインに、適宜、他の技術専門委員会報告等も対象とした。
- 委員会報告は昭和28年から発刊されているが、規格等の違いにより、現状のセメントコンクリートの性状と大きく異なるデータは記載しなかった。
- 一般的なコンクリートの各種性状に関するデータを対象とし、舗装コンクリートは対象としなかった。また、コンクリート用骨材に関しては、石灰石骨材を使用したコンクリートも対象とした。
- コンクリートの各種性状毎に取り纏めたが、複数の報告書に記載されたデータを記載する場合は、それぞれの研究目的や試験条件を明確に記載した。
- セメントの種類がコンクリートの各種性状に及ぼす影響および各種セメントを使用したコンクリートの長期暴露試験結果をポイントに整理した。
- 原則として、各報告書中の図表を貼付するが、単位はSI単位に統一して記載した。

本報告「コンクリート専門委員会報告ダイジェスト版」の発刊を通じて、社団法人セメント協会の研究活動を改めて認知して頂き、これまでの活動成果が社会的に活用される機会が増大することに期待したい。

2 単位水量

2.1 各種要因の影響

F-34	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その1)	1982 年
F-36	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その2)	1983 年

F-34, F-36 では、水セメント比を変化させたスランプ 8cm および 18cm の AE コンクリートを対象に冬期および夏期の施工を想定し、練混ぜ温度を変化させ、セメントの種類と練混ぜ温度がコンクリートの単位水量に及ぼす影響について報告している。

2.1.1 練混ぜ温度

{	【要因】	・練混ぜ温度	4 水準	5, 10, 20, 30
		・セメントの種類	4 種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B 種 FB : フライアッシュセメント B 種
		・スランプ	2 水準	8.0 ± 1.5cm, 18.0 ± 1.5cm

練混ぜ温度とコンクリートの単位水量比 (20 を基準) を図 2.1 および図 2.2 に示す。N, H, BB, FB の全てのセメントにおいて同一スランプを得るためにはいずれも練混ぜ温度 ± 10 の増減に対して単位水量を ± 2~3% (約 4~6kg/m³) 変化させる必要がある。

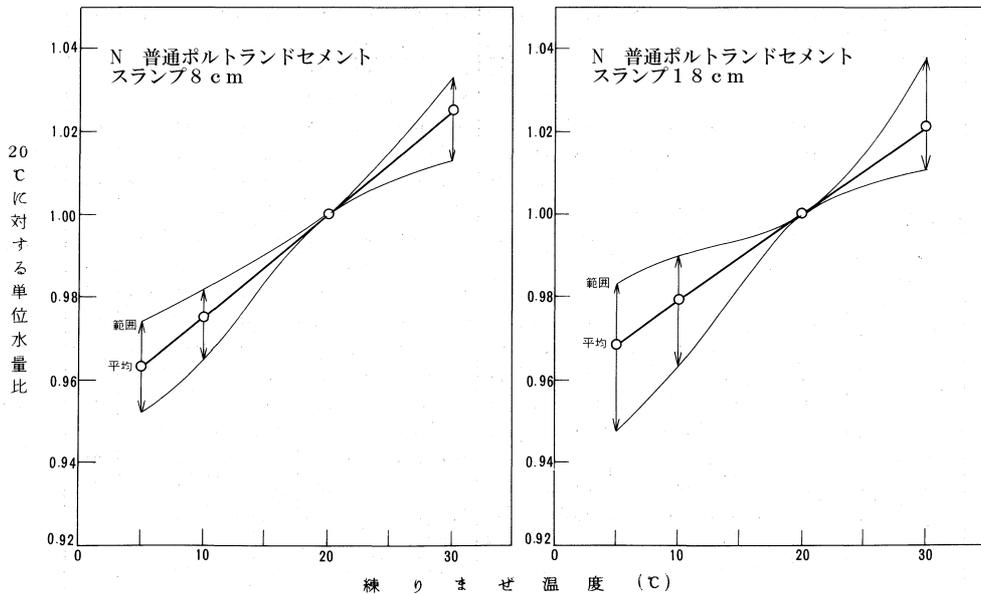


図 2.1 練混ぜ温度とコンクリートの単位水量比 (20 を基準)(N)

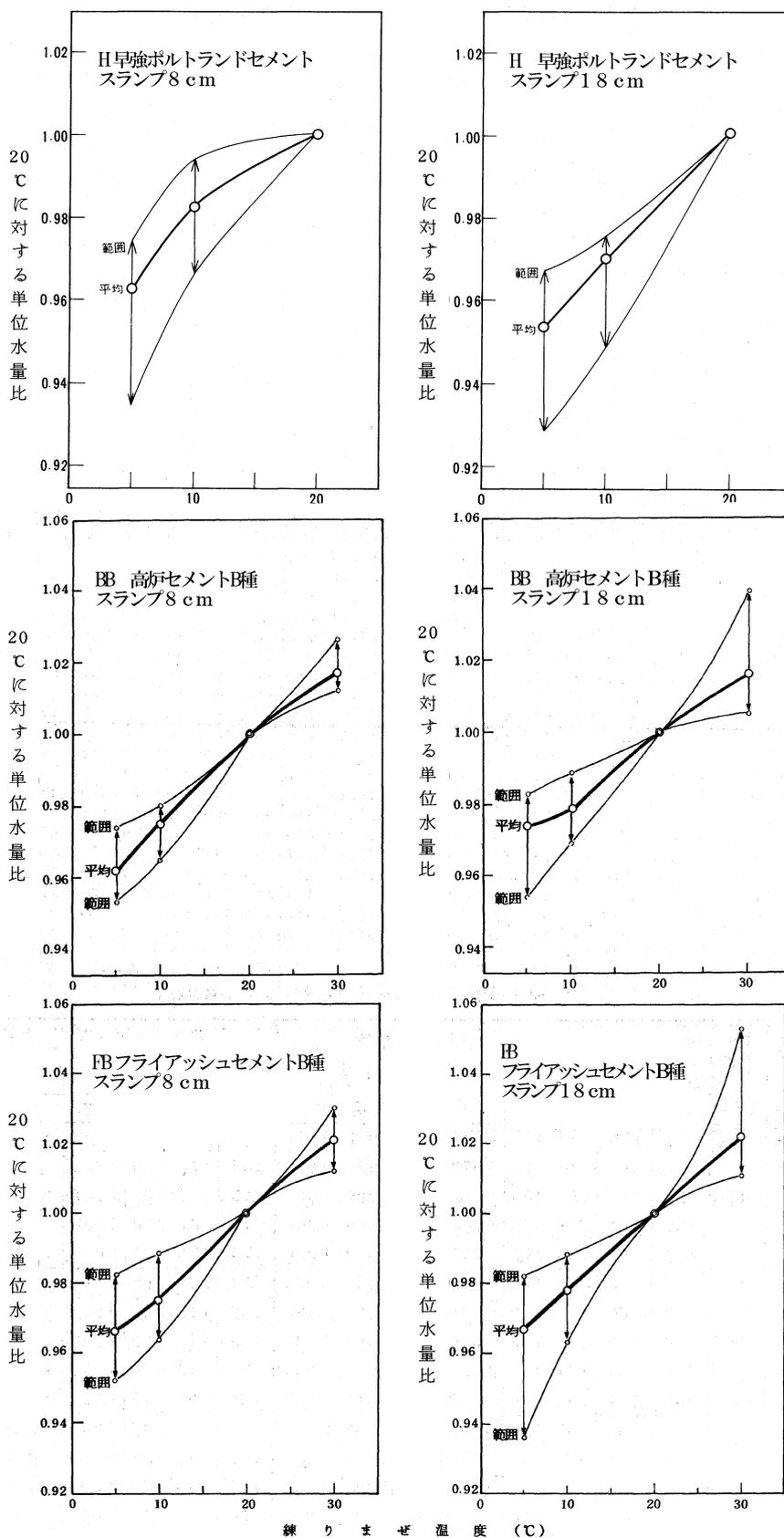


図 2.2 練混ぜ温度とコンクリートの単位水量比 (20 を基準)(H, BB, FB)

2.1.2 水セメント比

{	【要因】	・水セメント比	5水準	45%, 50%, 55%, 60%, 65%
		・セメントの種類	4種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B種 FB : フライアッシュセメント B種
		・スランプ	2水準	8.0 ± 1.5cm, 18.0 ± 1.5cm
		・練混ぜ温度	4水準	5, 10, 20, 30

水セメント比と単位水量の関係を図 2.3 に示す。N, H, BB, FB の全てのセメントにおいてスランプ 8.0 ± 1.5cm を得る単位水量は水セメント比 45~55% の範囲でほぼ同一であるのに対し、スランプ 18.0 ± 1.5cm を得る単位水量は水セメント比 55~65% の範囲では水セメント比が低いほど僅かながら増加した。

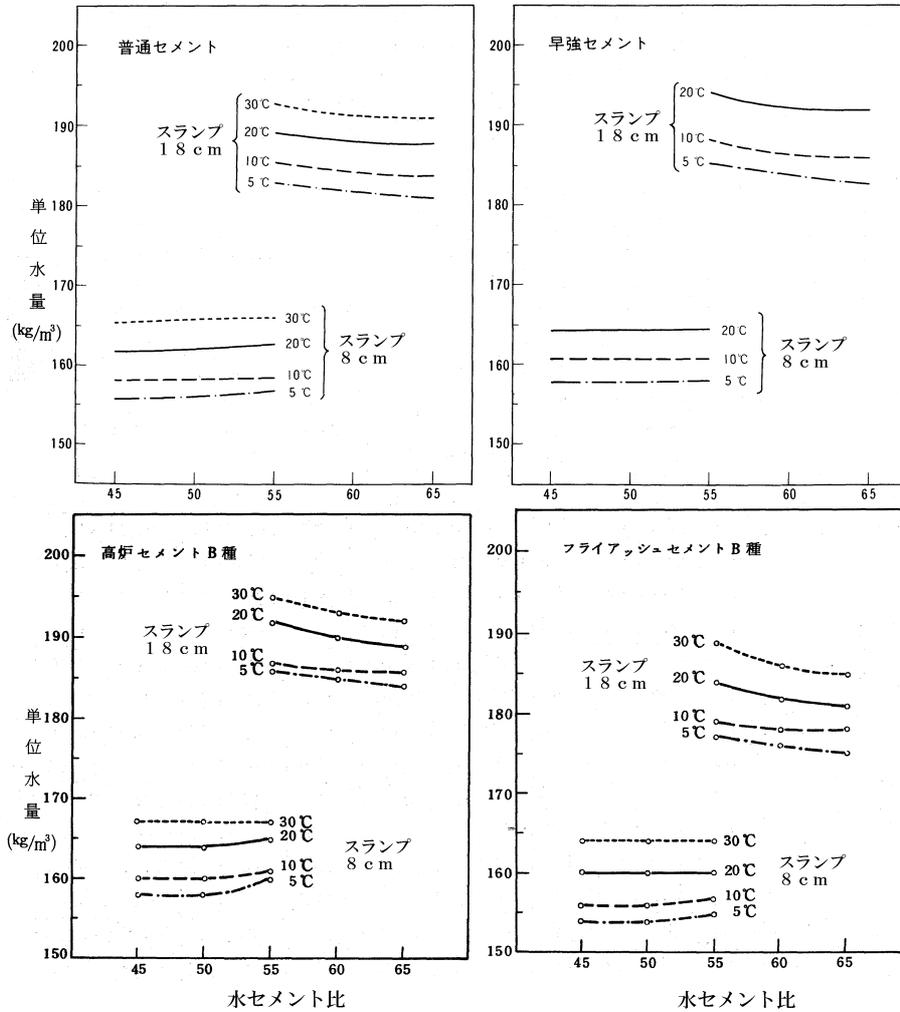


図 2.3 水セメントと単位水量

3 圧縮強度

3.1 各種要因の影響

3.1.1 セメントの種類および水セメント比

F-55	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究	2008年
------	----------------------------	-------

F-55 では、コンクリートの強度発現性に及ぼすセメントの種類による影響について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠		
	・スランプ	12.0 ± 1.5cm		
	・養生条件	標準水中養生		
	【要因】	・セメントの種類	5種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント M : 中庸熱ポルトランドセメント L : 低熱ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B種
	・水セメント比	3水準	45%, 55%, 65%	

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度を 100 としたときの強度比を表 3.1 に、材齢と圧縮強度の関係を図 3.1 に示す。材齢 7 日の圧縮強度は、H > N > BB > M > L の順であり、L が最も低い強度を示した。ただし、水セメント比 45% では BB よりも M のほうが若干大きい強度となっており、水セメント比により異なる傾向を示した。その後、材齢の経過とともにセメントによる強度差が小さくなり、材齢 28 日では BB はいずれの水セメント比においても N とほぼ同等、M および L についても低水セメント比では同等の強度を示した。材齢 91 日では BB、M および L を用いたコンクリートは H、N を用いたコンクリートをやや上回る強度発現を示した。

表 3.1 普通セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を 100 としたときの強度比

W/C (%)	セメントの種類	材齢 (日)		
		7	28	91
65	N	100	100	100
	H	125	109	105
	M	52	89	113
	L	26	69	112
	BB	67	94	110
55	N	100	100	100
	H	124	111	98
	M	58	97	111
	L	31	88	117
	BB	68	98	113
45	N	100	100	100
	H	116	103	93
	M	73	105	114
	L	38	95	115
	BB	67	94	105

(%)

各種セメントの材齢 28 日の圧縮強度を 100 としたときの強度比を表 3.2 に示す。いずれの水セメント比においても H は材齢 7 日以降, N は材齢 28 日以降の強度増進が小さい。一方, BB, M および L は材齢 7 日以降の強度の伸びが大きく, 材齢 28 日以降も良好な強度増進を示した。なかでも L の強度増進が顕著である。水セメント比の影響をみると, BB では材齢 7 日, 91 日ともに水セメント比による差はあまり大きくないのに対して, M および L では, 材齢 7 日では低水セメント比ほど強度比が大きくなるが, 材齢 91 日では低水セメント比ほど強度比が小さくなった。従って, M および L では水セメント比が小さい配合ほど早期に材齢 28 日に近い強度レベルに達し, 逆に水セメント比が大きい配合では強度発現が遅いが 28 日以降の強度の伸びが大きい傾向にあった。

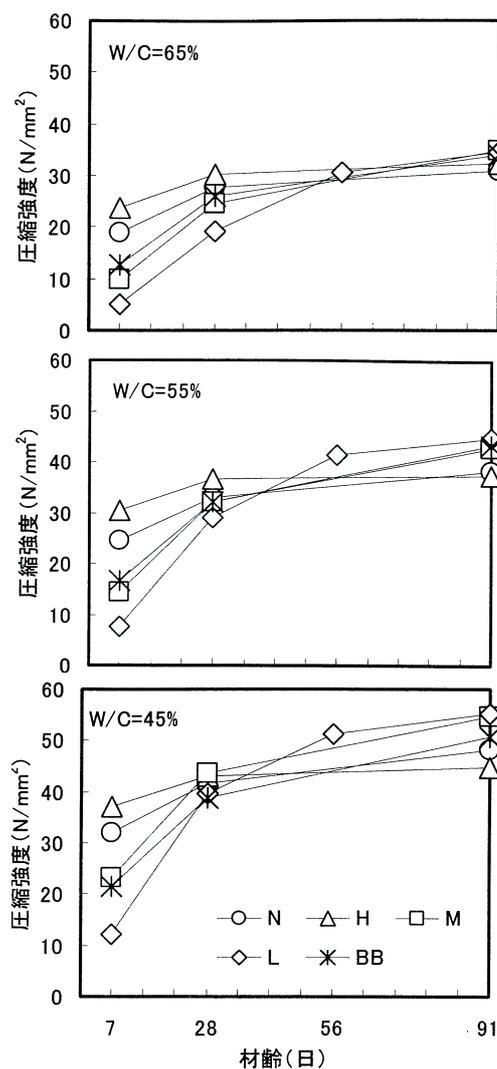


図 3.1 材齢と圧縮強度

表 3.2 各種セメントの材齢 28 日の圧縮強度を 100 としたときの強度比

セメントの種類	W/C (%)	材齢 (日)			
		7	28	56	91
N	65	69	100	—	111
	55	74	100	—	116
	45	77	100	—	116
H	65	79	100	—	107
	55	83	100	—	103
	45	87	100	—	104
M	65	40	100	—	141
	55	45	100	—	133
	45	54	100	—	125
L	65	26	100	159	179
	55	26	100	142	154
	45	31	100	130	134
BB	65	49	100	—	131
	55	52	100	—	135
	45	55	100	—	130

(%)

3.1.2 養生温度および養生条件

(1) 養生温度

F-34	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その1)	1982 年
F-36	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その2)	1983 年

F-34 および F-36 では、N、H、BB および FB について、水セメント比を変化させたスランブ $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ および $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ の AE コンクリートを対象に、冬期および夏期の施工を想定した温度条件を与え、養生条件は水中養生および型枠内における封緘養生とし、初期材齢における強度発現性について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠		
	【要因】	・養生温度	5 水準	5, 10, 20, 30
		・養生条件	2 種類	水中養生 (48 時間脱型後に水中), 封緘養生
		・セメントの種類	4 種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B 種 FB : フライアッシュセメント B 種
		・スランブ	2 水準	$8.0 \pm 1.5\text{cm}$ (硬練り), $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ (軟練り)
		・水セメント比	硬練り 3 水準	45%, 50%, 55%
			軟練り 3 水準	55%, 60%, 65%

N、H、BB および FB を使用した硬練りコンクリートおよび軟練りコンクリートについて、W/C、養生方法および練混ぜ・養生時の温度が異なる場合の初期材齢の圧縮強度を表 3.3 および表 3.4、図 3.2～図 3.9 に示す。なお、表には、脱型後に 20 水中養生した場合の材齢 28 日の圧縮強度も併せて示す。また、封緘養生とは、型枠のまま上面を密封し水分の蒸発のない状態での養生を指す。

いずれのセメントも初期材齢の圧縮強度に及ぼす養生温度の影響は大きく、これに比べると、W/C やコンクリートの種類の影響は比較的小さかった。また、水中養生と封緘養生を比較すると、材齢 7 日までの圧縮強度は同等となっており、封緘養生でも水分の逸散を防げば、初期強度は水中養生と同一視できる結果であった。

表 3.3 各材齢における圧縮強度 (N, H)

コンクリートの種類	セメントの種類	W/C (%)	練混ぜ・養生温度 (°C)	水中養生 (N/mm ²)				封緘養生 (N/mm ²)			
				3日	5日	7日	28日*1	1日	3日	5日	7日
硬練りコンクリート	N	45	5	8.43	16.8	22.9	46.0	0.59	8.04	16.2	22.0
			10	15.8	24.0	28.5	47.7	2.55	15.6	23.6	28.3
			20	22.4	29.7	33.4	45.1	7.85	22.2	29.5	32.9
			20*2	24.6	30.4	34.8	45.1	9.51	24.7	31.7	35.4
			30*2	28.1	32.7	34.9	42.9	14.7	28.9	33.3	36.0
		50	5	6.37	13.1	18.1	40.6	0.39	5.98	12.7	17.5
			10	12.2	19.6	23.9	41.5	2.06	12.1	19.3	23.7
			20	18.6	25.5	29.1	40.4	6.08	18.7	25.2	28.1
			20*2	20.8	26.8	30.4	40.5	7.55	21.4	27.3	30.8
			30*2	23.7	28.7	31.3	37.8	12.5	24.2	29.2	32.2
	55	5	4.61	10.0	14.3	34.9	0.29	4.51	9.81	14.3	
		10	10.0	15.8	19.2	35.8	1.57	9.81	15.7	19.4	
		20	15.5	21.5	24.2	35.9	5.00	15.5	21.4	24.6	
		20*2	17.3	22.8	26.3	35.4	5.98	18.1	23.3	26.8	
	H	45	5	16.9	27.9	33.7	51.6	1.67	16.7	27.0	32.5
			10	24.5	34.2	40.0	52.0	5.20	24.4	33.2	38.7
			20	32.3	38.9	41.0	50.1	14.9	32.7	38.3	42.2
		50	5	13.5	22.8	29.3	47.2	1.18	13.2	22.4	28.2
			10	20.6	29.3	34.8	46.4	3.92	20.6	28.8	33.5
			20	27.9	33.8	36.9	44.5	12.2	28.0	34.0	37.3
55		5	10.2	18.3	24.3	42.0	0.69	9.90	18.0	23.7	
		10	16.0	24.0	28.6	41.1	2.75	16.1	23.7	28.4	
		20	24.0	30.1	33.3	40.0	9.41	24.1	30.4	33.0	
		20*2	28.1	32.7	34.9	42.9	14.7	28.9	33.3	36.0	
軟練りコンクリート	N	55	5	5.49	10.1	13.3	35.6	0.78	5.69	9.90	13.0
			10	7.85	12.7	16.2	35.3	2.16	8.04	12.7	15.7
			20	14.5	16.9	20.6	33.4	5.39	12.6	17.1	20.3
			30	16.2	20.7	23.2	32.2	8.24	16.0	20.4	23.2
		60	5	4.31	8.14	11.0	31.9	0.59	4.31	7.94	10.6
			10	6.67	11.2	14.5	31.7	1.77	6.96	11.0	13.8
			20	10.8	14.7	17.7	29.9	4.22	10.6	14.7	17.6
		65	5	3.43	6.77	9.32	27.3	0.49	3.43	6.37	9.22
			10	5.59	9.51	12.7	27.9	1.37	5.88	9.71	12.3
			20	9.22	12.4	14.9	25.6	3.43	9.02	12.6	15.0
	H	55	5	9.12	15.1	20.5	39.3	1.37	9.22	15.2	19.6
			10	13.5	20.2	25.0	39.1	3.82	13.9	20.1	23.8
			20	20.9	26.2	29.8	38.0	10.3	21.1	26.1	29.0
		60	5	7.45	12.7	17.8	34.8	1.18	7.55	13.0	17.6
			10	11.5	16.9	21.0	35.1	3.14	11.8	17.0	20.4
			20	18.2	22.8	26.5	34.7	8.63	18.0	23.2	25.7
		65	5	6.47	10.9	15.5	31.0	0.88	6.57	11.3	15.5
			10	9.81	14.3	18.3	31.3	2.26	10.1	14.7	17.8
			20	15.2	19.8	22.9	30.6	6.86	15.3	20.1	22.7
			20*2	17.3	22.8	26.3	35.4	5.98	18.1	23.3	26.8

*1: 材齢 28 日強度は、脱型後 20°C 水中養生を実施。他の材齢は練混ぜおよび養生温度は同一

表 3.4 各材齢における圧縮強度 (BB, FB)

コンクリートの種類	セメントの種類	W/C (%)	練混ぜ・養生温度 (°C)	水中養生 (N/mm ²)				封緘養生 (N/mm ²)			
				3日	5日	7日	28日*1	1日	3日	5日	7日
硬練りコンクリート	BB	45	5	5.69	9.90	13.5	45.8	0.78	5.69	9.90	13.6
			10	8.83	13.8	18.2	43.2	1.86	9.32	14.5	18.4
			20	15.6	20.6	24.6	43.7	6.28	16.5	21.2	25.1
			20*2	14.1	19.5	23.3	43.7	5.30	14.7	20.1	23.7
		30*2	17.5	23.4	28.1	38.9	8.34	18.7	25.2	29.5	
		50	5	4.61	8.14	11.7	41.3	0.78	4.71	8.24	11.4
			10	7.06	11.1	14.3	38.0	1.57	7.26	11.5	14.9
			20	12.7	17.2	21.1	39.4	4.90	13.5	17.8	21.0
			20*2	11.2	16.0	19.1	38.7	4.02	11.8	16.8	19.9
		30*2	14.6	19.9	24.1	35.7	6.77	15.6	21.4	26.0	
		55	5	3.43	6.18	8.53	34.8	0.39	3.43	6.18	8.63
			10	5.59	9.02	11.8	33.4	1.27	5.88	9.32	12.0
	20		10.5	14.2	17.5	34.3	3.92	11.0	14.8	18.0	
	20*2		9.02	13.3	16.5	34.3	3.24	9.51	13.9	17.1	
	30*2	12.1	16.7	20.5	31.4	5.39	12.6	17.8	22.2		
	FB	45	5	8.34	15.4	20.4	41.7	0.39	8.34	14.9	19.8
			10	14.0	19.7	24.5	39.9	1.67	14.0	19.9	23.3
			20	20.6	25.8	28.8	39.3	7.35	21.0	26.0	29.4
			20*2	19.6	25.0	27.8	39.0	5.98	19.4	24.9	28.0
		30*2	22.3	26.7	29.2	37.2	10.7	22.8	27.3	30.1	
		50	5	6.57	12.2	16.6	36.9	0.39	6.67	12.2	16.4
			10	11.0	16.3	20.4	35.2	1.27	11.4	16.7	20.3
			20	17.1	21.7	24.8	35.0	5.69	17.1	21.9	25.2
			20*2	16.0	20.8	23.8	34.1	5.00	16.0	21.2	23.6
30*2		19.2	23.2	25.7	33.9	8.73	18.8	23.7	26.7		
55		5	5.30	10.0	13.8	31.8	0.29	5.10	9.90	13.0	
		10	8.53	13.1	15.6	28.7	1.08	8.73	13.2	16.0	
	20	14.4	18.5	21.3	31.3	4.61	14.4	18.7	21.2		
	20*2	12.7	16.7	19.7	29.6	3.53	12.9	16.7	19.7		
30*2	15.7	19.1	21.6	29.0	6.86	16.1	20.0	22.7			
軟練りコンクリート	BB	55	5	2.75	4.81	6.86	32.6	0.59	2.75	5.10	7.35
			10	4.41	6.96	9.22	32.0	1.27	4.51	7.26	9.41
			20	8.63	11.8	14.0	31.8	3.43	8.63	12.0	14.5
			30	12.3	17.1	21.2	29.3	5.69	12.4	17.7	21.9
		60	5	2.35	4.02	5.79	29.6	0.49	2.35	4.22	6.18
			10	3.63	5.88	7.94	29.1	0.98	3.92	6.08	8.14
			20	7.16	10.1	11.9	28.4	2.94	7.35	10.2	12.4
			30	10.5	14.9	19.1	26.7	4.61	10.4	15.7	19.6
		65	5	1.86	3.43	4.90	27.0	0.39	1.96	3.63	5.20
			10	2.84	4.81	6.37	26.0	0.78	3.14	5.00	6.67
			20	5.98	8.43	10.2	24.6	2.35	6.08	8.63	10.7
			30	8.92	12.8	16.5	24.2	3.82	9.02	13.5	17.0
	FB	55	5	4.61	8.24	11.0	29.5	0.49	4.61	8.04	10.8
			10	7.06	11.0	13.9	28.9	0.98	7.16	10.9	13.2
			20	11.3	14.9	17.2	28.0	3.82	11.3	15.2	17.4
			30	14.7	18.1	21.2	26.8	7.55	14.8	18.4	20.9
		60	5	3.73	6.57	9.02	24.9	0.39	3.73	6.57	9.32
			10	5.59	8.92	11.5	24.5	0.88	5.69	8.83	11.4
			20	9.41	12.7	14.7	24.3	3.43	9.61	13.1	14.9
			30	12.9	15.9	18.2	23.9	6.47	12.8	16.1	18.5
		65	5	3.23	5.79	8.24	21.5	0.29	3.14	5.59	7.94
			10	4.70	7.85	10.0	20.6	0.69	4.71	7.65	10.0
			20	7.85	11.1	12.7	22.0	2.94	8.14	11.2	12.9
			30	11.3	13.5	15.7	20.8	5.30	11.4	14.0	16.1

*1: 材齢 28 日強度は、脱型後 20°C 水中養生を実施。他の材齢は練混ぜおよび養生温度は同一

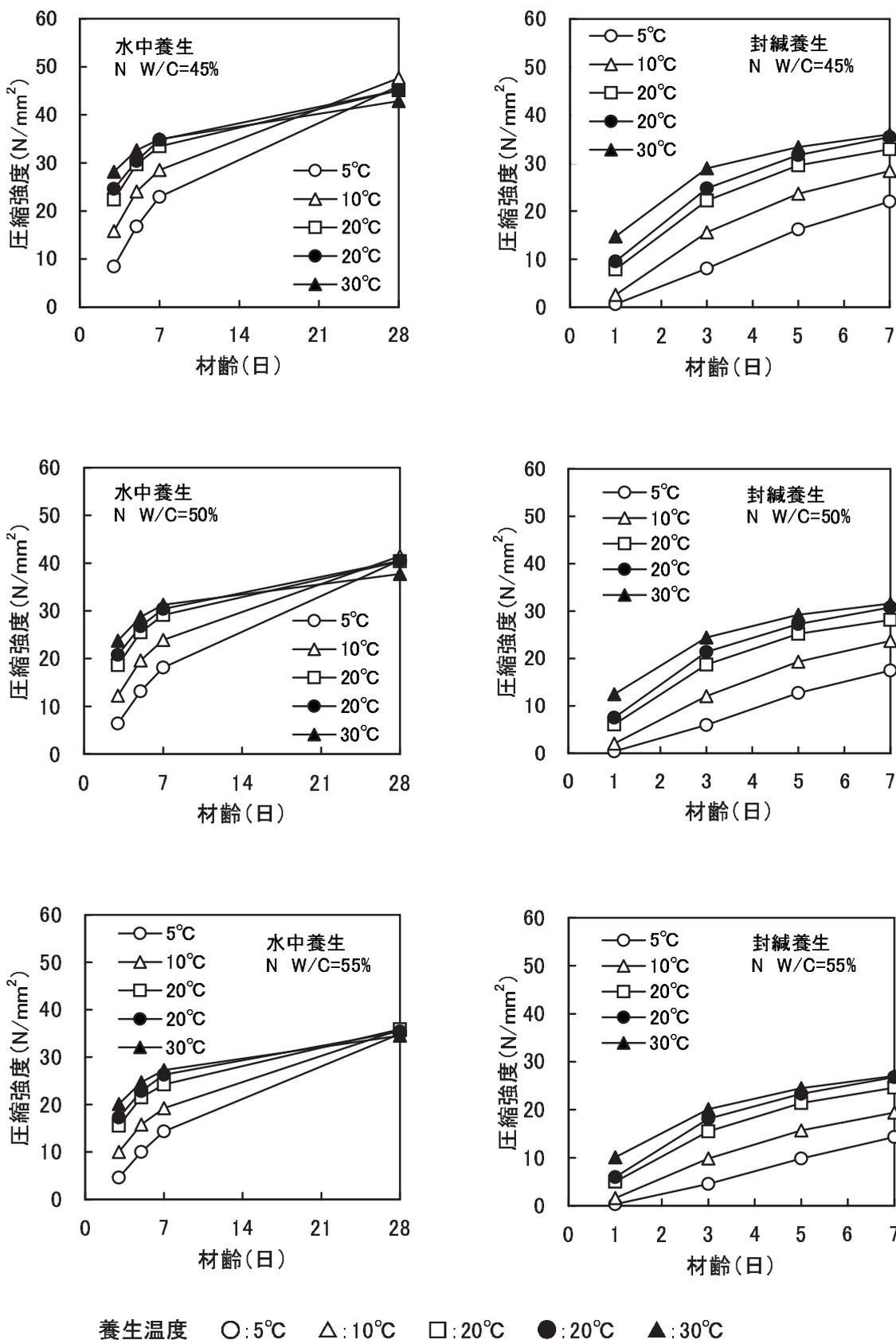


図 3.2 材齢と圧縮強度 (N, スランプ 8cm)

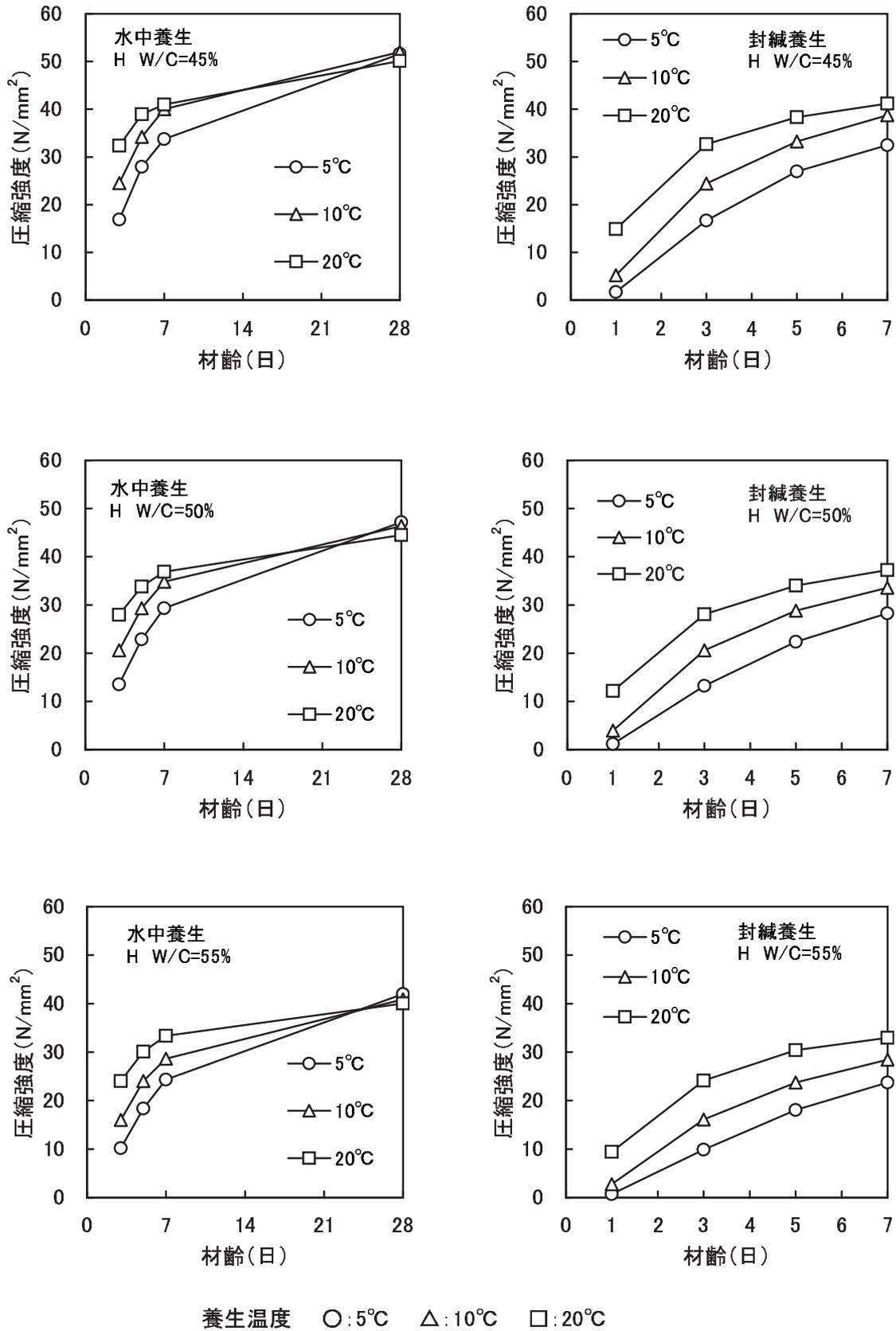


図 3.3 材齢と圧縮強度 (H, スランプ 8cm)

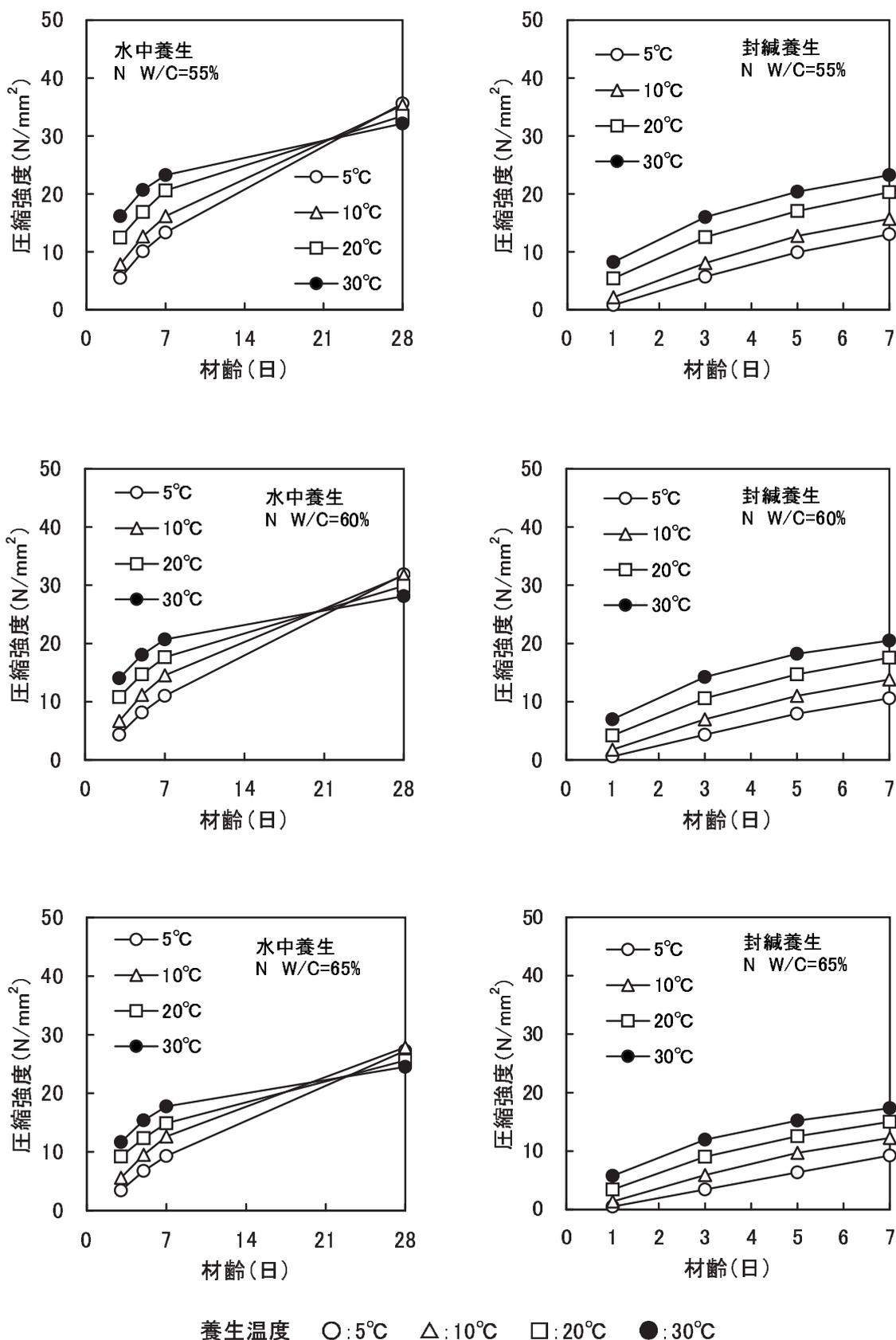


図 3.4 材齢と圧縮強度 (N, スランプ 18cm)

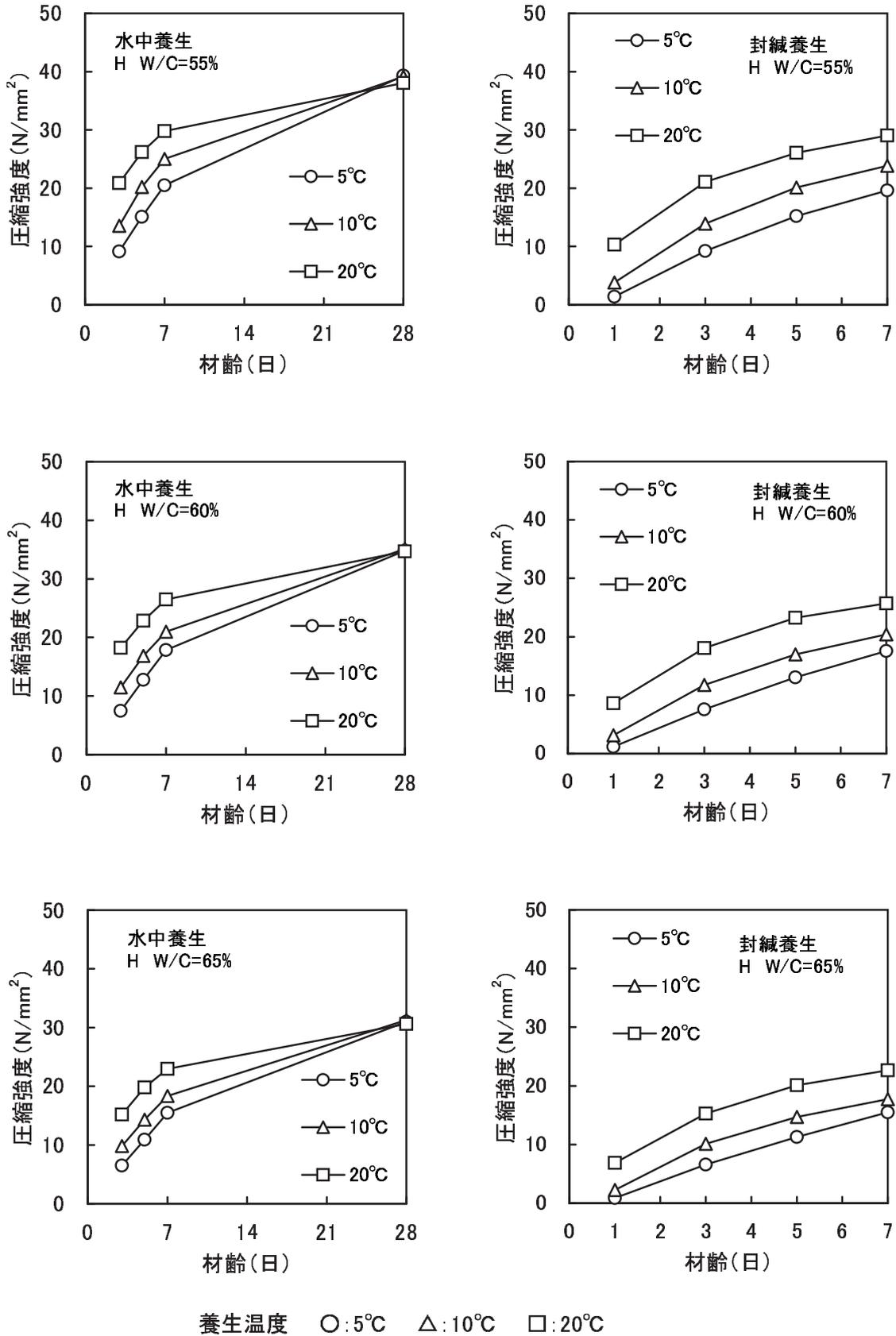


図 3.5 材齢と圧縮強度 (H, スランプ 18cm)

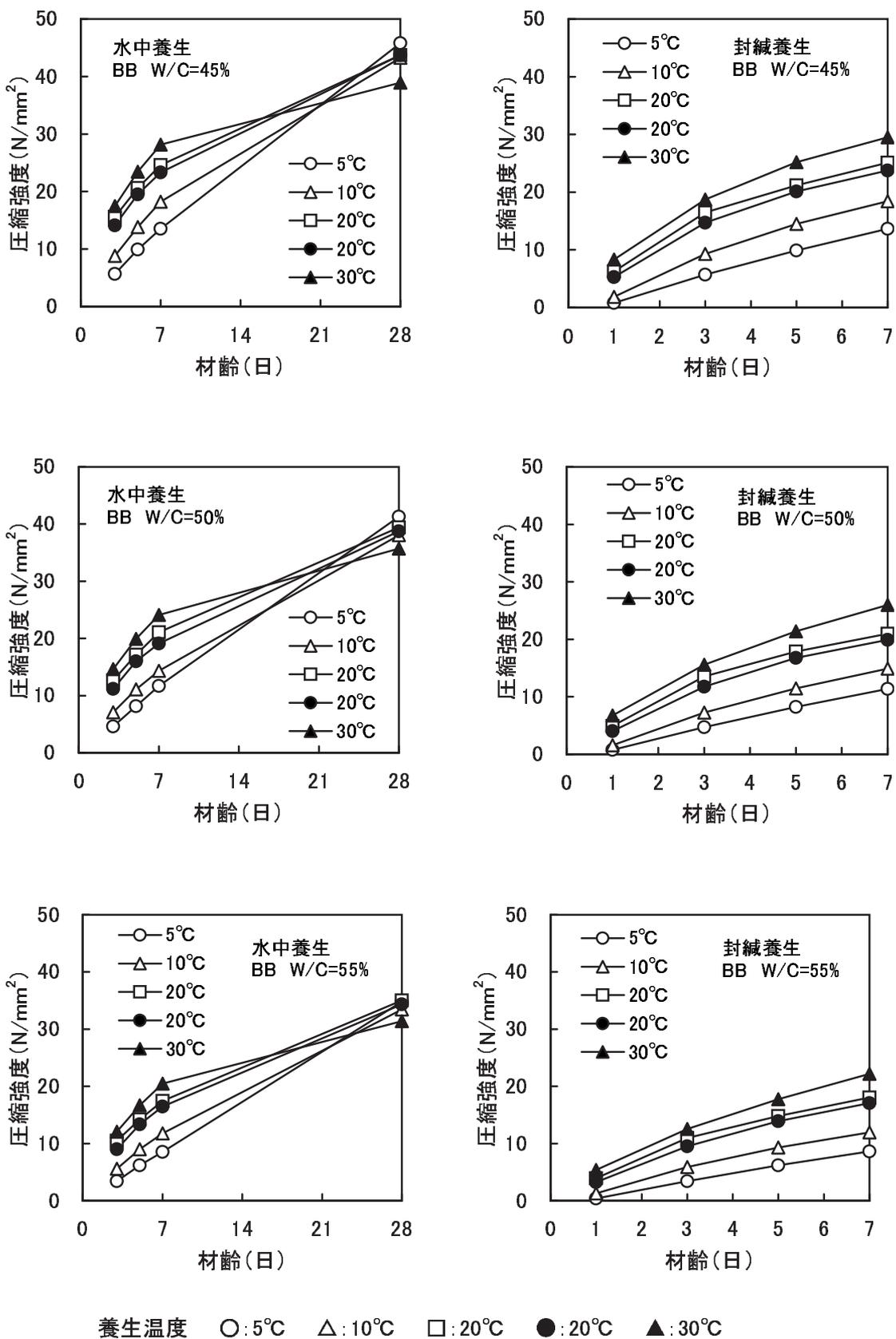


図 3.6 材齢と圧縮強度 (BB, スランプ 8cm)

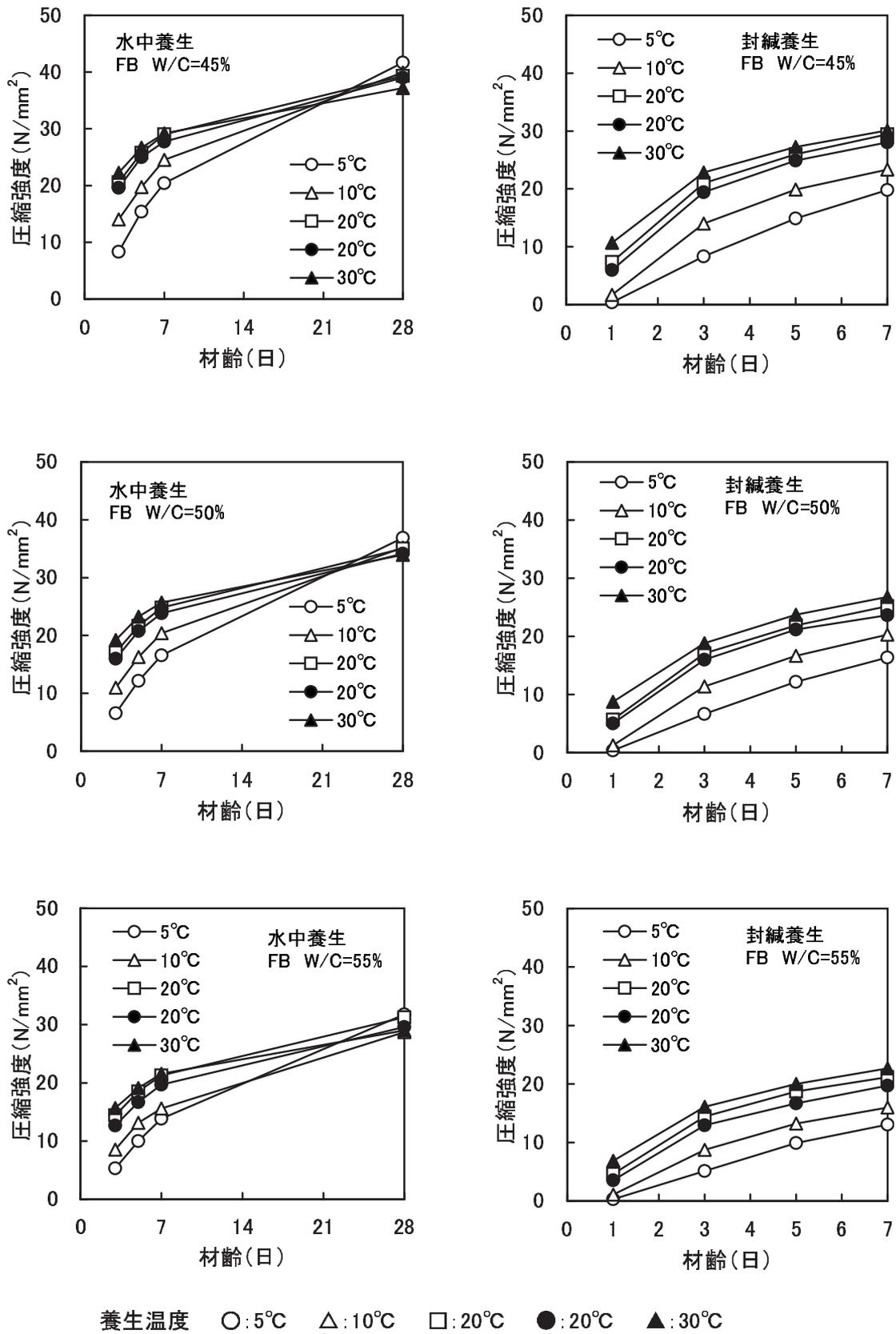


図 3.7 材齢と圧縮強度 (FB, スランプ 8cm)

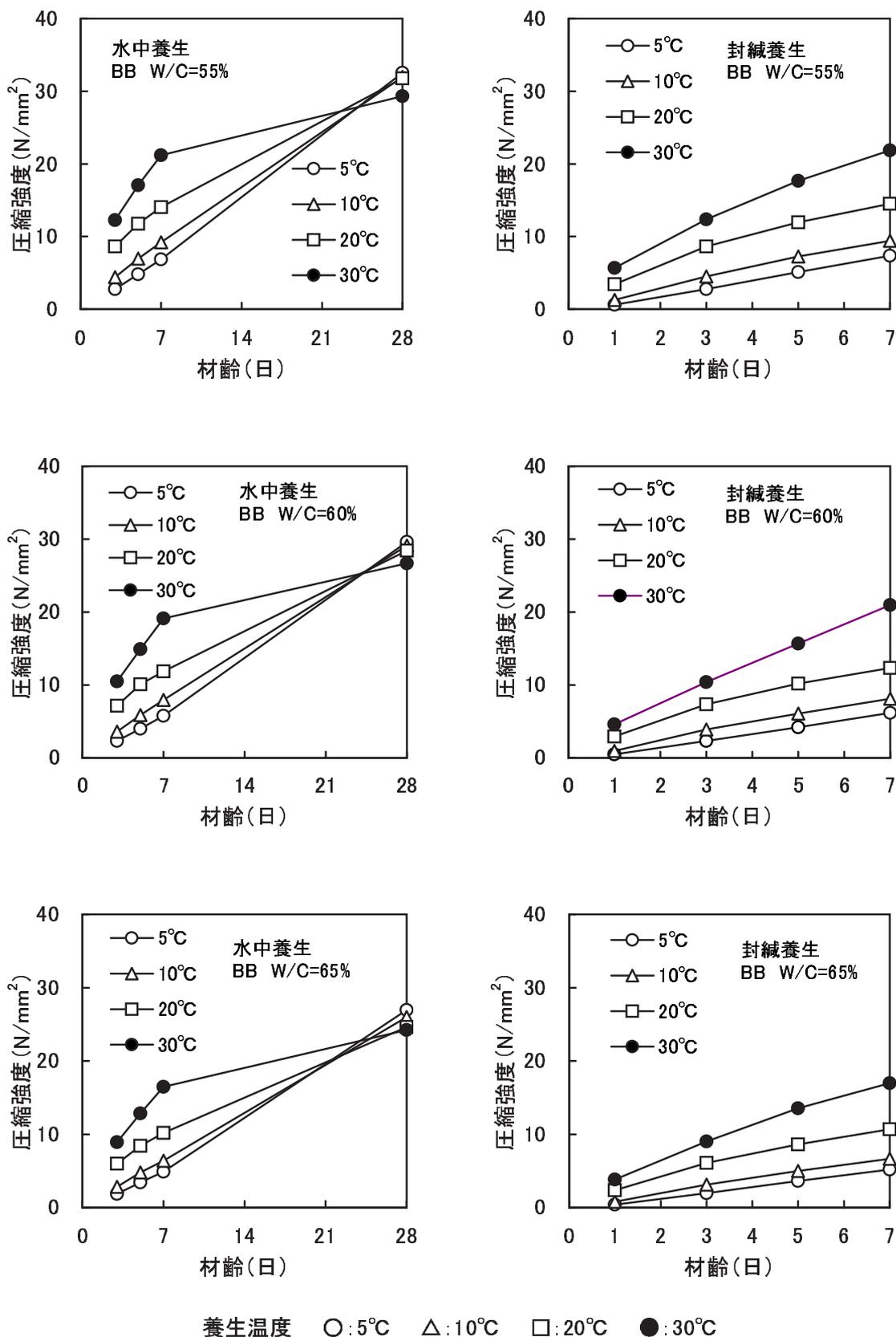


図 3.8 材齢と圧縮強度 (BB, スランプ 18cm)

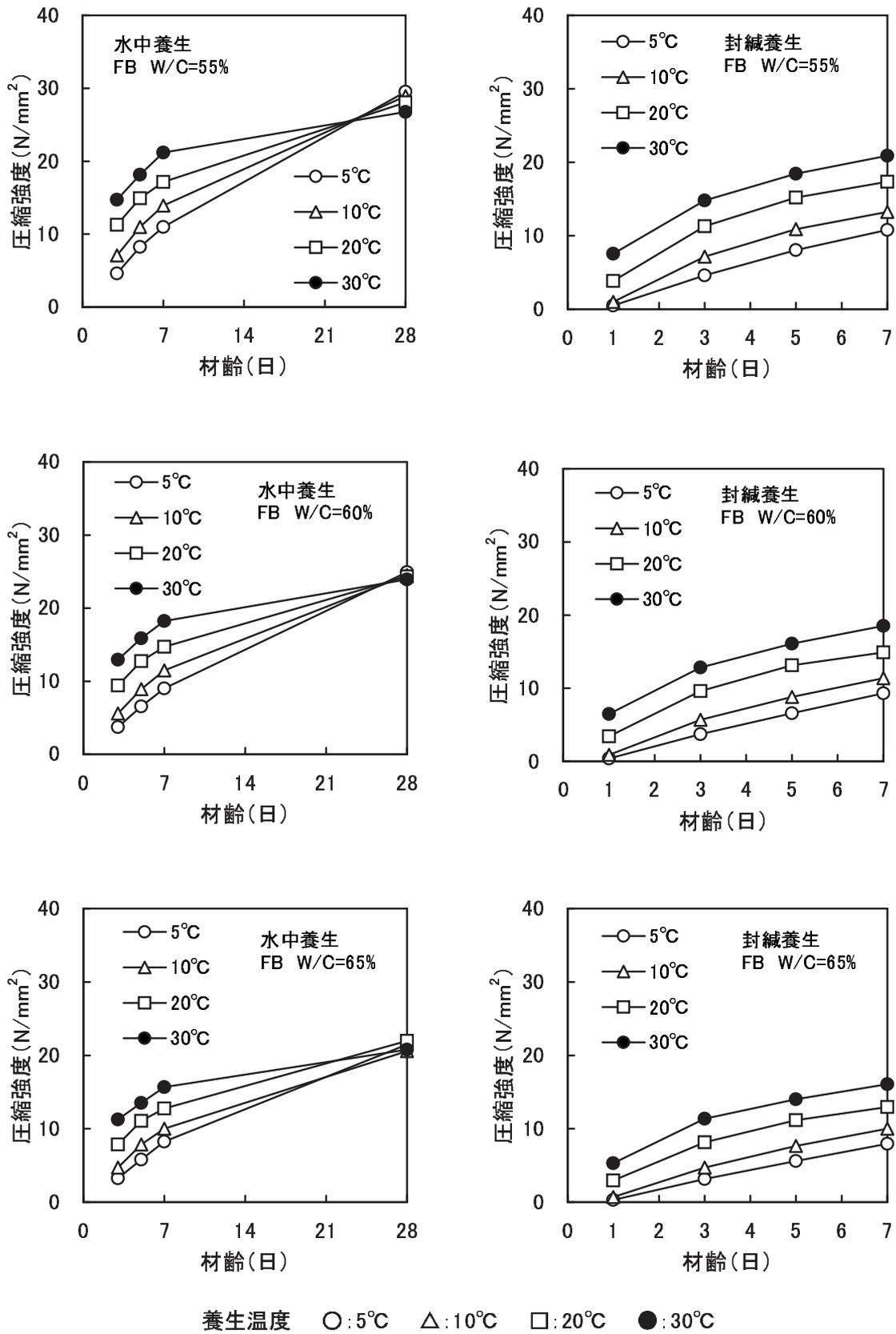


図 3.9 材齢と圧縮強度 (FB, スランプ 18)

F-51	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇	2002年
------	----------------------------------	-------

F-51では、スランブ、水セメント比、養生方法および練混ぜ養生温度を要因として、N、LおよびBBの3種類のセメントを使用したコンクリートの初期材齢の圧縮強度について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠		
	【要因】	・練混ぜ温度	3水準	10, 20, 30
		・養生条件	2種類	封緘養生 (試験材齢まで練混ぜ温度と同一温度で養生) 標準養生 (材齢1日脱型後、試験材齢まで20 標準水中養生)
	・セメントの種類	3種類	N	普通ポルトランドセメント
			BB	高炉セメントB種
			L	低熱ポルトランドセメント
・水セメント比	2水準	50%, 60%		
・スランブ	2水準	8.0 ± 1.5cm (硬練り), 18.0 ± 1.5cm (軟練り)		

封緘養生したケースにおいて、標準養生材齢28日に対する初期材齢の強度比(初期強度比)を求め、養生温度およびセメントの種類が初期強度比に及ぼす影響を評価している。表3.5および表3.6に、標準養生28日強度を基準とした強度比を示す。養生温度が高いほど初期強度比は大きく、セメントの種類ではいずれの材齢においてもN > BB > Lの順に初期強度比が大きくなる。また、Nは材齢の進行とともに養生温度の影響は小さくなるが、初期強度発現の遅いBBおよびLは材齢7日でもその影響は顕著となる。一方、初期強度比に対するスランブやW/Cの違いによる影響はほとんどない。

図3.10～図3.13に、養生条件と圧縮強度の関係を示す。練混ぜ温度が変化しても、材齢1日で脱型した後に20の標準水中養生を行えば材齢7日の強度発現は同等となった

表 3.5 標準養生 28 日強度を基準とした封緘養生の強度比 (スランプ 8cm)

コンクリートの種類	セメントの種類	水セメント比 (%)	練り混ぜ温度 (°C)	材齢(日)			
				1	3	5	7
硬練り	N	50	10	6	36	54	64
			20	21	56	69	77
			30	35	66	74	77
		60	10	5	31	50	64
			20	18	52	67	75
			30	32	63	73	79
	BB	50	10	3	19	30	41
			20	11	35	46	55
			30	22	47	60	68
		60	10	2	16	26	35
			20	9	29	43	51
			30	18	43	55	67
	L	50	10	2	16	21	26
			20	8	22	28	33
			30	14	26	37	50
		60	10	2	13	20	23
			20	8	21	26	31
			30	14	26	36	52

表 3.6 標準養生 28 日強度を基準とした封緘養生の強度比 (スランプ 18cm)

コンクリートの種類	セメントの種類	水セメント比 (%)	練り混ぜ温度 (°C)	材齢(日)			
				1	3	5	7
軟練り	N	50	10	5	36	54	65
			20	20	55	68	76
			30	34	64	72	78
		60	10	4	31	48	62
			20	16	50	66	73
			30	29	60	72	77
	BB	50	10	3	19	29	40
			20	10	33	47	56
			30	21	47	61	70
		60	10	2	16	27	35
			20	9	29	42	52
			30	18	44	58	69
	L	50	10	2	16	21	26
			20	8	21	28	32
			30	16	26	38	53
		60	10	2	17	22	26
			20	9	22	28	34
			30	17	28	38	53

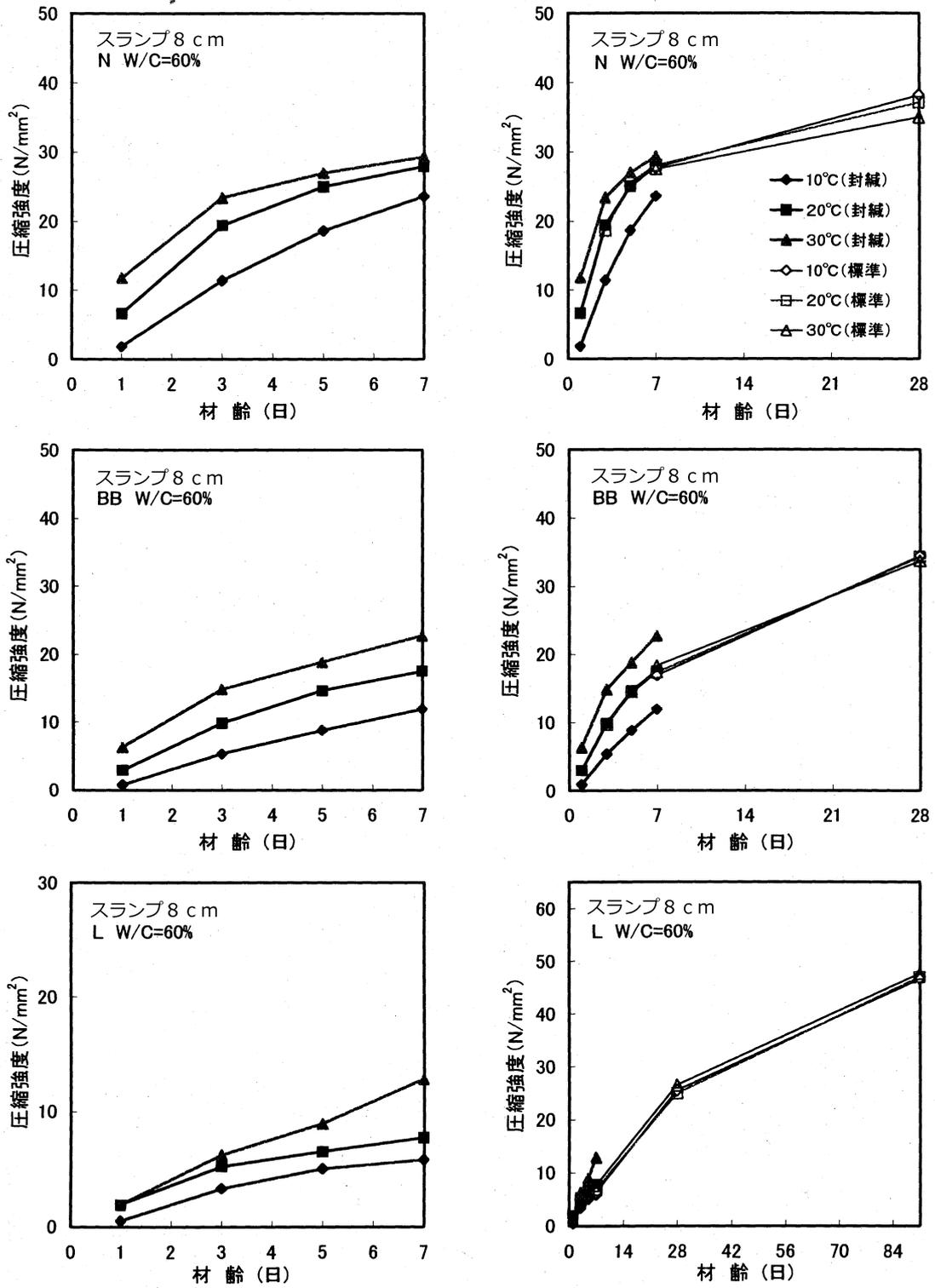


図 3.10 養生条件と圧縮強度 (W/C=60%, スラブ 8cm)

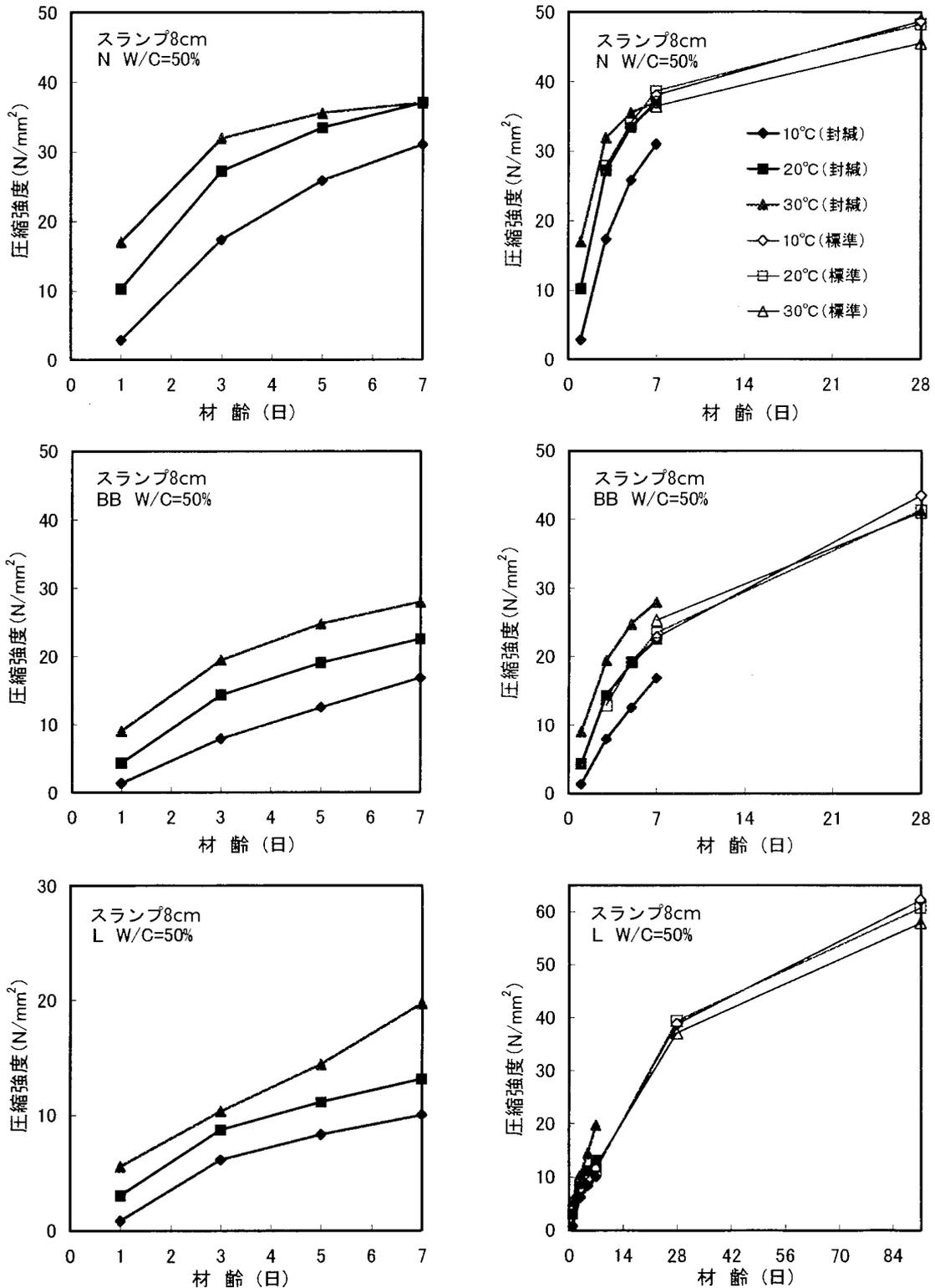


図 3.11 養生条件と圧縮強度 (W/C=50%, スランプ 8cm)

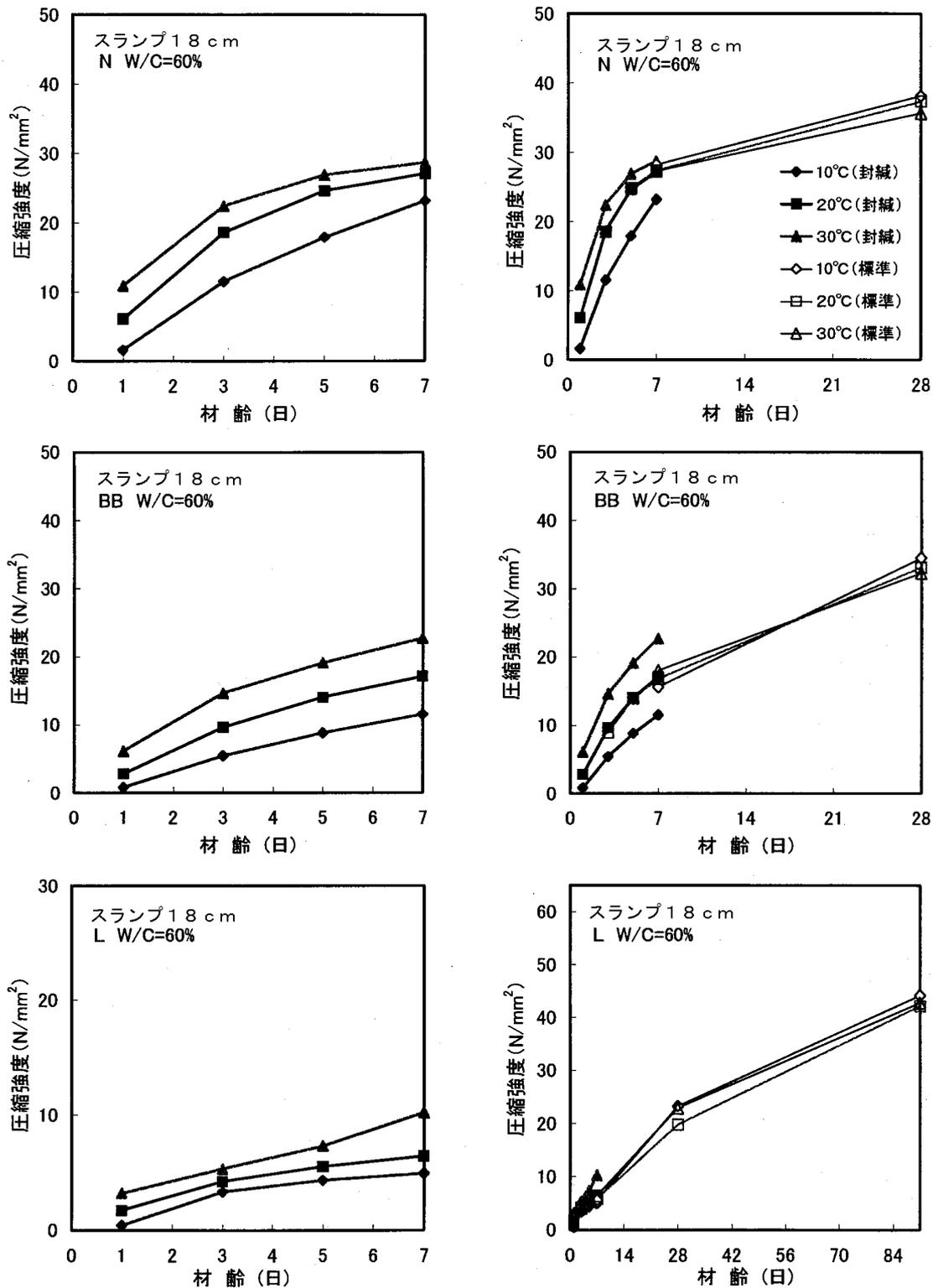


図 3.12 養生条件と圧縮強度 (W/C=60% , スランプ 18cm)

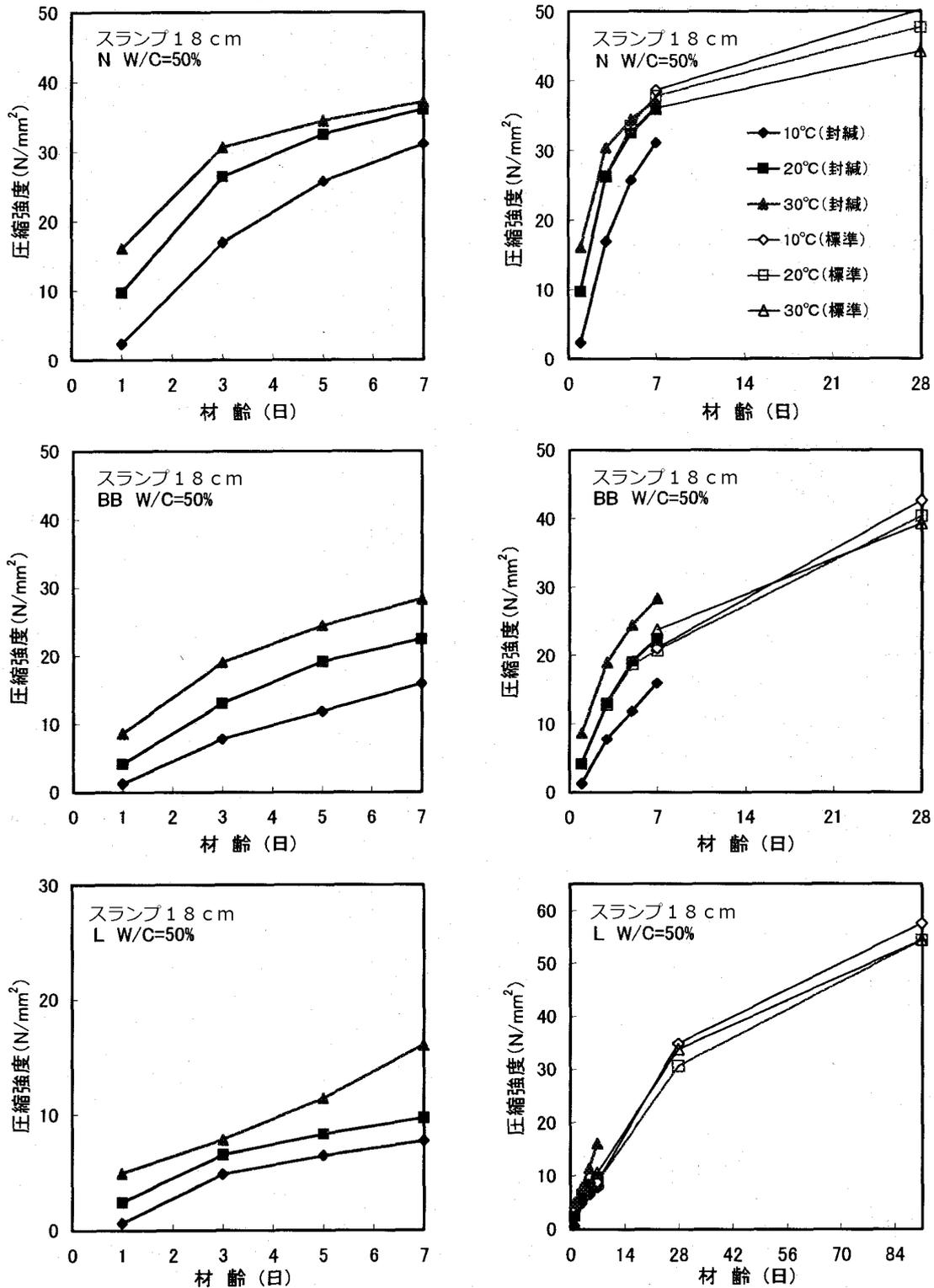


図 3.13 養生条件と圧縮強度 (W/C=50%, スラブ 18cm)

(2) 養生条件

F-34	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その1)	1982 年
F-36	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告 (その2)	1983 年

F-34 および F-36 では、N、H、BB および FB を対象として、型枠内における封緘養生による初期強度への影響を、標準水中養生の材齢 28 日強度に対する強度比で検討を行い報告している。

- 【試験条件】 JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠
- 【要因】
 - ・養生条件 2 種類 水中養生 (48 時間脱型後に水中)、封緘養生
 - ・セメントの種類 4 種類
 - N : 普通ポルトランドセメント
 - H : 早強ポルトランドセメント
 - BB : 高炉セメント B 種
 - FB : フライアッシュセメント B 種
 - ・養生温度 5 水準 5 , 10 , 20 , 30

水中養生と封緘養生における強度比の比較を表 3.7 に示す。封緘養生とは、型枠のまま上面を密閉し水分の蒸発のない状態で養生している。水中養生に対する封緘養生の強度比はほぼ 1 に近い値が得られており、水分の逸散を防ぎ封緘養生を行なうことで、初期材齢における強度は、水中養生とほぼ同程度となった。

表 3.7 水中養生と封緘養生の強度比の比較

セメントの種類	比較 練りま ぜおよび 養生の温度(°C)	(封緘養生の強度比)/(水中養生の強度比)		
		3	5	7
普通 セメント	5	0.97	0.98	0.97
	10	1.00	1.00	0.98
	20	1.00	1.01	1.00
	30	1.01	1.00	1.00
早強 セメント	5	1.00	0.99	0.97
	10	1.01	0.99	0.97
	20	1.00	1.01	0.99
高炉 セメント B 種	5	1.04	1.04	1.04
	10	1.06	1.07	1.04
	20	1.05	1.03	1.04
	30	1.04	1.09	1.05
フライ アッシュ セメント B 種	5	0.98	0.98	0.99
	10	1.06	1.00	0.99
	20	1.01	1.01	1.01
	30	1.01	1.03	1.02

3.1.3 初期の乾燥

F-38	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響	1985 年
------	-------------------------	--------

F-38 では、初期の乾燥がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を各種セメントにおいて検討を行い報告している。セメントは、N、H、BB および FB を対象とした。

- 【試験条件】 JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠
- 【要因】
 - ・乾燥開始材齢 5水準 1日、2日、3日、5日、7日
 - ・乾燥条件 温度：20℃、湿度：60 ± 5 % R.H.
 - ・セメントの種類 4種類
 - N：普通ポルトランドセメント
 - H：早強ポルトランドセメント
 - BB：高炉セメントB種
 - FB：フライアッシュセメントB種
 - ・配合 2種類
 - 水セメント比 50%，スランプ 8cm（硬練り）
 - 水セメント比 60%，スランプ 18cm（軟練り）
 - ・乾燥時の環境 2条件 風有り、風無し

標準水中養生における材齢 28 日圧縮強度を 100 %とした場合の材齢 28 日における圧縮強度比を図 3.14～図 3.16 にそれぞれ示す。W/C=50% スランプ 8cm に比べて W/C=60% スランプ 18cmの方が初期乾燥の影響を受けやすい傾向にある。セメントの種類についてみると、初期強度の高いセメントほど初期乾燥の影響を受けにくい傾向にある。また、乾燥開始材齢が早いほど圧縮強度が著しく低下しており、乾燥開始材齢 3 日まではその傾向が特に顕著である。

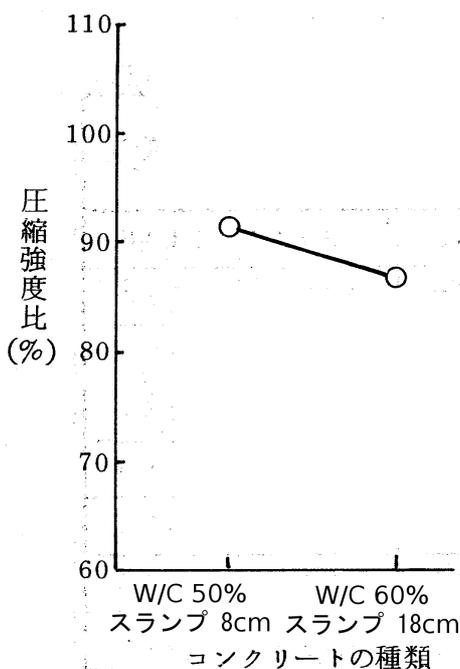


図 3.14 コンクリートの種類と圧縮強度比

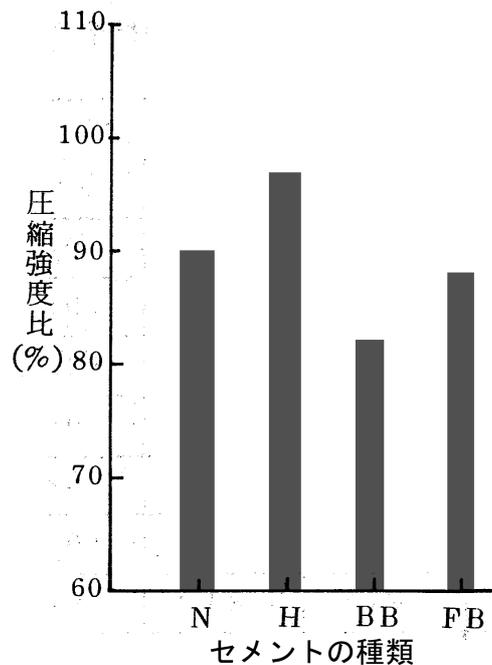


図 3.15 セメントの種類と圧縮強度比

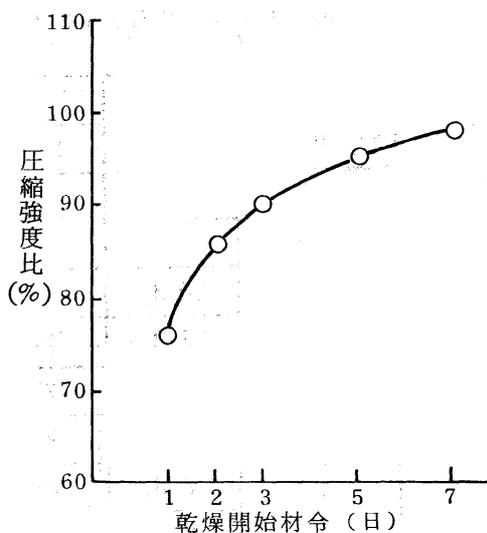


図 3.16 乾燥開始材齢と圧縮強度比

水中養生における材齢 28 日圧縮強度を 100 %とした場合の材齢 91 日における乾燥条件下の圧縮強度比を図 3.17 に示す。いずれのセメントについても、材齢 91 日においても乾燥開始材齢の影響が残存しており、乾燥開始材齢が早いほど圧縮強度が低い傾向にある。また、材齢 91 日においても初期強度が高いセメントほど圧縮強度が高い傾向を維持している。これに対し、材齢 91 日まで水中養生を行い初期の乾燥を防いだ場合の圧縮強度比は、いずれのセメントについても 100 %を超えており、特に BB および FB の圧縮強度比が著しく高い。このことは、長期材齢において強度発現が期待される BB および FB のような混合セメントを用いたコンクリートについては、初期材齢における湿潤養生が重要であることを示している。その他、乾燥時の湿度、風の有無についても検討しているが、本試験の範囲においては顕著な影響は認められていない。

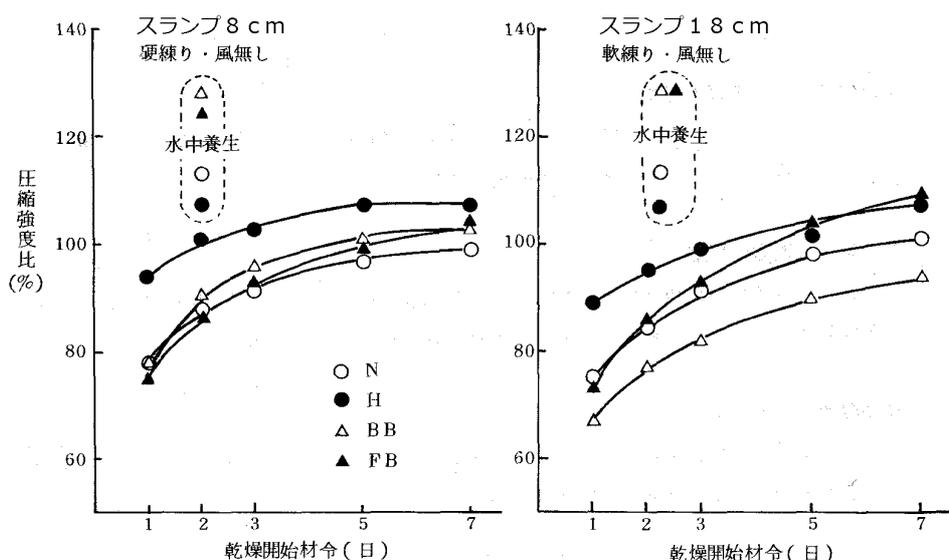


図 3.17 材齢 91 日の圧縮強度比 (標準水中材齢 28 日強度基準) と乾燥開始材齢

3.2 長期暴露

F-48	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢 20年最終報告	1998年
------	---	-------

F48 では、塩分含有量の異なる海砂を細骨材として使用したコンクリートを、酒田および鹿児島島の沿岸部に暴露し、長期材齢の圧縮強度について報告している。セメントは、N、H、M および BB を対象とした。

【試験条件】	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠	
	・養生条件	標準水中養生 28 日後暴露
	・試験材齢	28 日、10 年、20 年
	【要因】	・暴露環境 4 箇所 酒田感潮、酒田海中、鹿児島感潮、鹿児島海中
	・セメントの種類 4 種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント M : 中庸熱ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B 種
	・水セメント比	41.0% ~ 74.4%
	・海砂の塩分含有量	0.00, 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40%

酒田感潮、酒田海中、鹿児島感潮および鹿児島海中に 20 年間暴露したコンクリートのセメント種類別の強度増進状況を図 3.18 に、セメント水比と圧縮強度の関係を図 3.19 に示す。暴露期間 10 年から 20 年にかけて強度増進が認められる場合とそうでない場合があるが、暴露条件およびセメントの種類の違いによる一定の傾向は認められない。また、塩分含有量の違いがセメントの種類と強度発現性に及ぼす影響は認められない。各セメントとも低水セメント比では暴露条件による圧縮強度のばらつきは小さいが、BB 以外のセメントではセメント水比が高くなるとばらつきが大きくなっている。

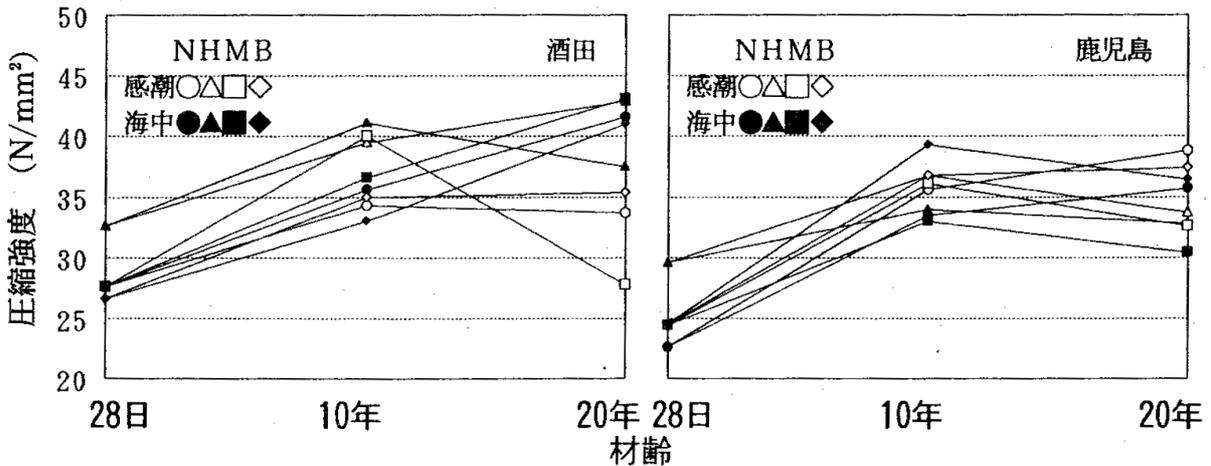


図 3.18 セメント種類別の強度増進状況 (海砂の塩分含有量 0.00 ~ 0.01%)

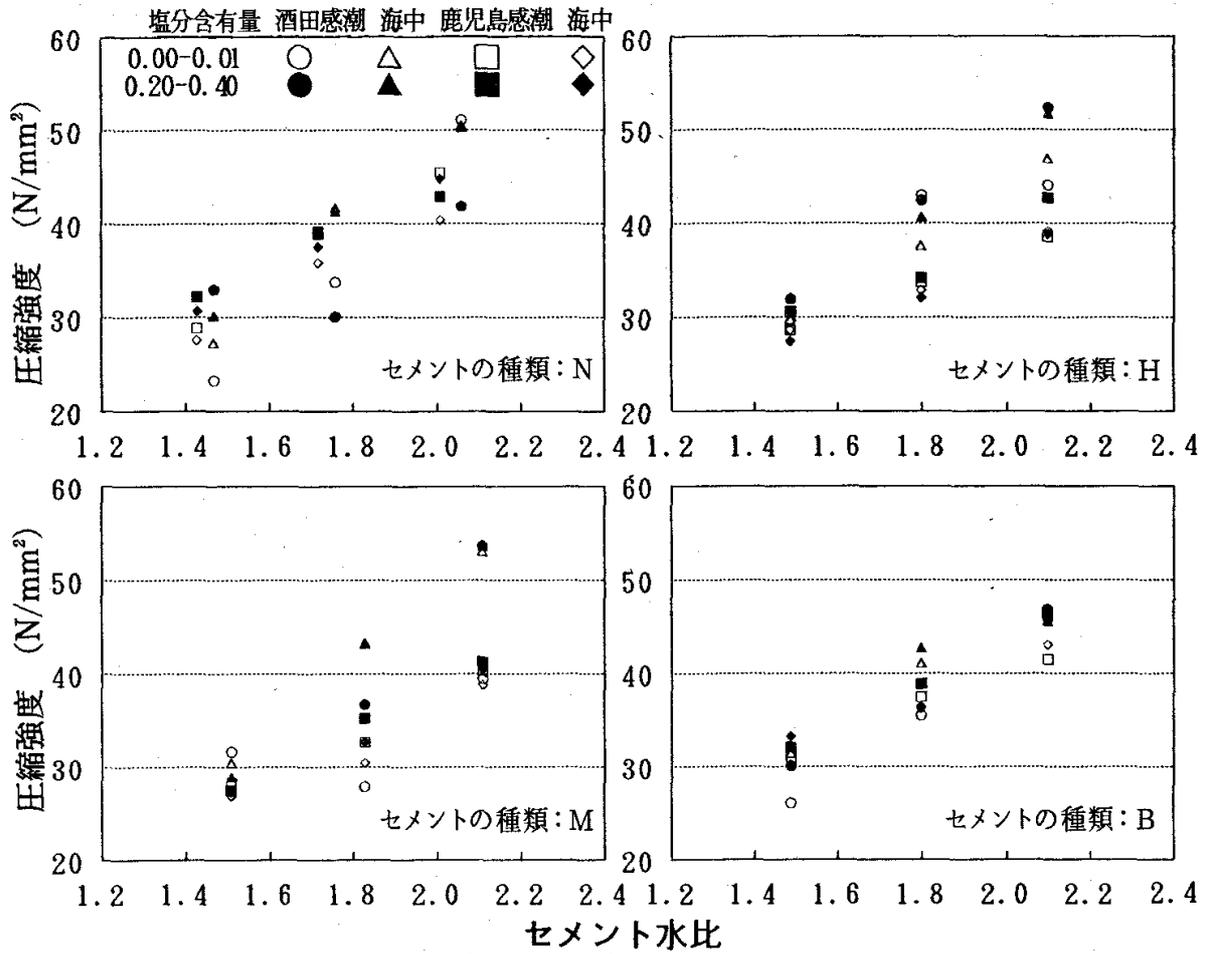


図 3.19 セメント水比と圧縮強度 (セメントの種類)

F-56	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢 10 年最終報告	2010 年
------	--	--------

F-56 では、酒田感潮、久里浜感潮、久里浜海浜および東京に長期暴露したコンクリートの圧縮強度について報告している。

}	【試験条件】 JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠			
	・養生条件		所定の材齢まで温度 20 湿度 80%RH の室内において湿布養生後に暴露	
	・試験材齢		28 日、5 年、10 年	
	【要因】	・暴露環境	4 箇所	酒田感潮、久里浜感潮、久里浜海浜、東京屋上
		・セメントの種類	10 種類	NC : 普通ポルトランドセメント MC : 中庸熱ポルトランドセメント LC : 低熱ポルトランドセメント NBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (NC ベース) MBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (MC ベース) LBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (LC ベース) FC : フライアッシュ II 種 30% 混合 (NC ベース) FCN : フライアッシュ III 種 30% 混合 (NC ベース) LP : 石灰石微粉末 30% 混合 (NC ベース) NBF : フライアッシュ混合高炉セメント
	・水結合材比	3 水準	40%、50%、60%	
	・養生期間	2 種類	28 日、91 日	

セメントの種類および暴露条件ごとに、暴露開始時 (温度 20 湿度 80%RH 湿布養生 28 日)、暴露材齢 5 年および 10 年の圧縮強度を図 3.20 に示す。

暴露条件で比較すると、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP の圧縮強度は、標準養生 > 久里浜海浜部 東京屋外部 > 久里浜感潮部 酒田感潮部の順になった。一方、LP を除く混合セメントは、感潮暴露は標準養生とほぼ同等、気中暴露 (久里浜海浜および東京屋外部) は標準養生および感潮暴露より低い傾向となり、暴露条件が強度発現性に及ぼす影響はセメント種類により異なった。

酒田感潮部および久里浜感潮部の場合、材齢 5 年の圧縮強度は、MBB > NBB LBB FC NBF > FCN ポルトランドセメント系 > LP の順になった。感潮暴露にてポルトランドセメント系の長期強度が LP を除く混合セメント系より低くなった要因としては、海水による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱やエトリンガイトの生成などの強度低下を及ぼす作用が水分供給による水和促進の作用より卓越したためと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合セメント系は、海水に対する化学抵抗性に優れており、水分供給による長期的な強度増進作用 (潜在水硬性やポゾラン反応) が卓越した可能性がある。

気中暴露 (久里浜海浜および東京屋外部) の場合、いずれのセメントも材齢 5 年で $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度強度が増加し、セメント種類の違いによる強度の大小関係は暴露開始時とほぼ同様の傾向であった。

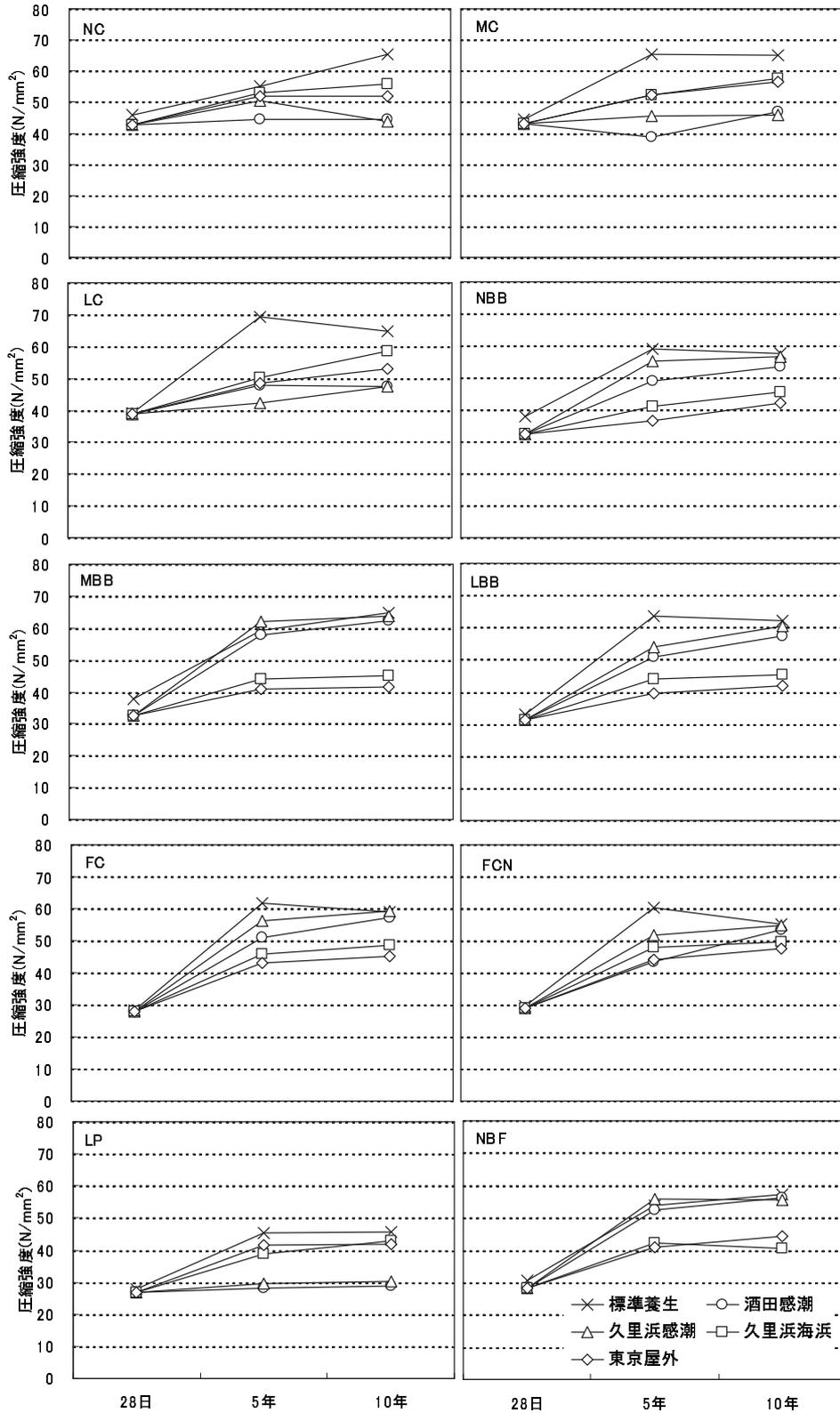


図 3.20 材齢と圧縮強度（水結合材比 50%，前養生期間 28 日）

4 断熱温度上昇

4.1 セメントの種類を要因としたコンクリートの断熱温度上昇量

F-51	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇	2002年
------	----------------------------------	-------

F-51 では、N、LおよびBBの3種類のセメントについて、断熱温度上昇に関する共通試験（8試験所）を実施し、単位セメント量が増加した場合の終局断熱温度上昇量および温度上昇速度に関する定数の推定式を報告している。

{	【試験条件】	既往の研究結果にもとづき、以下に示す項目を統一して試験を実施		
	・型枠	40 × 40cm(鋼製：0.6mm厚)、容量 50L		
	・外槽	使用せず		
	・試験装置	同一メーカーの空気循環方式		
	・キャリブレーションおよび偏差の設定			
	【要因】	・セメントの種類	3種類	N：普通ポルトランドセメント L：低熱ポルトランドセメント BB：高炉セメントB種
	・水セメント比	2水準	50%、60%	
	・スランプ	2水準	8.0 ± 1.5cm(硬練り)、18.0 ± 1.5cm(軟練り)	

各試験所で実施したコンクリートの配合を表 4.1 に示す。なお、配合は各試験所間で異なるため、範囲で示す。

表 4.1 各試験所で実施したコンクリートの配合

種類	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
硬練り コンクリート	N	50	43.0-45.0	152-156	304-320	780-817	1010-1135	0.760-0.800
	BB		44.0-45.3	154-176	308-352	770-819	950-1041	0.770-0.880
	L		43.5-45.0	147-155	194-310	803-830	1026-1145	0.735-0.775
	N	60	45.0-46.0	156-162	260-270	824-852	1035-1112	0.650-0.675
	BB		45.0-47.0	156-178	260-297	823-865	950-1062	0.650-0.740
	L		45.5-46.0	151-161	252-168	847-868	1029-1124	0.624-0.670
軟練り コンクリート	N	50	42.0-46.0	170-180	340-360	726-805	982-1142	0.850-0.900
	BB		44.0-45.5	170-192	340-384	739-790	938-1000	0.850-0.960
	L		44.8-45.5	166-188	332-376	755-806	955-1019	0.830-0.940
	N	60	44.0-48.0	170-176	283-293	791-865	971-1044	0.708-0.732
	BB		45.8-47.5	172-193	287-322	795-837	932-1008	0.718-0.800
	L		46.0-47.5	168-190	280-317	808-852	947-1024	0.700-0.790

断熱温度上昇試験結果を表 4.2 および表 4.3 に示す。なお，表中の K ， α および t は，断熱温度上昇量を下記式にて近似した時の定数である。また，練上り温度 20℃ における単位セメント量と K ， α の関係を図 4.1 に示す。

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \tag{1}$$

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \tag{2}$$

ここに， T ：断熱温度上昇量

K ：終局断熱温度上昇量

t ：材齢（日）

α ：断熱温度上昇速度の定数（日⁻¹）

C ：実験定数

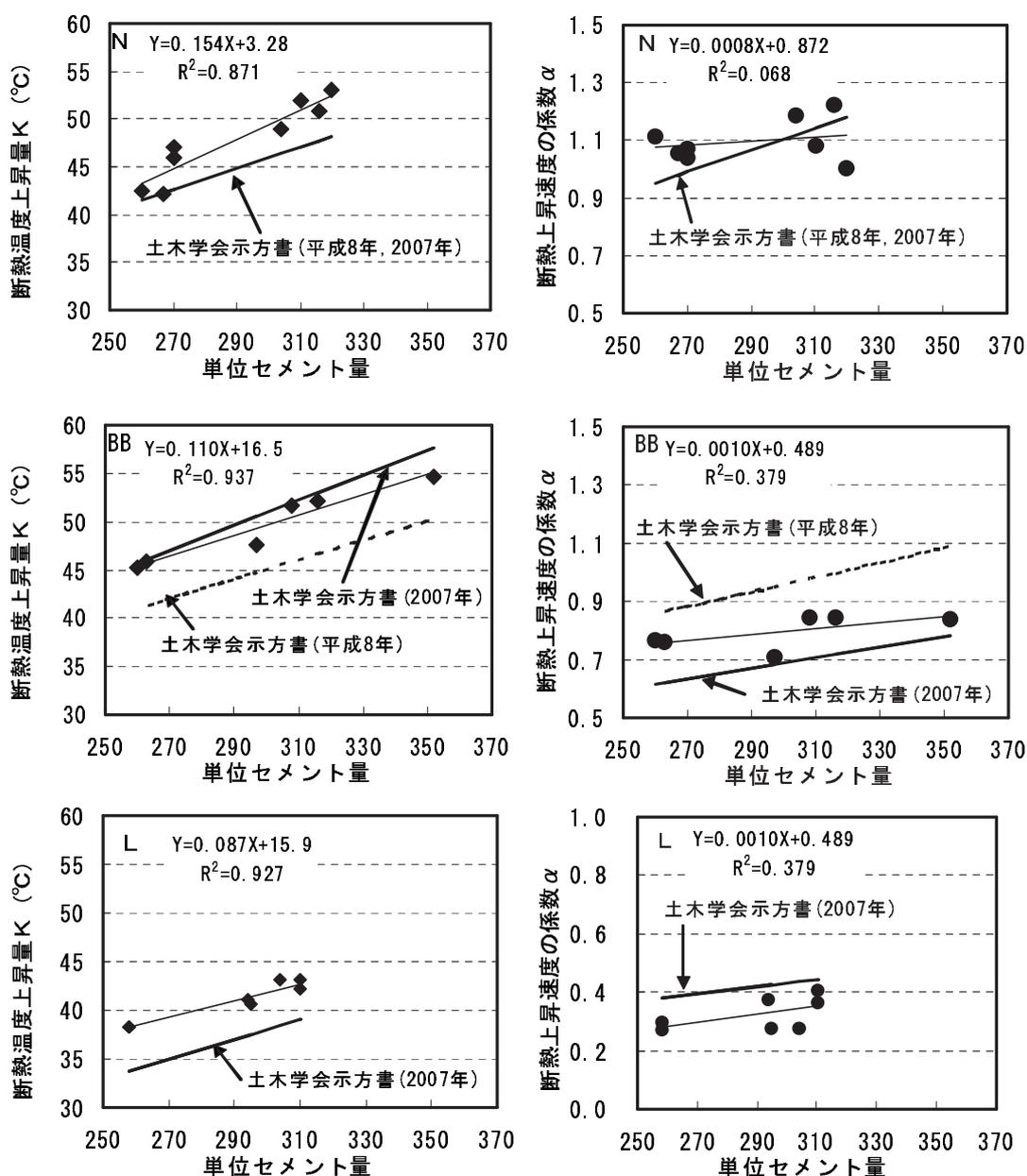


図 4.1 単位セメント量と K ， α

表 4.2 断熱温度上昇試験結果 (その1)

コンクリートの種類	セメントの種類	水セメント比 (%)	試験所	単位セメント量 (kg/m ³)	実測値 K (°C)	*1 推定値 K (°C)	α (α式)	α (αβ式)	β (αβ式)
	N	50	A	310	52.1	52.0	1.079	0.791	1.573
			D	320	53.0	53.0	1.003	0.786	1.310
			E	316	50.8	50.8	1.224	1.018	1.641
			G	304	49.0	49.0	1.185	0.975	1.733
		60	A	270	45.9	45.9	1.041	0.788	1.514
			D	267	42.2	42.2	1.057	0.834	1.432
	E		270	47.1	47.1	1.069	0.894	1.011	
	BB	50	B	316	52.0	52.2	0.843	0.598	1.344
			C	352	54.6	54.6	0.840	0.631	1.447
			H	308	51.6	51.6	0.845	0.703	1.340
		60	B	263	45.3	45.9	0.763	0.528	1.672
			C	297	47.6	47.6	0.707	0.526	1.501
			H	260	45.1	45.2	0.766	0.647	1.401
	L	50	A	310	43.1	43.1	0.366	0.324	1.065
			D	310	42.2	42.2	0.405	0.409	0.977
			E	304	43.1	43.1	0.278	0.305	0.977
			G	294	41.0	41.1	0.375	0.330	1.072
		60	B	258	38.3	38.3	0.298	0.294	1.030
C			295	39.7	40.7	0.276	0.371	0.805	
H			258	38.3	38.3	0.272	0.337	0.909	

表 4.3 断熱温度上昇試験結果 (その2)

コンクリートの種類	セメントの種類	水セメント比 (%)	試験所	単位セメント量 (kg/m ³)	実測値 K (°C)	*1 推定値 K (α式) (°C)	α (α式)	*1 推定値 K (αβ式) (°C)	α (αβ式)	β (αβ式)
	N	50	A	310	52.1	53.1	1.027	51.7	1.071	1.799
			D	320	53.0	53.6	0.973	52.4	0.985	1.402
			E	316	50.8	51.6	1.177	50.6	1.299	1.650
			G	304	49.0	49.9	1.136	48.8	1.235	1.703
		60	A	270	45.9	46.7	0.998	45.5	1.019	1.559
			D	267	42.2	42.8	1.018	41.8	1.048	1.536
	E		270	47.1	47.1	1.065	46.2	1.104	1.381	
	BB	50	B	316	52.0	53.5	0.782	51.5	0.696	1.718
			C	352	54.6	56.3	0.777	54.4	0.707	1.544
			H	308	51.6	53.0	0.784	51.6	0.735	1.381
		60	B	263	45.3	47.2	0.691	45.2	0.611	1.672
			C	297	47.6	49.7	0.634	47.7	0.578	1.501
			H	260	45.1	46.7	0.703	45.3	0.660	1.401
	L	50	A	310	43.1	42.6	0.379	42.6	0.380	0.996
			D	310	42.2	41.4	0.430	41.5	0.431	0.996
			E	304	43.1	42.1	0.298	42.2	0.299	0.996
			G	294	41.0	40.7	0.385	40.8	0.386	0.996
		60	B	258	38.3	38.1	0.303	38.1	0.304	0.996
C			295	39.7	38.2	0.338	38.2	0.339	0.996	
H			258	38.3	37.2	0.295	37.3	0.296	0.996	

(*) 終局断熱温度上昇量Kの推定に当たり、実測データを N, BBは7日、Lは15日に区切り、推定式を導いた。

また、終局断熱温度上昇量（K）および断熱温度上昇速度に関する定数（ α ）を土木学会コンクリート標準示方書に示された値と比較した結果を表 4.4 に示す。なお、当時は平成 8 年度版との比較を実施しているため、表には、2007 年制定 土木学会コンクリート標準示方書【設計編】に示された数値も併せて示す。これによれば、N および BB では、単位セメント量 $260 \sim 350 \text{kg/m}^3$ の範囲において、K は当時の示方書（平成 8 年度版）¹⁾ よりも 2~5 高くなり、また単位セメント量の増加に伴う α の上昇が小さくなっている。2007 年版の示方書²⁾ では、BB の係数が見直されるとともに、新たに L の係数が示されている。この数値と比較した場合、K は、BB は示方書と同等となり、L は示方書よりも 4 程度高くなっている。また α は、BB は示方書よりも 0.24~0.30 大きくなるが、L は示方書よりも 0.1 程度小さくなっている。

表 4.4 断熱温度上昇式における係数の算定式

セメント種類と算定値の種類	終局断熱温度上昇量 K	断熱温度上昇速度の定数 α	
N	本試験	$K=0.154 \times C+3.28$	$\alpha=0.0008 \times C+0.872$
	土木学会 平成 8 年度版	$K=0.110 \times C+13.0$	$\alpha=0.0038 \times C-0.036$
	土木学会 2007 年版	$K=0.110 \times C+13.0$	$\alpha=0.0038 \times C-0.036$
BB	本試験	$K=0.110 \times C+16.5$	$\alpha=0.0010 \times C+0.489$
	土木学会 平成 8 年度版	$K=0.100 \times C+15.0$	$\alpha=0.0025 \times C+0.207$
	土木学会 2007 年版	$K=0.130 \times C+11.9$	$\alpha=0.0018 \times C+0.148$
L	本試験	$K=0.087 \times C+15.9$	$\alpha=0.0014 \times C-0.078$
	土木学会 平成 8 年度版	—	—
	土木学会 2007 年版	$K=0.100 \times C+8.0$	$\alpha=0.0012 \times C+0.071$

*打込み時の温度：20℃，C は単位セメント量 (kg/m^3)

- 1) 土木学会：【平成 8 年制定】コンクリート標準示方書 施工編，1996 年 3 月
- 2) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2007 年 3 月

5 乾燥収縮

5.1 各種要因の影響

5.1.1 単位セメント量および単位水量

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、単位セメント量および単位水量が乾燥収縮率に及ぼす影響について報告している。

(1) 単位セメント量

【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・養生条件	ポリエチレンシートで密封後，材齢 7 日まで養生
	・乾燥条件	各試験所の恒温恒湿室
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
	・スランブ	18.0 ± 1.5cm
【要因】	・単位セメント量	212 ~ 390kg/m ³
	・単位水量	170 ~ 195kg/m ³

単位水量一定の場合の単位セメント量と乾燥期間 28 日の乾燥収縮率との関係を図 5.1 に示す。単位セメント量が増加しても乾燥収縮率の差は大きくて 50×10^{-6} であり、単位セメント量が乾燥収縮率に及ぼす影響は小さかった。

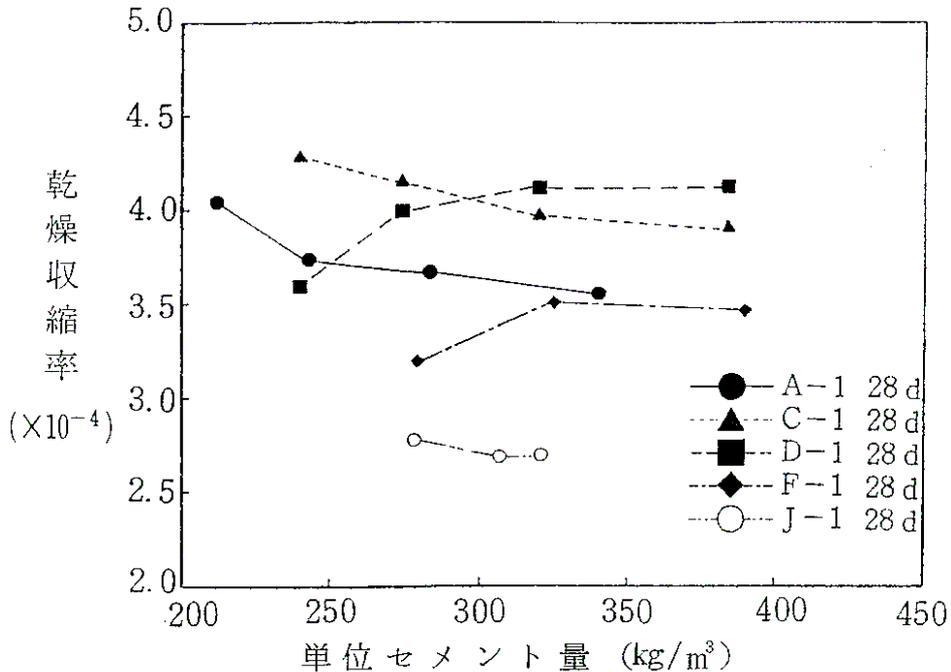


図 5.1 単位セメント量と乾燥収縮率

(2) 単位水量

【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・養生条件	ポリエチレンシートで密封後，材齢 7 日まで養生
	・乾燥条件	各試験所の恒温恒湿室
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
	・スランブ	8.0 ± 1.5cm，18.0 ± 1.5cm，21.0 ± 1.5cm
【要因】	・単位水量	155 ~ 207kg/m ³
	・単位セメント量	226 ~ 400kg/m ³

単位水量と乾燥期間 14 日の乾燥収縮率との関係を図 5.2 に示す。なお，図中の記号は試験所を表す。単位水量にある程度差がある場合，単位水量が多くなるほど乾燥収縮率は大きくなる傾向がみられる。

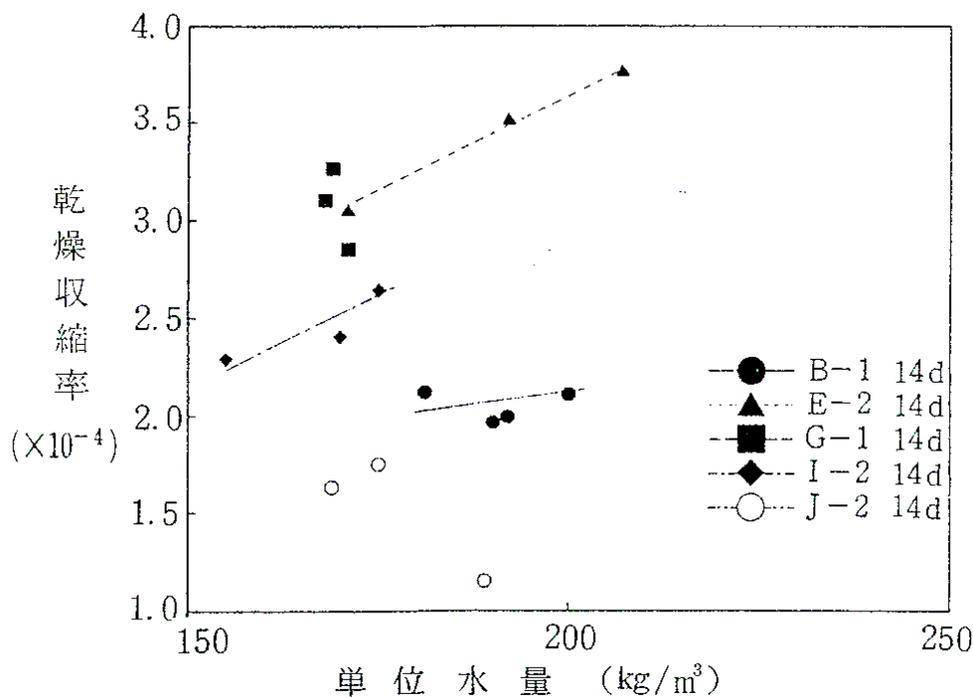


図 5.2 単位水量と乾燥収縮率（乾燥期間 14 日）

5.1.2 水セメント比

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、水セメント比がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響について報告している。

- 【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠
 - ・養生条件 ポリエチレンシートで密封後、材齢7日まで養生
 - ・乾燥条件 各試験所の恒温恒湿室
 - ・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
 - ・スランプ 18.0 ± 1.5cm
- 【要因】 ・水セメント比 4水準 50%、60%、70%、80%

図 5.3 に水セメント比と乾燥収縮率との関係を示す。なお、図中の A ~ I は試験所記号を表す。水セメント比と乾燥収縮率には明確な傾向が認められなかった。

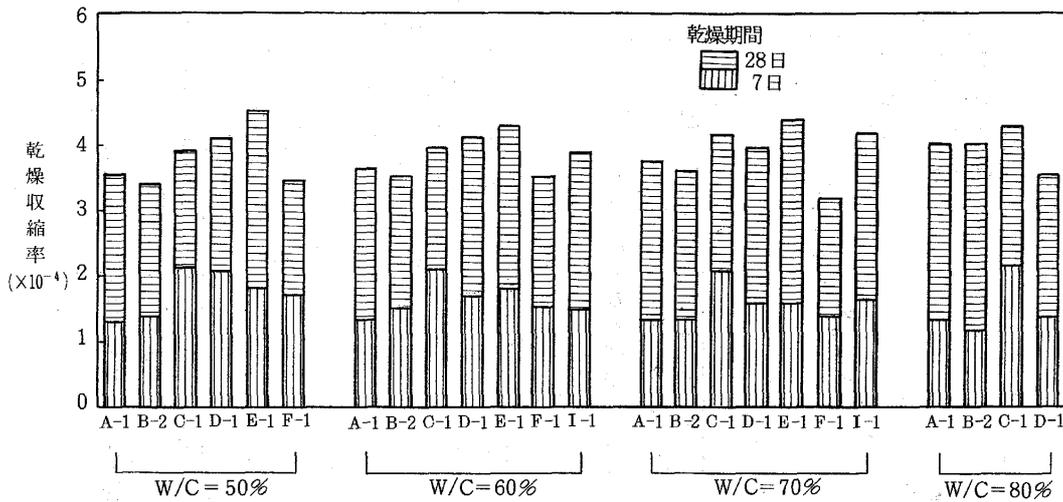


図 5.3 水セメント比と乾燥収縮率

5.1.3 スランブ

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、スランブおよび単位水量を変えたコンクリートの乾燥収縮率について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠		
	・養生条件	ポリエチレンシートで密封後、材齢7日まで養生		
	・乾燥条件	各試験所の恒温恒湿室		
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント		
	・水セメント比	60%		
	・細骨材率	43%		
	【要因】	・スランブ	3水準	8.0 ± 1.5cm, 18.0 ± 1.5cm, 21.0 ± 1.5cm
		・単位水量	3水準	155kg/m ³ , 170kg/m ³ , 175kg/m ³

水セメント比が一定の場合のスランブと乾燥収縮率との関係を図5.4に示す。乾燥初期においてはスランブによる差はみられないが、乾燥期間が長いほどスランブの大きいほうが乾燥収縮率はやや大きくなる傾向がみられた。これは、スランブが大きいほど単位水量が多いためと考えられる。

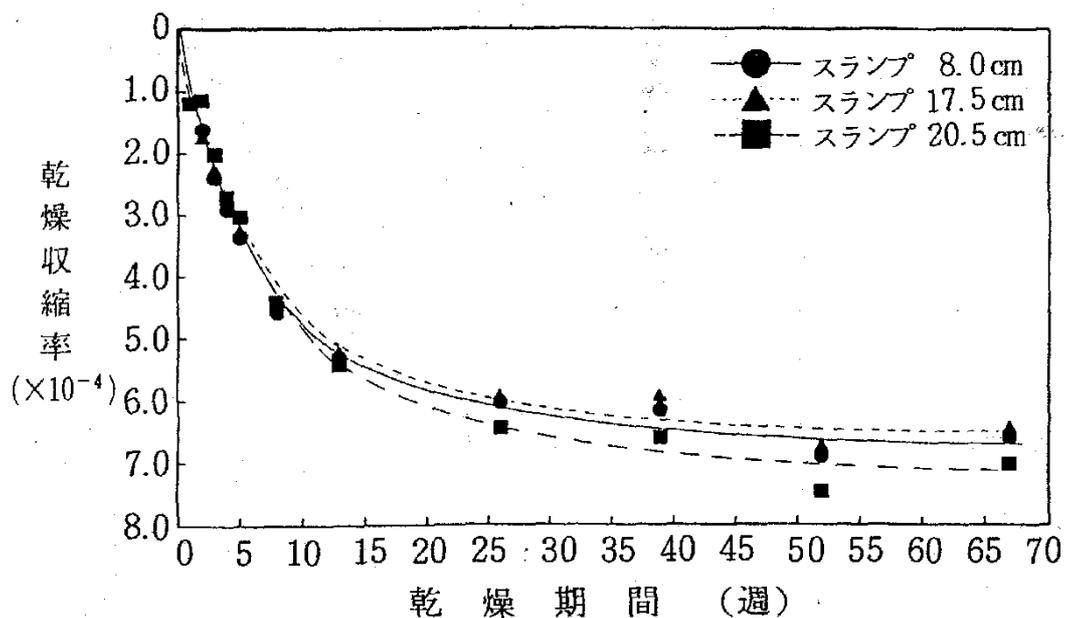


図 5.4 スランブと乾燥収縮率

5.1.4 セメントの種類

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率について報告している。

{	<p>【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠</p> <ul style="list-style-type: none"> ・養生条件 1日脱型後，材齢7日まで標準水中養生 ・乾燥条件 温度 20℃，湿度 60%RH ・単位水量 175kg/m³ ・単位セメント量 320kg/m³ ・スランプ 18.0 ± 1.5cm 	
	<p>【要因】 ・セメントの種類 9種類</p>	<p>N : 普通ポルトランドセメント</p> <p>H : 早強ポルトランドセメント</p> <p>M : 中庸熱ポルトランドセメント</p> <p>SR: 耐硫酸塩ポルトランドセメント</p> <p>BA: 高炉セメント A 種</p> <p>BB: 高炉セメント B 種</p> <p>BC: 高炉セメント C 種</p> <p>FA: フライアッシュセメント A 種</p> <p>FB: フライアッシュセメント B 種</p>

図 5.5 に各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率を示す。H, M, FAおよびFBの乾燥収縮率は、Nの乾燥収縮率に対し、概ね有意な差はみられなかった。高炉セメントの乾燥収縮率は、スラグ量が増えるに従い大きくなった。いずれの乾燥期間においてもSRの乾燥収縮率が最も小さかった。

表 5.1 にポルトランドセメントの組成化合物量と乾燥収縮率を示す。セメントの組成化合物による収縮率について、C₃A は他の組成化合物に比べて大きく、異種セメント間の収縮率の差の80%までは、このC₃A含有量の差によると考えられている。耐硫酸塩ポルトランドセメントの乾燥収縮率が最も小さいのは、C₃A含有量が他のポルトランドセメントに比べ、著しく少ないことに起因していると考えられる。

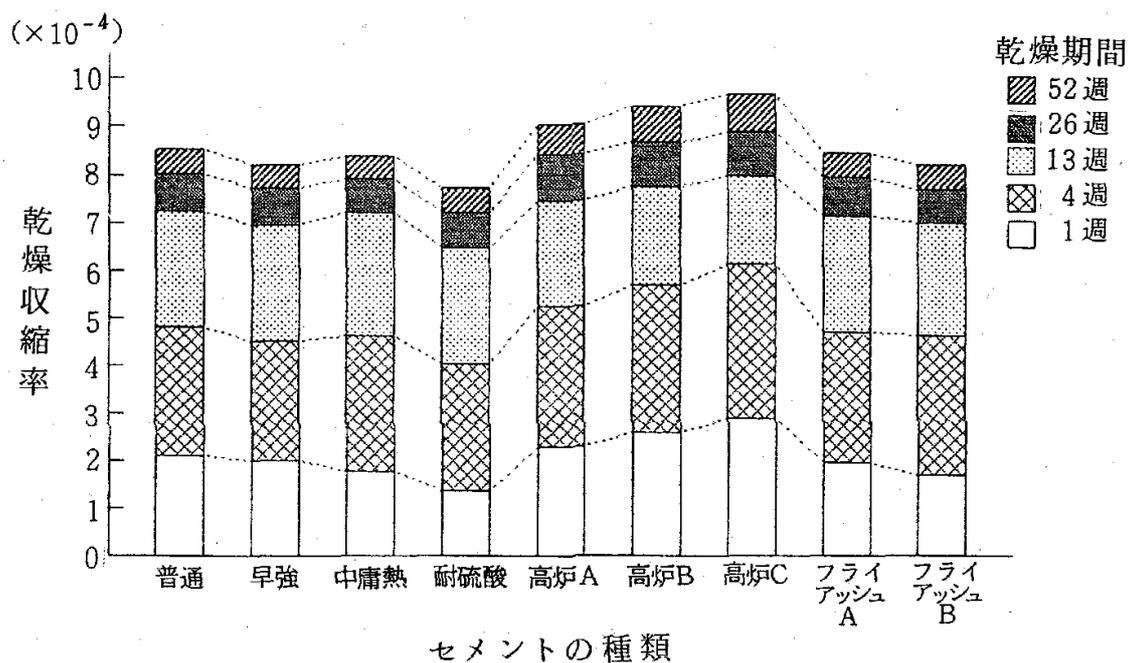


図 5.5 各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率

表 5.1 ポルトランドセメントの組成化合物量

セメントの種類	組成化合物量 (%)				乾燥収縮率 (52週)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
N	49.8	23.9	9.4	8.8	8.55×10 ⁻⁴
H	63.6	10.9	8.7	8.2	8.19×10 ⁻⁴
M	48.0	29.5	4.6	12.2	8.38×10 ⁻⁴
SR	53.9	25.1	0.9	13.1	7.72×10 ⁻⁴

5.1.5 混和剤の種類

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、各種混和剤を用いたコンクリートの乾燥収縮率について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・養生条件	1日脱型後、材齢7日まで標準水中養生	
	・乾燥条件	温度 20℃，湿度 60%RH	
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント	
	・単位セメント量	320kg/m ³	
	・スランプ	18.0 ± 1.5cm	
	・細骨材率	46.1%	
【要因】	・混和剤の種類	6種類	AE剤，AE減水剤（標準形，促進形，遅延形） 流動化剤，高性能AE減水剤

図 5.6 に各種混和剤を用いたコンクリートの乾燥収縮率を示す。乾燥収縮率は、全乾燥期間を通じて AE 減水剤（促進形）が最も大きく、次いで AE 剤，流動化剤の順となり、プレーンが最も小さい結果となった。ただし、いずれも単位水量が異なっており、混和剤種類の違いが乾燥収縮率に及ぼす影響は明確ではない。なお、AE 減水剤の標準形・遅延形および高性能 AE 減水剤はプレーンと大きな差はなかった。流動化剤については、流動化前のベースコンクリートと流動化後のコンクリートの乾燥収縮率はほぼ同等であり、多くの報告と一致する。

図 5.7 に各種混和剤を用いたコンクリートにおける単位水量と乾燥収縮率との関係を示す。基本的にコンクリートの乾燥収縮率はセメントペーストの収縮によるものであり、一般的には単位水量が少ないほど小さいとされている。実験における単位水量は約 30kg/m³ の幅があるが、同一乾燥期間における乾燥収縮率はほぼ同等で、両者の間には前述のような明確な関係は認められない。流動化剤や高性能 AE 減水剤の使用により、単位水量は大幅に減少しているにも関わらず、乾燥収縮率はプレーンと大差なかった。

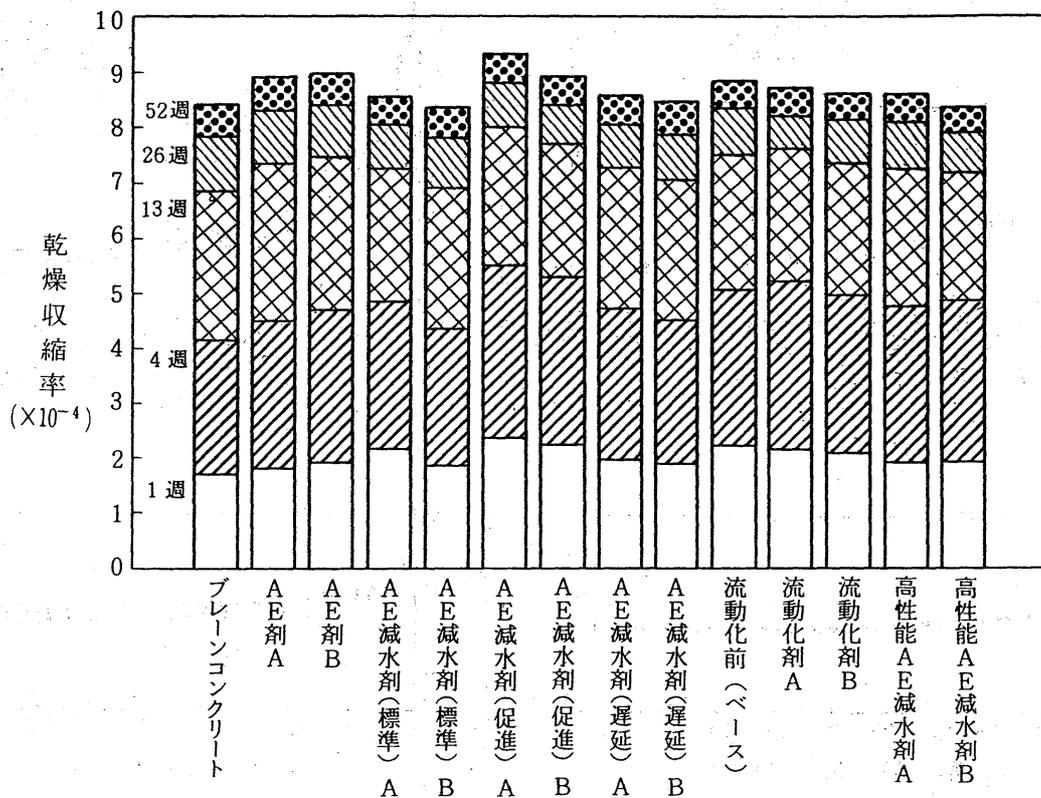


図 5.6 各種混和剤を用いたコンクリートの乾燥収縮率

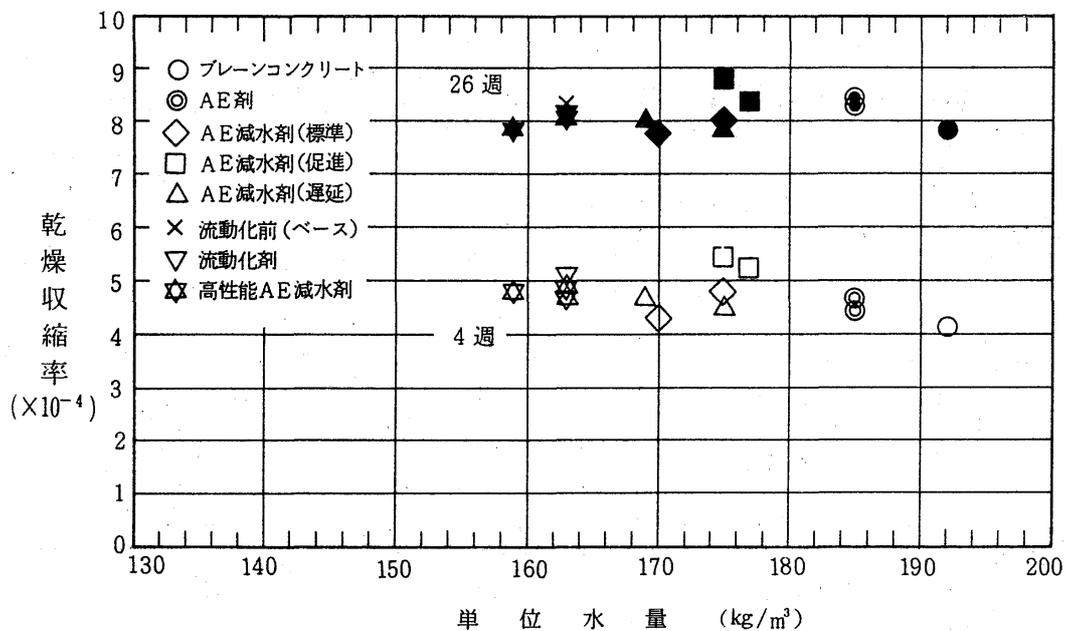


図 5.7 単位水量と乾燥収縮率

5.1.6 骨材の種類

(1) 細骨材

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、粒度構成が同一となるように調整した川砂，陸砂および海砂を用いたコンクリートの乾燥収縮率について報告している。

【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・養生条件	材齢 7 日まで封緘養生
	・乾燥条件	温度 20 ，湿度 65%RH
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
	・水セメント比	60%
	・単位水量	182kg/m ³
	・単位セメント量	303kg/m ³
【要因】	・スランブ	18.0 ± 1.5cm
	・骨材の種類	3 種類 川砂，海砂，陸砂

図 5.8 に各種細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を示す。乾燥収縮率の測定は7週までしか実施していないが，その範囲で見ると乾燥収縮率は陸砂 > 川砂 > 海砂の順である。また，委員会報告 F-32 では，全国 40 種類の細骨材を用いた各種試験結果を整理しており，各種細骨材を用いた乾燥収縮率は，川砂 > 陸砂 > 海砂の順であった。これらから，海砂が陸砂および川砂に比べて乾燥収縮率が小さな値を示すものと判断される。

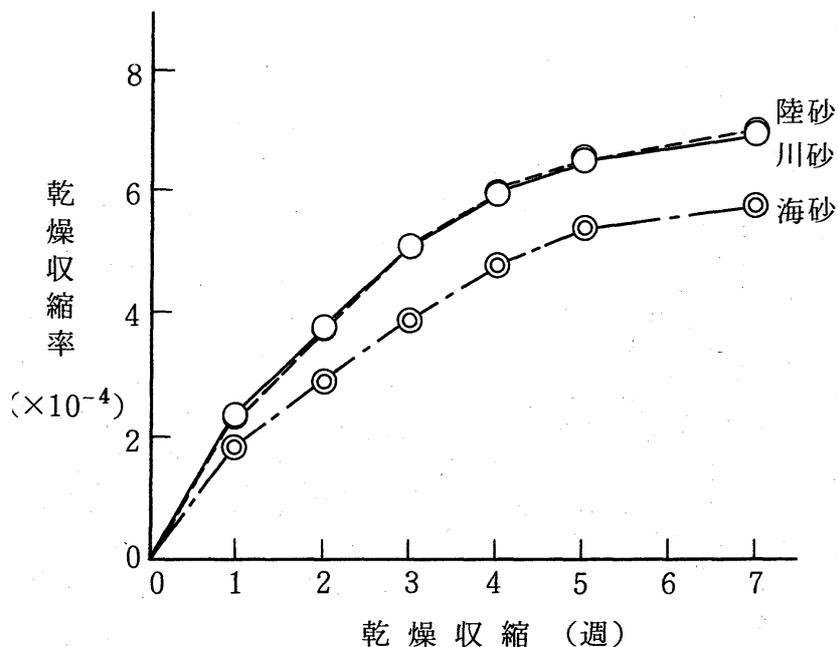


図 5.8 各種細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率

H-21	ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の検討 (その三) 骨材種類の影響	1988 年
------	----------------------------------	--------

H-21 では、細骨材の岩種の影響を検討するため、各種岩種（砂岩系、安山岩、石灰岩）の粗骨材を粉砕して細骨材状とした骨材を用いたモルタルの乾燥収縮率について報告している。

- 【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠
 - ・養生条件 1 日脱型後、材齢 7 日まで湿度 100%RH 環境下
 - ・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
 - ・材料の混合比率 セメント：粉砕骨材：水 = 1：2：0.6
- 【要因】
 - ・細骨材の種類 3 種類 砂岩系、安山岩、石灰岩
(各岩種を粉砕して試製)

図 5.9 に各種岩石を粉砕して試製した細骨材を用いたモルタルの乾燥収縮率を示す。石灰岩の場合は安山岩および砂岩系に比べて乾燥収縮率が明らかに小さな値である。骨材の粒度を変え岩粉状とした場合も同様の傾向を示すことから、骨材間の形状の差や骨材表面の物理的性状の差を考慮したとしても、岩種により、あるいは同一岩種であってもその産地により、乾燥収縮性状が異なると思われる。

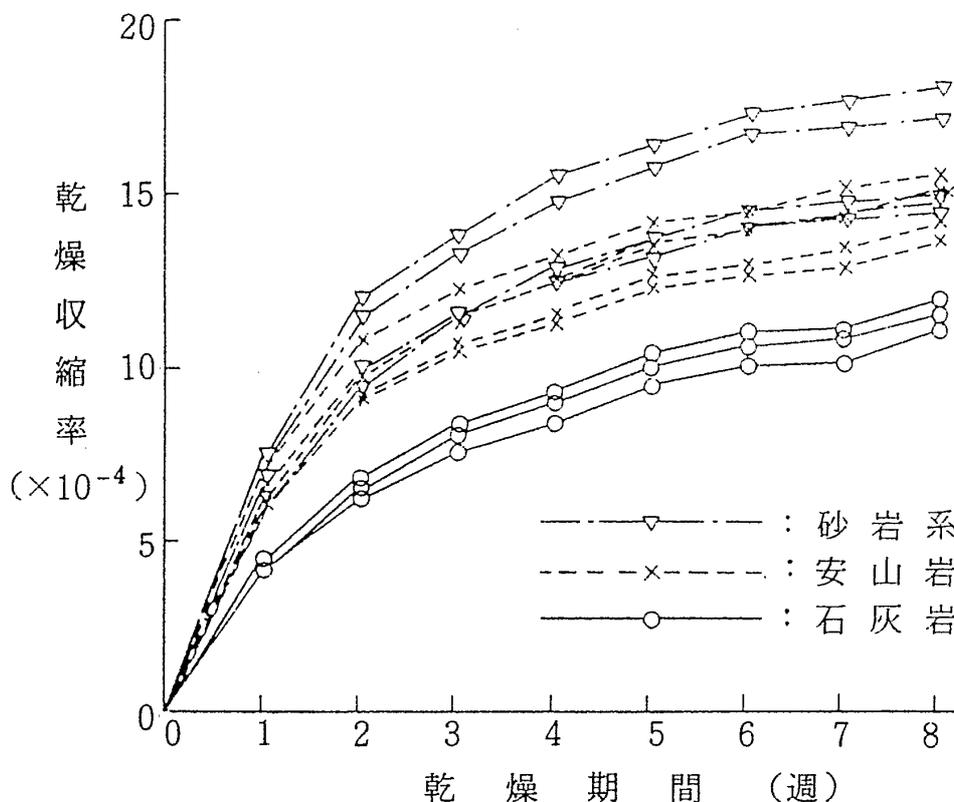


図 5.9 各種岩種の粉砕骨材を用いたモルタルの乾燥収縮率

(2) 粗骨材

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、産地、岩種の異なる粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率について報告している。

- 【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠
 - ・養生条件 材齢 7 日まで封緘養生
 - ・乾燥条件 温度 20 , 湿度 65%RH
 - ・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
 - ・水セメント比 60%
 - ・スランプ 18.0 ± 1.5cm
- 【要因】
 - ・骨材の種類 3 種類 硬質砂岩、石灰岩、安山岩

図 5.10 に各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率を示す。粗骨材の影響は極めて大きく、石灰岩の乾燥収縮率が最も小さい。また、石灰岩の乾燥収縮率は産地が異なってもほとんど差がないが、硬質砂岩と安山岩は産地の差が大きいことがわかる。

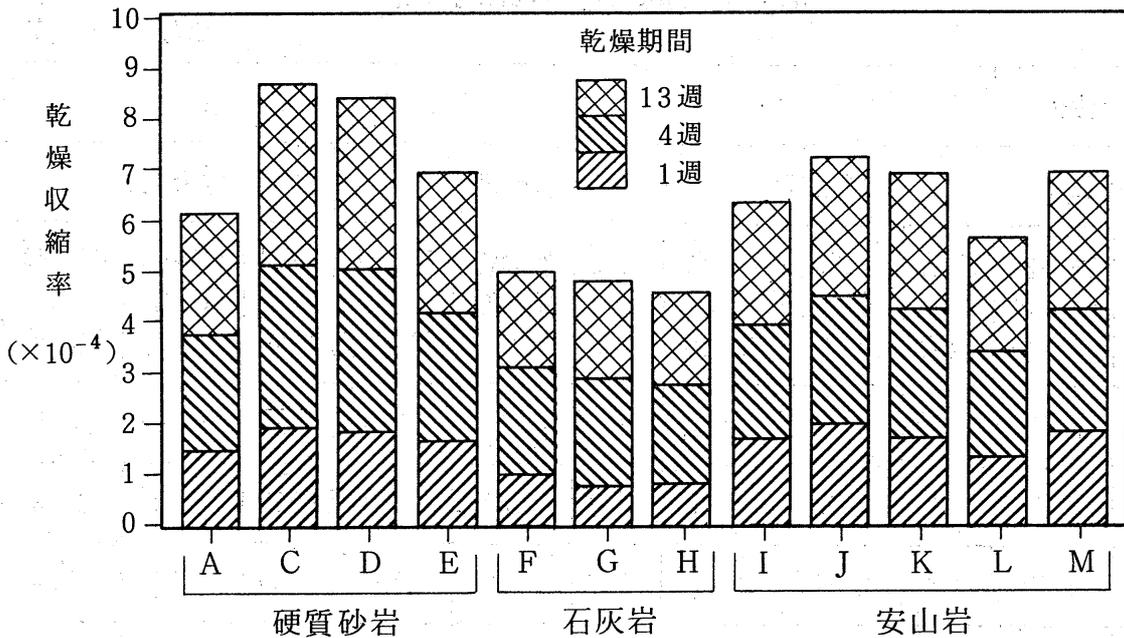


図 5.10 各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率

5.1.7 初期養生条件

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、初期養生条件が乾燥収縮率に及ぼす影響について報告している。

(1) 初期養生期間

【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・養生条件	所定の初期養生期間まで型枠内に存置
	・乾燥条件	温度 20℃, 湿度 60%RH
	・セメントの種類	N: 普通ポルトランドセメント
	・水セメント比	60%
	・単位水量	192kg/m ³
	・単位セメント量	320kg/m ³
【要因】	・スランプ	18.0 ± 1.5cm
	・初期養生期間(脱型時期) 5水準	1日, 2日, 3日, 5日, 7日

初期養生期間と乾燥収縮率との関係を図 5.11 に示す。試験所 C の場合、乾燥期間 2 週までは初期養生期間が長いほどわずかに乾燥収縮率が増加する傾向を示したが、乾燥期間が 4 週以降の長期になると逆に初期養生期間が長いほど乾燥収縮率は小さくなった。また、試験所 D の場合には、乾燥期間 1 週までは初期養生期間に関わらず乾燥収縮率はほぼ同等であったが、乾燥期間が 2 週以降になると試験所 C の場合と同様に初期養生期間が長いほど乾燥収縮率が小さくなった。

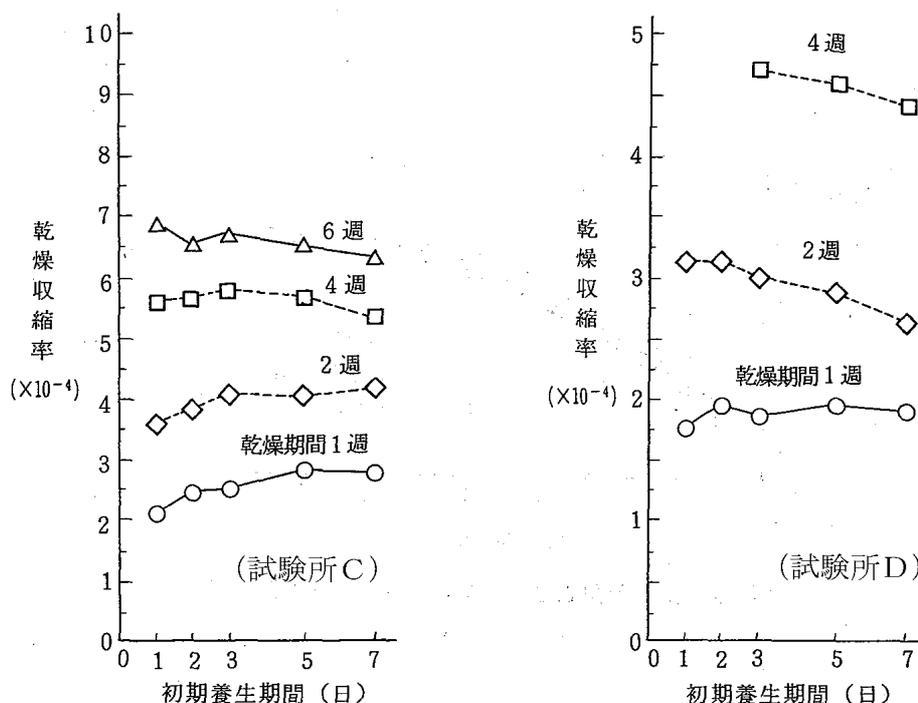


図 5.11 初期養生期間とコンクリートの乾燥収縮率

(2) 初期養生方法

{	【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠	
	・乾燥条件	温度 20	湿度 60%RH
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント	
	・水セメント比	60%	
	・単位水量	192kg/m ³	
	・単位セメント量	320kg/m ³	
	・スランブ	18.0 ± 1.5cm	
【要因】	・初期養生方法	3水準	材齢1日で脱型後，材齢7日まで水中養生 材齢1日で脱型後，材齢7日まで湿潤養生 材齢7日で脱型後，以降乾燥

図 5.12 に初期養生方法別の乾燥収縮率を示す。ここでの初期養生とは，乾燥開始までの養生が水中もしくは水分の逸散がない状態での養生である。乾燥収縮率は，初期養生方法に関わらずほぼ同様の傾向を示した。すなわち，コンクリートの打設からの水分の逸散を防止すれば，水中養生と同等の収縮量になる結果であった。

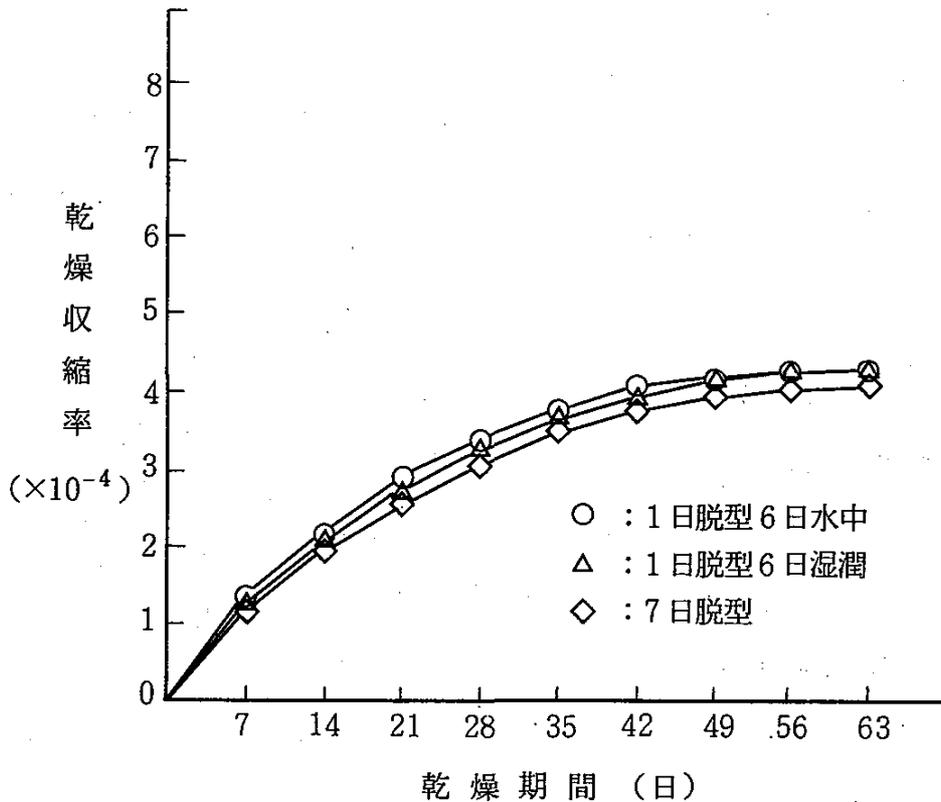


図 5.12 初期養生方法別の乾燥期間と乾燥収縮率

5.1.8 アジテート時間

H-23	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討	1992年
------	------------------------	-------

H-23 では、生コン工場から出荷したコンクリートを用いて、アジテータトラックのアジテート時間が乾燥収縮率に及ぼす影響について報告している。

- 【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠
 - ・養生条件 脱型後材齢 7 日まで封緘養生
 - ・乾燥条件 温度 20 , 湿度 65%RH
 - ・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
 - ・水セメント比 60%
 - ・スランプ 18.0 ± 1.5cm
- 【要因】 ・アジテート時間 5 水準 練り混ぜ後 30 分, 60 分, 90 分, 120 分, 150 分

図 5.13 にアジテート時間と乾燥収縮率との関係を示す。A 工場ではアジテート時間が 90 分を超えると乾燥収縮率が大きくなる傾向を示した。B 工場では乾燥期間が 1 週ではアジテート時間が 120 分を超えると、また乾燥期間が 4 週以上の場合にはアジテート時間が 60 分を超えると乾燥収縮率が大きくなり、特に 120 分を超えると乾燥収縮率が急に大きくなる傾向を示した。JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に規定される荷卸しまでの時間(90 分)以内であれば、アジテート時間が乾燥収縮率に及ぼす影響は小さいとの結果であった。

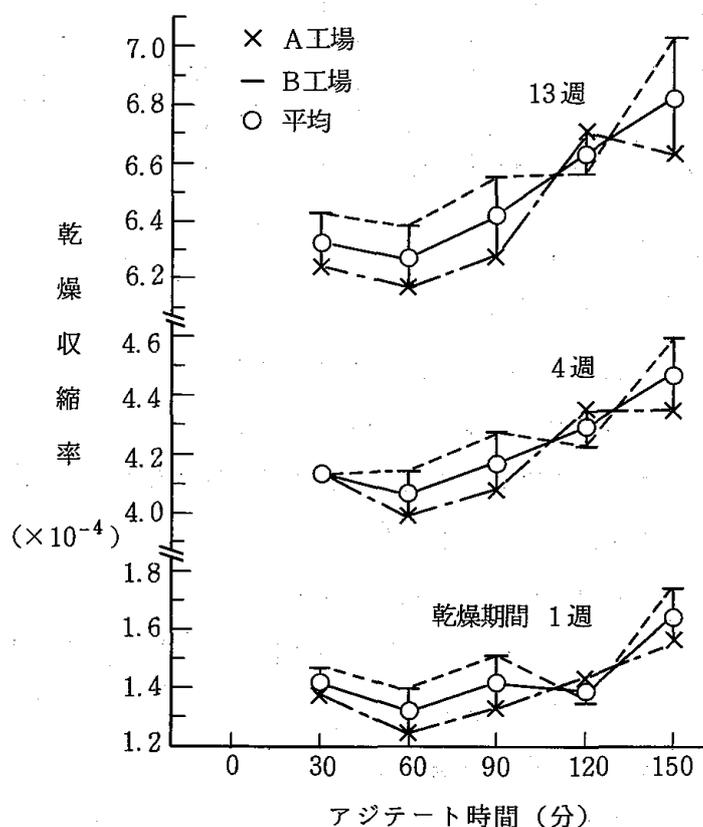


図 5.13 アジテート時間と乾燥収縮率

5.2 長期暴露

F-48	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢 20年最終報告	1998 年
------	---	--------

F-48 では、久里浜、酒田および鹿児島島の感潮部に暴露したコンクリートの長さ変化率について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠		
	・養生条件	脱型後材齢 1 ~ 2 ヶ月間、潮風の影響を受けない屋外で濡れむしろをかけて養生		
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント		
	・スランブ	8.0 ± 1.5cm		
	・単位セメント量	300kg/m ³		
	・測定時期	材齢 20 年まで		
	【要因】	・暴露場所	3 箇所	久里浜、酒田、鹿児島
		・細骨材の種類	3 水準	川砂 (0%)、海砂 (0%)、海砂 (0.1%)
				(塩分含有量)

図 5.14 に各地域の感潮部に暴露したコンクリートおよび標準水中養生したコンクリートの長さ変化率および質量変化率を示す。長さ変化率は細骨材の塩分含有量にはほとんど影響されず、コンクリートの暴露環境に大きく左右されることがわかる。標準水中では、長さ変化率は材齢の経過にともない増加する傾向にあり、材齢 10 年から 20 年にかけて若干大きくなっているが 1×10^{-4} 程度と小さく、暴露した供試体と比較しても小さい。質量変化率は材齢 1 年以降ほぼ一定である。感潮部の供試体の長さ変化率は暴露地ごとに傾向が異なり、久里浜では、材齢 1 年まで収縮した後、徐々に膨張傾向を示した。酒田では、膨張・収縮を繰り返した後、材齢 20 年では膨張傾向にある。鹿児島では、長さ変化率は暴露後、一貫して膨張傾向を示し、また、質量変化率も増加している。供試体の長さ変化率と質量変化率はよく対応しており、供試体の含水状態の差が長さ変化率に大きく影響していることがわかる。暴露地により長さ変化率が異なるのは、干満差による水没時間と乾燥時間の影響が原因の一つと考えられる。久里浜および鹿児島では、酒田に比べて水没時間が長く乾燥時間が短い。このため、長さ変化は膨張の傾向にあり、質量変化率も増加している。

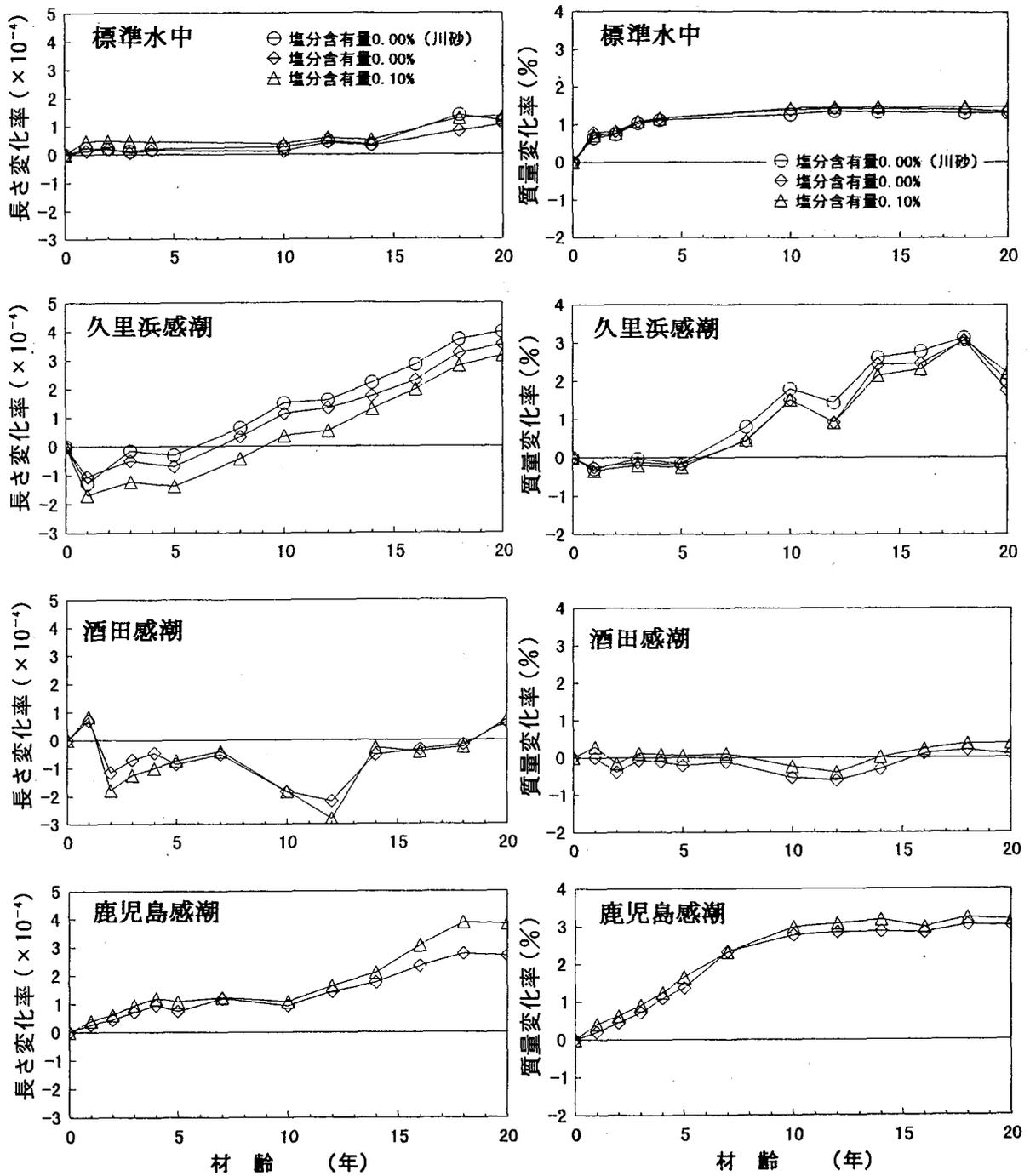


図 5.14 感潮部に暴露したコンクリートの長さ変化

6 ひび割れ抵抗性

6.1 各種要因の影響

6.1.1 水セメント比

H-19	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討（その一）試験条件の影響	1988年
------	--------------------------------	-------

H-19 では、水セメント比を変えたコンクリートのひび割れ試験について報告している。

{	【試験条件】	JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」		
		(JIS A 1151 と寸法が若干異なる)		
		・養生条件	材齢 7 日まで封緘養生	
		・乾燥条件	温度 20℃, 湿度 60%RH	
		・セメントの種類	N: 普通ポルトランドセメント	
	・スランブ	18.0 ± 1.5cm		
	【要因】	・水セメント比	5 水準	40%, 50%, 60%, 70%, 80%
		・混和剤の種類	2 種類	AE 減水剤, AE 剤

図 6.1 に水セメント比とひび割れ発生日数との関係を示す。両者に明確な関係は認められなかった。なお、水セメント比と乾燥収縮率の関係も、5.1.2 の図 5.3 で示すように、両者に明確な関係は認められなかった。

図 6.2 に自由収縮ひずみおよび拘束率ひずみとひび割れ発生日数との関係を示す。拘束率ひずみとひび割れ発生日数に明確な相関は認められなかったが、自由収縮ひずみとひび割れ発生日数との間には負の相関が認められた。

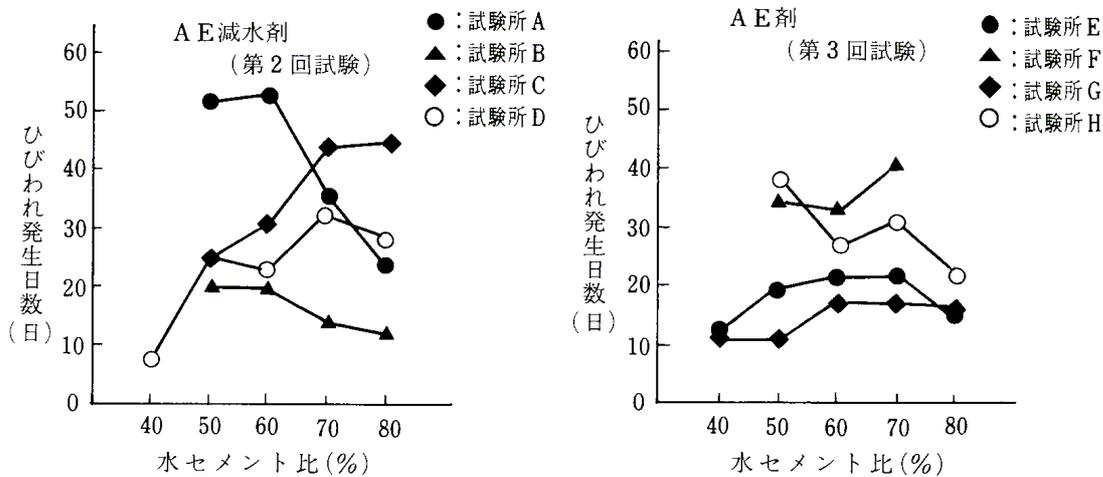


図 6.1 水セメント比とひび割れ発生日数

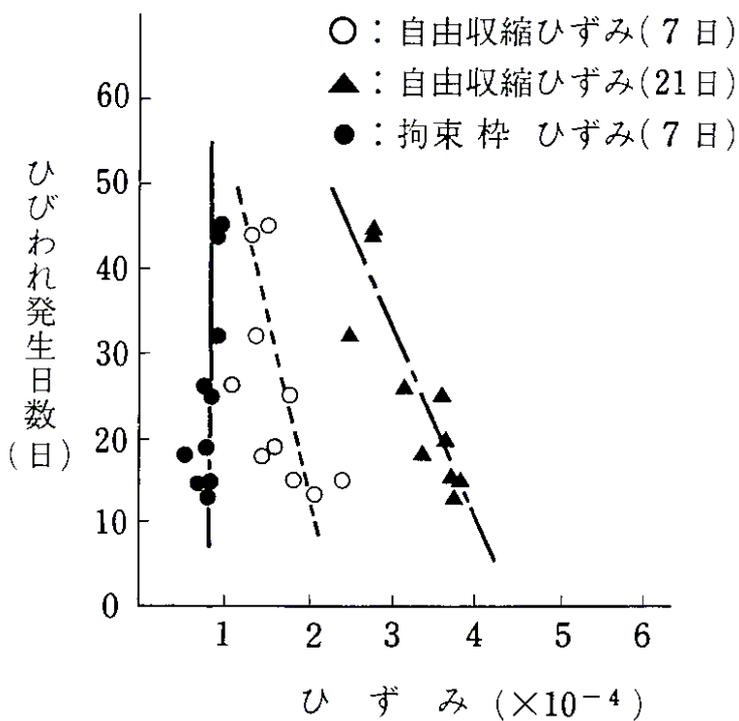


図 6.2 自由収縮および拘束粋ひずみとひび割れ発生日数

6.1.2 スランプ

H-19	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討（その一）試験条件の影響	1988年
------	--------------------------------	-------

H-19 では、スランプおよび単位水量を変えたコンクリートのひび割れ試験について報告している。

{	【試験条件】 JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」			
	(JIS A 1151 と寸法が若干異なる)			
	・養生条件		材齢 7 日まで封緘養生	
	・乾燥条件		温度 20 , 湿度 60%RH	
	・セメントの種類		N : 普通ポルトランドセメント	
	・水セメント比		60%	
	【要因】	・スランプ	3 水準	8.0 ± 1.5cm , 18.0 ± 1.5cm , 21.0 ± 1.5cm
		・単位水量	3 水準	試験所 I 155kg/m ³ , 170kg/m ³ , 175kg/m ³ 試験所 E 171kg/m ³ , 192kg/m ³ , 207kg/m ³

図 6.3 にスランプとひび割れ発生日数との関係を示す。本試験の範囲ではスランプの大小がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響は認められなかった。なお、5.1.3 の図 5.4 で示したスランプと乾燥収縮率との関係は、スランプが大きいかうが乾燥収縮率がやや大きくなる程度であった。

図 6.4 に自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数との関係を示す。拘束枠ひずみとひび割れ発生日数に明確な相関は認められなかったが、自由収縮ひずみとひび割れ発生日数との間には負の相関が認められた。

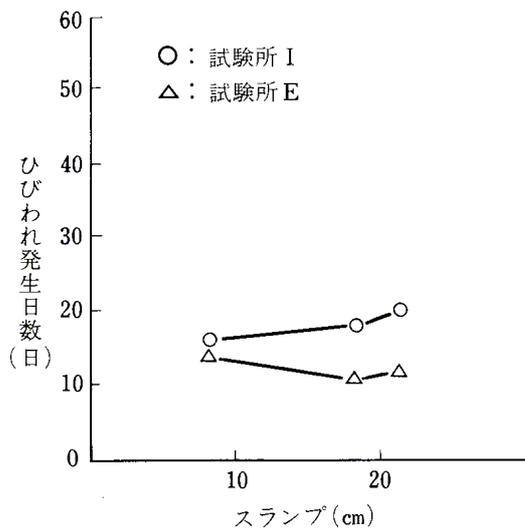


図 6.3 スランプとひび割れ発生日数

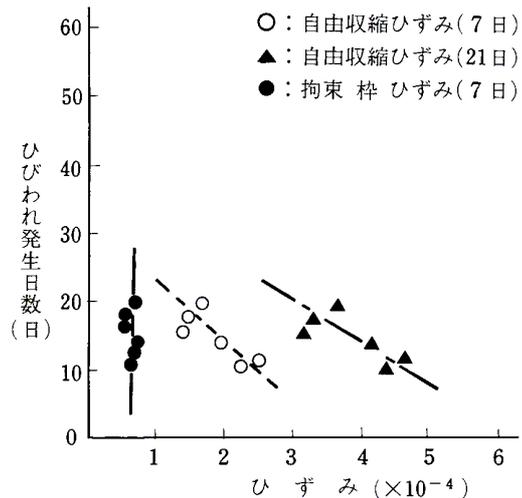


図 6.4 自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数

6.1.3 混和剤の種類

H-19	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討（その一）試験条件の影響	1988年
------	--------------------------------	-------

H-19 では、混和剤種類を変えたコンクリートのひび割れ試験について報告している。

{	【試験条件】	JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法（案）」 (JIS A 1151 と寸法が若干異なる)		
	・養生条件	材齢 7 日まで封緘養生		
	・乾燥条件	温度 20℃, 湿度 60%RH		
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント		
	・水セメント比	60%		
	【要因】	・混和剤の種類	2 種類	AE 減水剤, AE 剤
	・スランプ	3 水準	8.0 ± 1.5cm, 18.0 ± 1.5cm, 21.0 ± 1.5cm	
	・単位水量	3 水準	試験所 B 155kg/m ³ , 170kg/m ³ , 175kg/m ³ 試験所 E 171kg/m ³ , 192kg/m ³ , 207kg/m ³	

AE 剤および AE 減水剤を用いたコンクリートのひび割れ発生日数を図 6.5 に示す。試験所によってひび割れ発生日数に差があり、混和剤種類による影響は明確ではない。なお、5.1.5 の図 5.6 で示すように、混和剤種類による乾燥収縮率への影響も明確ではなかった。

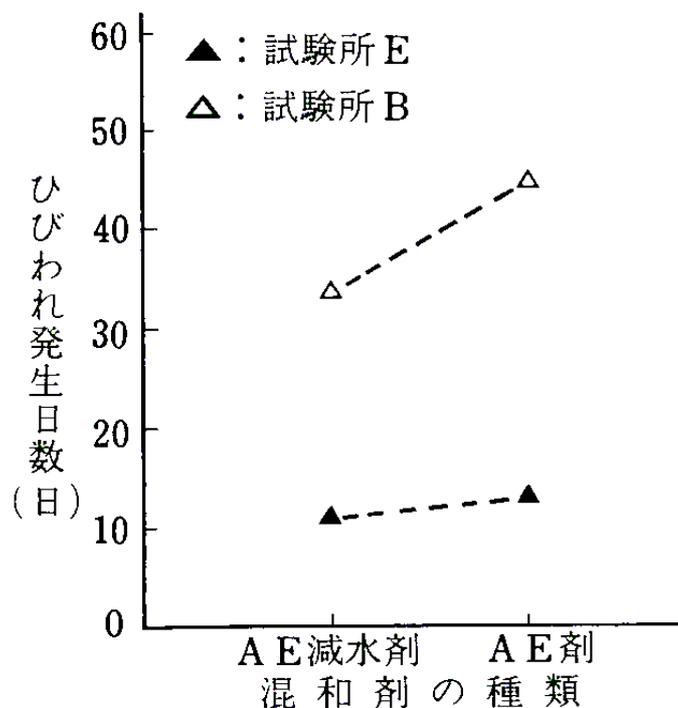


図 6.5 混和剤種類とひび割れ発生日数

6.1.4 骨材の種類

H-21	ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の検討 (その三) 骨材種類の影響	1988 年
------	----------------------------------	--------

H-21 では、産地、岩種の異なる粗骨材を用いたコンクリートのひび割れ試験を報告している。

(1) 粗骨材の岩種および産地

}	【試験条件】	JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法 (案)」 (JIS A 1151 と寸法が若干異なる)	
	・養生条件	材齢 7 日まで封緘養生	
	・乾燥条件	温度 20 , 湿度 60%RH	
	・セメントの種類	N : 普通ポルトランドセメント	
	・水セメント比	60%	
【要因】	・粗骨材の種類	13 種類	安山岩 (5 産地) 石灰系 (3 産地) 砂岩系 (5 産地)

各種粗骨材を使用したコンクリートのひび割れ発生日数とその範囲を図 6.7 に示す。骨材の種類毎にコンクリートのひび割れ発生日数をみると、石灰岩が他の 2 種類の岩種に比べて長くなった。なお、5.1.6 の図 5.10 で示した各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、石灰岩を用いた場合最も小さくなり、ひび割れ発生日数と対応する結果となった。図 6.6 に自由収縮ひずみとひび割れ発生日数との関係を示す。自由収縮ひずみが大きいほどひび割れ発生日数が短くなる傾向がみられた。

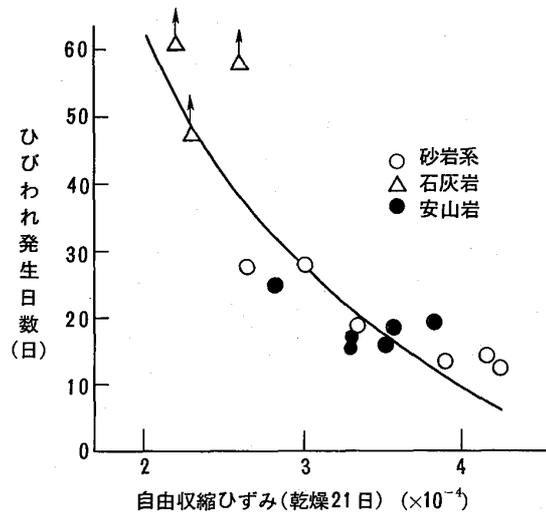


図 6.6 自由収縮ひずみとひび割れ発生日数

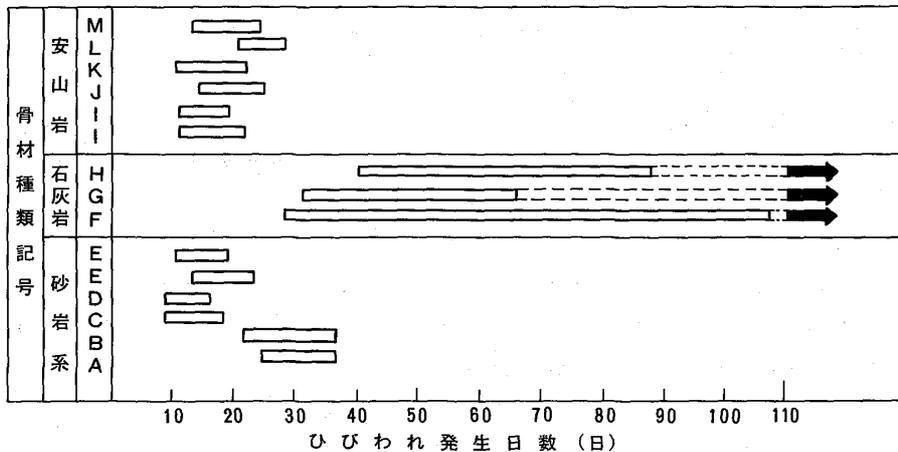


図 6.7 粗骨材の種類とひび割れ発生日数の範囲

(2) 粗骨材の物理的性質

骨材の物性値である表乾密度，吸水率，単位容積質量および破砕値とひび割れ発生日数との関係をそれぞれ図 6.8～図 6.11 に示す。試験条件は，前述 (1) と同様である。岩種別にみると全般にひび割れ発生日数と物性値との間にある程度相関性は認められるが，同一岩種で比べると明確な相関が認められないことがわかる。

骨材の種類および物理的性質がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響は，骨材の岩種の相違が最も大きく，石灰岩は砂岩系および安山岩に比べて，ひび割れ発生日数が最も大きい結果となった。

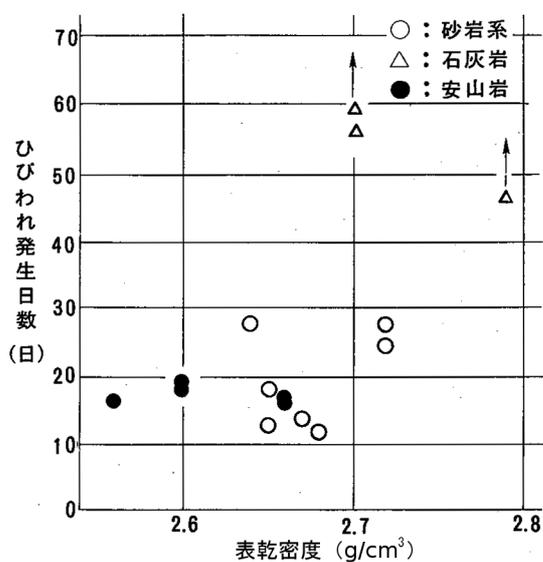


図 6.8 表乾密度とひび割れ発生日数

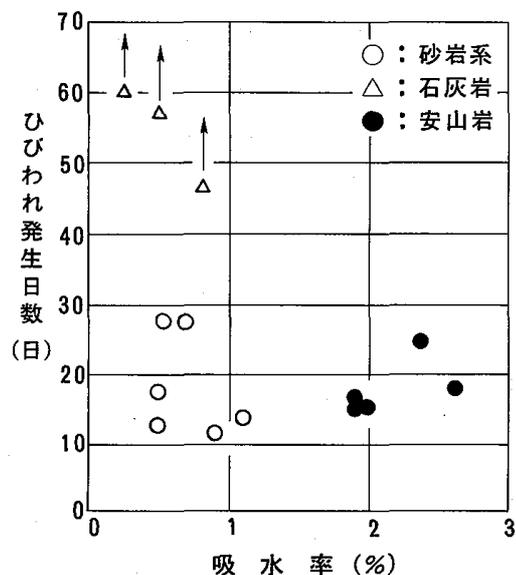


図 6.9 吸水率とひび割れ発生日数

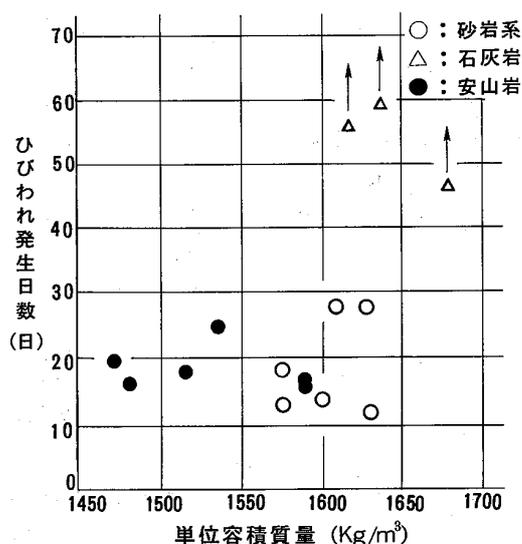


図 6.10 単位容積質量とひび割れ発生日数

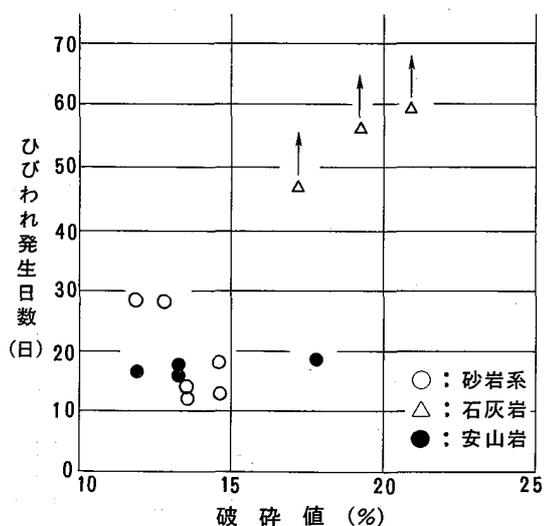


図 6.11 破砕値とひび割れ発生日数

6.1.5 初期養生条件

H-19	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討（その一）試験条件の影響	1988年
------	--------------------------------	-------

H-19 では、初期養生条件を変えたコンクリートのひび割れ試験について報告している。

(1) 初期養生期間

【試験条件】	JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」	
	(JIS A 1151 と寸法が若干異なる)	
	・養生条件	所定の材齢まで型枠のまま湿潤養生
	・乾燥条件	温度 20℃, 湿度 60%RH
	・セメントの種類	N: 普通ポルトランドセメント
	・水セメント比	60%
	・単位水量	192kg/m ³
・単位セメント量	320kg/m ³	
・スランプ	18.0 ± 1.5cm	
【要因】	初期養生期間(脱型時期)	5水準 1日, 2日, 3日, 5日, 7日

初期養生期間（脱型までの期間）とひび割れ発生日数との関係を図 6.12 に示す。初期養生期間が長いほどひび割れ発生日数は長くなる傾向にあり、脱型までに積極的な水分補給がなくとも乾燥防止処理を施すだけでも、ひび割れ抑制には効果を示すようである。なお、5.1.7 の図 5.11 で示した初期養生期間と乾燥収縮率との関係は、乾燥期間が長い場合、初期養生期間が長いほど乾燥収縮率が小さくなり、ひび割れ発生日数とひずみの大小関係は対応する結果となった。

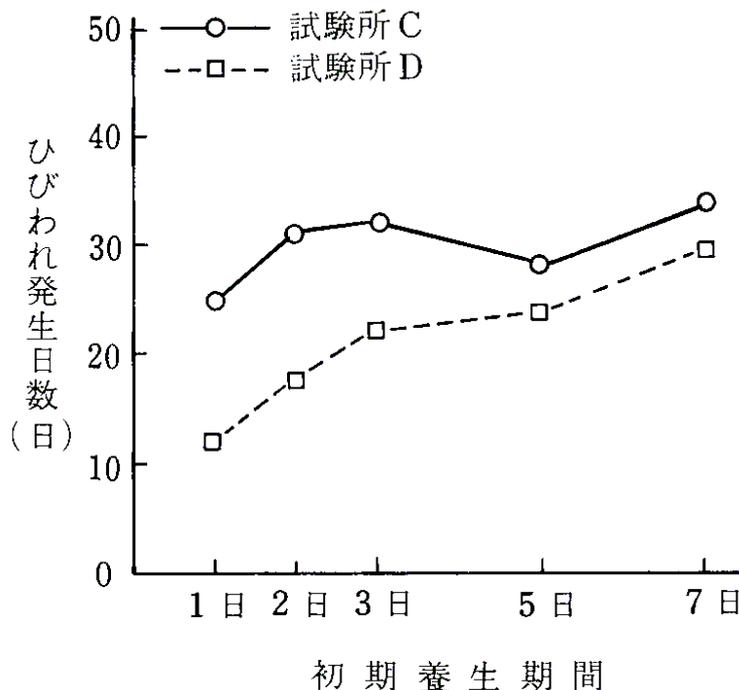


図 6.12 初期養生期間とひび割れ発生日数

(2) 初期養生方法

}	<p>【試験条件】 JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」 (JIS A 1151 と寸法が若干異なる)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・養生条件 ・乾燥条件 ・セメントの種類 ・水セメント比 ・単位水量 ・単位セメント量 ・スランプ <p>【要因】</p>	<p>所定の材齢まで型枠のまま湿潤養生 温度 20℃ , 湿度 60%RH N：普通ポルトランドセメント 60% 192kg/m³ 320kg/m³ 18.0 ± 1.5cm</p> <p>3 水準</p>	<p>材齢 1 日で脱型後, 材齢 7 日まで水中養生 材齢 1 日で脱型後, 材齢 7 日まで湿潤養生 材齢 7 日で脱型後, 以降乾燥</p>
---	---	---	---

初期養生方法とひび割れ発生日数との関係を図 6.13 に示す。湿潤養生は試験体からの水分の逸散を防ぐため、ひび割れ発生日数を遅らせることが可能と考えられる。また、水中養生は水分が補給されるため、ひび割れ抵抗性の向上にはより効果的な結果を示した。なお、5.1.7 の図 5.12 で示した初期養生方法と乾燥収縮率との関係では、7 日脱型は他の養生方法に比べてわずかに小さい乾燥収縮率を示した。1 日脱型 6 日水中養生は、7 日脱型よりも乾燥収縮率がわずかに大きくなってひび割れ日数が長くなっていることより、初期に積極的に水分補給する養生を行うことが、ひび割れ抵抗性を向上させる上で重要と考えられる。

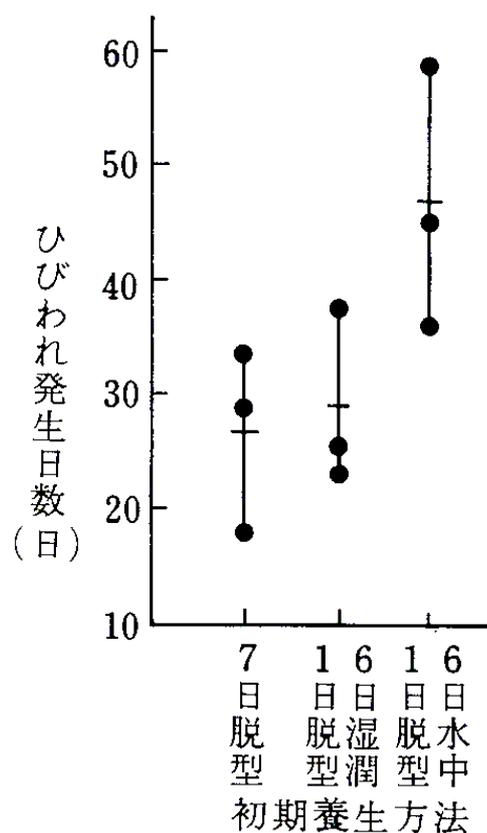


図 6.13 初期養生方法とひび割れ発生日数

6.1.6 アジテート時間

H-20	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討 (その二)アジテート時間の影響	1988 年
------	------------------------------------	--------

H-20 では、生コン工場から出荷したコンクリートについて、アジテータトラックのアジテート時間を変えてひび割れ試験を実施した結果について報告している。

【試験条件】 JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法 (案)」
(JIS A 1151 と寸法が若干異なる)

- ・養生条件 材齢 7 日まで型枠のまま封緘養生
- ・乾燥条件 温度 20 , 湿度 60%RH
- ・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
- ・水セメント比 60%
- ・スランブ 18.0 ± 1.5cm

【要因】 ・アジテート時間 5 水準 練り混ぜ後 30 分, 60 分, 90 分, 120 分, 150 分

図 6.14 にアジテート時間とひびわれ発生日数との関係を示す。アジテート時間が 90 分までは、ひびわれ発生日数はあまり変化しないが、120 分を超えるとひび割れ発生日数が短くなる傾向を示した。なお、5.1.8 の図 5.13 で示したアジテート時間と乾燥収縮率との関係は、アジテート時間が 90 分を超えると乾燥収縮率が大きくなり、ひび割れ発生日数とひずみの大小関係は対応する結果となった。図 6.15 に自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数との関係を示す。拘束枠ひずみとひび割れ発生日数に明確な相関は認められなかったが、自由収縮ひずみとひび割れ発生日数との間には負の相関が認められた。

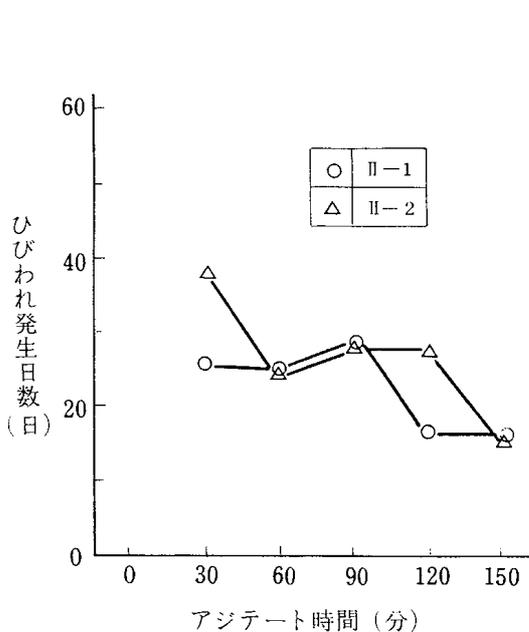


図 6.14 アジテート時間とひびわれ発生日数

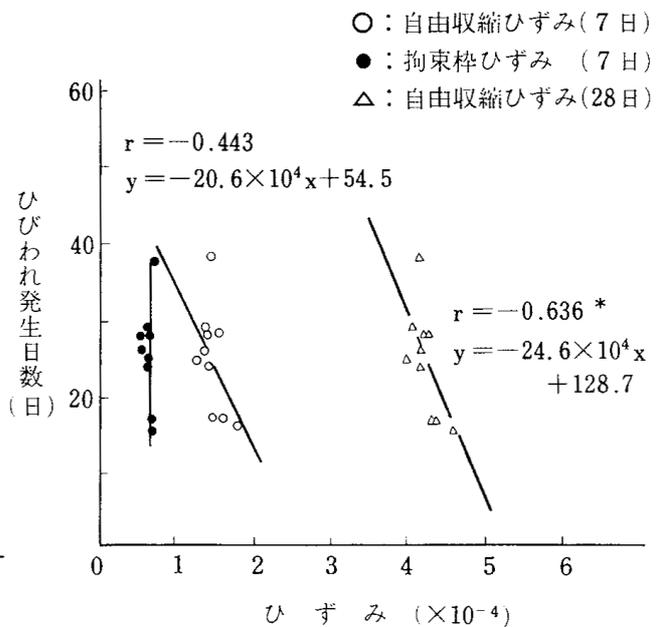


図 6.15 自由収縮ひずみおよび拘束枠ひずみとひび割れ発生日数

7 塩害

7.1 セメントの種類および水セメント比を要因とした塩化物イオン浸透性

F-55	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究	2008年
------	----------------------------	-------

F55では各種室内試験により供試体に塩化物を浸透させ、その浸透深さから拡散係数を算定した結果を報告している。

7.1.1 発色法による塩化物イオン浸透深さ

{	【試験条件】	JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」準拠
	・浸漬条件	10% 塩化ナトリウム水溶液に 26 週間浸漬
	・養生条件	材齢 28 日まで標準水中養生 (L のみ 56 日追加)
	・水セメント比	55%
	・スランプ	12.0 ± 1.5cm
	【要因】	・セメントの種類 5 種類
		N : 普通ポルトランドセメント
		H : 早強ポルトランドセメント
		M : 中庸熱ポルトランドセメント
		L : 低熱ポルトランドセメント
	BB : 高炉セメント B 種	

図 7.1 は、W/C = 55% の各種コンクリートに前養生 28 日間実施後、濃度 10% の NaCl 水溶液に 6 ヶ月間浸漬させた供試体断面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧し発色法により塩化物イオンの浸透深さを測定した結果である。塩化物イオンの浸透深さは、高炉セメント B 種がポルトランドセメントを用いた場合に比べて小さくなった。この理由として高炉セメント B 種はフリーデル氏塩の生成量が多く、塩化物イオンの固定能力が高いためと考えられる。また、低熱セメントは、前養生期間を 28 日から 56 日に長くした場合、塩化物イオンの浸透深さは小さくなった。前養生期間を長くして圧縮強度を増進させることで遮塩性が向上した結果となった。

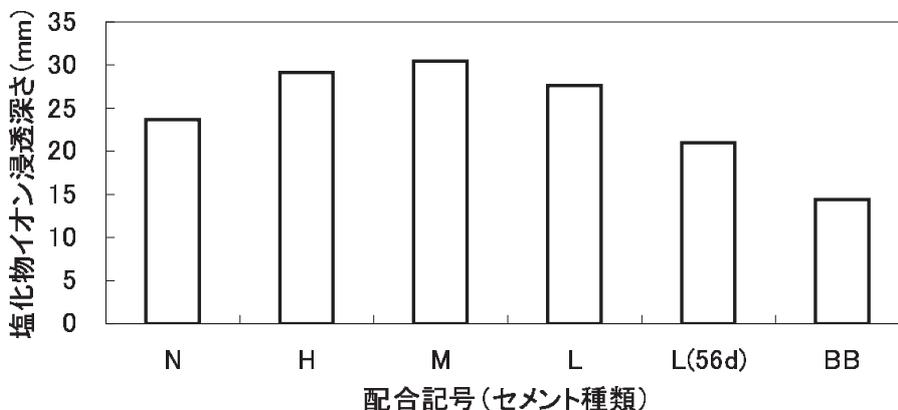


図 7.1 発色法による塩化物イオンの浸透深さ結果

7.1.2 浸漬による塩化物イオンの見掛けの拡散係数

【試験条件】 JSCE-G-572-2003「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」準拠

- ・浸漬条件 10% 塩化ナトリウム水溶液に 26 週間浸漬
- ・養生条件 材齢 28 日まで標準水中養生
(L のみ材齢 56 日追加)

- ・水セメント比 55%
- ・スランプ $12.0 \pm 1.5\text{cm}$

【要因】 ・セメントの種類 5 種類

- N : 普通ポルトランドセメント
- H : 早強ポルトランドセメント
- M : 中庸熱ポルトランドセメント
- L : 低熱ポルトランドセメント
- BB: 高炉セメント B 種

塩化物イオンの濃度分布および拡散方程式への回帰結果を図 7.2, 図 7.3, 図 7.4 に示す。高炉セメント B 種は, コンクリート表面の全塩化物イオンが大きい, 見掛けの拡散係数は他セメントに比べて小さく, 塩化物イオンの固定能力が大きく遮塩性が高い傾向がうかがえる。また, 低熱セメントは浸せき前の養生期間を長くすると見掛けの拡散係数が小さくなる結果となった。以上の結果は, 発色法による塩化物イオンの浸透深さの測定結果と傾向が一致している。

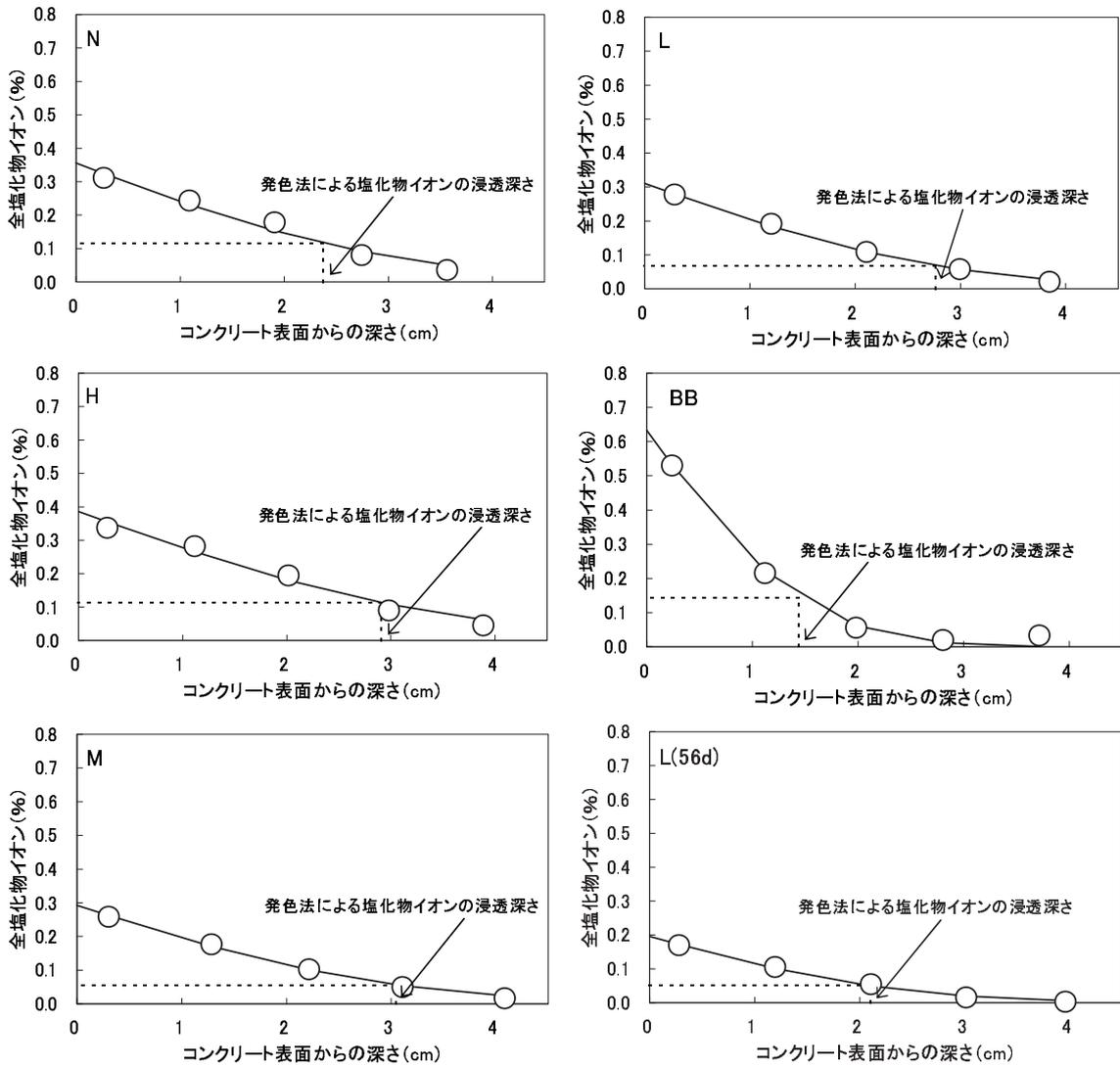


図 7.2 コンクリート表面からの深さと全塩化物イオン

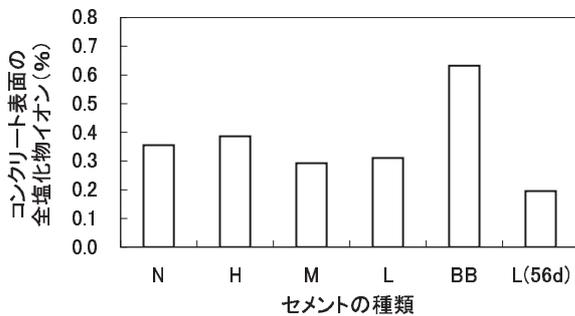


図 7.3 表面全塩化物イオン濃度 (C_{a0})

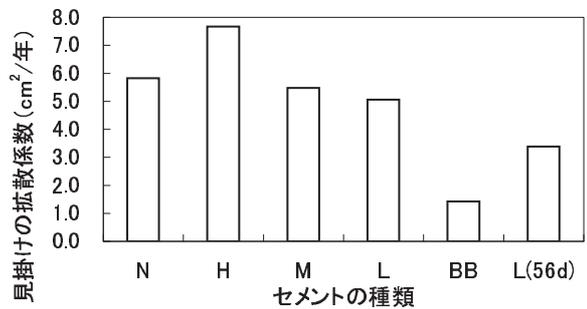


図 7.4 見掛けの拡散係数 (D_{ap})

7.1.3 電気泳動による実効拡散係数

- 【試験条件】 JSCE-G-571-2003「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」準拠
 - ・養生条件 材齢 28 日まで標準水中養生 (L のみ 56 日追加)
 - ・スランブ $12.0 \pm 1.5\text{cm}$
- 【要因】
 - ・セメントの種類 5 種類
 - N : 普通ポルトランドセメント
 - H : 早強ポルトランドセメント
 - M : 中庸熱ポルトランドセメント
 - L : 低熱ポルトランドセメント
 - BB : 高炉セメント B 種
 - ・水セメント比 3 水準 45%, 55%, 65%

セメントの種類と実効拡散係数の関係を図 7.5 に示す。実効拡散係数をセメントの種類別に見ると、BB $H < N < M < L$ のような結果となった。また、セメント水比と実効拡散係数の関係を図 7.6 に示す。極めて実効拡散係数が小さい高炉セメント B 種を除いて、水セメント比が大きいほど実効拡散係数も大きくなり、セメント水比と実効拡散係数は概ね直線的な関係が見られた。

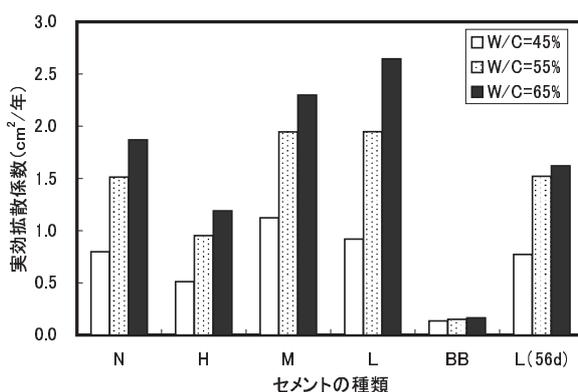


図 7.5 セメントの種類と実効拡散係数

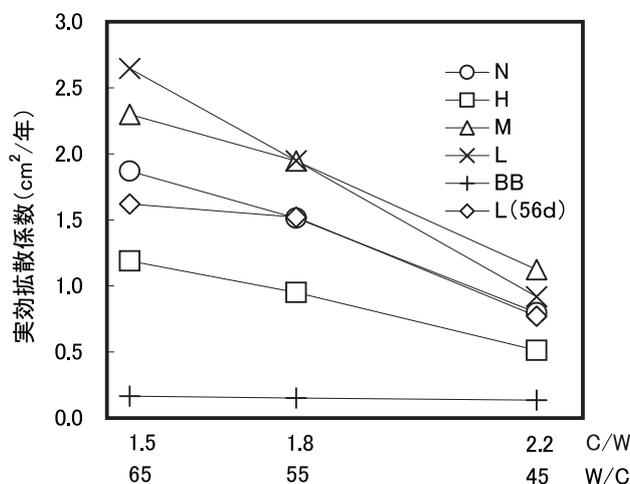


図 7.6 セメント水比と実効拡散係数

7.2 長期暴露

F-48	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢 20年最終報告	1998 年
------	---	--------

F48 では、N、H、M、BB を使用したコンクリート試験体を、鹿児島感潮、鹿児島海中、酒田感潮および酒田海中に 20 年間暴露した場合の塩分量と鉄筋の腐食面積等を報告している。この試験では、予め塩分量を 0~0.4% の範囲に調整した砂を用いてコンクリートの練混ぜを行い、砂の塩分量と鉄筋の発錆との関係を調査した。なお、コンクリート供試体は海水に暴露する前に 3~5 ヶ月間、濡れむしろをかけて養生を行った。セメントの種類が耐久性に与える影響調査は酒田、鹿児島
の暴露地でのみ実施されていたため、ここでは、その試験結果を概説する。

{	【試験条件】	・養生条件	暴露前に 3~5 ヶ月間湿潤養生	
		・水セメント比	53.8% ~ 58.3%	
		・単位セメント量	300kg/m ³	
		・スランプ	12 ± 1.5cm	
		・暴露期間	20 年	
	【要因】	・セメントの種類	4 種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント M : 中庸熱ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B 種
		・暴露場所	4 箇所	鹿児島感潮、鹿児島海中、酒田感潮、酒田海中

(1) コンクリートへの塩分浸透

図 7.7 にコンクリート試験体表面からの深さと、塩分量の関係を示す。どの暴露条件においてもポルトランドセメントを用いた場合、深さ方向による塩分の差は小さいが、BB では、試験体内部にいくほど塩分量は小さくなっており、塩分の浸透が表面でとどまっている。ポルトランドセメントの種類による比較では個々の暴露条件で若干傾向が異なるものの、N を用いた場合より H や M の方が高い塩分量を示している。

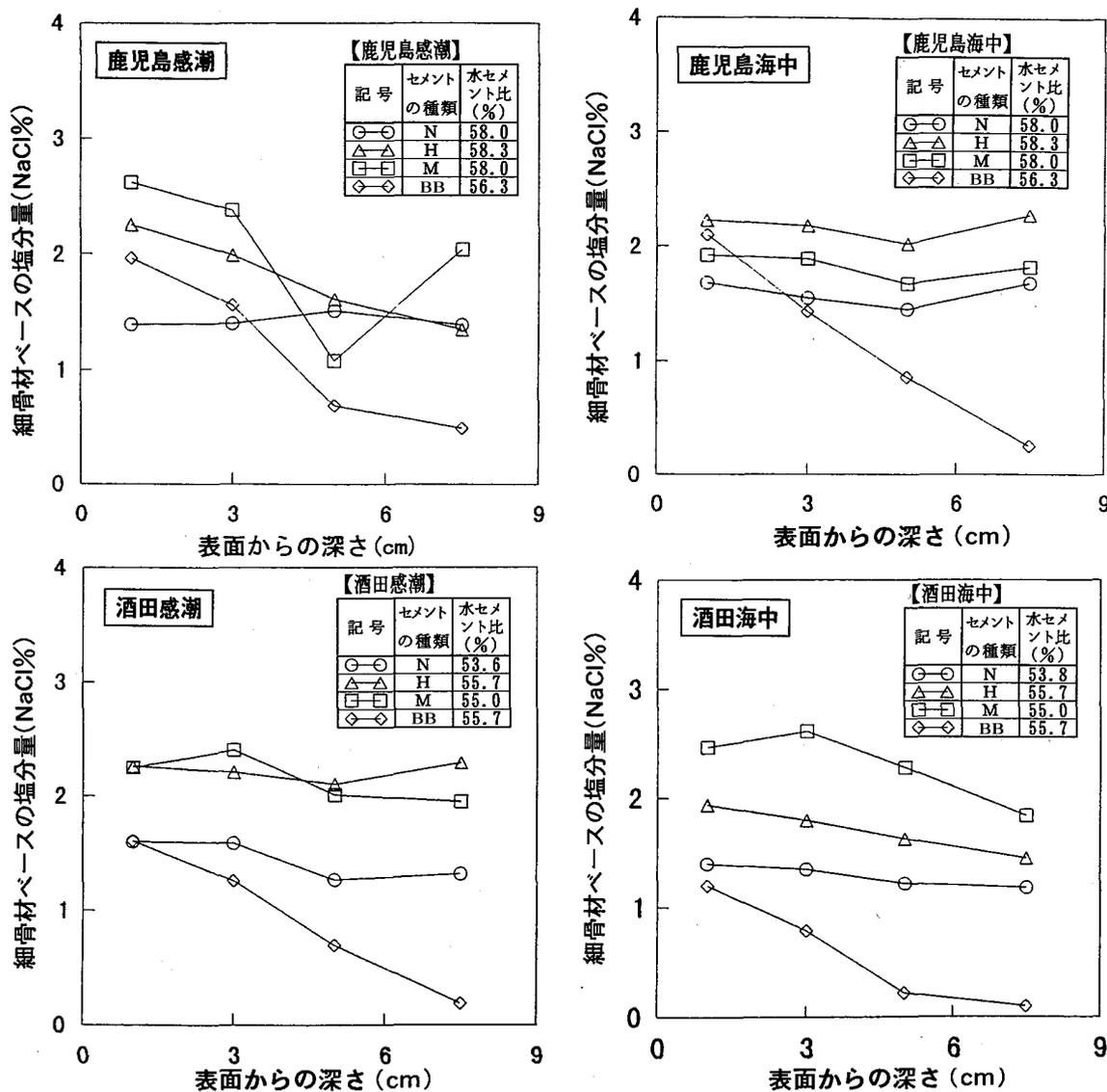


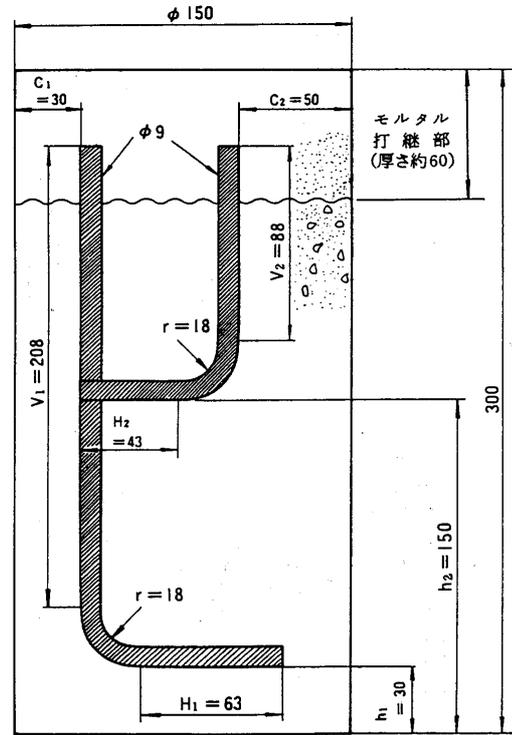
図 7.7 コンクリート表面からの深さと塩分量

(2) コンクリート内部の鉄筋の腐食

当試験では図 7.8 に示すような鉄筋が埋設されており発錆面積率・減少率が調査されている。

結果を図 7.10 に示すが、感潮部の場合、酒田は鹿児島に比べ非常に発錆量が多く、海砂の塩分含有量が 0% であっても発錆は認められるが、海砂の塩分含有量と鉄筋の発錆量の間に明確な相関は認められない。鹿児島感潮では塩分含有量 0% では発錆は認められないが、塩分量の増加と共に発錆量も増える傾向にある。このように感潮部では暴露地間で鉄筋の発錆量に違いが認められる。これは、鹿児島では火山灰などの堆積物に供試体が埋もれていたため酸素の供給が十分ではなく、また潮の干満による乾湿の影響も受けにくかったものと推測される。

セメントの種類と孔食深さの関係を図 7.9 に示す。BB では酒田感潮の海砂塩分含有量が多い場合を除いて発錆も孔食もほとんど認められず、他のポルトランドセメントに比べて小さい傾向にあるが、ポルトランドセメントの種類の違いは認められない。



- V_1 : 長鉄筋鉛直部分寸法,
- H_1 : 長鉄筋水平部分寸法,
- h_1 : 長鉄筋埋込み高さ,
- C_1 : 長鉄筋かぶり厚さ,
- V_2 : 短鉄筋鉛直部分寸法
- H_2 : 短鉄筋水平部分寸法
- h_2 : 短鉄筋埋込み高さ
- C_2 : 短鉄筋かぶり厚さ

図 7.8 鉄筋の形状・寸法及び配筋状態

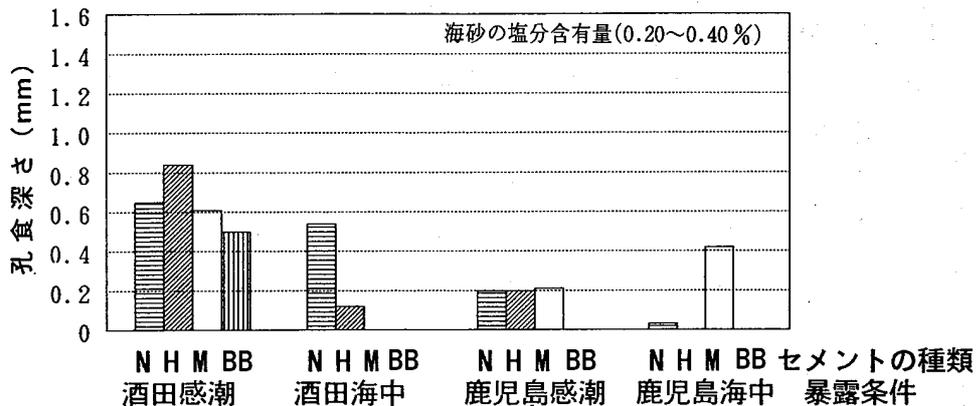


図 7.9 セメントの種類と孔食深さ

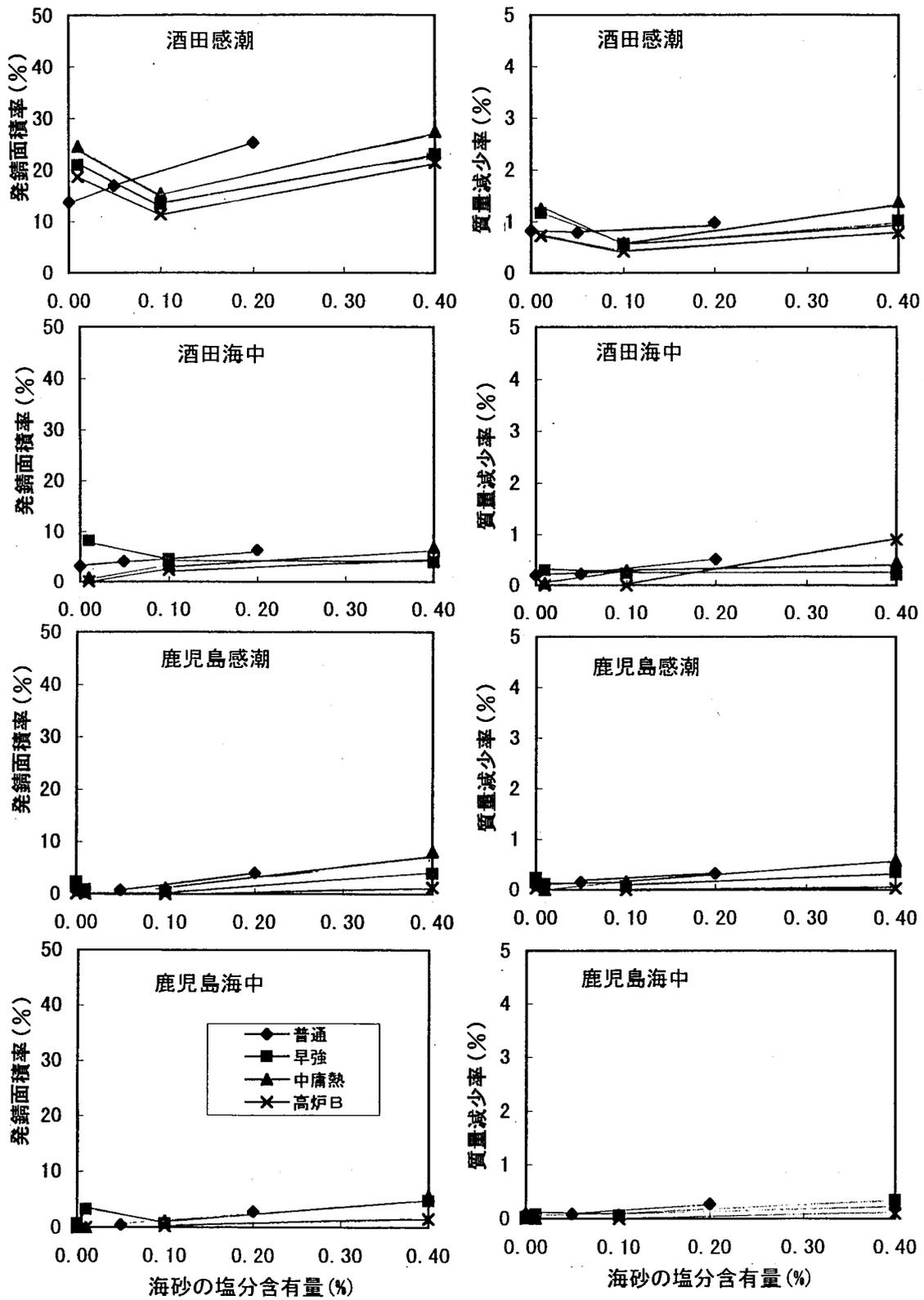


図 7.10 セメントの種類別にみた海砂の塩分量と発錆面積率および質量減少率

F-49	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究	1999年
------	------------------------------	-------

F-49では、旧運輸省港湾技術研究所構内の海水循環水槽に10年間、コンクリート供試体を暴露し塩害について検討を行い報告している。

{	【試験条件】	・暴露開始材齢		材齢7日まで所定の養生を行い、材齢2ヶ月まで屋外養生を行った後に暴露	
		・暴露期間		10年	
	【要因】	・海砂の塩分含有量	3水準		0.00%, 0.04%, 0.10%
		・セメントの種類	3種類		N : 普通ポルトランドセメント
					SR : 耐硫酸塩ポルトランドセメント
					BB : 高炉セメントB種
		・水セメント比	3水準		40%, 55%, 70%
		・養生条件	3条件		封緘養生(翌日脱型後, 材齢7日まで封緘養生) 気中養生(翌日脱型後, 材齢7日まで気中養生) 蒸気養生(蒸気養生後, 材齢7日まで気中養生) 蒸気養生条件...最高温度70℃, 4時間保持
		・暴露条件	3条件		海浜, 感潮(干満部), 海中
		・かぶり	3水準		30mm, 50mm, 70mm

(1) コンクリートへの塩分浸透

図7.11は養生条件を封緘、海砂の塩分含有量を0.10%、水セメント比55%におけるコンクリートの試験体表面からの深さと塩分量の関係を示す。海浜暴露ではいずれのセメントを使用した場合でも、表面から深さ1cmにおける塩分量が海砂の塩分含有量よりも高い値を示した。しかし、表面から3cm以上では海砂含有量とほぼ同じ値を示した。このように海浜暴露における材齢10年の塩分浸透深さはセメントの種類による明確な差が認められなかった。

感潮および海中暴露においては、N及びSRを使用した場合は、コンクリートの中心部まで塩分が浸透しており、深さ方向による塩分量の差が小さかった。それに対し、BBでは供試体表面付近の塩分量はやや高い値を示したが、中心部への塩分浸透は少なかった。

また、深さ3cmの塩分量を養生条件で比較した結果を図7.12に示す。塩分浸透量が少ない海浜暴露では養生条件の違いによる差は認められなかった。感潮および海中暴露では、N及びSRを使用した場合は封緘養生と気中養生で差が認められなかったが、BBでは気中養生の方が封緘養生に比較し大きい塩分量を示した。また、蒸気養生(Nのみ実施)の場合は、封緘および気中養生よりも、やや大きい塩分量を示した。

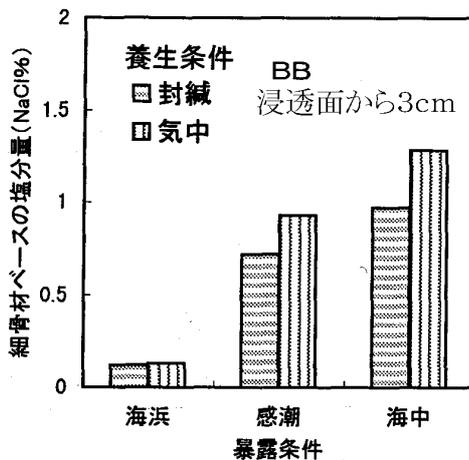
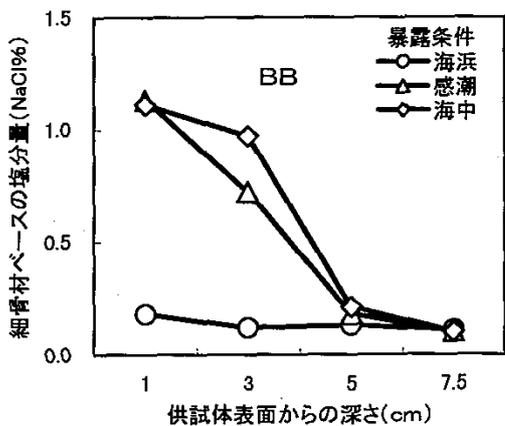
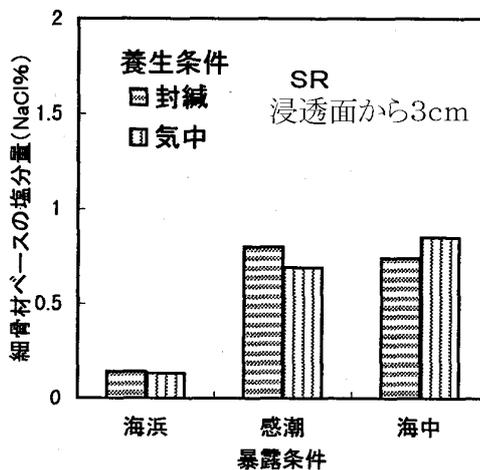
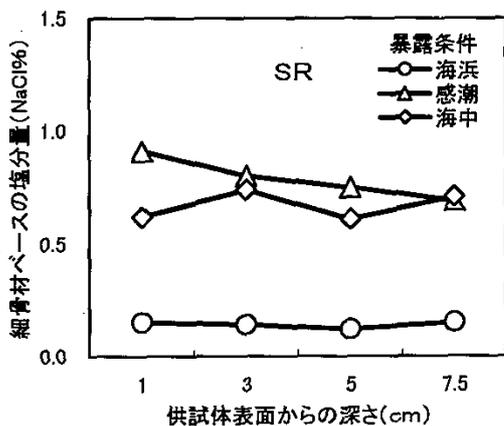
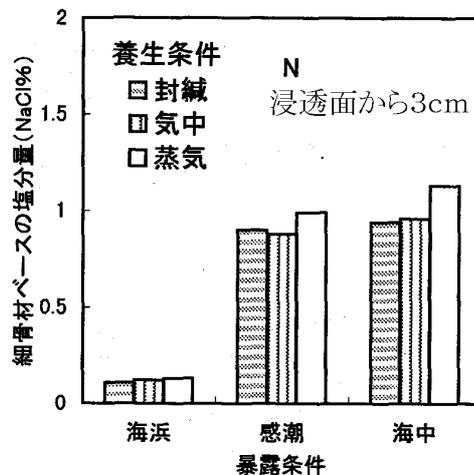
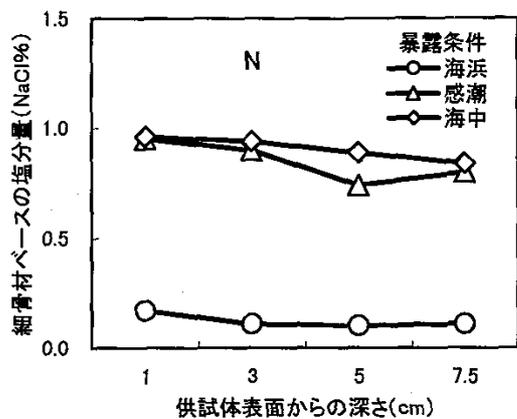


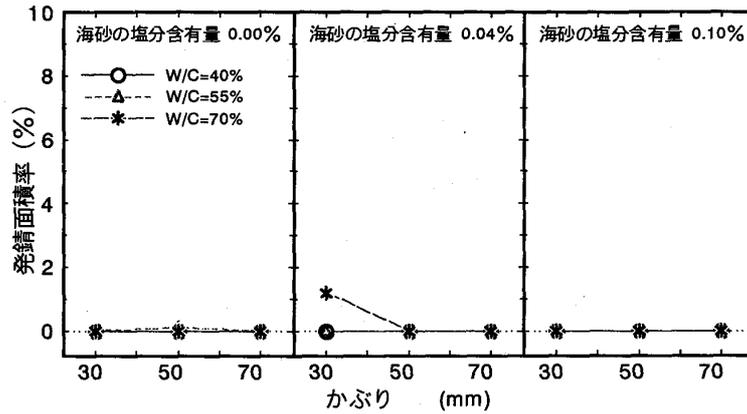
図 7.11 供試体表面からの深さと塩分量

図 7.12 養生条件が塩分浸透に与える影響

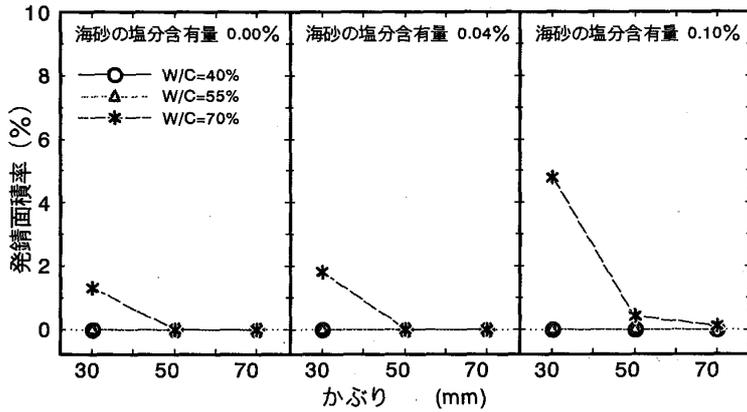
(2) コンクリート内部の鉄筋の腐食

図 7.13 ~ 図 7.15 にかぶりと発錆面積率の関係を暴露条件毎にまとめたものを示す。

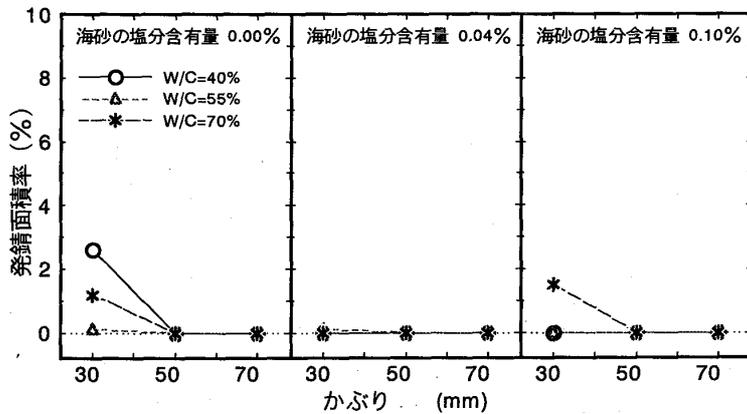
図 7.13 は海浜部に暴露した供試体のかぶりと発錆面積率の関係である。いずれのセメントも W/C=70% ではかぶり 30mm で発錆が認められる場合があるが、かぶり 50mm 以上では、ほとんど発錆は認められない。



(a) 普通ポルトランドセメント



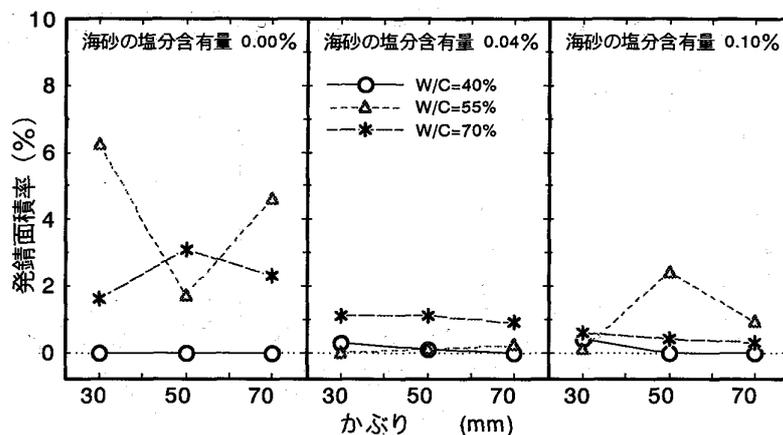
(b) 耐硫酸塩ポルトランドセメント



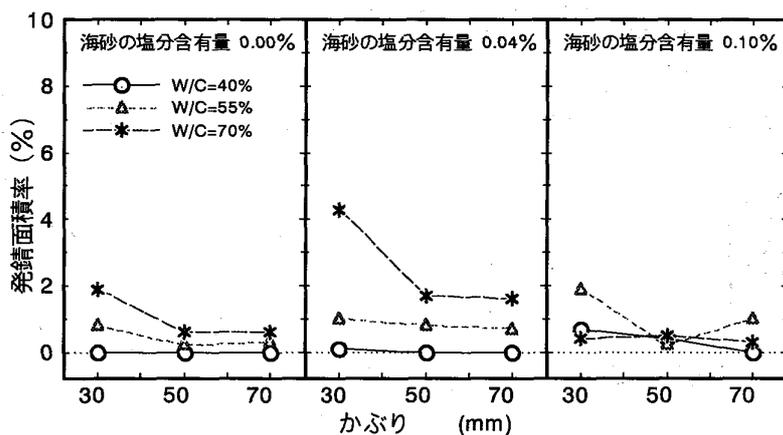
(c) 高炉セメントB種

図 7.13 封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (海浜部)

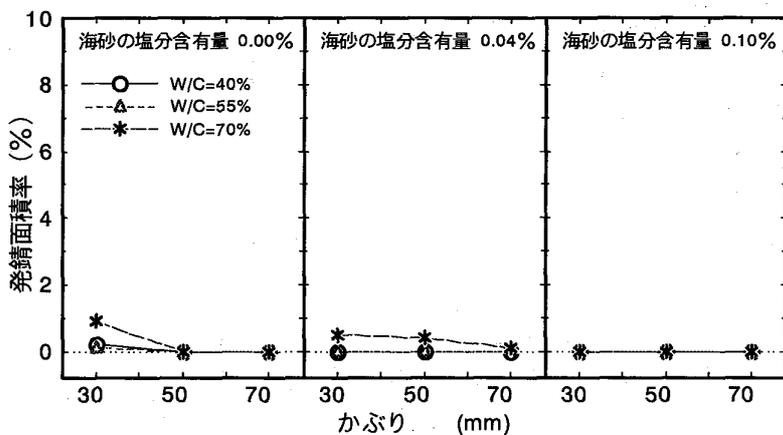
図 7.14 に、感潮部に暴露した供試体のかぶりと発錆面積率を示す。感潮部は、外部から塩分と酸素が十分に供給される環境であることから、他の暴露条件に比べ発錆が大きい傾向にある。全体的に、かぶりが小さいほど発錆面積率が大きい傾向が認められるが N を使用し W/C=40% の場合、また BB を用いて W/C=55% 以下の場合は、かぶりが小さくても発錆面積率が非常に小さい。



(a) 普通ポルトランドセメント



(b) 耐硫酸塩ポルトランドセメント



(c) 高炉セメントB種

図 7.14 封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (感潮部)

図 7.15 に、海中部に暴露した供試体のかぶりと発錆面積率を示す。N を使用した場合、かぶりが小さいほど発錆面積率が大きい傾向が認められる。SR を使用した場合は、かぶりの影響が判然としない。BB を使用した場合は、かぶりが小さい場合でも発錆は殆ど認められない。

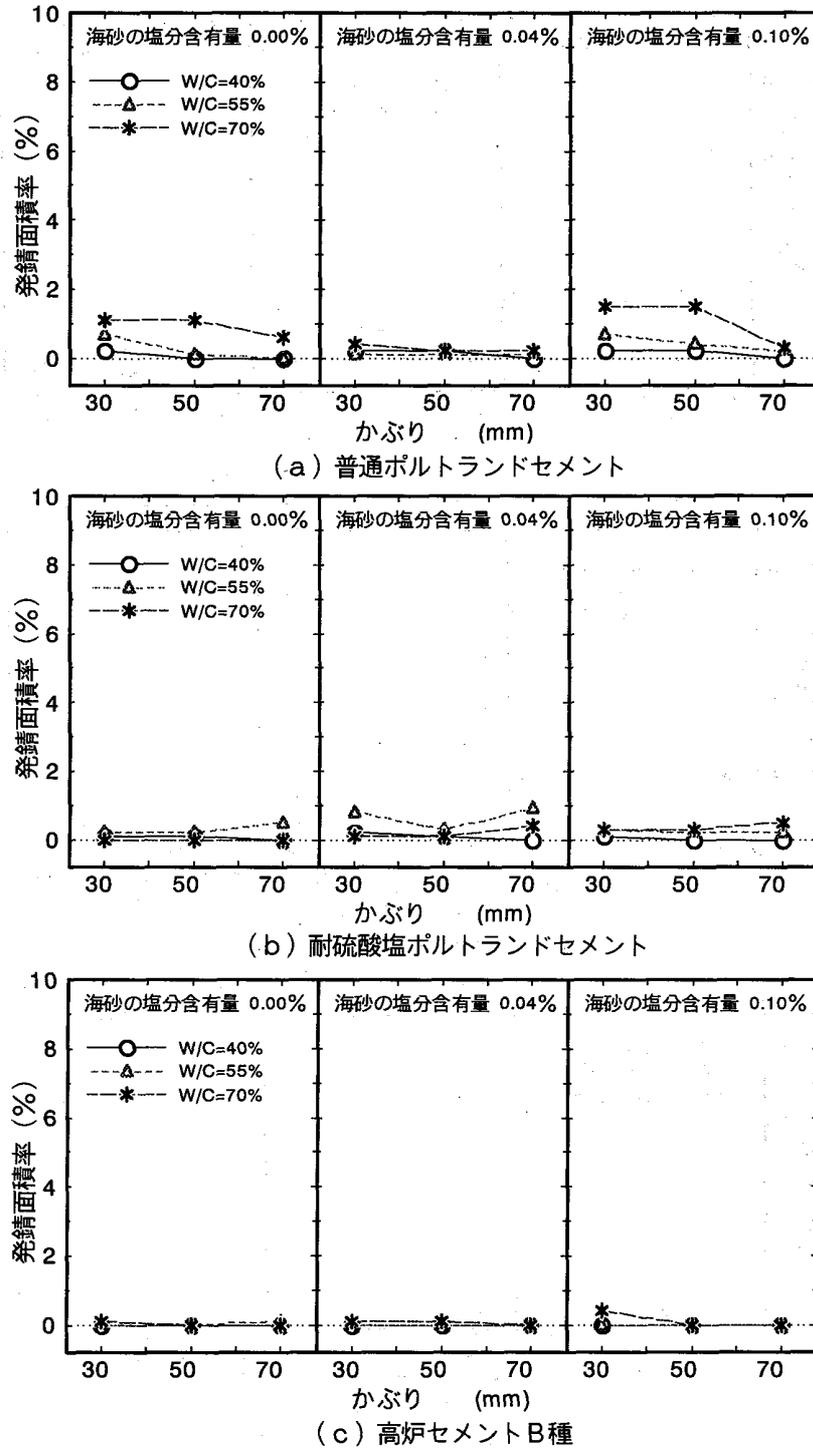


図 7.15 封緘養生した供試体のかぶりと発錆面積率 (海中部)

F-56	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢 10 年最終報告	2010 年
------	--	--------

F-56 では、各種低発熱セメントを 10 年間暴露した供試体の調査結果を報告している。

{	<p>【試験条件】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・養生条件 ・試験材齢 <p>【要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・暴露環境 ・セメントの種類 	<ul style="list-style-type: none"> ・養生条件 ・試験材齢 <ul style="list-style-type: none"> 4 箇所 10 種類 	<p>所定の材齢まで標準水中養生後に暴露</p> <p>28 日, 5 年, 10 年</p> <p>酒田感潮, 久里浜感潮, 久里浜海浜, 東京屋上</p> <p>NC : 普通ポルトランドセメント</p> <p>MC : 中庸熱ポルトランドセメント</p> <p>LC : 低熱ポルトランドセメント</p> <p>NBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (NC ベース)</p> <p>MBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (MC ベース)</p> <p>LBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (LC ベース)</p> <p>FC : フライアッシュ II 種 30% 混合 (NC ベース)</p> <p>FCN : フライアッシュ III 種 30% 混合 (NC ベース)</p> <p>LP : 石灰石微粉末 30% 混合 (NC ベース)</p> <p>NBF : フライアッシュ混合高炉セメント</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ・水セメント比 ・養生期間 	<ul style="list-style-type: none"> 3 水準 2 種類 	<p>40%, 50%, 60%</p> <p>28 日, 91 日</p>

(1) コンクリートへの塩分浸透

水結合材比 50%，前養生期間 28 日における感潮暴露での材齢 10 年の塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の関係を図 7.16 に示す

ポルトランドセメント系の場合，セメント種類の違いが塩化物イオンの見掛けの拡散係数に及ぼす影響は小さく，塩化物イオンの見掛けの拡散係数は同程度であった。高炉スラグセメント系やフライアッシュセメント系の場合，ポルトランドセメント系に比べて塩化物イオンの見掛けの拡散係数は著しく小さくなっており，塩化物の浸透に対する抑制効果が認められ，特に NBF では顕著であった。高炉スラグ微粉末を用いた場合，ポルトランドセメントの種類，すなわち，NBB，MBB，LBB では塩化物の浸透に大きな違いは認められなかった。フライアッシュを用いた場合，フライアッシュ II 種 (FC) と III 種 (FCN) とでは塩化物の浸透に大きな差は認められなかった。石灰石微粉末を混合した LP を用いた場合，高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような浸透抑制効果は認められなかった

また，感潮暴露での比較ではあるが，ポルトランドセメント系の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は示方書解説中の予測式に比べてほぼ同程度，一方，高炉スラグセメント系は予測式に比べて小さい傾向を示した。表面塩化物イオン濃度については示方書で示されている飛沫帯と今回の感潮暴露による違いはあるが，材齢 10 年暴露した表面塩化物イオン濃度は示方書の $13\text{kg}/\text{m}^3$ と同等以上であり，特に NBF を除く高炉スラグセメント系およびフライアッシュセメント系で顕著に大きかった。

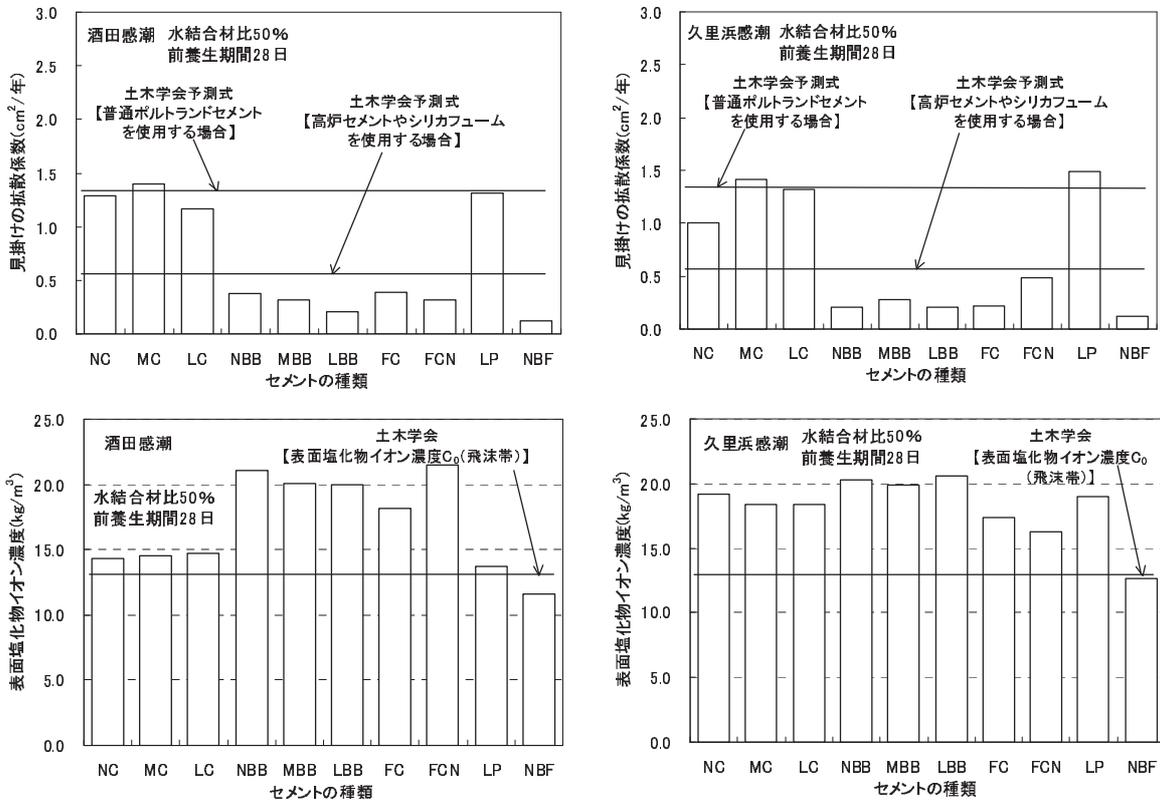


図 7.16 見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン濃度 (材齢 10 年)

(2) コンクリート内部の鉄筋の腐食

水結合材比 50 % , 前養生期間 28 日におけるセメントの種類と鉄筋の発錆面積率の関係を図 7.17 に示す。気中暴露（久里浜海浜および東京屋外部）の供試体は感潮暴露に比べて鉄筋の発錆が少なく、特に東京屋外部では鉄筋の発錆面積は非常に小さかった。これは材齢 5 年と同様の傾向であった。感潮暴露については、試験結果から酒田感潮部より久里浜感潮部の方が厳しかったものと推定される。セメントの種類では、ポルトランドセメント系および石灰石微粉末を混合した LP に比べて混合セメント系（NBB, MBB, LBB, FC, FCN, NBF）の方が鉄筋の発錆面積率は小さく、混合材による鉄筋の発錆抑制効果が認められた。

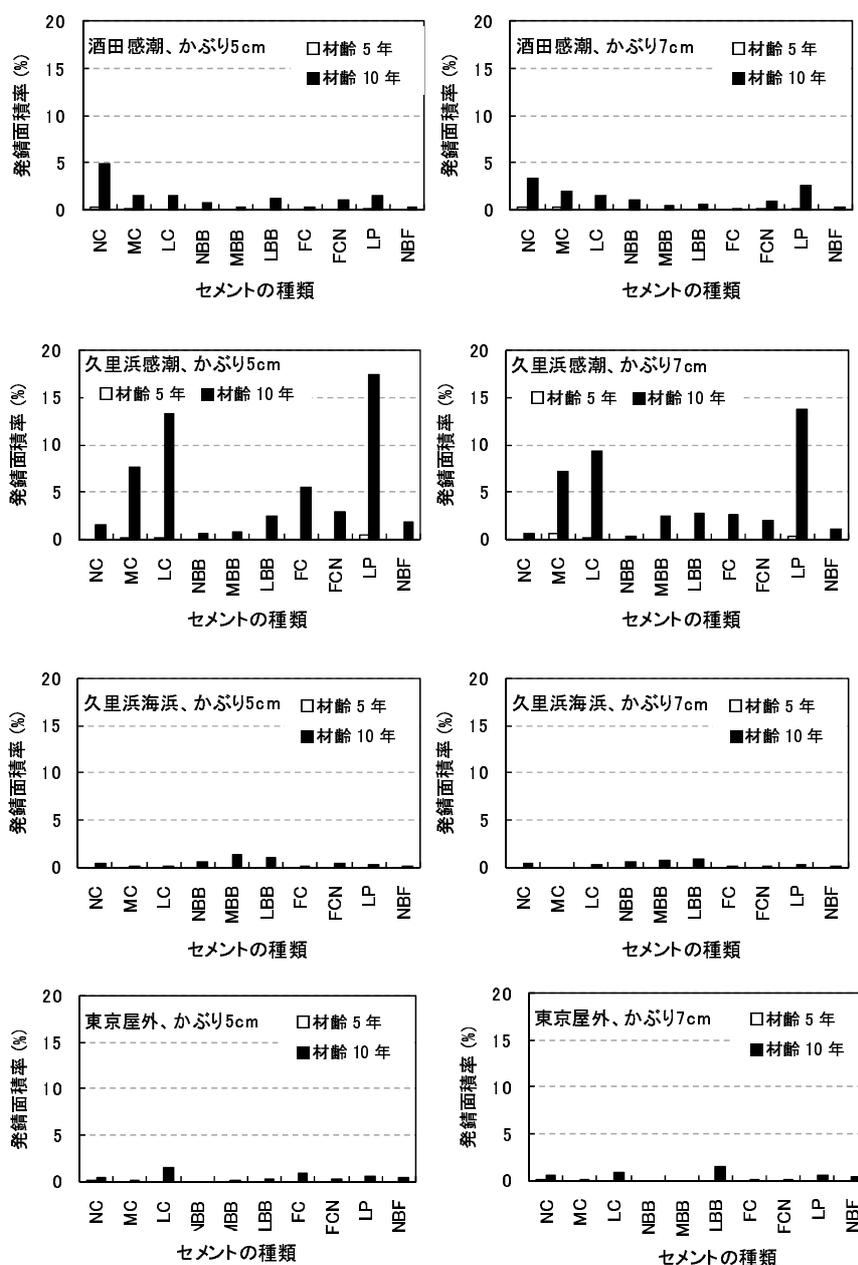


図 7.17 セメントの種類と発錆面積率

8 中性化

8.1 各種要因の影響

8.1.1 セメントの種類および水セメント比

F-55	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究	2008年
------	----------------------------	-------

F-55 では、各種セメントを用いたコンクリートの中性化に関して、促進中性化試験により検討を行い報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」準拠		
	・養生条件	材齢 28 日まで標準水中養生 (L のみ 56 日追加)		
	・スランプ	12.0 ± 1.5cm		
	【要因】	・セメントの種類	5 種類	N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント M : 中庸熱ポルトランドセメント L : 低熱ポルトランドセメント BB : 高炉セメント B 種
	・水セメント比	3 水準	45% , 55% , 65%	

促進中性化試験結果を、表 8.1 に中性化速度係数で、図 8.1 に中性化深さで示す。いずれの水セメント比においても、Hを用いたコンクリートの中性化深さが最も小さく、ついでNの順となり、M、L及びBBを用いたコンクリートの中性化深さはこれより大きくなる傾向が見られた。また、Lを用いたコンクリートの中性化深さは水セメント比 65% では、中庸熱セメント、高炉セメント B 種よりも大きく、水セメント比が大きい場合では中性化速度が大きい傾向が見られた。また図 8.2 に図示するように、試験開始時の圧縮強度が小さいほど中性化速度が大きくなる傾向となり、Lは水中養生期間を 28 日から 56 日とすると、コンクリートの中性化深さはNと同等となっている。

表 8.1 各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化速度係数 (mm/√年)

セメントの種類	養生(日)	W/C (%)		
		45	55	65
N	28	16.9	30.7	42.9
H		10.8	27.3	39.4
M		19.8	42	54.2
L		23.3	42	65.8
BB		21.1	39	51.9
L	56	14.6	32.1	48.9

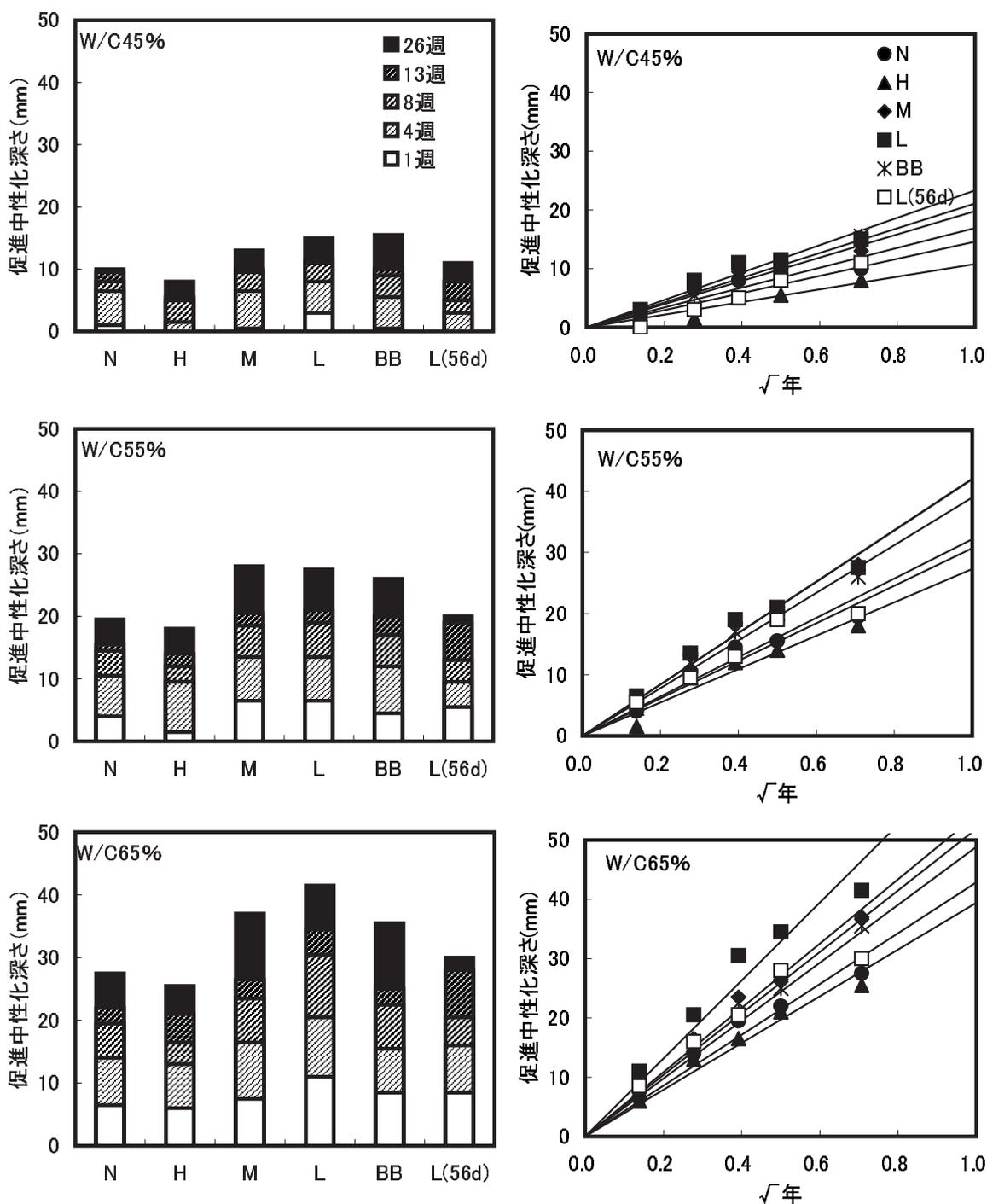


図 8.1 各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化深さ

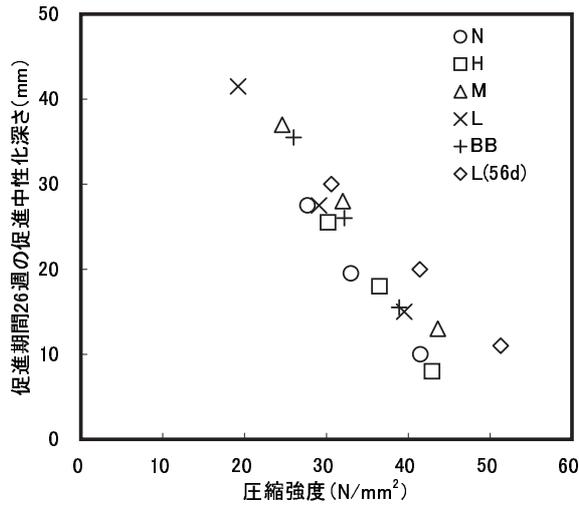


図 8.2 圧縮強度と促進中性化期間 26 週の中性化深さ

また，図 8.3 より，水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数はセメント種類毎に直線関係で評価できることが確認された。直線回帰した定数を表 8.2 に示す。

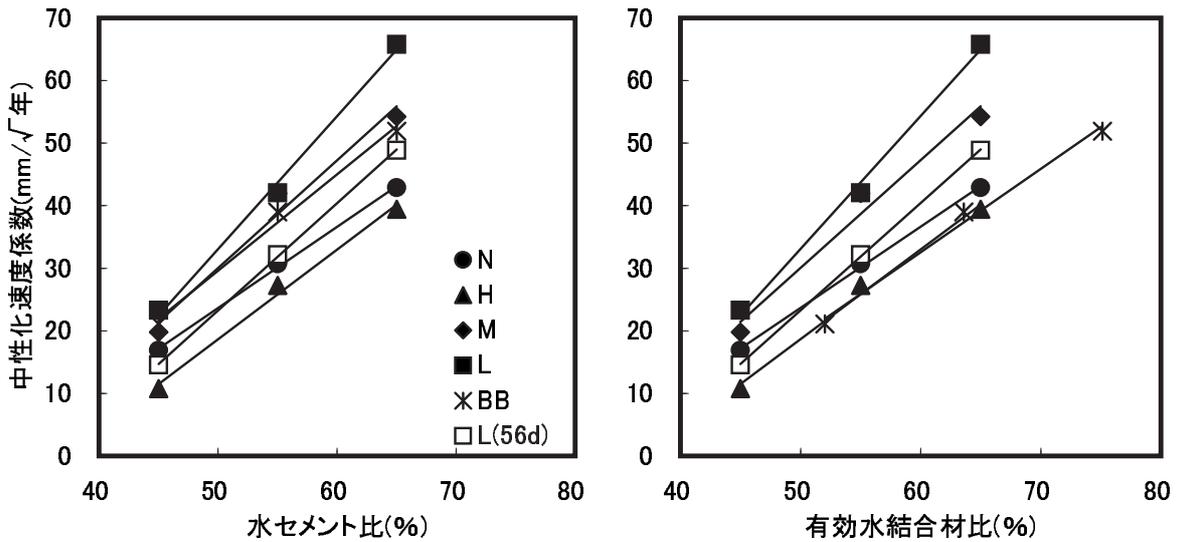


図 8.3 水セメント比および有効水結合材比と中性化速度係数

表 8.2 有効結合材比と中性化速度係数の直線回帰定数

セメントの種類	養生 (日)	$\alpha = a + b \times (W/B)$	
		a	b
N	28	-41.3	129.9
H		-53.0	143.3
M		-56.1	172.3
L		-73.1	212.3
BB		-47.4	133.3
L	56	-62.5	171.5

8.1.2 初期の乾燥

F-38	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響	1985 年
------	-------------------------	--------

F-38 では、初期の乾燥が各種セメントを用いたコンクリートの中性化に及ぼす影響を報告している。セメントは、N、H、BB および FB を対象とした。

{	【試験条件】 JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」と同等の試験			
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント		
	・養生条件	所定の材齢まで封緘養生		
	・水セメント比	60%		
	・スランプ	18.0 ± 1.5cm		
	・乾燥期間	4 週		
	【要因】	・乾燥開始材齢	2 水準	3 日，7 日
		・乾燥条件	2 水準	温度 20 湿度 35%RH 温度 20 湿度 65%RH

図 8.4，図 8.5 より、乾燥開始材齢については 3 日，7 日とでは約 1mm の差、湿度 35%RH の条件では、65%RH に比べ平均的に約 2mm 中性化深さが大きくなっている。このことより、セメントの種類、初期の乾燥条件（材齢，湿度）は、中性化深さに影響を及ぼす可能性が確認された。

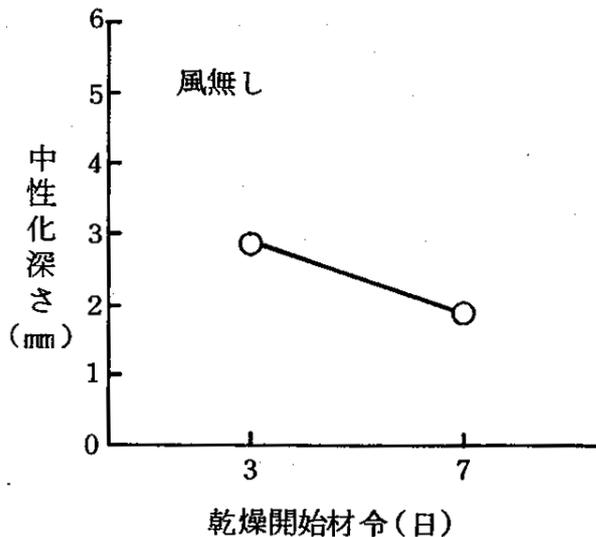


図 8.4 乾燥開始材齢と中性化深さ

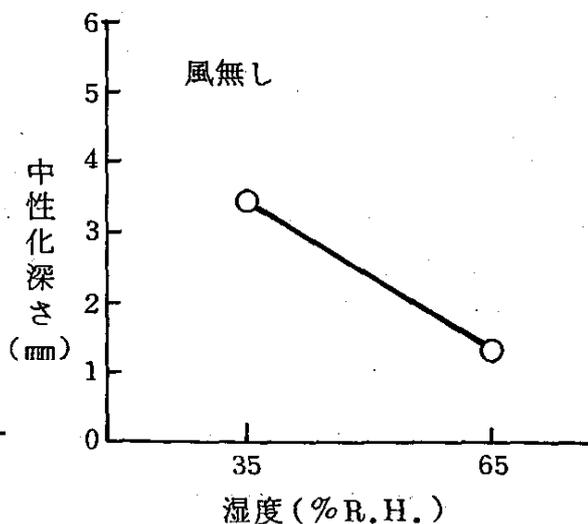


図 8.5 相対湿度と中性化深さ

8.2 長期暴露

F-48	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢 20年最終報告	1998 年
------	---	--------

F-48 では、海砂の塩分含有量がコンクリート中の鉄筋の発錆に与える影響を評価するために、20年の長期暴露試験を行い報告している。

【試験条件】	JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」と同等の試験		
	・養生条件	所定の期間，濡れむしろをかけて養生	
	・試験材齢	5年，10年，20年	
	【要因】	・暴露環境	9箇所 東京（屋内，屋外），久里浜（海浜，感潮，海中） 酒田（感潮，海中），鹿児島（感潮，海中）
		・セメントの種類	4種類 N：普通ポルトランドセメント H：早強ポルトランドセメント M：中庸熱ポルトランドセメント BB：高炉セメント B種
	・水セメント比	41.0%～74.4%	
	・海砂の塩分含有量	0.00，0.01，0.05，0.10，0.20，0.40%	

暴露したコンクリートの中性化深さに関して、材齢との関係を図 8.6 に水セメント比との関係を図 8.7 に示す。暴露環境によって中性化の進行が異なり、東京屋外、久里浜海浜では材齢 5 年以降の中性化の進行がほとんど見られない。一方、東京屋内では中性化深さが進行しており、その進行速度は JASS5 の計算式と同様の傾向であった。水セメント比との関係においても、屋内と屋外で異なる傾向が認められたが、何れも良い相関であった。なお、海砂の塩分含有量が中性化深さに及ぼす影響は認められなかった。

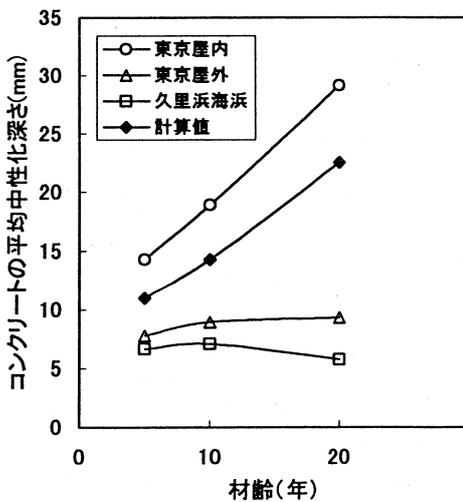


図 8.6 中性化深さと材齢

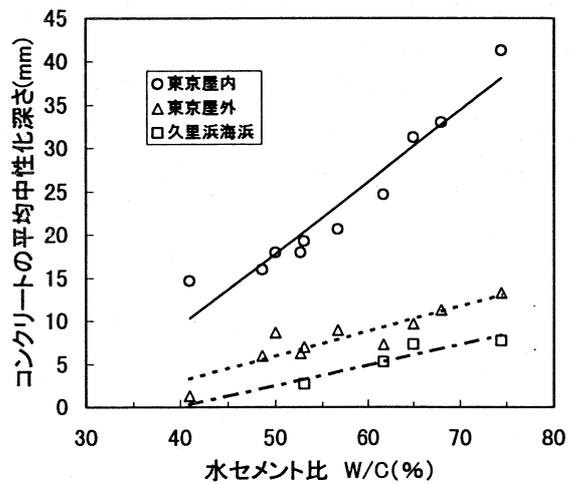


図 8.7 水セメント比と中性化深さ (暴露材齢 20 年)

F-56	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢 10 年最終報告	2010 年
------	--	--------

F-56 では、各種低発熱セメントを用いたコンクリートの鉄筋腐食抵抗性を評価するために、10 年の長期暴露試験を行い報告している。

}	【試験条件】 JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」と同等の試験	・試験材齢	5 年, 10 年
	【要因】	・暴露環境	4 箇所 酒田感潮, 久里浜感潮, 久里浜海浜, 東京屋上
	・セメントの種類	10 種類	NC : 普通ポルトランドセメント
	MC : 中庸熱ポルトランドセメント	LC : 低熱ポルトランドセメント	NBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (NC ベース)
	MBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (MC ベース)	LBB : 高炉スラグ微粉末 50% 混合 (LC ベース)	FC : フライアッシュ II 種 30% 混合 (NC ベース)
	FCN : フライアッシュ III 種 30% 混合 (NC ベース)	LP : 石灰石微粉末 30% 混合 (NC ベース)	NBF : フライアッシュ混合高炉セメント
	・水セメント比	3 水準	40%, 50%, 60%
	・養生期間	2 種類	28 日, 91 日

水結合材比 50 % , 前養生期間 28 日における材齢と中性化深さの関係を図 8.8 に示す。中性化深さは、いずれのセメントについても、東京屋外部 > 久里浜海浜部 > 酒田感潮部 > 久里浜感潮部の順になった。感潮暴露では、海水中に浸漬されるため、ほとんど中性化は認められなかった。東京屋外部の方が久里浜海浜部より中性化深さが大きくなった理由としては、東京の年平均相対湿度が約 60 % に対して久里浜の年平均相対湿度が約 79 % であり、東京屋外部の方が乾燥していること、久里浜海浜部では水分を含んだ飛来塩化物が供試体表面部へ付着することで炭酸ガスの侵入が抑制されたこと等によると考えられる。全般に、材齢の平方根と中性化深さの関係は比例関係を示したが、東京屋外部において高炉スラグセメント系では、材齢 5 年から 10 年にかけての中性化深さの増加量が、材齢 5 年までの増加量に比べ大幅に大きくなった。

ポルトランドセメント系で比較した場合、中性化深さは、NC が最も小さくなったものの、その差は 1mm 程度であり、セメント種類間で大差がないと判断される。ポルトランドセメント系と混合セメント系を比較した場合、混合セメント系の方が中性化深さは大きくなった。この理由としては、ポルトランドセメント量の減少により水酸化カルシウムの生成量が減少したことや高炉スラグやフライアッシュの水和反応により水酸化カルシウムが消費されたこと等によるものと考えられる。

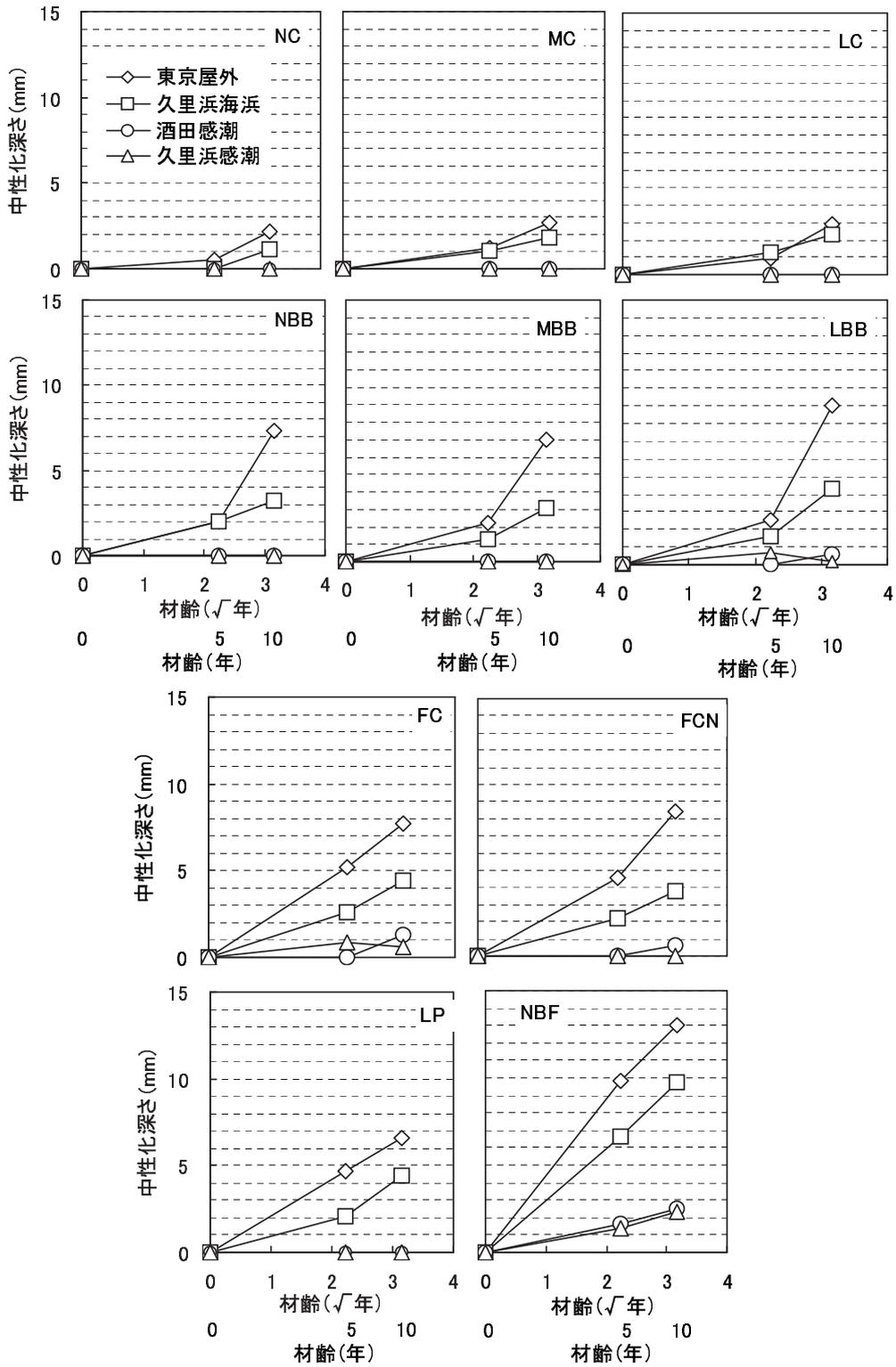


図 8.8 材齢と中性化深さ (水結合材比 50 % , 前養生期間 28 日)

9 凍害

9.1 各種要因の影響

9.1.1 セメントの種類および水セメント比

F-55	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究	2008年
------	----------------------------	-------

F-55 では、標準養生におけるコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすセメントの種類の影響について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」準拠	
		・凍結融解サイクル数	300回
		・スランプ	12.0 ± 1.5cm
		・空気量	4.5 ± 0.5%
		・養生条件	材齢 28 日まで標準水中養生（Lのみ 56 日追加）
	【要因】	・セメントの種類	5種類
			N : 普通ポルトランドセメント
			H : 早強ポルトランドセメント
			M : 中庸熱ポルトランドセメント
			L : 低熱ポルトランドセメント
		BB : 高炉セメント B 種	
	・水セメント比	3水準	45% , 55% , 65%

凍結融解を 300 サイクル行った後の試験結果をもとに、セメントの種類と相対動弾性係数および質量減少率を図 9.1，凍結融解開始時の圧縮強度と相対動弾性係数および質量減少率との関係を図 9.2 に示すこれにより、質量減少率は、試験開始時の圧縮強度が供試体表面のスケーリングに対して直接的に現れた結果となった。相対動弾性係数は、水セメント比 55%、65% において、いずれのセメントにおいても、相対動弾性係数は 70% 以上、水セメント比 55% では 80% 以上を満足することが確認され、所定の空気量が連行されていれば、セメントの種類によらず十分な抵抗性を確保できることが確認された。

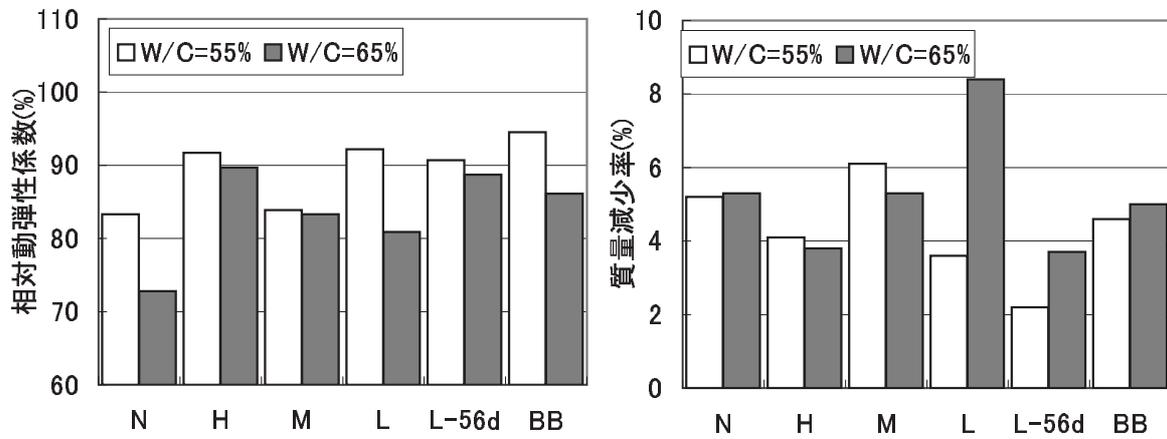


図 9.1 セメントの種類と相対動弾性係数および質量減少率

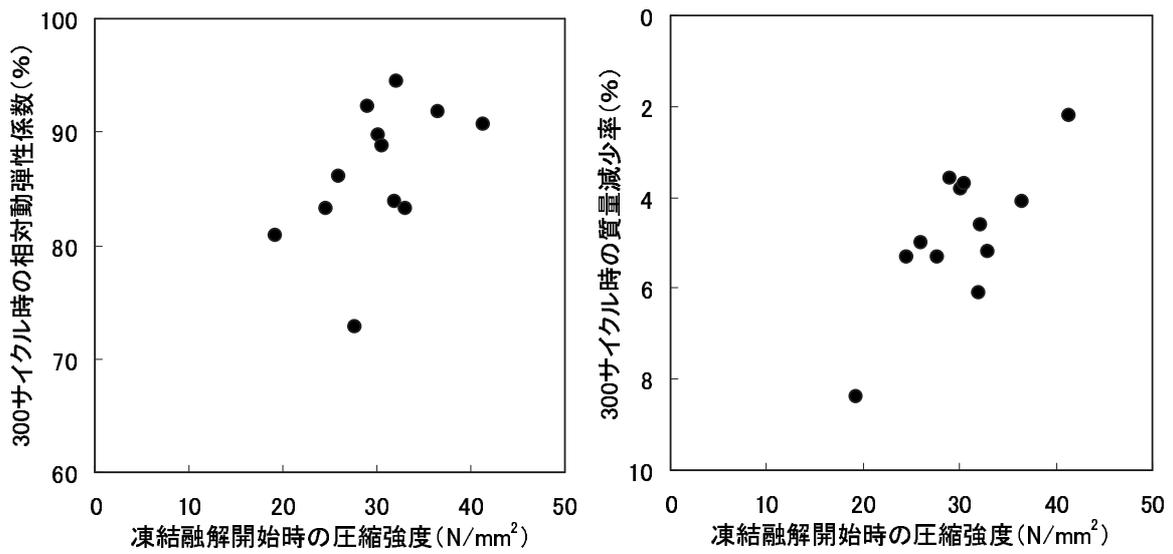


図 9.2 凍結融解開始時の圧縮強度と相対動弾性係数および質量減少率

9.1.2 初期の乾燥

F-38	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響	1985 年
------	-------------------------	--------

F-38 では、セメントの種類に加え、初期の乾燥がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響について報告している。

{	【試験条件】	JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」準拠	
		・凍結融解サイクル数	300 回
		・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
		・水セメント比	50%
		・スランプ	8.0 ± 1.5cm
		・空気量	4.5 ± 0.5%
		・養生条件	乾燥開始までは型枠内で封緘養生した後、材齢 28 日まで所定の乾燥条件下に置く。その後、7 日間水中浸漬し試験開始。
	【要因】	・乾燥開始材齢	3 水準 2 日、3 日、7 日
		・乾燥条件	3 条件 温度 20℃、水中（乾燥無し） 温度 20℃、湿度 35%RH 温度 20℃、湿度 65%RH
		・セメントの種類	4 種類 N、H、BB、FB

初期の乾燥条件と相対動弾性係数の関係を図 9.3 に、初期の乾燥条件と質量減少率との関係を図 9.4 に示す。質量減少率は、混合セメントを用いたものが平均的に大きく、乾燥を受けた場合に混合セメントの表層部分が多孔化したことによる影響と言える。相対動弾性係数は、いずれのセメントの種類や初期の乾燥条件のものも 90 % 以上であり、初期乾燥によって耐久性が著しく損なわれることはない。むしろ、一時的な乾燥によって供試体内部の飽水度が低下するため、乾燥条件の厳しいものほど相対動弾性係数が大きくなる傾向が見られた。しかしながら、耐久性を確保するためには、適切な養生を実施し、初期乾燥を防いで内部組織を十分に緻密化させることが必要となることは言うまでもない。

土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、凍害の気象条件が激しい環境においてコンクリートに要求される相対動弾性係数の最小限界値 (E_{min}) を、連続してあるいはしばしば水に飽和される場合（部材断面が薄い場合を除く）には 70%、普通の露出状態にある場合には 60% としている。F-55 および F-38 より、いずれのセメントの種類を用いた場合でも、また初期に乾燥を受けても所定の空気量を連行することで十分な凍結融解抵抗性を有するコンクリートを得られることが確認された。

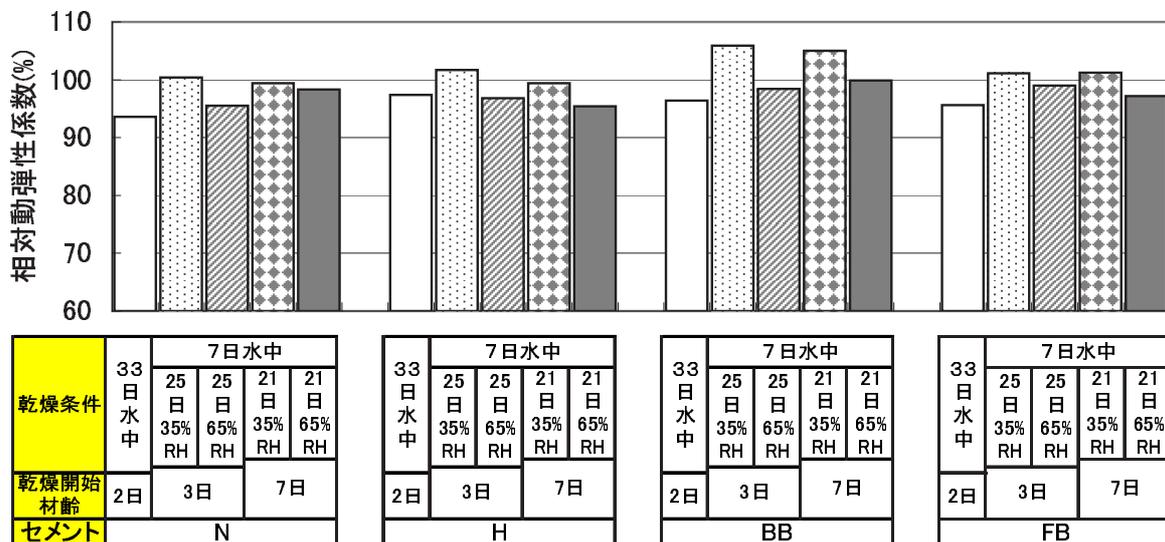


図 9.3 初期の乾燥が凍害抵抗性（相対動弾性係数）に及ぼす影響

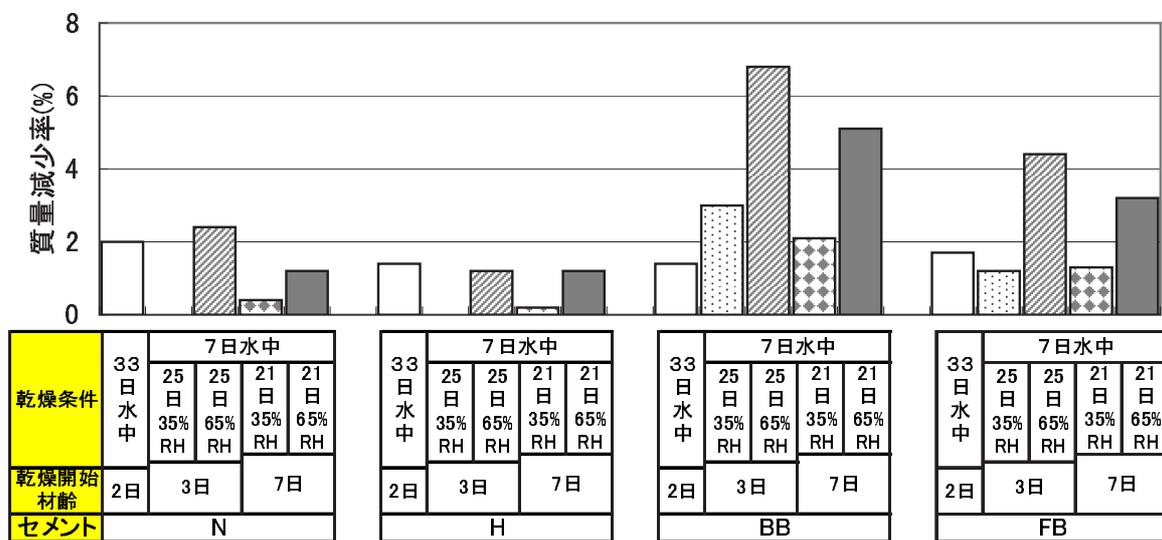


図 9.4 初期の乾燥が凍害抵抗性（質量減少率）に及ぼす影響

9.2 長期暴露

F-54	寒冷地に暴露した AE コンクリートの耐凍害性-材齢 20 年報告-	2008 年
------	------------------------------------	--------

F-54 では、寒冷地に長期暴露したコンクリートの耐凍害性を調査するため、凍害劣化度の異なる釧路、盛岡、酒田、東京（図 9.5）の 4 箇所を選定して、コンクリート供試体（10 × 10 × 40cm）による 20 年の長期暴露実験を行い報告している。

【試験条件】	JIS A 1127 「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数， 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」準拠	
	・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
【要因】	・空気量	4.5 ± 0.5%
	・養生条件	材齢 28 日まで標準水中養生
	・暴露場所	4 箇所 釧路，盛岡（凍害を受けやすい） 酒田（中庸），東京（凍害を受けにくい）
	・水セメント比	2 水準 50%，60%
	・スランプ	2 水準 8.0 ± 1.5cm，18.0 ± 1.5cm

暴露環境は、写真 9. 1 のように凍結融解を受けやすい場所を選定し気中暴露（図中”気中”）としたが、材齢 5 年を経て顕著な差が生じなかったため、供試体 3 本中 1 本の供試体を雨水の溜まる水槽に浸漬させ含水の高い状態で暴露（図中”浸漬”）した。なお、図中記号は、水セメント比，スランプの順で wc50s8（水セメント比 50%，スランプ 8cm の場合）のように表記する。

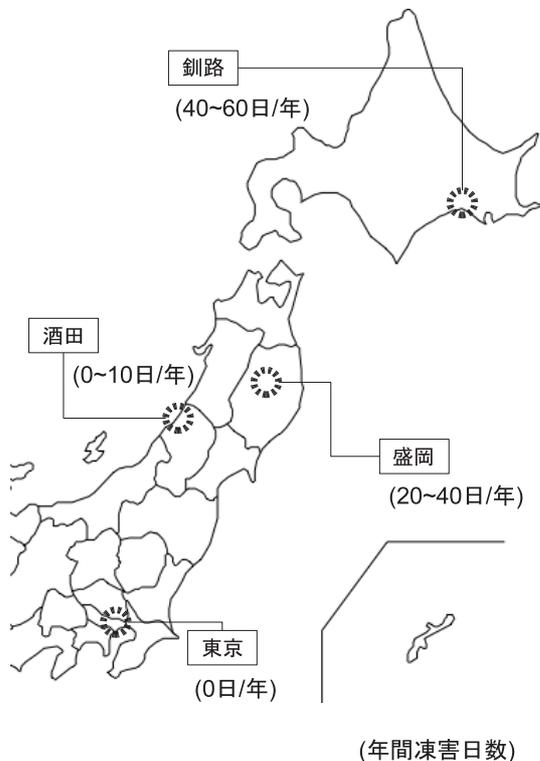


図 9.5 凍害調査の暴露地



材齢5年まで



材齢5年以降

写真 9. 1 暴露状況

凍害危険度の異なる4箇所に20年間暴露を行い調査した、相対動弾性係数の経年変化(たわみ振動)を図9.6に、質量の経年変化を図9.7に示す。

図9.6より、すべての暴露地、配調合で、相対動弾性係数の低下は認められず、凍結融解による劣化の兆候は確認されなかった。相対動弾性係数の経年変化が小さい為、暴露地や配調合による明確な傾向は見受けられなかった。また、水に浸漬させた供試体も相対動弾性係数の低下は認められず劣化の兆候は確認されなかった。なお、浸漬後に一次共鳴振動数が若干増加しており、浸漬による供試体への影響が確認された。

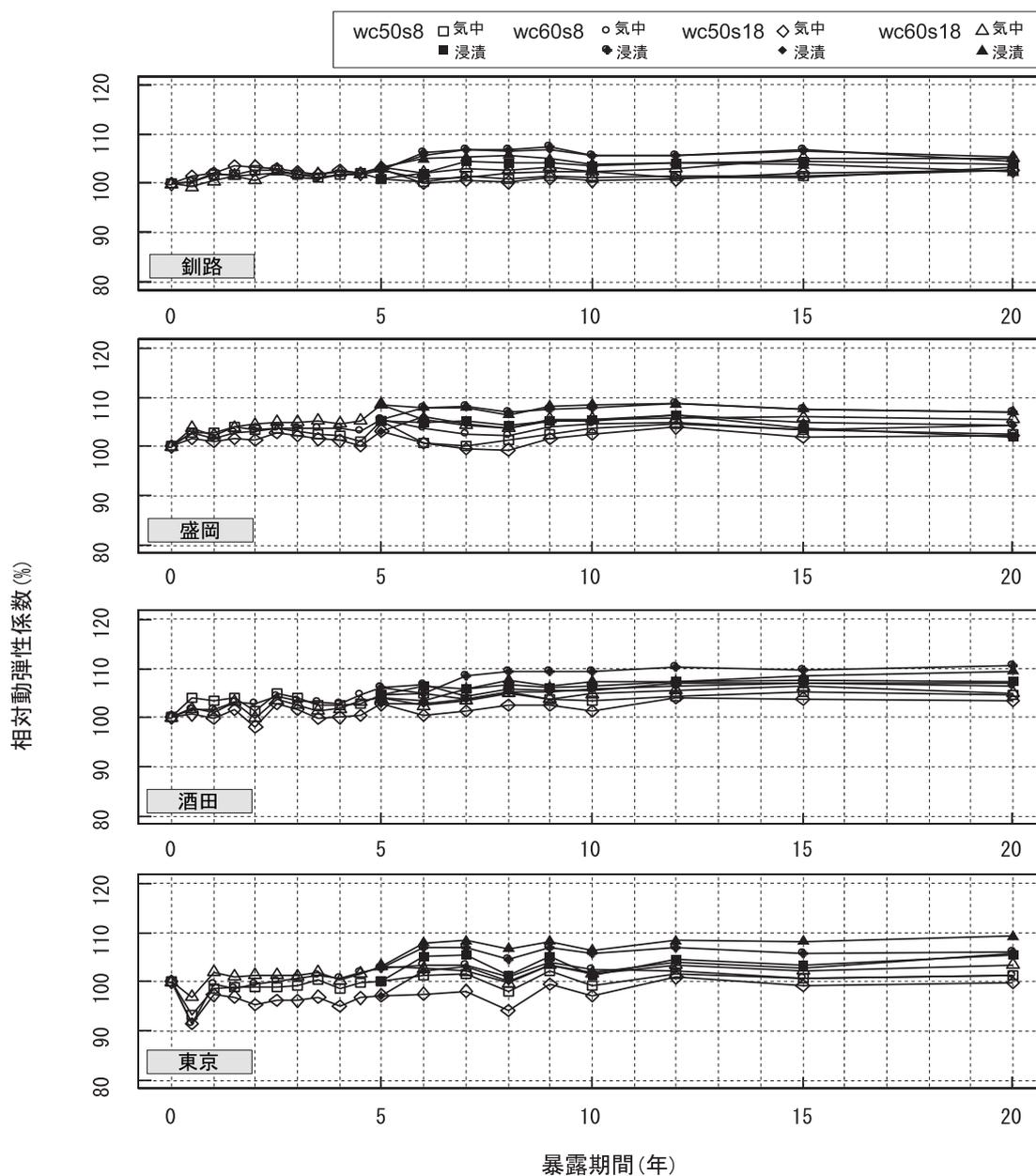


図 9.6 相対動弾性係数の経年変化 (たわみ振動)

図 9.7 より、何れの供試体も、暴露開始初期は乾燥により質量は大きく減少するが、その後は長期にわたり緩やかに減少している。長期にわたる質量の減少はペースト分の剥離などが影響していると考えられるが、極端な質量の減少は生じておらず、スケーリングなど凍害劣化の兆候は確認されなかった。浸漬させた供試体では、浸漬後に質量が増加していることから、高い含水状態におかれより厳しい環境で暴露された事が確認された。しかし、その後の暴露でも気中暴露と同様に凍結融解による劣化の兆候は確認されなかった。

以上より、凍害を受け易い環境下においても、所定の空気量を連行した AE コンクリートは十分な耐凍害性を有することが 20 年間の長期暴露実験結果により確認された。

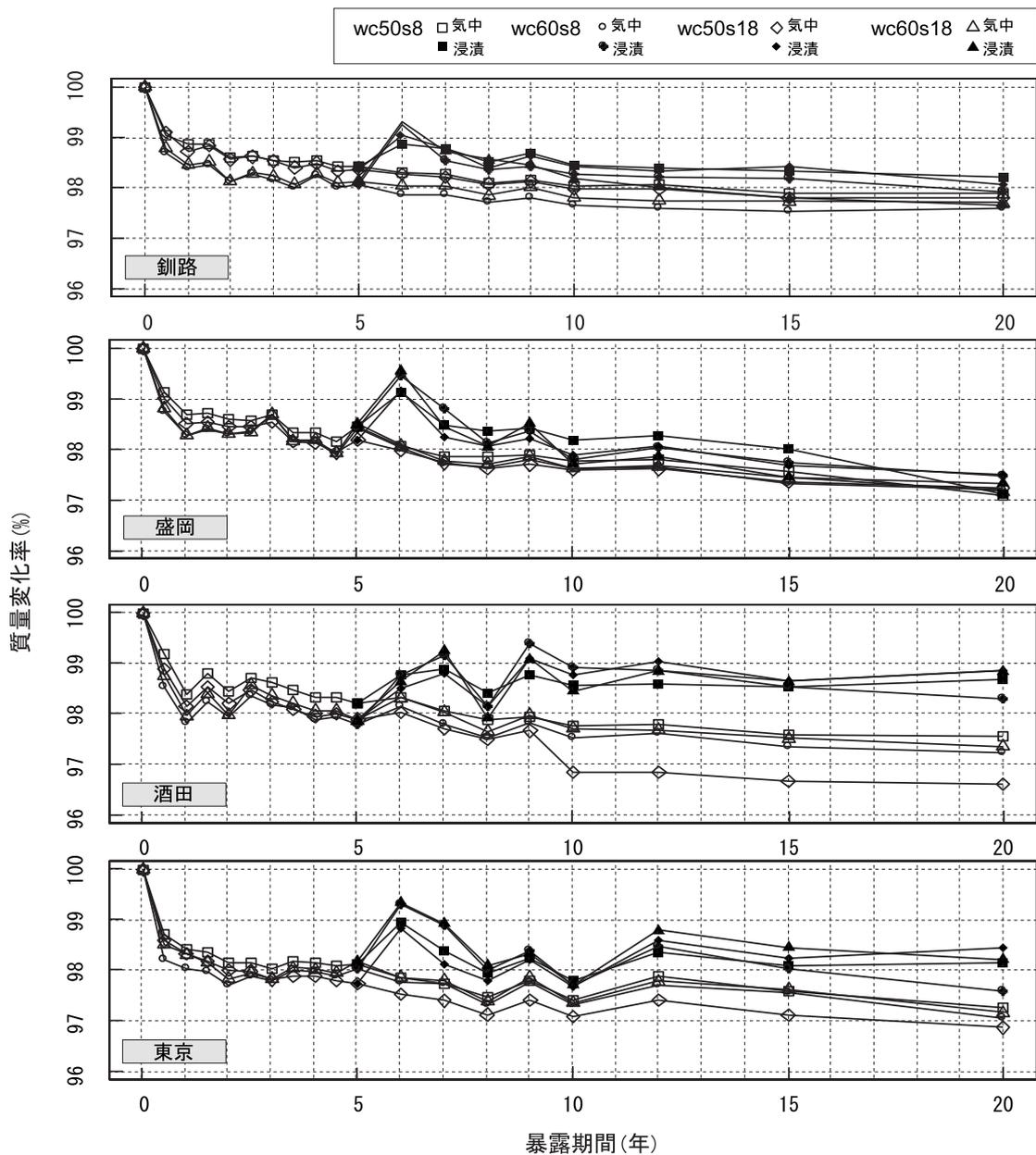


図 9.7 質量の経年変化

10 アルカリ骨材反応

10.1 各種要因の影響

10.1.1 骨材の種類

C-4	アルカリ骨材反応に関する共同研究	1987年
-----	------------------	-------

C-4では、昭和58年にアルカリ骨材反応に関する共同試験を実施し、7種類の粗骨材の岩石種、構成鉱物の調査を行い、アルカリシリカ反応性について報告している。

(1) 化学法による骨材の潜在反応性試験

ASTM C 289-81 に準拠し、化学法による骨材の潜在反応性試験を実施した。結果を図 10.1 に示す。骨材Nを除き、いずれも「潜在的有害」または「有害」と判定される。

(2) 粉末X線回折法による構成鉱物の調査

各骨材の粉末X線回折結果を表 10.1 に示す。安山岩からなるA～Eには、ガラス相、クリストバライトあるいはトリディマイトが、またスレート、チャートおよび砂岩からなるFには多量の石英が含まれていた。

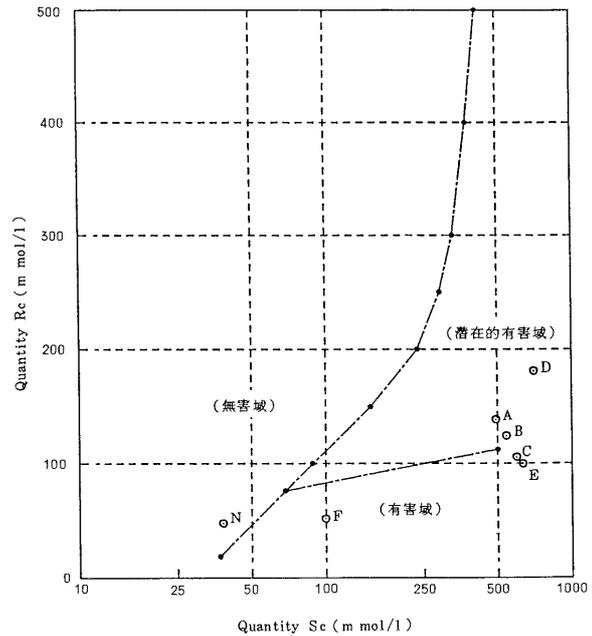


図 10.1 ASTM の判定区分による判定結果

表 10.1 使用骨材の粉末X線回折法結果

鉱物		骨材						
		A	B	C	D	E	F	N
シリカ 鉱物	石英	△	○	△	○	○	◎	◎
	トリディマイト	-	○	○	-	○	-	-
	クリストバライト	△	△	△	○	△	-	-
長石	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
輝石	○	△	△	○	△	-	-	
雲母	-	-	-	-	-	△	△	
緑泥石	-	-	-	-	-	△	△	
りん酸処理残渣量(%)		9	16	14	20	18	66	34

最大回折強度 ◎：強 (2,500 cps 以上)
 ○：中程度 (2,500~1,000 cps)
 △：弱 (1,000 cps 以下)
 -：不検出

(3) モルタルバー法による骨材の膨張試験

{	【試験条件】	ASTM C 227 準拠		
	【要因】	・骨材	7 種類	反応性骨材 6 種類 (A ~ F) 非反応性骨材 1 種類 (N)
		・セメントのアルカリ含有量	3 水準	0.36%, 0.93%, 1.50%

ASTM C 227 に準拠し、モルタルバー法による骨材の膨張試験を実施した。試験に用いたセメントのアルカリ含有量は Na_2O 等価値で 0.36% および 0.93% の N と NaOH と KOH の試薬を加えて Na_2O 等価値で 1.5% に調整したものを使用した。また、反応性骨材のペシマム現象を調べるために、7 種類の骨材を単独で使用したものおよび 6 種類の反応性骨材に非反応性骨材を重量比で 60:40, 30:70 に混合したケースも追加した。結果は以下の通りである。

セメントのアルカリ含有量 0.36% においては、単独の骨材及び混合した骨材による供試体とも材齢 6 か月のモルタルバー膨張率は 0.10% 以上に達せず有害なアルカリシリカ反応を引起こす可能性のある骨材はないと判定された。

セメントのアルカリ含有量 0.93% においては、反応性骨材 A, B, C による供試体は材齢 6 か月において膨張率 0.10% 以上となり、これらの骨材は有害なアルカリシリカ反応を引起こす可能性ありと判定された。しかし、反応性骨材 D, E による供試体は材齢 6 か月においても膨張率 0.10% に達せず、有害なアルカリシリカ反応を引起こす可能性はないと判定された。また、骨材 A ~ E では反応性骨材と非反応性骨材 N の比が 30 : 70 において、反応性骨材だけをを用いた場合より膨張率が大きくなり、ペシマム現象が認められた。反応性骨材 F を単独で使用した供試体及び非反応性骨材 N を混入した供試体はいずれも材齢 6 か月では膨張率が 0.10% に達せず、アルカリシリカ反応を起こす可能性がないと判定された。

アルカリ量を 1.50% に調整した場合には、反応性骨材 A ~ F の全てが材齢 6 か月において、膨張率 0.10% 以上となり、骨材は有害なアルカリシリカ反応を引起こす可能性ありと判定された。骨材 A, D, F を用いた供試体においては反応性骨材と非反応性骨材 N の比が 60 : 40 において、また骨材 B, C, E を用いた供試体においては 30 : 70 において膨張率が最大となりペシマム現象が認められた。また、非反応性骨材 N のみによる供試体はアルカリ量が 1.50% の場合でも有害なアルカリ反応を引起こす可能性はないと判定された。

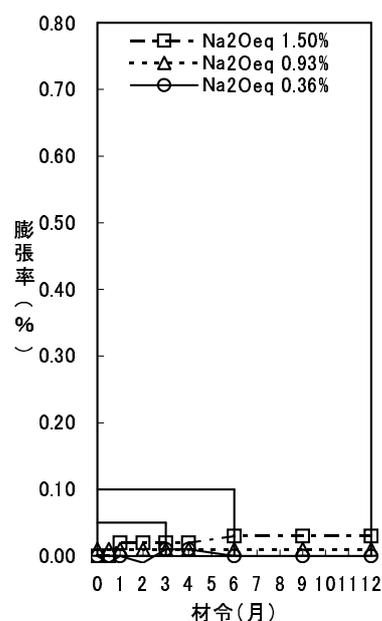


図 10.2 非反応性骨材 N のモルタルバー膨張率

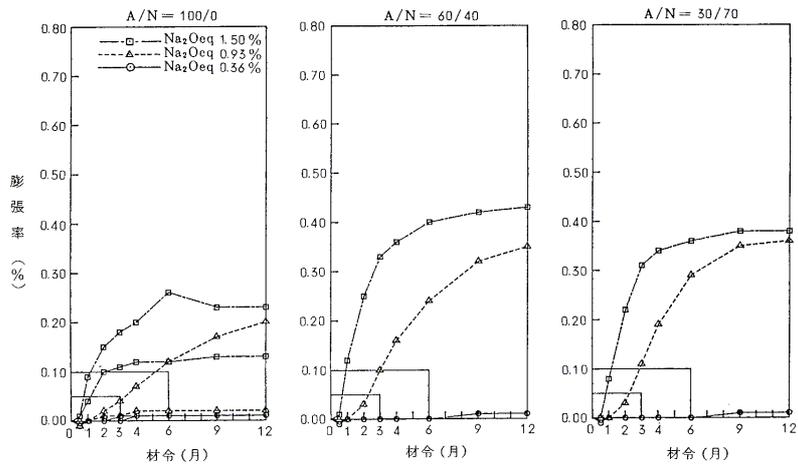


図 10.3 反応性骨材 A のモルタルバー膨張率

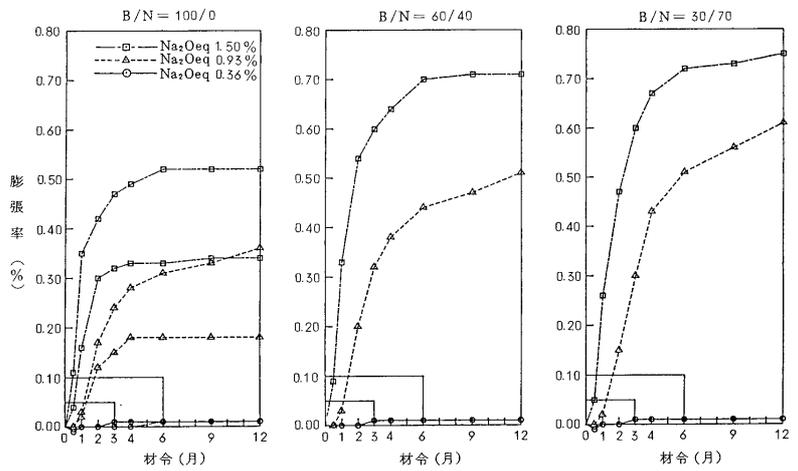


図 10.4 反応性骨材 B のモルタルバー膨張率

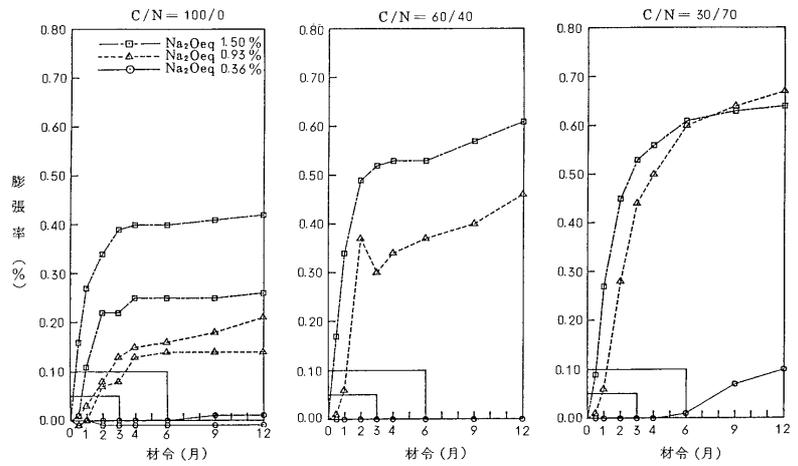


図 10.5 反応性骨材 C のモルタルバー膨張率

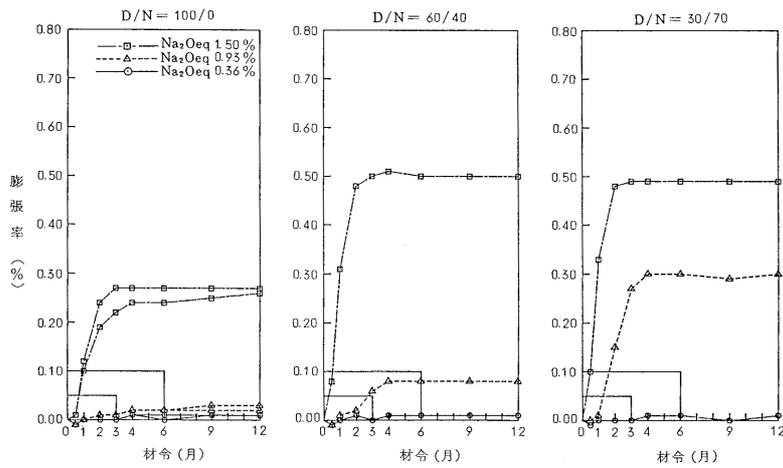


図 10.6 反応性骨材 D のモルタルバー膨張率

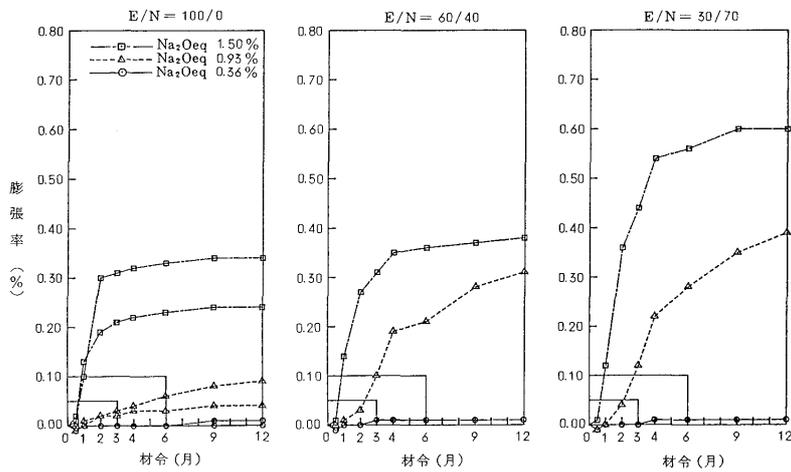


図 10.7 反応性骨材 E のモルタルバー膨張率

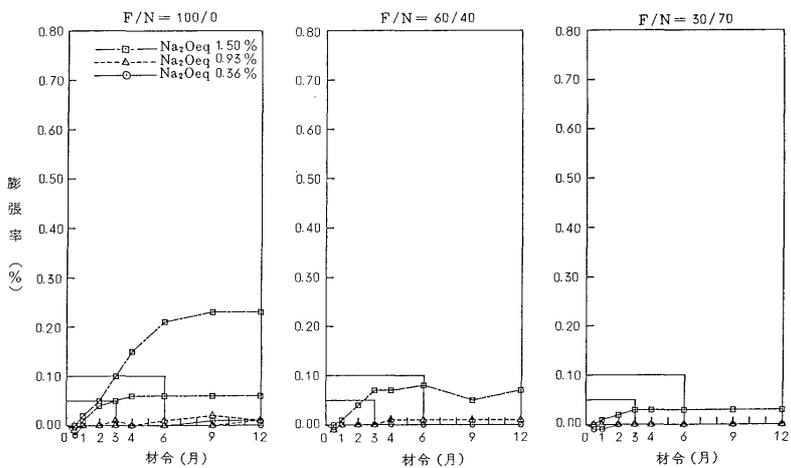


図 10.8 反応性骨材 F のモルタルバー膨張率

10.1.2 総アルカリ量

F-42	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究 (その 1)	1988 年
------	--------------------------------------	--------

F-42 では、アルカリシリカ反応に影響を及ぼす各種条件を明らかにすることを目的に、骨材の種類、反応性骨材の混合率および総アルカリ量の検討を行い報告している。

{	【試験条件】	ダイヤルゲージ法により供試体の長手方向の長さ変化を測定
		・セメントの種類 N：普通ポルトランドセメント
		・養生条件 2 日脱型後，1 週間封緘養生
		・暴露環境 40 湿空下
	【要因】	・骨材 7 種類 反応性骨材 6 種類 (A ~ F) 非反応性骨材 1 種類 (N)
		・総アルカリ量 9 水準 1.08kg/m ³ , 1.62kg/m ³ , 2.16kg/m ³ 2.79kg/m ³ , 4.18kg/m ³ , 4.50kg/m ³ 5.58kg/m ³ , 6.75kg/m ³ , 9.00kg/m ³
		・反応性骨材の混合率 3 水準 30% , 60% , 100%

(1) 総アルカリ量と膨張量の関係

コンクリートの総アルカリ量と膨張量の関係に関して、図 10.9 に 40 湿空環境下の結果を示す。反応性骨材を使用したコンクリートの膨張は、コンクリートの総アルカリ量に支配されるが、骨材種類によって膨張量が相違することが明らかになっている。

(2) 反応性骨材混合率と膨張量の関係

反応性骨材混合率と膨張量の関係に関して、図 10.10 に結果を示す。総アルカリ量が多い場合には、反応性骨材の混合率が高いほど膨張量は大きくなるが、総アルカリ量が低下するに従いペシマム混合率が認められる。ただし、総アルカリ量によっては、ペシマム混合率が存在する骨材とペシマム混合率が認められない骨材があり、アルカリシリカ反応性を試験する場合、骨材単品だけでなく、実際に使用する混合比率で行う必要があると考えられる。

(3) ひび割れの発生時期

図 10.11 に総アルカリ量とひび割れ発生日数の関係を、図 10.12 にひび割れ発生時の膨張量の度数分布を示す。ひび割れ発生時期は総アルカリ量が多いもののほうが早くなり、ひび割れ発生時の平均膨張量は 0.065% となった。また、平均膨張率を 0.065% としたときのひび割れ限界総アルカリ量を表 10.2 に示す。ひび割れ限界総アルカリ量は最も少ないもので 3.6kg/m³ となること分かる。

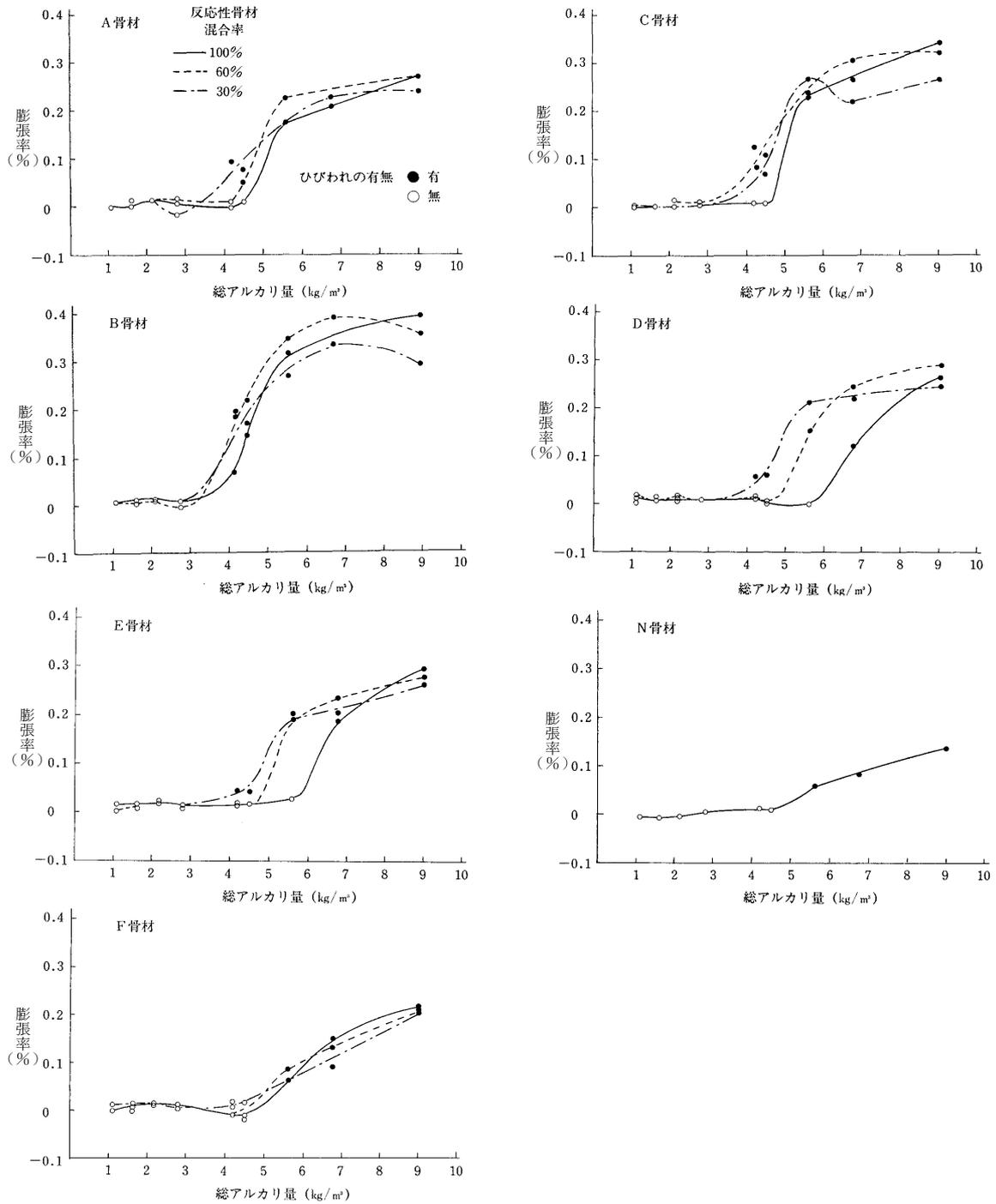


図 10.9 40 湿空におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張量

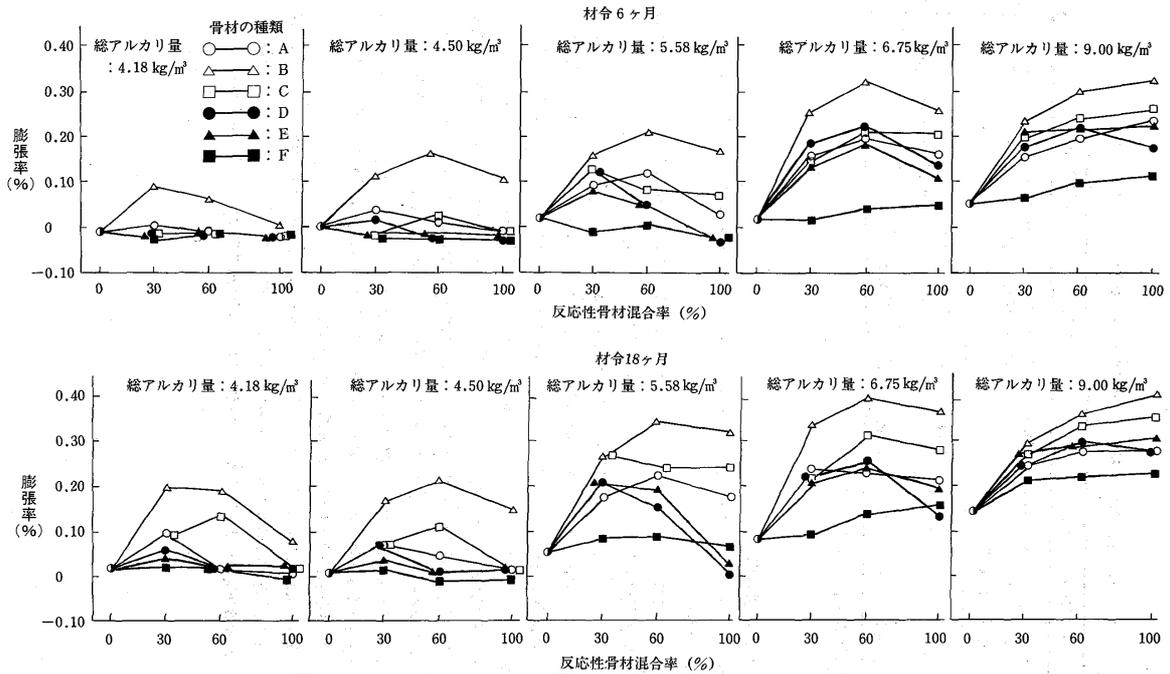


図 10.10 反応性骨材混合率と膨張量 (40 湿空)

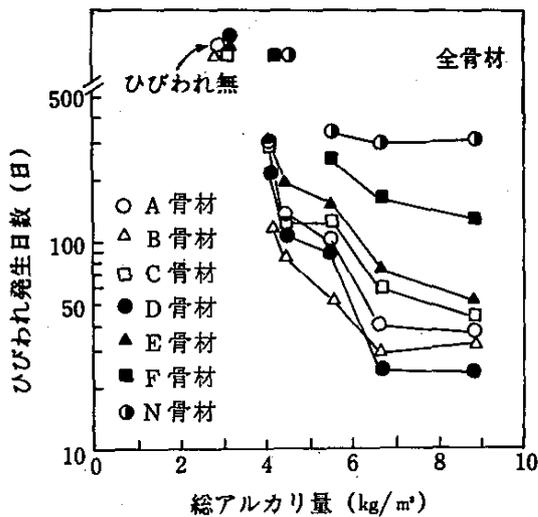


図 10.11 総アルカリ量とひび割れ発生日数 (40 湿空)

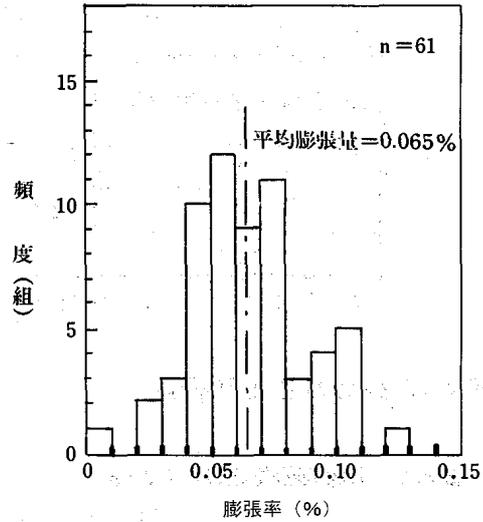


図 10.12 ひび割れ発生時の膨張量の度数分布

表 10.2 反応性骨材混合率別のひび割れ限界総アルカリ量 (40 湿空)

反応性骨材混合率 (%)	反応性骨材種類					
	A	B	C	D	E	F
30	4.1	3.6	4.3	4.4	4.6	5.5
60	4.6	3.6	3.9	5.1	4.9	5.2
100	4.9	4.1	4.8	6.3	6.0	5.6

注) N骨材のひびわれ限界総アルカリ量: 5.7 kg/m^3 (kg/m³)

10.1.3 暴露環境

F-42	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究 (その 1)	1988 年
F-43	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究 (その 2)	1989 年

アルカリシリカ反応に及ぼす暴露環境条件の影響を調査するために、F-42 で検討した 40 湿空という条件に加えて、F-43 では屋外暴露および 20 海水反復浸漬条件下に暴露した場合の膨張特性を検討し報告している。

{	【試験条件】	ダイヤルゲージ法により供試体の長手方向の長さ変化を測定	
		・セメントの種類	N：普通ポルトランドセメント
		・養生条件	2 日脱型後，1 週間封緘養生
	【要因】	・暴露環境	3 条件 40 湿空 屋外暴露 20 海水反復浸漬条件
		・骨材	7 種類 反応性骨材 6 種類 (A ~ F) 非反応性骨材 1 種類 (N)
		・総アルカリ量	9 水準 1.08kg/m ³ , 1.62kg/m ³ , 2.16kg/m ³ 2.79kg/m ³ , 4.18kg/m ³ , 4.50kg/m ³ 5.58kg/m ³ , 6.75kg/m ³ , 9.00kg/m ³
		・反応性骨材の混合率	3 水準 30% , 60% , 100%

(1) 総アルカリ量と膨張率の関係

コンクリートの総アルカリ量と膨張量の関係に関して、図 10.9 に 40 湿空下の結果を、図 10.13 に屋外暴露の結果を、図 10.14 に 20 海水反復浸漬の結果を示す。反応性骨材を使用したコンクリートの膨張は、コンクリートの総アルカリ量に支配されるが、骨材種類によって膨張量が相違することが明らかになっている。暴露環境で比較すると、40 湿空の場合に比べ、屋外暴露では 0.1 ~ 0.15%、20 海水反復浸漬では 0.1 ~ 0.2% 膨張量が小さい。

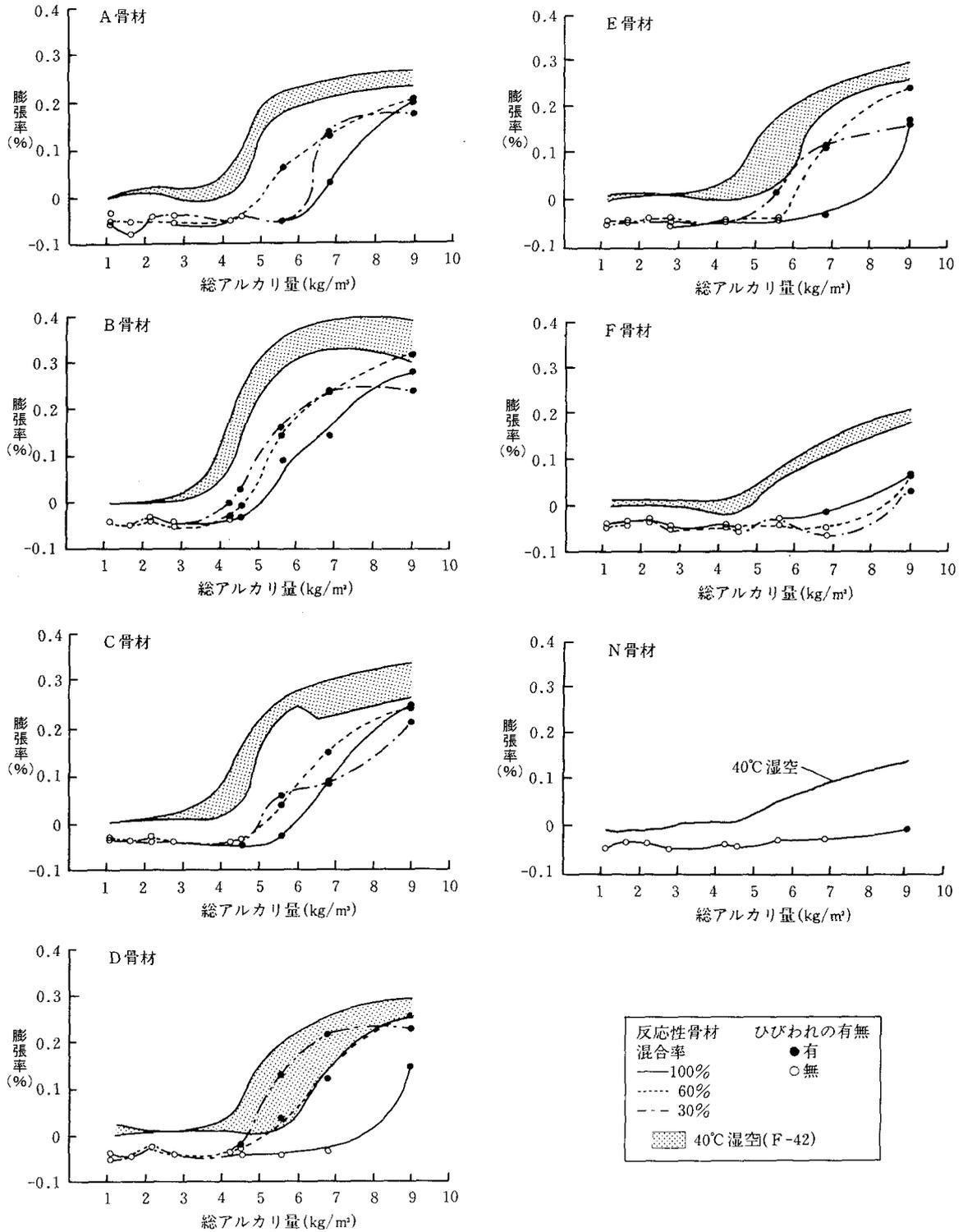


図 10.13 屋外暴露におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率

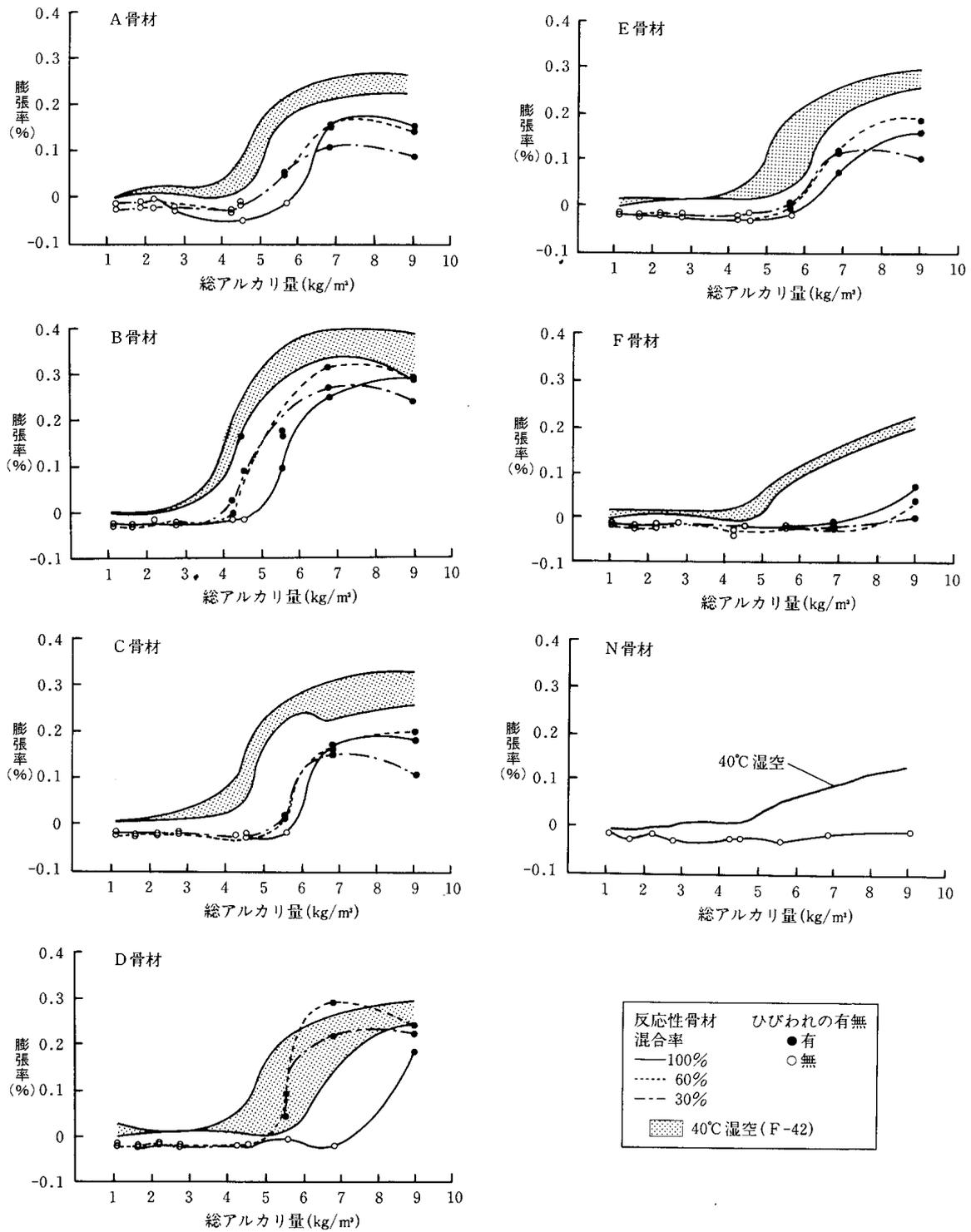


図 10.14 20 海水反復浸漬におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率

(2) 反応性骨材混合率と膨張率の関係

反応性骨材混合率と膨張率の関係に関して、暴露環境別の結果を図 10.15 に示す。暴露条件が相違しても、40℃ 湿空の場合と同様の傾向を示し、反応性骨材の混合率が高いほど膨張率は大きくなるが、総アルカリ量が低下するに従いペシマム混合率が認められた。ただし、総アルカリ量によっては、ペシマム混合率が存在する骨材とペシマム混合率が認められない骨材があり、アルカリシリカ反応性を試験する場合、骨材単品だけでなく、実際に使用する混合比率で行う必要があることが分かる。

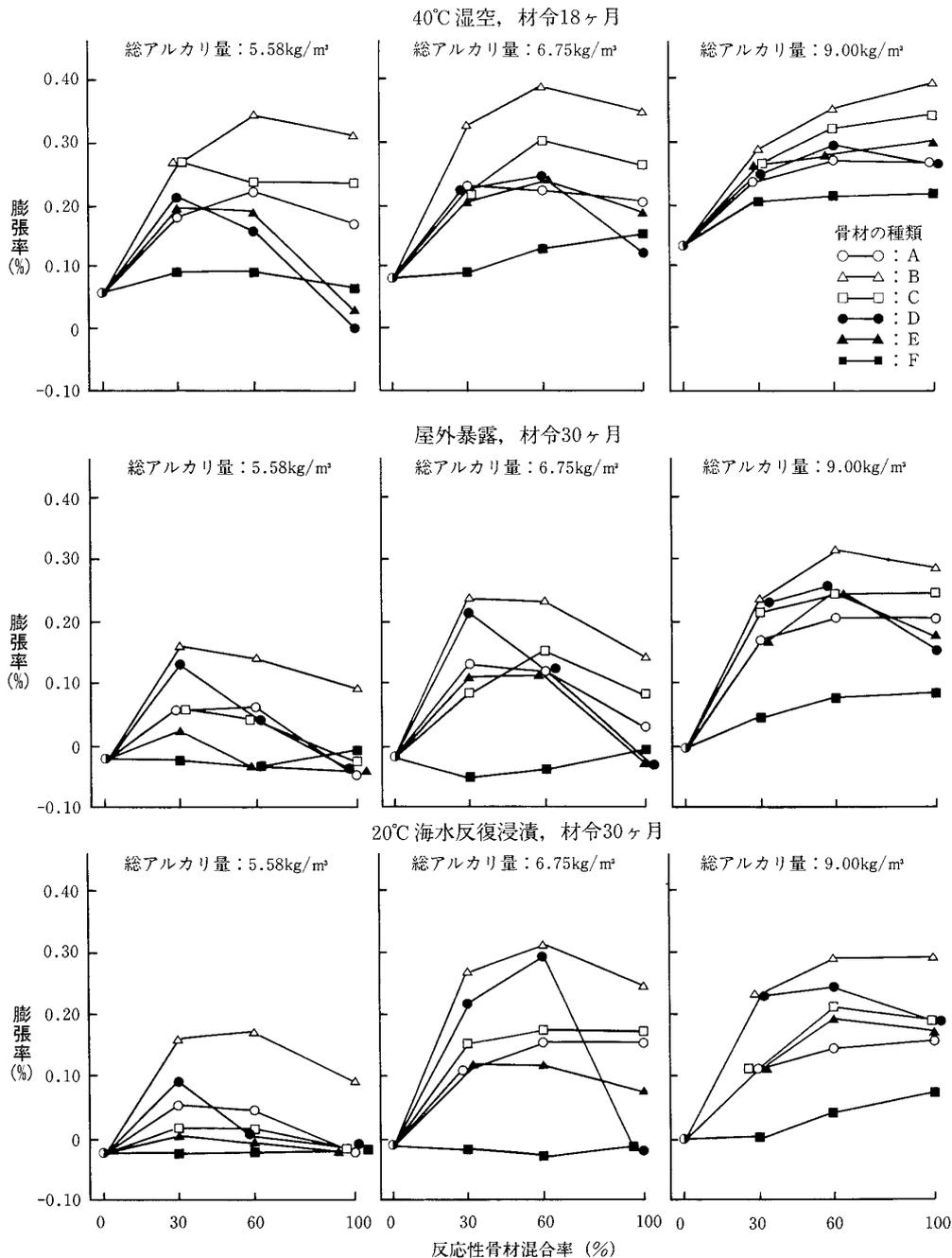


図 10.15 暴露条件別の反応性骨材混合率と膨張率

(3) ひび割れの発生時期

総アルカリ量とひび割れ発生日数の関係について図 10.11 に 40℃ 湿空下の結果を，図 10.16 に屋外暴露と 20℃ 海水反復浸漬の結果を示す。ひび割れ発生時期は 40℃ 湿空の場合と同様に，総アルカリ量が多いもののほうが早くなっている。しかし，屋外暴露した場合のひび割れ発生時の平均膨張量は，アルカリ骨材反応による膨張が乾燥収縮率に相殺されるため表 10.3 に示すように-0.003%と小さくなる。また，20℃ 海水反復浸漬の場合は，環境条件がそれほど厳しくないために，平均ひび割れ日数は長く，ひび割れ発生時の平均膨張率も大きくなっている。平均膨張率よりひび割れ限界総アルカリ量を算出した結果を，表 10.4 に示す。屋外暴露および 20℃ 海水反復浸漬の場合も，ひび割れ限界総アルカリ量は，最も少ないもので $5.1\text{kg}/\text{m}^3$ および $5.5\text{kg}/\text{m}^3$ であることが分かり，40℃ 湿空の結果を含め，現在のアルカリシリカ反応抑制対策方法の一つであるコンクリート中のアルカリ総量を $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に規制する方法が妥当であることが示された。

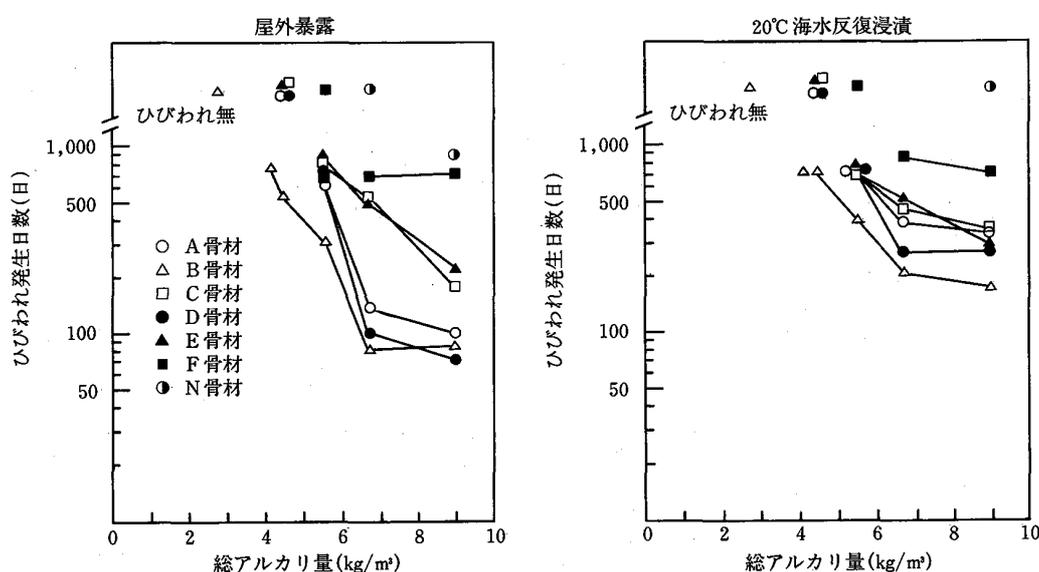


図 10.16 暴露環境別の総アルカリ量とひび割れ発生日数

表 10.3 暴露環境とひび割れ発生時期およびひび割れ発生時の平均膨張量

暴露条件	40℃湿空	屋外暴露	20℃海水反復浸漬
平均ひびわれ発生日数	93日	352日	426日
ひびわれ発生時の平均膨張量	0.065%	-0.003%	0.072%

表 10.4 暴露環境別のひび割れ限界総アルカリ量

骨材種類	40℃湿空	屋外	20℃海水反復浸漬
A	4.9	6.6	6.3
B	4.1	5.1	5.5
C	4.8	5.9	6.1
D	6.3	8.0	8.3
E	6.0	7.5	6.8
F	5.6	7.2	-

10.2 アルカリシリカ反応抑制対策

F-44	コンクリートのアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究	1989年
------	----------------------------	-------

F-44 では、アルカリシリカ反応の防止条件を検討するため、セメントの種類、単位セメント量がコンクリートの膨張量に及ぼす影響を検討し報告している。

{	【試験条件】	傾斜型マイクロメータを用い供試体の長手方向の長さ変化を測定
	・養生条件	1日脱型後、1週間封緘養生
	・細骨材	海砂
	・スランプ	12 ± 1.5cm
	【要因】	・セメントの種類 10種類
		N : 普通ポルトランドセメント
		NL : 低アルカリ形普通ポルトランドセメント
		H : 早強ポルトランドセメント
		SR : 耐硫酸塩ポルトランドセメント
		BA : 高炉セメント A 種
	BB : 高炉セメント B 種	
	BC : 高炉セメント C 種	
	FA : フライアッシュセメント A 種	
	FB : フライアッシュセメント B 種	
	FC : フライアッシュセメント C 種	
	・単位セメント量 2水準	450kg/m ³ , 600kg/m ³
	・粗骨材の種類 2種類	10.1.1 で検討した B 骨材 , F 骨材

セメントの種類と膨張量の関係を図 10.17 に、総アルカリ量と膨張の関係を図 10.18 に示す。アルカリシリカ反応性の高い骨材を用い、かつ単位セメント量の多いコンクリートでも、セメントに全アルカリの少ない低アルカリ形普通ポルトランドセメントや耐硫酸塩セメント、また高炉セメント B , C 種、フライアッシュセメント C 種を用いれば膨張の抑制に効果的であることがわかる。

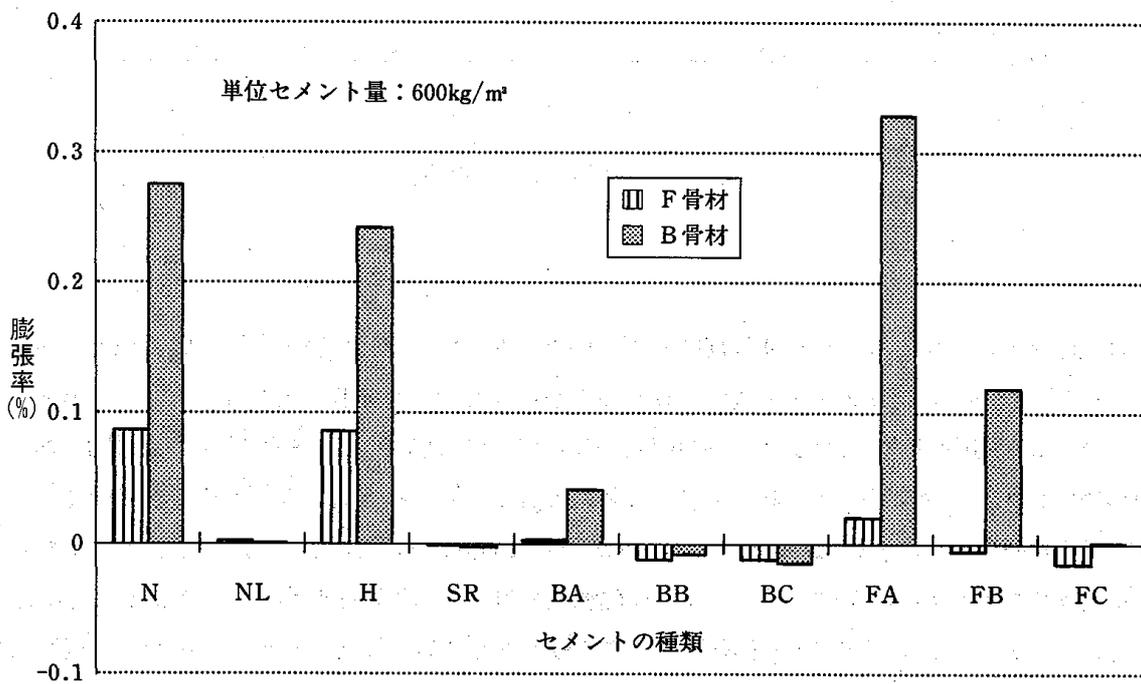
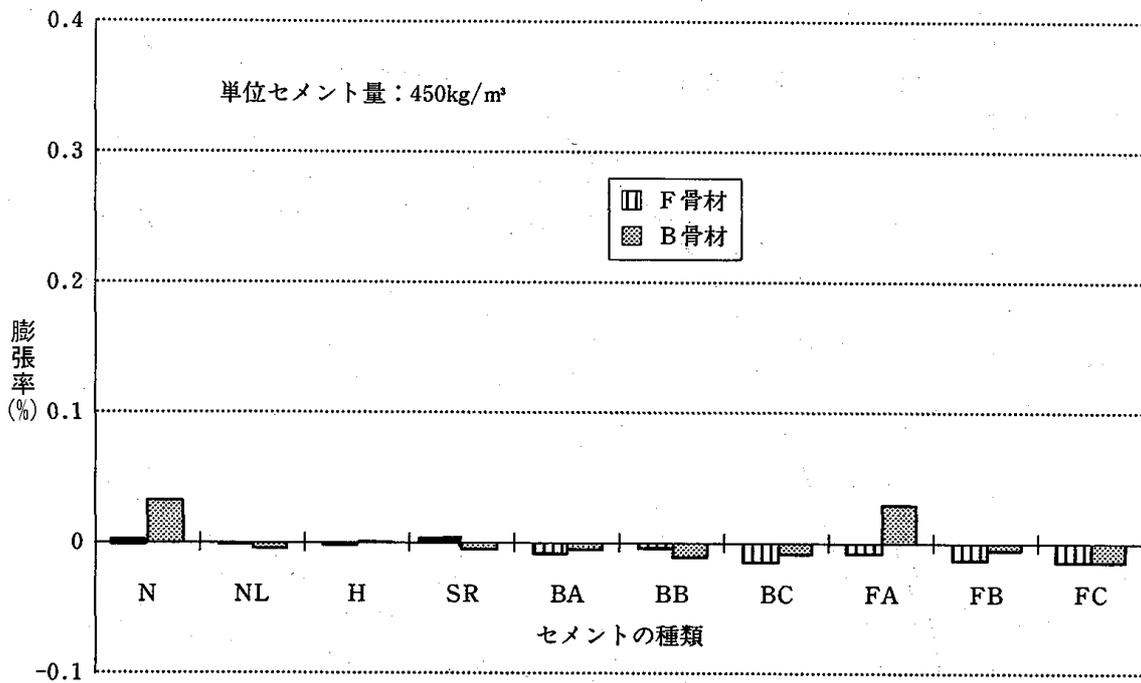


図 10.17 セメントの種類と膨張率 (材齢 18 ヶ月)

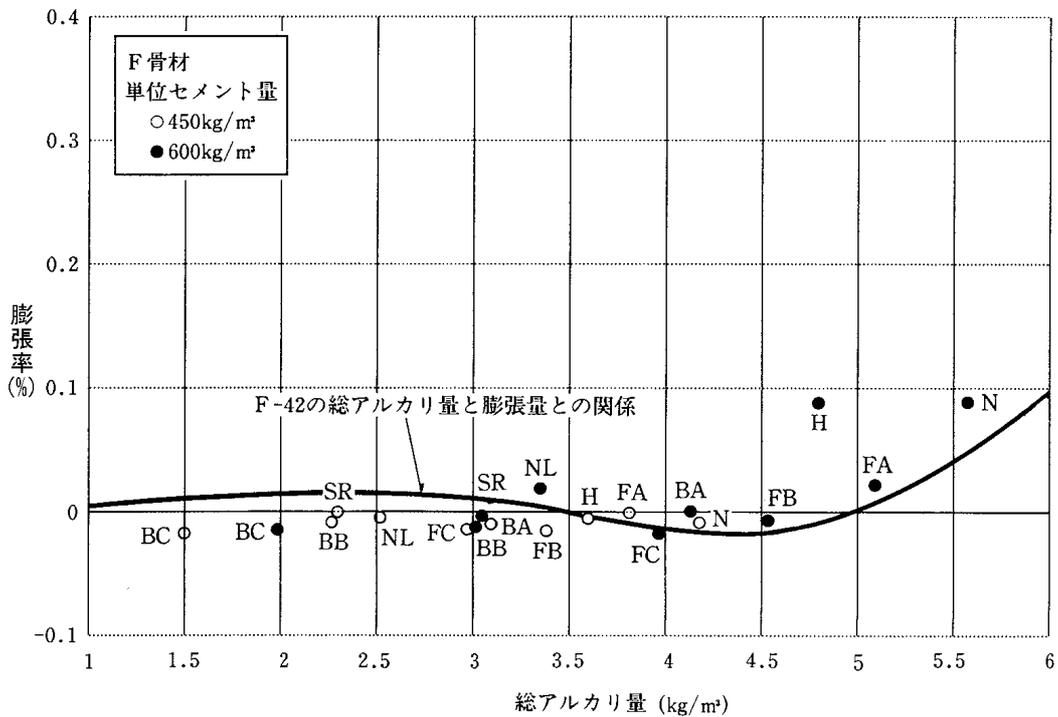
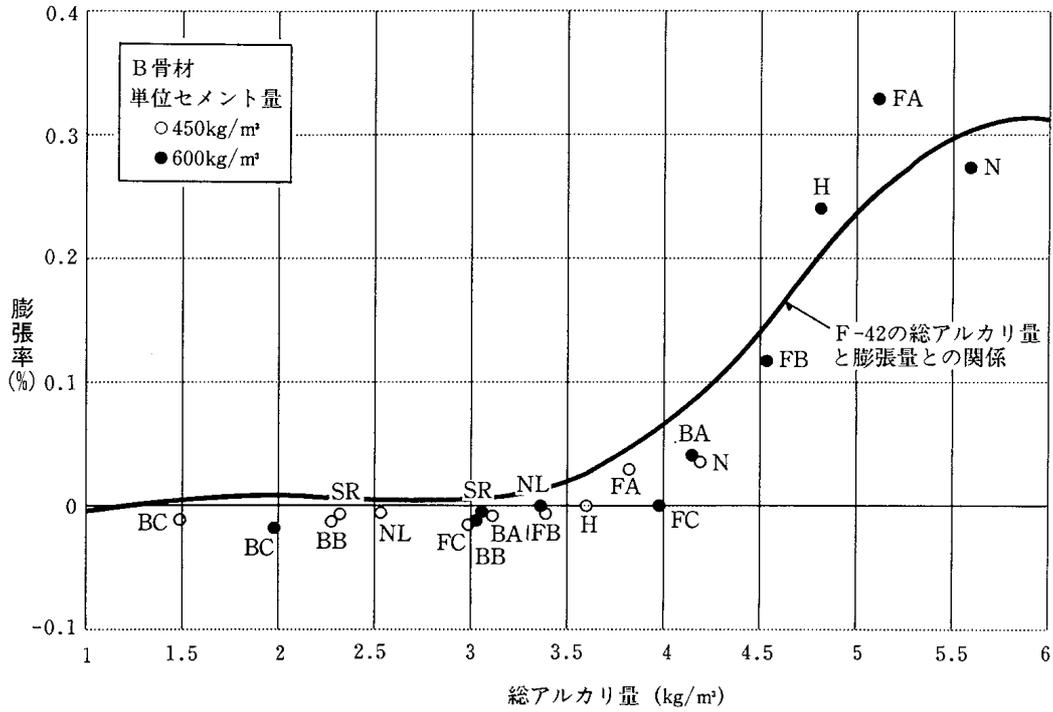


図 10.18 総アルカリ量と膨張率 (材齢 18 ヶ月)

(混合セメント中のスラグまたはフライアッシュのアルカリ量を 0 として算出した総アルカリ量)

11 高炉スラグ微粉末

11.1 混合率がコンクリートの各種特性に及ぼす影響

F-41	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究	1988年
------	-----------------------------	-------

F-41 では、高炉スラグ微粉末がコンクリート用混和材に使用される際に、セメントの種類、高炉スラグ微粉末の種類と混合率が、コンクリートの諸性質に与える影響を検討し報告している。

【試験条件】	・水セメント比	50%
	・スランプ	8.0 ± 1.5cm
	・空気量	4.5 ± 0.5%
	【要因】	
	・混合率（フライアッシュ含む）	5水準 0%, 30%, 40%, 55%, 70%
【要因】	・ベースセメントの種類	5種類 N : 普通ポルトランドセメント H : 早強ポルトランドセメント FA : フライアッシュセメント A 種 FB : フライアッシュセメント B 種 FC : フライアッシュセメント C 種
	・初期養生温度	5水準 5, 10, 20, 30
	・養生条件	2条件 脱型 2日後標準水中養生 型枠内で材齢 7日まで封緘養生, その後 20 60%RH 気中養生

11.1.1 単位水量

スラグ混合率による単位水量の変化をセメントの種類別に図 11.1 および図 11.2 に示す。図 11.3 に、スラグ混合率 0% を基準とした単位水量比を示す。N にスラグを混合した場合、単位水量はスラグ混合率の増加と共に減少し、その減少の程度はスラグ混合率 30% で約 0.4% 減、混合率 30~70% の範囲では混合率 10% の増加に対し、さらに 0.4% ずつ直線的に減少する。H にスラグを混合した場合、単位水量は N の混合と同じような減少傾向を示し、スラグ混合率 30% で約 0.7% 減、混合率 30~70% の範囲では混合率 10% の増加に対し、さらに 0.5% ずつほぼ直線的に減少する。N および H にスラグを混合した場合は、混合率の影響を強く受ける。FA, FB, FC にスラグを混合した場合、混合後の単位水量はスラグ混合率の影響をほとんど受けない。

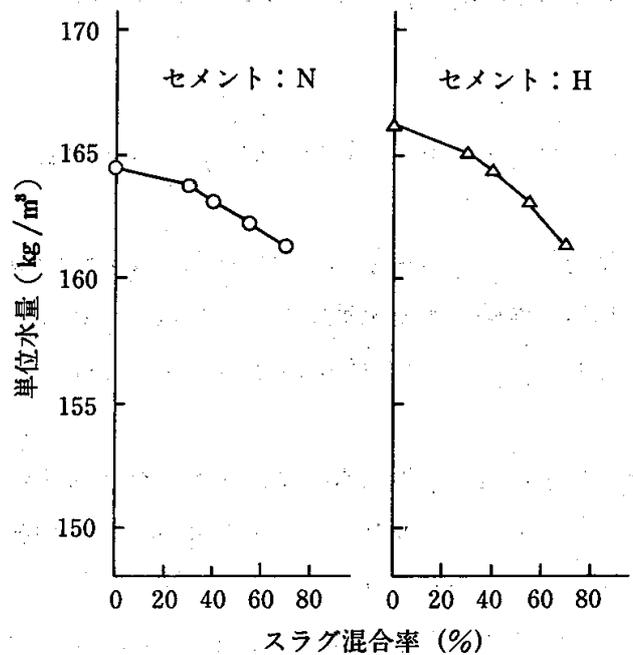


図 11.1 セメントの種類とスラグ混合率による単位水量の変化 (N, H)

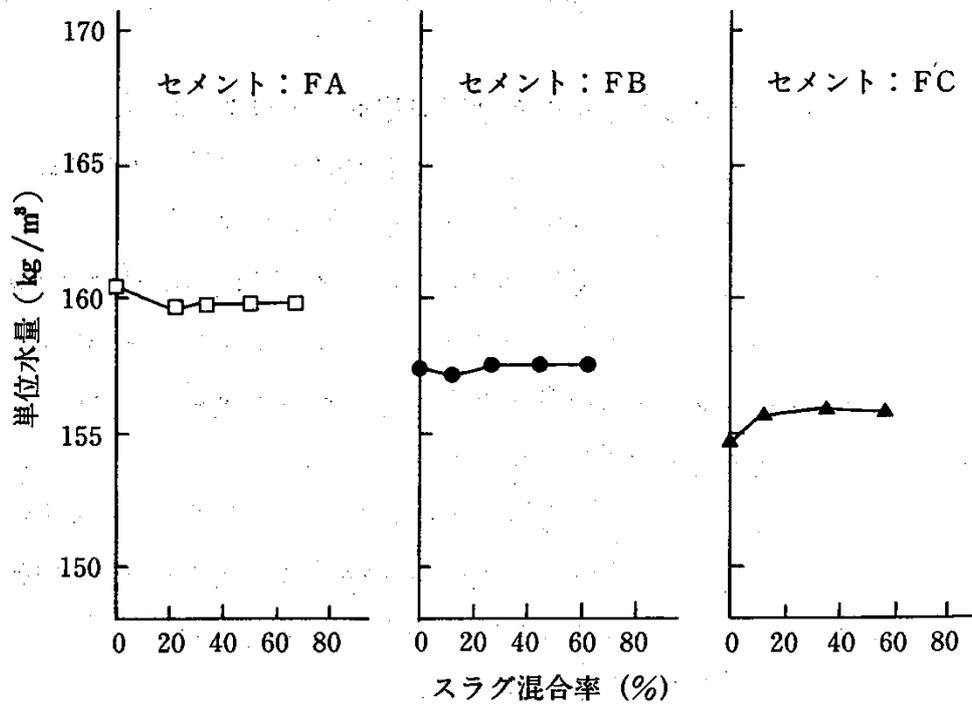


図 11.2 セメントの種類とスラグ混合率による単位水量の変化 (FA, FB, FC)

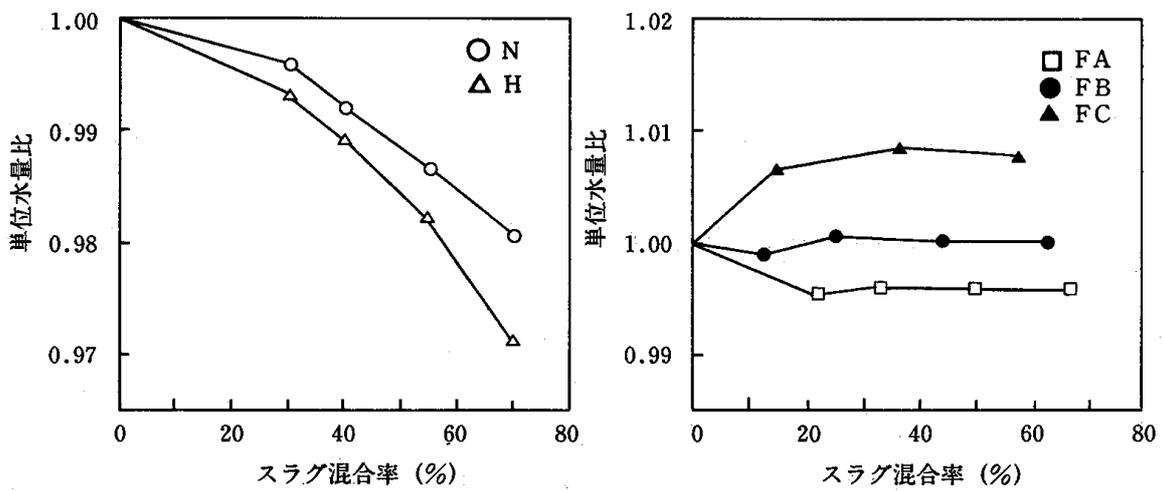


図 11.3 スラグ混合率と単位水量比

11.1.2 圧縮強度

{ 【試験条件】 JIS A 1123「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠

(1) セメントの種類

図 11.4 に養生条件別にセメントの種類およびスラグ混合率と圧縮強度の関係を示す。いずれの養生条件においても、ベースセメントを用いたコンクリートの強度発現性状に応じた強度を示し、 $H > N > FA > FB > FC$ の順となった。ただし、混合率の増大に伴いベースセメントの強度発現特性が緩和され、セメントの種類間の差異が小さくなる傾向にある。スラグ混合率が70%程度になると、いずれのセメントを用いた場合も同等の強度水準を示した。

(2) 初期養生温度

図 11.5 にセメントの種類別に、初期養生温度およびスラグ混合率と圧縮強度の関係を示す。材齢7日では養生温度に比例して強度が大きくなったが、スラグの混合による強度は、いずれの養生温度においてもスラグ混合率に比例して低下した。材齢7日以後は20℃の空气中で養生したものであるが、材齢28日の圧縮強度に対する初期養生温度の変化は、全般に混合率が高くなるほど影響が見られ、初期養生温度が低い条件ほど強度が低くなる傾向を示した。

以上の結果より、高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの強度は、強度が高いベースセメントほどスラグの混合により強度低下割合が大きくなり、養生条件によっては強度発現性に差異が生じるため、養生に注意する必要がある。また、積算温度と強度の関係では、概ね積算温度の上昇につれて圧縮強度が大きくなるが、スラグ混合率が高くなると同一積算温度における圧縮強度が低くなることが明らかとなった。

なお、土木学会や日本建築学会では、高炉スラグ微粉末に関する施工指針¹⁾²⁾を発刊しているため、こちらも参考にするとよい。

- 1) 土木学会 コンクリートライブラリー 86号：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996年6月
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説 第2版，2001年7月

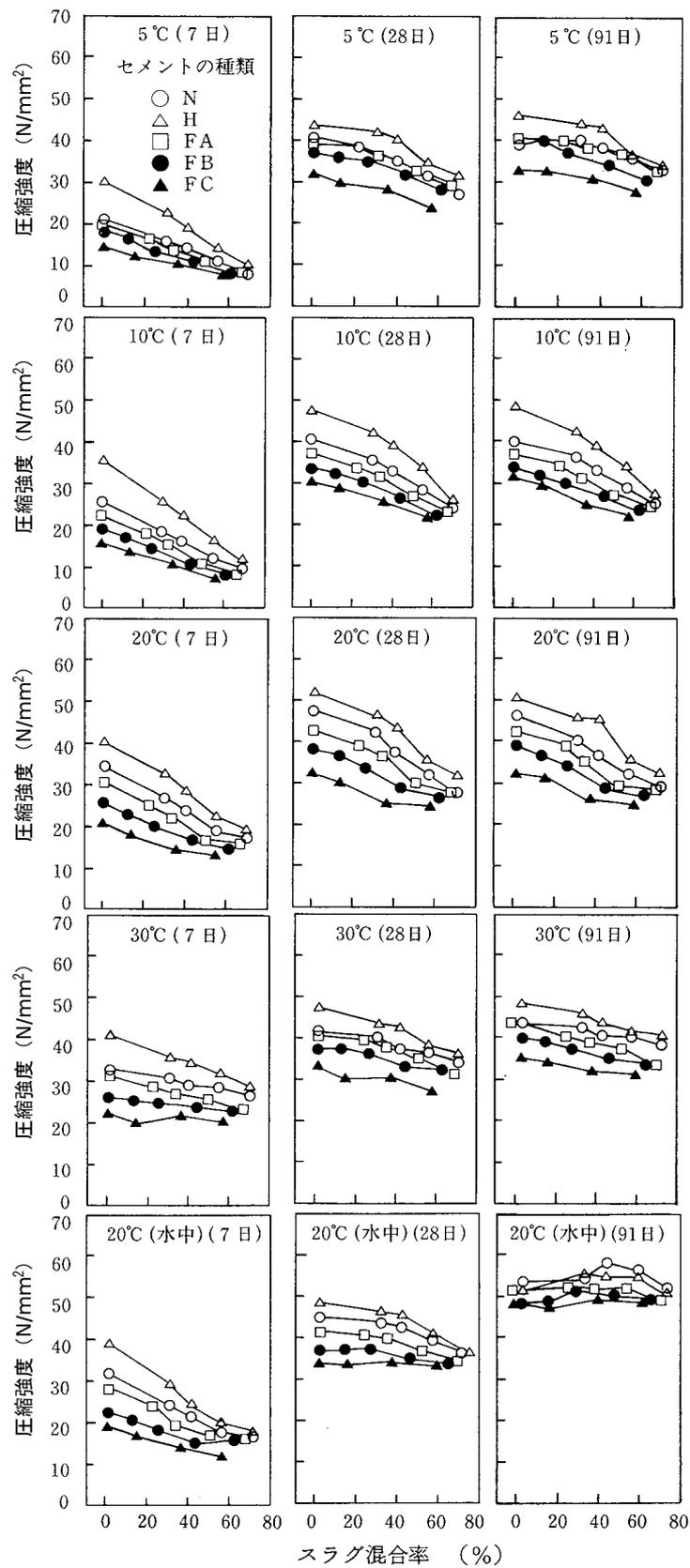


図 11.4 セメントの種類およびスラグ混合率と圧縮強度

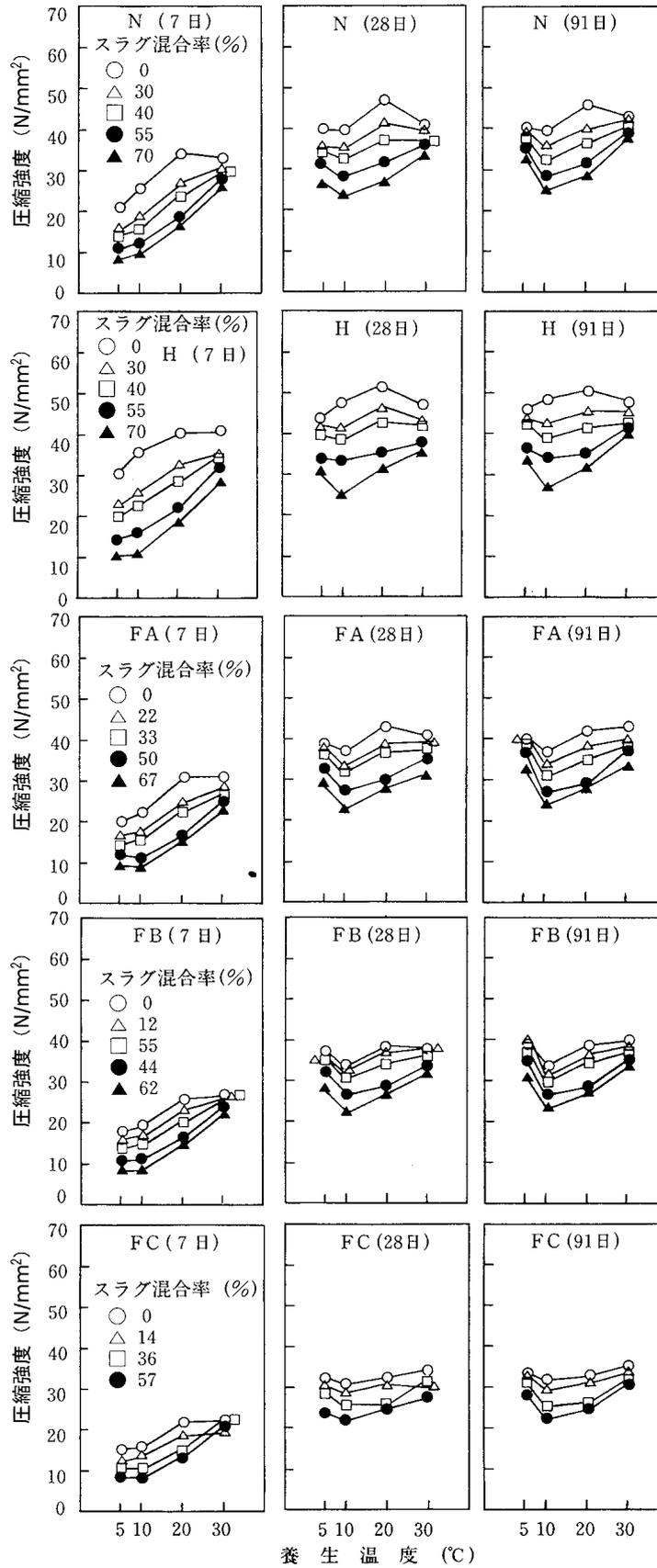


図 11.5 初期養生温度と圧縮強度

12 石灰石骨材

12.1 コンクリートの各種特性に及ぼす影響

F-46	石灰石骨材コンクリートに関する研究	1992年
RCPCP	完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究	1998年

F-46では、石灰石をコンクリート用骨材として用いたときのフレッシュコンクリートの性質、および硬化コンクリートの特性（圧縮強度，引張強度，弾性係数，乾燥収縮率，凍結融解に対する抵抗性，中性化および熱膨張係数）を確認した。また，粗骨材に付着する石灰石粉の量的影響についても検討を行い報告している。

{	【試験条件】	・セメントの種類		N：普通ポルトランドセメント
		・スランプ		18.0 ± 1.5cm
		・空気量		4%
	【要因】	・粗骨材の種類	4種類	A：隠微晶質石灰石 B：微晶質石灰石 C：ドロマイト質石灰石 N：硬質砂岩
		・細骨材の種類	2種類	S：硬質砂岩砕砂 L：石灰石砕砂
		・石粉量	3水準	0%，2%，4%
		・水セメント比		50%，60%，70%
		・養生条件	2水準	標準養生（水中），気中養生（20℃，65%RH）

RCPCPでは、石灰石をコンクリート用骨材として用いたときの耐火性状や、石灰石砕砂中の微粉がコンクリートの性状に及ぼす影響について報告している。

{	【試験条件】	・セメントの種類		N：普通ポルトランドセメント
		・スランプ		18.0 ± 1.5cm
		・空気量		4.5 ± 0.5%
		・養生条件		材齢28日まで封緘養生
	【要因】	・骨材の種類	2種類	石灰石，砂岩
		・微粉量	3水準	8%，11%，14%
		・水セメント比		40%，50%，60%

12.1.1 単位水量

図 12.1 に骨材の種類と単位水量の関係を示す。単位水量は石灰石骨材を用いると少なくすることができる。図 12.2 に石灰石砕砂および砂岩砕砂の微粉量と単位水量の関係を示す。図 12.3 に石灰石砕砂の微粉量と単位水量一定におけるスランプおよび空気量の関係を示す。同一スランプを得るために必要な単位水量は、微粉量が多くなってもほぼ同等であった。単位水量一定の場合、スランプ、空気量ともに微粉量が多くなると小さくなった。

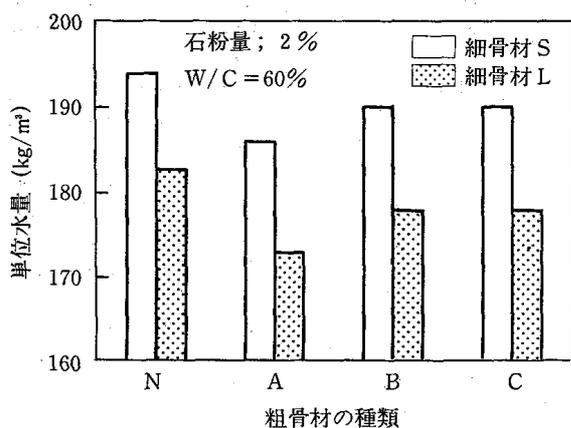


図 12.1 骨材の種類と単位水量

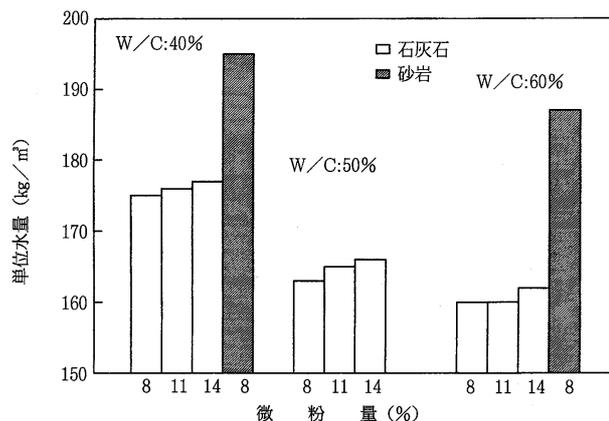


図 12.2 石灰石砕砂および砂岩砕砂の微粉量と単位水量

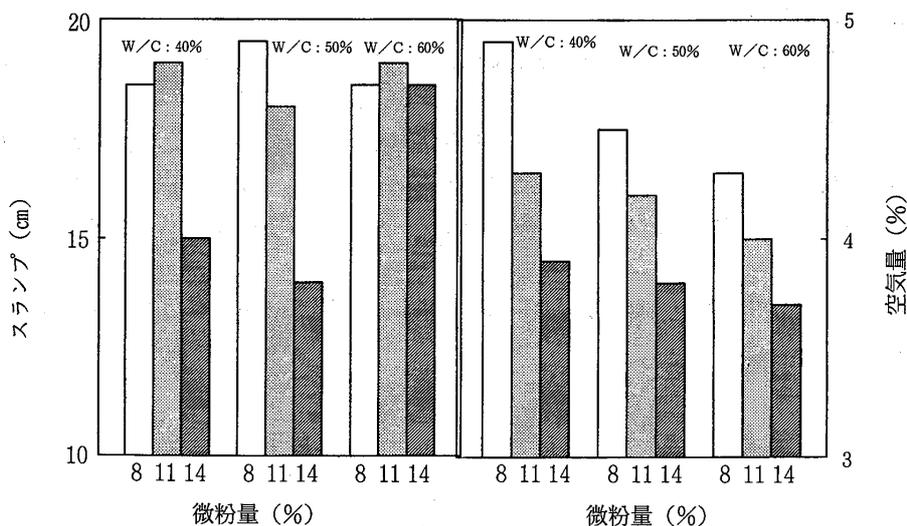


図 12.3 石灰石砕砂の微粉量と単位水量一定におけるスランプおよび空気量

12.1.2 ブリーディング率

{ 【試験条件】 JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」準拠

図 12.4 に骨材の種類とブリーディング率の関係を示す。ブリーディング率は石粉量の増加により減少する。図 12.5 に石灰石砕砂の微粉量とブリーディング率を示す。微粉量が多くなると細骨材率が小さくなるためにブリーディング率は多くなった。

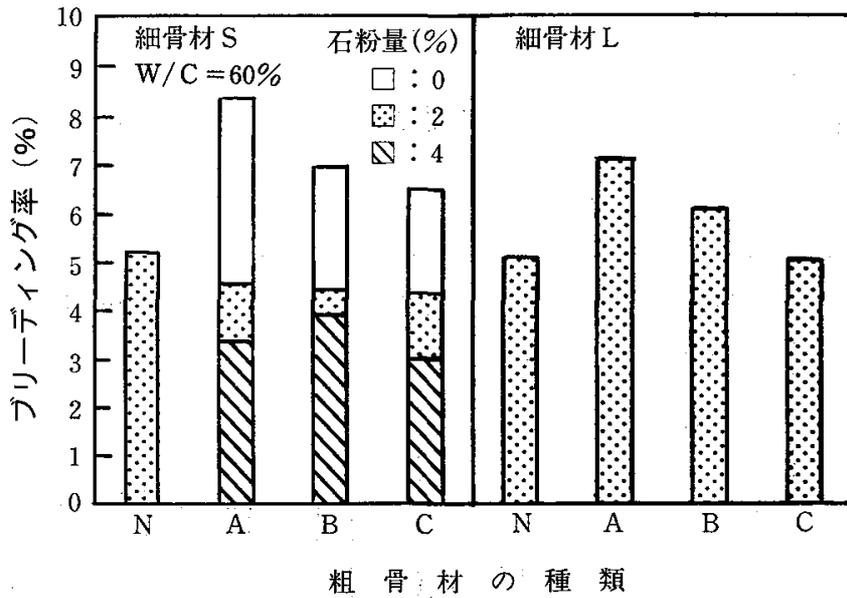


図 12.4 骨材の種類とブリーディング率

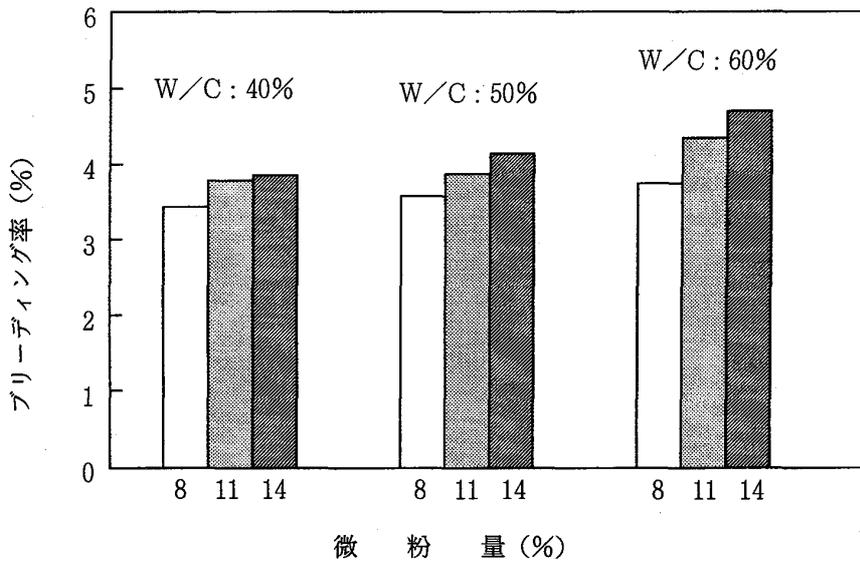


図 12.5 石灰石砕砂の微粉量とブリーディング率

12.1.3 凝結時間

【試験条件】 ASTM C 403 「Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance」 準拠
 JIS A 6204 コンクリート用化学混和剤 付属書

図 12.6 に骨材の種類が凝結の時間に及ぼす影響を示す。細骨材の種類による凝結時間はほとんど差はない。粗骨材の違いを比較すると、粗骨材 N は他の骨材よりもわずかに長い傾向にある。図 12.7 に石粉量と凝結時間の関係を示す。石粉量が多くなると凝結時間が短くなる傾向にある。図 12.8 に石灰石砕砂の微粉量と凝結時間を示す。微粉量による凝結時間への影響は認められなかった。

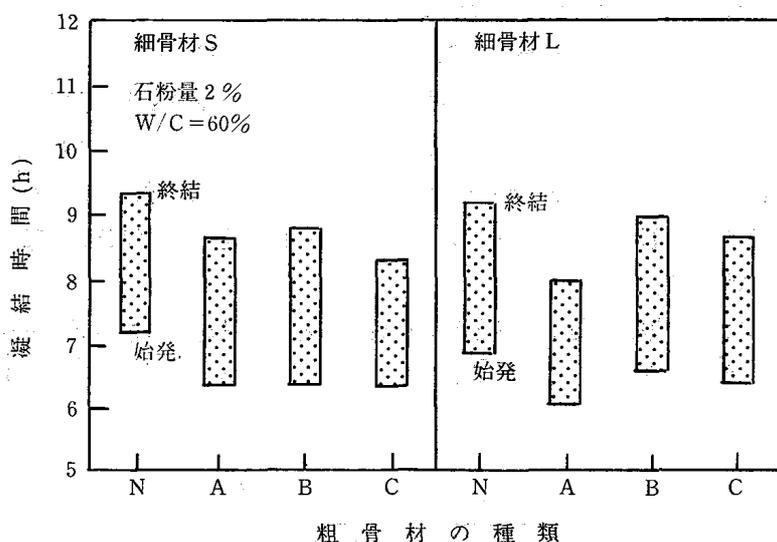


図 12.6 骨材の種類と凝結時間

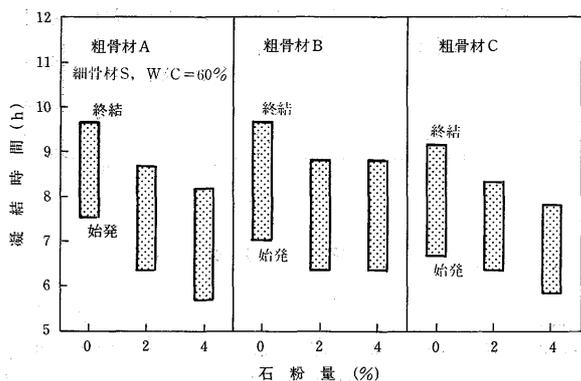


図 12.7 石粉量と凝結時間

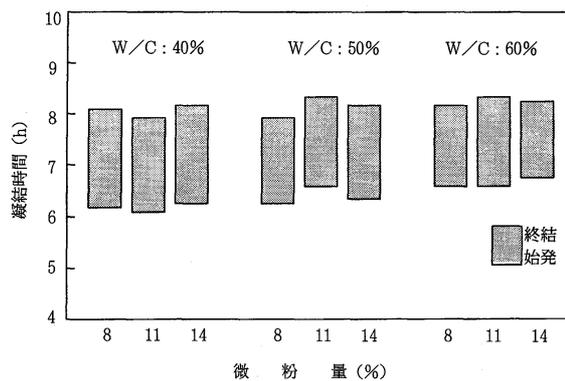


図 12.8 石灰石砕砂の微粉量と凝結時間

12.1.4 圧縮強度

【試験条件】 JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠

図 12.9 に材齢と圧縮強度の関係を、図 12.10 に粗骨材の石粉量と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、水中養生の場合、石灰石骨材を用いると 7 日強度は高くなる傾向が認められた。28 日以降の強度発現は岩種により異なり、ドロマイト質石灰石は長期強度の発現性が大きいことがわかった。

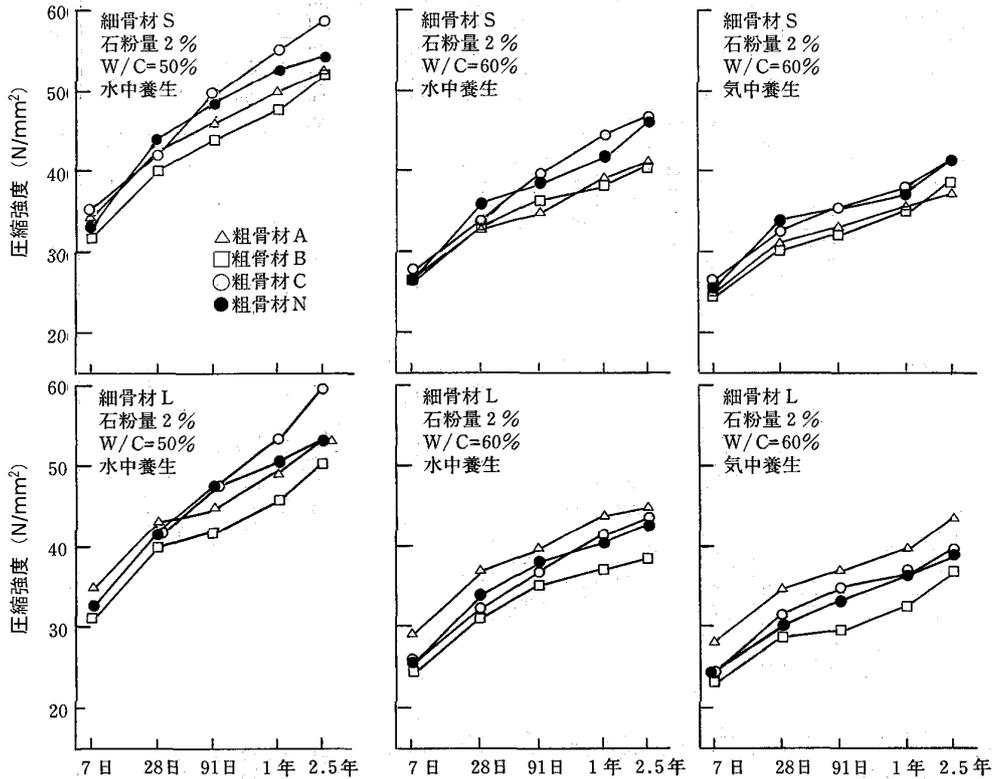


図 12.9 材齢と圧縮強度

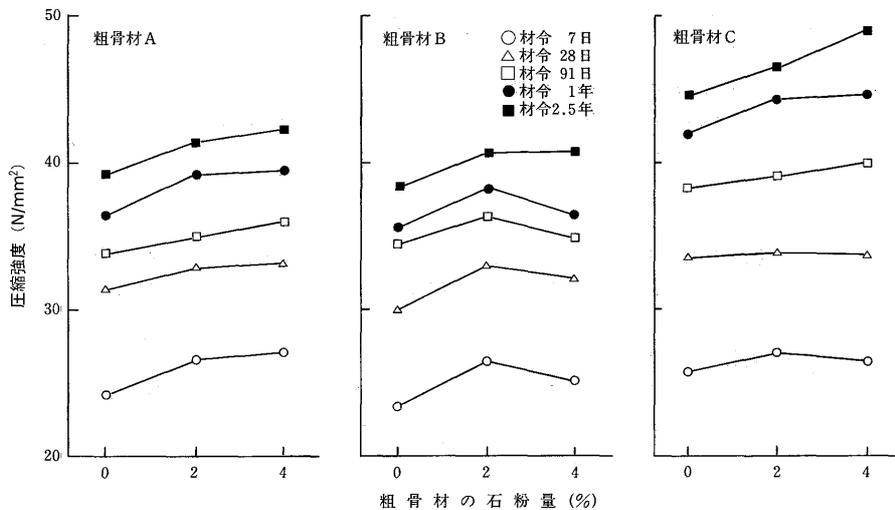


図 12.10 粗骨材の石粉量と圧縮強度

12.1.5 弾性係数

【試験条件】 JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」準拠
 最大応力の 1/3 での応力とひずみより割線弾性係数を算出

図 12.11 に材齢と静弾性係数の関係を、図 12.12 に粗骨材の石粉量と静弾性係数の関係を示す。
 弾性係数は、岩質による差は少し認められるが、初期材齢では砂岩骨材にくらべ高い傾向を示す。

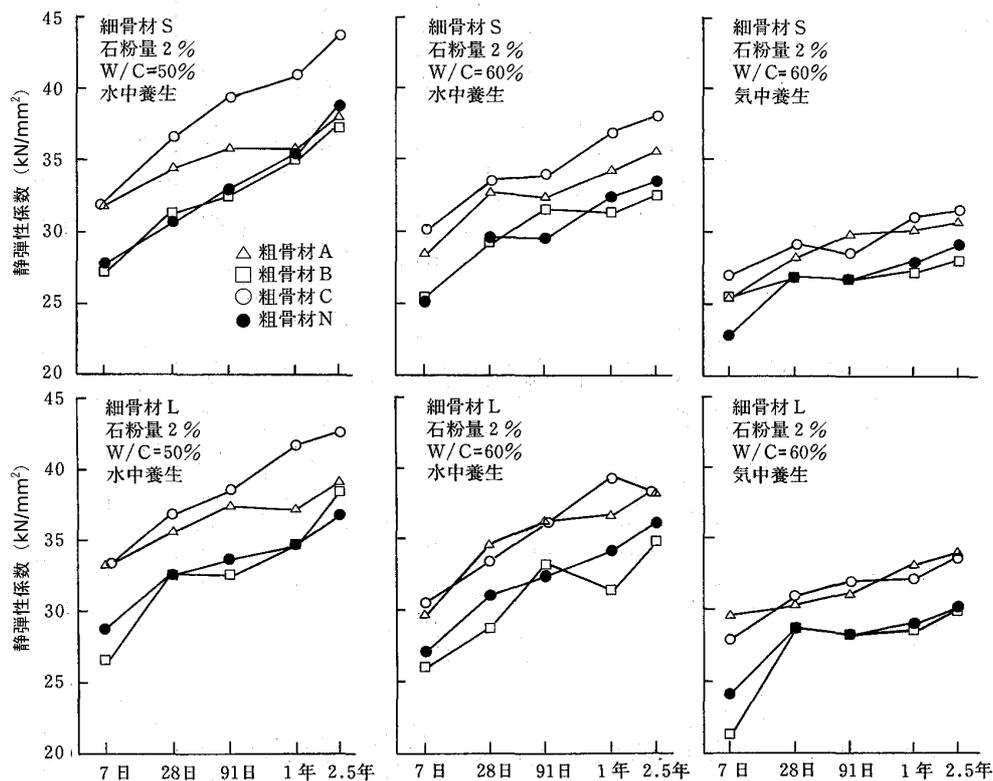


図 12.11 材齢と静弾性係数

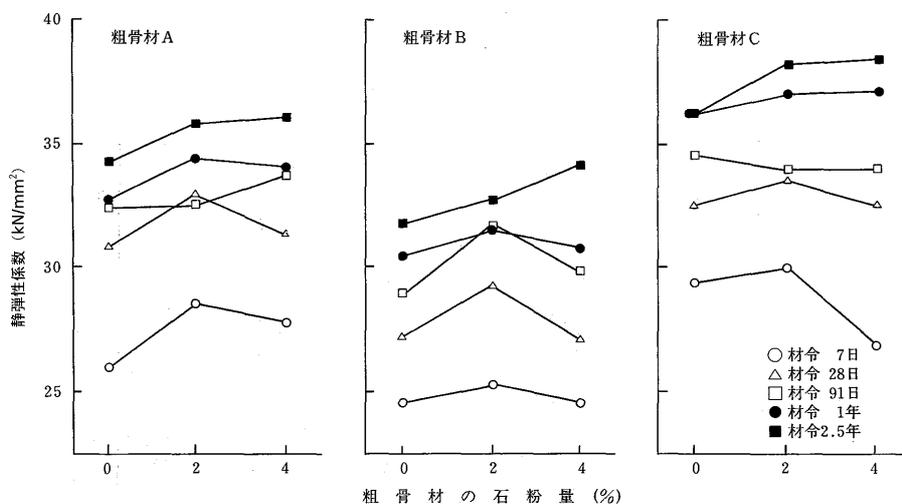


図 12.12 粗骨材の石粉量と静弾性係数

12.1.6 乾燥収縮

【試験条件】 JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」準拠

図 12.13 に粗骨材の種類と乾燥収縮率の関係を、図 12.14 に細骨材の種類と乾燥収縮率の関係を、図 12.15 に石粉量と乾燥収縮率の関係を示す。乾燥収縮率は、石灰石骨材を用いると著しく減少し、特に細・粗骨材に石灰石骨材を用いると砂岩骨材にくらべ約 40% も減少する。

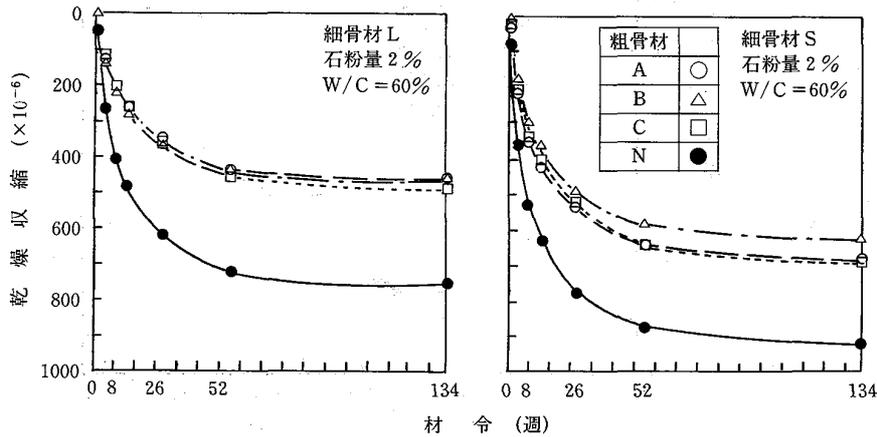


図 12.13 粗骨材の種類と乾燥収縮率

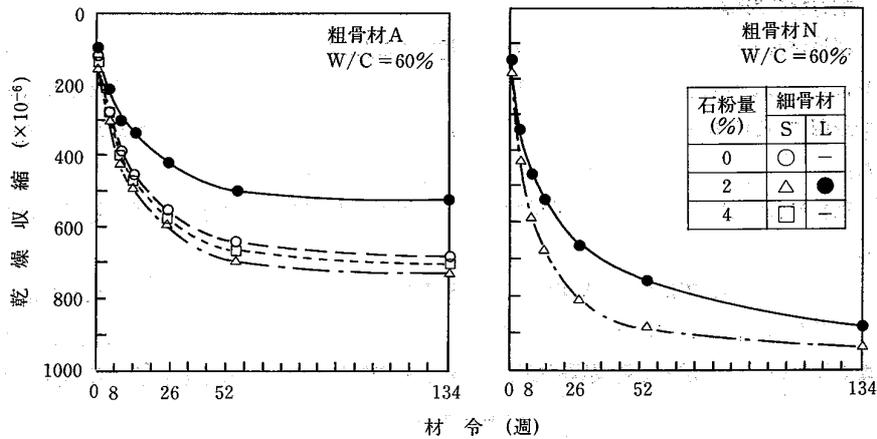


図 12.14 細骨材の種類および石粉量と乾燥収縮率

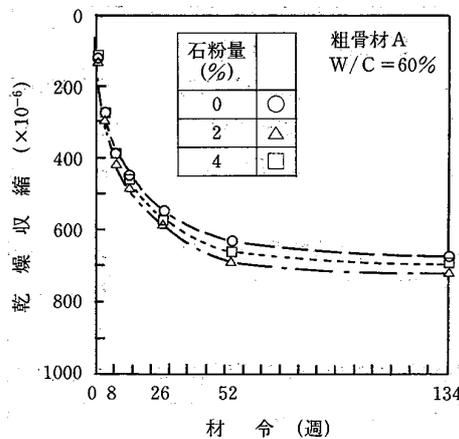


図 12.15 石粉量と乾燥収縮率

12.1.7 促進中性化深さ

- 【試験条件】 ・養生条件 脱型後材齢 7 日まで標準養生 (水中), その後 材齢 28 日まで 20 65%RH で気中養生
- ・促進中性化条件 温度 20 , 湿度 65%RH , CO₂ 濃度 10%

図 12.16 に促進中性化試験による, 粗骨材の種類とコンクリートの中性化深さとの関係を示す。中性化は通常の砂岩骨材のコンクリートと同程度である。

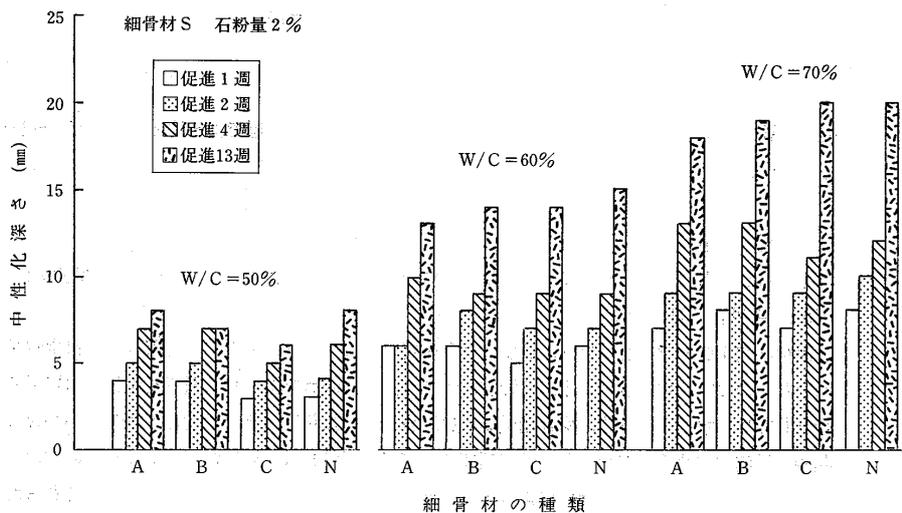


図 12.16 粗骨材の種類とコンクリートの中性化深さ (促進試験)

12.1.8 凍結融解抵抗性

- 【試験条件】 JIS A 6204 「コンクリート用化学混和剤」
- 附属書 2 コンクリートの凍結融解試験方法に準拠
- ・凍結融解サイクル数 300 回

図 12.17 に粗骨材と耐久性指数の関係を示す, 図 12.18 に細骨材と耐久性指数の関係を示す。凍結融解に対する抵抗性は, 石灰石の岩質により異なるが, ドロマイト質石灰石ではやや劣る傾向が認められた。しかし, 空気量を 1% 程度増加させることによって耐久性を砂岩骨材コンクリートと同程度とすることができる。

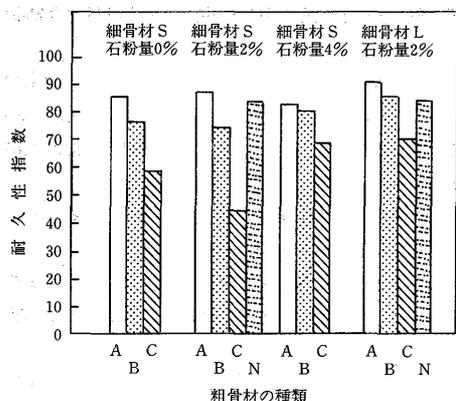


図 12.17 粗骨材の種類と耐久性指数

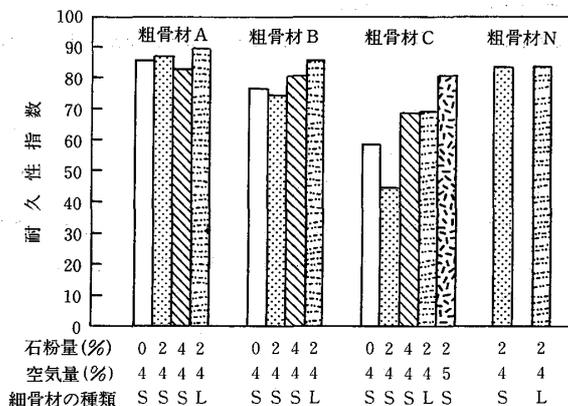


図 12.18 細骨材の種類と耐久性指数

12.1.9 熱膨張係数

【試験条件】 ワイヤーストレインゲージにより 20 と 80 におけるひずみを測定

図 12.19 に粗骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数との関係を、図 12.20 に細骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数との関係を示す。熱膨張係数は、石灰石の岩質により異なるが、概ね砂岩骨材コンクリートのそれより約 10~20% 小さくなる。

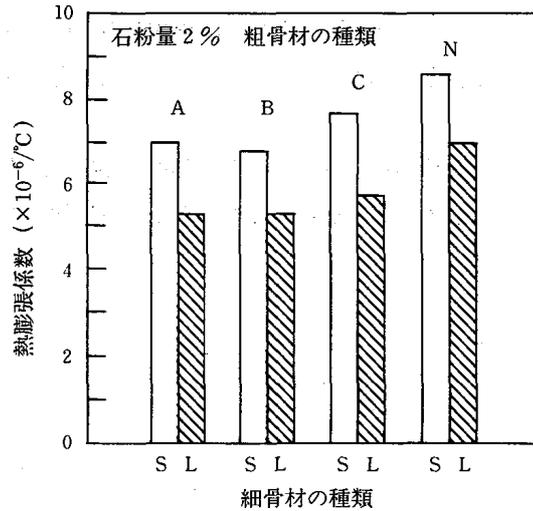
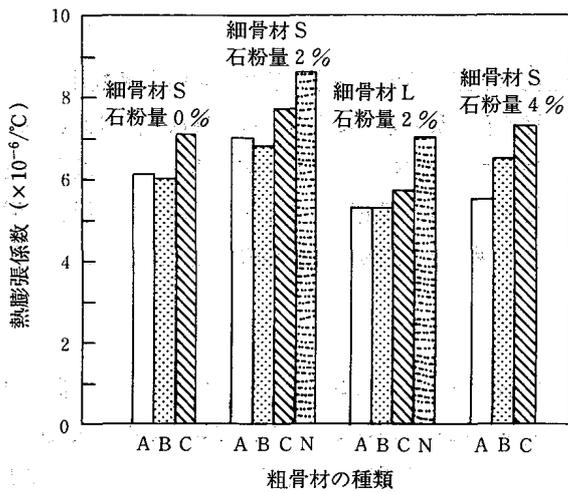


図 12.19 粗骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数

図 12.20 細骨材の種類とコンクリートの熱膨張係数

12.1.10 耐火性状

【試験条件】 JIS A 1304 建築構造部分の耐火試験方法 準拠

表 12.1 に、耐火試験前後の圧縮強度と静弾性係数および残存率を示す。耐火後の圧縮強度および静弾性係数の残存率は、砂岩骨材コンクリートに比べて石灰石骨材コンクリートの方が小さくなった。これは、石灰石骨材の脱炭酸の影響と考えられる。表面ひび割れは、水セメント比が小さい方が、また、石灰石骨材コンクリートの方が多かった。

表 12.1 耐火試験前後の圧縮強度，静弾性係数および残存率

種類	水セメント比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		残存率 (%)	静弾性係数 (kN/mm ²)		残存率 (%)
		試験前	試験後		試験前	試験後	
石灰石骨材コンクリート	40	55.8	8.3	14.9	28.3	1.1	3.8
	60	40.6	8.0	19.7	25.3	1.3	5.1
砂岩骨材コンクリート	40	58.7	13.4	22.8	21.8	1.6	7.2
	60	41.4	12.4	30.0	18.4	1.5	7.9

12.1.11 アルカリ炭酸塩岩反応

F-47	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究	1994年
------	---------------------------	-------

F-47では、日本国内でコンクリート用骨材として使用されている石灰石のうち、主要な産地の石灰石についてアルカリ炭酸塩反応性を検討し報告している。

{	【試験条件】	CAN/CSA A23.2-14A「コンクリート角柱膨張試験方法」準拠	
		・水セメント比	57%
		・単位セメント量	310kg/m ³
		・空気量	2.0 ± 0.5%
{	【要因】	・骨材の種類	15種類 国内産石灰石 14種類 カナダ Pittsburgh 産 1種類 (基準骨材) アルカリ炭酸塩反応が確認されている
		・アルカリ総量	2水準 3.1kg/m ³ , 5.5kg/m ³

使用骨材の化学分析結果を表 12.2 に、膨張試験の結果を図 12.21 に示す。カナダ Pittsburgh 産では著しい膨張が認められたが、日本の石灰石骨材の場合、その膨張率は最大でも 0.01% と小さく、有害な膨張を起こすと思われるものはなかった。また、今回の試料にはドロマイト質石灰石として分類されるのが 2 種類あるが、有害な膨張は認められない。カナダ産ドロマイト質石灰岩とは産状、組織等の岩石学的特徴の違いに起因していると考えられる。

表 12.2 化学分析結果

鉾山名	化 学 成 分 (%)						
	ig. loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅
峯 朗	43.9	0.19	0.04	0.08	55.0	0.69	0.019
尻 屋	43.8	0.30	0.03	0.06	55.3	0.48	0.013
八 戸	43.8	0.12	0.02	0.13	55.3	0.38	0.026
長 岩	41.5	3.75	0.49	1.50	49.8	2.58	0.027
大 叶	43.9	2.06	0.14	0.26	43.4	9.80	0.201
武 甲	43.7	0.30	0.10	0.12	55.1	0.53	0.011
水 川	43.8	0.36	0.03	0.11	54.7	0.84	0.020
藤 原	43.6	0.53	0.16	0.15	54.9	0.50	0.016
阿 哲	43.8	0.21	0.04	0.06	55.2	0.35	0.022
伊 佐	43.8	0.07	0.02	0.07	55.5	0.31	0.018
関 の 山	43.9	0.09	0.08	0.09	55.3	0.55	0.023
津 久 見	43.9	0.14	0.03	0.06	55.3	0.54	0.030
鳥 形 山	43.8	0.12	0.04	0.15	55.6	0.25	0.020
安 和	43.9	0.14	0.04	0.09	54.5	1.17	0.020
Pittsburgh	42.0	6.07	0.94	1.44	37.9	11.18	0.014

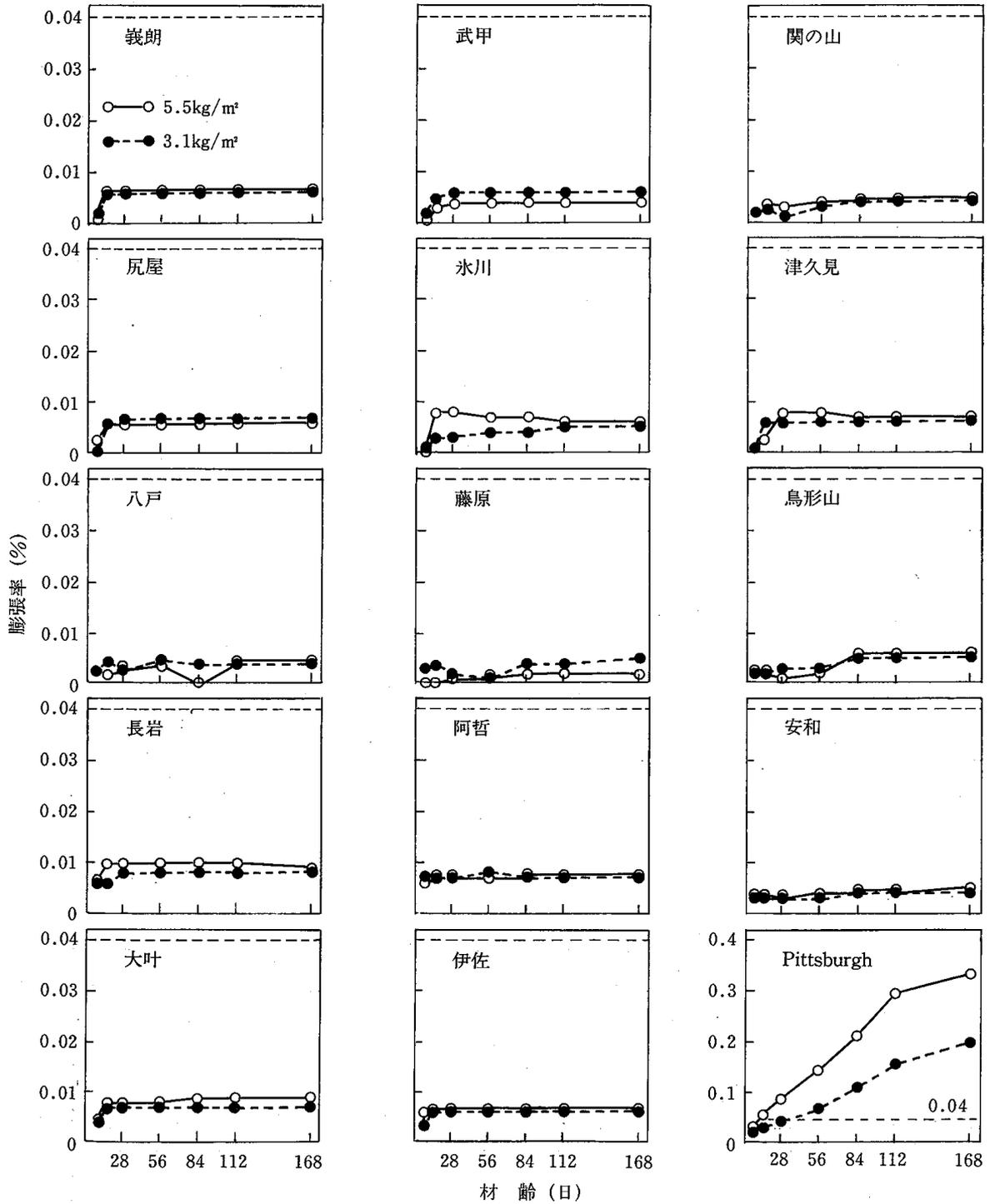


図 12.21 膨張率測定結果

13 あとがき

本報告では、わが国で製造されている各種セメントを使用したコンクリートの性状を総合的に取りまとめた。特に、コンクリートの耐久性に関しては長期暴露した場合のデータを中心に整理した。要約は以下のとおりである。

コンクリートのフレッシュ性状については、単位水量を採り上げ、各種セメント毎に、水セメント比および練混ぜ温度を要因として整理した。

コンクリートの強度性状については、各種セメント毎に、水セメント比および養生方法が異なる場合のコンクリートの圧縮強度を整理した。また、初期の乾燥条件が圧縮強度に及ぼす影響もまとめた。さらに、さまざまな環境条件で長期暴露した場合の圧縮強度も追加した。

コンクリートの発熱性状については、各種セメントの断熱温度上昇に関する共通試験結果より、断熱温度上昇量に関する係数を、土木学会コンクリート標準示方書に示された値と比較して整理した。

コンクリートの収縮性状については、各種セメント毎に、コンクリートの乾燥収縮率を整理した。またその他要因として、コンクリートの配合条件、骨材種類、混和剤種類、前養生方法およびアジテート時間がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響もまとめた。さらに、長期暴露した場合の乾燥収縮率も追加した。

コンクリートのひび割れ抵抗性については、JIS A 1151「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ方法」の試験方法を検討した実験結果より、コンクリートの配合条件、骨材種類、混和剤種類、前養生方法およびアジテート時間がひび割れ発生日数に及ぼす影響を整理した。

コンクリートの耐久性については、塩害、中性化および凍害を採り上げ、セメント種類毎に、水セメント比および初期の乾燥がこれらの性状に及ぼす影響を整理した。またいずれも長期暴露した場合の結果も追加した。

アルカリ骨材反応については、骨材種類、アルカリ総量および暴露環境条件を要因として整理した。また各種セメントのアルカリ骨材抑制効果をまとめた。

混和材料として高炉スラグ微粉末を、コンクリート用骨材として石灰石骨材を採り上げ、これらを使用したコンクリートの性状をまとめた。

本報告で取りまとめた結果は、社団法人セメント協会で実施した研究結果であり、限られた範囲から抜粋したものであるが、わが国のセメントの性能を評価するうえで、有効な資料として利用できるのではないかと考える。

なお本報告書では、舗装コンクリートなどは対象としておらず、すべての情報を網羅するまでには至っていない。また、社会情勢の変化や技術の進展に伴い、セメントに求められる性能も変化していく可能性がある。

これらの点を踏まえ、本委員会では、今後もセメント・コンクリートに関する研究を実施し、これらの情報をユーザーに提供していく予定である。最後に、巻末に本報告書で引用した委員会報告一覧を掲載した。ここで紹介した内容についてさらに詳細な実験データ等が記載されており、ご一読していただければ幸いである。

関係報告

コンクリート専門員会報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-1	昭和 28 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係に関する報告(I)
F-2	昭和 29 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強さの関係に関する報告(II)
F-3	昭和 30 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度の関係に関する報告(III)
F-4	昭和 31 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強さとの関係に関する報告
F-5	昭和 32 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度および引張強さ係数との関係に関する報告
F-6	昭和 33 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いた舗装用コンクリートを対象とするAEコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強度との関係に関する報告
F-7	昭和 34 年 5 月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その2 早強および中庸熱ポルトランドセメント)
F-8	昭和 35 年 4 月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その3 高炉セメント)
F-9	昭和 36 年 4 月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その4 シリカセメントおよびフライアッシュセメント)
F-10	昭和 36 年 4 月	コンクリート強度におよぼす細骨材の影響に関する共同試験報告
F-11	昭和 36 年 4 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告
F-12	昭和 37 年 5 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その2)
F-13	昭和 38 年 3 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その3)
F-14	昭和 39 年 6 月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その1)
F-15	昭和 40 年 8 月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その2)
F-16	昭和 41 年 9 月	スランプの相違をも含めたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係に関する報告
F-17	昭和 42 年 4 月	各種のセメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告
F-18	昭和 42 年 9 月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告
F-19	昭和 43 年 5 月	富配合かた練りコンクリートのセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係に関する報告
F-20	昭和 43 年 10 月	砕石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度および曲げ強度に関する報告
F-21	昭和 44 年 9 月	砕石を用いた軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告
F-22	昭和 45 年 9 月	舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度に関する共同試験報告
F-23	昭和 46 年 3 月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告(その2)
F-24	昭和 47 年 9 月	コンクリートの強度試験方法に関する共同試験報告(その1) I 圧縮強度試験におけるキャッピング材料およびキャッピング方法 II 引張強度試験における支承材の有無および支承材の材質 III 曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法
F-25	昭和 48 年 10 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-26	昭和50年9月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(II) 1.回収水使用コンクリートの性質に及ぼす温度の影響 2.減水剤を用いたコンクリートに及ぼす回収水の影響 3.スラッジの経過日数がコンクリートの性質に及ぼす影響 4.回収水とスラッジの品質調査
F-27	昭和50年9月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(III) 回収水使用コンクリートの性質に及ぼすスラッジ組成の影響 (付)F-25における中性化試験の中間報告
F-28	昭和51年12月	細骨材の品質調査報告
F-29	昭和52年10月	粗骨材の品質調査報告
F-30	昭和52年9月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告
F-25 追加報告	昭和53年4月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験 コンクリートの中性化試験結果
F-31	昭和54年6月	粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-32	昭和56年3月	細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-33	昭和56年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 －材齢5年中間報告(その1)－
F-34	昭和57年5月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その1) －普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合－
F-35	昭和57年7月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 －材齢5年中間報告(その2)－
F-36	昭和58年2月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その2) －高炉セメントB種およびフライアッシュセメントB種を用いた場合－
F-37	昭和59年3月	コア供試体の圧縮強度におよぼす各種試験要因の影響
F-38	昭和60年7月	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-39	昭和61年6月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 －材齢10年中間報告(その1)－
F-40	昭和62年8月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 －材齢10年中間報告(その2)－
F-41	昭和63年4月	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究
F-42	昭和63年1月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その1) －40℃湿空条件における試験結果－
F-43	1989年8月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その2) －屋外暴露および20℃海水反復浸漬条件における試験結果－
F-44	1989年9月	コンクリートによるアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究
F-45	1991年6月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 －材齢15年中間報告－
F-46	1992年10月	石灰石骨材コンクリートに関する研究
F-47	1994年3月	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-48	1998年4月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢20年最終報告
F-49	1999年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —セメントの種類、養生条件および海洋暴露条件の影響(材齢10年試験)—
F-50	1999年3月	コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究
F-51	2002年3月	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇
F-52	2006年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢5年報告
F-53	2006年3月	蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響
F-54	2008年3月	寒冷地に暴露したAEコンクリートの耐凍害性-材齢20年報告-
F-55	2008年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究
F-56	2010年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢10年最終報告

耐久性専門委員会ひびわれ分科会

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
H-19	1988年4月	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討(その一)試験条件の影響
H-20	1988年6月	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討(その二)アジテート時間の影響
H-21	1988年10月	ひびわれ抵抗性に及ぼす各種要因の検討(その三)骨材種類の影響
H-22	1990年5月	コンクリートの乾燥収縮率測定方法の検討
H-23	1992年10月	コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討

建設副産物利用促進専門委員会

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
RCPCP	1998年3月	完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究

セメント化学専門委員会

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
C-4	1987年8月	アルカリ骨材反応に関する共同研究