



粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートの劣化に関する共同研究報告書(その1)

昭和62年11月

建設省土木研究所
地質化学部 地質研究室
株式会社 間 組
株式会社 熊 谷 組
大成建設 株式会社

Copyright © 1987 by P.W.R.I.

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

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

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートの劣化に関する共同研究報告書(その1)

地質研究室	室長	市川	慧彦
研究員	脇坂	安政	和
	長	沢	
(株)間組* 技術研究所第一部	次長	加藤	重雄
	主査	大崎	信
	副主査	前田	肇
	研究員	佐々木	
(株)熊谷組* 技術研究所 材料研究部	次長	田中	健治郎
地質基礎研究部	主任研究員	三谷	哲
	研究員	永沢	毅
材料研究部	研究員	林	順三
大成建設(株)* 技術研究所 材工研究室	室長	内藤	隆文
バイオ研究室	室長	金子	誠二
材工研究室	主席研究員	松岡	康訓
	主任	宇治	隆公
	主任	藤原	靖

要 旨

粘土鉱物の1つであるモンモリロナイトを含有した骨材を使用したコンクリートの劣化現象を把握すること、モンモリロナイト含有骨材のコンクリート用骨材としての良否の判定法の開発、骨材として使用する場合の対策法の開発などを目的に種々の試験を行った。骨材としてモンモリロナイトを含有しているもの4種、含有していないもの1種を選定し、試験として原石の試験、粘土分の鉱物化学試験、モルタルの試験およびコンクリートの試験を実施した。その結果、モンモリロナイトのタイプによってモルタルおよびコンクリートに生じる現象は異なっていることがわかった。

キーワード：粘土鉱物・モンモリロナイト・モルタル・コンクリート・骨材

ま え が き

近年、モンモリロナイト（粘土鉱物の一種）を含んだ岩石を骨材として使用したコンクリートに、凝結現象、ひびわれなどが生じる例が知られてきている。これらの現象はコンクリート打設時の施工性を低下させるとともに、耐久性や強度を低下させるなど、コンクリート構造物にとって問題がある。そこで本共同研究では、モンモリロナイト含有骨材がモルタルやコンクリートに引き起こす現象の把握および劣化機構の解明、含有骨材の使用の適否の判定法の開発、含有骨材の無害化利用法の開発、さらに原石山の調査・評価法の開発を目的に種々の試験および検討を行うこととした。まず、60年度にはコンクリートの劣化事例の調査をし、試験用骨材選定のための原石の各種試験および粘土分の鉱物化学試験を実施した。61年度には、さらに試験用骨材の選定を行い、選定された骨材を用いて原石・モルタル・コンクリートの各種試験を実施した。

本報告は主として61年度に実施した試験の結果をまとめたものである。なお、本共同研究は62年度以降も引き続き実施されている。

目 次

まえがき

1. 原石の性質	1
1.1 岩石記載	1
1.2 全岩試料のX線回析	2
1.3 全岩化学組成	2
1.4 原石中の粘土鉱物の鉱物化学的性質	4
1.4.1 陽イオン交換容量	4
1.4.2 交換性陽イオン	4
1.4.3 メチレンブルー吸着量	4
1.4.4 遊離ケイ酸	5
1.4.5 定方位X線回析	5
1.4.6 示差熱分析	6
1.4.7 赤外吸収スペクトル	7
1.5 物理量・力学量	8
1.5.1 初期物理量	8
1.5.2 力学量	9
1.6 膨潤度	10
1.7 乾湿繰り返し	11
1.7.1 80℃ 炉乾	11
1) 重量変化	11
2) 長さ変化	11
3) 動弾性係数の変化	11
1.7.2 60℃ 炉乾	11
1) 重量変化	11
2) 長さ変化	11
3) 動弾性係数の変化	11
1.7.3 40℃ 炉乾	18
1) 重量変化	18
2) 長さ変化	18
3) 動弾性係数の変化	18
1.7.4 20℃, 60% R H 乾燥	18
1) 重量変化	18
2) 長さ変化	18

3) 動弾性係数の変化	18
1.7.5 20℃, 44% R H 乾燥	18
1) 重量変化	18
2) 長さ変化	26
3) 動弾性係数の変化	26
1.8 乾燥収縮	28
1.8.1 重量変化	28
1.8.2 長さ変化	28
1.9 凍結融解	31
1.9.1 重量変化	31
1.9.2 吸水率の変化	32
1.9.3 動弾性係数の変化	33
1.10 骨材試験	33
1.10.1 比重・吸水率	33
1.10.2 すりへり抵抗	33
1.10.3 薬液による安定性	33
1.11 アルカリシリカ反応性	35
1.12 まとめ	36
 2. モルタルの性質	 39
2.1 配 合	39
2.2 凝結硬化速度	39
2.3 フロー値	41
2.4 強 度	41
2.4.1 圧縮強度	41
2.4.2 曲げ強度	43
2.5 水和発熱過程	45
2.6 細孔溶液の化学組成	51
2.7 まとめ	60
 3. コンクリートの性質	 61
3.1 配 合	61
3.1.1 使用材料	61
3.1.2 コンクリートの種類・配合	63
3.2 フレッシュコンクリートの性質	64
3.2.1 スランプ	64

3.2.2 ブリージング	64
3.2.3 凝結硬化速度	66
3.3 強度	67
3.3.1 圧縮強度	67
3.3.2 弾性係数	67
3.3.3 曲げ強度	67
3.4 乾燥収縮	72
3.4.1 重量変化	72
3.4.2 長さ変化	72
3.5 乾湿繰り返し	75
3.5.1 重量変化	75
3.5.2 長さ変化	75
3.6 凍結融解	77
3.6.1 重量変化	77
3.6.2 相対動弾性係数	77
3.7 若材令期の長さ変化	79
3.8 ブリージング水の化学組成	81
3.9 まとめ	83
4. まとめ	85
5. おわりに	87

1. 原石の性質

1.1 岩石記載

各種試験に用いる骨材のうち粘土鉱物（モンモリロナイト）含有骨材として4種（A, B, C, I）と、粘土鉱物を含まない標準骨材として1種（K）を選定した。Aは北海道産の中新世の安山岩、Bは青森県産の中新世の粗粒玄武岩、Cは宮城県産の中新世の安山岩、Iは山形県産の中新世の粗粒玄武岩、Kは茨城県産の二畳紀の砂岩である。

表-1に原石の顕微鏡観察の結果を示す。モンモリロナイト含有骨材は、安山岩類（A・C）と粗粒玄武岩類（B・I）に区分できる。標準骨材は中粒のアルコース質砂岩で、一部、礫質な部分も含まれている。

表-1 原石の顕微鏡観察の結果

モンモリロナイト含有骨材

	*	岩 石 名	斑 晶 鉱 物	石 基 鉱 物
A	1	含石英・複輝石安山岩 (ピロタキシティック)	Qz・Pl・Cpx・Opx・Mg・Ap	Pl・Px・Mg・Ap・Gl
	2	玄武岩 (填間状) 粗粒玄武岩含有安山岩	Pl・Opx?・Cpx・Mg・Ap 粗粒玄武岩: Pl・Px・Mg 安 山 岩: Pl・Px・Mg・Ap	Pl・Px?・Mg Pl・Ch・Mg・Gl
	3	単斜輝石安山岩 (填間状)	Pl・Cpx・Ap・Mg・Ch	Pl・Ch・Mg・Gl・Cpx・Rt
B	1	玄武岩 (填間状)	Pl・Cpx・Opx	Pl・Px・Mg・Il・Ch
	2	粗粒玄武岩 (オフィティック)	Pl・Cpx・Ch・Mg・Sp	
	3	粗粒玄武岩 (オフィティック)	Pl・Cpx・Ch・Sp・Qz・Cal	
C	1	含石英・輝石安山岩 ガラス基流晶質～ ピロタキシティック	Qz・Pl・Cpx・Opx・Mg	Pl・Px・Mg・Ch・Cal・Gl
	2	含石英・複輝石安山岩 (ピロタキシティック)	Pl・Cpx・Opx?・Mg・Qz	Pl・Qz・Cpx・Ch・Mg・Ap・ Cal
	3	含石英・輝石安山岩 填間状～ ピロタキシティック	Pl・Cpx・Qz・Mg・Ch・Cal	Pl・Ch・Mg・Cal・Cpx
I	2	玄武岩 (サブオフィティック)	Pl・Cpx	Pl・Cpx・Ch・Opx・Qz・Mg
	3	粗粒玄武岩 (ドレリティック)	Pl・Cpx・Ch・Mg	

標準骨材

	*	岩 石 名	砂 粒	マ ト リ ッ ク ス
K	2	中粒砂岩	Qz・Kf・Pl・Mc・珪化岩・ 石英絹雲母石・シルト岩	Ms・Bi・Cal・Ch・Mg・Zr
	3	アルコース質砂岩	Qz・Kf・Pl・頁岩	Cal・Bi・Mg・Clay

*実施機関

Qz (石英) Pl (斜長石) Kf (カリ長石) Mc (微斜長石) Px (輝石) Cpx (単斜長石)
Opx (斜方輝石) Hb (角閃石) Ch (緑泥石) Cal (方解石) Mg (磁鉄鉱) Il (チタン鉄鉱)
Ap (リン灰石) Rt (ルチル) Sp (スフェーン) Gl (ガラス) Ms (白雲母) Zr (ジルコン)

1.2 全岩試料のX線回折

全岩粉末試験のX線回折パターンを図-1に示す。同定された鉱物は次に示すとおりである。

A：高温型斜長石・石英・モンモリロナイト・緑泥石

B：高温型斜長石・石英・緑泥石・モンモリロナイト

C：高温型斜長石・石英・モンモリロナイト

I：高温型斜長石・モンモリロナイト・石英・エンスタタイト

K：低温型斜長石・石英・正長石・方解石・緑泥石・イライト

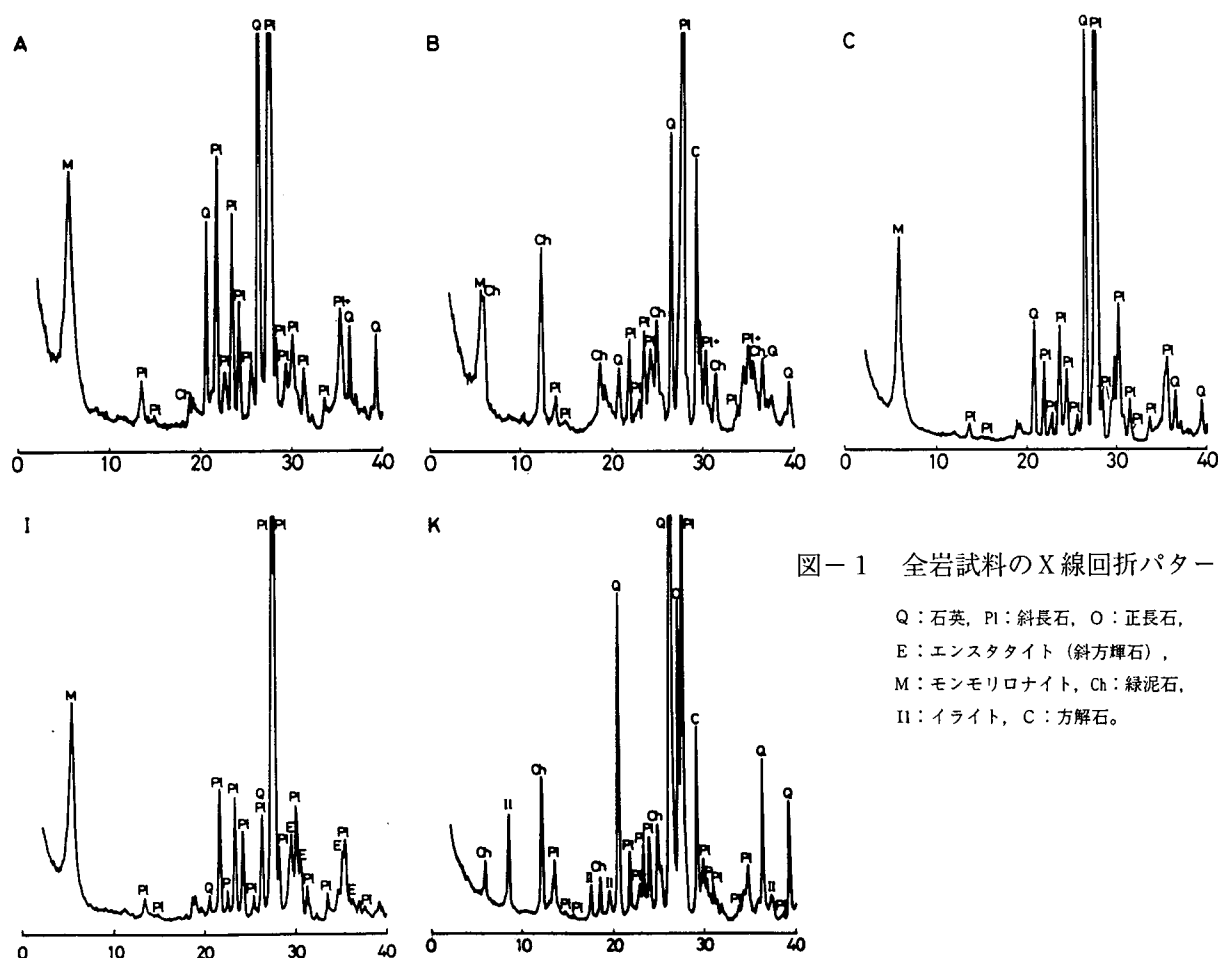


図-1 全岩試料のX線回折パターン

Q：石英, Pl：斜長石, O：正長石,
E：エンスタタイト (斜方輝石),
M：モンモリロナイト, Ch：緑泥石,
Il：イライト, C：方解石。

1.3 全岩化学組成

原石の全岩化学組成を表-2に示す。砂岩であるKを除く各骨材 (火成岩類) の属する岩系は次のようである。

まず, $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 図 (図-2) でみると, Bが境界線付近にあるもののすべて非アルカリ岩系であることがわかる。次に $\text{FeO}^* / \text{MgO} - \text{FeO}^*$ (図-3) および $\text{FeO}^* / \text{MgO} - \text{SiO}_2$ (図-4) では, Aは確実にカルクアルカリ岩系, Iは確実にソレイト岩系, B・Cは両者の境界付近にあることがわかる。

$$\text{FeO}^* = \text{FeO} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$$

表-2 原石の全岩化学組成

	A-1	A-2	A-3	A-4	B	C	I(2)*	I(4)*	K(2)*	K(4)*
SiO ₂ (%)	56.71	59.91	60.12	60.71	45.01	55.55	48.83	50.18	72.74	73.64
TiO ₂ (%)	0.62	0.59	0.53	0.62	0.88	0.72	1.23	1.01	0.35	0.42
Al ₂ O ₃ (%)	15.17	15.06	15.58	15.92	17.21	15.87	16.78	16.04	13.73	11.18
Fe ₂ O ₃ (%)	3.16	2.91	2.12	2.71	5.42	4.02	5.34	5.15	0.35	0.95
FeO (%)	4.28	3.64	3.75	3.52	3.75	3.94	5.72	5.73	1.73	1.45
MnO (%)	0.06	0.04	0.06	0.06	0.09	0.16	0.19	0.16	0.04	0.02
MgO (%)	4.23	3.18	2.94	2.57	7.62	3.65	5.02	5.92	1.21	1.65
ZnO (ppm)	144	168	79	155	176	198	147	—	45.8	—
CaO (%)	6.06	5.79	5.36	5.76	10.57	7.73	8.40	8.61	2.25	2.25
Na ₂ O (%)	2.97	2.88	2.93	3.00	1.77	2.61	2.75	2.56	2.42	2.34
K ₂ O (%)	1.23	1.30	1.35	1.37	0.27	0.47	0.50	0.51	2.99	2.97
P ₂ O ₅ (%)	—	—	—	—	—	—	—	0.16	—	0.08
V ₂ O ₅ (ppm)	221	104	255	134	268	145	555	—	39	—
S (%)	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.08	0.01	0.00	0.05
SO ₃ (%)	—	—	—	—	—	—	—	<0.01	—	<0.01
CO ₂ (%)	—	—	—	—	—	—	—	0.10	—	1.43
H ₂ O (%)	2.26	1.74	1.59	1.45	2.97	2.10	1.63	1.91	0.03	1.81
H ₂ O- (%)	1.40	0.61	1.11	0.87	2.75	1.38	1.95	2.03	1.27	0.15
Total (%)	98.21	97.70	98.40	98.60	98.37	98.25	98.49	100.08	98.77	100.37

* () 内の数字は分析実施機関を表す。

A-1 : 原石, A-2 : 40mm, A-3 : 25mm, A-4 : 砂, I-1・K-1 : 粗骨材, I-2・K-2 : 細骨材

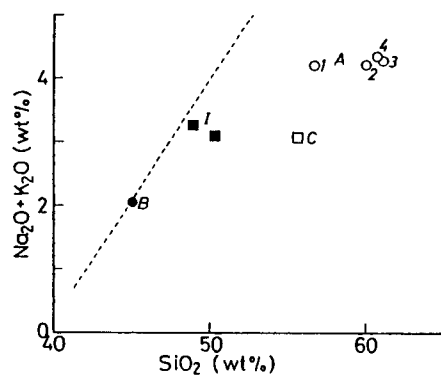


図-2 SiO₂ - (Na₂O + K₂O) 図

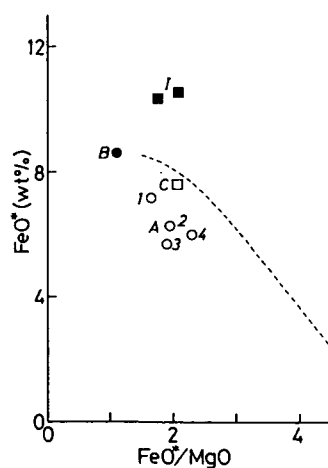


図-3 FeO*/MgO - FeO* 図

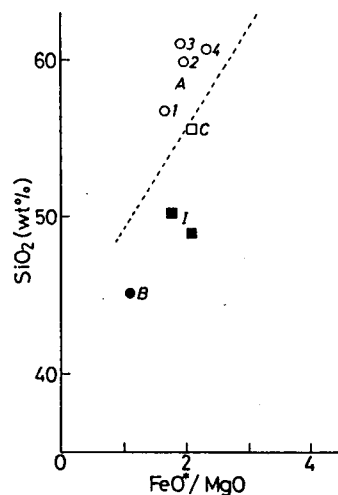


図-4 FeO*/MgO - SiO₂ 図

1.4 原石中の粘土鉱物の鉱物化学的性質

1.4.1 陽イオン交換容量

表-3に原石の鉱物化学的分析結果を示す。陽イオン交換容量（以下C E C）は原石では，A，B，Cが30meq/100g以上と粘性土などの風化物なみに大きな値を示している。Aには原石，粗骨材（40-20mm），粗骨材（<20mm），細骨材の4種があり，C E Cは順に減少し17meq/100g程度になっている。これは原石を粉砕する過程で粘土鉱物に変質した部分が除去されたためである。

A，B，CおよびIは後述するように，粘土鉱物の大部分はスメクタイトであり，C E Cの大部分が永久荷電であると考えられる。これに対して，KのC E Cは約8meq/100gと小さく，粘土鉱物にはスメクタイトを含まないので，粘土鉱物やシリカ鉱物の破壊原子価由来のpH依存性であると考えられる。

表-3 原石の鉱物化学的性質

	A-1	A-2	A-3	A-4	B	C	I-1	I-2	K-1	K-2
pH	10.1	10.0	10.0	10.0	9.4	9.7	—	—	—	—
C.E.C. (meq/100g)	32.7	28.8	27.1	16.6	40.3	33.2	15.9	18.5	8.4	8.7
交換性陽イオン	Ca(%)	20.4	23.1	23.0	25.2	45.9	58.9	15.0	17.3	66.4
	Mg(%)	8.2	11.1	9.9	8.4	13.5	6.4	4.0	5.6	1.5
	K(%)	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.9	1.1
	Na(%)	9.2	7.3	7.2	3.5	0.6	1.0	2.7	3.2	0.5
	Total(%)	38.1	41.9	40.5	37.4	60.2	66.5	21.8	26.3	69.4
M.B.(mmol/100g)	15	12	12	7	11	10	6	6	1	1
遊離ケイ酸(%)	9.2	5.0	5.0	4.5	1.1	1.8	3.1	3.3	0.6	0.7
溶解ケイ酸(%)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

A-1：原石，A-2：40mm，A-3：25mm，A-4：砂，I-1・K-1：粗骨材，I-2・K-2：細骨材

1.4.2 交換性陽イオン

交換性陽イオン（表-3）はカルシウムイオンが主体であるが，特にC E Cの大きいA，B，Cの内B，Cは10~20%がマグネシウムイオンで残りは全てカルシウムイオンである。これに対してAはナトリウムイオン，マグネシウムイオンをそれぞれ10~20%含有している。

1.4.3 メチレンブルー吸着量

メチレンブルー吸着量（表-3）は，C E Cの値と同様にA，B，Cで10mmol/100g以上と大きく，メチレンブルー吸着量とC E Cとは良く対応している。

1.4.4 遊離ケイ酸

遊離ケイ酸はNaOH溶解法（表-3 上段）とDCB溶解法（表-3 下段）を実施した。DCB溶解法では遊離ケイ酸は抽出されなかった。NaOH溶解法による遊離ケイ酸はAが他に比べてやや高い値を示しているが、アルカリシリカ反応を示す骨材の値よりも小さい値である。

1.4.5 定方位X線回折

定方位法によるX線回折結果を図-5に示す。A、B、C、Iの粘土部分の粘土鉱物はCa飽和粘土のエチレングリコール処理やMg飽和粘土のグリセロール処理で、低角度側への14~15Åピークの移動が生じ、K飽和粘土の600℃加熱処理で、12.6から10Åへのピークの移動からモンモリロナイトであることがわかる。

Kは7.2ÅのピークがK飽和粘土の600℃加熱処理で消滅することからカオリナイト、10Åのピークが各処理で全く変化しないことからイライト、14Åのピークが各処理で全く変化しないことから緑泥石を含むことがわかる。

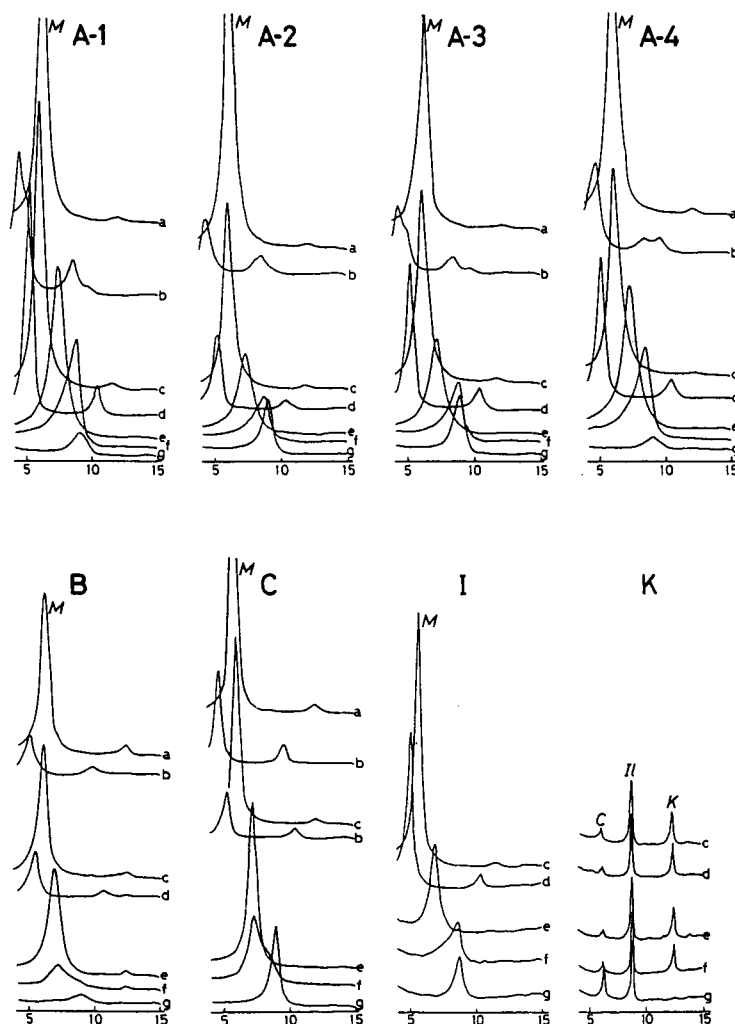


図-5 2ミクロン以下の試料の定方位X線回折パターン

- a : Mg 飽和, b : Mg 飽和+グリセロール, C : Ca 飽和
d : Ca 飽和+エチレングリコール, e : 飽和 ; f : K 飽和+300℃加熱,
g : K 飽和+600℃加熱

1.4.6 示差熱分析

各試料の2ミクロン以下Mg飽和粘土部分の示差熱分析結果を図-6に示す。

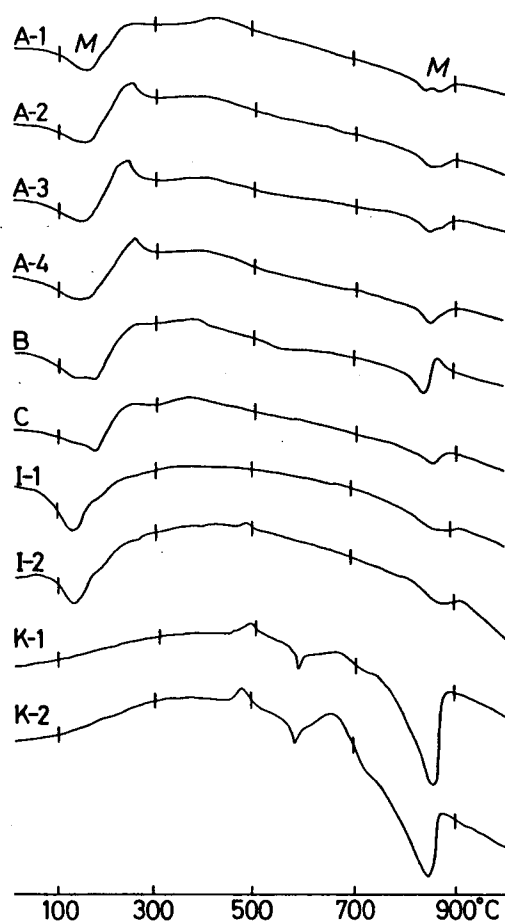


図-6 2ミクロン以下Mg飽和粘土の示差熱曲線

Aは100~200℃に顕著な吸熱ピークが有り、このピークはモンモリロナイトの層間水の脱水によるものである。また200~300℃に発熱ピークを示しており、これはサポナイトに見られるものである。800℃までは顕著なピークは見られず800~900℃に吸熱ピークが見られる。これは珪酸塩層中のOH脱水によるもので、モンモリロナイト族のなかでもMg成分の多いヘクライト、サポナイト、スティーブンサイトに見られるものである。

Bは100~200℃に吸熱ピークが有り、このピークはモンモリロナイトの層間水の脱水によるものである。800~900℃に吸熱ピークと発熱ピークを示しており、これは珪酸塩層中のOHの脱水によるものであるが、モンモリロナイト、サポナイトと緑泥石の混合層鉱物に見られるものである。しかしX線回析分析では今のところ緑泥石との混合層鉱物であるか否かは今のところ明らかではない。

C, Iは100~200℃に吸熱ピークが有り、このピークはモンモリロナイトの層間水の脱水によるものである。800~900℃に吸熱ピークは見られる。これはサポナイト、スティーブンサイトに見られるものである。

Kは 200℃以下に吸熱ピークが無いのでカオリナイト，イライト，緑泥石の存在が考えられる。600℃付近に明瞭な吸熱ピークがみられ，カオリナイト，イライト，緑泥石の存在がわかる。800～900℃に吸熱ピークと発熱ピークを示しており，イライト，緑泥石のそれに類似している。

1.4.7 赤外吸収スペクトル

赤外線吸収スペクトル分析結果を図-7に示す。赤外線吸収スペクトルでの粘土鉱物の研究は，粘土

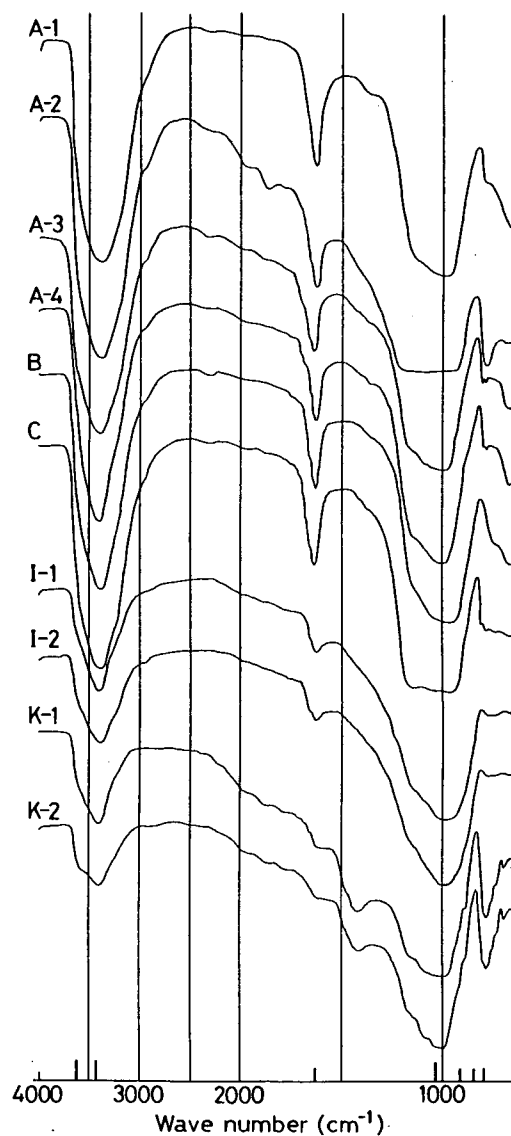


図-7 2ミクロン以下Mg飽和粘土の赤外吸収スペクトル

鉱物の持つOHに起因するOH振動，O-H-X振動と4面体シート中のSi(Al)に関係したSi-O振動，Si-O-X振動が測定の対象となっている。一般に粘土鉱物でみられる普通赤外域での吸収線は，3300～3800cm⁻¹に現れるO-Hの伸縮振動と3400cm⁻¹付近に現れる吸着水あるいは層間水に起因する吸収線，1200～900cm⁻¹付近に現れるSi-O振動，1000～700cm⁻¹付近に現れるO-H-Xの振動，800

～500 cm^{-1} 付近に現れるSi-O-X振動が主なものである。

これらの吸収線はA, B, C, I, K全ての試料に共通してみられ、粘土鉱物の同定の対象となる800 cm^{-1} 以下の吸収線が不明瞭なので、本方法による粘土鉱物種の正確な同定は困難であるが、現在までに一般的に示されている赤外線吸収分析結果による吸収スペクトルの形状と比較すると、A, B, C, Iはいずれも1640 cm^{-1} に明瞭な吸収があるがKにはみられない。これはサポナイト、ヘクトライトのそれに類似している。Kは720～780 cm^{-1} に明瞭な吸収があり、A, B, C, Iには見られない。これはイライトのそれに似ている。

1.5 物理量・力学量

1.5.1 初期物理量

原石の各試験（膨潤度・乾湿繰り返し・乾燥収縮・凍結融解、供試体は直径5cm、長さ10cm）を通して共通に測定されている物理量は、動弾性係数である（ただし、膨潤度・乾燥収縮試験では測定されていない）。図-8に初期動弾性係数のヒストグラムを乾湿試験と凍結融解・一軸圧縮試験に使用した供試体に分けて示す（乾湿試験では湿潤時に、凍結融解試験・一軸圧縮試験では乾燥時に測定しているため）。

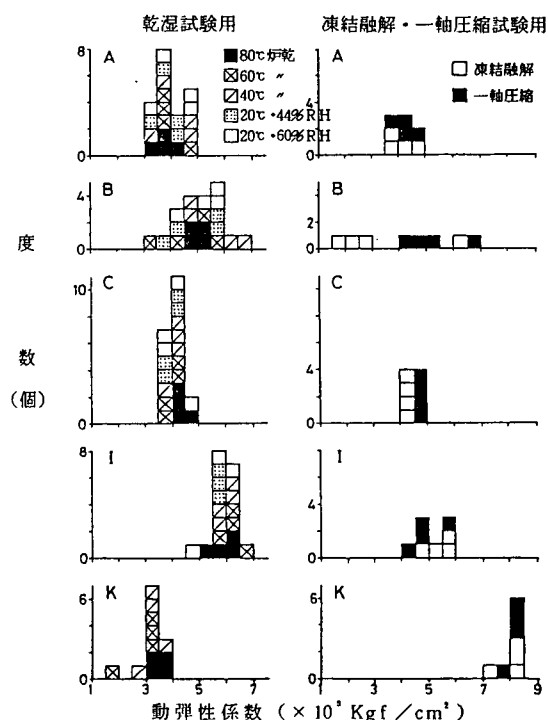
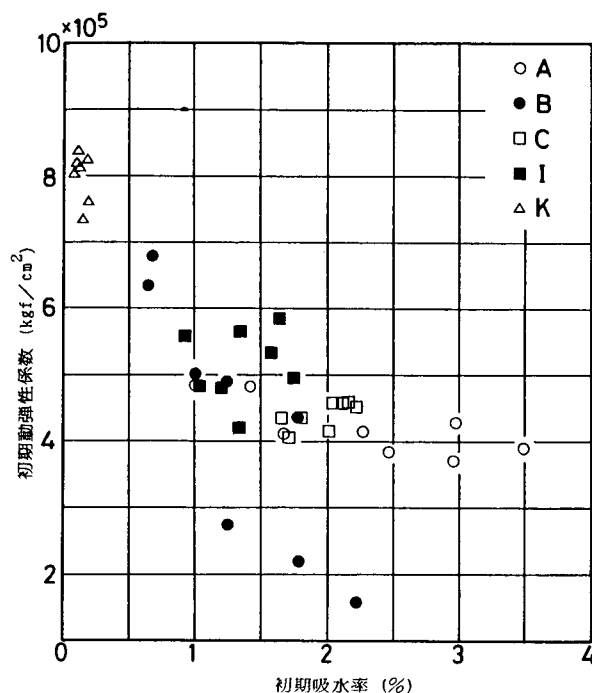


図-8 原石の各試験に用いた供試体の初期動弾性係数

図のように双方の頻度分布は、Kを除くと良く一致している。Kの値が異なっていることについては検討を要する（たぶん試験機関の差によるものと考えられる）。Kを除いて値が最も良好であるのは、Iで以下、C=Aの順となる。これらの個々の動弾性係数は、 $1 \sim 2 \times 10^5 \text{ kg f / cm}^2$ の比較的狭い範囲にある。一方、Bの値は高いものから低いものまでがある。これは、Bの供試体内部に亀裂が伏在してい

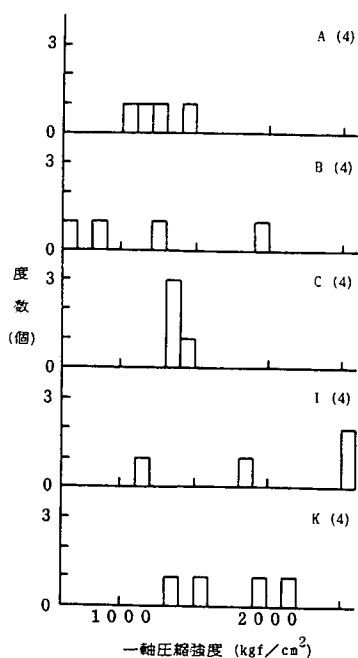
るためと考えられる。これは初期吸水率と初期動弾性係数の関係（図－9）を見るとよくわかる。すなわち、Bでは他の試料と吸水率は同様であっても、動弾性係数のみが低い。



図－9 原石の初期吸水率と初期動弾性係数の関係（凍結融解試験用）

1.5.2 力学量

原石の力学量としては、一軸圧縮強度が測定されている。図－10に強度のヒストグラムを示す。Cは比較的まとまった値を示しているが、それ以外の強度はばらついている。



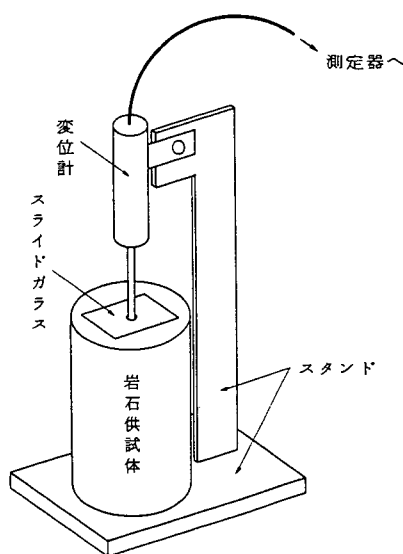
図－10 原石の一軸圧縮強度のヒストグラム

1.6 膨潤度

供試体を図-11のように、水槽の中に設置したスタンドにのせ、上面にスライドガラスを敷き変位計をセットする。変位計とデジタルひずみ測定器とを接続する。脱イオン水を供試体が完全に浸るまで加えて、ただちに初期値をとる。この後経時的に測定する。

測定は、試験開始後 380時間行った。ただしこの時間は測定値の変化がほとんど無くなった時点である。

図-12に膨潤度の測定結果を示した。Aは時間の経過とともにほぼ直線的に膨潤している。これに対してB, C, Iは 120時間位では膨潤が終了し、その後時間が経過してもほとんど膨潤はみられない。Kは全く膨潤はみられない。このような膨潤特性の違いは、粘土鉱物、ここではモンモリロナイトの存在部分の違い、例えば経過とともに直線的に膨潤するものは、モンモリロナイトは岩石の骨格構造中に存在しており、120時間位で膨潤が終了するものは空隙を充填していることを反映している可能性が考えられる。また、モンモリロナイト中の交換性陽イオンが、Aでは他に比べNaに富んでいることも原因として考えられる。



変位計の固定

図-11 原石の膨潤度の測定方法

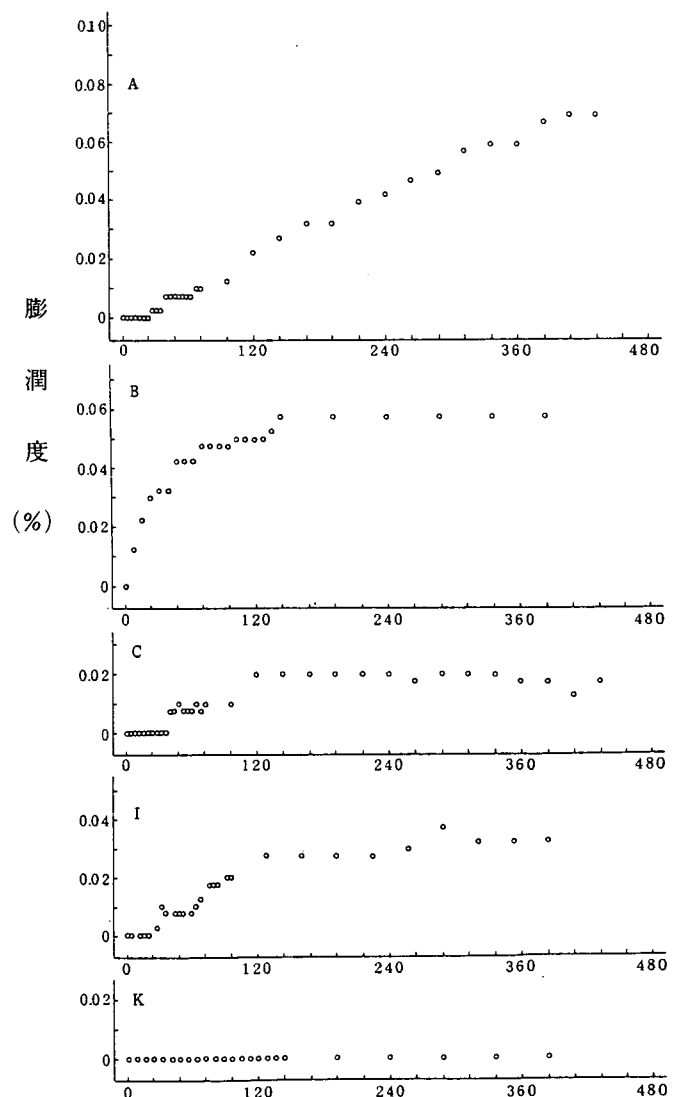


図-12 原石の膨潤度の経時変化

1.7 乾湿繰り返し

1.7.1 80℃炉乾

1) 重量変化 (図-13)

あらゆる試料, あらゆる乾燥温度で乾燥時の重量変化率の方が, 湿潤時の率よりも大きい。これは, 岩石が吸水をするからであって, 両者の差は吸水率が大きい試料ほど大きくなっている。よって, 重量減少率の経時変化をみるには, 湿潤時のみ, 乾燥時のみの値を比較する必要がある。

各試料の湿潤時の重量変化は大きい順に, $A > C > I > B > K$ となり, Kではほとんど重量の変化がない。Cは2サイクル目の変化率は大きい, その後はほとんど変化をしていない。B, Kの重量もほとんど変化をしていない。他方, A, Iでは2サイクル目以降も徐々に重量が減少している。すなわち, 全サイクルを通して重量が減少しているのはA, Iで, その他の試料では変化が認められない。

2) 長さ変化 (図-14)

長さ変化には, 湿潤時と乾燥時との値に, 重量変化のときのような明瞭な差が認められない。全試料とも初期サイクルの変化率は小さく (多くは負になっている, すなわち縮んでいる), それ以降, 伸びを示している。

各試料間での変化にあまり差はなく, 特にモンモリロナイトを含有していないKと他試料の傾向が同様であることが注目される。また, 変化率の絶対値は, いずれも+0.5%以下と小さい。

3) 動弾性係数の変化 (図-15)

動弾性係数の変化も長さの変化と同様に, 湿潤時と乾燥時との間に系統的な差は認められない。A, B, Kでは, 減少側から増加側へ, 鋸歯状に変化をしており, 絶対値も大きい。他方, Cでは, 全体的に増加側に値が集中しており, 反対にIでは減少側に値が集中している。一般に岩石の劣化試験を行うと, 動弾性係数は指数関数的に減少するものである。しかし, この試験ではIを除いて, 値が増加しているものが多い。このことはモンモリロナイトを含有していることと関係しているように考えられるが, Kでも同様な傾向を示しており可能性は低い。

1.7.2 60℃炉乾

1) 重量変化 (図-16)

各試料の重量変化の傾向は, 80℃炉乾試験と同様である。但し変化率は80℃炉乾の場合よりもいずれも小さい。

2) 長さ変化 (図-17)

長さ変化も80℃炉乾と同様な傾向を示している。

3) 動弾性係数の変化 (図-18)

動弾性係数も80℃炉乾と同様な傾向を示している。Cで増加側, Iで減少側の値を示しているほか, 鋸歯状の変化をしている。

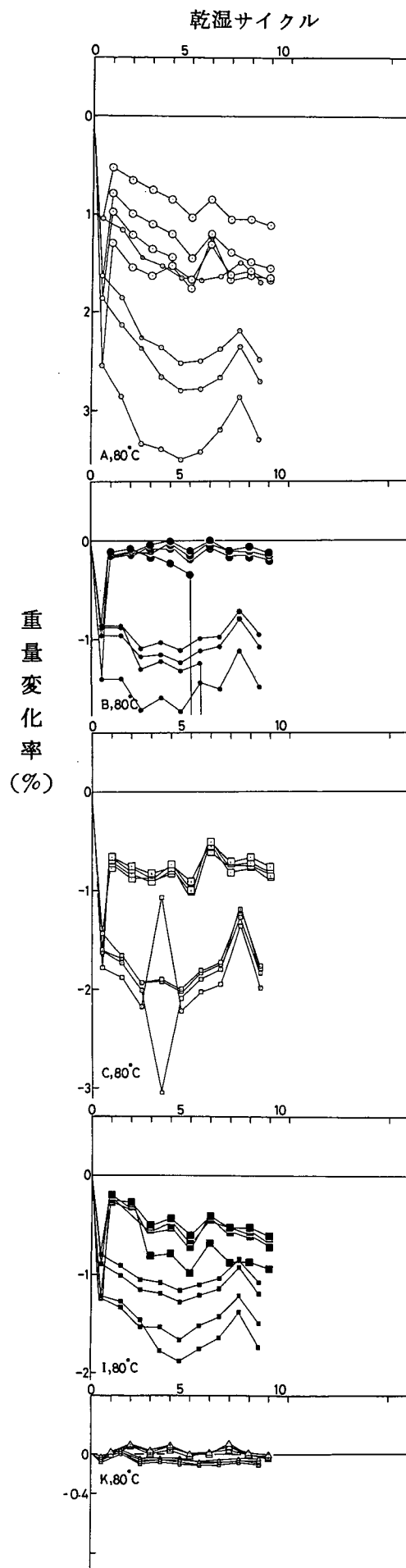


図-13 乾湿繰り返し (80°C 炉乾) による原石の重量変化

乾湿サイクル

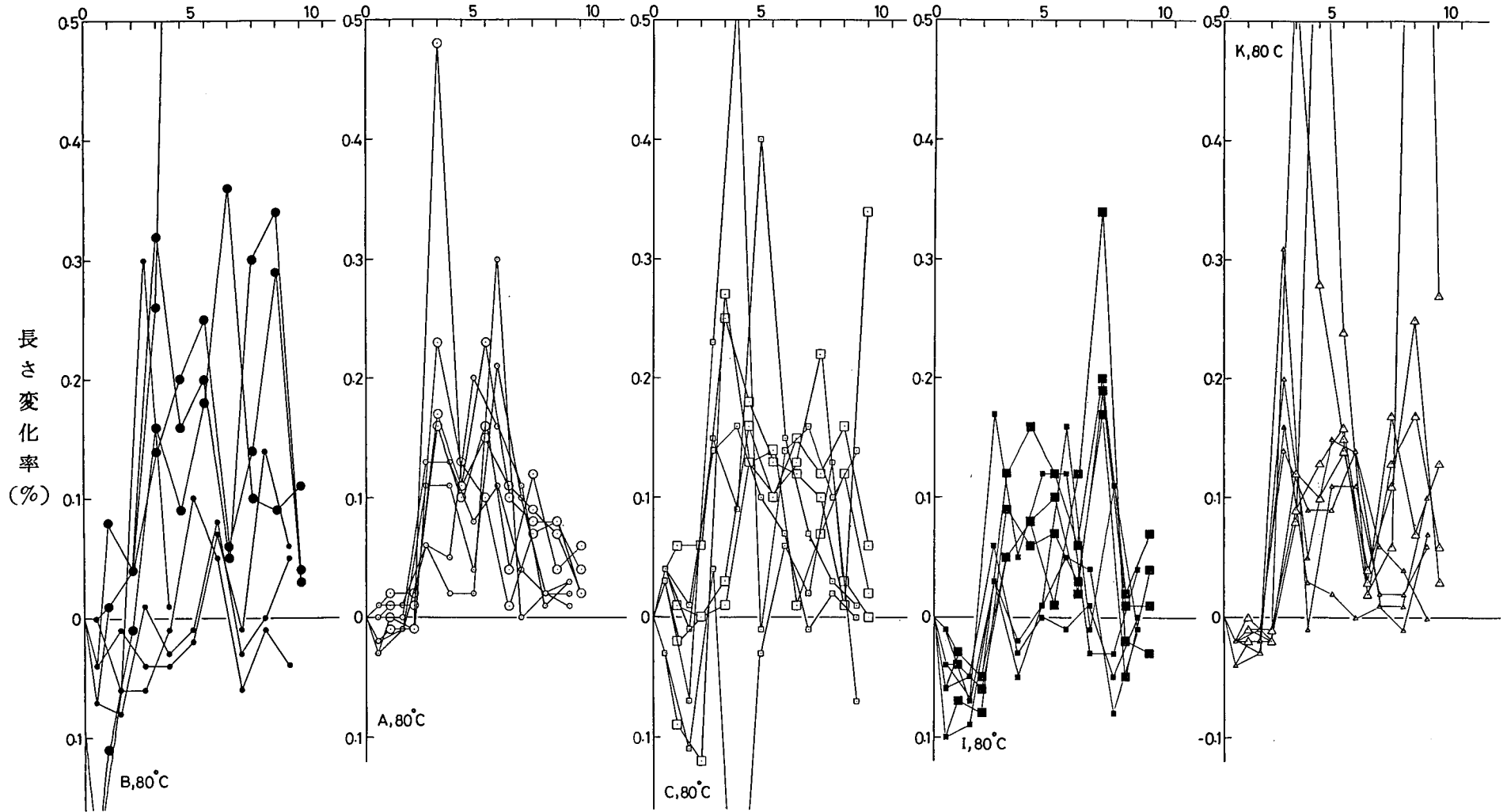


図-14 乾湿繰り返し (80°C 炉乾) による原石の長さ変化

乾湿サイクル

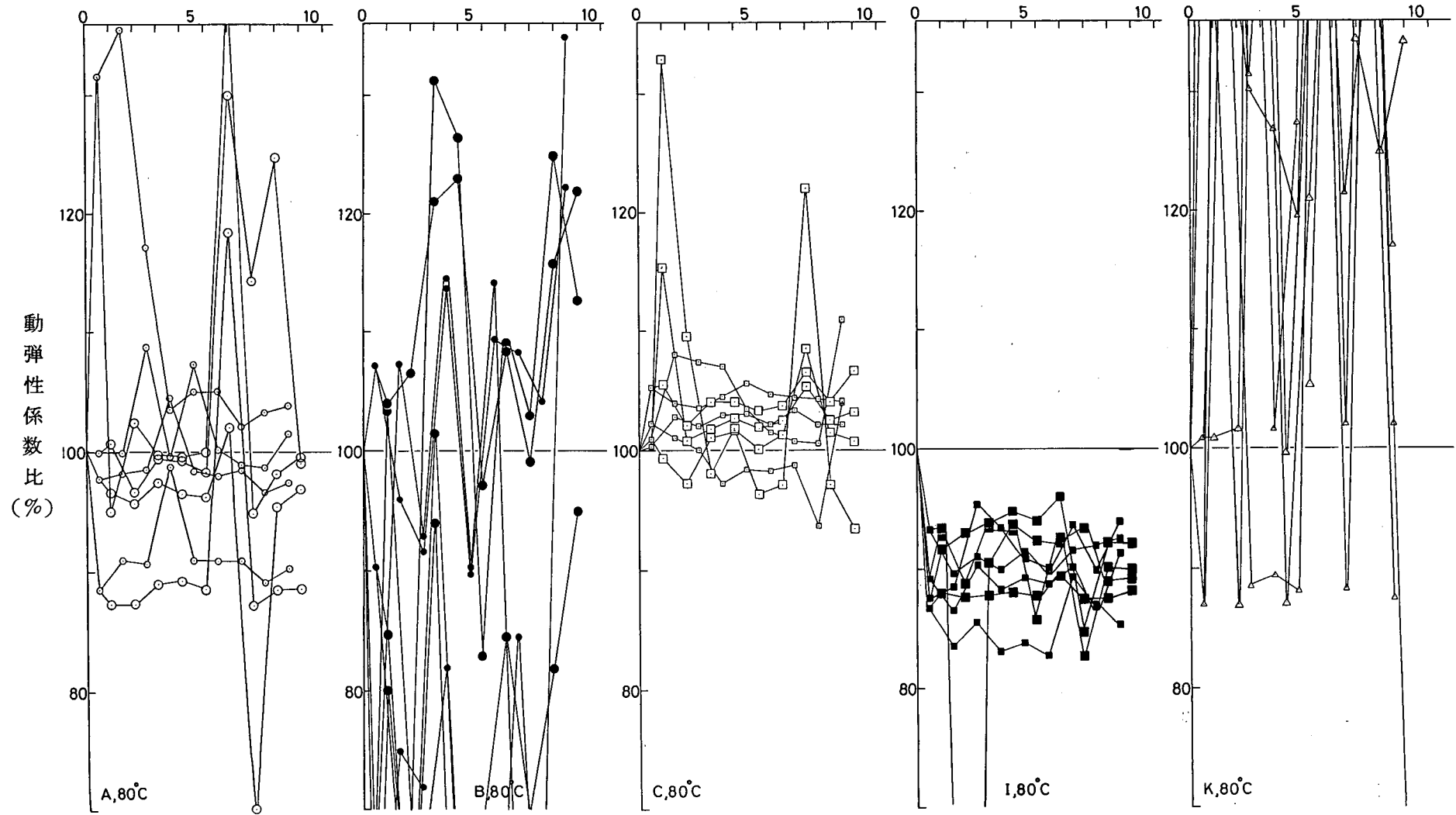


図-15 乾湿繰り返し (80°C 炉乾) による原石の動弾性係数の変化

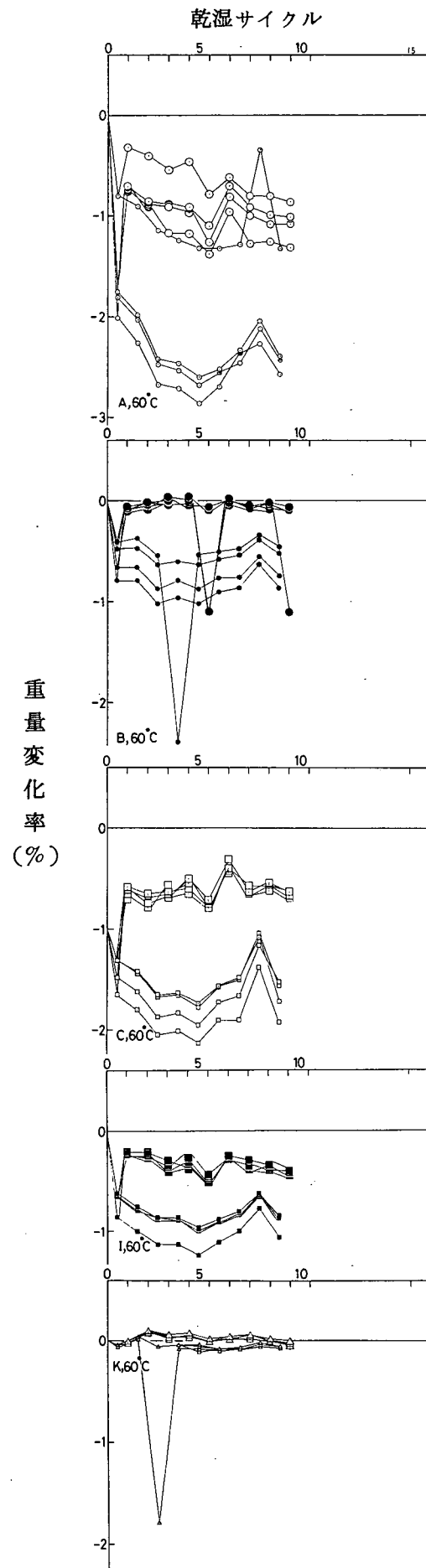


図-16 乾湿繰り返し (60°C 炉乾) による原石の重量変化

乾湿サイクル

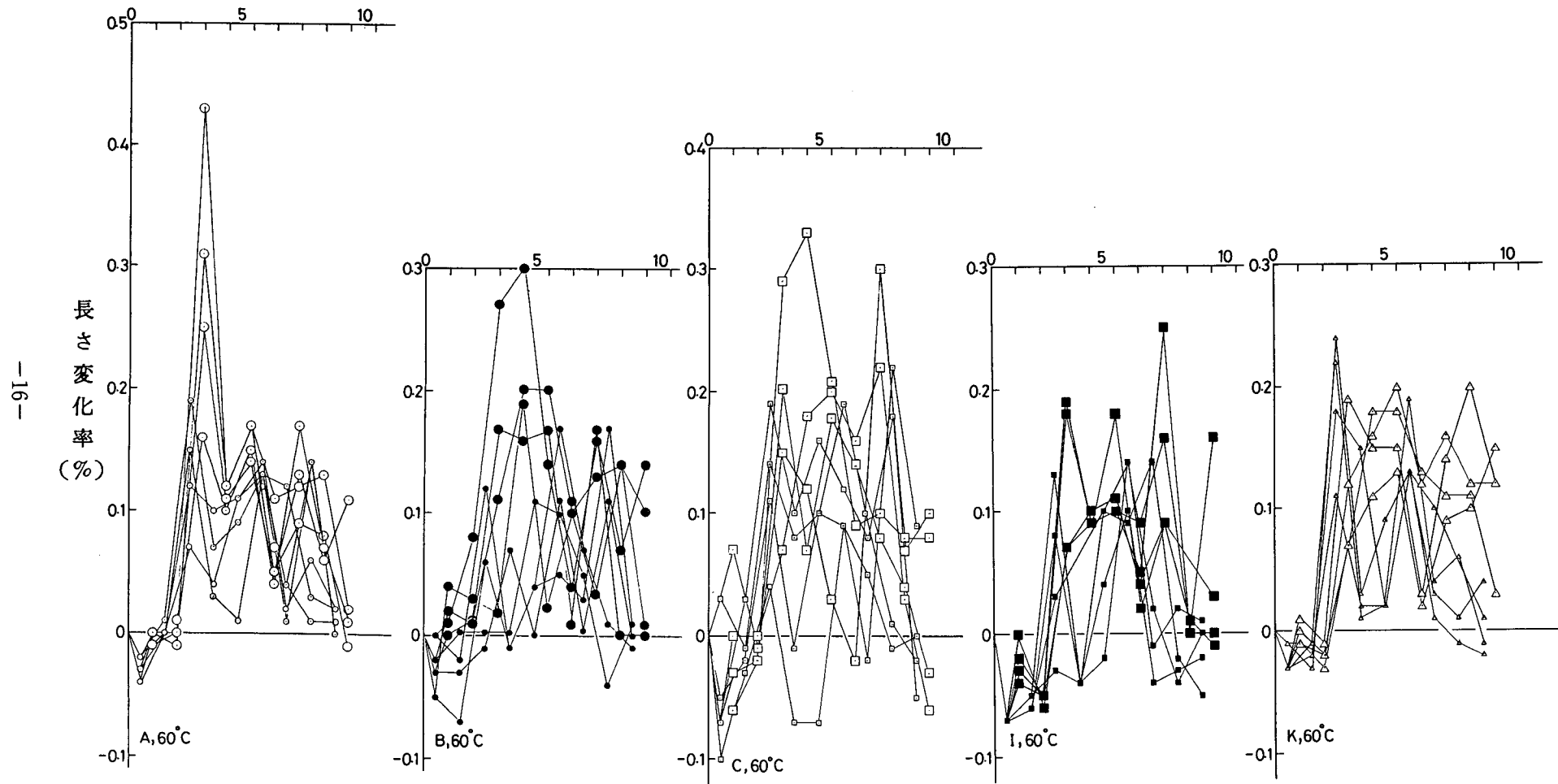


図-17 乾湿繰り返し (60℃ 炉乾) による原石の長さ変化

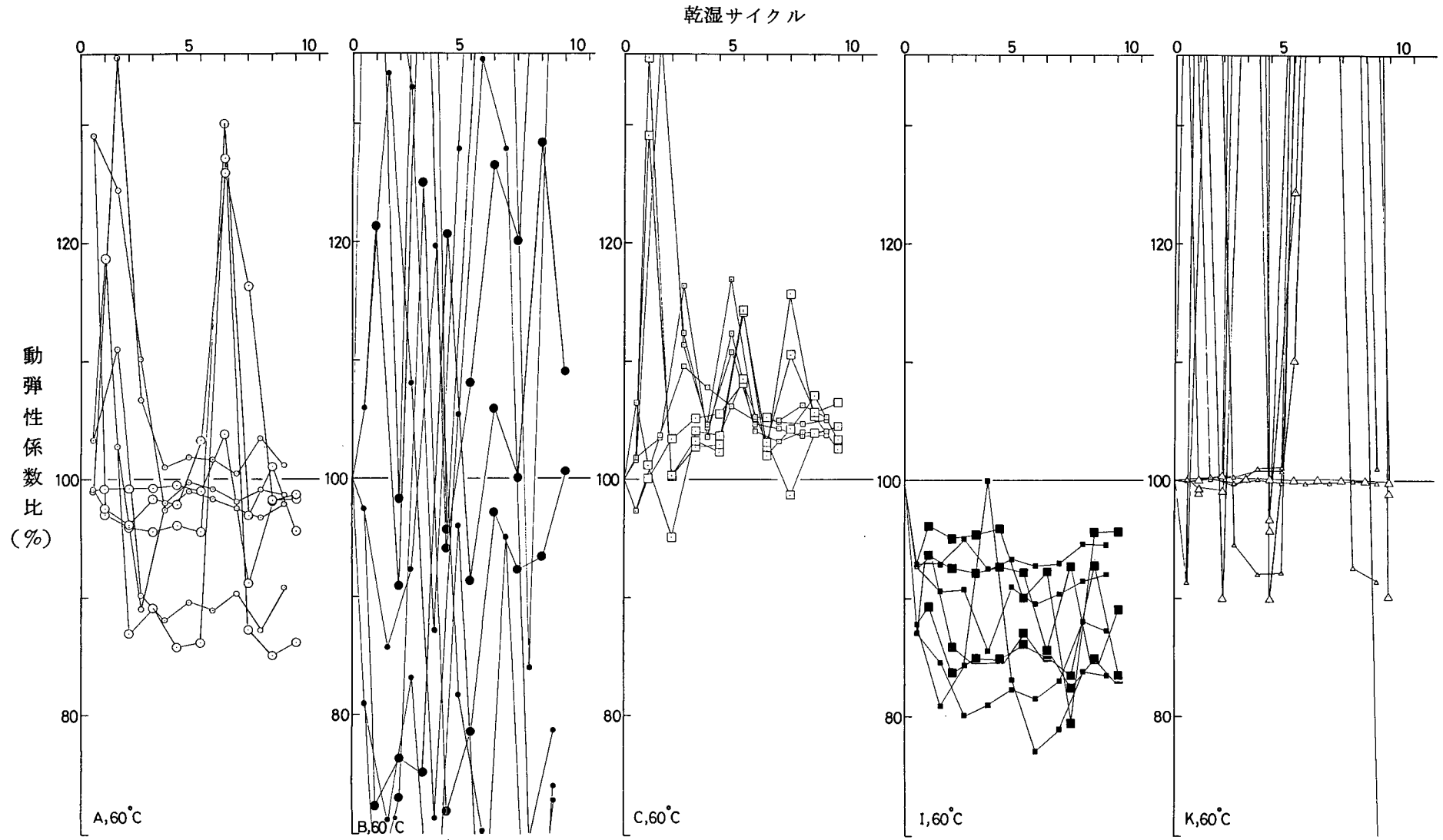


図-18 乾湿繰り返し (60°C 炉乾) による原石の動弾性係数の変化

1.7.3 40℃ 炉乾

1) 重量変化 (図-19)

40℃ 炉乾では、80℃、60℃で全体を通して減少傾向にあったA、Iでも2サイクル目以降の減少が見られない。40℃ 炉乾では劣化が促進されていないといえる。

2) 長さ変化 (図-20)

長さ変化も80℃、60℃ 炉乾と同様な傾向を示している。絶対値は80℃に比べて小さくなっているが、60℃とはあまり変わらない。

3) 動弾性係数の変化 (図-21)

動弾性係数80℃、60℃ 炉乾での変化と変わりはない。

1.7.4 20℃、60% R H 乾燥

1) 重量変化 (図-22)

炉乾燥に比べると60% R Hでの乾燥による重量の変化は小さくなっている。また、変化のパターンも炉乾燥の場合とは異なっている。全体を通して減少傾向にあるのはCのみで、その他のものは2サイクル目以降変化をしていない。特にB、Iの変化は、Kとはほぼ同様で非常に小さい。

各試料の変化量は大きい順に $C > A > B = I = K$ といえるであろう。この順位や各試料の変化パターンの違いは、乾燥条件の違いによるものか、供試体の差によるものか検討の必要がある(44% R H乾燥でも60% R H乾燥と同じ変化を示している)。

2) 長さ変化 (図-23)

長さ変化も炉乾燥と異なった変化を示している。正の値を示しているのは、IとKの一部であって、他のものは全て負の値を示していることが大きな違いである。変化パターンは、重量の変化によく類似しており、乾燥時の変化の方が湿潤時の変化よりも大きい。また、2サイクル目以降の変化もあまりない。

湿潤時の変化量は大きいものから $A > C \geq B > I > K$ の順となる。

3) 動弾性係数の変化 (図-24)

炉乾燥の動弾性係数の変化に比べると、Bを除いて比較のおだやかな変化を示している。湿潤時と乾燥時との値の間に系統的な差はないようであるが、Aでは乾燥時の値の方が低い。全体的に乾湿の繰り返しに従い、動弾性係数比は減少する傾向にある。なお、Kの動弾性係数は測定機械の測定範囲よりも大きかったために測定が不能であった。

1.7.5 20℃、44% R H 乾燥

1) 重量変化 (図-25)

60% R H乾燥と非常に類似した変化を示している。変化量は60% R H乾燥よりも大きくなっている。

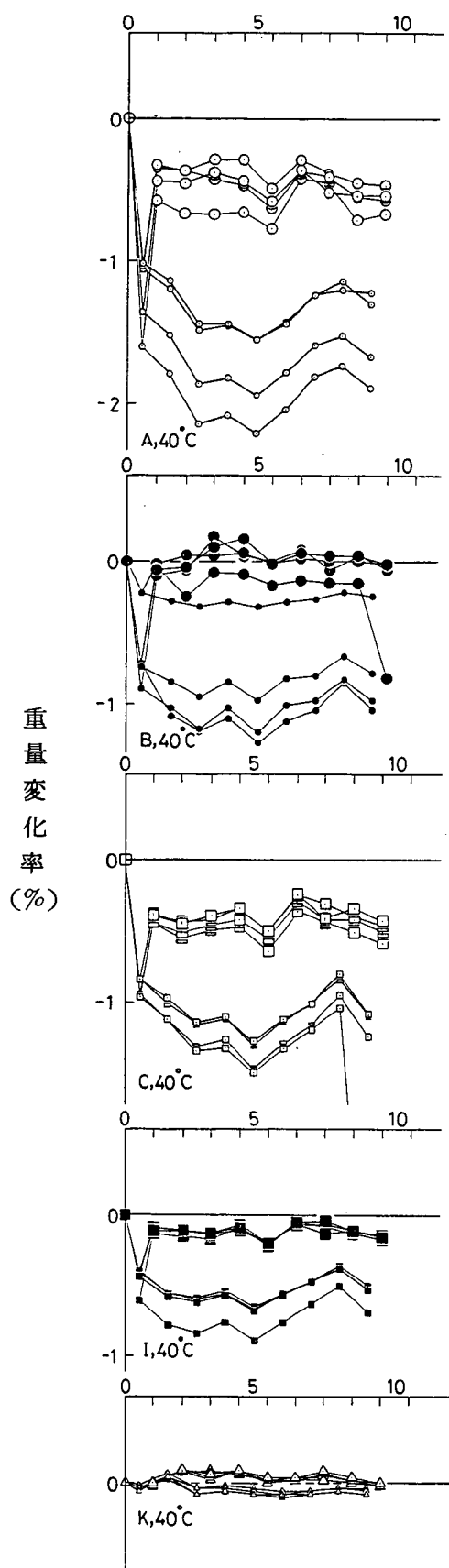


図-19 乾湿繰り返し (40°C 炉乾) による原石の重量変化

乾湿サイクル

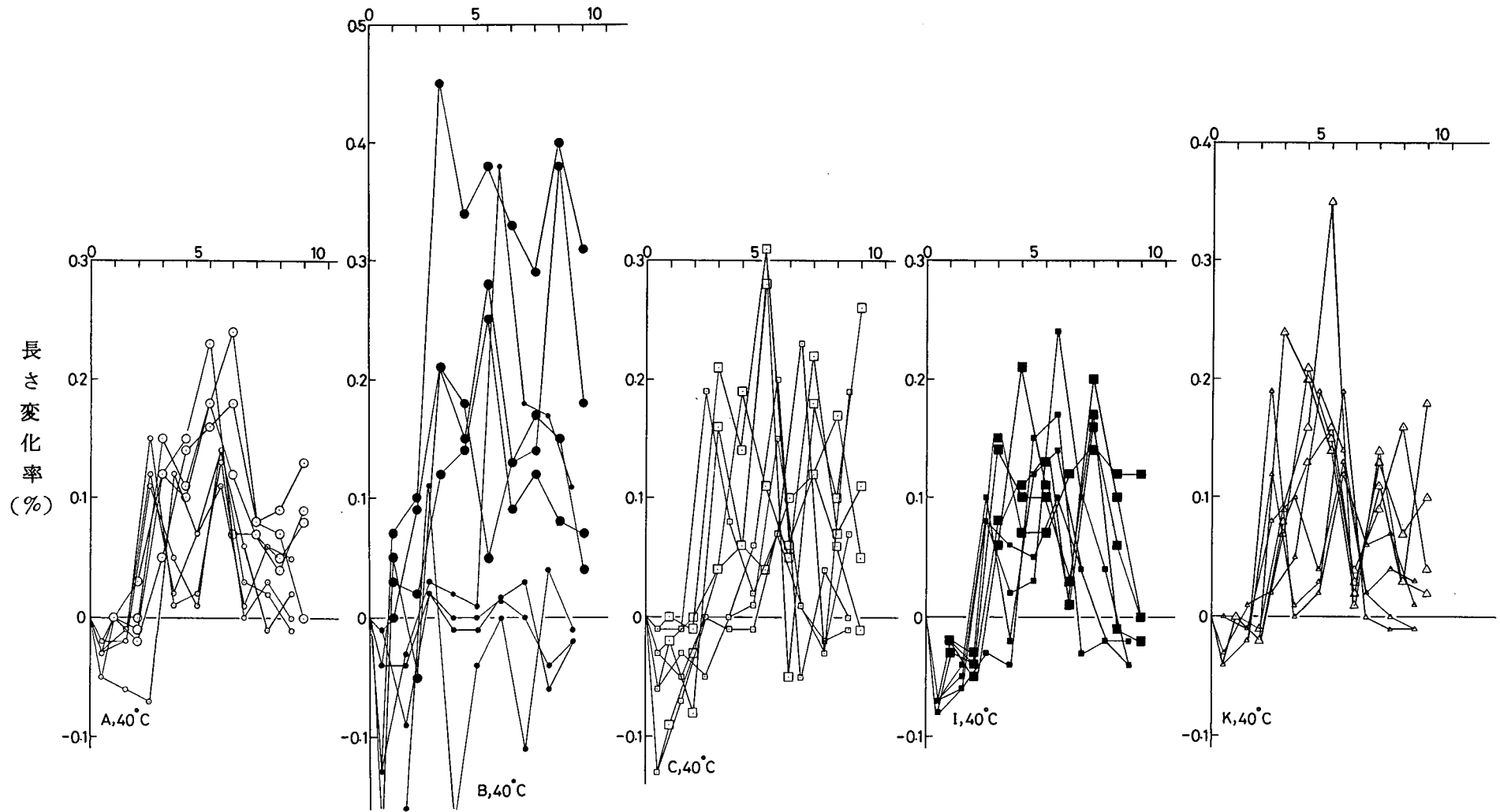


図-20 乾湿繰り返し (40°C 炉乾) による原石の長さ変化

乾湿サイクル

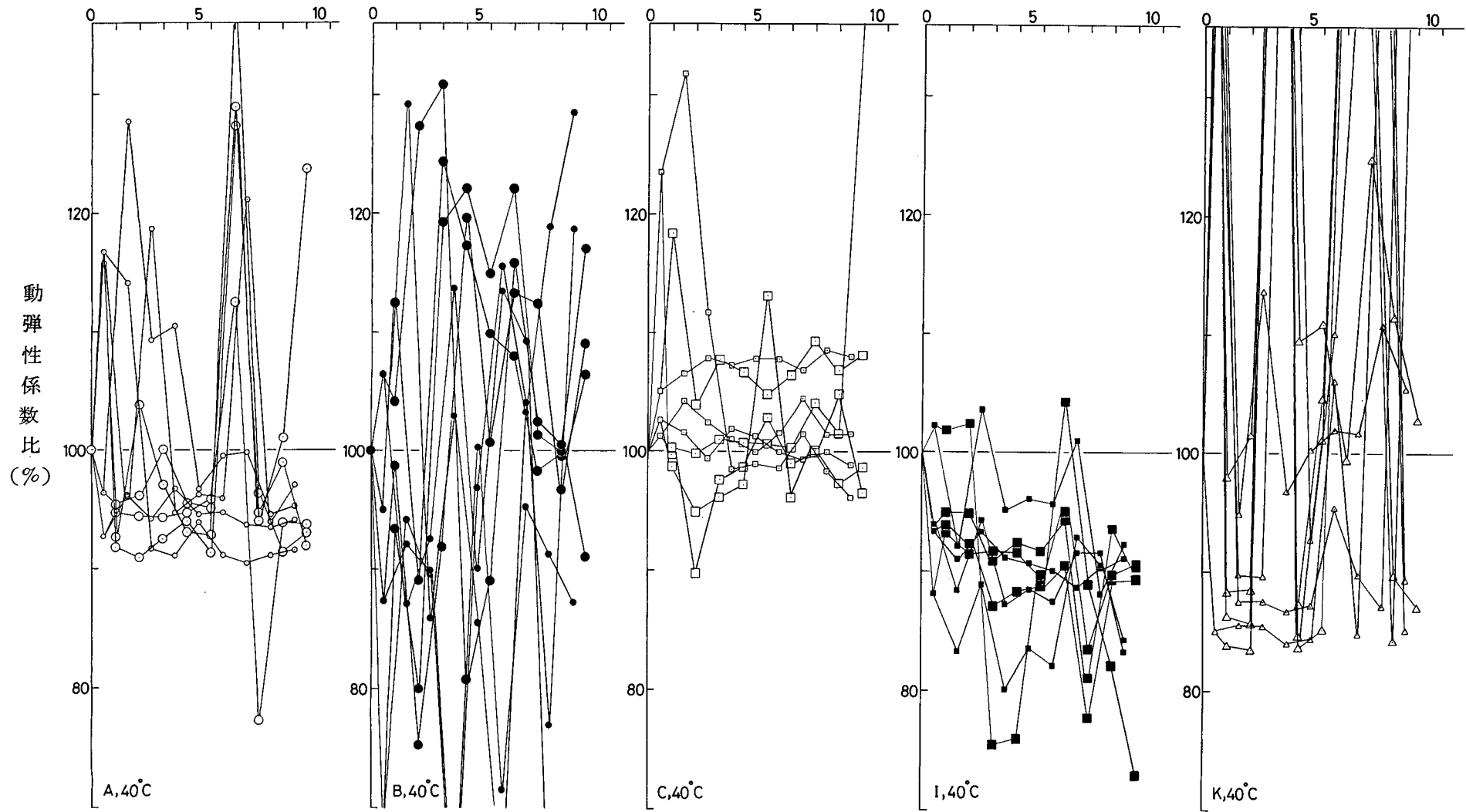


図-21 乾湿繰り返し (40°C 炉乾) による原石の動弾性係数の変化

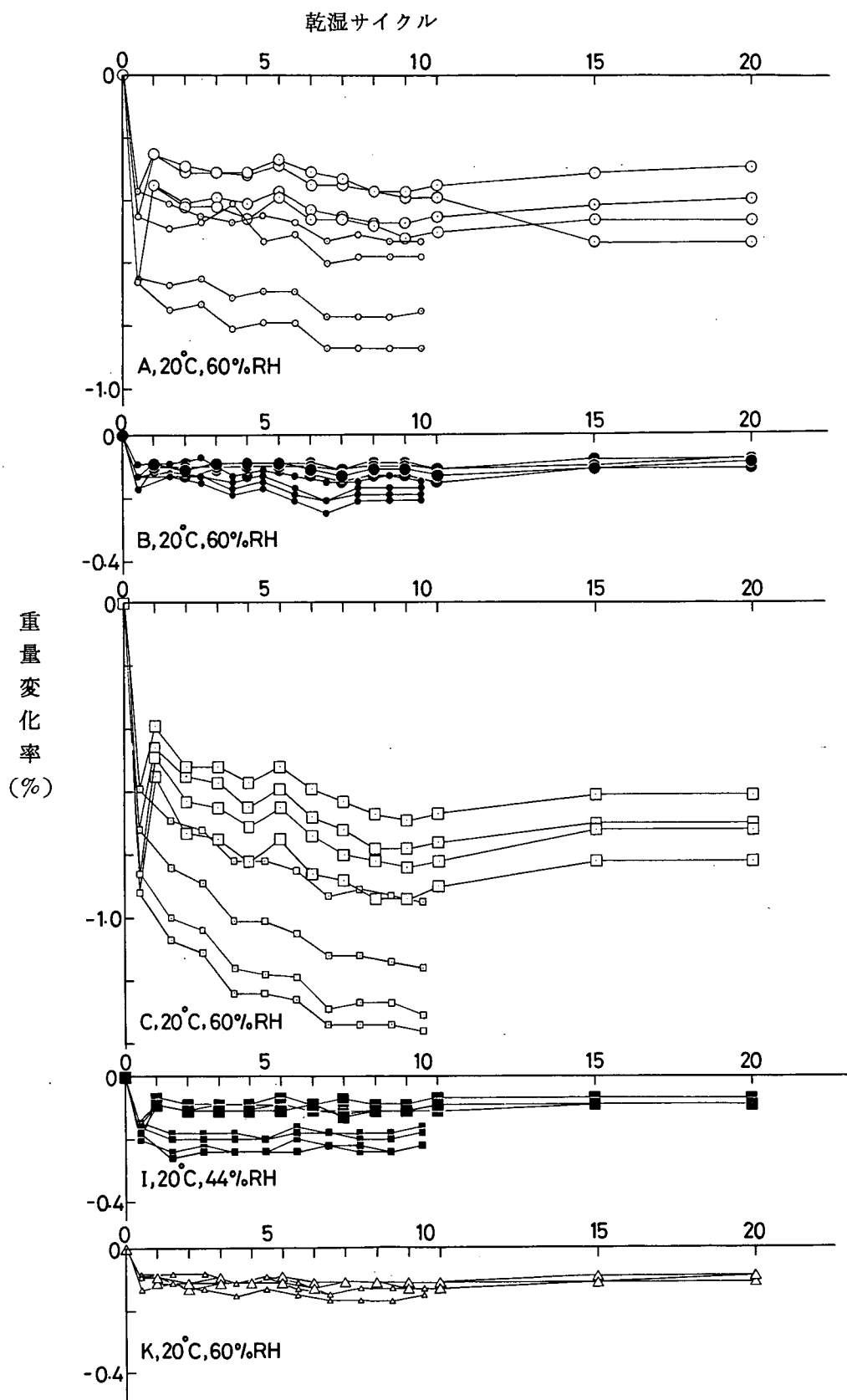


図-22 乾湿繰り返し (20°C, 60%RH乾燥) による原石の重量変化

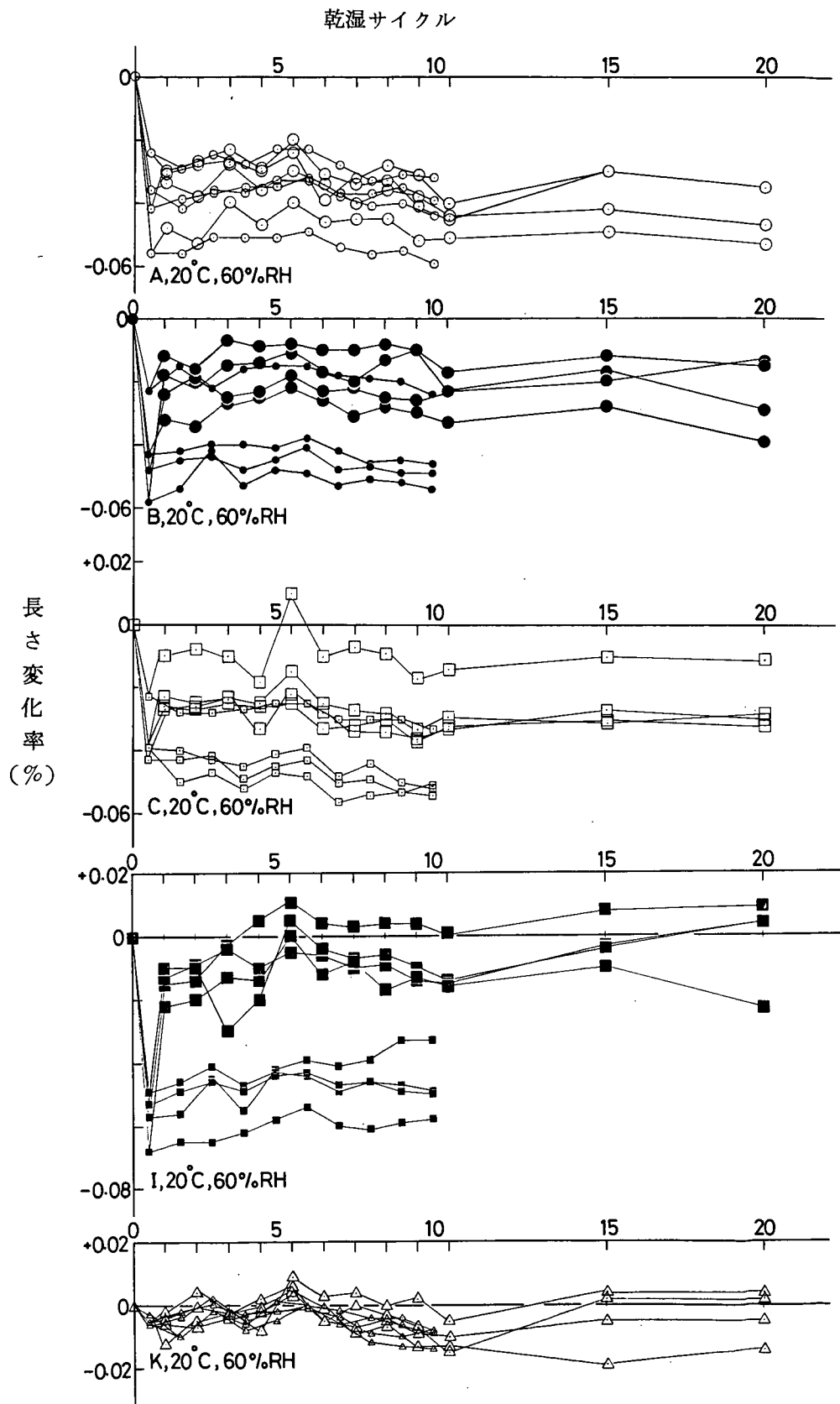


図-23 乾湿繰り返し (20°C, 60%RH乾燥) による原石の長さ変化

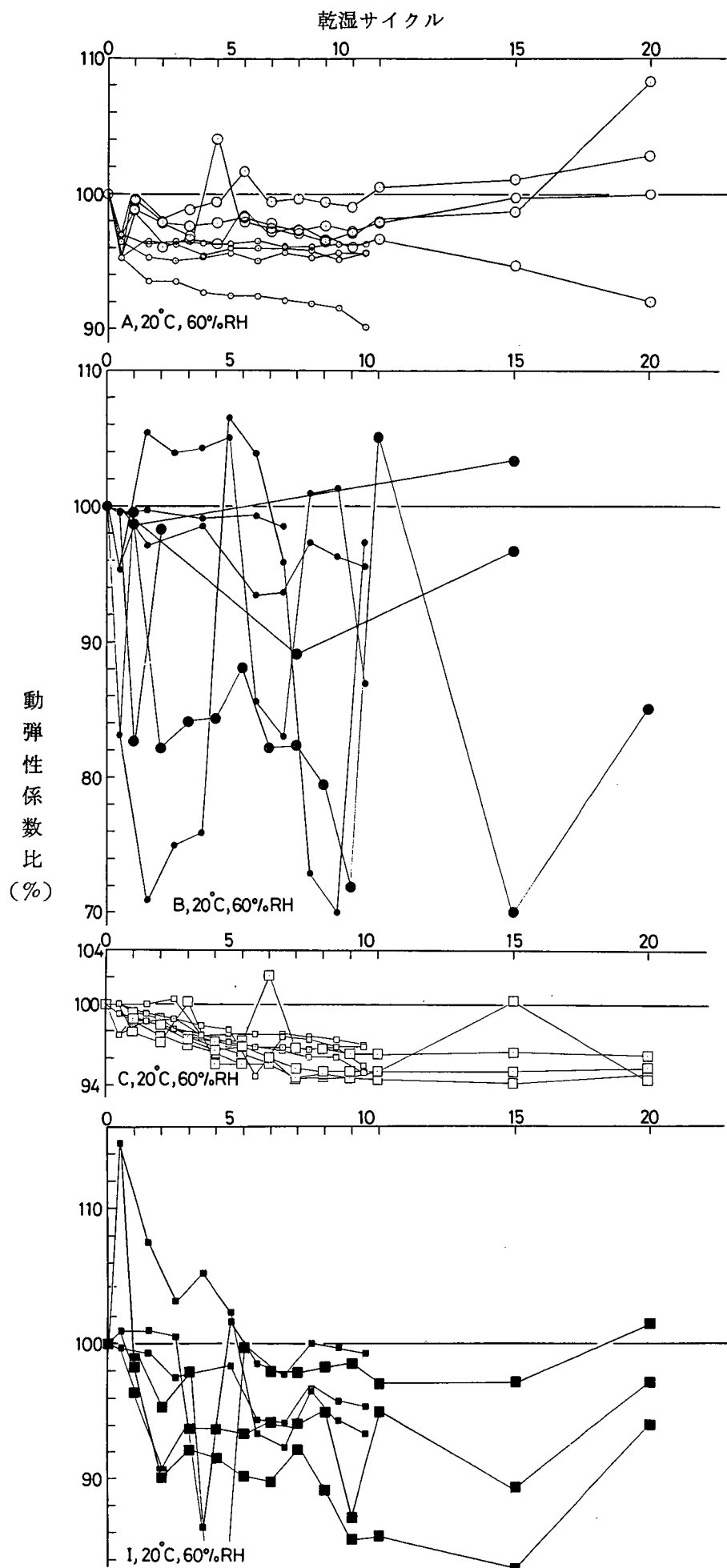


図-24 乾湿繰り返し (20°C, 60%RH乾燥) による原石の動弾性係数の変化

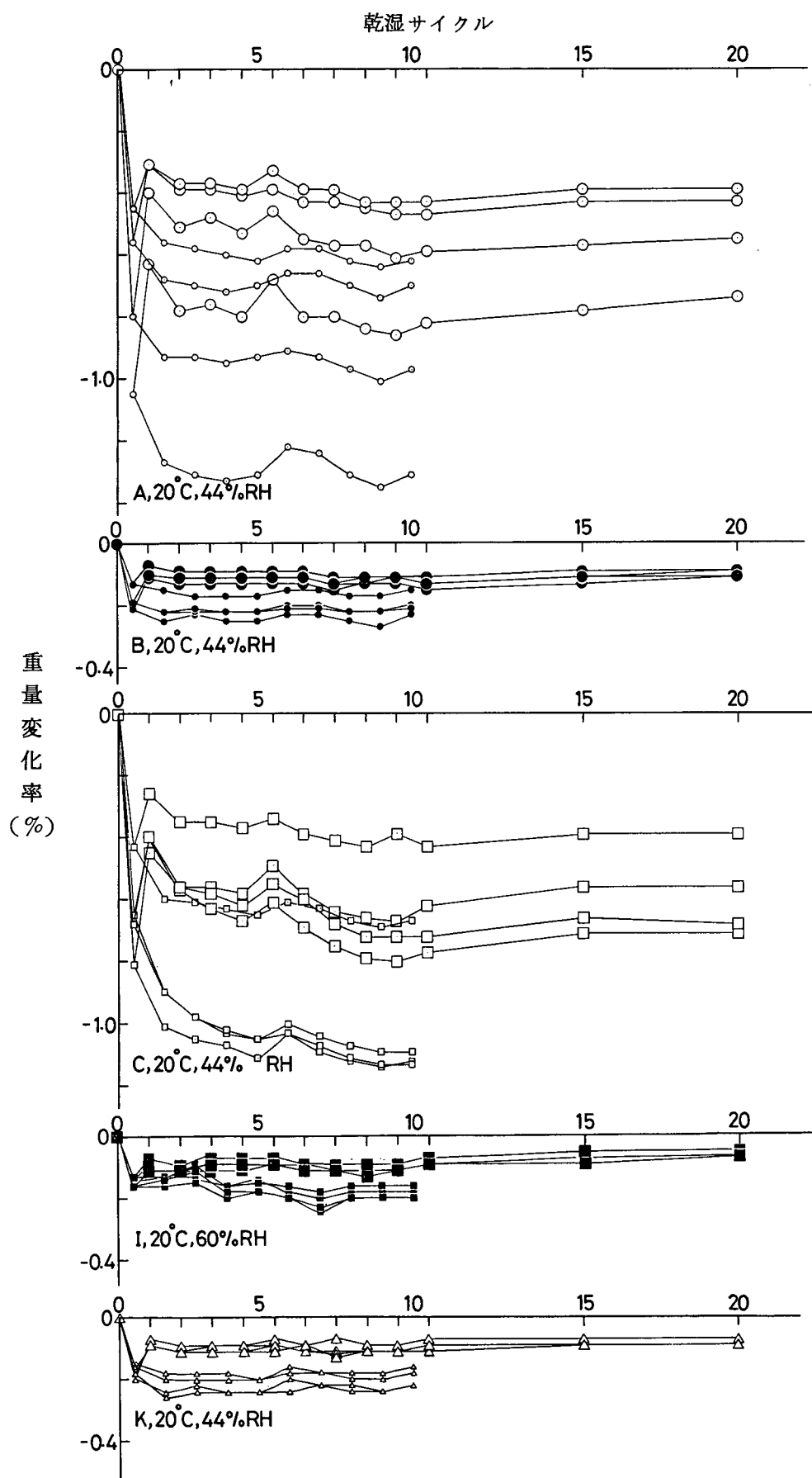


図-25 乾湿繰り返し (20°C, 44% RH 乾燥) による原石の重量変化

2) 長さ変化 (図-26)

60% R H 乾燥と同様な変化を示しているが、正の値を示すものが60% R H 乾燥よりも多い。

3) 動弾性係数の変化 (図-27)

動弾性係数の変化も60% R H 乾燥と類似している。しかし、絶対値は60% R H 乾燥に比べ小さくなっている。

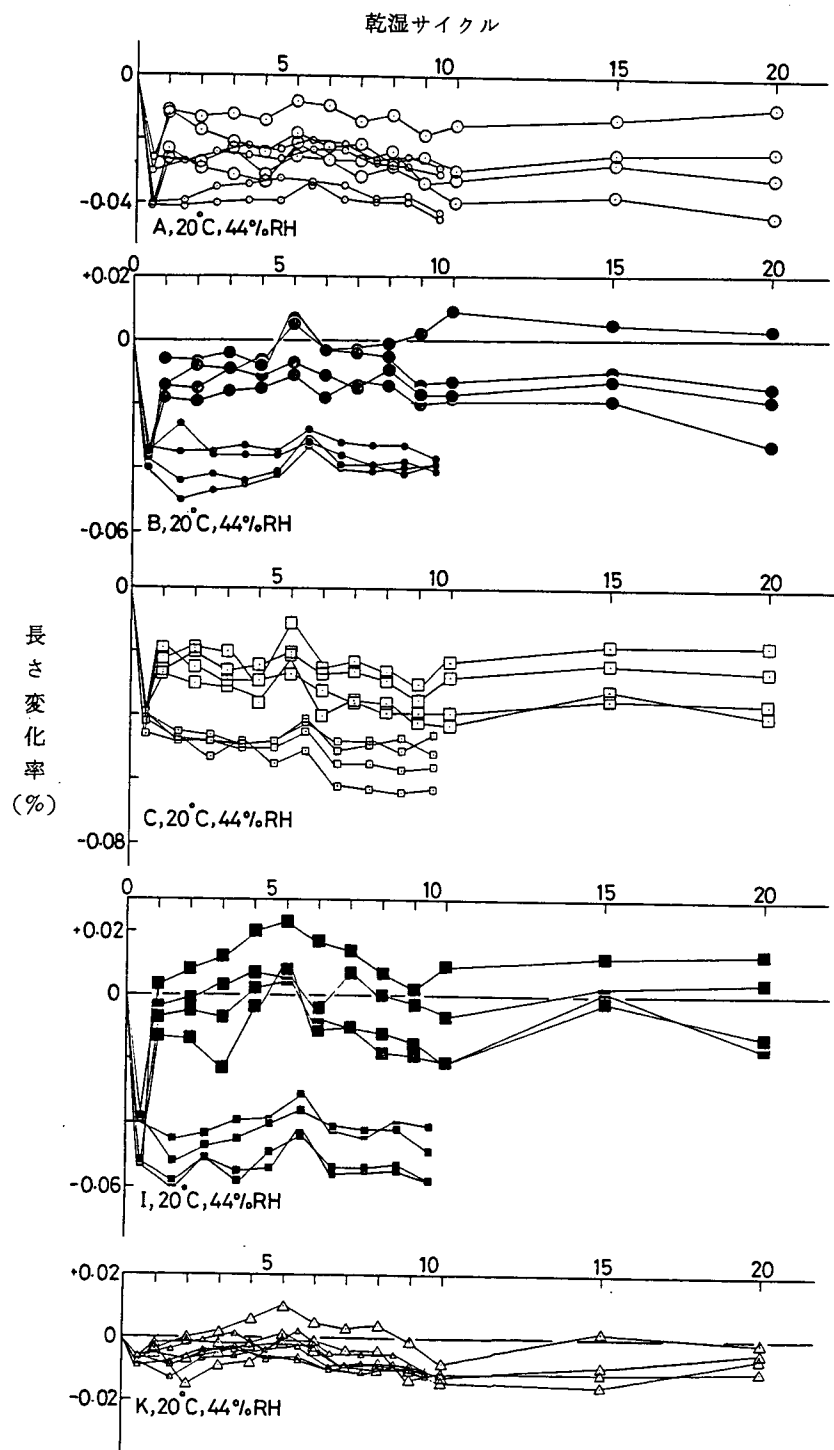


図-26 乾湿繰り返し (20°C, 44%RH乾燥) による原石の長さ変化

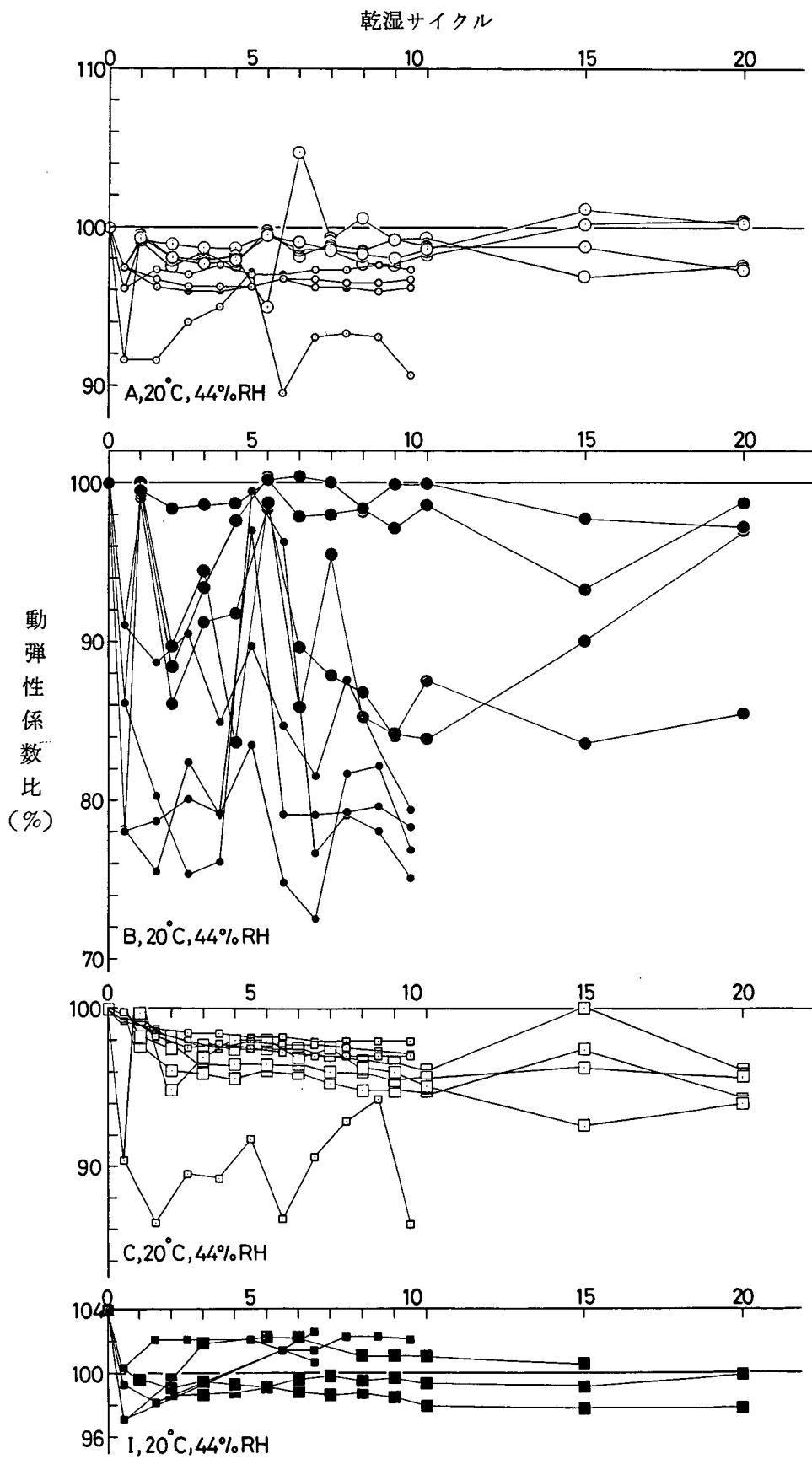


図-27 乾湿繰り返し (20°C, 44%RH乾燥) による原石の動弾性係数の変化

1.8 乾燥収縮

原石よりφ5×10cmのコアを採取する。コアの端面は切断し平滑に仕上げ、コア供試体の両端面中心位置に直径7～8mm、深さ10mm強の孔を設ける。この孔にモルタル供試体用ゲージプラグを接着剤を用いて埋込み固定する。接着剤としては、湿潤時硬化型樹脂を使用する。供試体は重量が一定になるまで20±1℃の水中に浸漬する。

測定は、JIS A 1129モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法のうちのダイヤルゲージ方法に準拠して行う。

1.8.1 重量変化 (図-28)

試料は各ケース4本としたが、原石Aの重量変化率のみ4本の値のバラツキが大きい。その他のケースは、4本の傾向が類似していた。

A、Cは1週までの減少量が大きく、8週まで減少傾向を示しているのに対し、B、I、Kは1週以後あまり変化がない。Iにおいては、4週時点で逆に重量が若干増加している。8週から3ヵ月の間で、各ケースとも重量が増加している。

重量変化率は、 $A > C > B = I = K$ となり、B、IはKと同様の傾向である。A、Cは吸水率が大きく、吸水率の大きい骨材は重量変化率が大きい傾向を示している。ただし、同程度の吸水率であるI骨材は変化率が小さい。

1.8.2 長さ変化 (図-29)

重量変化の場合と同様、原石Aは4本の値のバラツキが大きい。ただし、Bについても、Aと同程度のバラツキを示し、また、C、Iもバラツキが見られる。Kのバラツキは他に比べて小さい。

長さ変化率は重量変化率とは異なった傾向を示している。すなわち、 $I > B > A > C > K$ であり、また、基準となるKは長さ変化が小さいことがわかる。各ケースとも4週程度まで長さの減少がみられ、以後はほとんど変化ない。長さ変化率については、吸水率との関係は明確でない。

[乾燥収縮、乾・湿繰り返し試験(60%RH・44%RH乾燥)における重量変化率、長さ変化率の計算方法]

重量変化率、長さ変化率とも試験開始時の湿潤の値を基準とし、その値からの相対的な変化率を各測定時の変化率とする。

重量は絶対的な値を示すものであり、重量変化率は各測定時の値から試験開始時の値を差引き、その差を試験開始時の値で割ることにより得られる。すなわち、ある測定の値をW1、試験開始時の値をW0とおけば、そのときの重量変化率(ΔW)は

$$\Delta W = (W1 - W0) / W0$$

となる。

一方、長さ変化率試験においては、測長わく(またはコンタクトゲージ)により測定するが、測長わくのダイヤルゲージ(またはコンタクトゲージ)の読み値は絶対的なものではない。そのため本試験で

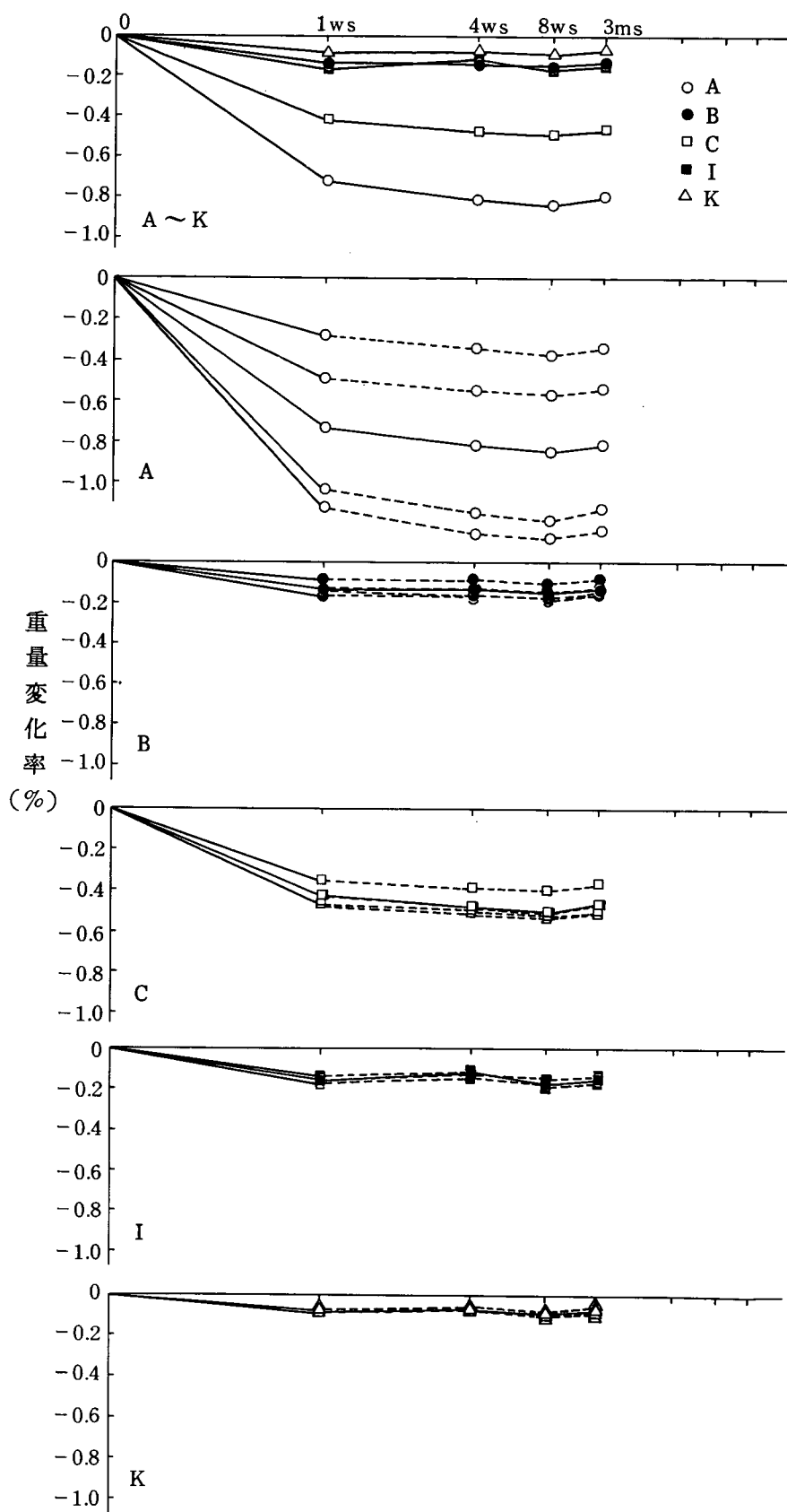


図-28 乾燥収縮による原石の重量変化

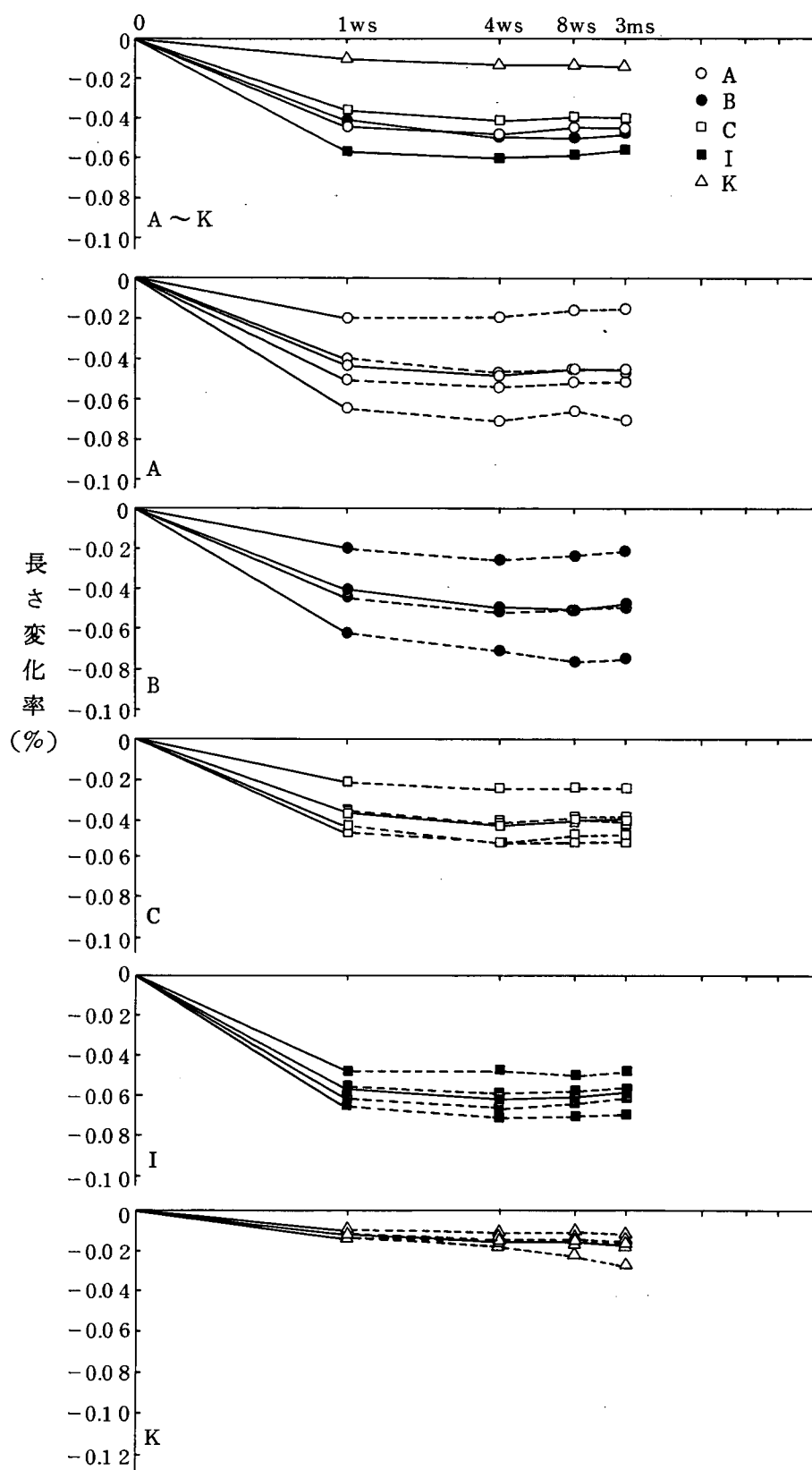


図-29 乾燥収縮による原石の長さ変化

は標準棒を用い、この標準棒自体の長さは変化しないものとして標準棒を基準に計算することになる。すなわち、測定時において標準棒及び供試体についての測長わくのダイヤルゲージ（またはコンタクトゲージ）の読み値の差を求め、その差と、同じく試験開始時の測定から求まる標準棒及び供試体についての測長わくのダイヤルゲージの読み値の差との相対的な差を長さ変化量とする。長さ変化率はこの値を試験開始時の有効長で割ることにより求まる。ある測定時の標準棒及び供試体についての測長わくのダイヤルゲージ（またはコンタクトゲージ）での読み値をそれぞれLS1及びLD1とし、試験開始時の標準棒及び供試体の読み値をLS0及びLD0とする。また、有効長としては、ゲージプラグの内側端面間の距離で定義し、標準棒の全長（LO）からプラグの長さ（LP）を差引き、LS0及びLD0の差を加えた値とする。従って、長さ変化率（ ΔL ）の計算式は次の様になる。

$$\Delta L = (LD1 - LS1) - (LD0 - LS0) \div (LO - 2LP + (LD0 - LS0))$$

1.9 凍結融解

試験槽内の温度を自動制御できる空気循環式の凍結融解試験装置を使用し、供試体をゴム容器中に水浸状態でいれ、下記条件下で試験を実施した。

槽内温度範囲	: +20℃～-20℃
温度上昇・下降速度	: 40℃／時間
最高最低温度持続時間	: 2 時間
1 サイクル時間	: 6 時間
日当りサイクル数	: 4 サイクル

1.9.1 重量変化

凍結融解試験による乾燥重量の経時変化を図-30に示す。図に示すように重量の変化はごくわずかなものである。重量が減少方向にあるのは、AおよびBで、その他のものでは変化が認められない。なお、いくつかの供試体で変化率が（+）になっているが、これは、凍結融解のサイクルが増すにつれて湿润時間が長くなる（試験中は常に水浸）のに対し、乾燥時間は一定であるので、後期のサイクルなど乾燥重量が重く出ているためと考えられる。また、Bでは2供試体が既存の亀裂より分割した。以上のように288サイクルまでに重量変化率が-10%より低いものではなく、今回試験をした供試体の凍結融解作用に対する耐久性は良好であるといえる。

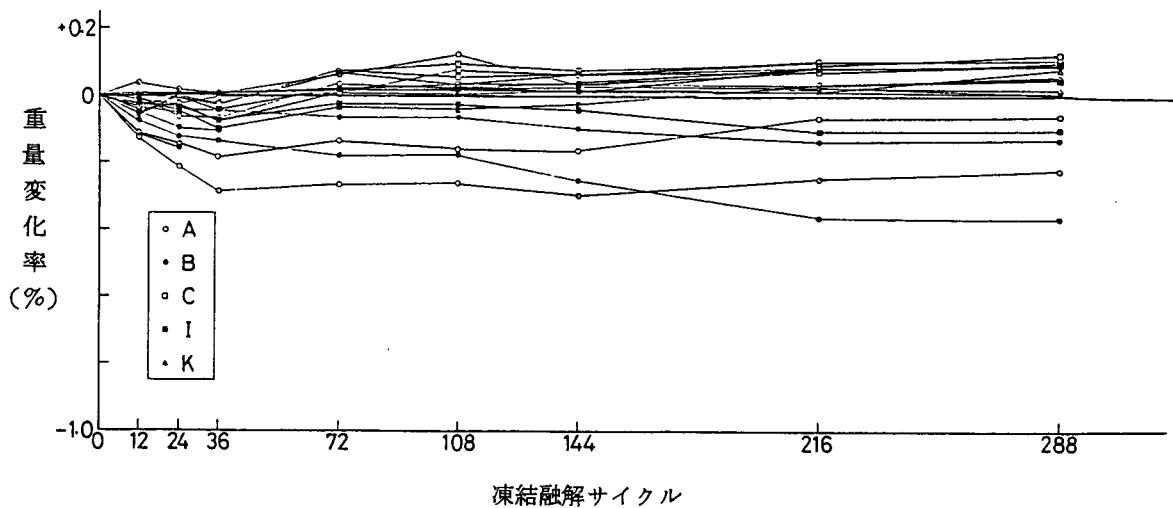


図-30 凍結融解による原石の重量変化

1.9.2 吸水率の変化

吸水率は岩石の耐久性を判断する上で良い指標となる。図-31は吸水率の経時変化を示したものである。K以外の試料ではサイクルの増加に伴って、ほぼ吸水率も増加傾向にある。一方、Kでは吸水率の絶対値も小さく、また経時変化もほとんど認められない。

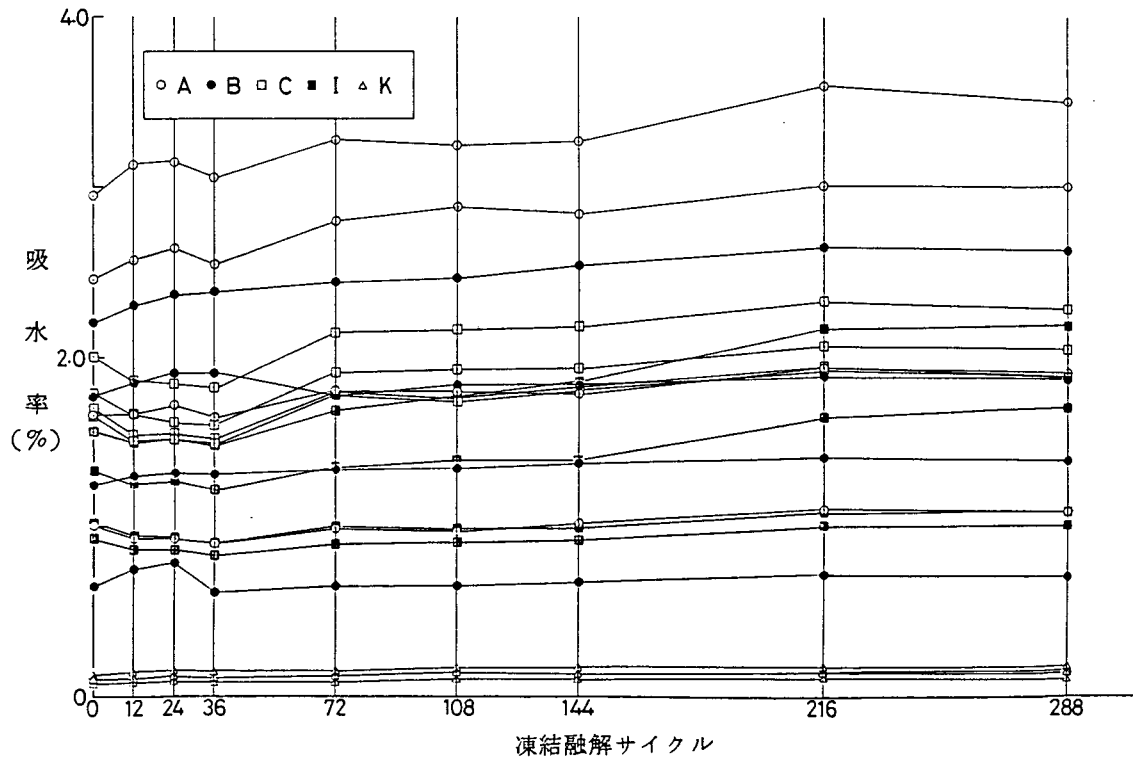


図-31 凍結融解による原石の吸水率の変化

1.9.3 動弾性係数の変化

図-32は動弾性係数の経時変化を示したものである。一般に動弾性係数は凍結融解を繰り返すに従い低下してくる。しかし、図のようにモンモリロナイトを含んだ岩石では初期サイクル（～72サイクル）で、動弾性係数が大きくなっている。これはモンモリロナイトを含んだ岩石でみられる特異な現象である。特にB試料で動弾性係数が急激に上昇し、次に急激に低下していることが注目される。以上のような現象は、モンモリロナイトの膨潤性に関係していると考えられるが詳細は不明である。

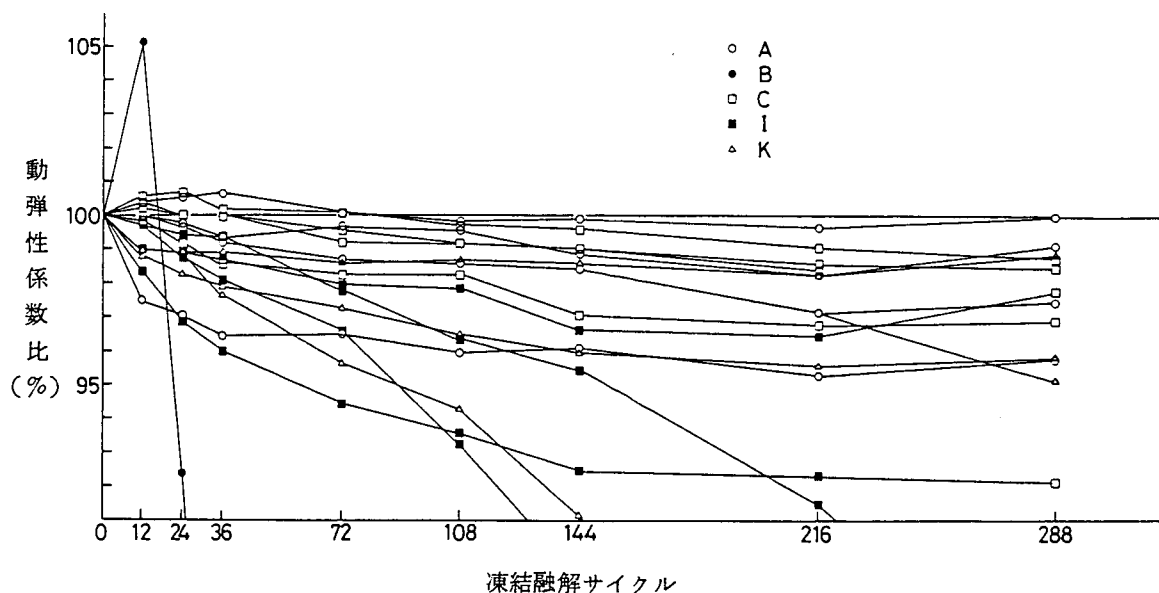


図-32 凍結融解による原石の動弾性係数の変化

1.10. 骨材試験

1.10.1 比重・吸水率（表-4）

比重は、2.56～2.71の間であり、一般的な値である。吸水率はKが非常に小さく、0.08%であった。他の骨材については0.9～1.9%の間である。吸水率がやや小さいのは、供試体の形状が円柱状（5×10cm）であるためである（3.1も参照のこと）。

1.10.2 すりへり抵抗（表-5）

すりへり抵抗試験によるすりへり減量はすべて40%以下であり、規格値（40%）を満足している。

すりへり減量（%）は、A>C>B>I>Kの順であった。

1.10.3 薬液による安定性（表-6, 7）

粗骨材の安定性損出量は、B>A>C>I>Kの順であり、Bについては規格値の12%をオーバーしている。

また、円柱供試体（5×10cm）の安定性試験損出量はすべて1%以下であった。

表-4 原石の比重および吸水率 (5×10cm供試体)

試料名	比重	吸水率 (%)
A	2.56	0.91
B	2.71	1.47
C	2.59	1.90
I	2.70	1.59
K	2.68	0.08

表-5 原石のすりへり抵抗試験結果

試料の種類	大きさ (mm)	すりへり減量 (%)
A	40	20.6
B	40	15.4
C	40	18.4
I	40	14.1
I	20	15.6
K	40	13.6
K	20	13.9

表-6 原石 5×10cm供試体安定性試験結果

	試験前の重量 (g)	試験後の重量 (g)	損失重量 (g)	損失重量 百分率 (%)	平均損失 重量 (%)	備 考 (観察)
A-1	490.4	487.6	2.8	0.6	0.6	
A-2	489.5	486.7	2.8	0.6		
A-3	493.2	490.8	2.4	0.5		
A-4	465.6	463.2	2.4	0.5		
※B-1	514.8	508.0	6.8	1.3	0.5	上面割れ
B-2	522.5	519.9	2.6	0.5		
B-3	522.8	521.2	2.1	0.4		
B-4	523.2	520.6	2.6	0.5		
C-1	522.8	519.6	3.2	0.6	1.0	表面剥離が大
C-2	506.9	500.0	6.9	1.4		
C-3	523.9	520.4	3.5	0.7		
C-4	506.0	499.8	6.2	1.2		
I-1	532.9	530.4	2.5	0.5	0.4	
I-2	541.9	539.8	2.1	0.4		
I-3	497.2	495.2	2.0	0.4		
I-4	547.7	545.7	2.0	0.4		
K-1	531.0	530.8	0.2	0.0	0.0	
K-2	526.1	526.0	0.1	0.0		
K-3	525.2	525.1	0.1	0.0		
K-4	527.8	527.7	0.1	0.0		

表-7 原石粗骨材の安定性試験結果

試料	粒 度 (mm)	損失重量 (%)
A	40	7.2
A	20	8.8
B	40	20.4
B	20	14.2
C	20	4.4
I	40	3.0
I	20	3.7
K	40	0.5
K	20	1.7

※ B-1の上面割れは、供試体上面のモルタルが層状を呈しており、この一部分が欠損したもので安定性損失量から除いた。

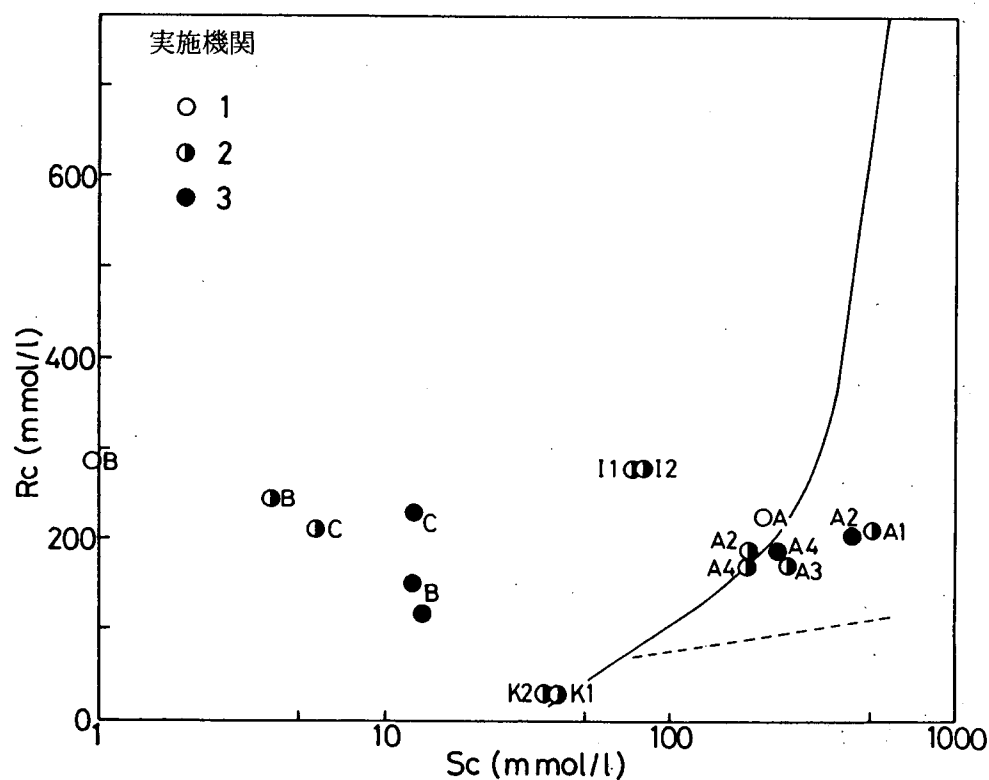
1.11 アルカリシリカ反応性

モンモリロナイトを含有しているような変質岩石には、アルカリシリカ反応を生じる可能性のあるシリカ鉱物が共存していることが考えられるため、アルカリ反応性試験（化学法）を実施した。試験はASTM C 289 を改良した建設省暫定案に従って行った。結果を表－8 及び図－33に示す。図のようにAの一部が潜在的有害の範囲にある以外は、全て無害である。

表－8 原石の化学法の結果

実施機関		A-1	A-2	A-3	A-4	B		C	I-1	I-2	K-1	K-2
1	Sc(m mol/l) Rc(m mol/l)	213 224				0 289		—	—	—	—	—
2	Sc(m mol/l) Rc(m mol/l)	508 208	189 188	259 169	187 170	4 242		5.8 209	72 276	80 277	40 26	36 28
3	Sc(m mol/l) Rc(m mol/l)	—	335 203	—	240 186	13.7 166	12.6 149	12.7 227	—	—	—	—

A－1：原石，A－2：40mm，A－3：25mm，A－4：砂，I－1・K－1：粗骨材
I－2・K－2：細骨材



図－33 原石のアルカリ反応性

1.12 まとめ

1) 骨材の岩種

試験に使用したモンモリロナイト含有骨材は安山岩類 (A・C) と粗粒玄武岩類 (B・I) に区別できる。標準骨材 (K) は中粒アルコース質砂岩である。

2) 粘土分の鉱物化学的性質

対象とした試料は鉱物化学的性質から、A, B, C, I はモンモリロナイトを主要粘土鉱物としており、その中でも A, B, C はそれを多量に含むものである。比較試料とした K は全くモンモリロナイトを含有せず、粘土鉱物としては少量のカオリナイト、イライト、緑泥石を含むものである。

A・B・C・I の交換性陽イオンは Ca が最も多く、次いで Mg, Na, の順となっている。なかでも B, C の Ca は多く Na, は少ない。他方、A・I の Ca は B, C に比べ少ないが、逆に Na が多くなっている。

A・C では粒度別にも試験をしているが、A では細粒になる程 CEC は小さくなり、I ではやや増加している。

3) 膨潤度

浸漬 480 時間で膨張量は大きい順に $A > B > I > C > K$ であり、K で膨張が認められない。変化パターンを見ると B, I, C では 120 時間前後で膨張が止まっているのに対し、A ではその後も膨張が継続している。

4) 乾湿繰り返し

(1) 乾湿繰り返しによる重量減少量は 80°C 炉乾で最も大きく、60% RH 乾燥で小さい。各試料で重量変化を比較すると炉乾燥の場合と 60% RH, 44% RH 乾燥で異なっている。炉乾燥では減少量の大きなものからは $A > C > I > B > K$ となるのに対し、60% RH, 44% RH 乾燥では $C > A > B = I = K$ の順となっている。

(2) 乾湿繰り返しによる長さ変化も炉乾燥と 60% RH, 44% RH 乾燥で異なっている。炉乾燥ではいずれの試料でも初期サイクルに負の変化率を示しその後正の変化率を鋸歯状に示している (K も変化をしている)。他方、60% RH, 44% RH 乾燥では多くのものが、全サイクルにわたり負の変化率を示している (60% RH 乾燥では I, K が一部正の変化率を示し、44% RH 乾燥ではさらに B の一部も正の変化率を示している)。これらの模式的を示すと図-34 のようになる。

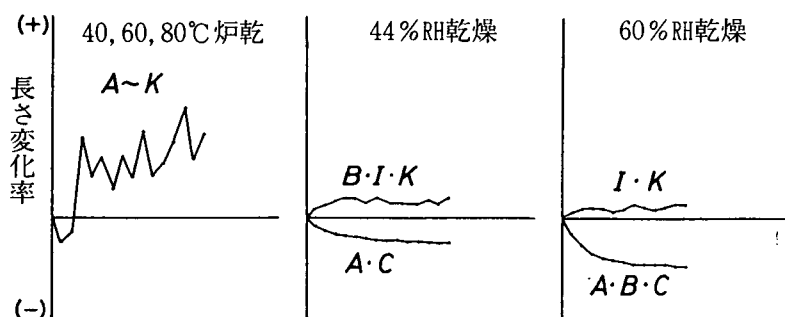


図-34 乾湿試験条件と長さ変化率の変化

- (3) 乾湿繰り返しによる動弾性係数の変化も炉乾燥と60%RH、44%RH乾燥で異なっている。図-35に示すように炉乾燥ではA、B、Kが増加と減少の値を鋸歯状の比を示し、Cは増加側、Iは減少側の比を示している。他方、60%RH、44%RH乾燥ではいずれの試料も炉乾燥に比べ減少傾向の比を示している。

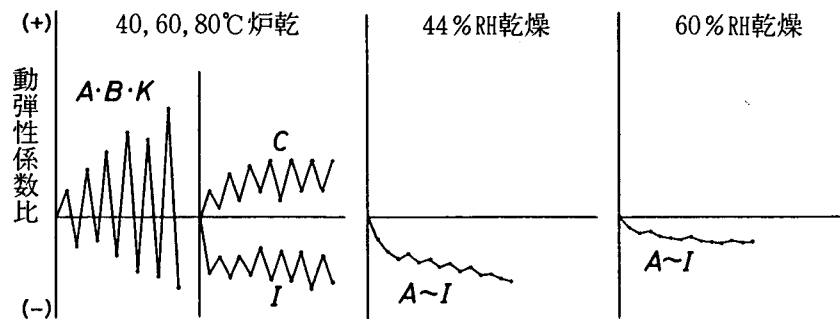


図-35 乾湿試験条件と動弾性係数比の変化

- (4) 以上の乾湿繰り返し試験の炉乾燥とそれ以外のものとの試験結果の間に差が生じた原因としては、試験条件（乾燥条件）の違いのほかに、試験実施機関の違いも考えられる（炉乾燥とそれ以外で機関が異なっているのである）。

5) 乾燥収縮

- (1) 乾燥収縮ではいずれも重量は減少している。減少量は大きい順に $A > C > B = I = K$ となり、Kではほとんど変化が認められない。
- (2) 長さの収縮率は大きい順に $I > B > A > C > K$ であって、Kではほとんど変化をしていない。

6) 凍結融解

- (1) 重量はAとBでわずかに減少しているほかはほとんど変化が認められない。変化は大きいものから $A = B > C = I = K$ である。
- (2) 動弾性係数は初期サイクルにわずかに増加するもの（A、B、C）があるが、全般的にサイクルの経過とともにめらかに減少をしている。Kとその他の試料との間に差異はない。

7) 骨材試験

- (1) 比重は大きいものの順に $B = I \geq K > C \geq A$ である。吸水率は大きいものの順に $C > I > B > K$ である。
- (2) すりへり減量は大きいものの順に $A > C > B = I > K$ である。
- (3) 5 cm×10 cm円柱供試体の安定性試験による損失重量は大きいものから、 $C > A \geq B \geq I > K$ の順となり、Kでは全く重量が減少していない。
- (4) 20 mm碎石による安定性試験による損失重量は大きいものから $B > A > C \geq I > K$ の順で、Kではほとんど重量損失が認められない。
- (5) 円柱状供試体と碎石で安定性試験の結果が異なるのは、供試体の不均一さを示しているものと考えられる。

えられる（円柱状供試体は比較的新鮮な試料からしか採取できない）。

8) アルカリシリカ反応性

化学法の結果ではAの一部が潜在的有害の領域にあるほかは、全て無害の領域にある。よって、A骨材をコンクリートに使用する場合は、アルカリシリカ反応が生じる可能性もある。

9) 各試験による長さ変化率、重量変化率の比較

各試験による長さ変化率、重量変化率の順位をまとめると表-9のようになる。また、重量変化率の大きさを試験ごとに比べると大きい順に、乾湿（80℃炉乾）＞乾湿（60℃炉乾）＞乾燥収縮＞乾湿（40℃炉乾）＞乾湿（44%RH乾燥）＞乾湿（60%RH乾燥）＞凍結融解となる（以上のことは、各試験に用いた各試料の供試体の物理量がほぼ等しいときに成立するものである）。

表-9 原石の各試験による物理量変化率の比較

1) 長さ変化率

試 験	項 目	順 位
膨 潤 度	膨 脹 量	A > B > I > C > K
乾燥収縮	収 縮 率	I > B > A > C > K

2) 重量変化率（減少率）

試 験		順 位
乾湿繰 り返し	炉 乾 燥	A > C > I > B > K
	60%・44% RH乾燥	C > A > B = I = K
乾 燥 収 縮		A > C > B = I = K
凍 結 融 解		A = B > C = I = K
す り へ り 減 量		A > C > B = I > K
安定性	5 cm×10cm	C > A ≥ B ≥ I ≧ K
	20mm碎石	B > A > C ≥ I > K

2. モルタルの性質

2.1 配 合

試験に使用する各砂の準備および粒度調整は次の2種とした。

実験－1 「骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）」

（建設省暫定案）の粒度に従ったもの。

実験－2 実験－1の粒度分布に150 μ m以下の微粒分を外割りで約8%加えたもの。

(1) 砂の準備および粒度調整

モルタルに関する試験に使用する各砂は、水洗いを施こした後絶乾状態で表－10に示す粒度に調整する。

(2) モルタルの配合

モルタルの配合は、『61年度 粘土鉱物含有骨材実験計画書』に従い $w/c=0.5$, $s/c=2.0$ （重量比）とした。

試験に際し、各砂は表乾状態で使用した。

なお、使用したセメントは後述のコンクリート試験に使用したのと同じものである(3.1.1参照)。

表－10 細骨材の粒度分布

ふるい呼び寸法		質量百分率(%)	
通 過	残 留	実験1	実験2
4.75mm	2.36mm	10	9.26
2.36mm	1.18mm	25	23.15
1.18mm	600 μ m	25	23.15
600 μ m	300 μ m	25	23.15
300 μ m	150 μ m	15	13.84
150 μ m	受皿	0	7.40

2.2 凝結硬化速度

実験1では、測定値が試験によって大きく異なっている（表－11、図－36）。これは150 μ m以下を含まないためブリージングが大きくなり、再現性がないためと考えられる。

実験2では、 $A > C > I > B > K$ の順で凝結の促進が認められた。

表-11 モルタルの凝結硬化速度試験結果

試料名	試験 機関	実 験 1		実 験 2	
		凝 結 (h-m)		凝 結 (h-m)	
		始 発	終 結	始 発	終 結
A	2 4	3-25	6-50	2-35	5-20
B	2 4	4-30	6-55 8-45	5-00	8-05
C	4	6-20	8-25	3-30	5-55
I	4	6-25	8-30	4-10	6-45
K	2 4	4-20	6-30	5-30	7-30

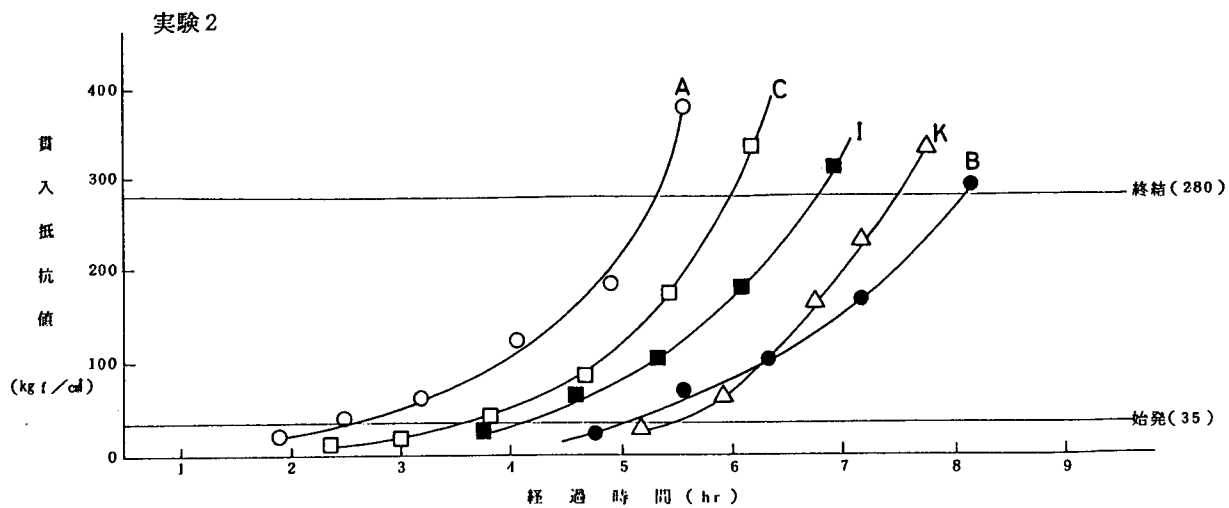
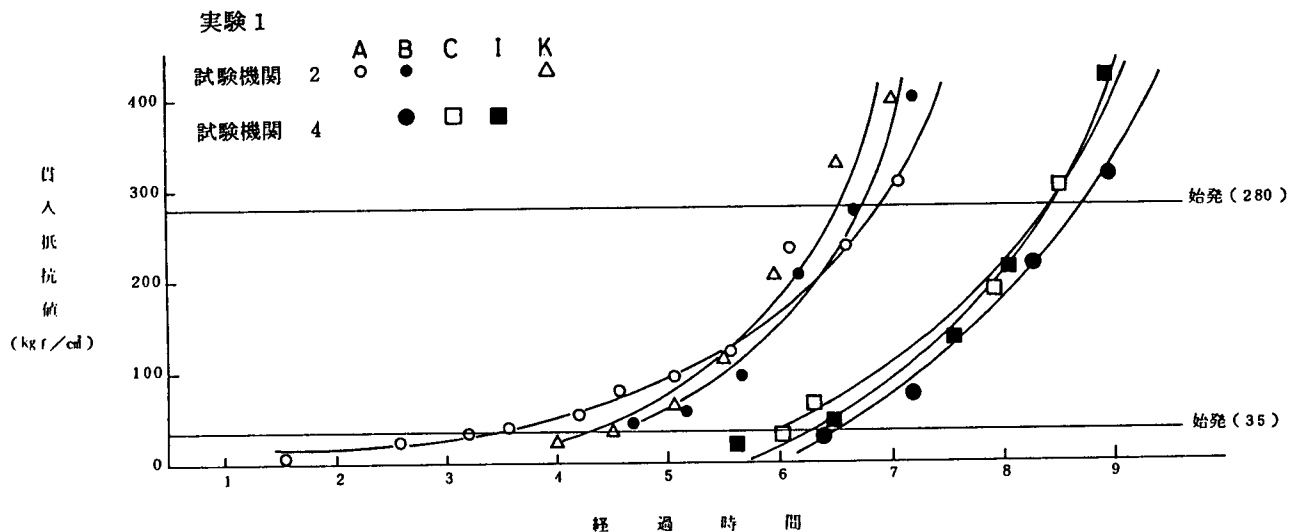


図-36 モルタルの凝結硬化速度

2.3 フロー値

実験2では、Kと比較してAとCにフロー値の低下が見られた（表-12）。

表-12 モルタルのフロー値

試料名	試験機関	フロー値 (mm)	
		実験1	実験2
A	2	194	208
	3	206	
	4		
B	2	216	233
	3	212	
	4	229	
C	3	213	220
	4	229	
I	3	212	237
	4	224	
K	2	203	234
	3	204	
	4		

2.4 強度

2.4.1 圧縮強度

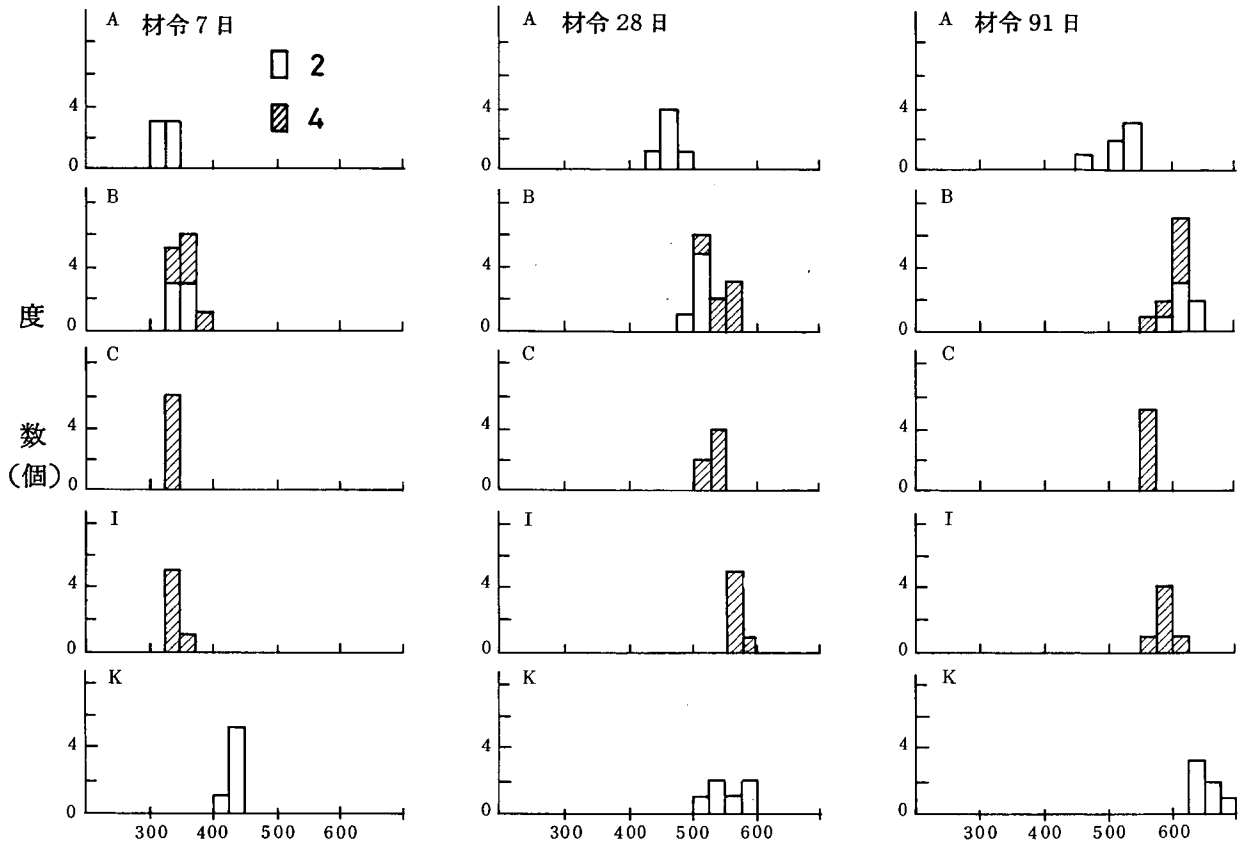
実験2では、Kと比較して骨材間の強度の差が少なくなっている（表-13，図-37）。また、実験1と比較すると強度が若干増加している。これは微粒分の添加による微粉末効果と考えられる。

表-13 モルタルの圧縮強度

試料名	試験機関	実験1			実験2		
		材令 (日)			材令 (日)		
		7	28	91	7	28	91
A	2	324	457	515	374	546	
	4						
B	2	347	511	615	313	535	
	4	357	554	595			
C	4	344	526	560	324	543	
I	4	339	553	589	292	542	
K	2	430	558	651	422	586	
	4						

単位：kgf/cm²

実験1



実験2

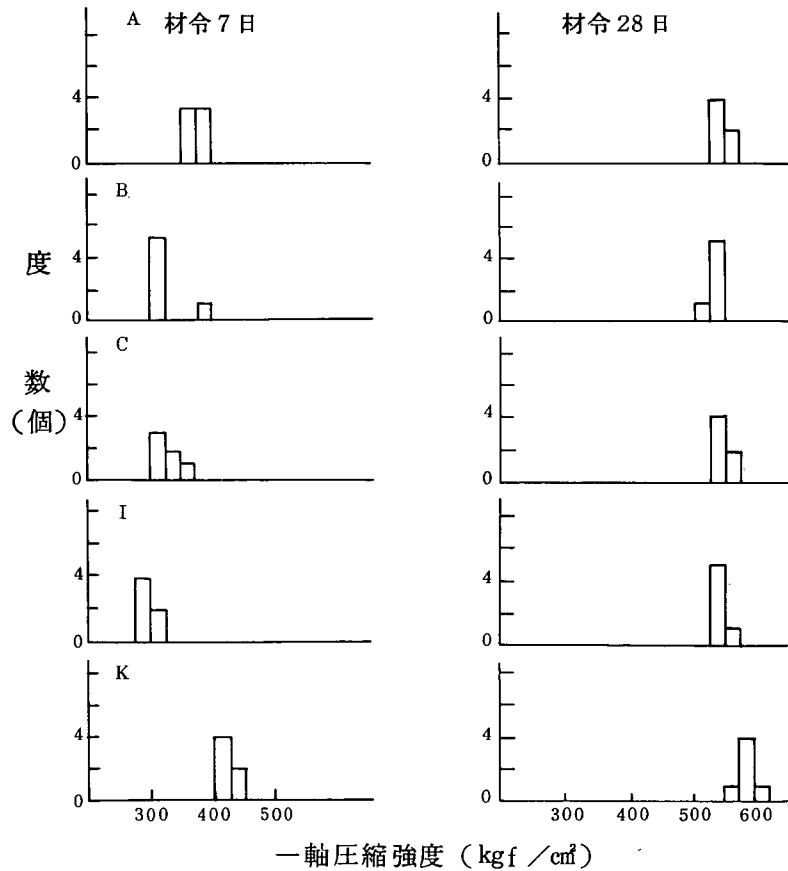


図-37 モルタルの圧縮強度のヒストグラム

2.4.2 曲げ強度

実験2では、Kと比較して骨材間の差が少なくなっている（表-14、図-38）。また、実験1と比較すると強度が若干増加している。これは、圧縮強度と同様に微粒分の添加による微粉末効果と考えられる。

表-14 モルタルの曲げ強度

試料名	試験 機関	実験1			実験2		
		材令（日）			材令（日）		
		7	28	91	7	28	91
A	2 4	60.0	77.0	82.0	72.8	89.5	
B	2 4	70.0 68.7	86.0 97.0	91.0 99.2	66.8	91.7	
C	4	63.0	92.0	94.4	66.5	94.8	
I	4	65.8	84.4	106.0	52.0	86.9	
K	2 4	84.0	97.0	99.0	82.2	97.2	

単位：kgf/cm²

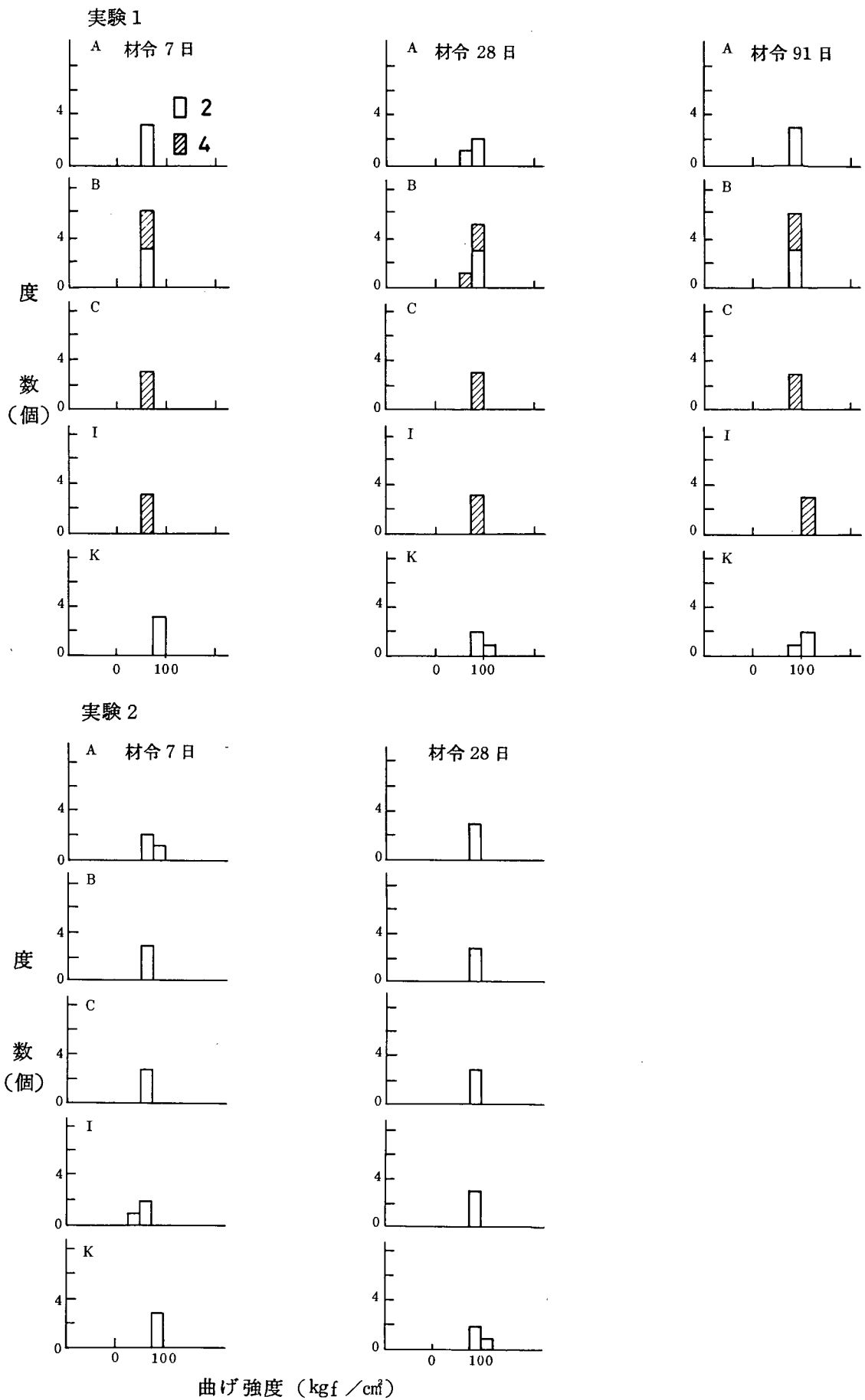


図-38 モルタルの曲げ強度のヒストグラム

2.5 水和発熱過程

コンダクションカロリメーターを用いて注水直後から48時間までの水和発熱過程を測定した。まずセメント2gと骨材2gを5分間混合し、この混合試料1.3gをはかりとり、8~10kgの荷重をかけ直径13mmの錠剤を3個成型した。試料容器に3個の錠剤を並べ、その上方にあるゴム膜でシールされた試料筒に所定のW/Cとなる蒸留水をいれる。次に熱量計の恒温体の温度(30℃に設定)と試料容器の温度が同一になるよう24時間待った後、4時間以上ベースラインの安定性を調べた。ベースラインの安定性を確認した後、蒸留水の入ったゴム膜シールを針で破り錠剤に水を落して水和を開始させた。

モルタルの配合は次のとおりである。

S/C : 1

W/C : 0.55・0.65・0.75

骨材粒度: 125~105・105~88・88~63 μ m

実験用骨材には比較用のために豊浦標準砂を加えた。

水和発熱曲線は図-39に示すように区分される。表-15に各区間の発熱量およびピークの時間などを示した。

図-40に各試料の水和発熱曲線を示す。図でまずわかるのは、モンモリロナイト含有骨材の曲線は相

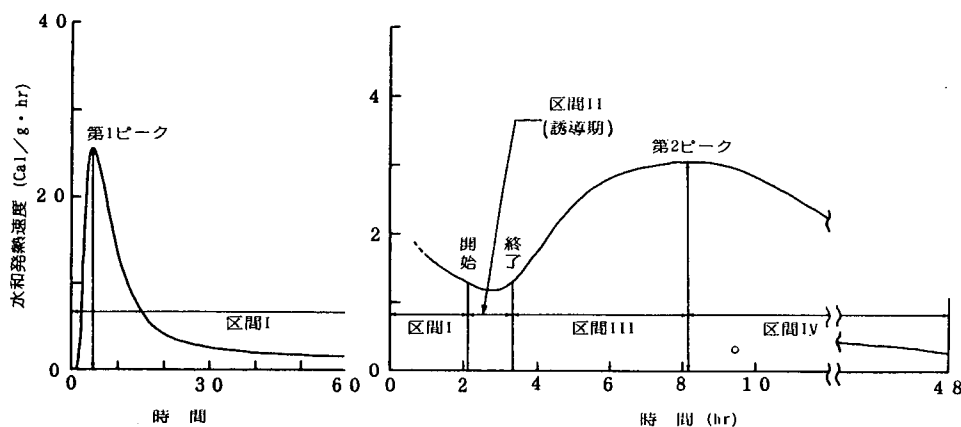


図-39 モルタルの水和発熱曲線の区分

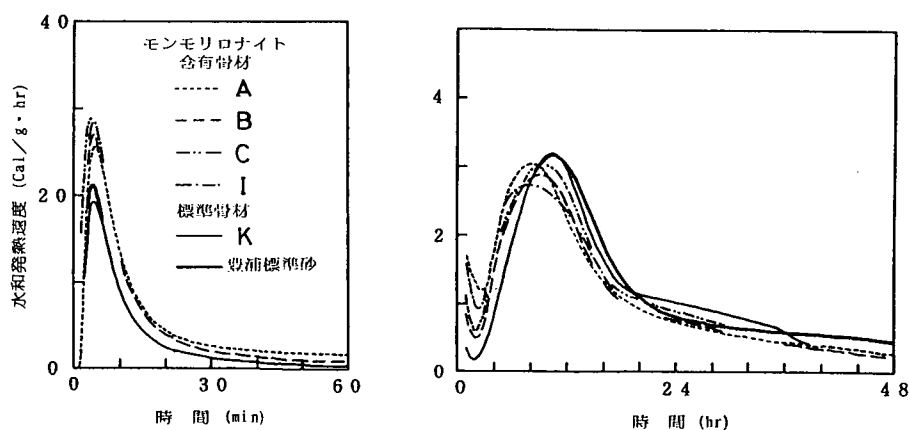


図-40 モンモリロナイト含有骨材と標準骨材で作製したモルタルの水和発熱過程の比較 (W/C=0.65, 粒径105~88 μ m)

表-15 モルタルの水和発熱過程

1) 粒径一定, 88~105 μm

骨 材 名	W／C	第1ピー クの時間 (分：秒)	誘 導 期 （区 間 Ⅱ）			第2ピー クの時間 (時：分)	発 熱 量 （c a l／g）					
			開 始 (時：分)	終 了 (時：分)	時 間 (時：分)		区間Ⅰ	区 間 Ⅱ		区間Ⅲ	区間Ⅳ	48時間
									* 1			
A	0.55	3:00	2:00	3:12	1:12	7:21	6.98	1.43	1.195	11.04	36.70	56.16
	0.65	3:30	2:09	3:18	1:09	8:09	7.21	1.39	1.211	12.15	36.01	56.76
	〃	3:30	2:03	3:12	1:09	7:15	7.06	1.37	1.190	10.74	36.45	55.61
	0.75	3:30	2:15	3:21	1:06	8:24	7.40	1.35	1.227	12.68	35.43	56.86
	〃	3:45	2:06	3:15	1:09	7:09	7.07	1.38	1.203	10.22	37.87	56.54
B	0.55	2:45	1:39	2:33	0:54	9:03	5.44	0.54	0.604	14.92	35.57	56.48
	0.65	3:30	1:45	2:39	0:54	8:15	5.64	0.46	0.516	11.06	36.40	53.57
	〃	3:15	1:42	2:36	0:54	9:15	5.60	0.48	0.530	14.02	35.35	55.44
	0.75	3:30	1:45	2:42	0:57	9:00	5.57	0.52	0.549	13.09	34.48	53.66
C	0.55	3:15	1:51	2:39	0:48	9:03	6.20	0.44	0.556	13.65	33.83	54.12
	0.65	3:15	1:48	2:39	0:51	9:27	6.28	0.51	0.604	15.38	36.96	59.13
	0.75	3:00	1:45	2:36	0:51	9:39	5.08	0.38	0.445	14.76	37.35	57.56
I	0.55	3:15	2:00	2:57	0:57	8:12	6.85	0.85	0.949	11.56	33.28	52.55
	0.65	3:15	2:03	2:57	0:54	7:51	7.18	0.86	0.951	11.18	37.10	56.31
	0.75	3:30	2:03	3:00	0:57	8:06	7.08	0.89	0.908	11.52	35.98	55.48
K	0.55	3:30	1:45	2:36	0:51	9:39	5.08	0.38	0.445	14.76	37.35	57.56
	〃	3:00	1:30	2:09	0:39	9:33	3.68	0.16	0.242	15.26	36.15	55.24
	0.65	3:00	1:33	2:09	0:36	10:18	3.52	0.10	0.170	15.30	37.49	56.41
	0.75	3:15	1:39	2:12	0:33	10:18	3.68	0.12	0.211	15.43	36.88	56.11
標 準 砂	0.55	3:15	1:45	2:21	0:36	10:33	3.63	0.11	0.180	15.23	35.46	54.43
	0.65	3:00	1:33	2:27	0:54	10:21	3.77	0.21	0.237	15.19	38.62	57.79
	0.75	3:15	1:39	2:12	0:33	11:00	3.43	0.08	0.149	15.53	32.20	51.25

* 1 区間 II の平均発熱速度 (cal/g·hr)

表-15 つづき

2) W/C一定, 0.65

骨 材 名	粒 径 (μ m)	第1ピー クの時間 (分：秒)	誘 導 期 (区 間 II)			第2ピー クの時間 (時：分)	発 熱 量 (c a l / g)					
			開 始 (時：分)	終 了 (時：分)	時 間 (時：分)		区間Ⅰ	区間Ⅱ		区間Ⅲ	区間Ⅳ	48時間
			* 1									
A	125～105	3:30	2:03	3:18	1:15	8:21	6.92	1.48	1.184	12.69	36.05	57.15
	105～ 88	3:30	2:09	3:18	1:09	8:09	7.21	1.39	1.211	12.15	36.01	56.76
	〃	3:30	2:03	3:12	1:09	7:15	7.06	1.37	1.190	10.74	36.45	55.61
	88～ 63	3:00	2:09	3:21	1:12	7:33	7.93	1.68	1.403	12.11	38.04	59.76
	〃	3:00	2:15	3:24	1:09	8:03	8.02	1.60	1.394	13.20	37.64	60.46
B	125～105	3:15	1:42	2:39	0:57	10:21	5.45	0.58	0.607	16.17	32.41	54.61
	〃	3:30	1:42	2:39	0:57	8:54	5.49	0.48	0.505	12.94	33.18	52.08
	105～ 88	3:30	1:45	2:39	0:54	8:15	5.64	0.46	0.516	11.06	36.40	53.57
	〃	3:15	1:42	2:36	0:54	9:15	5.60	0.48	0.530	14.02	35.35	55.44
	88～ 63	3:15	1:42	2:42	1:00	10:24	5.59	0.57	0.566	17.69	34.60	58.45
	〃	3:30	1:42	2:36	0:54	9:09	5.52	0.49	0.544	14.40	37.77	58.18
C	125～105	3:15	1:51	2:36	0:45	8:51	5.98	0.42	0.556	13.61	32.38	52.40
	〃	3:00	1:48	2:36	0:48	9:03	6.09	0.43	0.540	14.57	32.53	53.62
	105～ 88	3:15	1:48	2:39	0:51	9:27	6.28	0.51	0.604	15.38	36.96	59.13
	88～ 63	3:30	1:54	2:39	0:45	10:15	6.38	0.44	0.583	17.31	31.25	55.38
	〃	3:15	1:51	2:42	0:51	9:21	6.34	0.51	0.600	15.77	38.82	61.44
I	125～105	3:15	2:00	3:00	1:00	8:18	6.99	0.91	0.908	11.91	35.19	55.00
	105～ 88	3:15	2:03	2:57	0:54	7:51	7.18	0.86	0.951	11.18	37.10	56.31
	88～ 63	3:30	2:03	3:00	0:57	7:57	7.20	0.90	0.942	11.61	37.68	57.38
K	125～105	3:15	1:36	2:12	0:36	10:33	3.71	0.12	0.203	15.56	33.29	52.69
	105～ 88	3:00	1:33	2:09	0:36	10:18	3.52	0.10	0.170	15.30	37.49	56.41
	88～ 63	3:15	1:33	2:09	0:36	10:33	3.77	0.14	0.230	16.14	35.78	55.83
標 準 砂	125～105	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	105～ 88	3:00	1:33	2:27	0:54	10:21	3.77	0.21	0.237	15.19	38.62	57.79
	88～ 63	3:15	1:42	2:18	0:36	10:39	3.86	0.12	0.193	15.64	35.04	54.65
	〃	3:15	1:33	2:18	0:45	10:18	3.73	0.15	0.204	14.77	35.97	54.62

* 1 区間 II の平均発熱速度 (cal/g・hr)

互に類似しているが、標準骨材の曲線とは明らかに異なっていることである。第1ピークの時間は両者でほとんど変わらないが、発熱量はモンモリロナイト含有骨材の方が大きい。また、第2ピークでは発熱量は逆に標準骨材が大きく、ピークの時間はモンモリロナイト含有骨材の方が2時間程度早い。第1ピークは通常、遊離石灰の水和や $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の水和による発熱、第2ピークは $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の水和発熱であるといわれている。モンモリロナイトが骨材中に含まれていることによってこれらの水和（硬化）の状態が、通常の場合と異なっていることは明らかである。モンモリロナイトからイオン交換によってCaが細孔溶液中に出てきているとすると、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ や、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の生成が促進されることが考えられる。

次に各骨材を使ったモルタルの配合等の違いによる曲線の変化をみる。図-41は異なるW/Cでの曲線を比較したものである。第1ピークではW/Cが大きい方が発熱量が小さくなるが、第2ピークでは明瞭な傾向はない。図-42は粒径を変えて曲線を比べたものである。第1、第2ピークとも粒径が小さい方が発熱量が大きくなっている。これは骨材粒径が小さくなることによって反応面積が増加し、モンモリロナイトとモルタル中の容液の反応が活発になるためと考えられる。しかし、いずれの条件を変えた場合の変化よりも、モンモリロナイトを含むか否かの要因の方が曲線をより大きく変化させている。

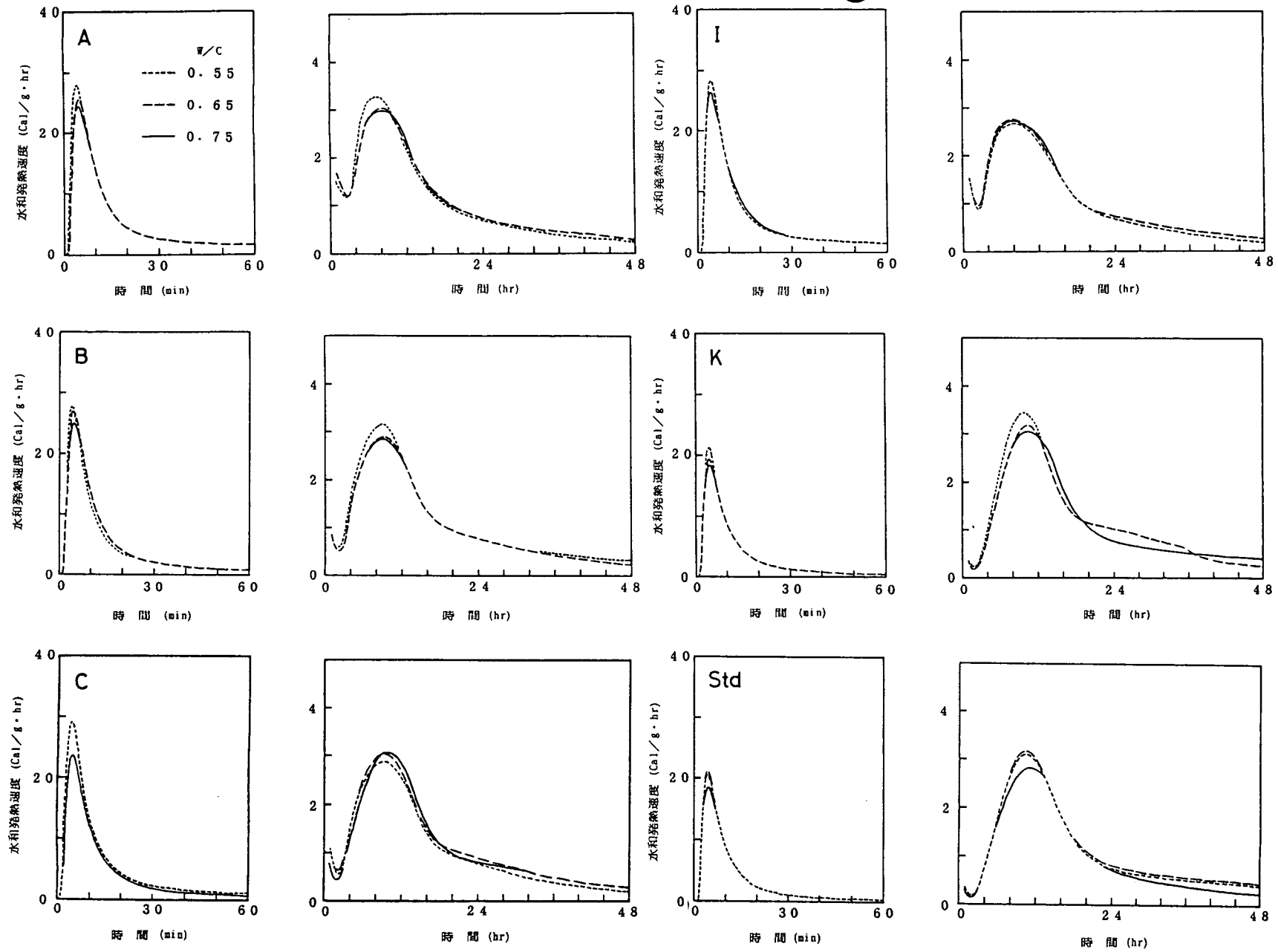


図-41 W/Cの違いによるモルタルの水和発熱曲線の比較 (粒径一定, 105~88 μ m)

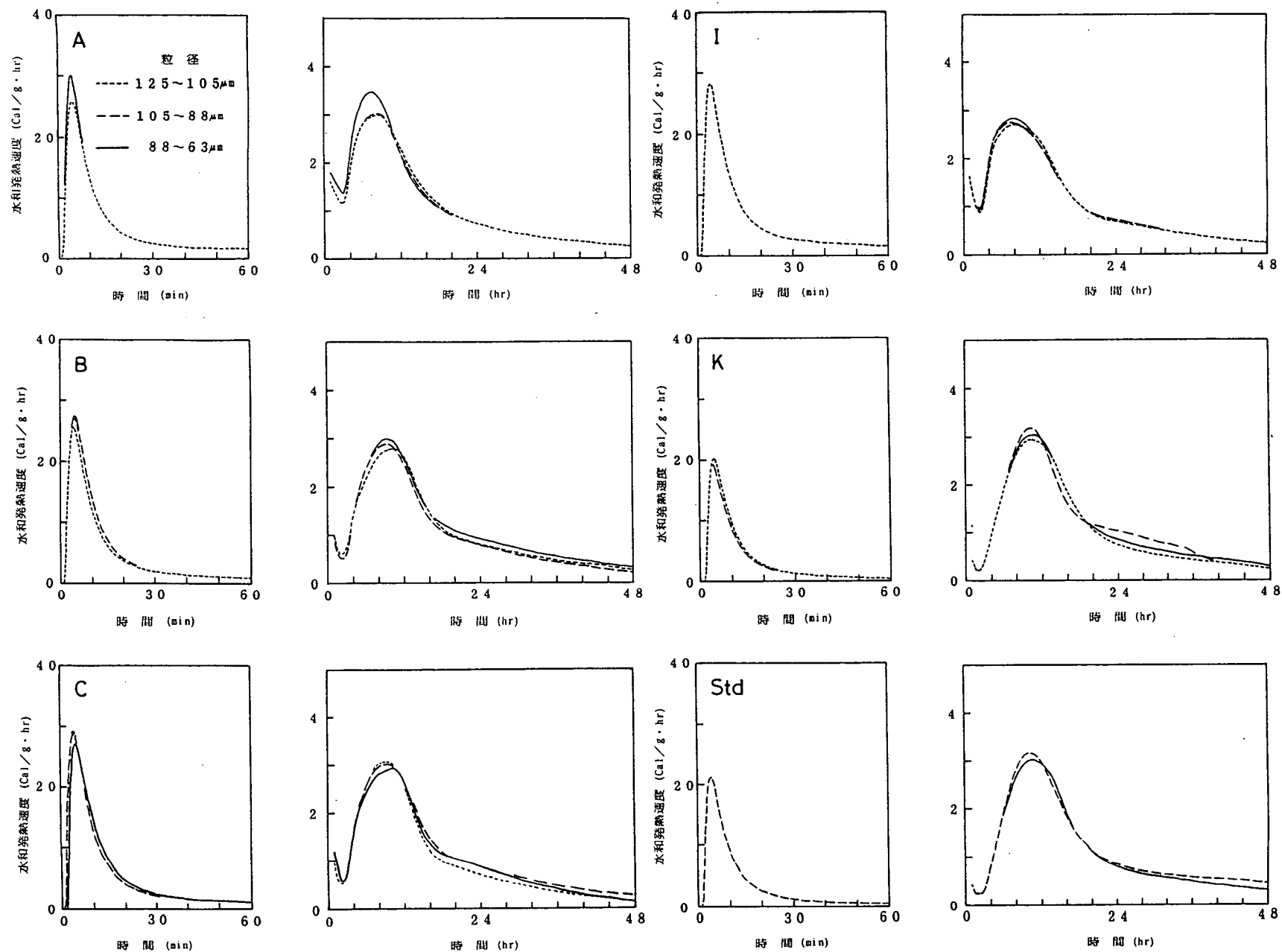


図-42 粒径の違いによるモルタルの水和発熱曲線の比較 (W/S 一定, 0.65)

2.6 細孔溶液の化学組成

細孔溶液の組成は、練り混ぜしたモルタル供試体をシリンダーに挿入して、ピストンで圧縮して得られた溶液を水質分析して得た結果である。この時、細孔溶液の化学組成を経時的に検討して、モルタル中で生じている化学反応を推定するものである。

表-16に分析結果を図-43に各粘土鉱物含有骨材の場合と健全骨材Kの場合と比較したものを示した。

Naイオンはいずれの骨材も時間の経過とともに増加している。濃度について見ると、A骨材はK骨材に比較して濃度の推移はほとんど同じであるが、B骨材はやや下回っており、C、I骨材は大きく下回っている。B、C、I骨材はセメントの水和の進行によって放出されるNaイオンがモンモリロナイトにイオン交換され、その濃度が低下するようなNaイオンの液相から固相への動きが生じていることが考えられる。

Kイオンはいずれの骨材も時間の経過とともに、僅かであるが増加している。濃度について見ると、全ての粘土鉱物含有骨材はK骨材に比較して、濃度が大きく下回って推移している。全ての粘土鉱物含有骨材は、セメントの水和の進行によって放出されるKイオンが、モンモリロナイトにイオン交換され、その濃度が低下するようなKイオンの液相から固相への動きが生じていることが考えられる。

CaイオンはA、B、C、I、K骨材とともに、0時間では40~50meq/lで、6時間付近で最大濃度となり、10時間を経過して次第に濃度が低下し、28日では10meq/l前後となる。これに対して、標準砂のCaイオン濃度は0時間が最も高く、次第に低下している。濃度について見ると、全ての粘土鉱物含有骨材はK骨材に比較して、濃度が大きく下回って推移している。全ての粘土鉱物含有骨材はセメントの水和の進行によって放出されるCaイオン以外に、モンモリロナイトから放出されるCaイオンが多くあることを示している。

陰イオンの変化についてみると、硫酸、水酸、炭酸イオンの総量はほぼ4陽イオンの総量に匹敵している。

硫酸イオンは、A、B、C、I、K、標準砂ともに、練り混ぜ後10時間でほぼ消滅している。硫酸イオンの減少を補うために水酸イオンが増加している。炭酸イオンは全体的に低く、時間の経過とともに増加している。濃度について見ると、全ての粘土鉱物含有骨材はK骨材に比較して、濃度が大きく下回って推移している。

以上から粘土鉱物を含有する場合とそうでない場合では、細孔溶液の化学組成に著しい違いがあることが明らかである。この違いを検討することで、粘土鉱物含有骨材に関する評価方法を提案できる可能性が考えられる。

表-16 モルタル細孔溶液の化学組成

A 骨材

		0 時間	2 時間	6 時間	10時間	24時間	7 日	28 日
pH		12.8	—	13.0	—	13.2	13.4	13.6
陽 イ オ ン	Na	93.5	—	115.2	—	122.6	207.8	276.5
	K	29.0	—	31.0	—	34.4	50.8	88.5
	Ca	37.0	—	67.5	—	19.5	4.0	3.5
	Mg	0	—	0	—	0	0	0
	Total	159.5	—	213.7	—	176.5	262.6	368.5
陰 イ オ ン	SO ₄	120.8	—	105.4	—	<0.2	<0.2	<0.2
	OH	50.8	—	131.2	—	151.8	207.4	290.6
	CO ₃	5.6	—	8.4	—	5.2	25.2	29.2
	Total	177.2	—	245.0	—	157.0	232.6	319.2

B 骨材

		0 時間	2 時間	6 時間	10時間	24時間	7 日	28 日
pH		12.8	—	12.9	—	13.1	13.3	—
陽 イ オ ン	Na	41.7	—	37.4	—	63.5	148.7	—
	K	32.8	—	22.6	—	28.2	67.4	—
	Ca	48.0	—	85.5	—	35.0	4.5	—
	Mg	0	—	0	—	0	0	—
	Total	122.5	—	145.5	—	126.7	220.6	—
陰 イ オ ン	SO ₄	71.7	—	54.8	—	<0.2	<0.2	—
	OH	46.4	—	83.8	—	111.0	174.8	—
	CO ₃	6.0	—	4.0	—	4.0	31.6	—
	Total	124.1	—	142.6	—	115.0	206.4	—

単位はmeq/l

表-16 つづき

C 骨材

		0 時間	2 時間	6 時間	10時間	24時間	7 日	28 日
	pH	12.8	12.9	13.0	12.8	13.0	13.2	13.3
陽 イ オ ン	Na	50.4	30.0	27.0	29.6	41.3	64.8	83.0
	K	29.7	13.6	10.5	10.5	10.3	14.9	17.9
	Ca	51.5	80.0	87.0	64.0	30.5	25.0	9.0
	Mg	0	0	0	0	0	0.1	0.1
	Total	131.6	123.6	124.5	104.1	82.1	104.7	109.9
陰 イ オ ン	SO ₄	62.3	44.3	38.1	34.3	<0.2	<0.2	<0.2
	OH	49.0	69.4	77.6	53.8	70.0	87.6	90.8
	CO ₃	4.4	4.0	2.4	7.2	3.2	4.0	9.6
	Total	115.7	117.7	118.1	95.3	73.2	91.6	100.4

I 骨材

		0 時間	2 時間	6 時間	10時間	24時間	7 日	28 日
	pH	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3
陽 イ オ ン	Na	72.6	53.9	47.8	48.7	56.1	75.7	76.1
	K	23.3	11.3	8.7	7.2	7.7	10.5	11.0
	Ca	47.0	67.5	79.0	59.0	27.0	22.0	11.0
	Mg	0	0	0.1	0	0	0	0.1
	Total	147.9	132.7	135.6	114.9	90.8	108.2	98.2
陰 イ オ ン	SO ₄	82.3	53.8	44.3	6.7	2.5	<0.2	<0.2
	OH	52.4	69.6	81.0	80.2	72.6	84.6	81.6
	CO ₃	4.8	4.0	2.8	4.4	2.8	4.0	7.6
	Total	139.5	127.4	128.1	91.3	77.9	88.6	89.2

単位はmeq/l

表-16 つづき

K 骨材

		0 時間	2 時間	6 時間	10時間	24時間	7 日	28 日
pH		13.0	—	13.1	—	13.4	13.6	13.9
陽 イ オ ン	Na	66.5	—	70.0	—	121.3	219.1	261.7
	K	112.3	—	138.2	—	178.7	246.7	373.8
	Ca	44.0	—	57.0	—	9.5	4.5	7.5
	Mg	0.1	—	0	—	0	0	0.3
	Total	222.9	—	265.2	—	309.5	470.3	643.3
陰 イ オ ン	SO ₄	163.3	—	152.2	—	<0.2	<0.2	<0.2
	OH	97.4	—	127.0	—	271.2	394.4	503.2
	CO ₃	6.8	—	4.8	—	15.6	36.8	54.4
	Total	267.5	—	284.3	—	286.8	431.2	557.6

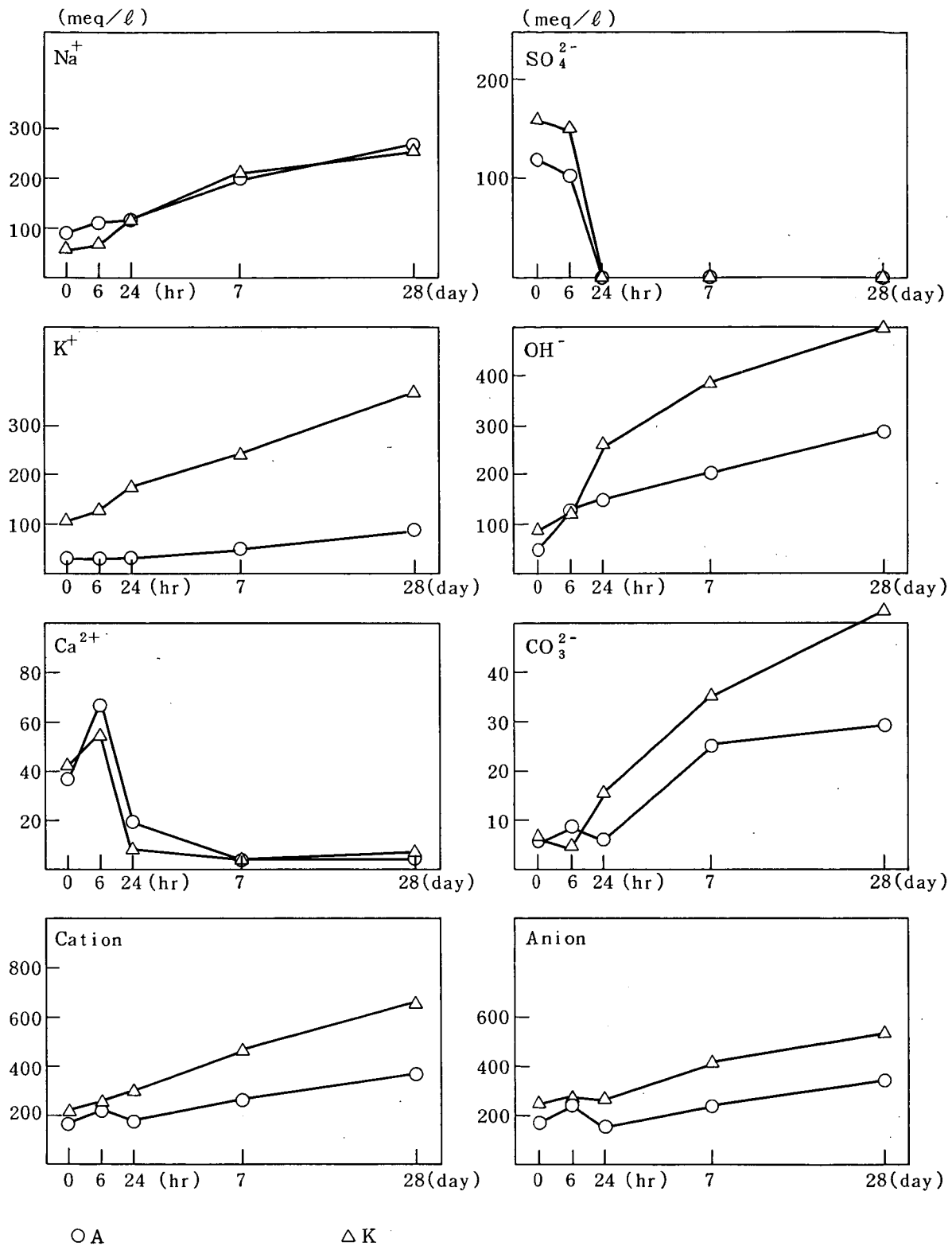


図-43(1) モルタル細孔溶液の化学組成の経時変化 (A, K)

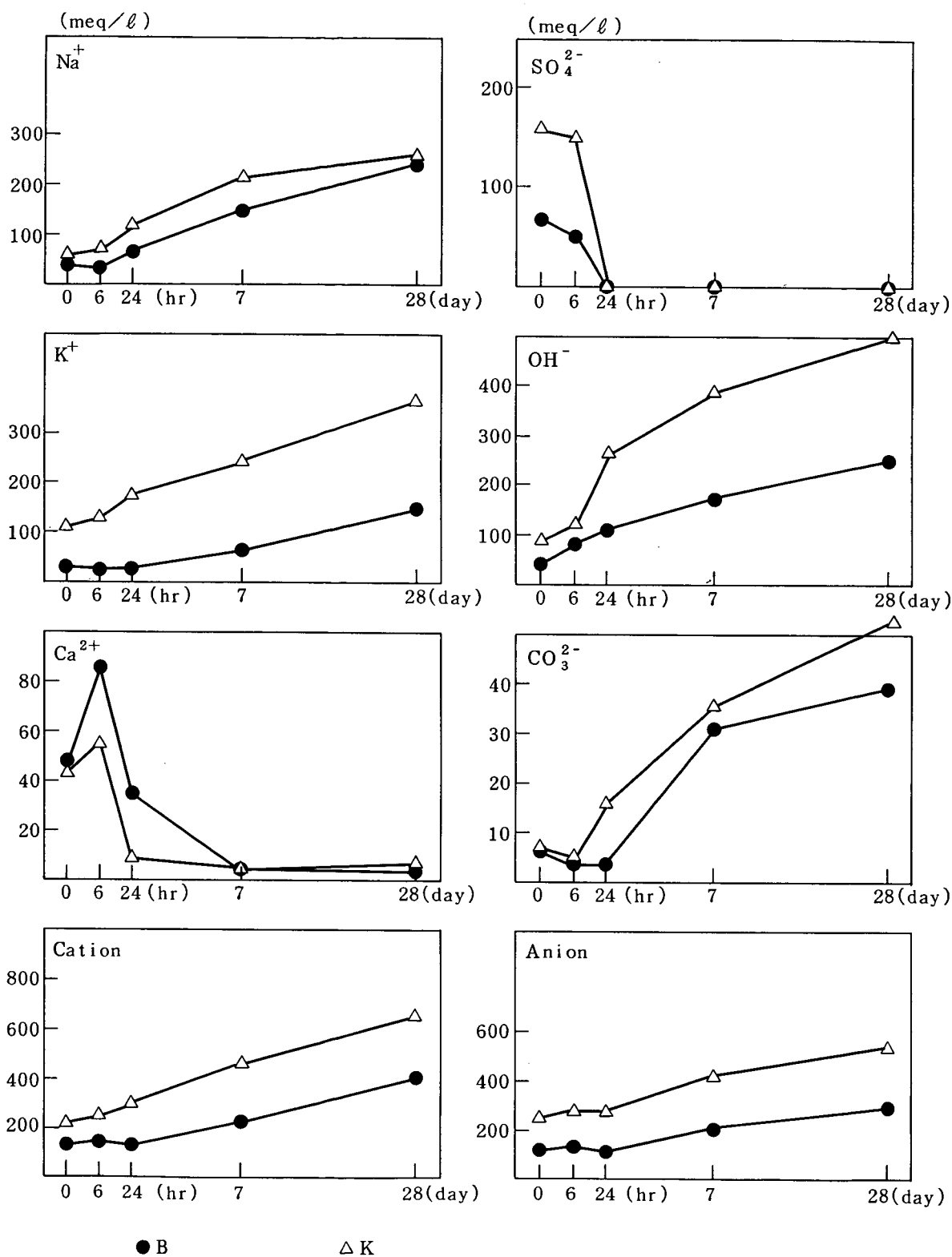


図-43(2) モルタル細孔溶液の化学組成の経時変化 (B, K)

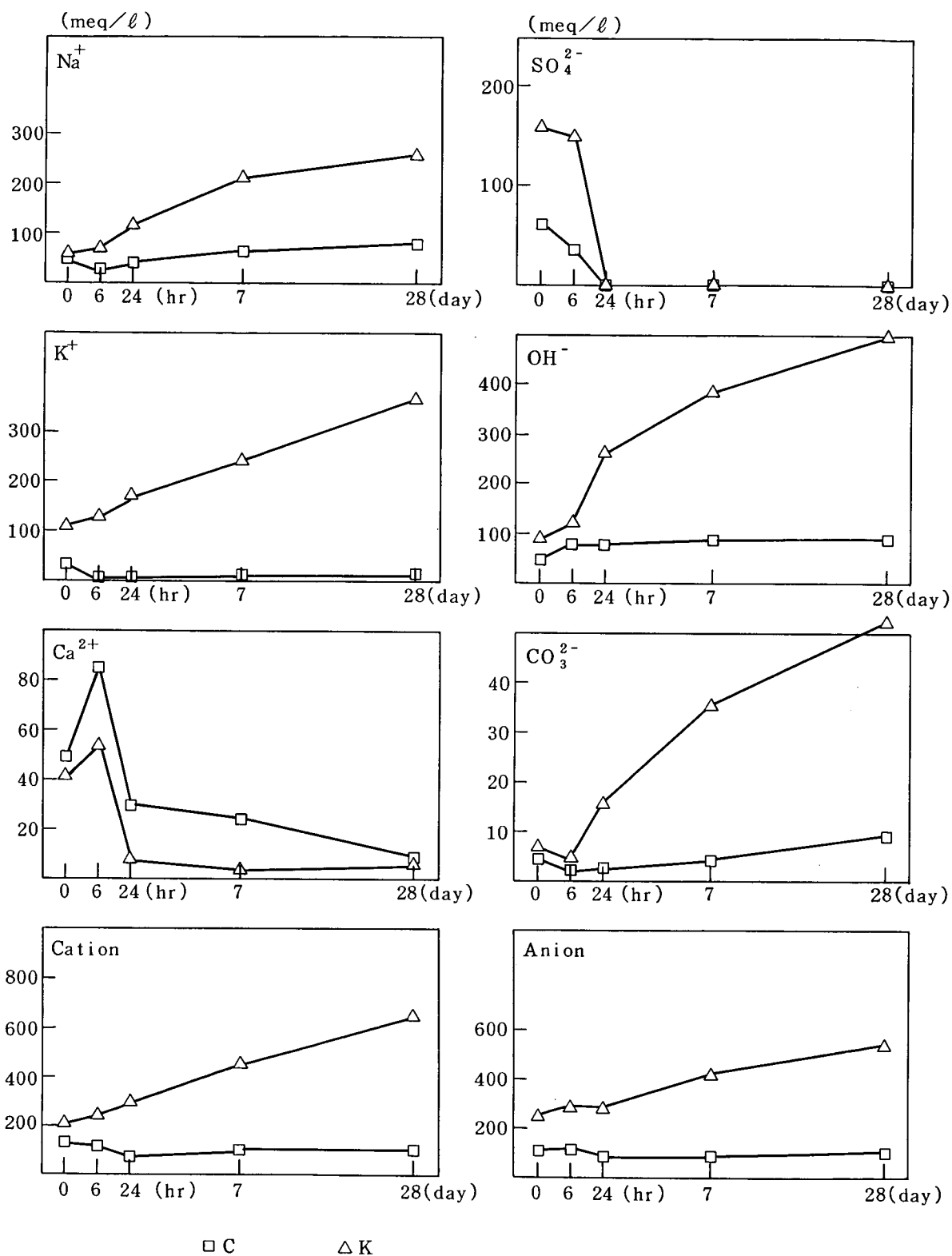


図-43(3) モルタル細孔溶液の化学組成の経時変化 (C, K)

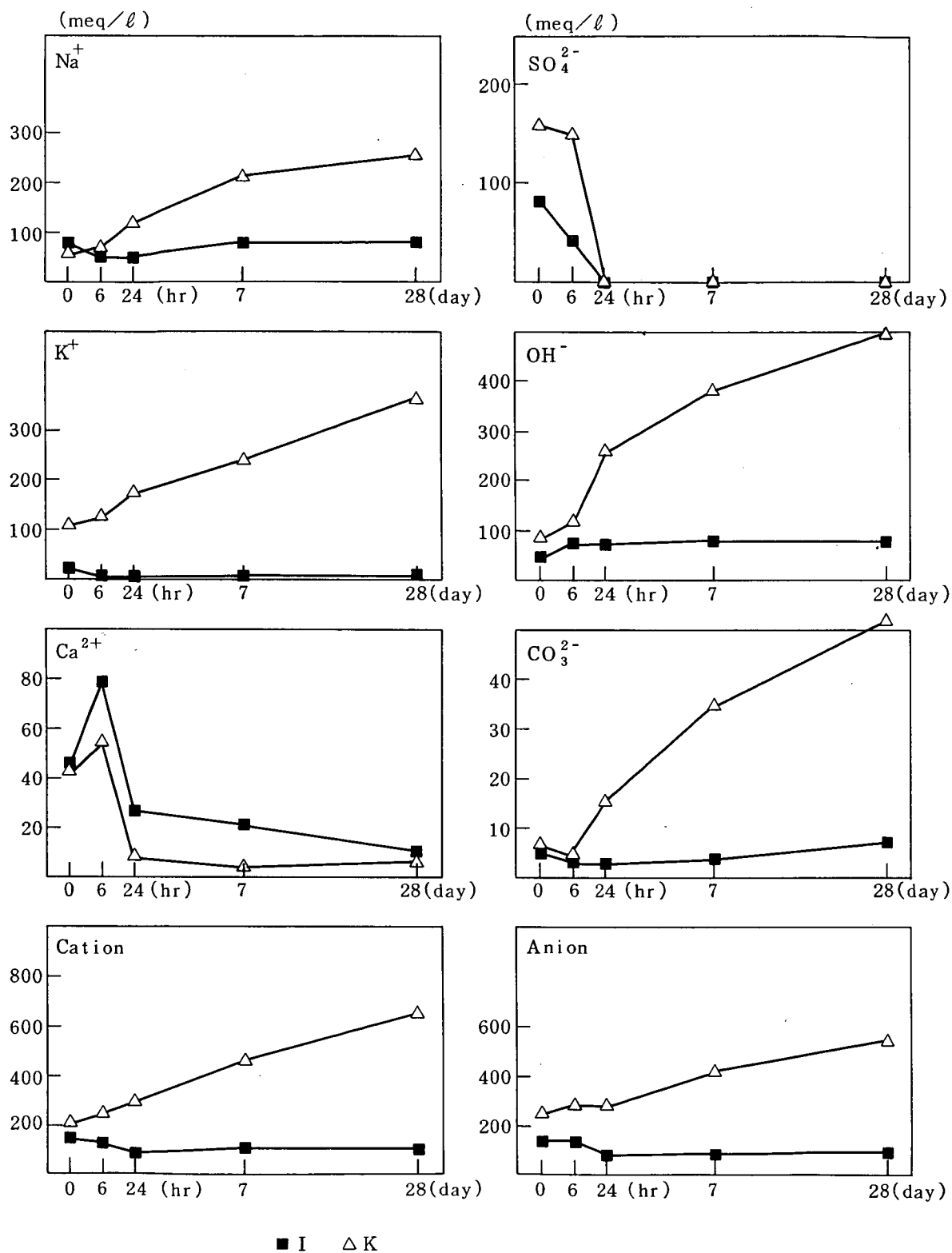


図-43(4) モルタル細孔溶液の化学組成の経時変化 (I, K)

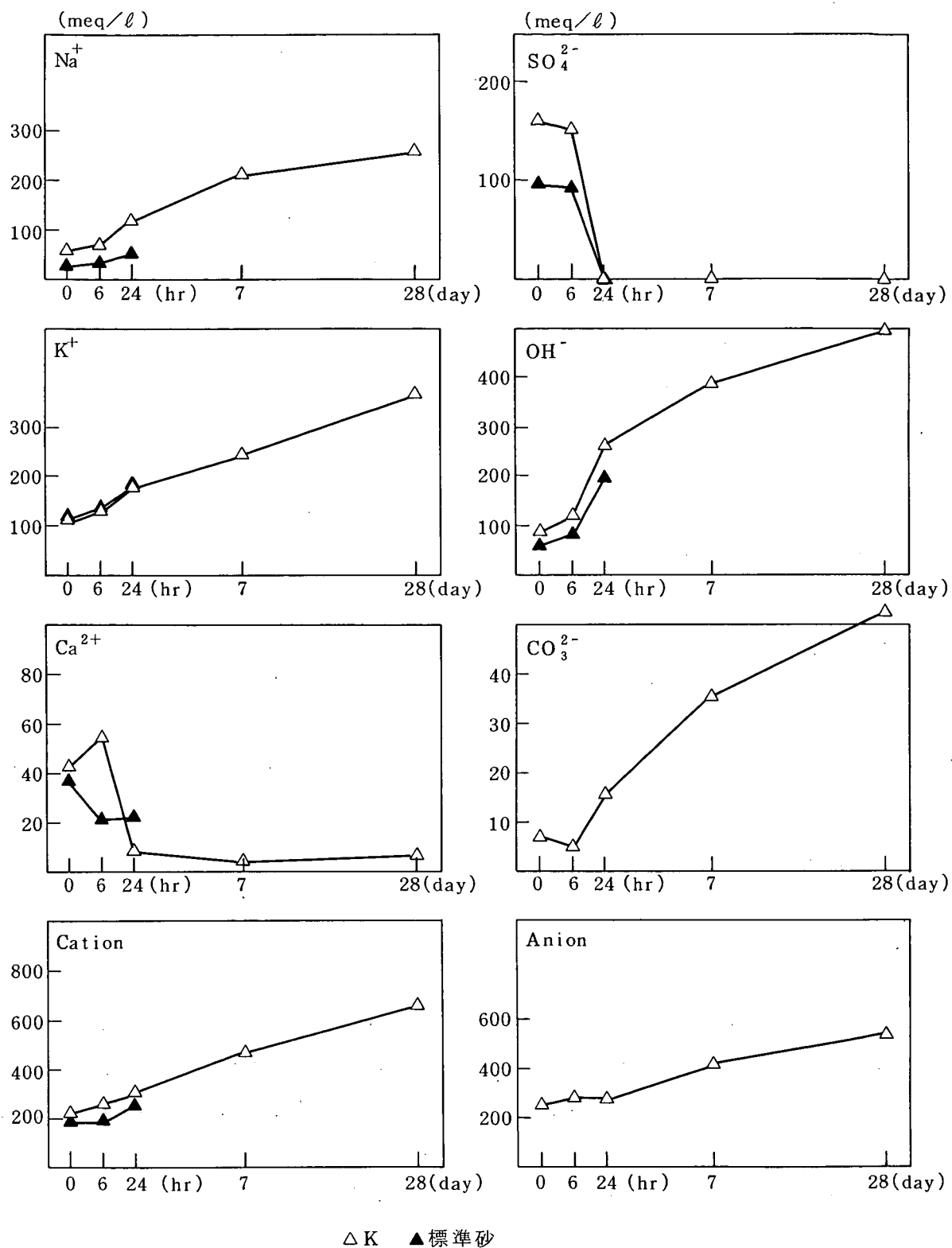


図-43(5) モルタル細孔溶液の化学組成の経時変化 (K, 標準砂)

2.7 まとめ

モルタルの試験（凝結硬化速度・フロー値・強度試験）はモルタルレバー法の粒度に調整したもの（実験1）と、この粒度にさらに $150\mu\text{m}$ 以下の微粒分を混ぜたもの（実験2）の2通りについて行った。

1) 凝結硬化速度

実験1では明瞭な傾向はみられない。実験2では始発、終結の速度の速いものから A, C, I, K = B となっており、B は標準骨材の K とあまり変わらない傾向を示している（始発は B の方が速く、終結は K の方が速い）。

2) フロー値

実験1の値は試験機関によってばらついている。実験2ではフロー値は小さい（固い）ものから、A, C, B = I = K の順となっており、B, I では標準骨材 K と相違がない。

3) 強度

実験2で強度は圧縮、曲げともに標準骨材に比べ粘土鉱物含有骨材をつかったモルタルで劣っている。最も劣っているのは材令7日の圧縮強度で、強度の低い順に $I < C < B < A < K$ となる。一方、曲げ強度の両者の差は小さい。

4) 水和発熱過程

標準骨材と粘土鉱物含有骨材では、第1ピークの発熱量および第2ピークの時間が明らかに異なっている。第1ピークの発熱量は高いものから $A = I, C, B, K = \text{標準砂}$ の順である。第2ピークの時間の早さもほぼ第1ピークの発熱量と同じ順である。これらのピークの発熱量や時間と骨材の粒径、水セメント比との間には明瞭な関係は認められない。

5) 細孔溶液の化学組成

- (1) Naイオン濃度はK骨材に比べるとAでほぼ同様の他は、粘土鉱物含有骨材で低い。特にC, Iで低くなっている。このことはNaイオンがイオン交換によってモンモリロナイトに吸着されていることを示している。
- (2) Kイオン濃度はK骨材に比べすべての粘土鉱物含有骨材で圧倒的に低い。Naイオンと同様に、Kイオン交換によってモンモリロナイトへ吸着されていることを示しているものと考えられる。
- (3) Caイオン濃度はK骨材に比べすべての粘土鉱物含有骨材で高くなっている。すなわち、Na, Kイオンとは逆にモンモリロナイト中のCaが放出されている。
- (4) 上記のように、陽イオンの移動は次のようにまとめられる。

モンモリロナイト中のCaイオン $\rightleftharpoons$ 溶液中のNa, Kイオン

- (5) SO_4 , OH , CO_3 の各陰イオン濃度は、K骨材に比べすべての粘土鉱物含有骨材で低くなっている。
- (6) 凝結硬化速度・フロー値・強度などは $150\mu\text{m}$ 以下の微粒分が試料に含まれないと、データがばらついてしまう。これは微粒分がないことによってブリージングの様子が異なってくるためと考えられる。

3. コンクリートの性質

3.1 配 合

3.1.1 使用材料

1) 実験用骨材

粘土鉱物含有骨材として A, B, C および I 骨材を使用し, 標準骨材として K 骨材を使用した。

表-17 および表-18 に使用骨材の物理的性質 (比重, 吸水率), 表-19 および表-20 に粒度を示す。

表-17 碎石 (粗骨材) の物理的性質

試 料	A	B	C	I	K
比 重	2.566	2.721	2.690	2.744	2.654
吸水率 (%)	3.455	2.120	2.135	3.025	0.699

表-18 砕砂 (細骨材) 物理的性質

試 料	A	B	C	I	K
比 重	2.550	2.681	2.625	2.678	2.603
吸水率 (%)	3.346	2.410	3.747	3.727	1.724

表-19 碎石 (粗骨材) の粒度分布

	碎石の種類				
	A	B	C	I	K
	累 加 残 留 率 (%)				
2 0	3	1	1	0	1
1 5	13	25	28	10	9
1 0	53	91	96	44	46
5	97	100	100	93	95
5 以下	100	100	100	100	100
F. M.	6.70	6.92	6.97	6.47	6.51

表-20 砕砂（細骨材）の粒度分布

	砕 石 の 種 類						
	A	B	C	I	K	B粒調後*	K粒調後*
	累 加 残 留 率 (%)						
5	0	1	1	0	1	1	2
2.5	7	8	12	17	43	6	37
1.2	32	23	38	51	61	19	61
0.6	62	46	65	73	73	46	76
0.3	83	69	82	84	80	75	85
0.15	96	91	95	93	88	94	93
0.15以下	100	100	100	100	100	100	100
F. M.	2.80	2.38	2.93	3.18	3.46	2.41	3.54

* B 砕砂粒度調整：0.3mm以下1/3減らし、再混合
 K 砕砂粒度調整：（粒調前石砂）／（2.5mm～0.15mm）＝2/1の比率で再混合

2) セメント

N社製普通ポルトランドセメントを使用した。表-21、22に使用セメントの物理的性質および化学組成を示す。

表-21 セメントの物理的性質（ミルシートより）

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結					安定性	フロー値 (mm)	曲げ強さ (kgf/cm ²)				圧縮強さ (kgf/cm ²)			
		室温 (℃)	湿度 (%)	水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)			1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
3.15	3280	20.5	90	28.8	2-25	4-08	良	265	—	38	50	71	—	167	265	415

表-22 セメントの化学組成（ミルシートより）

化 学 成 分 (%)									比 率 係 数				
強熱 減量	不溶 残分	二酸化 ケイ素	酸 化 アルミニウム	酸 化 第二鉄	酸 化 カルシウム	酸 化 マグネシウム	三酸化 硫 黄	合 計	水硬率	活動 係数	けい酸 率	アルミナ鉄 比	石 灰 飽和度
ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	H. M.	A. L.	S. M.	I. M.	L. S. D.
0.7	0.2	21.7	5.0	2.7	64.0	1.7	2.1	98.1	2.13	4.3	2.8	1.9	0.91

全アルカリ量 R₂O(%)
 Na₂O K₂O R₂O
 0.35+0.51×0.658=0.69%

3) 混和剤

遅延型 A E 減水剤（P_{oz}, No.8）および空気量調整剤（P_{oz}, No.303）を使用した。

4) 練り混ぜ水

水道水を使用した。

3.1.2 コンクリートの種類・配合

1) コンクリートの種類

表-23に粗骨材および細骨材の組合せによるコンクリートの種類を示す。

表-23 コンクリートの種類

No	粗骨材	細骨材	No	粗骨材	細骨材
1	A	A	6	A	K
2	B	B	7	B	K
3	C	C	8	C	K
4	I	I	9	I	K
5	K	K	—	—	—

2) 配 合

各コンクリートの配合は、使用骨材の違いによるコンクリートの物性値の相違を比較検討するために、粗骨材最大寸法 $G_{max}=20\text{mm}$ 、水セメント比 $W/C50\%$ 、細骨材率 $S/a=42\%$ 、単位水量 $W=185\text{kg}/\text{m}^3$ 、A E減水剤使用量： $C \times 0.25\%$ （粉末）で同一とした。また、セメントについても一括購入したN社製普通ポルトランドセメントを使用することとした。ただし、各コンクリートの目標空気量は $4 \pm 1\%$ とし、試験練りを行い空気調整剤により調整した。表-24に各コンクリートの配合を示す。

表-24 コンクリートの配合

組 合 せ			W/C (%)	S/a (%)	示 方 配 合 (kg/m³)						練り上り 温度 (℃)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)
No	粗骨材	細骨材			C	W	S	G	混 凝 和 材				
									No 8	303A			
1	A	A	50	42	370	185	705	979	0.925 kg	4.5A	21.5	9.0	4.6
2	B	B					741	1038		3 A	20.5	18.0	4.8
3	C	C					725	1026		2.5A	20.5	17.0	4.9
4	I	I					740	1046		2 A	20.5	15.0	4.9
5	K	K					719	1013		4.5A	21.0	17.0	4.6
6	A	K						979		6 A	21.0	12.0	5.1
7	B	K						1038		5 A	20.5	18.5	3.4
8	C	K						1026		5 A	20.0	18.0	4.5
9	I	K						1046		3 A	20.5	16.0	4.7

No 8 使用量 = $C \times 0.25\%$ kg (粉末)
303A nA 使用量 = $n \times 5.92\text{ml}$ (現液)

3.2 フレッシュコンクリートの性質

表-25にフレッシュコンクリートの性質を示す。

表-25 フレッシュコンクリートの性質

組み合わせ	練上り 温 度 (℃)	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリージング試験		凝 結 硬 化 速 度 試 験			
				ブリージング	ブリージング率	5mmでウエットスクリーニング		2.5mmでウエットスクリーニング	
				終了時間	(%)	始 発	終 結	始 発	終 結
A-A	21.5	9	4.6	2-00	0.73	5-45	9-00	5-50	9-05
B-B	20.5	18	4.8	2-30	2.53	6-50	10-30	7-15	10-25
C-C	20.5	17	4.9	3-00	2.64	6-45	10-05	7-20	10-15
I-I	20.5	15	4.9	2-40	1.99	6-05	8-50	6-50	9-30
K-K	21	17	4.6	5-30	3.98	9-40	12-20	10-35	13-45
A-K	21	12	5.1	4-30	2.74	9-05	12-10	10-30	13-35
B-K	20.5	18.5	3.4	5-00	4.93	7-55	11-00	9-40	12-20
C-K	20	18	4.5	5-00	4.37	10-20	13- 5	11-25	14-10
I-K	20.5	16	4.7	5-30	4.46	8-15	10-40	9-10	12-25

3.2.1 スランブ

スランブはA骨材を使用したコンクリート（A-A，A-K）だけが標準コンクリート（K-K）に比べ特に小さくなったが，その他のコンクリートは同程度であった。

3.2.2 ブリージング

表-25および図-44にブリージング試験結果を示す。粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも標準コンクリートに比べブリージング率は小さく，またブリージング終了時間も2～3時間早くなっている。細骨材に標準骨材を使用したコンクリートでは，A-Kコンクリートが標準コンクリートに比べてブリージング率が小さくなっている以外は，いずれも標準コンクリートに比べてブリージング率は大きくなっている。また，ブリージング終了時間も標準コンクリートと同程度か30分～1時間早くなっているだけである。

以上より細骨材を標準骨材Kに置換えることにより，ブリージングが標準コンクリートと同程度となることから，細骨材がブリージングに大きく影響を及ぼしていると考えられる。ただし，A骨材の場合は他の骨材に比べて粗骨材も影響が大きいようである。

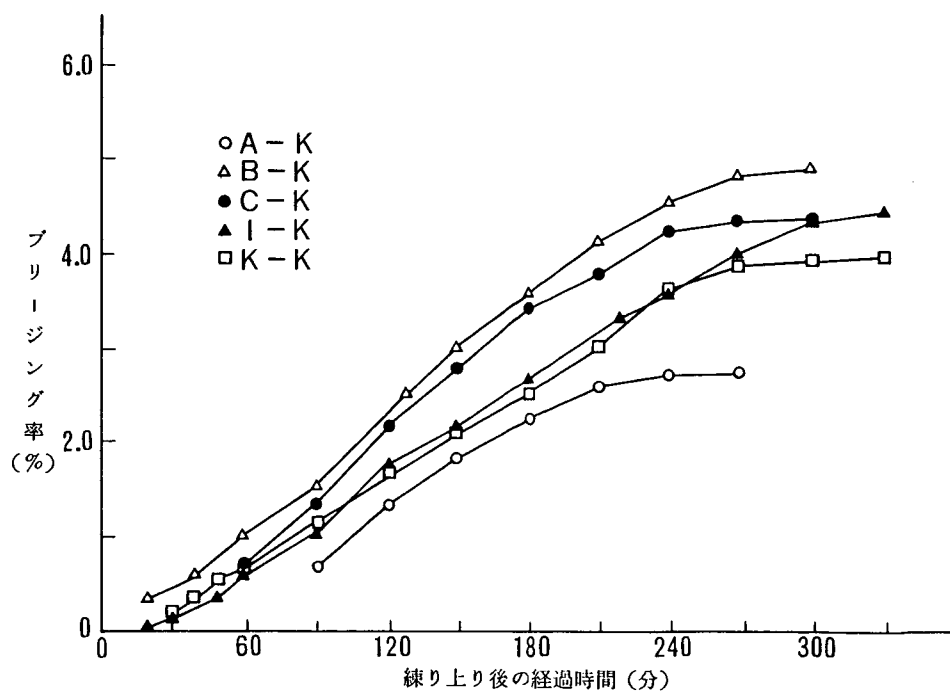
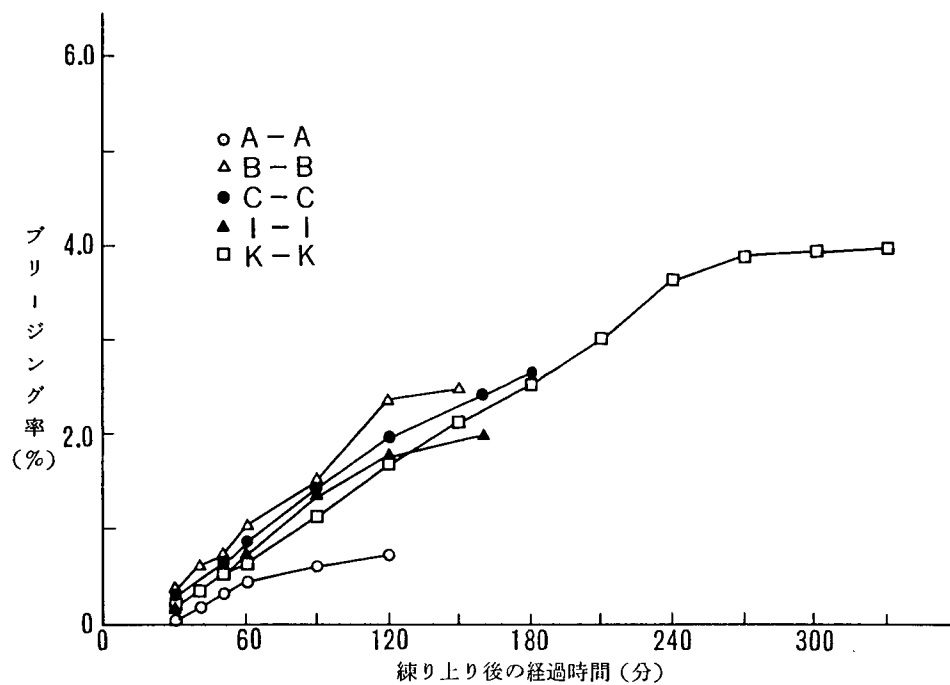


図-44 コンクリートのブリージング試験結果

3.2.3 凝結硬化速度

表-25および図-45に試験結果を示す。

今回の実験では表-20に示すようにK砂は5～2.5mmの粒径の砂が多いため、5mmふるいおよび2.5mmふるいでウェットスクリーニングを行い試験に供した。

粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用した場合、いずれのコンクリートも標準コンクリートに比べ始発および終結時間は早く、特にA-AおよびI-Iは早くなっている。

粗骨材に粘土鉱物含有骨材、細骨材に標準骨材を使用した場合、A-KおよびC-Kは標準コンクリートと同程度の結果となっているが、B-KおよびI-Kは始発および終結時間は標準コンクリートに比べ1～2時間程度早くなっている。このことは粗骨材による吸水あるいは粗骨材が含む微粒部分による影響と考えられる。

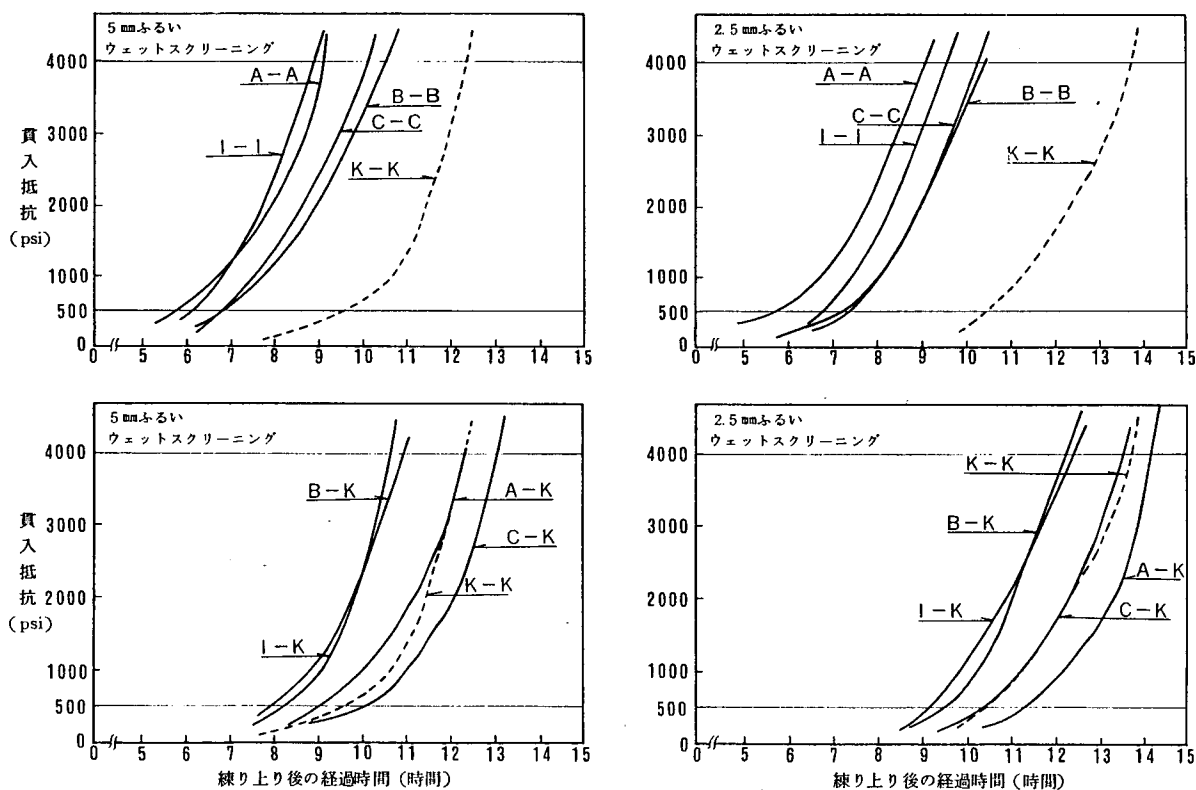


図-45 コンクリートの凝結硬化速度

3.3 強 度

3.3.1 圧縮強度

表-26および図-46に圧縮強度試験結果を示す。

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも材令7日より標準コンクリートに比べ圧縮強度は低く、特にB骨材を使用したコンクリート（B-B，B-K）は強度低下が大きい。また、材令180日の各コンクリートの圧縮強度は材令91日と同程度かそれ以下となっており、特にA骨材を使用したコンクリート（A-A，A-K）が大きく低下している。

細骨材を標準骨材Kと置換えた場合もいずれのコンクリートも標準コンクリートに比べて圧縮強度が低下していることから、粘土鉱物含有骨材自体の強度が低いことによる影響が大きいと考えられる。

3.3.2 弾性係数

表-27および図-46に弾性係数試験結果を示す。

圧縮強度試験の場合と同様に粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも材令7日より標準コンクリートに比べ弾性係数は低くなっている。

3.3.3 曲げ強度

表-28および図-46に曲げ強度試験結果を示す。

粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用した場合、A-AおよびB-Bコンクリートは全材令を通じ標準コンクリートに比べ曲げ強度は低くなっている。それにC-CおよびI-Iコンクリートは材令7日では標準コンクリートに比べ曲げ強度は低くなっているが材令28日および91日では同程度の曲げ強度となっている。

粗骨材に粘土鉱物含有骨材、細骨材に標準骨材を使用した場合、A-KおよびB-Kは全材令を通じて標準コンクリートに比べて曲げ強度は低くなっているのに対して、C-Kは材令7日より、I-Kは材令91日において標準コンクリートと同程度の曲げ強度となっている。

表-26 コンクリートの圧縮強度

(kg/cm²)

組 み 合 せ		材令 7 日		材令28日		材令91日		材令 180日	
		試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値
A - A	1	231	221	331	326	379	385	342	355 (339)
	2	208		338		388		307*	
	3	225		308		388		367	
B - B	1	208	199	258	281	344	333	336	316
	2	174		295		317		301	
	3	216		289		337		312	
C - C	1	227	227	331	328	362	356	352	351
	2	230		317		344		347	
	3	223		335		363		353	
I - I	1	251	245	348	344	391	390	375	374
	2	242		333		392		374	
	3	243		352		387		374	
K - K	1	315	316	408	417	465	461	387*	461 (437)
	2	315		420		455		434	
	3	319		424		462		489	
A - K	1	224	238	359	359	426	419	398	389
	2	232		370		418		378	
	3	257		347		414		390	
B - K	1	243	235	333	334	378	366	365	361
	2	233		325		354		336	
	3	229		343		367		381	
C - K	1	262	367	374	375	414	418	426	408
	2	266		360		409		394	
	3	274		391		430		404	
I - K	1	285	288	372	364	318*	414 (382)	414	402
	2	288		369		424		385	
	3	291		352		404		406	

*は異常値

() 内の数値は異常値を含めた平均値

表-27 コンクリートの弾性係数

(t/cm²)

組 み 合 せ		材令 7 日		材令28日		材令91日		材令 180日	
		試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値
A - A	1	195	188	315*	215 (248)	240	248	235	234
	2	185		207		249		232	
	3	185		223		256		—	
B - B	1	171	170	308*	210 (242)	229	232	247	248
	2	161		203		245		248	
	3	171		216		222		250	
C - C	1	197	218	259	257	277	280	277	281
	2	219		254		274		292	
	3	237		257		289		275	
I - I	1	196	212	266	260	278	273	274	279
	2	232		256		270		280	
	3	208		258		271		283	
K - K	1	273	316	337	331	378	349	—	333
	2	277		325		335		343	
	3	280		331		335		322	
A - K	1	224	238	247	258	287	277	398	291
	2	232		272		263		378	
	3	257		254		281		390	
B - K	1	243	235	240	239	274	271	267	272
	2	233		242		273		268	
	3	229		235		267		280	
C - K	1	262	267	281	285	309	305	304	306
	2	266		293		312		310	
	3	274		282		294		304	
I - K	1	285	288	283	288	274	294	293	300
	2	288		280		299		306	
	3	291		301		309		—	

*は異常値

() 内の数値は異常値を含めた平均値

表-28 コンクリートの曲げ強度

(kg/cm²)

組 み 合 せ		材令 7 日		材令28日		材令91日	
		試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値
A - A	1	37.5	37.3	44.7	44.5	54.9	52.1
	2	36.9		46.1		52.2	
	3	37.5		42.6		49.2	
B - B	1	36.9	36.2	45.3	44.8	54.6	53.1
	2	35.4		44.0		54.6	
	3	36.3		45.0		50.1	
C - C	1	48.0	41.4	51.3	53.9	60.0	59.4
	2	40.2		54.6		61.5	
	3	36.0		55.8		56.7	
I - I	1	38.0	41.3	57.5	54.6	63.0	61.7
	2	44.7		51.0		63.9	
	3	41.1		55.2		58.2	
K - K	1	53.7	52.3	56.6	55.7	63.0	63.8
	2	51.9		58.5		64.5	
	3	51.3		52.1		63.9	
A - K	1	48.9	47.5	51.6	53.1	51.9	57.6
	2	45.3		52.2		59.1	
	3	48.3		55.5		61.8	
B - K	1	38.1	42.2	46.2	50.0	54.9	54.4
	2	44.1		51.6		57.6	
	3	44.4		52.2		51.0	
C - K	1	48.9	51.2	58.8	58.4	60.8	62.2
	2	51.6		58.7		61.5	
	3	53.1		57.6		64.2	
I - K	1	49.5	44.1	56.6	56.9	66.6	67.3
	2	36.6		57.0		64.8	
	3	46.2		57.2		70.5	

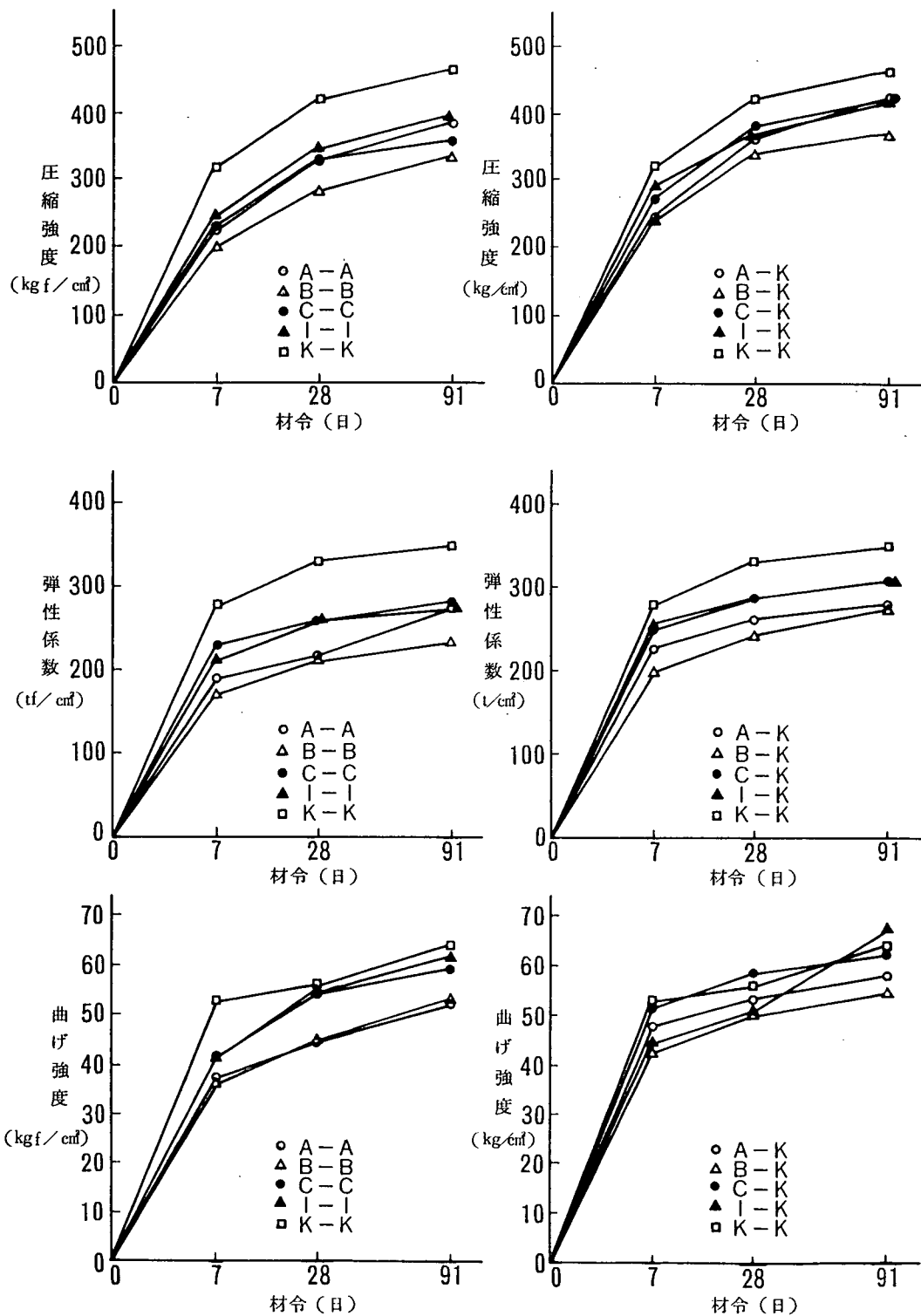


図-46 コンクリートの圧縮強度・弾性係数・曲げ強度

3.4 乾燥収縮

3.4.1 重量変化

図-47に各コンクリートの重量変化を示す。

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも材令に伴う重量減少率は標準コンクリートに比べ高くなっている。

各コンクリートの重量変化率は、粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用した場合、 $A-A > B-B > I-I > C-C > K-K$ ，粗骨材に粘土鉱物含有骨材，細骨材に標準骨材をした場合は、 $I-K > B-K \geq A-K > C-K > K-K$ の順に大きい。

3.4.2 長さ変化

図-48にコンクリートの長さ変化を示す。

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも材令に伴う乾燥収縮ひずみ量は標準コンクリートに比べ大きくなっている。各コンクリートの乾燥収縮ひずみ量は、粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用した場合は、 $B-B > I-I > A-A > C-C > K-K$ ，粗骨材に粘土鉱物含有骨材，細骨材に標準骨材を使用した場合は、 $B-K > I-K > C-K \geq A-K > K-K$ の順に大きい。特にB骨材を使用した場合、乾燥収縮ひずみ量は最も大きく、材令6ヵ月において標準コンクリートに比べB-Bコンクリートでは約2倍、B-Kコンクリートでは約1.5倍の乾燥収縮ひずみ量となっている。

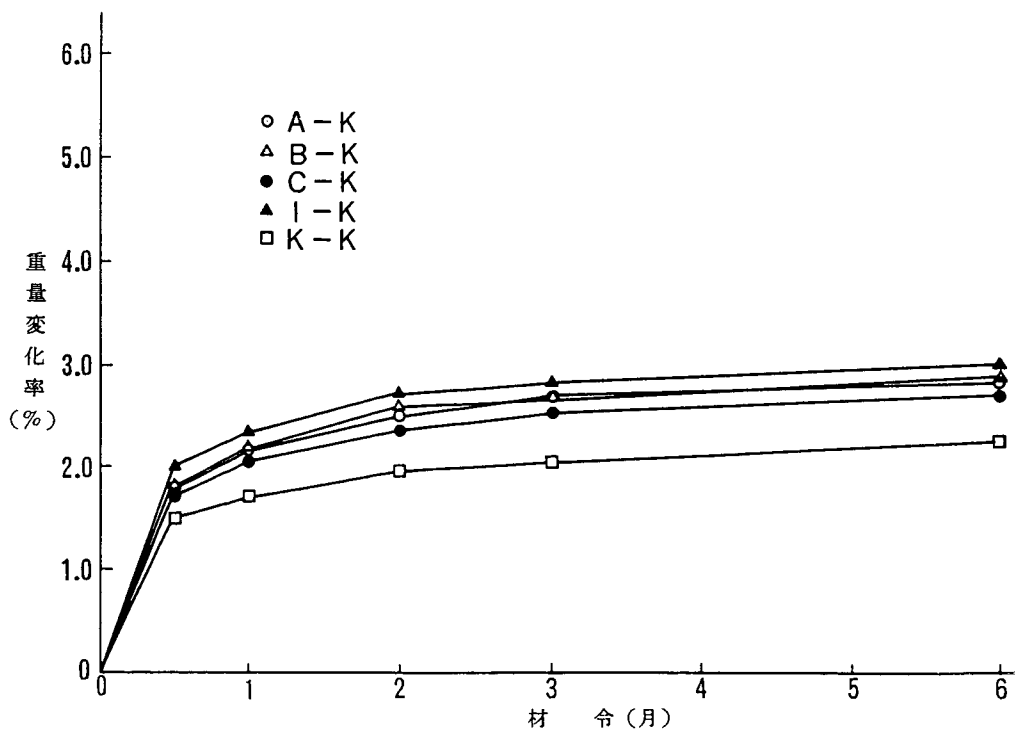
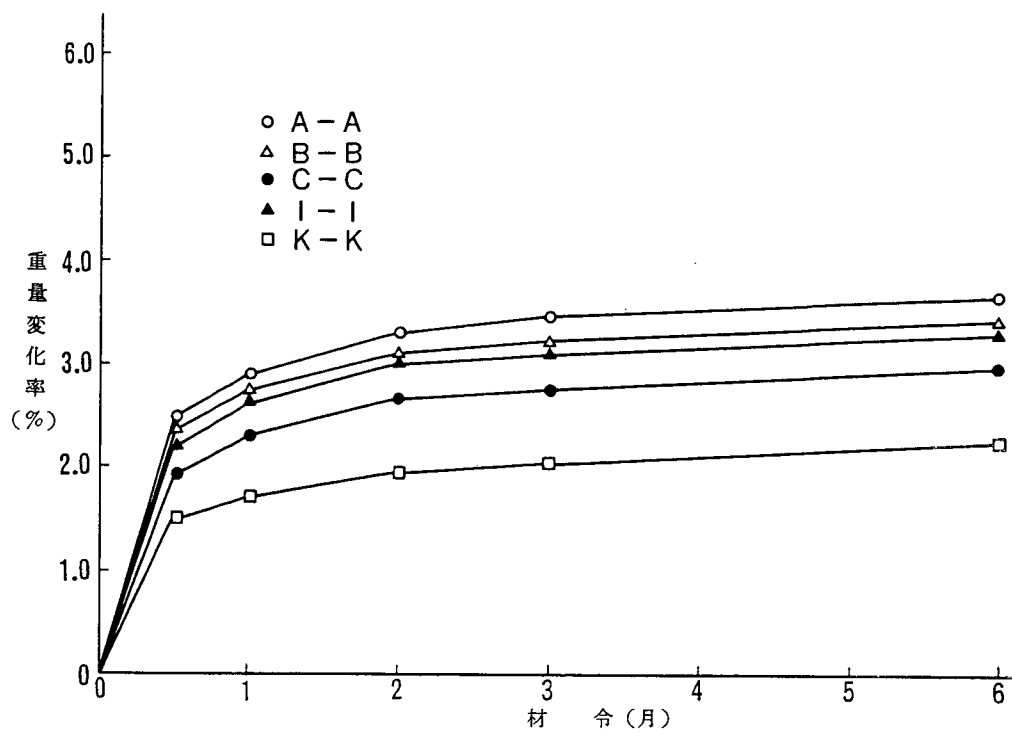


図-47 乾燥収縮によるコンクリートの重量変化

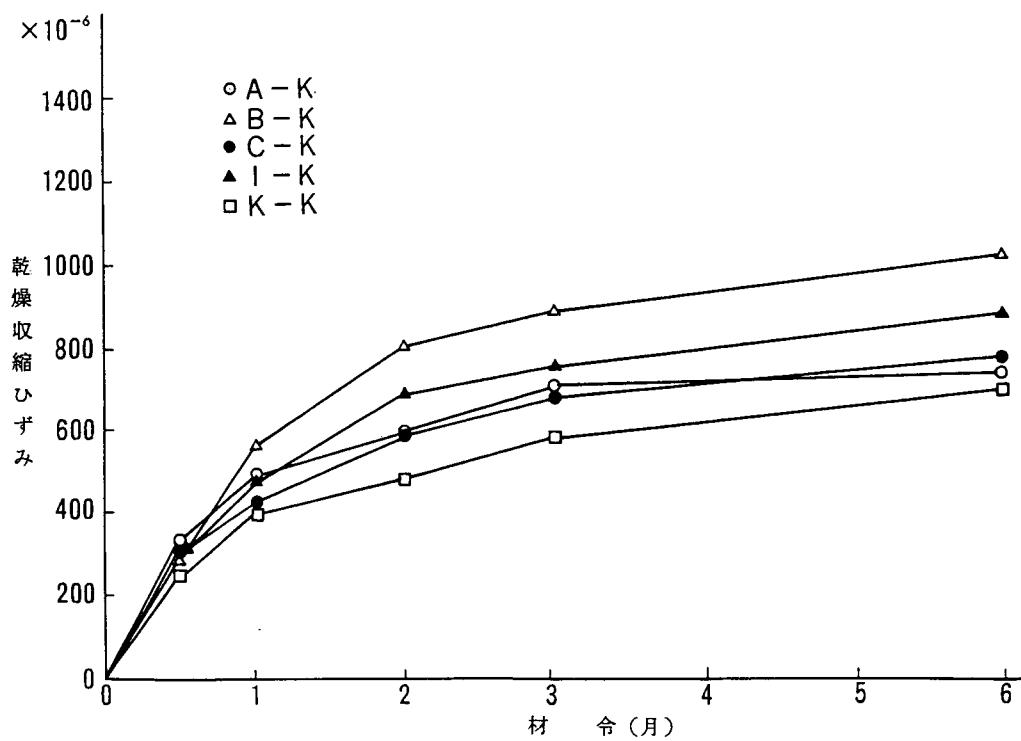
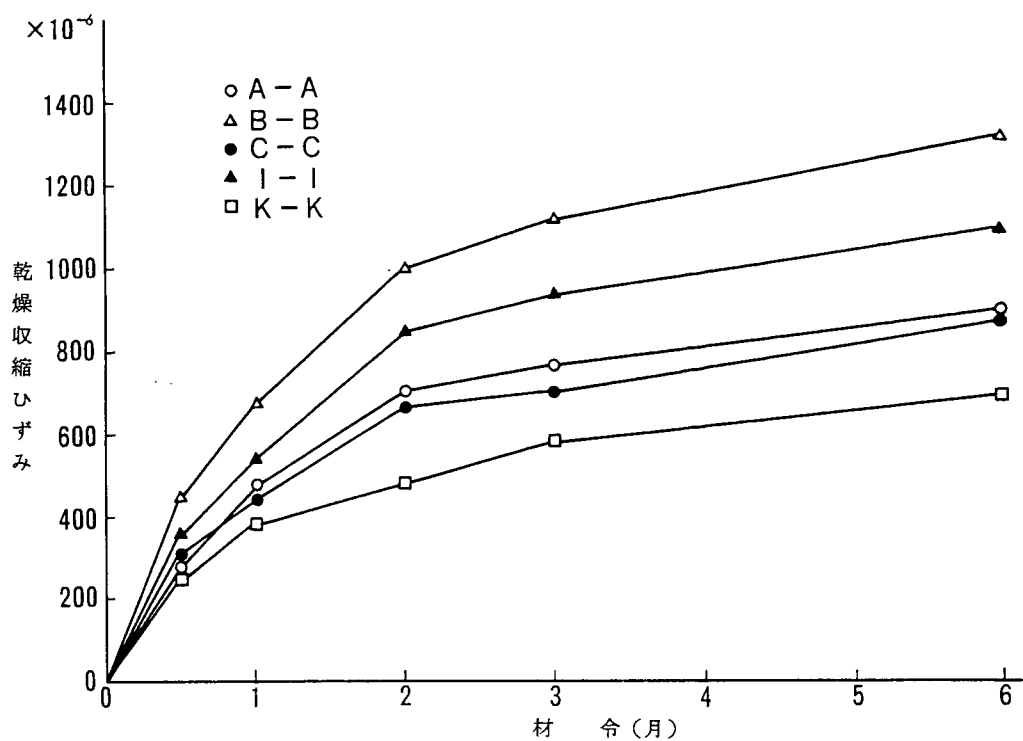


図-48 乾燥収縮によるコンクリートのひずみの変化

3.5 乾湿繰り返し

供試体 (10×10×40cm) に乾湿繰り返し (80℃ 炉乾燥47時間, 20℃ 水中浸漬48時間) を作用させて, 重量変化および長さ変化を測定した。

3.5.1 重量変化

図-49に各コンクリートの重量変化を示す。

各コンクリートとも乾湿繰り返し2サイクル以降より重量減少がみられる。

3.5.2 長さ変化

図-50に各コンクリートの長さ変化を示す。

標準コンクリートは, ほぼ全材令を通じ膨張を示しているのに対し, 粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートでは収縮から膨張, 膨張から収縮といった不規則な変化を示している。

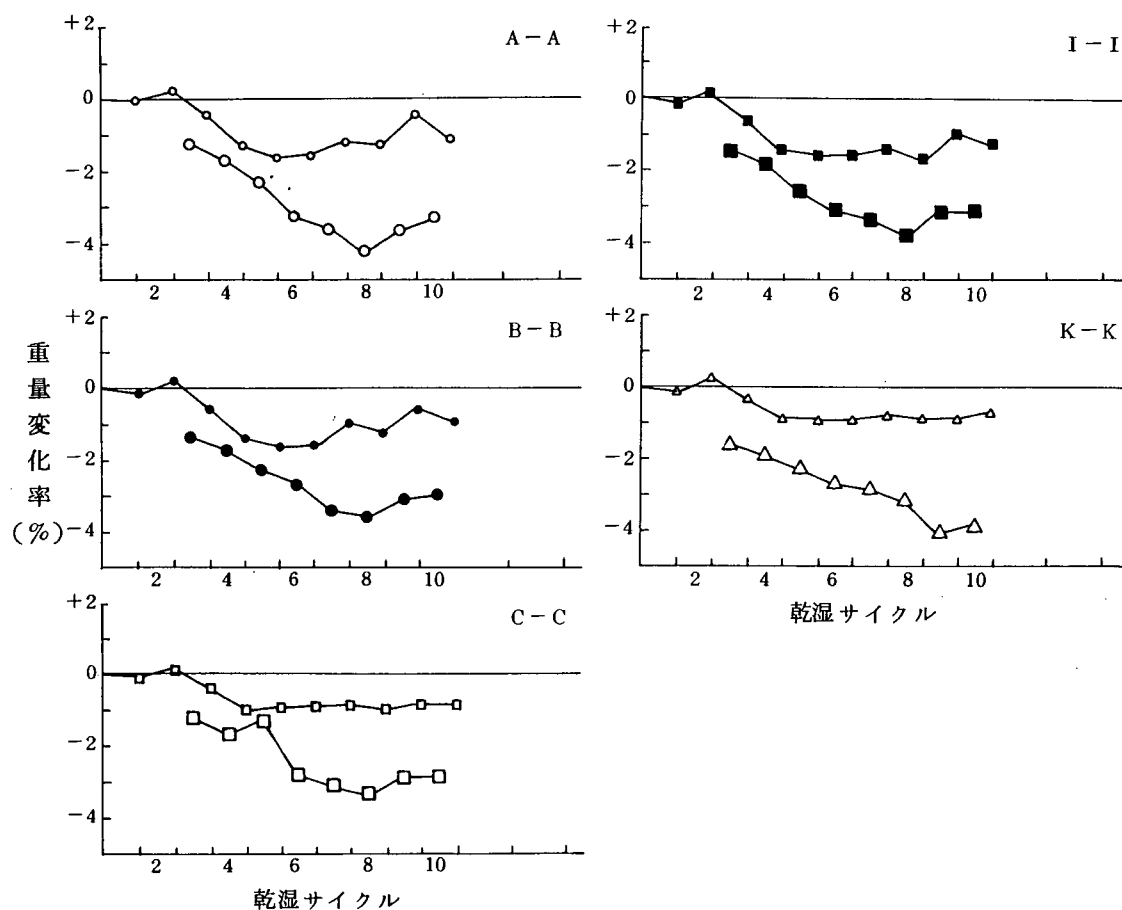


図-49 乾湿繰り返しによるコンクリートの重量変化

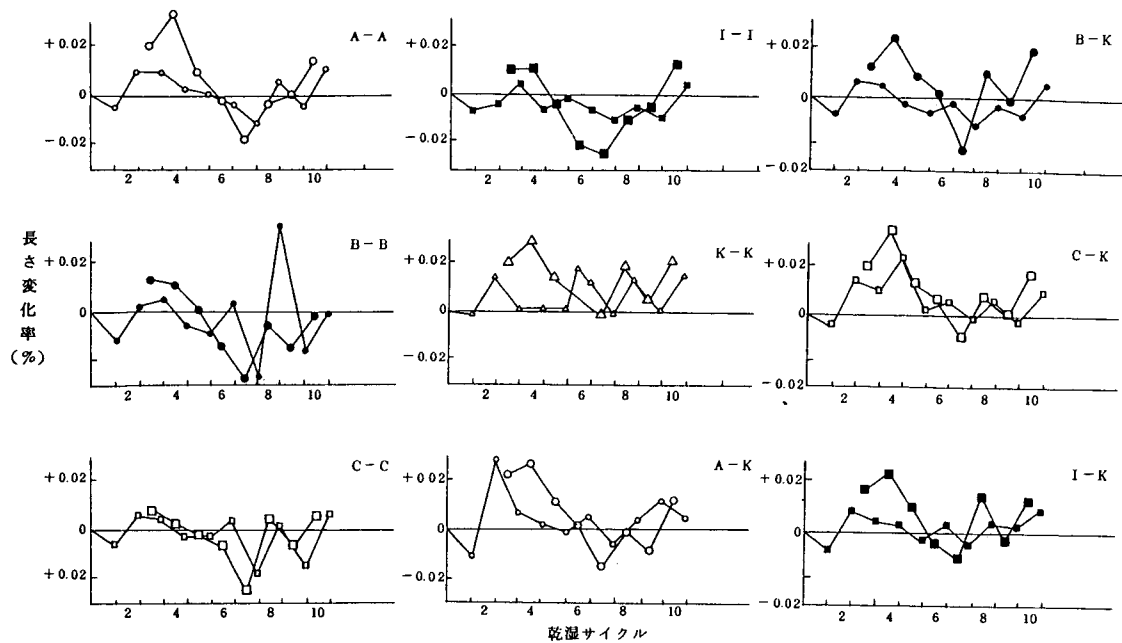


図-50 乾湿繰り返しによるコンクリートの長さ変化

3.6 凍結融解

3.6.1 重量変化 (図-51)

凍結融解 300サイクルにおける重量減少率は、最大でも A-A コンクリートの 5.44% であり、その他のコンクリートでは 2～4% の重量減少率となっている。

3.6.2 相対動弾性係数 (図-52)

凍結融解 300サイクルにおいて標準コンクリートの相対動弾性係数が 74% であるのに対し、粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも 90% 以上の値を示しており、凍結融解による劣化は認められなかった。これは、各コンクリートとも空気量 ($4 \pm 1\%$) が十分確保されていることによると考えられる。

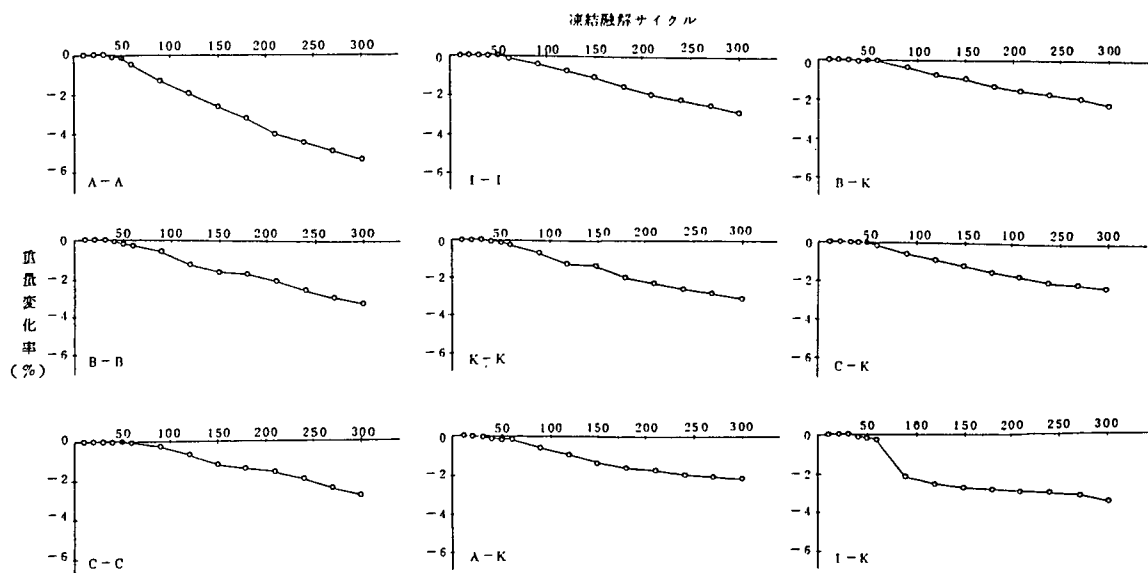


図-51 凍結融解によるコンクリートの重量変化

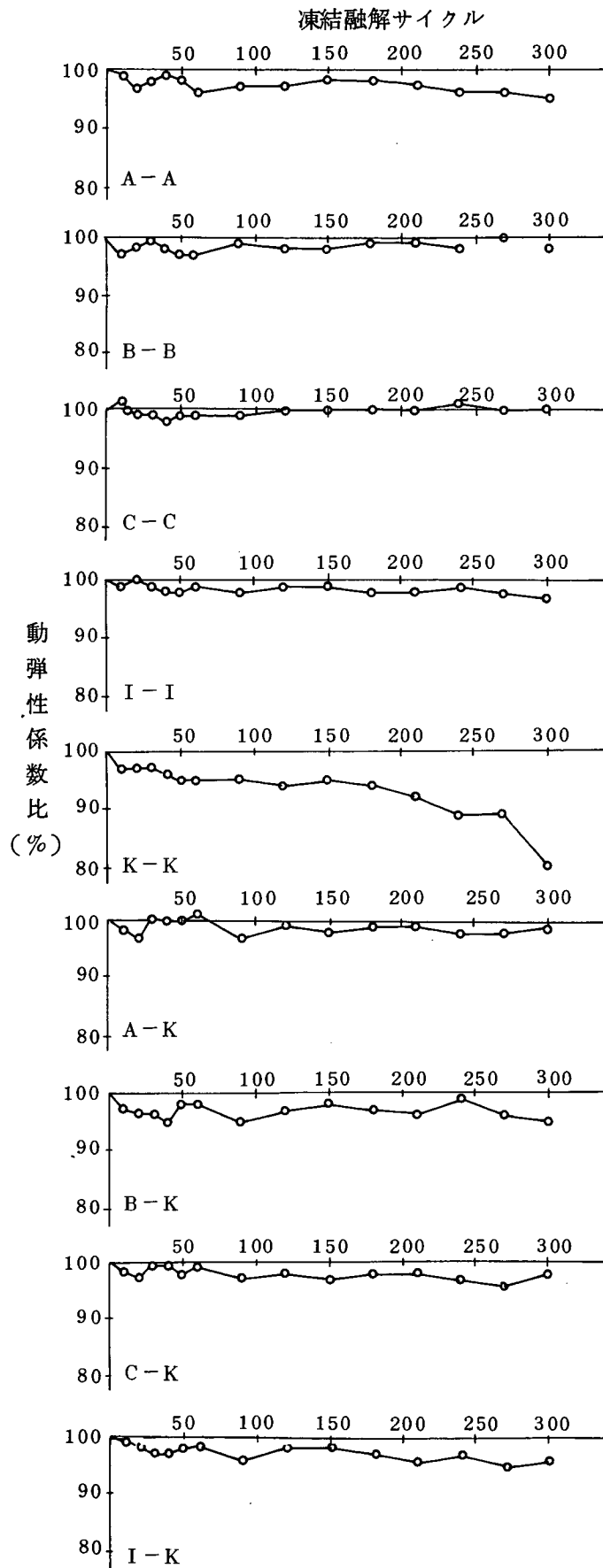


図-52 凍結融解によるコンクリートの動弾性係数の変化

3.7 若材令期の長さ変化

コンクリート供試体 (10×10×40cm) にひずみゲージおよび熱電対を埋め込み、恒温恒湿室内 (20℃, 90% R. H. 以上) に保存しコンクリート打込み直後より、ひずみおよび中心温度の測定を行った。今回は、実験を2回に分けて行い、それぞれについて標準コンクリート供試体を作製し比較することとした。配合を表-29に示す。長さ変化は、各コンクリートについて凝結硬化速度試験を行い、それぞれ始発時間 (表-29) を各コンクリートの長さ変化の基点としている。

(1) 第1回計測 (A-A, B-B, K-Kの1回目)

図-53に長さ変化試験結果を示す。

標準コンクリートは、材令の経過に伴う収縮ひずみ量は小さく材令6日においても約40μ程度の収縮ひずみ量となっているのに対し、A-AおよびB-Bコンクリートでは各コンクリートの始発時間から収縮ひずみがみられ材令に伴い増大し、材令6日においてA-Aは約150μ、B-Bは約200μの収縮ひずみ量となっている。

(2) 第2回計測 (C-C, I-I, K-Kの2回目)

図-53に長さ変化試験結果を示す。

標準コンクリートでは、材令の経過に伴う長さ変化はほとんどみられないのに対し、C-CおよびI-Iコンクリートでは材令の経過に伴い収縮ひずみ量が増大しており、材令6日においてC-Cは約80μ、I-Iは約130μのひずみ量となっている。

本実験は、データも少なく図-53に示すよう同一配合のコンクリートK-Kの1回目と2回目でもひずみ量に相違がみられたため、供試体形状、ひずみ計の埋込方法、供試体保存方法等に問題があると考えられるが、粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートは、いずれの場合もコンクリート練り上げ後の若材令期に急激に収縮する特性を有しているようである。

表-29 コンクリートの配合 (若材令期の長さ変化測定用)

昭和62年1月29日実施

組み合わせ	W/C (%)	S/a (%)	示 方 配 合 (kg/m ³)						練り上り 温度 (℃)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	凝結硬化速度試験 (昭和62年3月実施)	
			C	W	S	G	混 和 剤					始 発 (h-min)	終 結 (h-min)
							No.8 (粉末)	303A					
A-A	50	42	370	185	705	979	0.925 kg	6 A	11.0	3.5	4.1	5-30	8-10
B-B					741	1038		5 A	10.5	13.5	4.2	6-00	8-50
K-K					719	1013		6 A	11.5	16.0	3.1	8-15	11-05

昭和62年2月27日実施

組 み 合 せ	W/C (%)	S/a (%)	示 方 配 合 (kg/m ³)						練り上り 温度 (℃)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	凝結硬化速度試験	
			C	W	S	G	混 和 剤					始 発 (h-min)	終 結 (h-min)
							No.8 (粉末)	303A					
C-C	50	42	370	185	725	1026	0.925 kg	2.5A	11.0	12.0	5.8	7-25	11-20
I-I					740	1046		2A	11.0	6.5	4.7	5-40	9-00
K-K					719	1013		6A	11.0	15.5	4.6	8-55	11-30

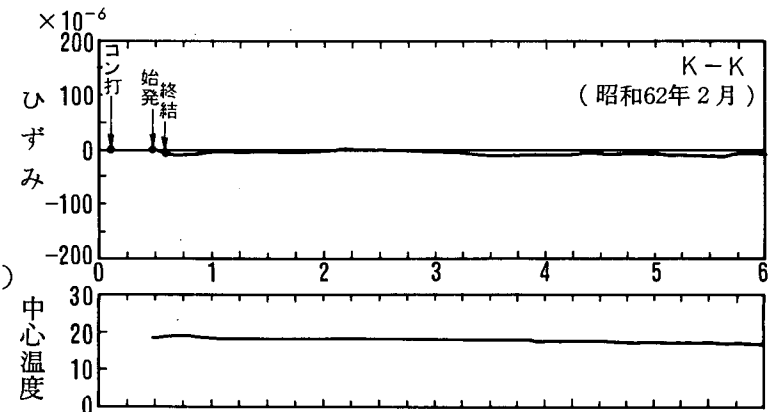
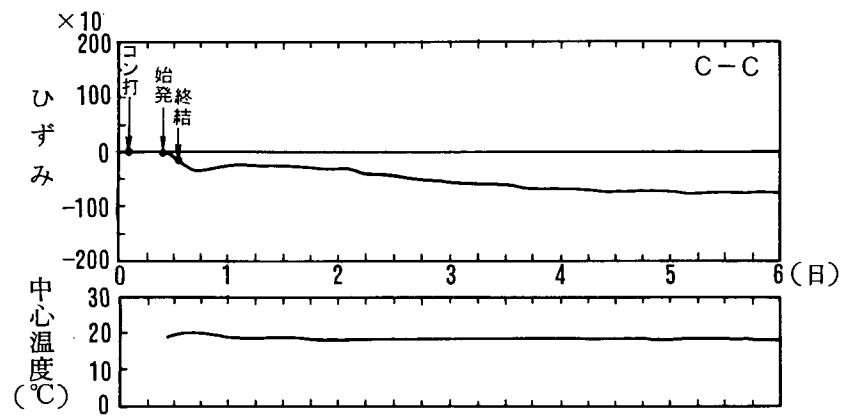
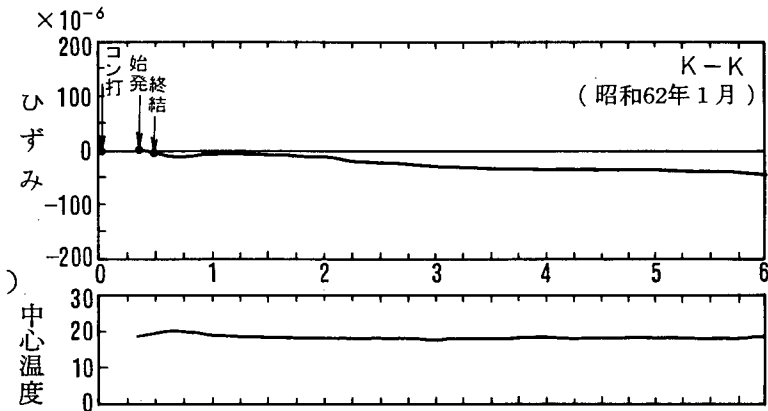
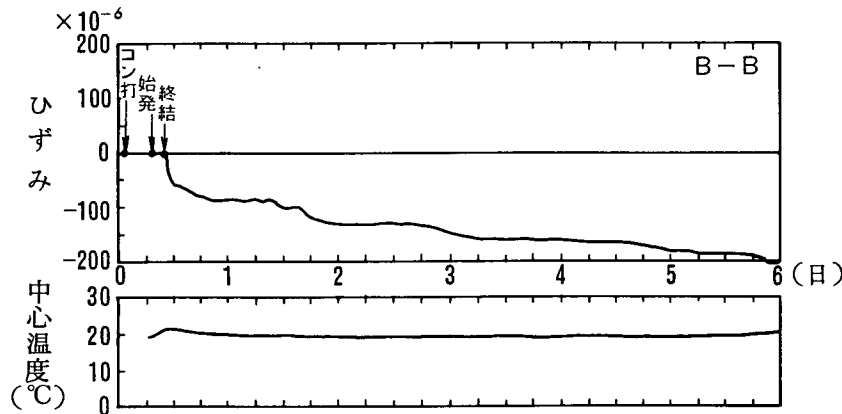
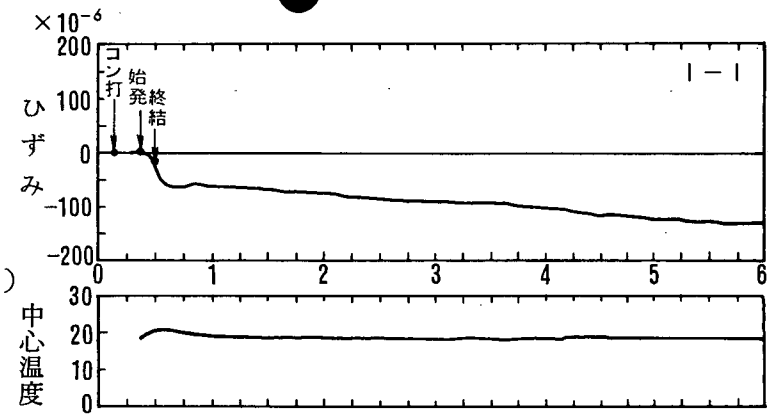
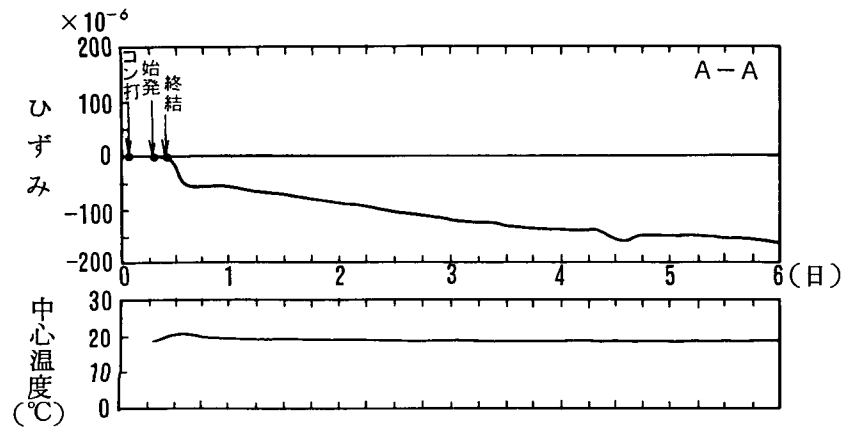


図-53 コンクリートの若材令期の長さ変化

3.8 ブリージング水の化学組成

コンクリートのブリージング水の化学組成を分析して、コンクリート内部で生じている反応について推定するものである。分析結果を表-30に示した。

A-AからI-Kの配合でK-K配合つまりK骨材コンクリートのブリージング水の化学組成と粘土鉱物含有粗骨材、細骨材と粘土鉱物含有粗骨材、健全骨材のそれとの比較を図-54に示した。

配合は粗骨材、細骨材ともに粘土鉱物含有骨材を用いた場合と、粗骨材は粘土鉱物含有骨材で、細骨材はKの細骨材を用いた場合の2通りがあり、粗骨材と細骨材のどちらがNaイオンやCaイオンとの反応に主要な役割を果たしているか否かがわかる。この2通りの配合はA骨材の場合それぞれA-A、A-Kであり、B骨材はB-B、B-Kであり、C骨材はC-C、C-Kであり、I骨材はI-I、I-Kである。

A骨材を用いた場合、A-AでもA-KでもNaイオン濃度が増し、Kイオン濃度が減少する。細骨材が粘土鉱物含有骨材であってもなくても、反応が大きく変化しないということであり、反応の主役は粗骨材と考えられる。反応の形態はKイオンの吸着、Naイオンの放出である。

B骨材を用いた場合、B-BでもB-KでもCaイオン濃度が増し、NaイオンとKイオン濃度が減少する。細骨材が粘土鉱物含有骨材であってもなくても、反応が大きく変化しないということであり、反応の主役は粗骨材と考えられる。反応の形態はNa、Kイオン吸着、Caイオン放出である。

C骨材を用いた場合は、C-CではCa濃度が増し、NaとK濃度が減少するが、C-KではK（K-K配合）の健全骨材を用いた場合と大きく違わない。細骨材を健全骨材とすることで健全骨材を用いた場合と同様の反応となることから、反応の主役は細骨材と考えられる。反応の形態はNa、Kイオン吸着、Caイオン放出である。

I骨材を用いた場合、I-IでもI-KでもCa濃度が増し、NaとK濃度が減少している。細骨材が粘土鉱物含有骨材であってもなくても、反応が大きく変化しないということであり、反応の主役は粗骨材と考えられる。反応の形態はNa、Kイオン吸着、Caイオン放出である。

得られた結果の概略を表-31に示す。

表-30 ブリージング水の化学組成

	A-A	B-B	C-C	I-I	K-K	A-K	B-K	C-K	I-K
pH	12.12	12.25	12.61	12.77	12.51	12.35	12.78	12.48	12.83
Na	128.9	33.7	20.4	38.2	60.6	116.1	35.1	64.3	40.5
K	32.7	21.7	24.4	17.0	136.4	84.4	95.0	140.3	76.9
Ca	33.1	51.1	57.3	46.6	35.6	36.0	40.9	41.7	40.8
Mg	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Total	194.9	106.7	102.3	102.0	232.8	236.7	171.2	246.5	158.5
SO ₄	144.6	44.3	28.4	83.8	146.3	144.2	96.9	127.5	87.9

pH以外の単位はmeq/l

表-31 プリージング水の化学組成から
みた骨材の反応性の概略

原石	反応の主体	反応イオンの種類	
		吸着	放出
A	粗 骨 材	K	Na
B	粗 骨 材	Na, K	Ca
C	細 骨 材	Na, K	Ca
I	粗 骨 材	Na, K	Ca

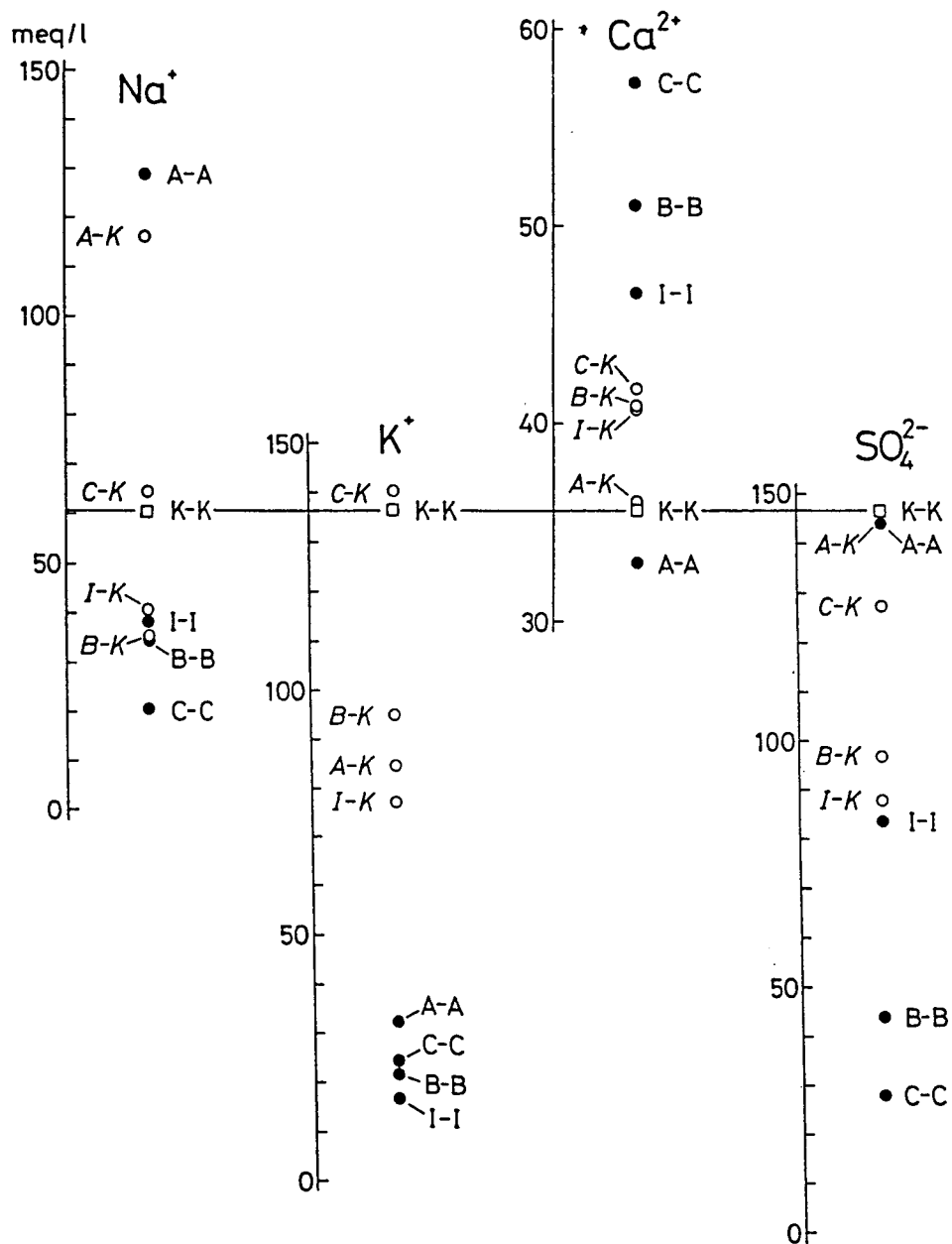


図-54 プリージング水の化学組成の比較

3.9 まとめ

1) フレッシュコンクリートの性質

(1) スランプ

A骨材を使用したコンクリート (A-A, A-K) だけがスランプは低くなっている。

(2) ブリージング

粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれもブリージング率、ブリージング終了時間は低くなっているが、細骨材に標準骨材Kを使用することで標準コンクリートと同程度の物性値となっている。

(3) 凝結硬化速度

ブリージング試験と同様に、粗骨材および細骨材に粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートは、標準コンクリートに比べ凝結の始発および終結時間が短くなっている。

以上より、フレッシュコンクリートの性質には粘土鉱物を含有した砂が大きく影響していると思われる。これは、砂は粗骨材に比べ表面積が大きく、骨材中の粘土鉱物が練り混ぜ水と共にA E減水剤 (Poz, No 8) を吸収しているためと考えられるが、詳細の検討は今後の課題である。

2) 強度

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれも全材令を通じ、標準コンクリートに比べて圧縮強度および弾性係数は低下し長期での強度増加もみられないのに対し、曲げ強度は材令91日においてCおよびI骨材を使用したコンクリート (C-C, C-K, I-I, I-K) では標準コンクリートと同程度となっている。

以上の結果は、粘土鉱物を含有した骨材自体の強度が低いためと考えられる。

3) 乾燥収縮

(1) 重量変化

粘土鉱物含有骨材を使用しているコンクリートはいずれも標準コンクリートに比べて重量減少率は大きい。減少率の大きい順に並べると以下ようになる。

$$A-A > B-B > I-I > C-C > K-K$$

$$I-K > B-K \geq A-K > C-K > K-K$$

(2) 長さ変化

重量変化の場合と同様に、いずれのコンクリートも標準コンクリートに比べて乾燥収縮ひずみ量は大きい。ひずみ量の大きい順にならべると以下になる。。

$$B-B > I-I > A-A > C-C > K-K$$

$$B-K > I-K > C-K \geq A-K > K-K$$

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの増大は、骨材自体の弾性係数が低いためと思われる。

4) 乾湿繰り返し

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートと標準骨材を使用したコンクリートとの間に特に大きな相違は認められない。

5) 凍結融解

各コンクリートとも重量および相対動弾性係数の低下は認められない。空気量 $4 \pm 1\%$ が十分に確保されていることおよび原石自体の凍結融解抵抗性があること (1.9) によると思われる。

6) 若材令期の長さ変化

粘土鉱物含有骨材を使用したコンクリートはいずれもコンクリートの始発あるいは終結時間より収縮がみられ材令に伴いひずみ量は増大している。

7) コンクリートのブリージング水の化学組成

A, B, I 骨材は粗骨材および細骨材ともコンクリート内部に生じている反応に大きな影響を及ぼしているが, C 骨材は細骨材のみの影響と考えられる。

4. まとめ

- 1) 試験に用いた粘土鉱物含有骨材の岩種は安山岩類と粗粒玄武岩に区分できる。これらの中に含まれている粘土鉱物の性質では、総量を表していると考えられるCECや交換性陽イオンの量比などに違いがみられる。特に交換性陽イオンのなかでも、Ca、Naに相違がある。
- 2) 今回、実施した原石、モルタル、コンクリートの各種試験のなかで、結果に標準骨材Kとの間に顕著な差がでたのは、原石の膨潤度、モルタルの凝結硬化速度・フロー値・水和発熱過程・細孔溶液組成、コンクリートの凝結硬化速度・圧縮強度・乾燥収縮ひずみ・若材令期の長さ変化・ブリージング水組成などである。これらの結果を標準骨材Kと比較すると表-32のようになる。

表-32のようにコンクリートの試験結果からは、各試料とも粗骨材・細骨材の両者に粘土鉱物含有骨材を使用したもののほうが、粗骨材のみ使用したものよりも標準骨材Kとの差が大きいことがわかる。すなわち、いずれの試料でもコンクリートに種々の現象を起こしている主体は細骨材であるといえる。ここで問題となるのは、A骨材では粒径が小さくなる程、CECが小さくなっている（粘土鉱物の含有量が少なくなっている）ことと、反応の主体が細骨材であるということが矛盾している点である。今後、さらに含有量や比表面積などの点について検討する必要がある。

コンクリートに粘土鉱物を細骨材として加えたものとモルタルの性質に注目してみると、各骨材の性質は次のようにまとめられる。

A骨材：モルタル、コンクリートともに凝結硬化速度が早く、フロー値も小さいなど若材令で硬い性質を有する。水和発熱過程もこのことを示している。一方、乾燥収縮ひずみや若材令期の長さ変化などには標準骨材と比べてあまり大きな差はない。

B骨材：凝結硬化速度やフロー値からは初期の硬さはそれ程でもないといえる。しかし、A骨材とは逆にひずみ量や圧縮強度などに標準骨材との間に顕著な差がみられる。これは原石の膨潤が大きいことと関係している可能性がある。

C骨材：若材令期にやや硬いといえる。ひずみ量は小さい。

I骨材：モルタルの場合は若材令で硬いとはいえないが、コンクリートにすると硬くなる。ひずみ量はBとA・Cの間である。

このように各骨材試料でモルタルやコンクリートに生じている現象は異なっている。特に若材令期の硬さを示す性質と変位を表わす性質等に違いが明瞭で、A、B骨材のように両性質の標準骨材との相違の傾向は必ずしも一致していない。このような現象の違いは、各骨材中に含まれている粘土鉱物（モンモリロナイト）の量、タイプの違いおよびモンモリロナイトの骨材中での存在形態などに起因しているものと考えられる。

表-32 粘土鉱物含有骨材と標準骨材の性質およびそれらを使用したモルタル・コンクリートの性質の比較

			A	B	C	I	K	備 考
岩 種			輝石 安山岩	粗粒 玄武岩	含石英輝石 安山岩	粗粒 玄武岩	砂 岩	
C	E	C	32.7 ~16.6	40.3	33.2	15.9 ~18.5	8.4 ~8.7	単位はmeq / 100 g。 ~は粗骨材~細骨材の値
交 換 性 陽 イ オ ン Na			9.2 ~3.5	0.6	1.0	2.7 ~3.2	0.5 ~0.6	同 上
" " Ca			20.4 ~25.2	45.9	58.9	15.0 ~17.3	66.4 ~64.0	同上。Kの値は方解石?
原 石 の 膨 潤 度			+++	+++	+	++	0	膨潤度大：+++
モ ル タ ル の 性 質	凝 結 硬 化 速 度		+++	0	++	+	0	速度早：+++
	フ ロ ー 値		++	0	+	0	0	フロー値小：++
	水 和 発 熱 過 程	第 1 ピーク発熱量	+++	++	++	+++	0	発熱量大：+++
		第 2 ピーク時間	+++	++	++	+++	0	時間早：+++
	細 孔 溶 液	Na	0	—	---	---	0	濃度低：---
		K	----	----	----	----	0	濃度低：----
		Ca	0	+	++	+	0	濃度高：++
コ ン ク リ ー ト の 性 質	ブ リ ー ジ ン グ 水	Na	+++ +++	— —	— 0	— —	0	濃度高：+++
		K	---- ---	---- --	---- 0	---- --	0	濃度低：----
		Ca	0 0	++ +	+++ +	++ +	0	濃度高：+++
	凝 結 硬 化 速 度		+++ 0	++ ++	++ —	+++ ++	0	5 mmふるいウェットスクリーニング。速度早：+++
	圧 縮 強 度		--- ----	--- ----	--- ---	--- ---	0	強度低：----
	乾 燥 収 縮 ひ ず み		+ +	+++ ++	+ +	++ +	0	ひずみ大：+++
	若材令期の長さ変化		++	+++	+	++	0	A—A, B—Bシリーズのみ。 ひずみ大：+++

コンクリートの性質の上段はA—Aシリーズ、下段はA—Kシリーズを表す。

5. おわりに

本報告書は昭和60年度、61年度の共同研究の結果を現象の記述を中心に中間的にまとめたものである。既述のように、モンモリロナイトを含有した骨材がモルタルやコンクリートに起こす現象の概要がつかめ、劣化現象もモンモリロナイトの含有量やタイプによって異なっていることがわかってきた。今後はこれらの現象をさらに確認し考察を進め劣化機構の解明、骨材良否の判定法開発、劣化防止法の開発などを行う予定である。

粘土鉱物含有骨材を使用した
コンクリートの劣化に関する
共同研究報告書（その1）

共同研究報告書第4号
昭和62年11月（1987）

市川・脇坂・長沢・加藤・大崎・前田・
佐々木・田中・三谷・永沢・林・内藤・
金子・松岡・宇治・藤原

要 旨

粘土鉱物の1つであるモンモリロナイトを含有した骨材4種、含まない骨材1種の原石・モルタル・コンクリートの試験を実施した。その結果、モンモリロナイトのタイプによってモルタル・コンクリートに生じる現象は異なっていることがわかった。

キーワード：粘土鉱物・モンモリロナイト・モルタル・コンクリート・骨材 ○

郵便はがき

3 0 5 - □ □

40円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所

地質研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 002

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所共同研究報告書第4号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印