

## 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。

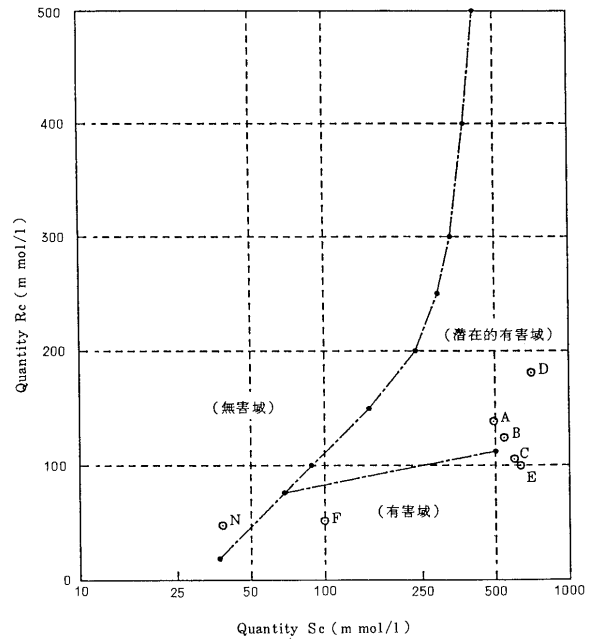


図 10.1 ASTM の判定区分による判定結果

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  $\text{Na}_2\text{O}$  等価値で 0.36% および 0.93% の N と  $\text{NaOH}$  と  $\text{KOH}$  の試薬を加えて  $\text{Na}_2\text{O}$  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。

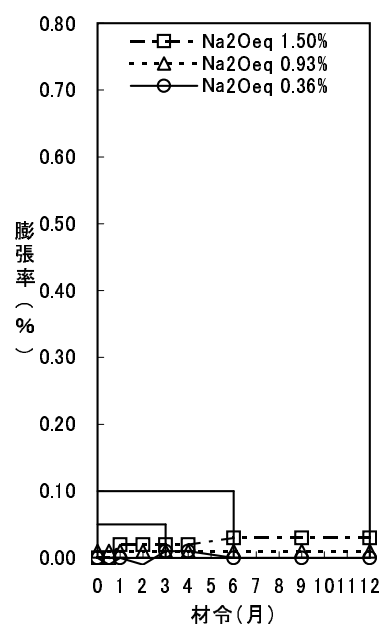


図 10.2 非反応性骨材 N のモルタルバー膨張率

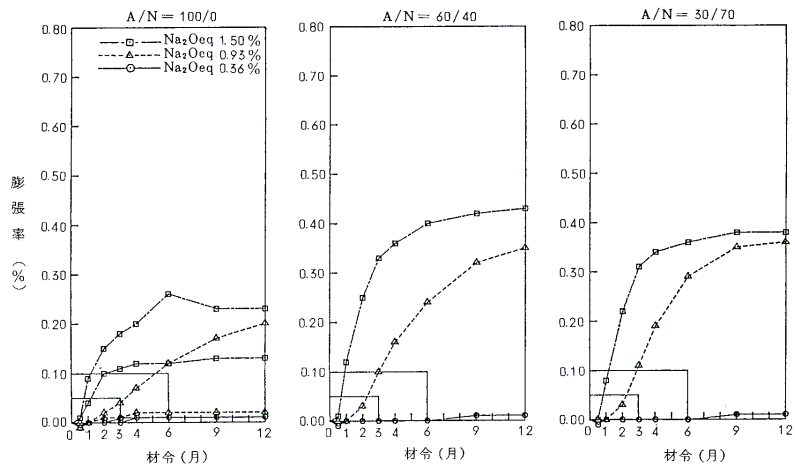


図 10.3 反応性骨材 A のモルタルバー膨張率

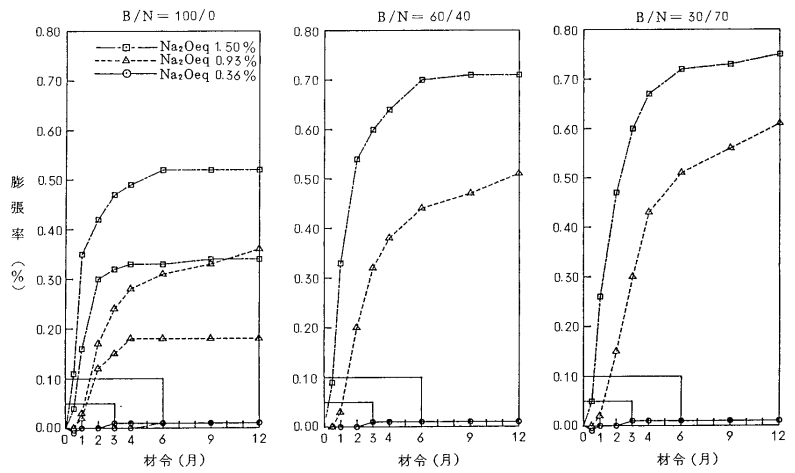


図 10.4 反応性骨材 B のモルタルバー膨張率

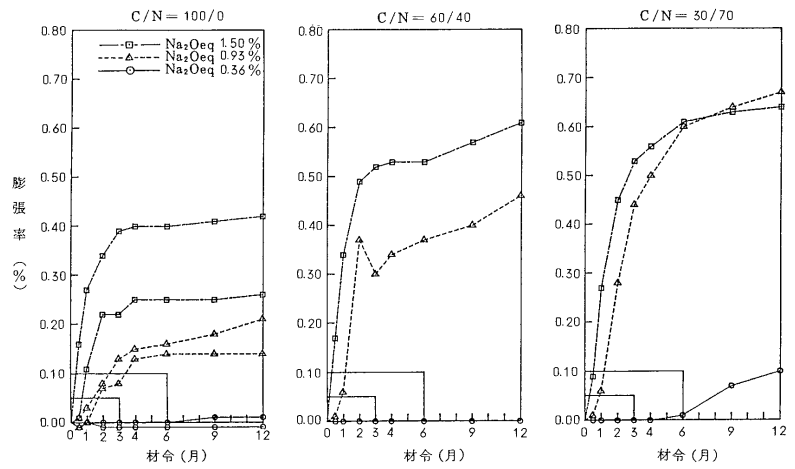


図 10.5 反応性骨材 C のモルタルバー膨張率

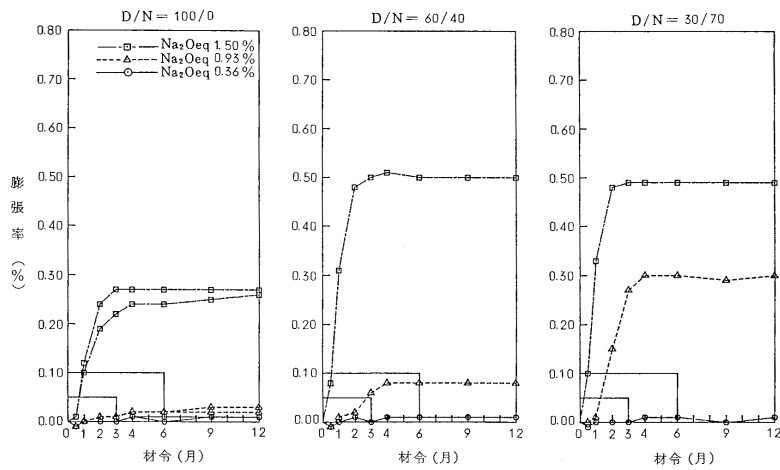


図 10.6 反応性骨材 D のモルタルバー膨張率

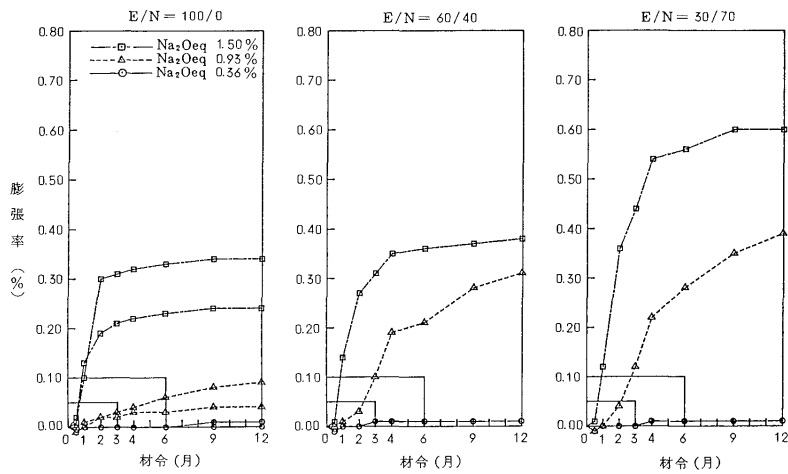


図 10.7 反応性骨材 E のモルタルバー膨張率

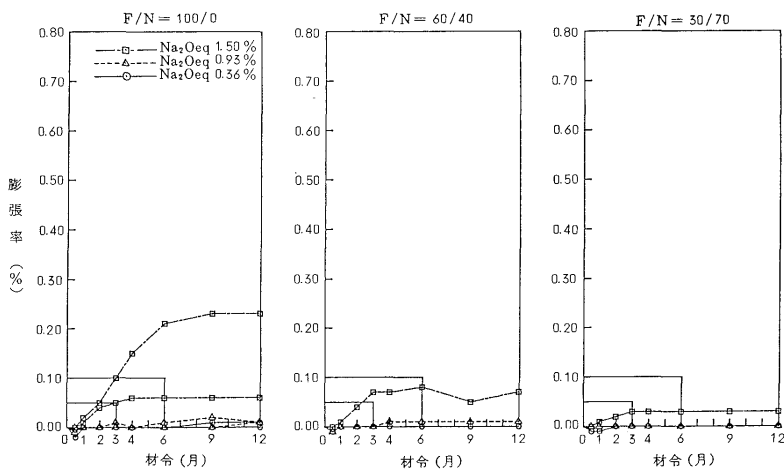


図 10.8 反応性骨材 F のモルタルバー膨張率

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 <sup>3</sup> , 1.62kg/m <sup>3</sup> , 2.16kg/m <sup>3</sup> 2.79kg/m <sup>3</sup> , 4.18kg/m <sup>3</sup> , 4.50kg/m <sup>3</sup> 5.58kg/m <sup>3</sup> , 6.75kg/m <sup>3</sup> , 9.00kg/m <sup>3</sup>
		・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/m<sup>3</sup> となることが分かる。

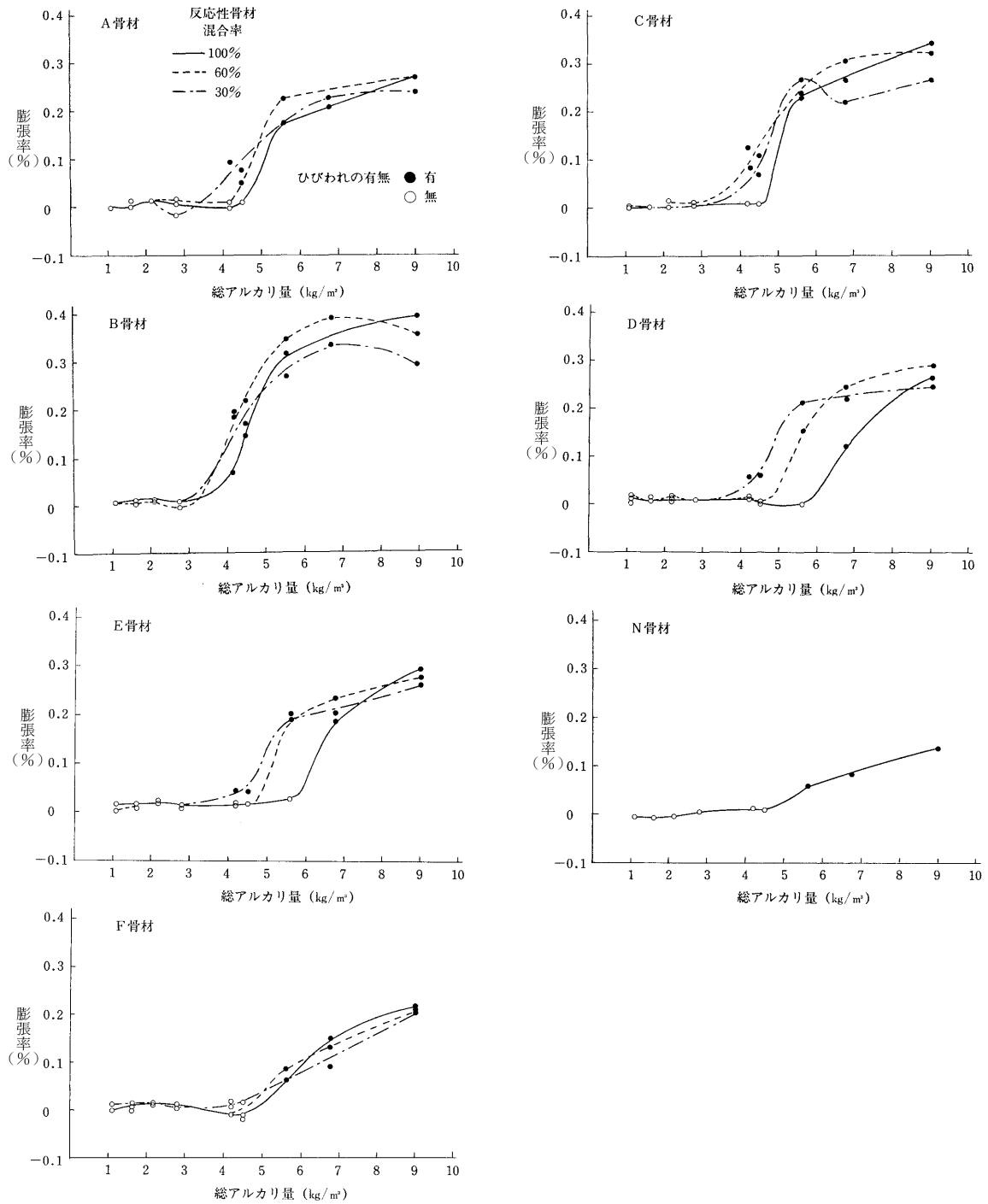


図 10.9 40 湿空におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張量

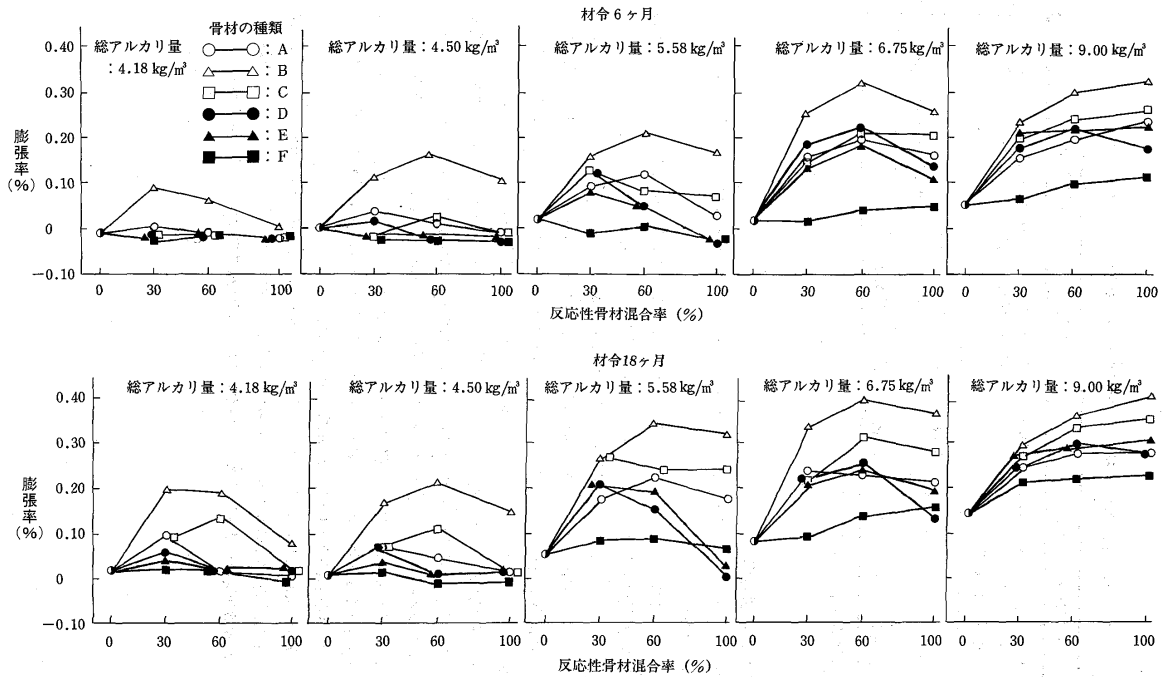


図 10.10 反応性骨材混合率と膨張量 (40 湿空)

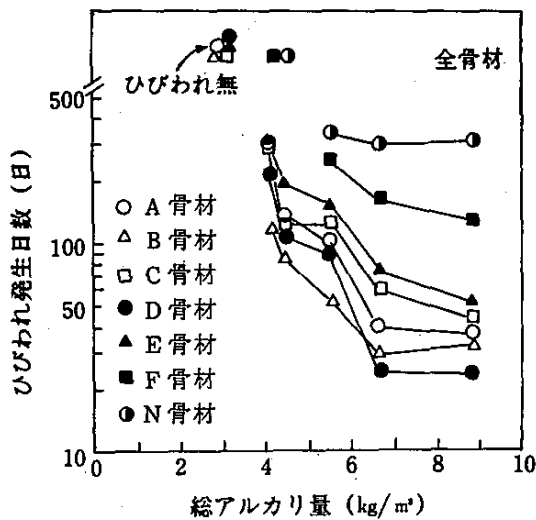


図 10.11 総アルカリ量とひび割れ発生日数 (40 湿空)

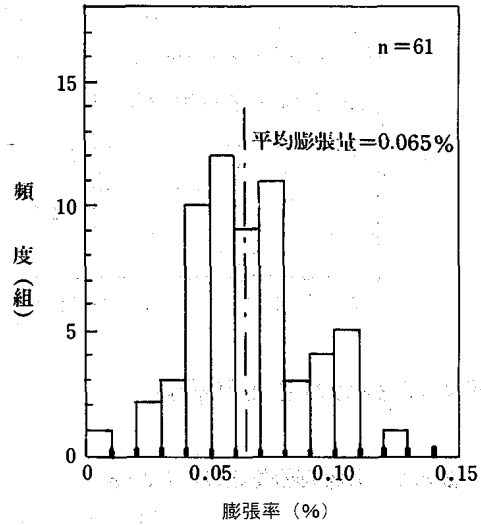


図 10.12 ひび割れ発生時の膨張量の度数分布

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/m³ (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 <sup>3</sup> , 1.62kg/m <sup>3</sup> , 2.16kg/m <sup>3</sup> 2.79kg/m <sup>3</sup> , 4.18kg/m <sup>3</sup> , 4.50kg/m <sup>3</sup> 5.58kg/m <sup>3</sup> , 6.75kg/m <sup>3</sup> , 9.00kg/m <sup>3</sup>
		・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。



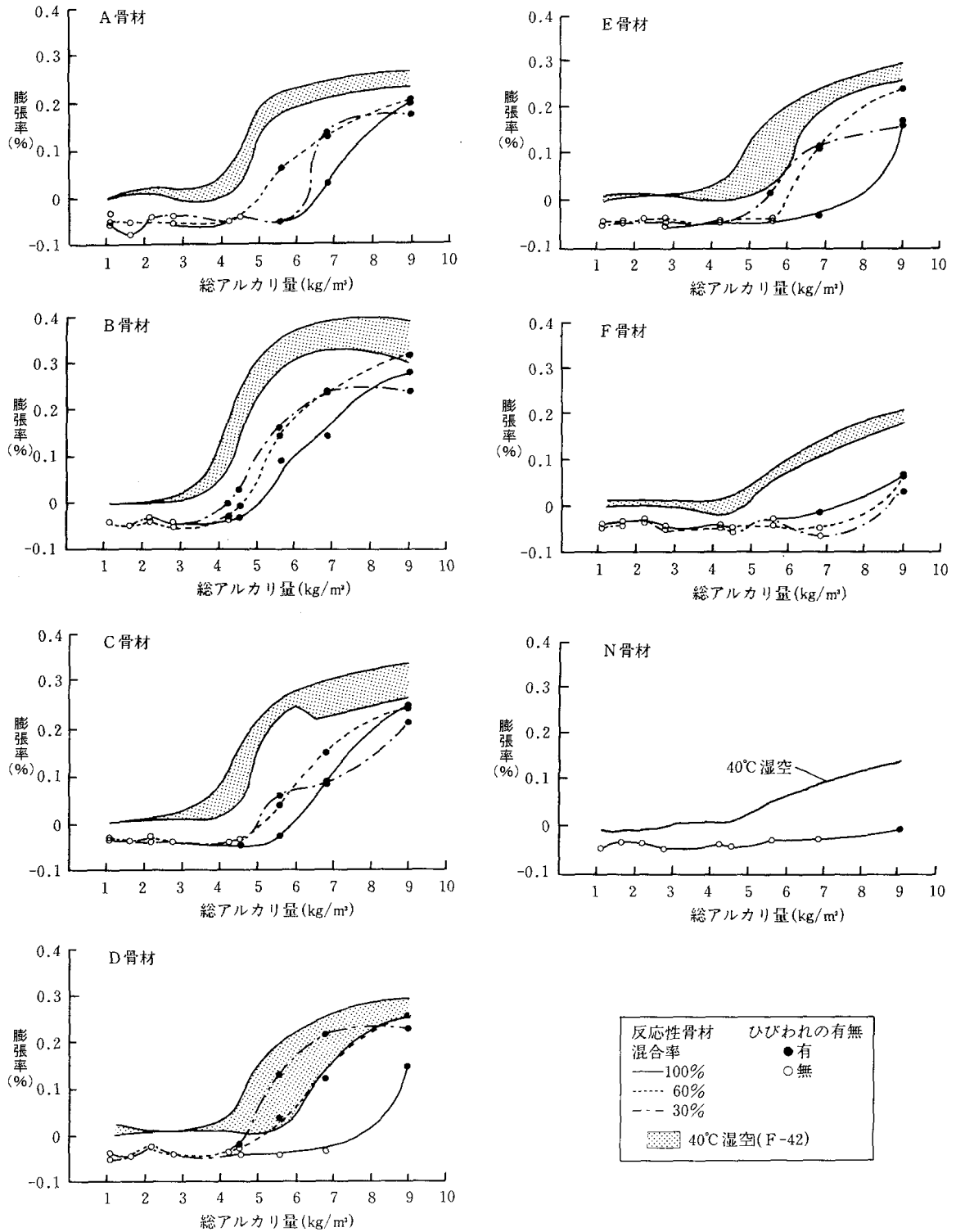


図 10.13 屋外暴露におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率

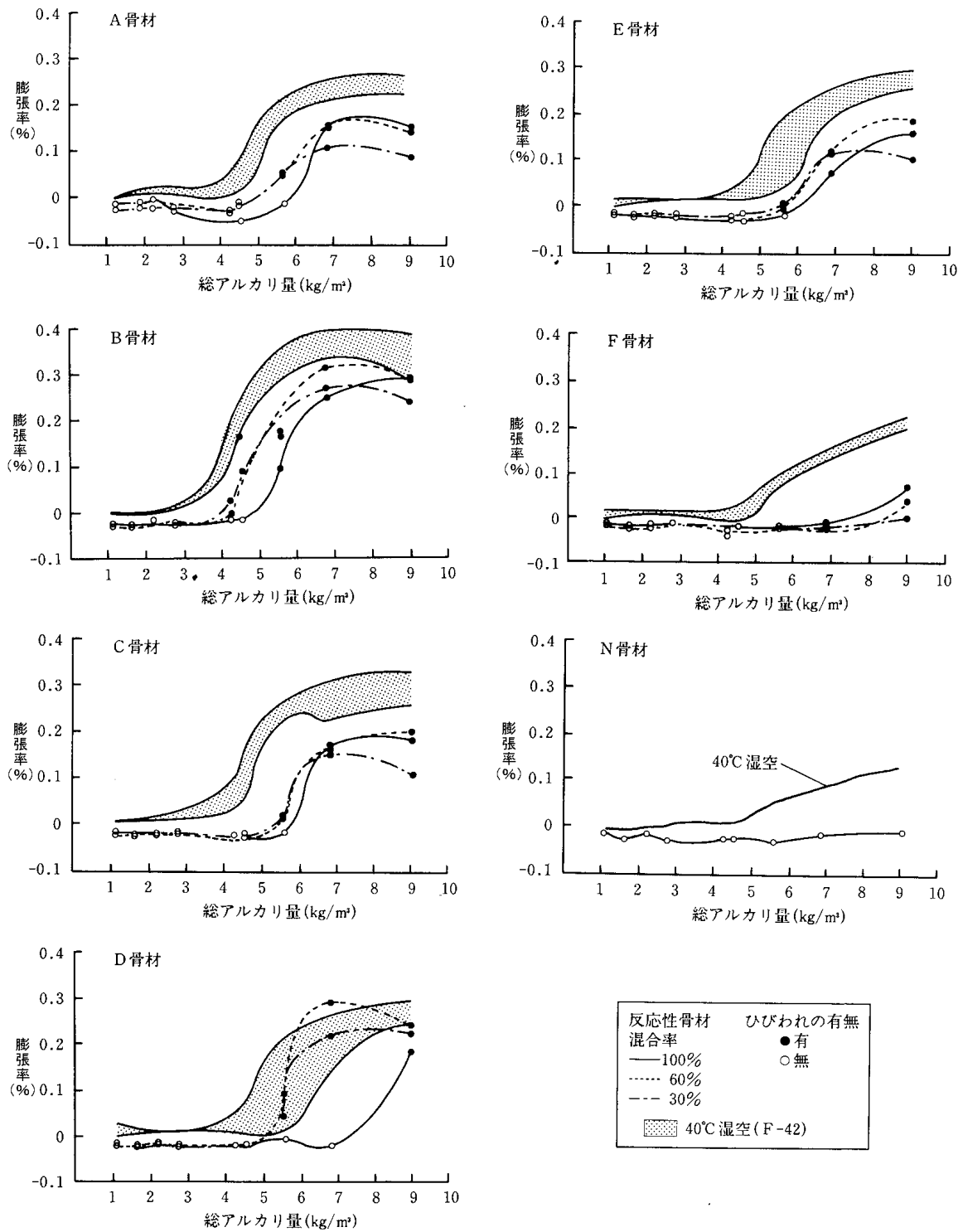


図 10.14 20 海水反復浸漬におけるコンクリートの総アルカリ量と膨張率

(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。

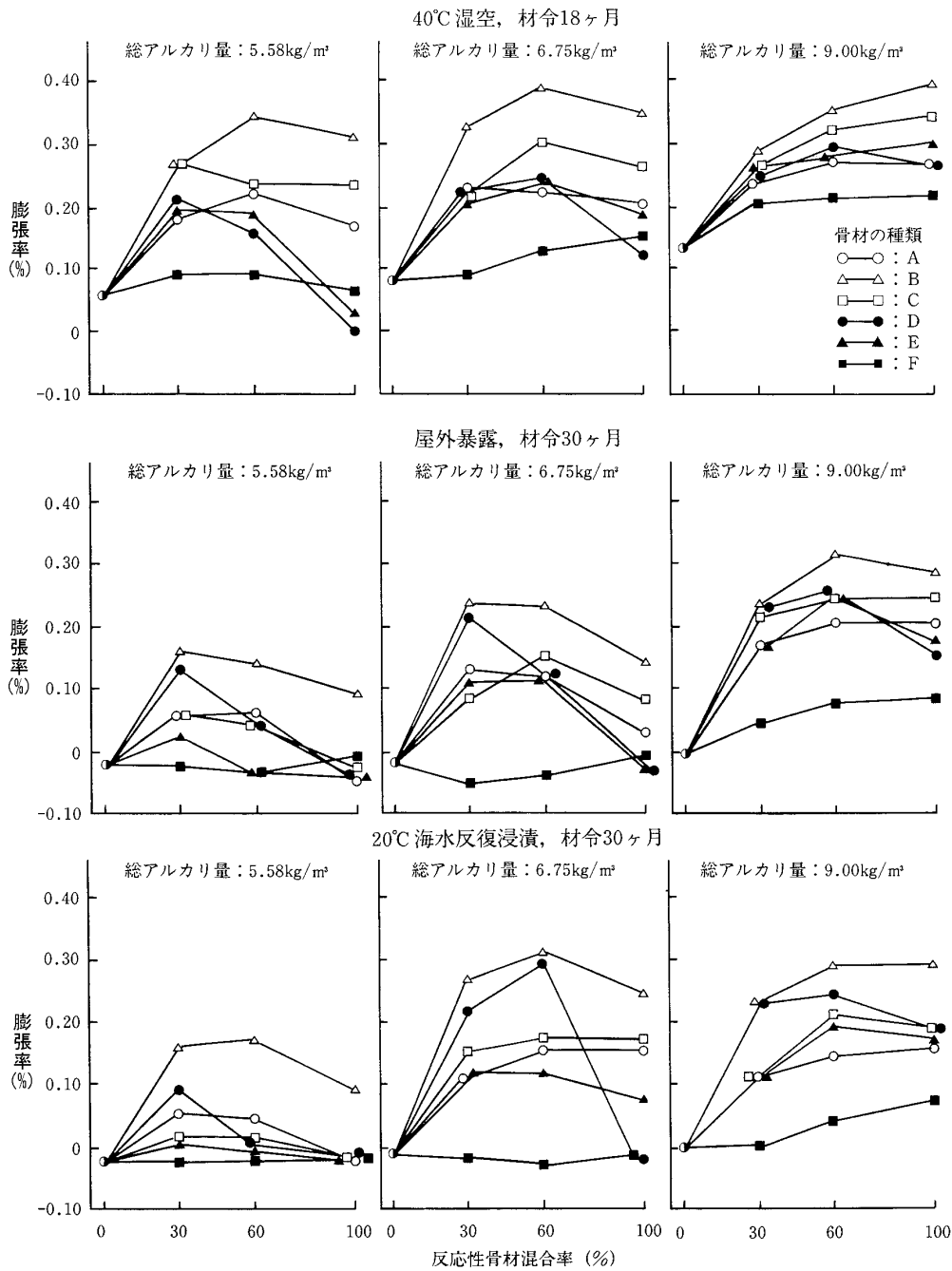


図 10.15 暴露条件別の反応性骨材混合率と膨張率

(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  $5.1\text{kg/m}^3$  および  $5.5\text{kg/m}^3$  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  $3.0\text{kg/m}^3$  以下に規制する方法が妥当であることが示された。

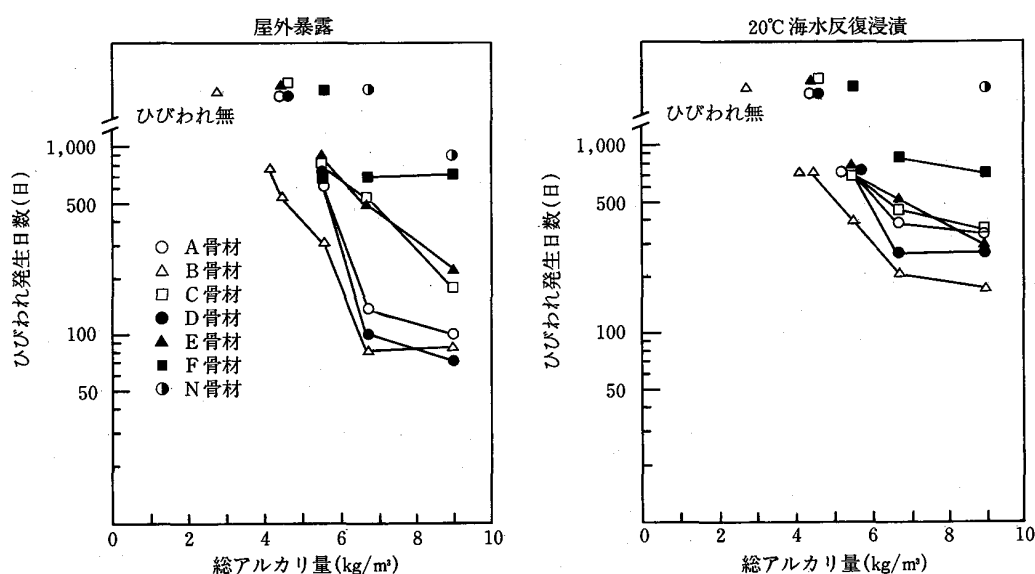


図 10.16 暴露環境別の総アルカリ量とひび割れ発生日数

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。

{	<b>【試験条件】</b>	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
	<b>【要因】</b>	・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 <sup>3</sup> , 600kg/m <sup>3</sup>
	・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。

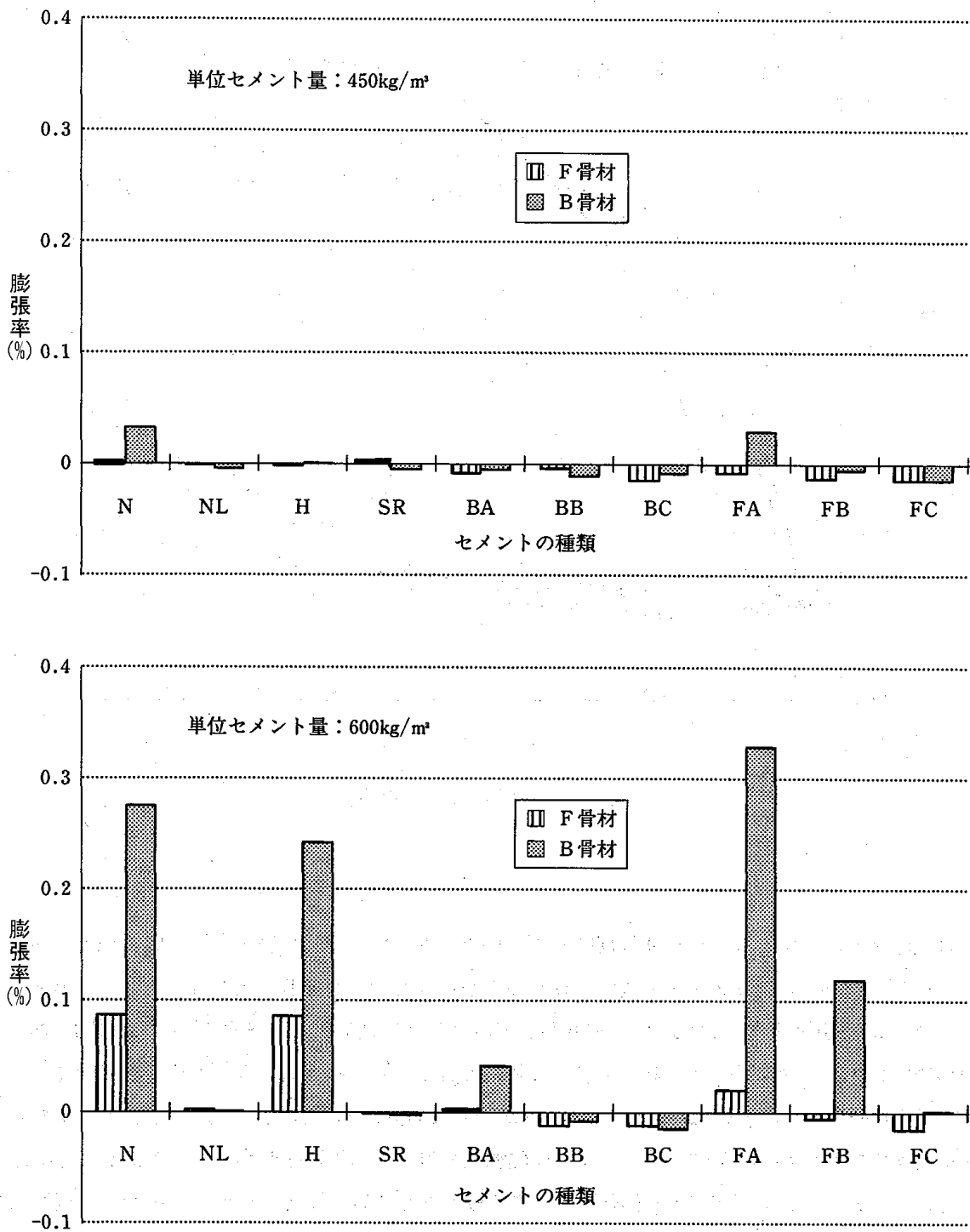


図 10.17 セメントの種類と膨張率 (材齢 18 ヶ月)

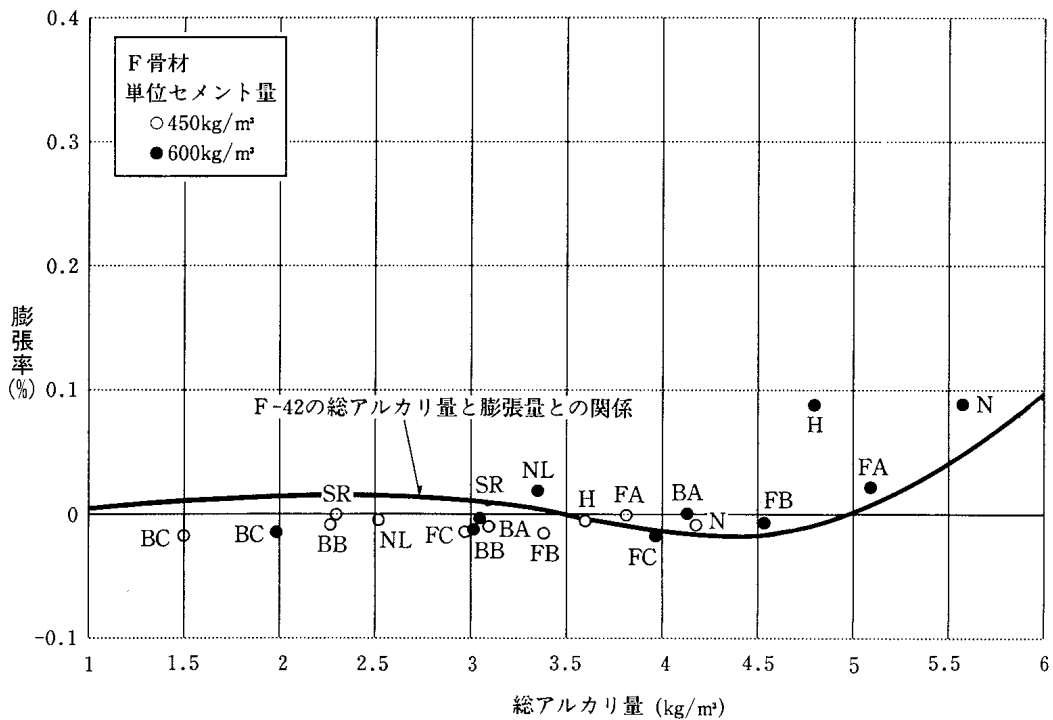
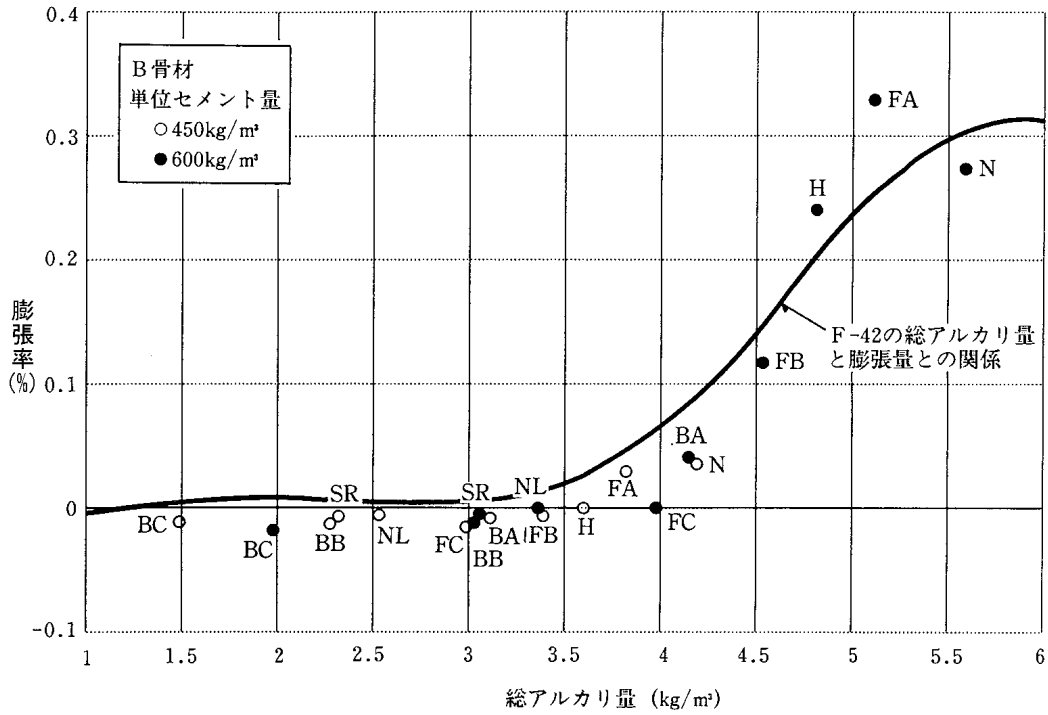


図 10.18 総アルカリ量と膨張率 (材齢 18 ヶ月)

(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)