

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

0 1.11.30

[技術情報室]

蛇紋岩コンクリートの物性データ調査報告

1981年10月

電源開発株式会社

Electric Power Development Co., Ltd.

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

配 布 限 定

PNC ~~S~~J230 81-02

1981年10月



蛇紋岩コンクリートの物性データ調査報告*

渡 部 雅** 馬 場 恭 平** 安 田 稔**
石 見 勝 雄** 橋 本 敦 美**

要 旨

本報告は、蛇紋岩コンクリートの機械的、熱的、物理的性質について、今まで数次にわたって実施した諸研究成果ならびに内外の文献調査結果をもとにとりまとめたものである。

その結果、蛇紋岩自体は結晶水の発散温度まで極めて耐熱的であり、またそれを用いたコンクリートは一般のコンクリートと同様に取扱うことができる。すなわち、①蛇紋岩は分解温度まで破碎抵抗および圧縮強度が加熱強化されるが、動弾性係数はコンクリートと同様に低下する。②蛇紋岩コンクリートの機械的性質の熱対応挙動は内外の諸文献にみられる一般のコンクリートとほぼ同様に、セメント水和物中にフリーCaOの発生前の300～350℃までほぼ安定であり、蛇紋岩コンクリートとしての特別な挙動はみられない。③熱的性質は、概括的には一般のコンクリートと同様であるが熱伝導率および熱拡散率はその下位にある。④物理的性質のうち、重量変化は蛇紋岩結晶水の発散温度付近で一般のコンクリートより極端に減少し、長さ変化はセメントの挙動に、より追従し易い傾向があり、その他の性質は同等である。

したがって、蛇紋岩コンクリートの諸性質は一般のコンクリートに比べて遜色なく、蛇紋岩（新鮮度、結晶水の発散温度）およびセメント水和物（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の分解温度）の耐熱特性を熟知して用いれば、セメントペースト水和物中の結晶水とあいまって、中性子の遮蔽には極めて有効な遮蔽材料といえよう。なお、個々の物性データについてはSJ230 81-03「コンクリート（蛇紋岩コンクリート）の物性データ集」として別途作成した。

※ 本報告書は、電源開発株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

※※ 電源開発株式会社

NOT FOR PUBLICATION

PNC-SJ 230 81 - 02

Oct., 1981



Survey Report on Properties of Serpentine Concrete*

Masashi Watanabe**, Kyohei Baba**, Minoru Yasuda**,
Katsuo Ishimi**, and Atsumi Hashimoto**

Abstract

This report summarizes the results of studies on mechanical, thermal and physical properties of serpentine concrete based on our repeated experiments and on literature search in Japan and abroad.

The results have revealed that serpentine itself was remarkably heat-resistant up to evaporation temperatures of crystalline water, and serpentine concrete could be dealt with in the same way as normal concrete. That is, (i) the crushing resistance and compressive strength of serpentine increase up to evaporation temperature of crystalline water, but dynamic modulus of elasticity decreases, as is similar to normal concrete. (ii) The mechanical properties of heated serpentine concrete are almost stable up to 300°C to 350°C at which free-CaO starts to be generated in cement hydrate. (iii) The thermal properties are in most case similar to normal concrete, but the heat conductivity and heat diffusion coefficient belong in lower level. (iv) In physical properties, weight of serpentine concrete decreases remarkably near the evaporation temperature of crystalline water as compared with normal concrete, and change in concrete length tends to follow the behavior of cement paste.

From the above results, it is concluded that properties of serpentine concrete bear comparison with those of normal concrete, and that serpentine concrete is an effective material for shielding of neutron for its heat-resistance and cement hydrate.

Full data of properties are compiled in "Data Collection for properties on concrete (serpentine concrete)" (SJ 230 81-03).

* Work performed by Electric Power Development Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

** Electric Power Development Co., Ltd.

目 次

1. ま え が き	1
2. 蛇紋岩コンクリート構成材料の諸性質	2
(1) セメント	2
(2) 蛇紋岩	5
3. 蛇紋岩コンクリートの諸性質	15
(1) 機械的性質	15
a) 圧縮強度	15
i) セメントの影響	15
ii) 骨材の影響	15
iii) 混和材の影響	16
iv) 昇温速度の影響	17
v) 加熱期間の影響	18
vi) 加熱温度の影響	18
vii) 熱サイクルの影響	19
viii) 熱間, 冷間の影響	19
ix) 加熱後放置の影響	20
x) 中性子照射の影響	21
b) 引張強度	23
i) 骨材の影響	23
ii) 昇温速度の影響	23
iii) 加熱温度の影響	23
c) 静弾性係数	24
i) 熱間, 冷間の影響	24
ii) 中性子照射の影響	24
d) ポアソン比	24
e) 動弾性係数	25
i) セメントの影響	25
ii) 骨材の影響	26
iii) 昇温速度の影響	27
iv) 加熱期間の影響	28
v) 加熱温度の影響	28

vi) 熱サイクルの影響	29
vii) 加熱後放置の影響	30
viii) 中性子照射の影響	31
f) クリープ	32
g) せん断強度	33
h) 多軸強度	33
(2) 熱的性質	34
a) 熱伝導率	34
b) 熱拡散率	35
c) 熱膨張係数	35
d) 比熱	37
(3) 物理的性質	37
a) 長さ変化	37
i) セメントの影響	38
ii) 骨材の影響	38
iii) 昇温速度の影響	38
iv) 加熱期間の影響	38
v) 加熱速度の影響	41
vi) 熱サイクルの影響	41
vii) 加熱後放置の影響	41
viii) 中性子照射の影響	41
b) 重量変化	42
i) セメントの影響	42
ii) 骨材の影響	42
iii) 昇温速度の影響	43
iv) 加熱期間の影響	43
v) 加熱速度の影響	43
vi) 熱サイクルの影響	44
vii) 加熱後放置の影響	44
viii) 中性子照射の影響	44
c) 単位容積重量	44
4. むすび	47

List of Tables

2.1	Compressive strength of cement paste due to heat	2
2.2	Tensile strength of cement paste due to heat	2
2.3	Dynamic modulus of elasticity of cement paste due to heat	3
2.4	Length change of cement paste due to heat	3
2.5	Weight change of cement paste due to heat	4
2.6	Physical properties of crushed stone	6
2.7	Relation of ignition loss to temperature	6
2.8	Crushing resistance of various serpentine rocks before and after a heating	8
2.9	Compressive strength of serpentine due to heat	8
2.10	Tensile strength of serpentine due to heat	9
2.11	Dynamic modulus of elasticity of serpentine due to heat	9
2.12	Length change of serpentine due to heat	10
2.13	Weight change of serpentine due to heat	10
3.1	Effect of cement type on compressive strength	15
3.2	Effect of heating rate on compressive strength	17
3.3	Compressive strength of concrete immersed in water after heating for two years at 300°C	20
3.4	Effect of neutron irradiation on static modulus of elasticity	25
3.5	Effect of cement type on dynamic modulus of elasticity	26

List of Table - Continued

3-6	Effect of aggregate type on dynamic modulus of ealsticity	27
3-7	Effect of heating rate on dynamic modulus of elasticity	27
3-8	Dynamic modulus of elasticity of concrete immersed in water after heating for two years at 300°C	30
3-9	Results of calculation by Mohr's circle	33
3-10	Coefficient of thermal expansion of serpentine concrete	36
3-11	Effect of cement type on length change	38
3-12	Effect of aggregate type on length change	39
3-13	Effect of heating rate on length change	40

List of Figures

2·1	Differential thermal analysis (DTA) curve and thermogravimetric analysis (TGA) curve of hardened cement paste	4
2·2	Drawing of X-ray diffraction of hardened cement paste	5
2·3	Relationship between heating temperature and heating duration, and residual crystalline water	7
2·4	Differential thermal analysis (DTA) curve and thermogravimetric analysis (TGA) curve of serpentine rock	11
2·5	Drawing of X-ray diffraction of serpentine rock	11
2·6	Formation of Coalingite	12
2·7	Compressive strength of the serpentine and aluminous cement paste samples	12
2·8	Bending-tensile strength of the serpentine and aluminous cement paste samples	13
2·9	Length change of the serpentine and aluminous cement paste samples	13
2·10	Pulse velocity of an ultrasonic wave in the serpentine and aluminous cement paste samples	14
3·1	Effect of serpentine quarry on compressive strength	16
3·2	Effect of aggregate type on compressive strength	16
3·3	Compressive strength of serpentine concrete with the addition of boron or tantalum	17
3·4	Relation of compressive strength to heating duration at 300°C	18
3·5	Relation of compressive strength to temperature	18

List of Figures - Continued

3.6	Relation of compressive strength to the number of thermal cycles	19
3.7	Relative compressive strength of heated concrete and that after heating-cooling process	20
3.8	Relation of compressive strength to exposure duration after heating ...	21
3.9	Compressive strength of serpentine concrete irradiated with neutron ...	22
3.10	Compressive strength of serpentine concrete bound by aluminous cement irradiated with neutron	22
3.11	Relation of tensile strength to temperature	23
3.12	Relationship between stress-strength ratio and static modulus of elasticity under various thermal conditions	24
3.13	Modulus of elasticity in heated concrete and that after heating-cooling process	24
3.14	Relationship between Poisson's ratio and stress-strength ratio under various thermal conditions	25
3.15	Effect of serpentine quarry on dynamic modulus of elasticity	26
3.16	Relation of dynamic modulus of elasticity to heating duration at 300°C	28
3.17	Relation of dynamic modulus of elasticity to temperature	29
3.18	Relation of dynamic modulus of elasticity to the number of thermal cycles	29
3.19	Relation of dynamic modulus of elasticity to exposure duration after heating	30
3.20	Dynamic modulus of elasticity for serpentine concrete irradiated with neutron	31

List of Figures - Continued

3·21	Pulse velocity of an ultrasonic wave in the serpentine concrete bound by aluminous cement irradiated with neutron	31
3·22	Relationship between creep coefficient and age	32
3·23	Creep of concrete under various thermal conditions	32
3·24	Relationship between triaxial compressive strength of specimens unheated and those after heating-cooling process	33
3·25	Relation of thermal conductivity to the number of thermal cycles	34
3·26	Relation of thermal diffusivity to the number of thermal cycles	35
3·27	Specific heat of serpentine concrete	37
3·28	Effect of serpentine quarry on length change	39
3·29	Relation of length change to heating duration at 300°C	40
3·30	Relation of length change to temperature	41
3·31	Relation of length change to neutron fluence dependence	42
3·32	Effect of aggregate type on weight change	43
3·33	Relation of weight change to temperature	43
3·34	Weight change of serpentine concrete irradiated with neutron	44
3·35	The results of unit weight measured from the relation between frequency and acceleration	45
3·36	Unit weight of the concrete cast in the vessel with various sorts of exhaust systems	46

1. ま え が き

高速増殖炉（FBR）遮蔽用蛇紋岩コンクリートについて、これまで約10年間にわたって蛇紋岩の調査に始まり、コンクリート構成材料の熱対応物性変化、遮蔽材料のコンクリートへの混和実験、各種混和材の混和効果、コンクリートの各種加熱条件下における諸物性および熱特性変化、加熱後気中放置中の物性変化等に関する実験的検討を多角的な見地から実施すると共に鋼函封入コンクリートブロックに関するモックアップ試験等も合せ実施して来た。

その結果、蛇紋岩コンクリートの常温下の諸物性はもちろん、その熱対応諸挙動の全ぼうをほぼ明らかにすることができた。

そこで、本文はこれらの研究成果を主軸とし、内外の諸文献に見られる要点も加え、機械的、熱的、物理的な諸性質に大別し、以下に取りまとめたものである。

2. 蛇紋岩コンクリート構成材料の諸性質

コンクリートは複合材料であり、セメントペースト相と骨材相からなる二相材料である。以下に、これら材料の主要な性質について述べる。

(1) セメント

セメントペーストの熱対応圧縮強度は表-2・1¹⁾に示すとおり、水・セメント比の小さい普通ポルトランドセメントペーストの場合は450℃まで強度の低下はなく、アルミナセメントペーストの場合は加熱温度に関わらず30%近く低下する。

表-2・1 セメントペーストの熱対応圧縮強度

単位: Kg f / cm²

用いたセメントの種類	硬化体の種類	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
普通ポルトランドセメント	セメントペースト	806 (100)	865 (107)	1036 (129)	1048 (130)	384 (48)	230 (29)
アルミナセメント	セメントペースト	814 (100)	603 (74)	629 (77)	794 (98)	588 (72)	623 (77)

注-1) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注-2) 供試体数は6ヶである。W/C=0.3

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

熱対応引張強度は表-2・2¹⁾に示すとおり、全体的には圧縮強度と同様な傾向になる。

表-2・2 セメントペーストの熱対応引張強度 単位: Kg f / cm²

用いたセメントの種類	硬化体の種類	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
普通ポルトランドセメント	セメントペースト	38 (100)	71 (203)	85 (224)	26 (68)	26 (68)	26 (68)
アルミナセメント	セメントペースト	20 (100)	15 (75)	14 (70)	14 (70)	15.2 (76)	14.7 (74)

注-1) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注-2) 供試体数は3ヶである。W/C=0.3

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

1)
熱対応動弾性係数は表-2・3に示すとおり、普通ポルトランドセメントペーストの場合は300℃まで低下しないが、アルミナセメントペーストの場合は温度上昇に伴って低下する。

表-2・3 セメントペーストの熱対応動弾性係数

単位: Kg f / cm²

用いたセメントの種類	硬化体の種類	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
普通ポルトランドセメント	セメントペースト	297 (100)	302 (102)	298 (100)	259 (87)	164 (55)	測定不能
アルミナセメント	セメントペースト	273 (100)	247 (90)	239 (88)	159 (58)	"	"

注-1) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注-2) 供試体数は3ヶである。W/C=0.3

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

1)
熱対応長さ変化は表-2・4に示すとおり、110℃以上で急激な収縮を示し、600℃で反転し膨張するが、これは冷却中に吸湿するためであろう。

表-2・4 セメントペーストの熱対応長さ変化

単位: %

用いたセメントの種類	硬化体の種類	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
普通ポルトランドセメント	セメントペースト	0	-0.090	-0.786	-1.326	-0.900	測定不能
アルミナセメント	セメントペースト	0	-0.081	-0.652	-0.827	測定不能	"

注-1) 供試体数は3ヶである。W/C=0.3

注-2) (+)は膨張, (-)は収縮を示す。

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

1)
熱対応重量変化は表-2・5に示すとおり、普通ポルトランドセメントの場合は300℃加熱で練り混ぜ水の約70%、600℃で97%の脱水量となり、300℃ではセメントの水和に必要とされている水分25%が確保され本来の機能を果していると考えられるが、600℃ではセメントの水和水はほとんど脱水し、セメント硬化体の機能は喪失する。アルミナセメン

トの場合は 300℃で練り混ぜ水の 78%、450℃で 96%の脱水となり、アルミナセメント²⁾の水和に必要な水量 50%より著しく減少する。

表-2・5 セメントペーストの熱対応重量変化

単位：%

用いたセメントの種類	硬化体の種類	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
普通ポルトランドセメント	セメントペースト	0	-8.018	-16.105	-19.300	-22.341	測定不能
アルミナセメント	セメントペースト	0	-3.821	-22.949	-27.010	測定不能	測定不能

注-1) 供試体数は 3ヶである。 W/C=0.3

注-2) (-)は減少を示す。

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は 72時間である。

示差熱分析結果は図-2・1³⁾に示すとおり、普通ポルトランドセメントペーストは 20~200℃の間に幅広い吸熱ピークがあり、これは水分の逸脱と一部のセメント水和物の分解によるものである。また、430℃を契機とした著しい吸熱ピークはカルシウム水和物 [Ca(OH)₂]³⁾が脱水し、フリーライム [CaO] になるためである。このことは図-2・2³⁾に示すように、X線回折結果とも一致する。

なお、普通ポルトランドセメント中に存在する自然放射性物質としてはウラン (U) が 1.6 ppm⁴⁾、トリウム (Th) が 2ppm 程度検出された。

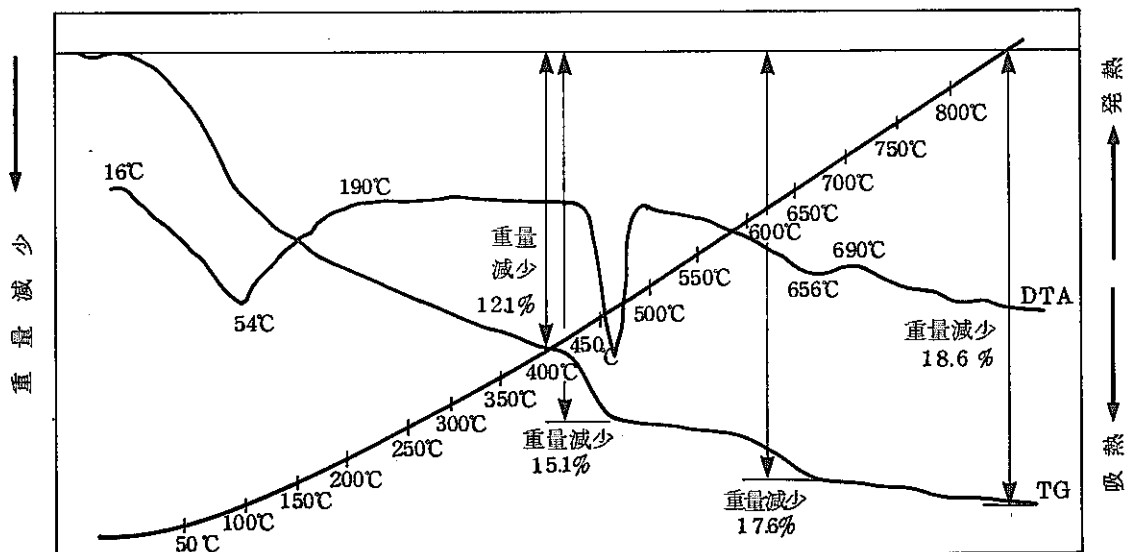


図-2・1 セメントペーストの示差熱 (DTA)・熱重量 (TG) 曲線

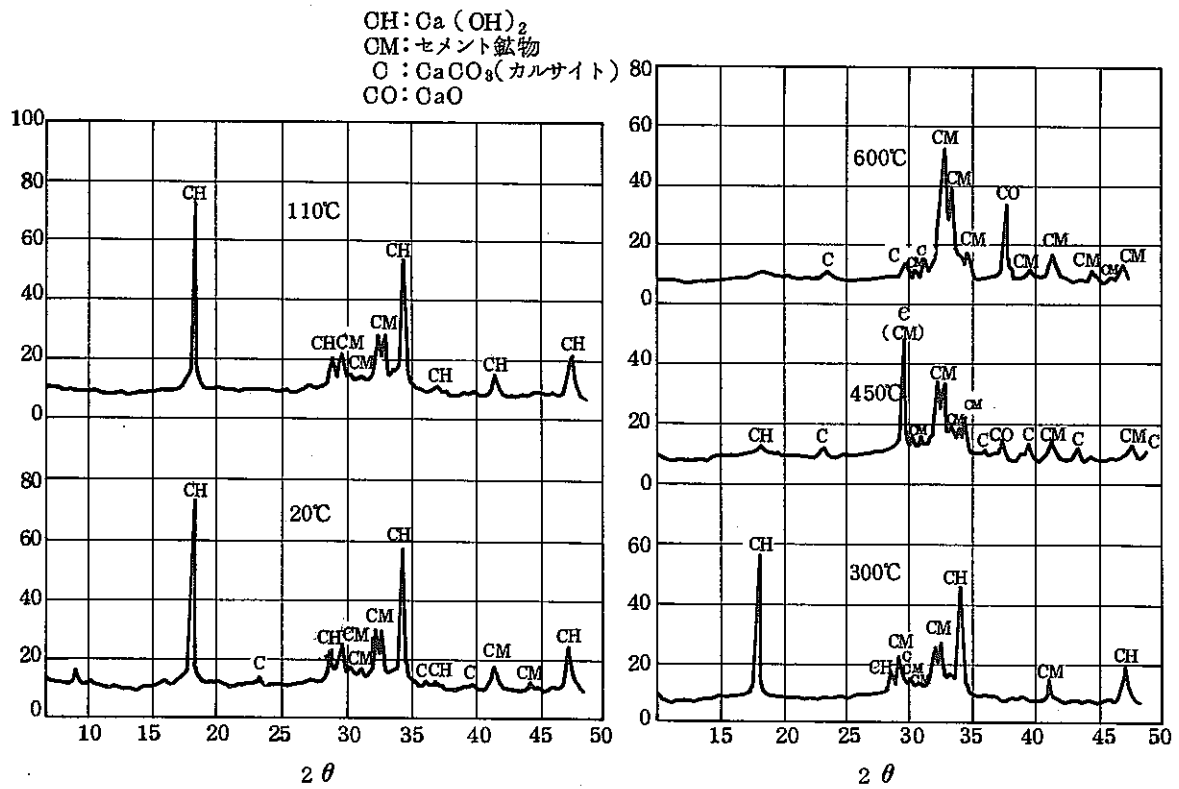


図-2・2 セメントペーストのX線回折図

(2) 蛇紋岩

蛇紋岩の産地別による物理的性質を表-2・6⁵⁾に示し、比較用として粘板岩の試験値を列記した。表中の④, ⑤, ⑦の蛇紋岩は他のものに比べて劣るが、この3種類を除けば蛇紋岩と粘板岩の性質はほぼ同じ程度である。

表-2・6 破碎骨材物理試験成績

岩種名	項目 産地	粗骨材						細骨材				
		比重	吸水量 (%)	安定性 (%)	すりへり減量 (%)	単位容積重量 (Kg/m ³)	破碎率 (%)	ロックウェル 硬度	比重	吸水量 (%)	安定性 (%)	単位容積重量 (Kg/m ³)
蛇紋岩	①岩手県 宮守村	2.69	0.87	2.3	14.9	1,600	16.7	83	2.64	1.50	5.1	1,590
	②福島県 郡山市	2.79	0.61	6.7	17.4	1,650	16.0	59	2.79	1.30	2.4	1,720
	③福島県 本宮町	2.88	0.87	2.1	19.5	1,740	17.6	79	2.88	1.00	3.7	1,760
	④千葉県 鴨川町	2.75	3.49	61.0	30.2	1,670	29.8	64	2.73	3.89	33.9	1,680
	⑤神奈川県 厚木市	2.57	3.65	76.1	53.7	1,610	32.8	53	2.57	3.44	29.4	1,530
	⑥三重県 伊勢市	2.64	0.89	6.0	22.0	1,590	20.2	90	2.63	1.10	3.0	1,590
	⑦山口県 宇部市	2.54	2.14	17.1	26.5	1,540	25.0	72	2.53	2.59	15.9	1,520
	⑧福井県 名田庄村	2.61	1.09	10.4	-	-	-	-	-	-	-	-
岩	埼玉県 越生町	2.65	1.00	33.6	14.6	1,560	17.6	63	2.59	1.67	4.2	1,710
粘板岩	①岩手県 大船渡市	2.61	1.10	3.2	14.7	1,540	15.7	122	2.61	1.44	2.5	1,620
	②宮城県 石巻市	2.69	0.84	1.4	17.0	1,540	14.1	105	2.67	1.03	1.3	1,680
	③岐阜県 谷汲村	2.68	0.72	11.4	40.1	1,590	19.7	89	2.66	1.11	4.8	1,680
	④岡山県 御津町	2.75	0.33	0.7	13.9	1,630	15.5	108	2.72	0.73	2.9	1,680
	⑤広島県 可部町	2.84	0.77	9.6	16.8	1,690	16.2	115	2.80	0.97	1.8	1,720

注 ① 安定性は、硫酸ナトリウム飽和溶液によるものである。

② すりへり減量は、ロサンゼルス試験機によるものでA粒度区分である。

③ 埼玉県越生町産蛇紋岩の最大骨材寸法は20mmで、すりへり減量はB及びC粒度区分である。

5)
中性子遮蔽に有効な蛇紋岩の結晶水については表-2・7に示すとおり、産地によって差が認められるが、400℃～600℃の間に大半の結晶水が失われる。

表-2・7 加熱温度と強熱減量

岩種	産地	強熱減量 (%)			
		400℃	600℃	800℃	1,000℃
蛇紋岩	岩手県 宮守村	1.3	10.7	12.6	12.7
	福島県 郡山市	1.2	6.1	8.3	8.3
	" 本宮町	1.6	5.1	6.6	6.9
	千葉県 鴨川市	3.2	6.2	9.1	9.2
	神奈川県 厚木市	3.3	5.6	6.2	6.6
	三重県 伊勢市	1.0	12.1	14.1	14.3
	山口県 宇部市	3.0	12.2	14.4	14.8
	(埼玉県 越生町)	1.2	10.7	12.3	12.6
粘板岩	岩手県 大船渡市	0.7	1.7	1.9	2.2
	宮城県 石巻市	0.7	3.0	8.0	8.2
	岐阜県 谷汲村	0.7	2.7	2.9	3.3
	岡山県 御津町	0.4	1.4	2.2	2.6
	広島県 可部町	0.7	1.7	2.4	2.3

コンクリート中の蛇紋岩結晶水の挙動は図-2・3³⁾に示すとおり、一時的な結晶水分解温度以上の温度に対してコンクリートブロック深部の蛇紋岩結晶水は安定的である。

蛇紋岩の圧砕に対する破碎抵抗値は表-2・8⁴⁾に示すとおり、300℃加熱まではいずれのものもかなり増加し、その後も結晶水の分解温度近くまで低下しないものと推測される。

熱対応圧縮強度は表-2・9¹⁾に示すとおり、600℃程度まで常温時より低下しないようである。

熱対応引張強度は表-2・10¹⁾に示すとおり、300℃程度まで安定しているが高温領域になると種々鉱物の異方性や異形性などにより膨張収縮差が生じ内部応力が発生し、強度を損うようである。

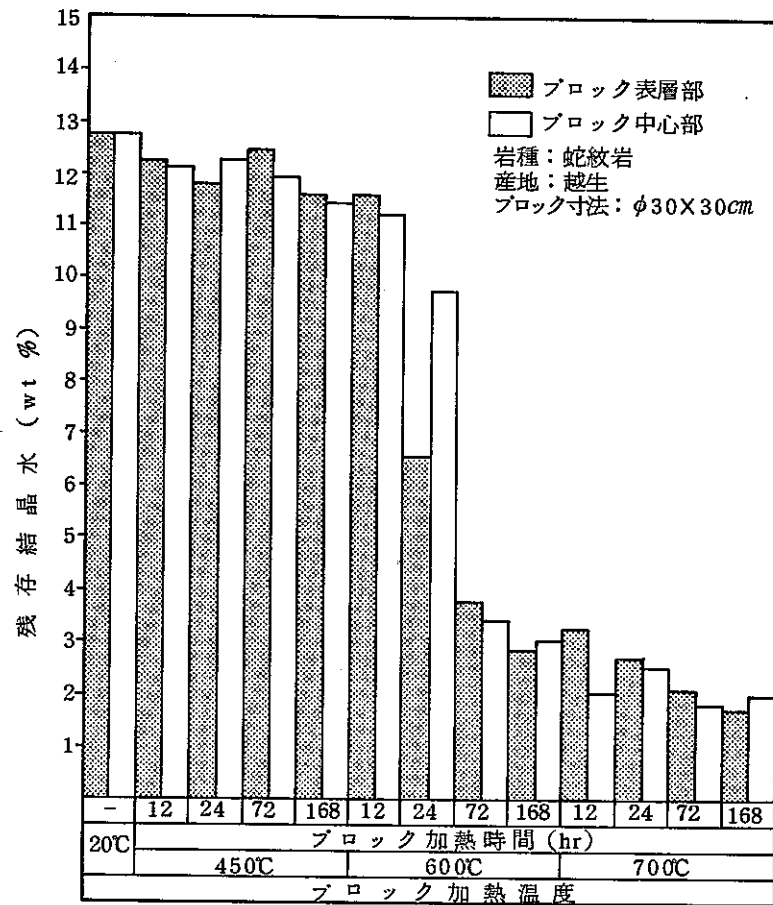


図-2・3 コンクリートの加熱温度・時間と残留結晶水との関係 (採取試料加熱温度範囲 90~1,000℃)

表-2・8 各種蛇紋岩の加熱前後の破碎抵抗

加熱温度 (°C)	宮守産		宇部産		越生産	
	破碎値 (%)	10%破碎荷重 (t)	破碎値 (%)	10%破碎荷重 (t)	破碎値 (%)	10%破碎荷重 (t)
90(BS基準)	10.7	36.4	18.7	19.8	17.6	24.7
110	10.0	40.0	17.6	23.3	12.5	31.6
300	8.0	45.0	13.0	29.8	11.5	34.0
600	19.9	19.2	29.3	9.3	20.9	16.8
600放置※	21.9	16.5	30.0	9.3	23.0	15.8

注-1) BS基準は90°Cで4時間乾燥後に試験する方法である。

注-2) 110~600°Cの加熱時間は7日間とした。

注-3) ※は加熱後7日間空中放置してから試験したものである。

表-2・9 蛇紋岩の熱対応圧縮強度

単位: Kg f / cm²

蛇紋岩名	試験区分	加熱温度 (°C)					
		21	110	300	450	600	700
宮守産	A	1,920 (4)	2,158 (5)	3,540 (4)	3,425 (4)	2,114 (5)	1,756 (5)
	B	978 (1)	821 (1)	1,715 (2)	1,720 (2)	877 (1)	— —
越生産	A	1,015 (6)	1,177 (6)	1,452 (5)	1,204 (4)	1,006 (3)	709 (6)
	B	— —	— —	1,200 (1)	1,044 (2)	787 (3)	— —
宇部産	A	990 (5)	1,412 (5)	1,570 (4)	2,030 (3)	1,570 (2)	685 (4)
	B	594 (1)	941 (1)	840 (1)	1,373 (3)	500 (3)	300 (2)

注-1) Aは正常破壊, Bは不正常破壊を示す。

注-2) ()内の値は供試体数を示す。

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

表-2・10 蛇紋岩の熱対応引張強度

単位: kgf/cm^2

蛇 紋 岩 名	試 験 区 分	加 熱 温 度 (° C)					
		21	110	300	450	600	700
宮 守 産	A	183 (5)	146 (5)	194 (4)	162 (5)	139 (6)	119 (6)
	B	97 (1)	123 (1)	104 (1)	125 (1)	— —	— —
越 生 産	A	115 (2)	105 (2)	134 (4)	94 (6)	82 (4)	80 (5)
	B	69 (4)	87 (1)	95 (1)	— —	61 (2)	48 (1)
宇 部 産	A	67 (5)	58 (5)	88 (5)	108 (6)	78 (5)	44 (4)
	B	39 (1)	28 (1)	39 (1)	— —	29 (1)	31 (2)

注-1) Aは正常破壊, Bは不正常破壊を示す。

注-2) ()内の値は供試体数を示す。

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

熱対応動弾性係数は表-2・11¹⁾に示すとおり, 温度の上昇と共に低下し, 300°C程度まで横ばい状態を示すセメントペーストの挙動とは著しく異っている。

表-2・11 蛇紋岩の熱対応動弾性係数

単位: $\times 10^3 \text{Kgf}/\text{cm}^2$

蛇 紋 岩 名	加 熱 温 度 (° C)					
	21	110	300	450	600	700
宮 守 産	1905 (100)	841 (33)	448 (24)	557 (29)	測定不能 "	測定不能 "
越 生 産	688 (100)	599 (87)	542 (79)	367 (53)	" "	" "
宇 部 産	723 (100)	415 (57)	241 (33)	189 (26)	" "	" "

注-1) 供試体数は3ヶである。

注-2) ()内の値は相対百分率(%)である。

注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。

注-4) 加熱時間は72時間である。

1)
熱対応長さ変化は表-2・12に示すとおり、450℃まで加熱温度に比例して収縮が増加し、結晶水が分解する温度領域ではさらに大きく収縮する。

表-2・12 蛇紋岩の熱対応長さ変化

単位：(%)

蛇紋岩名	加熱温度 (°C)					
	21	110	300	450	600	700
官守産	0	-0.016	-0.100	-0.115	-0.257	-0.267
越生産	0	-0.034	-0.080	-0.112	-0.201	-0.499
宇部産	0	-0.048	-0.283	-0.383	-0.468	-0.488

- 注-1) 供試体数は3ヶである。
 注-2) 「-」は収縮を示す。
 注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。
 注-4) 加熱時間は72時間である。

1)
熱対応重量変化は表-2・13に示すとおり、加熱温度と共にポーラス化が進み、長さ変化と同様に結晶水分解温度付近で大きな変化を示す。

表-2・13 蛇紋岩の熱対応重量変化

単位：(%)

蛇紋岩名	加熱温度 (°C)					
	21	110	300	450	600	700
官守産	0	-0.445	-1.239	-1.579	-7.475	-8.183
越生産	0	-0.459	-0.989	-1.221	-6.731	-12.719
宇部産	0	-1.072	-2.651	-3.737	-12.864	-13.639

- 注-1) 供試体数は3ヶである。
 注-2) 「-」は減少を示す。
 注-3) 測定は加熱後室温にて実施した。
 注-4) 加熱時間は72時間である。

3)
蛇紋岩の示差熱分析結果は図-2・4に示すとおり、560℃以降ではアンチゴライドが分解を始め次第にカンラン石化した。560℃から見られる転移は主として蛇紋岩中のアンチゴライトが脱水し、カンラン石になるためと言われている。

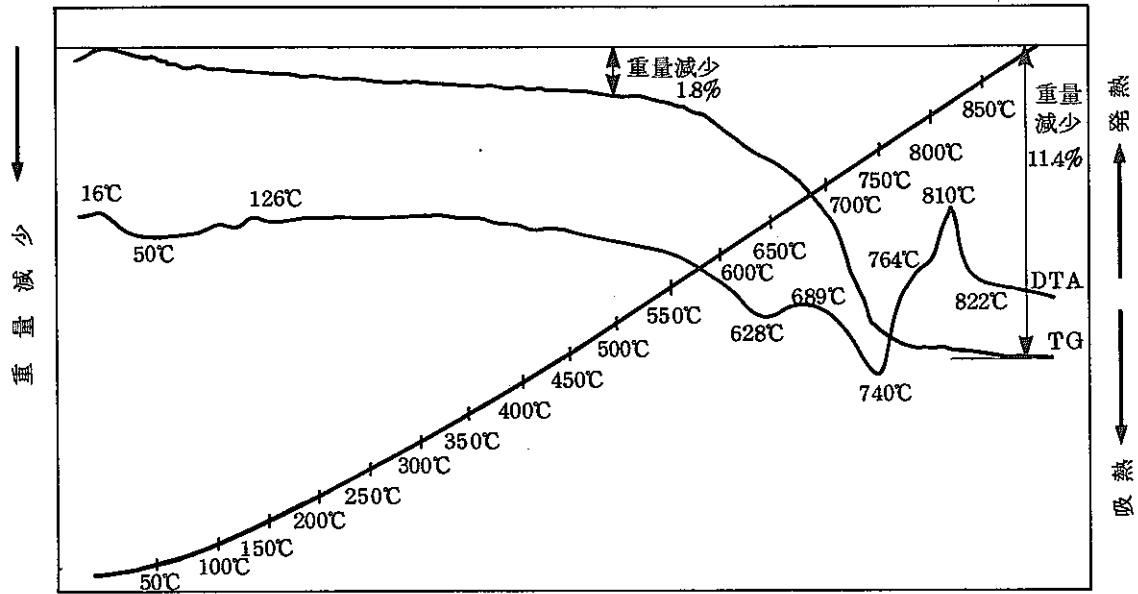


図-2・4 蛇紋岩の示差熱 (DTA) ・熱重量 (TG) 曲線

3)
このことは図-2・5に示すように X線回折結果とも一致する。

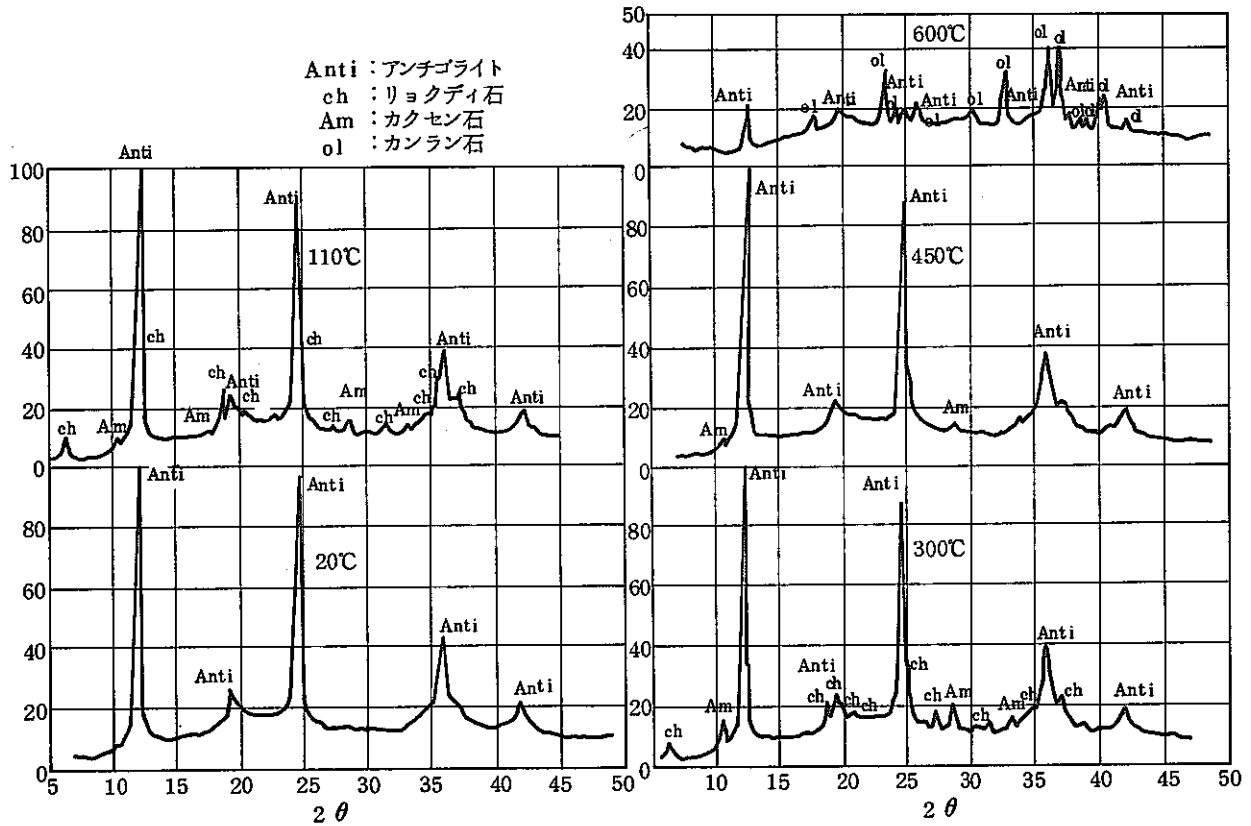


図-2・5 蛇紋岩の X線回折図

なお、数年前より蛇紋岩骨材に起因するコンクリートのポップアウトに関する研究例が報告されている。これは風化蛇紋岩中に局所的に存在する Brucite $[Mg(OH)_2]$ 鉱物が酸化、炭酸化により図-2・6に示すように Coalingite $[Mg_{10}Fe_2CO_3(OH)_{24} \cdot 2H_2O]$ に変質する過程で生ずる膨張に起因し、大気を遮断すれば防止できると報告されている。

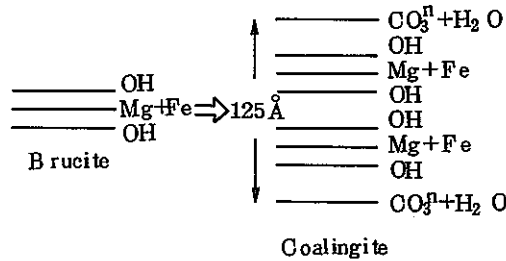


図-2・6 Coalingite の生成

一方、蛇紋岩中に含まれる自然放射性物質としてはウラン (U) が 0.1 ~ 0.2 ppm, トリウム (Th) が 0 ~ 1 ppm である。なお、この他に宮坂, 千田らの報告例がある。

以上は、国内のデータをまとめたものであり、次に諸外国のうち特にフランスの Elleuch らの研究データを示す。このデータは A C I セミナーで発表されたもので蛇紋岩およびアルミナセメントペーストへの中性子照射の影響を圧縮強度, 曲げ強度, 長さ変化および音速によって調べたものである。

圧縮強度は図-2・7に示すように照射サンプルにおいて非照射のものに比べて蛇紋岩については増加し、セメントペーストについては余り変化はないようである。

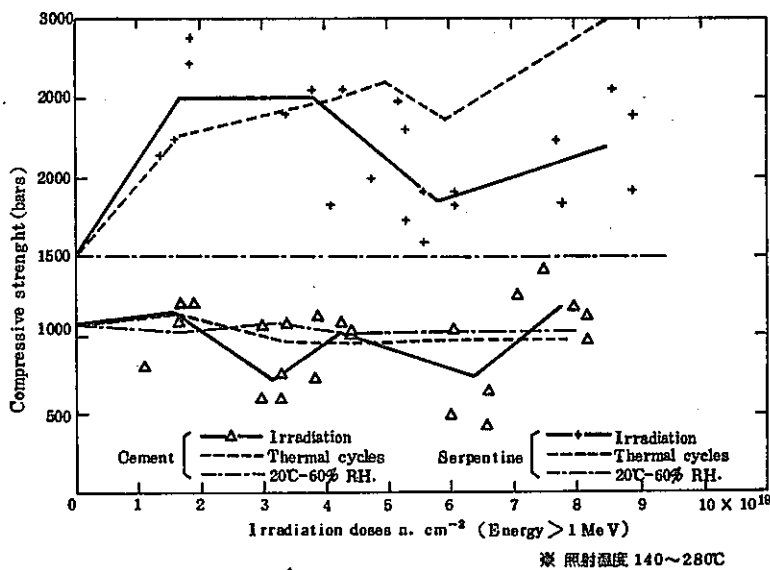


図-2・7 蛇紋岩とアルミナセメントペーストの圧縮強度

曲げ強度は蛇紋岩については明らかに小さくなるがセメントペーストについては定かでない(図-2・8参照)。

長さ変化は蛇紋岩については $7000\mu/m$ ($9 \times 10^{19} n/cm^2$) 膨張し、セメントペーストのみでは収縮するようである(図-2・9参照)。

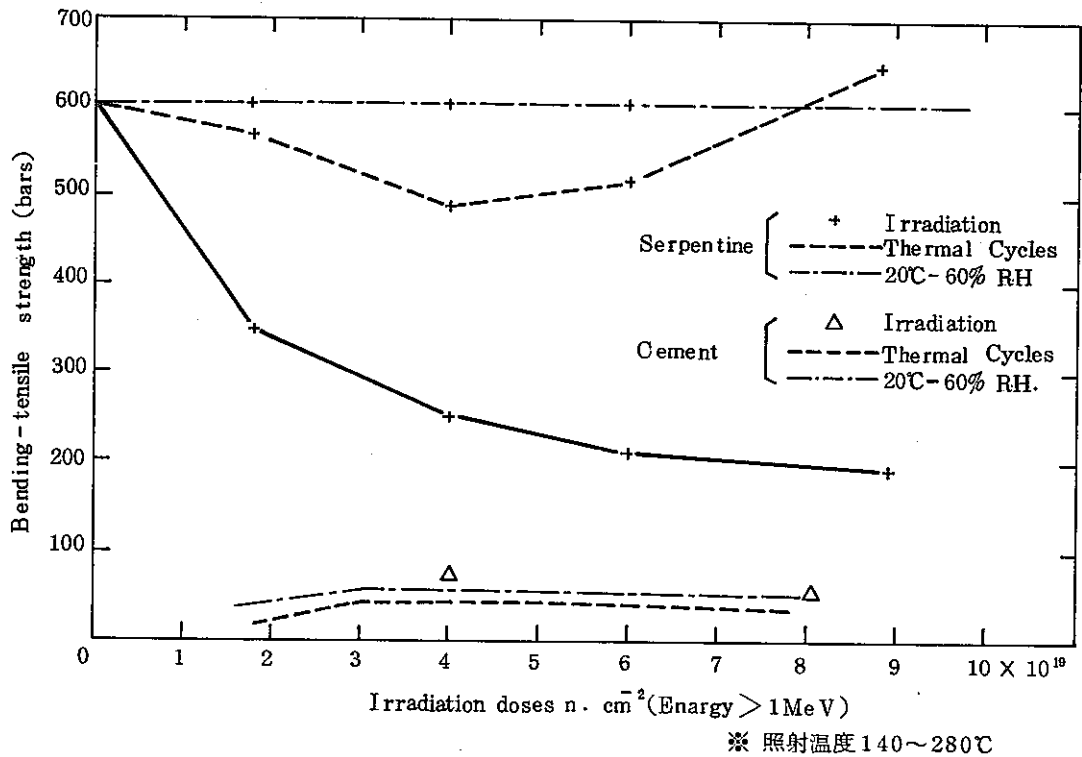


図-2・8 蛇紋岩とアルミナセメントペーストの曲げ強度

超音波伝播速度は図-2・10に示すように照射蛇紋岩では明らかに小さくなり、セメントペーストでは若干大きくなる。

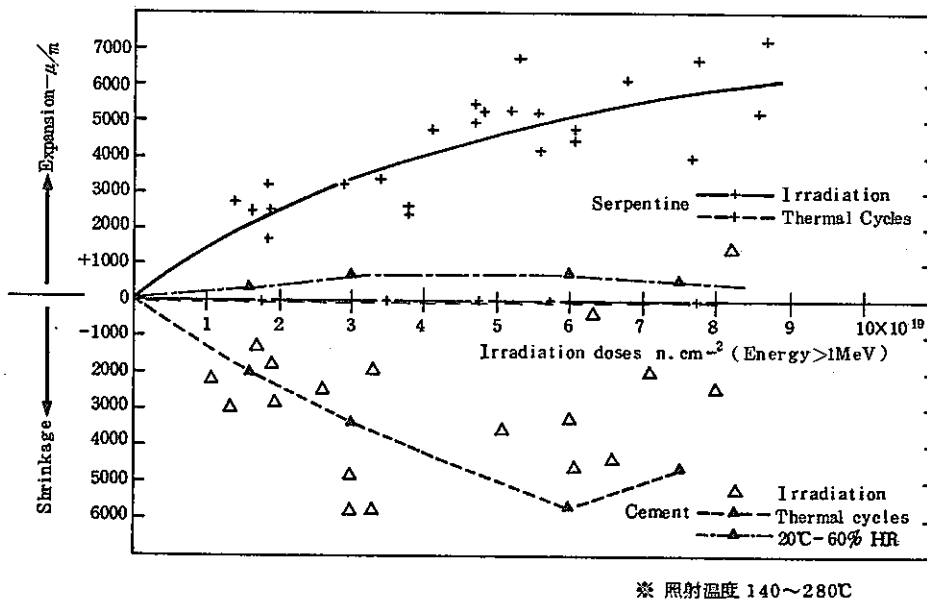


図-2・9 蛇紋岩とアルミナセメントペーストの長さ変化

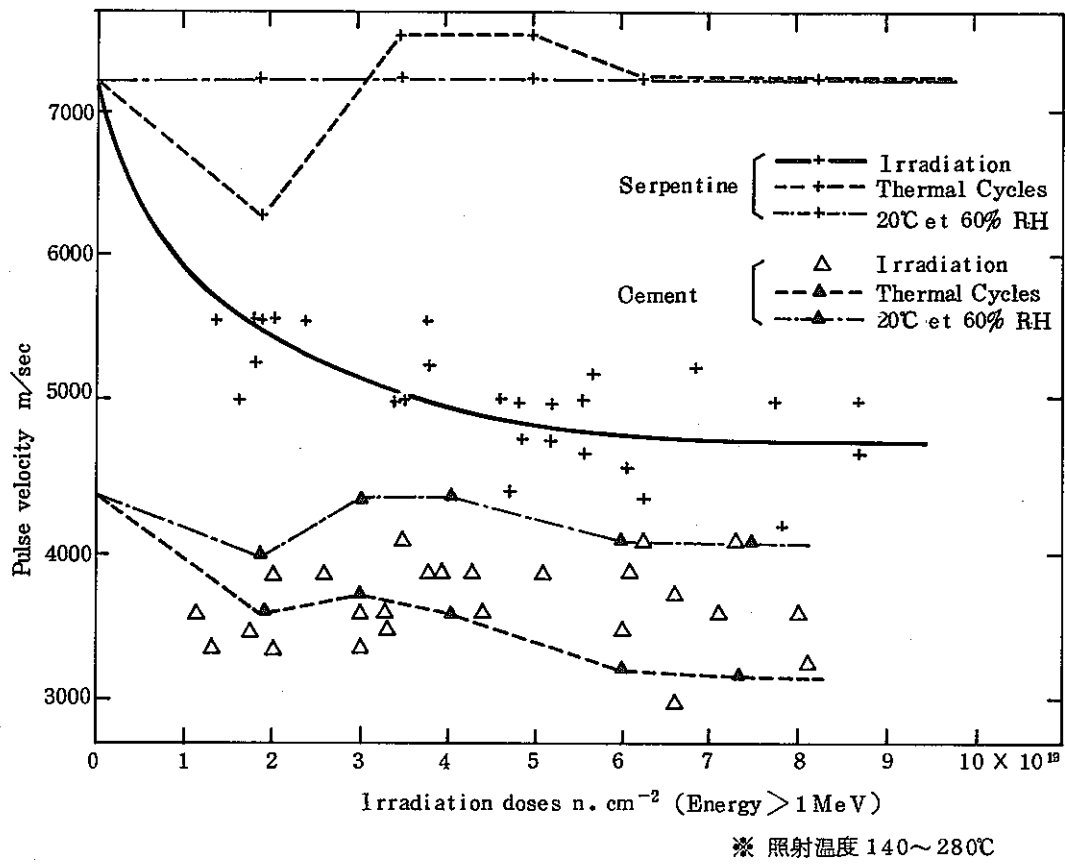


図-2・10 蛇紋岩とアルミナセメントペーストの超音波伝播速度

3. 蛇紋岩コンクリートの諸性質

(1) 機械的性質

蛇紋岩コンクリートの機械的性質としては圧縮強度、引張強度、弾性係数ならびにクリープ等であり、以下にその詳細について述べる。

(a) 圧縮強度

i) セメントの影響

蛇紋岩コンクリートにおけるセメントの種類の影響は表-3・1¹⁰⁾に示すとおり、混合セメントは普通ポルトランドセメントに比べて強度発現は遅いが加熱後残存率は大きく耐熱的である。

表-3・1 圧縮強度におよぼすセメントの種類の影響

単位: Kg f / cm²

セメントの種類	前養生材令(日)				加熱温度(°C)						
	7	14	28	91	90	110	200	250	300	350	450
普通ポルトランドセメント	181 (50)	249 (69)	327 (91)	361 (100)	326 (90)	330 (91)	339 (94)	319 (88)	340 (94)	273 (76)	227 (63)
高炉セメント (置換率40%)	140 (40)	202 (57)	295 (84)	352 (100)	320 (91)	345 (78)	394 (112)	349 (99)	371 (105)	322 (91)	241 (68)
フライアッシュセメント (置換率30%)	103 (39)	142 (54)	218 (82)	265 (100)	265 (100)	265 (100)	298 (112)	258 (97)	277 (105)	232 (88)	191 (72)

注-1) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注-2) 配合はC=300Kg/m³, スランブ7.5±1cm。

なお、アルミナセメントの場合は90°C加熱で著しい増加を示し、その後若干低下してから横ばい状態となるが、300°C加熱ではその逆の傾向となり、温度条件による変動が大きい。これは、アルミナセメント特有の転移現象が関与しているものと推察される。

ii) 骨材の影響

蛇紋岩の産地による差は図-3・1⁴⁾に示すとおり、300°C加熱で増減し、表-2・8~2・9でわかるようにルーズな骨材の場合に耐熱的でタフな骨材より残存強度が大きく、また結晶水の多寡と強度劣化とは無関係のようである。なお600°C加熱では骨材産地の差が消失する。

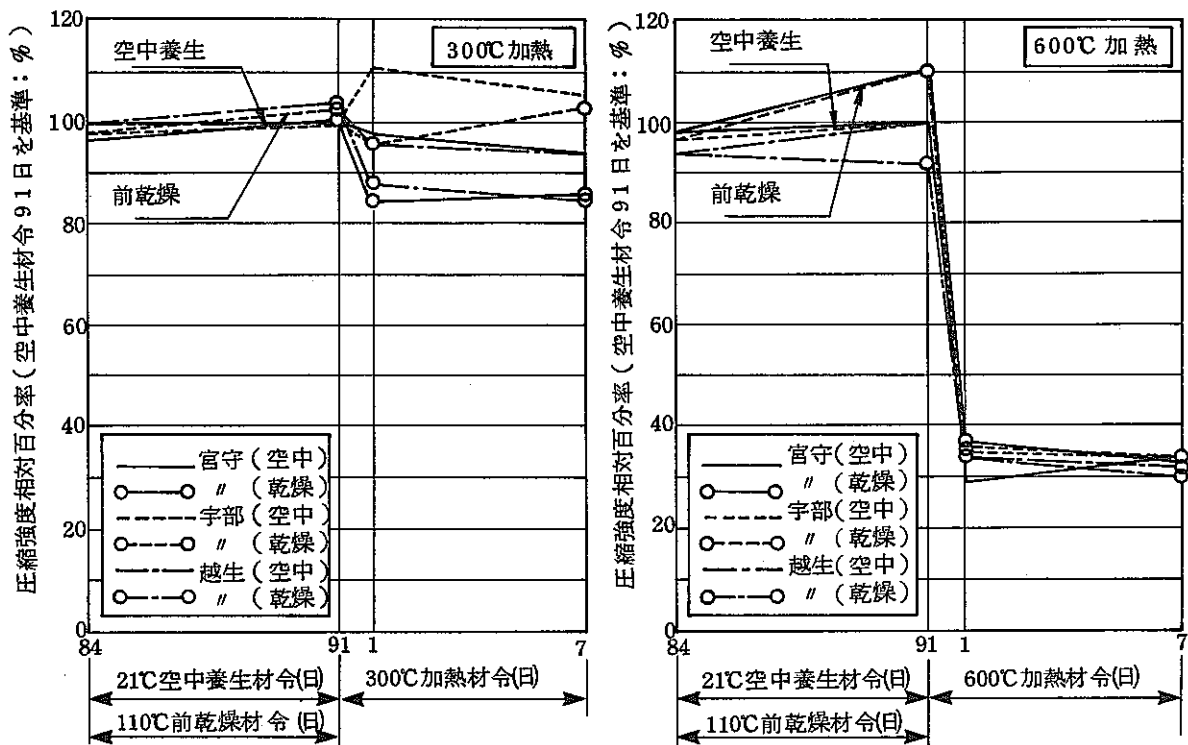


図-3・1 蛇紋岩産地と圧縮強度の関係

蛇紋岩と他の骨材を比較すると図-3・2¹²⁾に示すとおり、200°Cで3ヶ月加熱後の残存率は他のものに比べて遜色なく、またそれ以上の温度においても同様の傾向を示すとい^{10), 11)}える。

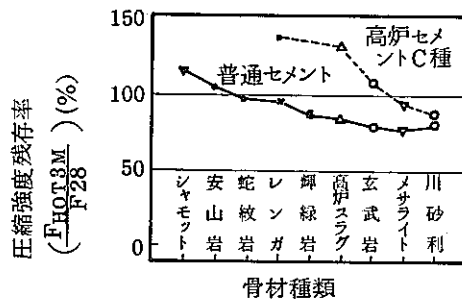


図-3・2 骨材の種類と圧縮強度の関係

iii) 混和材の影響

中性子を吸収することができる硼素およびタンタルを混和したコンクリートは図-3・¹³⁾3に示すとおり、硼素を混和すると圧縮強度は低下するが混和量による差異は認められ

ない。タンタルの場合は増減し混和量によって著しく相違し、材令28日以後の強度の延びはほとんどない。

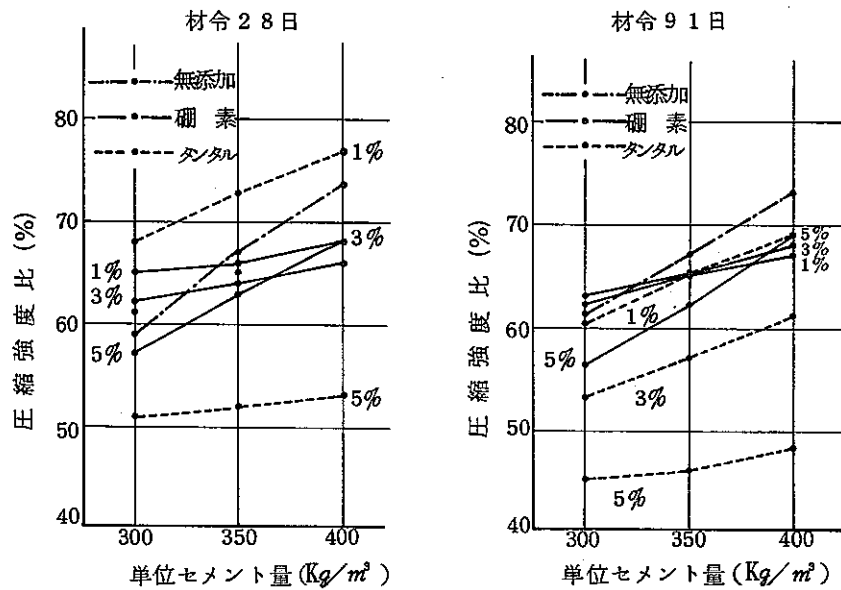


図-3・3 硼素およびタンタルを混和した蛇紋岩コンクリートの圧縮強度

iv) 昇温速度の影響

昇温速度を変化(10, 50, 100°C/H)させ、加熱温度300°Cを履歴させたコンクリートの挙動は表-3・2に示すとおり、前乾燥をうけたものはほとんど差はないが、しななかったものについては僅かではあるが緩速なものほど低下が大きいようである。

表-3・2 圧縮強度におよぼす昇温速度の影響

単位: %

配合	加熱温度上昇速度 (°C/H)	養生	材令					
			前養生 (日)		加熱 (日)		浸水 (日)	
			7	28	91	1	7	7
C-200	10	空中乾燥	43	91	100	106	105	-
		乾燥	-	-	105(100)	88(83)	92(87)	69
	50	空中乾燥	45	93	100	108	114	-
		乾燥	-	-	109(100)	95(87)	99(91)	68
	100	空中乾燥	41	82	100	110	115	-
		乾燥	-	-	113(100)	90(79)	93(82)	71
C-400	10	空中乾燥	58	99	100	95	92	-
		乾燥	-	-	107(100)	91(85)	89(83)	65
	50	空中乾燥	60	100	100	96	94	-
		乾燥	-	-	104(100)	88(85)	85(82)	64
	100	空中乾燥	61	100	100	93	94	-
		乾燥	-	-	97(100)	85(88)	88(92)	59

注-1) 値は標準養生の材令91日を基準にしたものである。

注-2) ()内は乾燥をうけたものの材令91日を基準にした値である。

注-3) C-200とはセメント量200Kg/m³, W/C=1.10。

注-4) C-400とはセメント量400Kg/m³, W/C=0.50。

v) 加熱期間の影響

2年間継続加熱による影響は図-3・4に示すとおり、加熱初期で著しい低下を示すがその後は横ばい状態で安定し、長期加熱による変化はほとんど認められない。

vi) 加熱温度の影響

700℃までの高温加熱を受けると蛇紋岩コンクリートの圧縮強度は図-3・5に示すとおり、セメントゲルの熱分解による物性低下の予想される400℃付近で急激に低下し、さらに蛇紋岩の結晶水が分解し、岩質の変化する500℃~600℃までこの低下は継続し、大半の強度は高温加熱で喪失する。

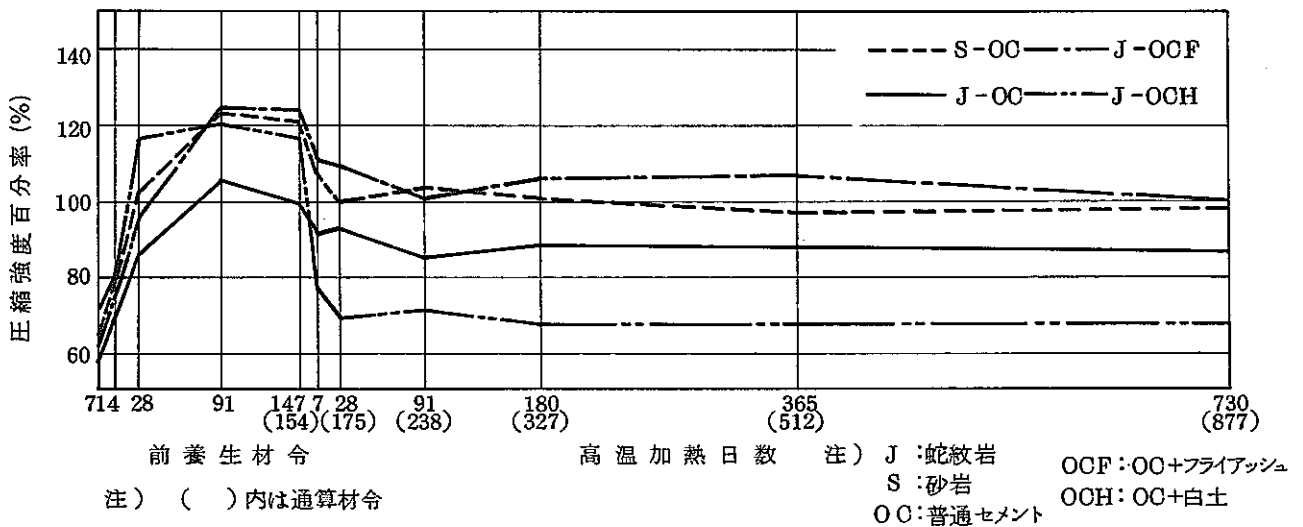


図-3・4 300℃加熱日数と圧縮強度の関係

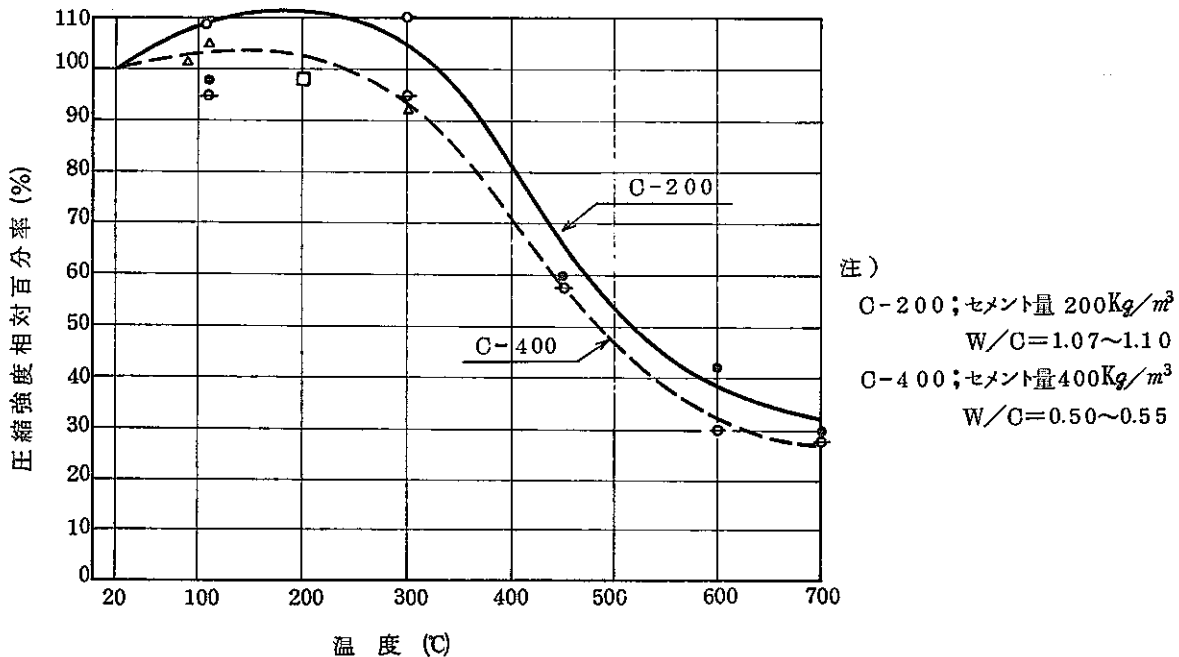
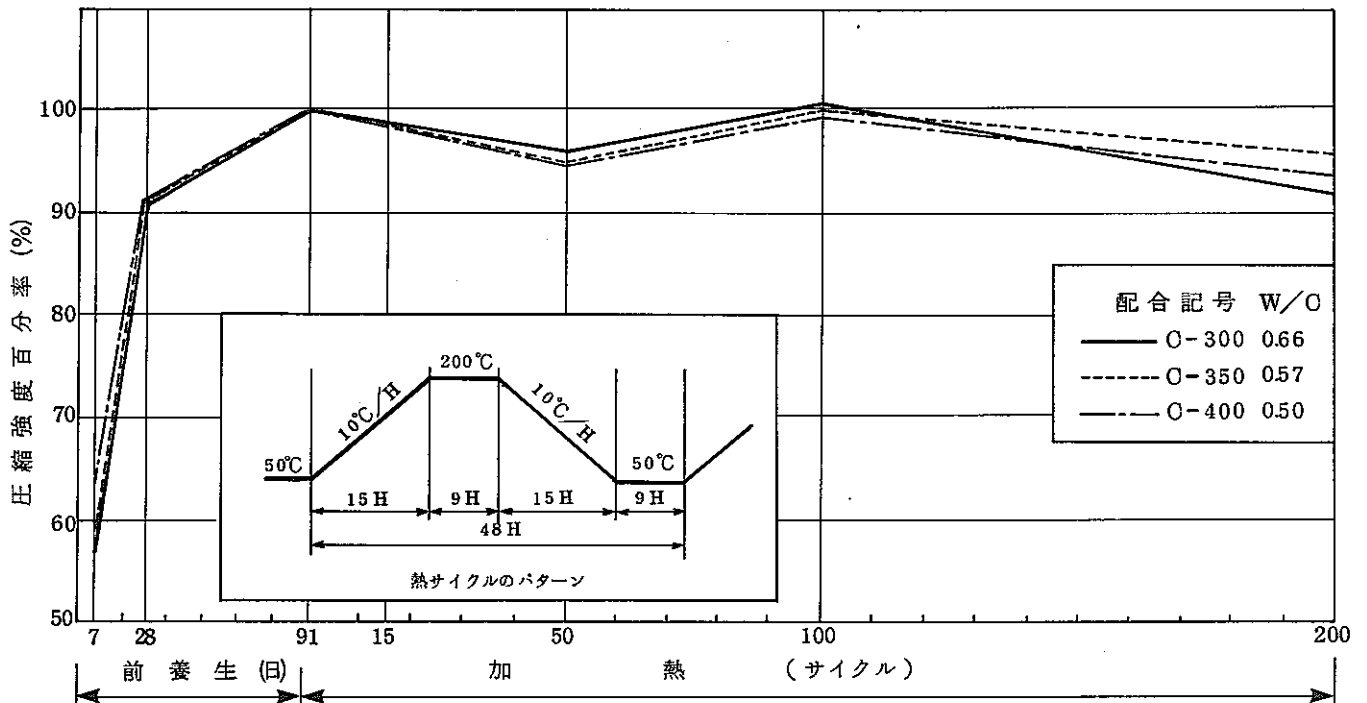


図-3・5 加熱温度と圧縮強度の関係

vii) 熱サイクルの影響

50℃～200℃の熱サイクルでは図-3・6¹⁶⁾に示すとおり、サイクル数および水セメント比の影響はあまり認められず、強度におよぼす影響は熱サイクルの上限温度によって支配されるようである。



注) 材令91日の圧縮強度を100(%)とした。

図-3・6 熱サイクル数と圧縮強度の関係

viii) 熱間・冷間の影響

蛇紋岩コンクリートは300℃加熱による熱間と加熱後冷間との間には差が見られな³⁾かったが、両者について図-3・7¹⁷⁾に示す調査結果があり、下限包絡線は加熱後冷間の方が熱間より若干低下率が大きい結果となっている。

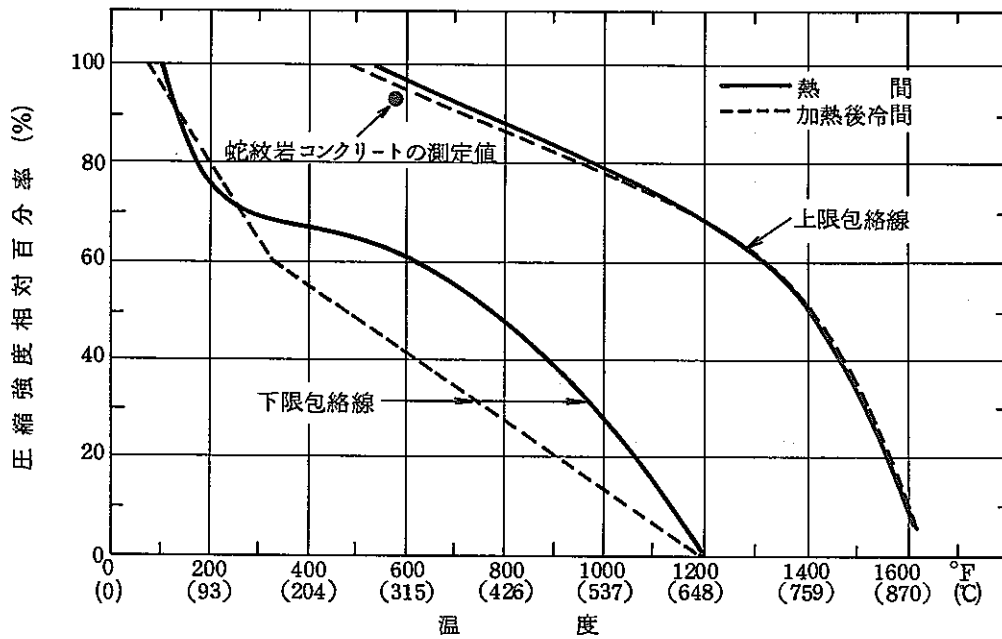


図-3・7 熱間および加熱後冷間における圧縮強度相対百分率

ix) 加熱後放置の影響

加熱後放置した蛇紋岩コンクリートは表-3・3¹¹⁾ならびに図-3・8¹⁰⁾に示すとおり、放置状態および加熱温度によって異なり、300°C加熱後水中に戻すと初期では低下するがその後回復する¹¹⁾。露出放置の場合は放置日数と共に低下し、大気を遮断した場合は放置の影響が少ないようである¹⁰⁾。

表-3・3 300°C 2年加熱後水中養生の圧縮強度 (kg/cm²)

配合記号	供試体寸法		10×10×10 cm	
	φ 10×20 cm		2年加熱後21°C水中養生	
	加熱直前	2年加熱後	2日	35日
S-OC	422	342	302	387
J-OC	348	301	241	352
J-OCF	431	349	349	465
J-OCH	407	235	237	303

注) S : 砂岩 OCF : OC+フライアッシュ
 J : 蛇紋岩 OCH : OC+白土
 OC : 普通セメント

加熱後放置したコンクリートについて既往の報告例も少なく^{18), 19)}、未解明の部分が多い分野

であるが、水分と二酸化炭素がなんらかの働きをしていることは明らかなことと考えられる。

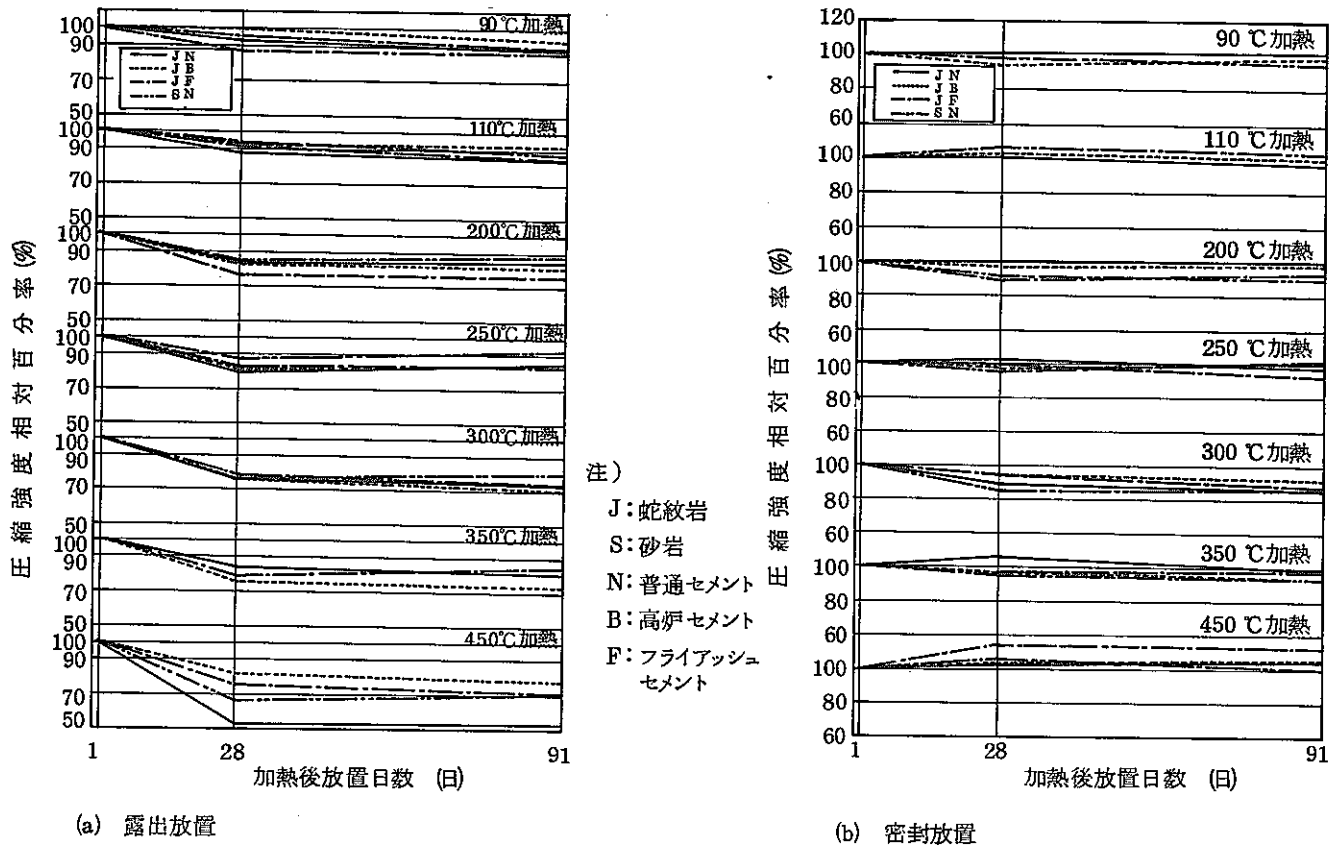


図-3・8 加熱後放置日数と圧縮強度の関係

X) 中性子の照射の影響

原型炉「もんじゅ」の使用条件、高速中性子フルエンス約 $2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$)²⁰⁾ 温度 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ の場合、図-3・9に示すとおり普通ポルトランドセメントを用いた蛇紋岩コンクリート(PS)の方がアルミナセメントを用いたもの(AS)より優れている。照射量が約 $5.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$)、照射温度が約 300°C の場合、照射によって強度は51~57%低下し熱履歴試料より低下率が大きく、中性子照射の影響が認められると伊藤らは報告している。²¹⁾

また、フランスにおける中性子照射試験データでも図-3・10⁹⁾に示すとおり、照射コンクリートの方が非照射のものに比べて強度が若干低下している。

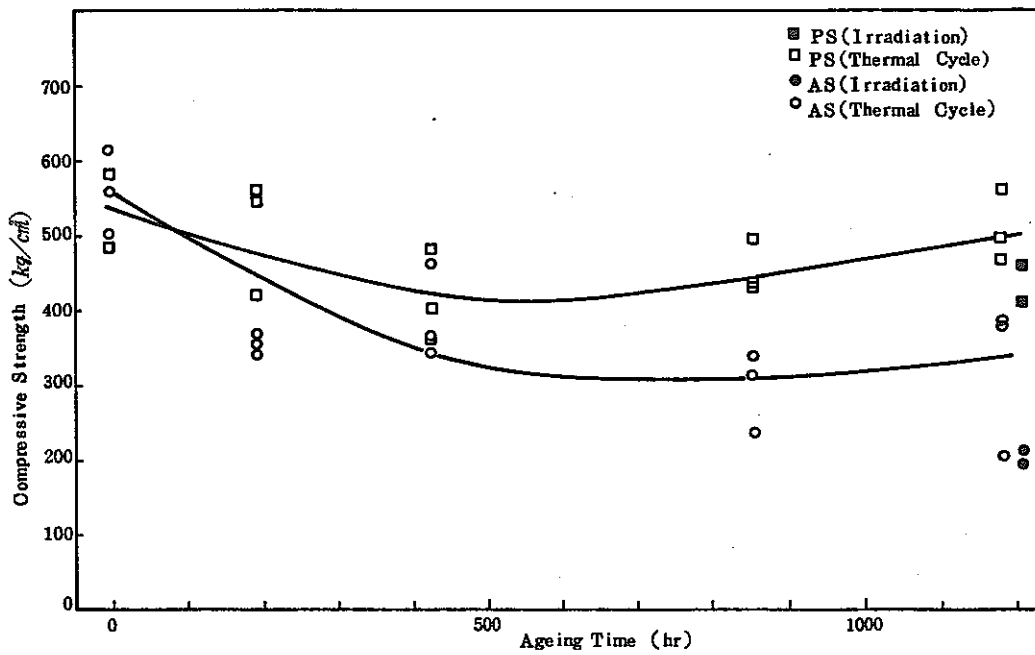


図-3・9 中性子を照射された蛇紋岩コンクリートの圧縮強度

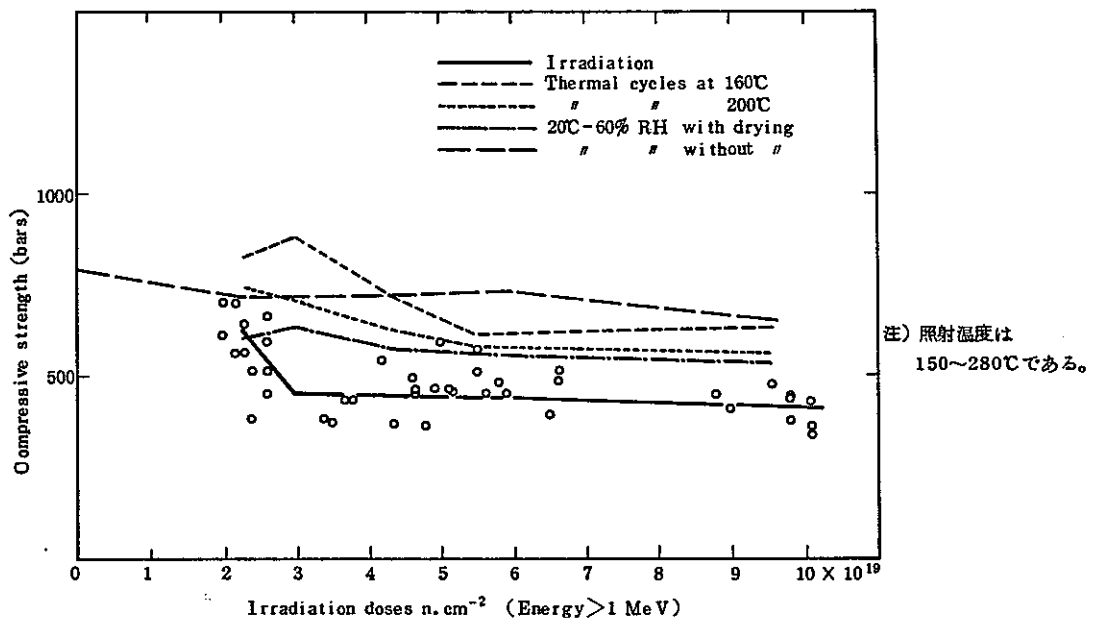


図-3・10 中性子を照射された蛇紋岩アルミナセメントコンクリートの圧縮強度

(b) 引張強度

i) 骨材の影響

蛇紋岩の産地によるコンクリート引張強度に与える影響は圧縮強度(図-3・1参照)と同様な傾向となり、結晶水の多寡と強度劣化とは無関係であり、300℃程度の加熱において残存引張強度を高めるにはある程度タフネスの小さいルーズな骨材を用いるのが肝要である。⁴⁾

ii) 昇温速度の影響

加熱温度上昇速度(10, 50, 100℃/H)による影響は圧縮強度(表-3・2参照)と同様な傾向となり、前乾燥をうけたものはほとんど差はないが、未処理のものについては緩速なものほど低下が大きいようである。¹⁴⁾

iii) 加熱温度の影響

700℃まで高温加熱を受けると引張強度は図-3・1¹⁵⁾に示すとおり、圧縮強度(図-3・5参照)と異なり加熱温度の全域で低下する。なお、引張強度の加熱温度による変化については Seven Thelandersson²²⁾ および、G. Jönsson²³⁾ の研究例があり、これらと比較した場合劣化の傾向は良く似かよっており、数値的にもほぼ等しく、蛇紋岩コンクリートの高温下での劣化はシリカ質骨材コンクリートと同等と考えられる。

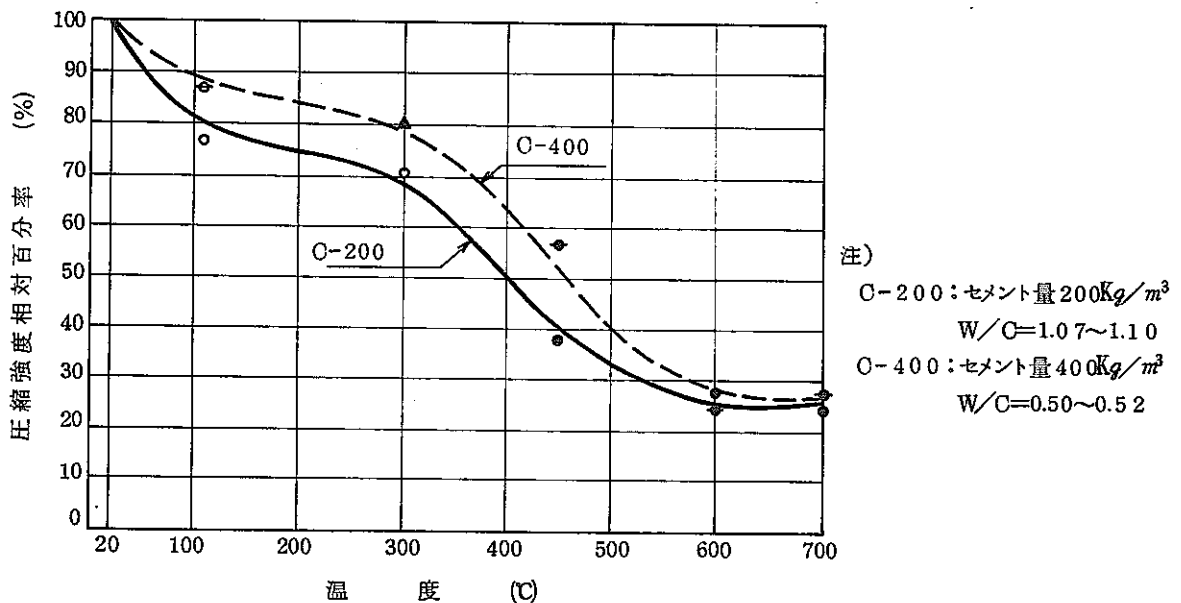


図-3・11 加熱温度と引張強度の関係

(c) 静弾性係数

i) 熱間, 冷間の影響

蛇紋岩コンクリートの静弾性係数(応力比 0.3)は図-3・12³⁾に示すとおり未加熱が約 $2.0 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ で一般のコンクリートの下位に属し, 熱間および加熱後冷間ではそれぞれ約 $1.2 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ および約 $1.1 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ となり, 熱間の方が若干大きいがいずれも半減し, その低下率はあとで述べる動弾性係数と類似した。既往の研究によれば図-3・13¹⁷⁾に示すとおり, 蛇紋岩コンクリートの場合はその分布のほぼ中央部に位置し一般的挙動といえる。

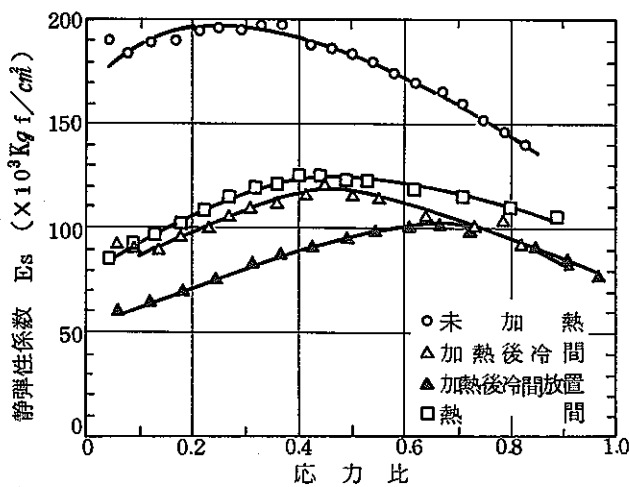


図-3・12 熱的諸条件下における応力比と静弾性係数の関係

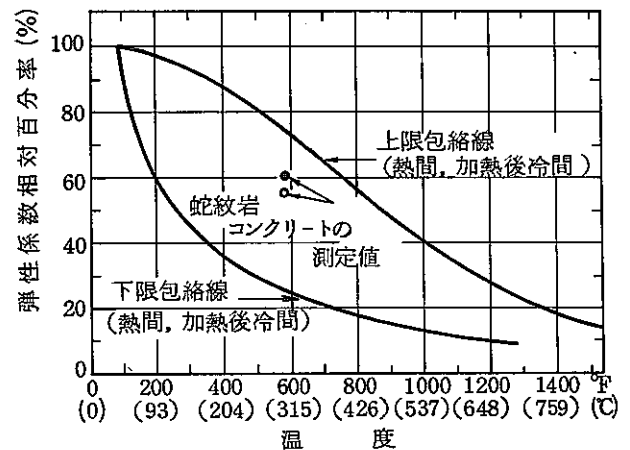


図-3・13 熱間および加熱後冷間における弾性係数

ii) 中性子照射の影響

蛇紋岩コンクリートに高速中性子フルーエンス $\sim 3 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$), 照射温度 $\sim 460^\circ\text{C}$ で照射した場合表-3・4²⁴⁾に示すとおり, 照射後低下する。静弾性係数に関してはデータが乏しく, 今のところ動弾性係数によってコンクリートの弾性を研究しているのが現状である。

(d) ポアソン比

ポアソン比は, 図-3・14³⁾に示すとおり, 300°C 加熱後 20~40% 程度低下し応力比が小さいほど著しく, 冷却放置しておくとも回復する兆候が見られる。また, 応力比が大きいほどポアソン比は未加熱値に近づく性質がある。

表-3・4 静弾性係数におよぼす中性子照射の影響

Modulus of Elasticity (kg/cm^2)	
pre -	post - *
-	-
-	-
-	-
-	-
2.18×10^5	1.84×10^4
2.23×10^5	3.62×10^4

* Static Elastic Modulus

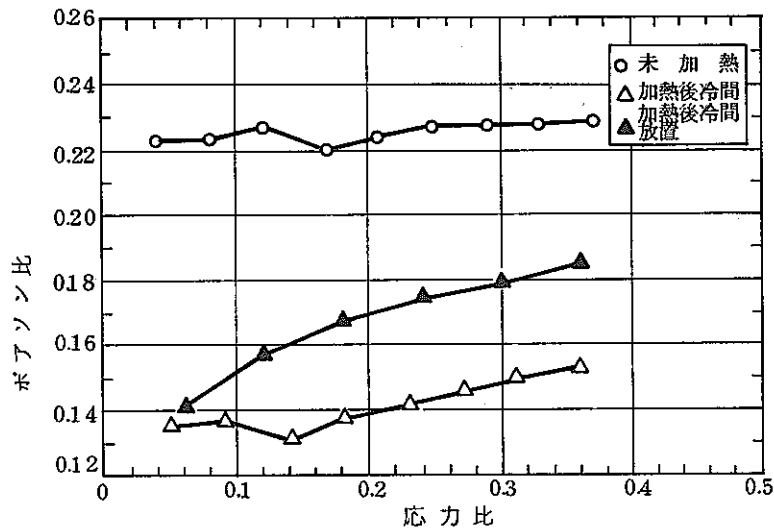


図-3・14 熱的諸条件下におけるポアソン比と応力比の関係

(e) 動弾性係数

i) セメントの影響

セメントの種類による動弾性係数は表-3・5¹⁰⁾に示すとおり、普通ポルトランドセメントは混合セメントに比べて加熱後残存率は同等以上である。また、アルミナセメントの場合は普通ポルトランドセメントに比べて90℃加熱で低下率は10%程度小さいが300℃加熱では逆に30%程度大きくなり、圧縮強度と同様に温度条件による変動が大きい。なお、加熱後放置した場合は混合セメントの方が有利である。¹⁰⁾

表-3・5 動弾性係数におよぼすセメントの種類の影響 (共鳴振動法)

単位: $\times 10^8 \text{ Kg f / cm}^2$

セメントの種類	前養生材令(日)				加熱温度 (°C)						
	7	14	28	91	90	110	200	250	300	350	450
普通ポルトランドセメント	275 (92)	294 (98)	301 (101)	299 (100)	235 (79)	217 (73)	209 (70)	189 (63)	172 (58)	153 (51)	123 (41)
高炉セメント (置換率40%)	251 (79)	275 (87)	300 (95)	317 (100)	216 (68)	212 (67)	173 (55)	170 (54)	157 (50)	132 (42)	111 (35)
フライアッシュセメント (置換率30%)	247 (85)	273 (94)	287 (99)	291 (100)	209 (72)	199 (68)	187 (64)	173 (60)	170 (58)	151 (52)	124 (43)

注-1) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注-2) 配合は $C=300 \text{ Kg/m}^3$, スランプ $7.5 \pm 1 \text{ cm}$

ii) 骨材の影響

蛇紋岩の産地による差は図-3・15⁴⁾に示すとおり、300°C加熱では骨材産地の差が若干みられ、結晶水の少ないものの減少率が大きく、600°C加熱では骨材産地の差が消失する。

蛇紋岩と砂岩を比較すると表-3・6¹⁰⁾に示すとおり、絶対値では砂岩コンクリートの方が大きい加熱後残存率は蛇紋岩コンクリートの方が大きくなり、また長期加熱後においてもその傾向は変わらない。

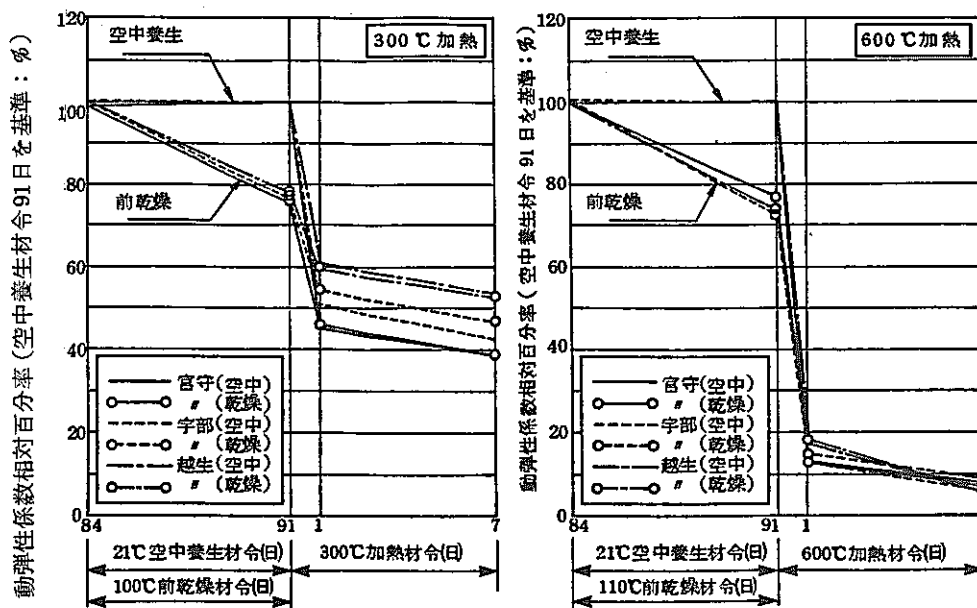


図-3・15 蛇紋岩産地と動弾性係数の関係

表一 3・6 動弾性係数におよぼす骨材の種類の影響 (共鳴振動法)

単位: $\times 10^3 \text{Kgf/cm}^2$

骨材の種類	前養生材令(日)				加熱温度(°C)						
	7	14	28	91	90	110	200	250	300	350	450
蛇紋岩	275 (92)	294 (98)	301 (101)	299 (100)	235 (79)	217 (73)	209 (70)	189 (63)	172 (58)	153 (51)	123 (41)
砂岩	313 (84)	349 (93)	362 (97)	375 (100)	280 (75)	263 (70)	228 (61)	206 (55)	207 (55)	181 (48)	142 (38)

注一) ()内の値は相対百分率(%)を示す。

注二) 配合は $C=300 \text{Kg/m}^3$, スランプ $7.5 \pm 1 \text{cm}$, 普通ポルトランドセメント使用。

iii) 昇温速度の影響

昇温速度を変化(10, 50, 100°C/H)させ、加熱温度300°Cを履歴したコンクリートの挙動は表3-7¹⁴⁾に示すとおり、緩速なものほど低下は大きく、水セメント比の大きいものほど顕著である。

表一 3・7 動弾性係数におよぼす昇温速度の影響

単位: %

配合	加熱温度上 昇速度 (°C/H)	養生	材令						
			前養生(日)				加熱(日)		浸水(日)
			7	28	84	91	1	7	7
C-200	10	空中	87	94	99	100	52	42	89
		乾燥	—	—	100	64	39	34	86
	50	空中	80	98	99	100	54	39	77
		乾燥	—	—	100	66	41	34	76
	100	空中	79	98	100	100	57	43	82
		乾燥	—	—	100	63	43	37	81
C-400	10	空中	96	99	100	100	58	55	89
		乾燥	—	—	100	74	57	49	88
	50	空中	98	100	100	100	61	54	89
		乾燥	—	—	100	78	59	53	87
	100	空中	97	100	100	100	59	54	85
		乾燥	—	—	100	78	60	53	84

注一) 値は乾燥をうけないものでは標準養生の材令91日、乾燥をうけたものでは材令84日を基準にしたものである。

注二) C-200とはセメント量 200Kg/m^3 , $W/C=1.10$, C-400とはセメント量 400Kg/m^3 , $W/C=0.50$ 。

iv) 加熱期間の影響

11)
 2年間継続加熱による影響は図-3・16に示すとおり、加熱直後で著しい低下を示し、傾向的には加熱180日まで低下し、それ以降は横ばいとなって安定する。

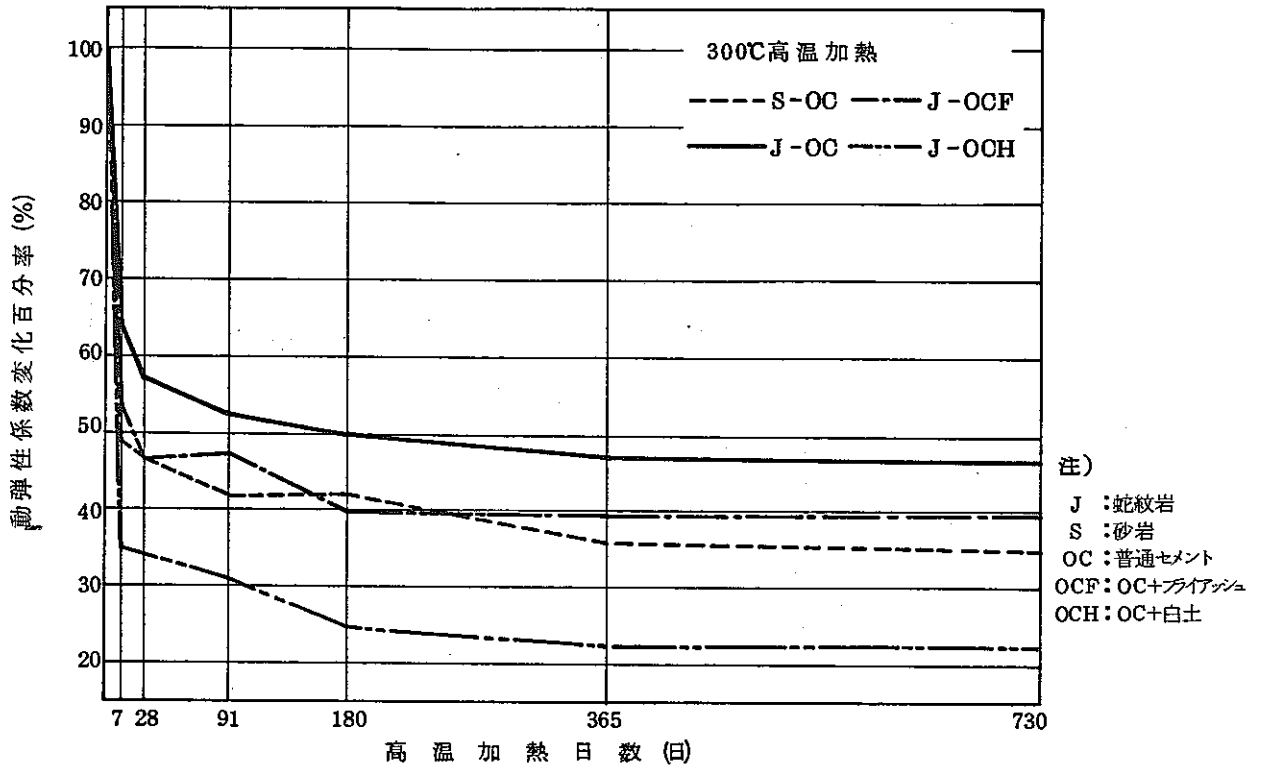


図-3・16 300°C加熱日数と動弾性係数の関係 (共鳴振動法)

v) 加熱温度の影響

15)
 高温加熱による動弾性係数の低下は図-3・17に示すとおり、加熱温度にほぼ正比例しながら続き、700°Cの時点ではその残存率は5%程度となっており、圧縮強度や引張強度に比してその低下率は著しい。しかし、動弾性係数はコンクリートの質的劣化のほか、含有湿分の影響を強く受けるので、低下がすべて劣化によるものとは一概にいえなない。

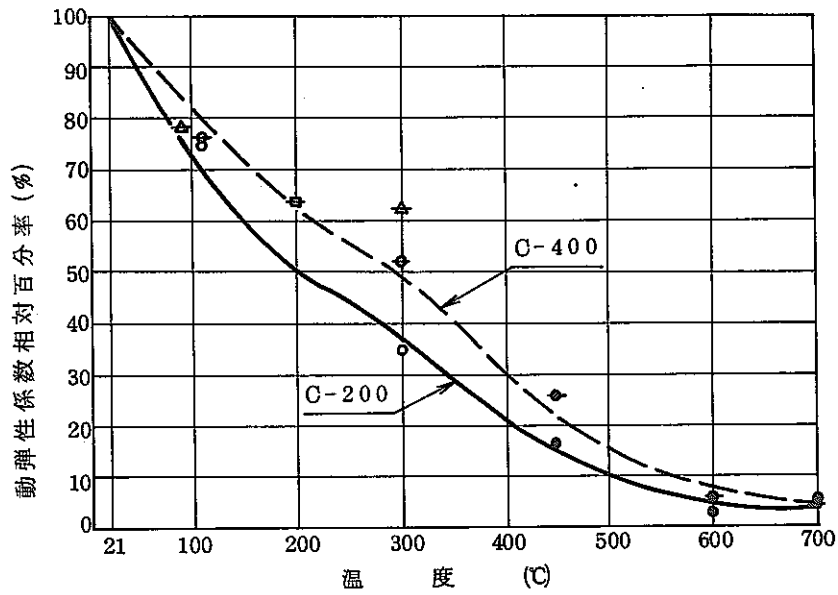


図-3・17 加熱温度と動弾性係数の関係 (共鳴振動法)

vi) 熱サイクルの影響

50°C ~ 200°C の熱サイクルでは図-3・18に示すとおり、熱サイクル初期で急激に低下し、その後も若干低下した後横ばい状態になり安定する。動弾性係数低下の原因は主に熱サイクル上限温度ならびに水分の影響が大きいものと考えられる。

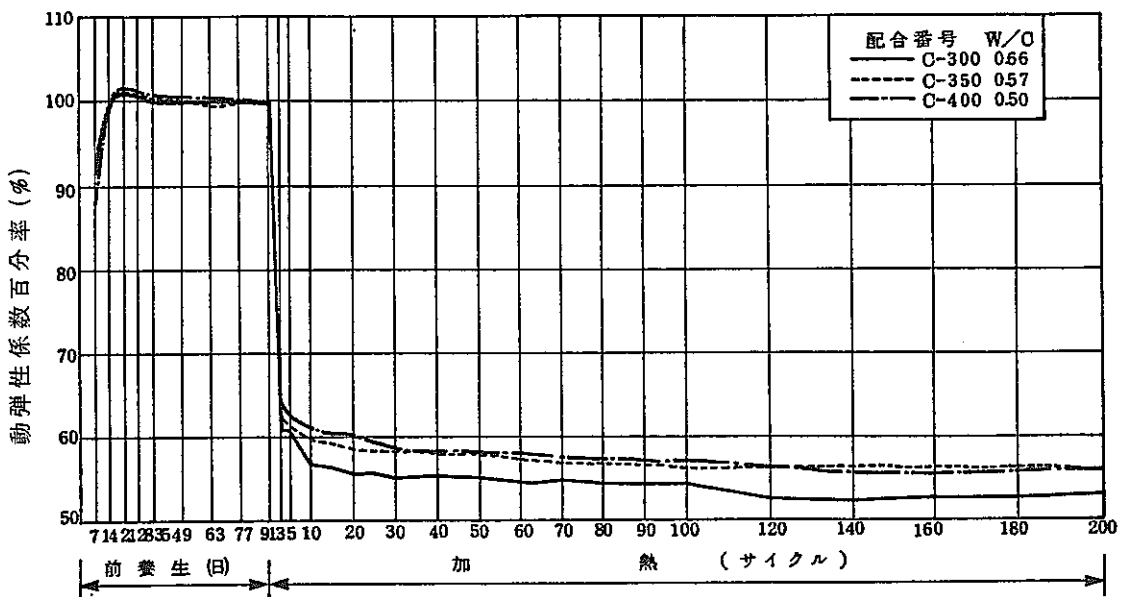


図-3・18 熱サイクル数と動弾性係数の関係 (共鳴振動方法)

vii) 加熱後放置の影響

動弾性係数は加熱冷間直後は図-3・17のようになり、加熱後放置した場合の性状は表-3・8および図-3・19に示すとおり、放置状態および加熱温度によって異なり、300℃加熱後水中養生すると圧縮強度と違い放置1日で50%以上の回復を示し、放置日数と共にその傾向は強くなる。

露出および密封放置の場合は、350℃の温度までならばあまり影響はないが450℃になると極端に低下する。

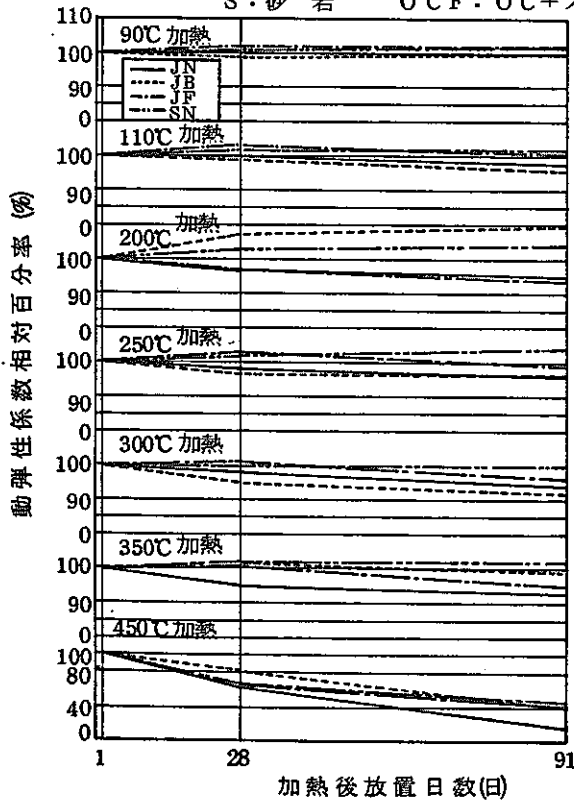
加熱後放置したコンクリートは圧縮強度と同様に水分と二酸化炭素がなんらかの作用をしていると考えられる。

表-3・8 300℃2年加熱後水中養生の動弾性係数 ($\times 10^6 \text{Kg/cm}^2$)

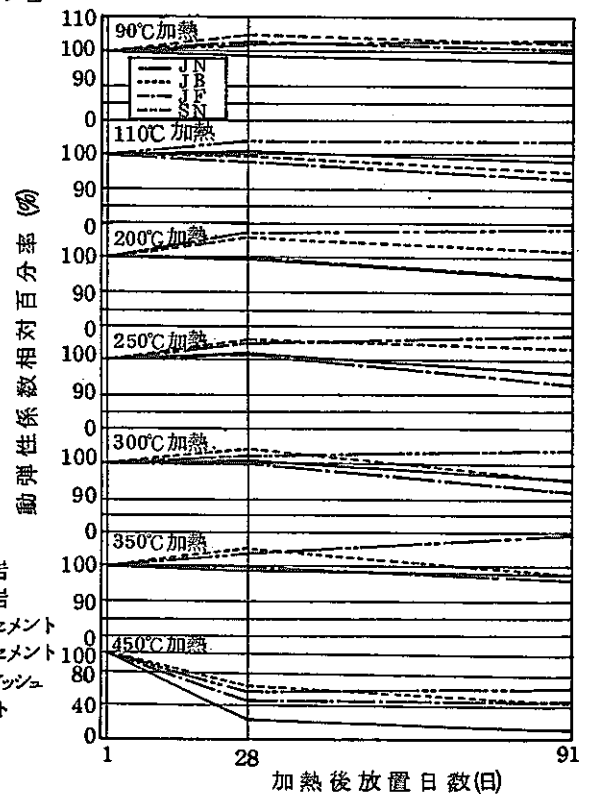
材令 配合記号	加熱直前	2年加熱後	2年加熱後 21℃水中養生		
			1日	7日	35日
S-OC	315	110	239	344	365
J-OC	264	123	184	266	288
J-OCF	271	107	180	276	299
J-OCH	256	56	120	217	246

注) J: 蛇紋岩 OC: 普通セメント
S: 砂岩 OCF: OC+フライアッシュ

OCH: OC+白土



(a) 露出放置



(b) 密封放置

図-3・19 加熱後放置日数と動弾性係数の関係 (共鳴振動法)

viii) 中性子照射の影響

24)

照射試料と熱履歴試料を比較すると図-3・20に示すとおり、照射試料の方が減少率が大きくなる。

また、動弾性係数と密接な関係の超音波伝播速度による中性子照射試験データは図-3・21に示すとおり、照射コンクリート中の超音波伝播速度は非照射のものより小さい。

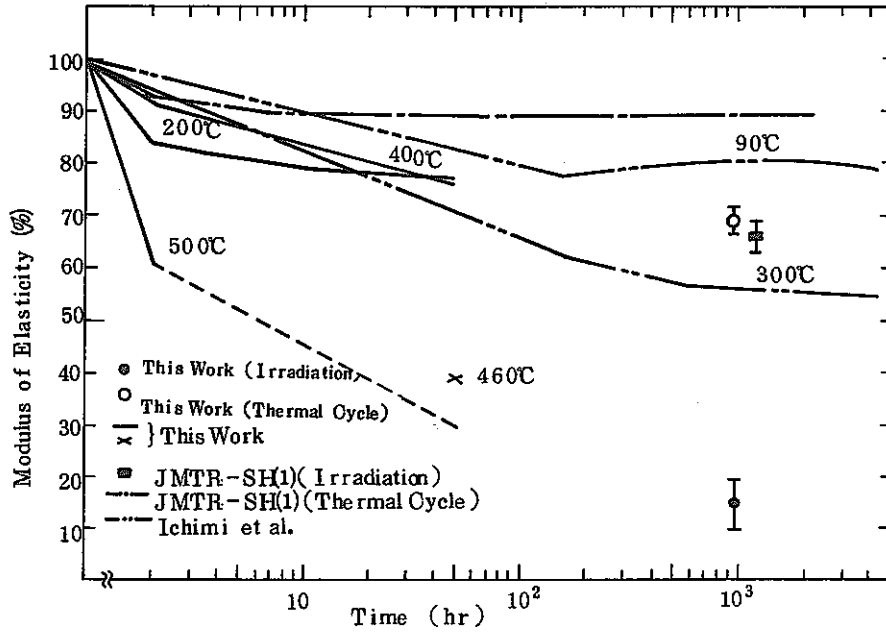


図-3・20 中性子を照射された蛇紋岩コンクリートの動弾性係数

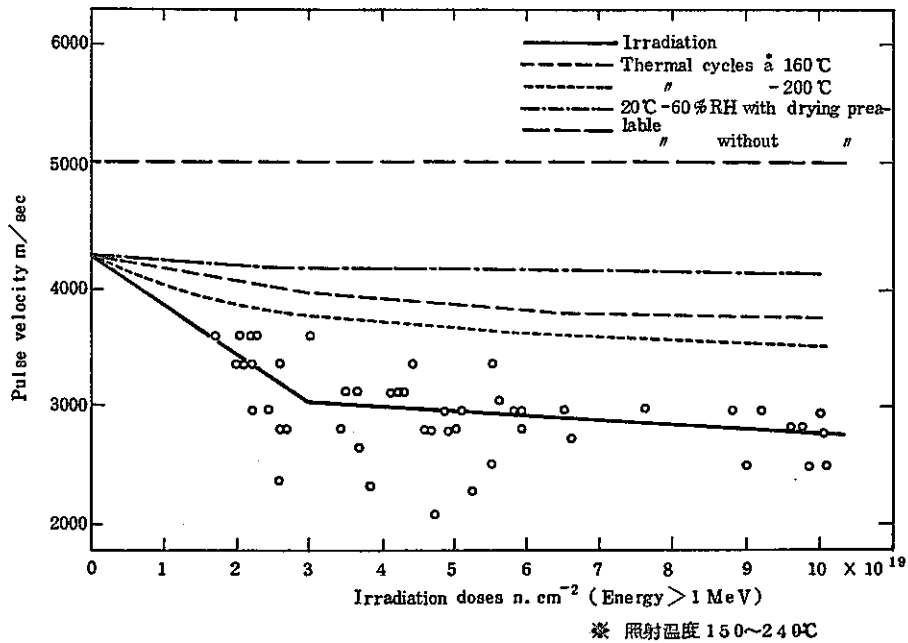


図-3・21 中性子を照射された蛇紋岩・アルミナセメントコンクリートの超音波伝播速度

f) クリープ

蛇紋岩コンクリートの常温下におけるクリープ係数は土木学会コンクリート標準示方書の標準クリープ係数2.0（屋外）および3.0（屋内）より小さく，一般のコンクリートと同等か若干小さいといえる（図-3・22参照）。

未加熱と加熱後冷間のクリープ曲線は同形であるが，熱間の場合は荷初期のクリープが大きく，常温のコンクリートのクリープ挙動と相違する（図-3・23参照）。

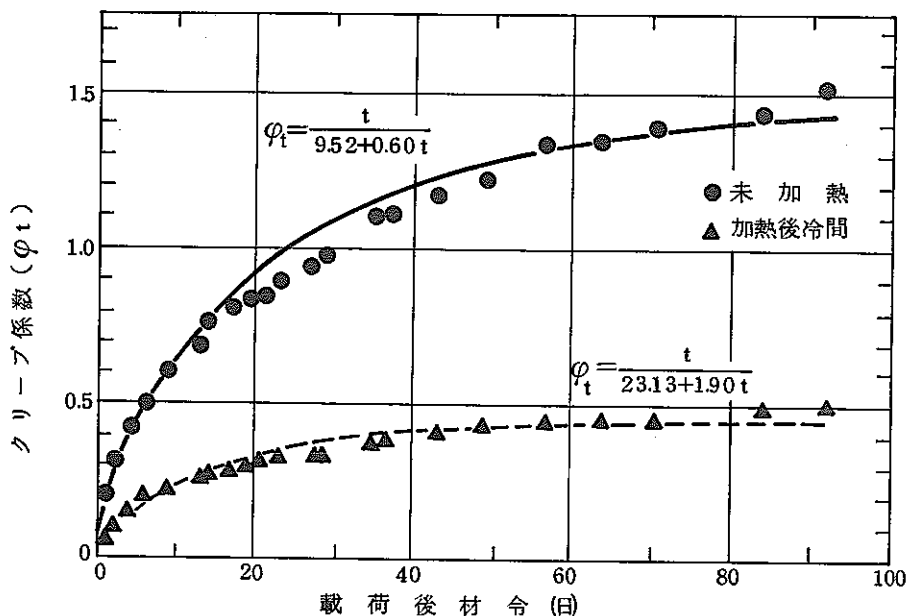


図-3・22 クリープ係数と材令の関係

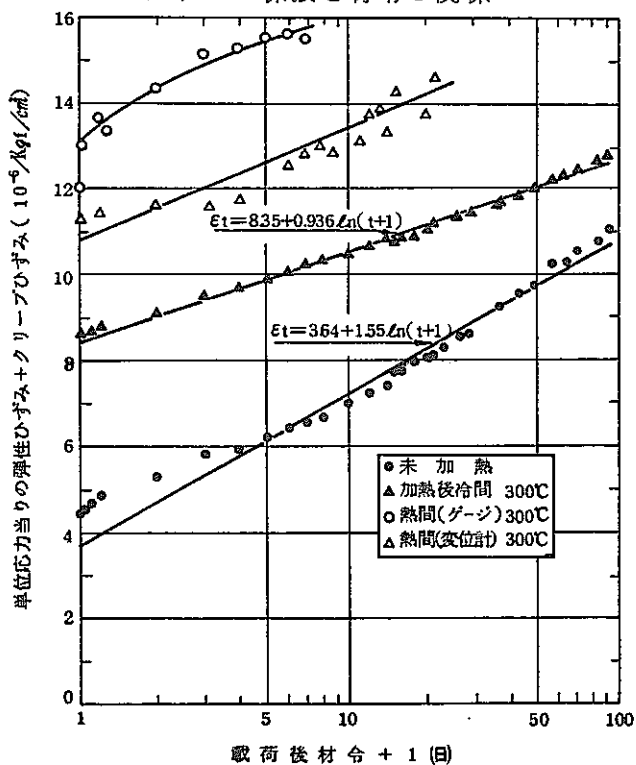


図-3・23 熱的諸条件下におけるコンクリートのクリープ

g) せん断強度

蛇紋岩コンクリートのせん断強度および内部摩擦係数は表-3・9に示すとおり、せん断強度は未加熱の方が大きく、内部摩擦係数は加熱後冷間の方が大きい。また、せん断強度と一軸圧縮強度の比率は未加熱および加熱後冷間ともに常温の一般的なコンクリートの値17~25%の範囲内である。

表-3・9 モール円による算出結果

試験条件	破壊条件式 $S_3 = b S_1^c + a$	モール円の包らく線の方程式 X: 垂直応力, Y: せん断応力	せん断強度 [Y] X=0 (Kgf/cm ²)	X=0におけるモール円限界曲線の勾配 (tanφ) X=0	内部摩擦角 φ	せん断強度 一軸圧縮強度 (%)
未加熱	$S_3 = 0.0104 S_1^{1.456} - 4624$	$X = \frac{0.0255 S_1^{1.456} - 4624}{1 + 0.0151 S_1^{0.456}}$ $Y = \frac{S_1 + 4624 - 0.0104 S_1^{1.456}}{1 + 0.0151 S_1^{0.456}} \sqrt{0.0151 S_1^{0.456}}$	69	1.0577	46°36'22"	22.5
加熱後冷間 (300°C)	$S_3 = 0.0053 S_1^{1.498} - 2742$	$X = \frac{0.0132 S_1^{1.498} - 2742}{1 + 0.0079 S_1^{0.498}}$ $Y = \frac{S_1 + 2742 - 0.0053 S_1^{1.498}}{1 + 0.0079 S_1^{0.498}} \sqrt{0.0079 S_1^{0.498}}$	52	1.4228	54°53'56"	18.1

h) 多軸強度

蛇紋岩コンクリートの三軸圧縮強度は図-3・24に示すとおり、側圧力とともに増加し、側圧が大きい場合に加熱後冷間が未加熱より相当大きい値となり加熱コンクリート本来の強度が発揮されるようである。

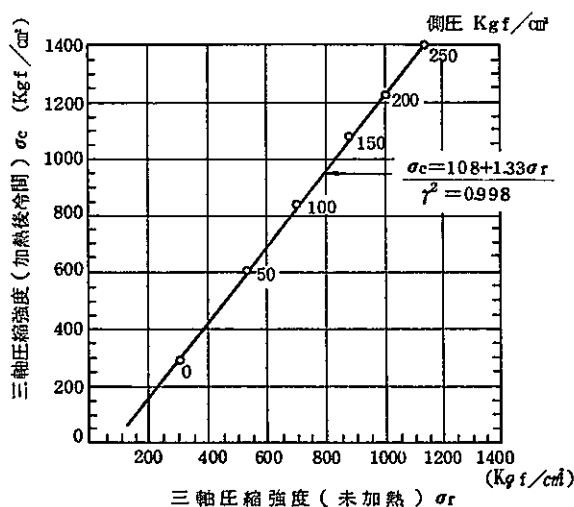


図-3・24 三軸圧縮強度における未加熱と加熱後冷間の関係

(2) 熱的性質

蛇紋岩コンクリートの熱的性質としては熱伝導率，熱拡散率および熱膨張率等であり，以下にその詳細について述べる。

a) 熱伝導率

蛇紋岩コンクリートの熱伝導率について，関²⁶⁾は熱サイクル履歴コンクリートの高温下における挙動をまとめた結果，熱履歴前が約 $1.05 \sim 1.08 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot\text{°C}$ に分布し，一般のコンクリートの値の下位に属し，熱履歴後は約10%低下し， $0.92 \sim 1.07 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot\text{°C}$ となると報告している。熱サイクル継続履歴の影響は図-3・25に示すとおり，ほとんど見受けられず安定している。また，A.E.DESOV²⁷⁾は蛇紋岩コンクリートの含湿率および測定温度の影響について，含湿率0 vol% のとき $1.3 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot\text{°C}$ であり， $20 \sim 300 \text{ °C}$ のとき $1.5 \sim 0.6 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot\text{°C}$ になると報告している。

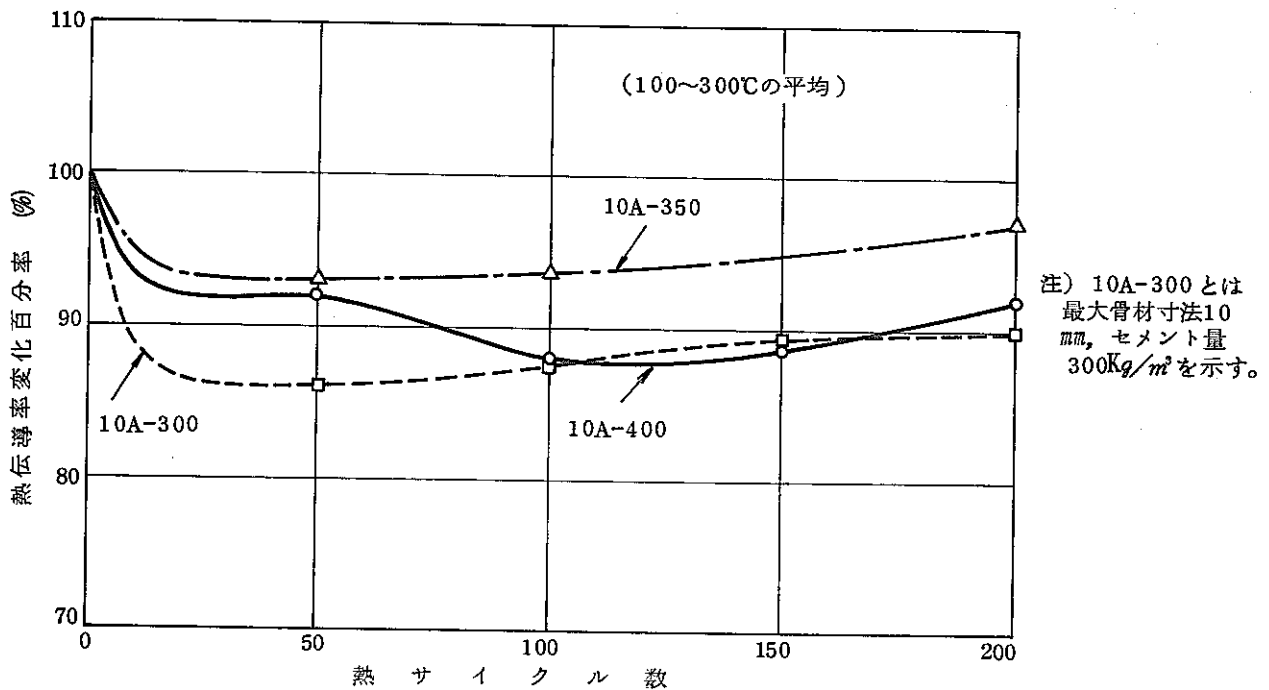


図-3・25 熱サイクル数と熱伝導率との関係

b) 熱拡散率

26)

関は熱サイクル履歴コンクリートの高温下における熱拡散率について、熱履歴の前後を通じて約 $0.0020 \text{ m}^2/\text{hr}$ で一般のコンクリートの値の下位に属し、熱サイクルの継続および配合の影響はあまり認められず安定しているが、測定温度が 100°C から 300°C になると $14\sim 19\%$ の低下を示すと報告している (図-3・26 参照)。この他の蛇紋岩コンクリートに関する研究例としては A.E.DESOV²⁷⁾ のものがある。

c) 熱膨張係数

26)

蛇紋岩コンクリートの熱膨張係数は関によると表-3・10 示すとおりであり、熱履歴前においては一般のコンクリートと同様に高温領域においては収縮しその挙動は極めて複雑で、 $21\sim 150^\circ\text{C}$ の平均熱膨張係数が約 $8 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ と標準的であるのに対して、 $21\sim 250^\circ\text{C}$ の平均値は約 $3 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ となり収縮の影響により極めて小さな値となる。しかし、熱履歴後においては複雑な挙動も消失して温度と膨張率とは直線的な比例関係を示し、熱サイクル継続履歴の影響もほとんど見られず安定で、その平均は $7.5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$ となり一般のコンクリートの値の中位に属すと報告している。

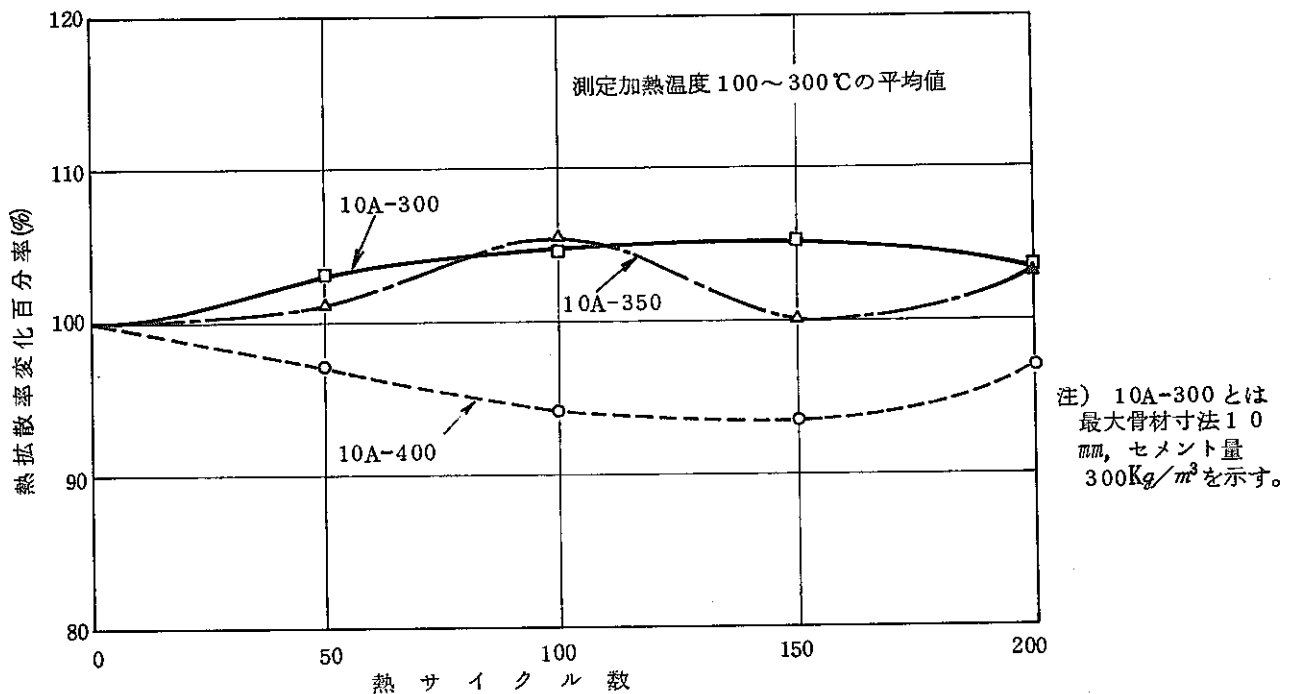


図-3・26 熱サイクル数と熱拡散率との関係

表-3・10 蛇紋岩コンクリートの熱膨張係数

サイクル数	温度測定 (°C)	統計記号	配 合					
			20A-400	20A-350	20A-300	10A-400	10A-350	10A-300
0	21~ 50	\bar{X}	7.1	6.1	4.5	5.9	6.5	6.1
		V	12.9	28.6	6.4	17.2	8.7	41.1
	50~100	\bar{X}	11.2	11.2	8.2	11.1	10.6	7.7
		V	9.8	10.1	6.8	9.1	5.2	11.8
	100~150	\bar{X}	3.1	2.6	6.7	3.4	5.3	6.1
		V	48.6	74.5	7.9	45.8	20.2	8.3
	150~200	\bar{X}	-8.1	-5.5	-5.1	-8.1	-7.3	-1.7
		V	14.7	9.2	17.7	1.4	16.2	99.6
	200~250	\bar{X}	4.1	4.4	1.0	2.0	1.4	0.8
		V	18.6	40.0	96.3	42.4	64.9	100
	21~250	\bar{X}	3.1	3.6	2.9	2.6	3.0	3.6
		V	8.4	11.6	12.9	8.3	6.9	14.5
1	21~250	\bar{X}	7.0	7.0	6.9	7.2	6.9	7.2
		V	1.0	2.0	0.0	1.0	3.1	1.0
50	21~250	\bar{X}	7.9	7.5	7.5	7.5	8.0	7.2
		V	1.6	5.6	4.8	4.8	4.2	2.0
100	21~250	\bar{X}	7.8	7.5	7.6	7.2	8.2	7.4
		V	8.5	7.1	10.9	11.5	2.1	7.1
150	21~250	\bar{X}	7.9	7.7	7.5	7.3	7.4	7.4
		V	8.6	7.0	4.7	4.4	2.9	4.5
200	21~250	\bar{X}	8.1	7.8	7.6	7.8	7.6	6.8
		V	-	3.4	0.9	3.2	4.7	2.1

注) \bar{X} およびV(%)は4ケの供試体から求めた。ただし、1および200サイクルの場合は2~3ケであった。

注) 20A-400とは最大骨材寸法20mm, 単位セメント量400kg/m³を示す。

d) 比熱

蛇紋岩コンクリートの比熱について、磯，宮坂らは図-3・27²⁸⁾に示すデータを得ている。これによると100℃，500℃にピークを持ち，遊離水ならびに結晶水の脱水温度²⁶⁾とほぼ一致している。また，関は，熱伝導率と熱拡散率の測定値から0.23 Kcal/Kg・℃を求めており，従来のコンクリート値とよく一致していると報告している。

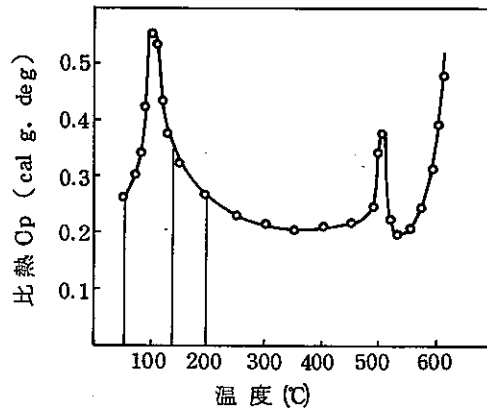


図-3・27 蛇紋岩コンクリートの比熱

(3) 物理的性質

蛇紋岩コンクリートの物理的性質としては長さ変化，重量変化ならびに単位容積重量等であり，以下にその詳細について述べる。

a) 長さ変化

i) セメントの影響

蛇紋岩コンクリートにおけるセメントの種類の影響は表-3・11¹⁰⁾に示すとおり，混合セメントは普通ポルトランドセメントに比べて加熱前は長さ変化率が小さく，加熱後は両者の間には差がないようである。しかし，450℃では普通ポルトランドセメントの収縮が大きく，2(1)で述べたようにカルシウム水和物の脱水量との関係が，うかがわれる。なお，アルミナセメントの場合は普通ポルトランドセメントよりも収縮が小さい¹¹⁾ようである。

表-3・11 長さ変化におよぼすセメントの種類の影響

単位：%

セメントの種類	前養生材令(日)				加熱温度(°C)						
	7	14	28	91	90	110	200	250	300	350	450
普通ポルトランドセメント	0.032	0.039	0.020	0	-0.099	-0.123	-0.163	-0.201	-0.201	-0.264	-0.425
高炉セメント (置換率40%)	0.029	0.032	0.015	0	-0.080	-0.121	-0.190	-0.225	-0.236	-0.274	-0.355
フライアッシュセメント (置換率30%)	0.015	0.018	0.009	0	-0.078	-0.137	-0.183	-0.219	-0.218	-0.287	-0.290

注) 配合はC=300Kg/m³, スランプ7.5±cm。

ii) 骨材の影響

蛇紋岩の産地による差は図-3・28⁴⁾に示すとおり、300°C加熱で0.20~0.45%収縮し、その中で骨材産地の差が見られルーズな骨材ほど変化は大きくなる。また、600°C加熱では300°C加熱の3~4倍も大きく収縮し、骨材産地の差も著しくなる。蛇紋岩と砂岩を比較すると表-3・12²⁹⁾に示すとおり、加熱後では蛇紋岩コンクリートの収縮が大きくなるようである。

iii) 昇温速度の影響

昇温速度を変化(10, 50, 100°C/H)させ加熱温度300°Cを履歴したコンクリートの挙動は表-3・13¹⁴⁾に示すとおり、全てに対して明かではないが、加熱温度上昇速度が緩速なものほど収縮は大きくなる傾向にある。

iv) 加熱期間の影響

2年間継続加熱による影響は図-3・29¹¹⁾に示すとおり、加熱直後で著しく収縮し、その後は横ばい状態で安定し長期加熱による変化はほとんど認められない。

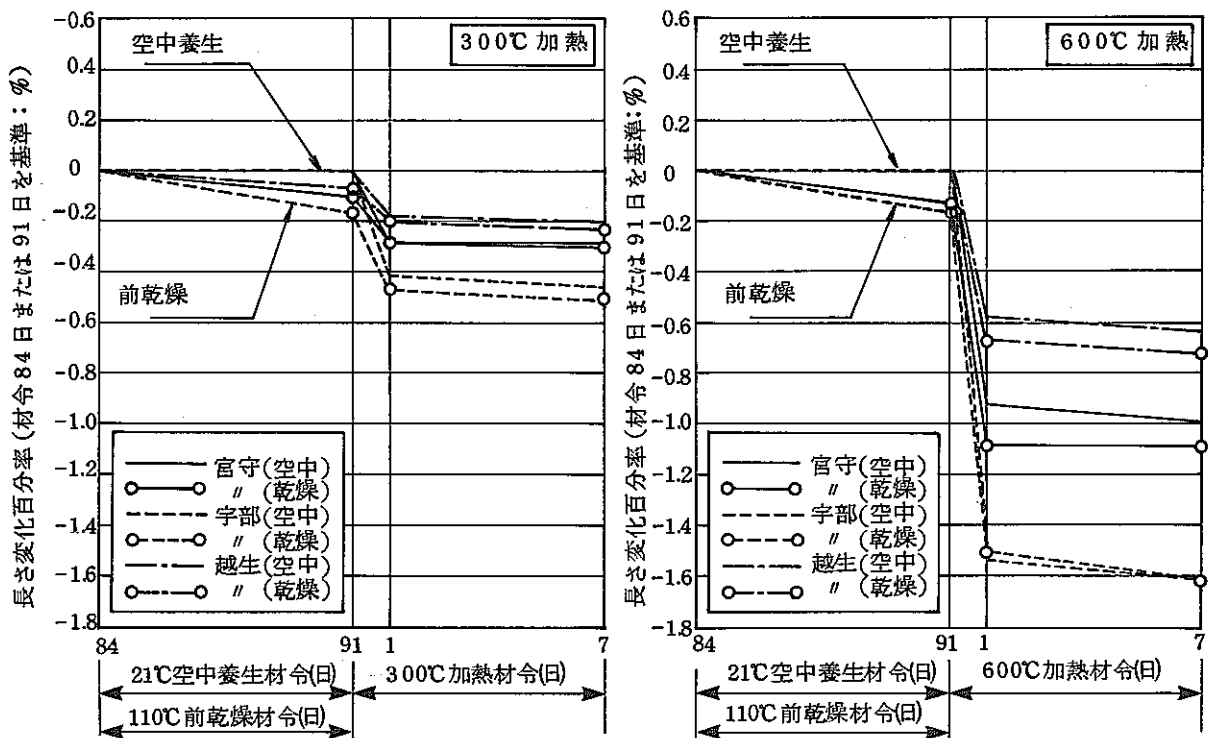


図 - 3・28 蛇紋岩産地と長さ変化の関係

表 - 3・12 長さ変化におよぼす骨材の種類の影響

単位: %

種類	養生温度 (°C)	前 養 生					高 温 養 生		
		7日	14日	28日	91日	147日	7日	28日	91日
砂 岩	21	0.118	0.125	0.091	0.010	0(360.80)	-0.008	-0.012	-0.022
	90	0.077	0.081	0.050	0.011	0(360.60)	-0.038	-0.081	-0.080
	300	0.071	0.076	0.046	0	0(361.25)	-0.149	-0.152	-0.164
蛇紋岩	21	0.099	0.090	0.079	0.012	0(360.30)	-0.001	-0.003	-0.006
	90	0.077	0.056	0.055	0	0(361.77)	-0.072	-0.144	-0.141
	300	0.068	0.060	0.056	0.001	0(360.81)	-0.260	-0.277	-0.286

表-3・13 長さ変化におよぼす昇温速度の影響

単位：%

材令 配合	加熱温度上 昇速度 (°C/h)	養生	前 養 生 (日)				加 熱 (日)		浸水(日)
			7	28	84	91	1	7	7
C-200	10	空中	0.030	0.014	0.002 (99.998)	0 (99.998)	-0.165	-0.241	-0.116
		乾燥	0.029	0.007	0 (100.098)	-0.085	-0.165	-0.218	-0.075
	50	空中	0.033	0.016	0.002 (100.03)	0 (100.03)	-0.152	-0.175	-0.062
		乾燥	0.036	0.022	0 (99.933)	-0.075	-0.137	-0.180	-0.074
	100	空中	0.021	0.013	0.001 (99.898)	0 (99.898)	-0.180	-0.207	-0.102
		乾燥	0.025	0.019	0 (100.03)	-0.085	-0.160	-0.164	-0.040
C-400	10	空中	0.031	0.006	0.001 (99.941)	0 (99.941)	-0.200	-0.212	-0.073
		乾燥	0.029	0.002	0 (99.857)	-0.083	-0.215	-0.229	-0.094
	50	空中	0.027	0.004	0 (99.899)	0 (99.899)	-0.176	-0.201	-0.061
		乾燥	0.040	0.006	0 (99.993)	-0.070	-0.198	-0.228	-0.078
	100	空中	0.048	0.005	0.001 (99.960)	0 (99.960)	-0.173	-0.189	-0.068
		乾燥	0.045	0.007	0 (100.029)	-0.057	-0.173	-0.193	-0.073

- 注) 1) 空中および乾燥養生は、加熱直前に1週間行なったものである。
 2) 値は、空中養生のものは標準養生の材令91日、乾燥養生のものは材令84日を基準としたものである。()内は基準長(mm)を示す。
 3) ()は収縮を示す。

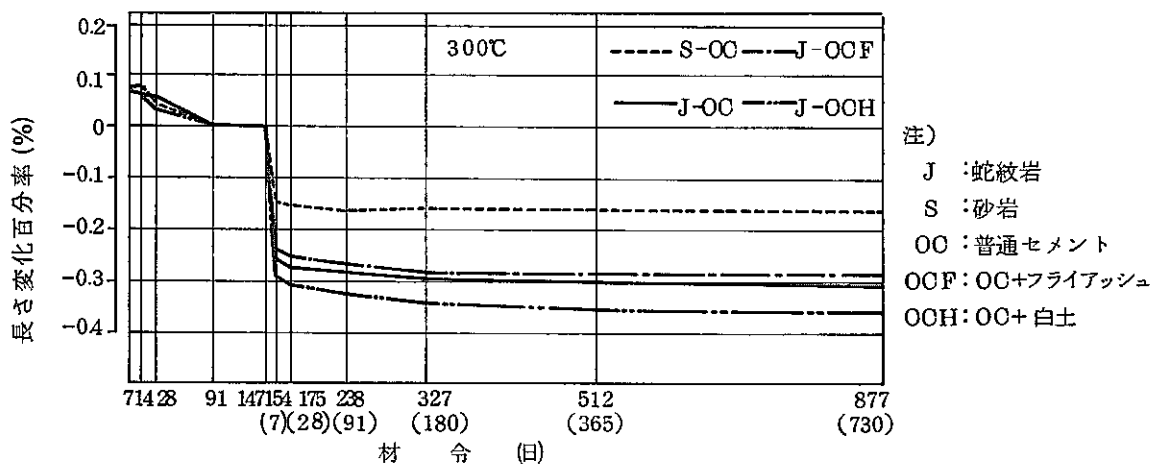


図-3・29 300°C 加熱日数と長さ変化の関係

v) 加熱温度の影響

700°Cまでの高温加熱を受けると、図-3・30に示すとおり、全加熱温度で収縮¹⁵⁾が進行し、300°Cまでは緩かで、その後600°C近くまで次第に収縮は急激となり、600~700°C間では若干緩かとなる。

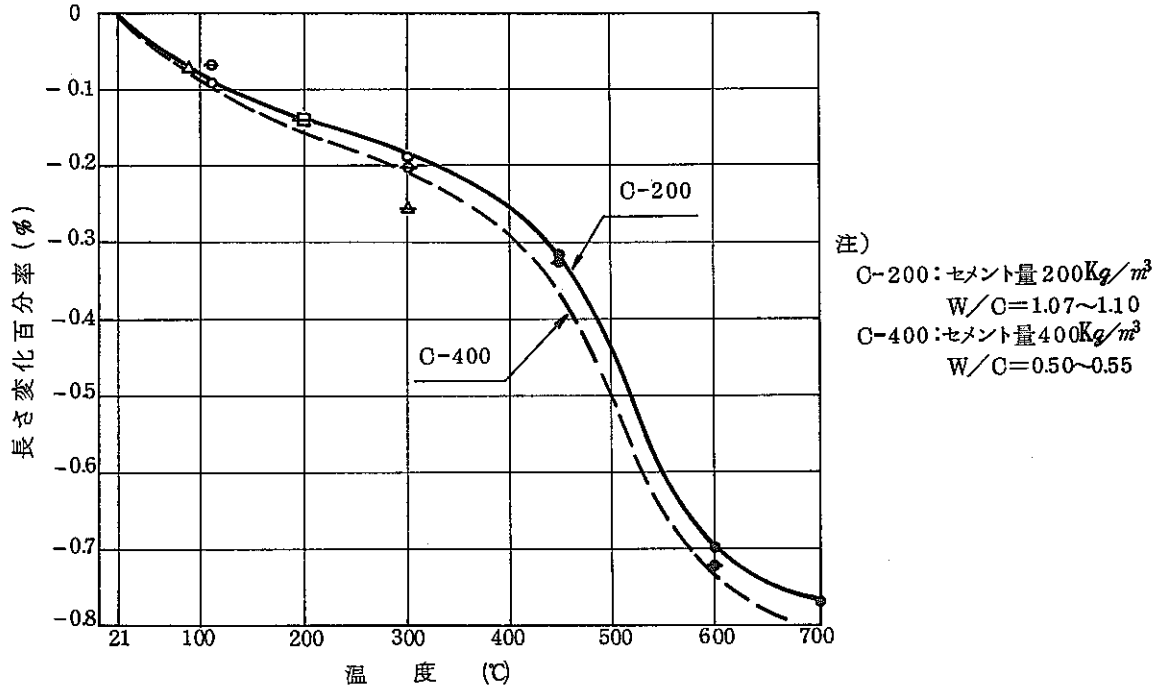


図-3・30 加熱温度と長さ変化の関係

vi) 熱サイクルの影響

50~200°Cの熱サイクルでは、最初の測定サイクルで急激に収縮し、以後50サイクル¹⁶⁾程度までは若干収縮するが、その後は200サイクルまでほとんど変化しない。

vii) 加熱後放置の影響

加熱後放置した蛇紋岩コンクリートの長さ変化率は放置日数と共に回復し、特に水中¹⁰⁾放置の場合加熱前の状態に回復する。^{11), 14)}

viii) 中性子照射の影響

長さ変化と高速中性子フルーエンス照射量との関係については、Dubrovskii,³⁰⁾ Elleuch,⁹⁾ 鈴木らの報告があり、これらの結果をまとめたものが図-3・31である。²⁰⁾ 蛇紋岩コンクリートはv)で述べたように熱履歴後収縮するが、照射を受けると 10^{19} n/cm^2 ($E \geq 1 \text{ MeV}$)程度から膨張が起こるようである。

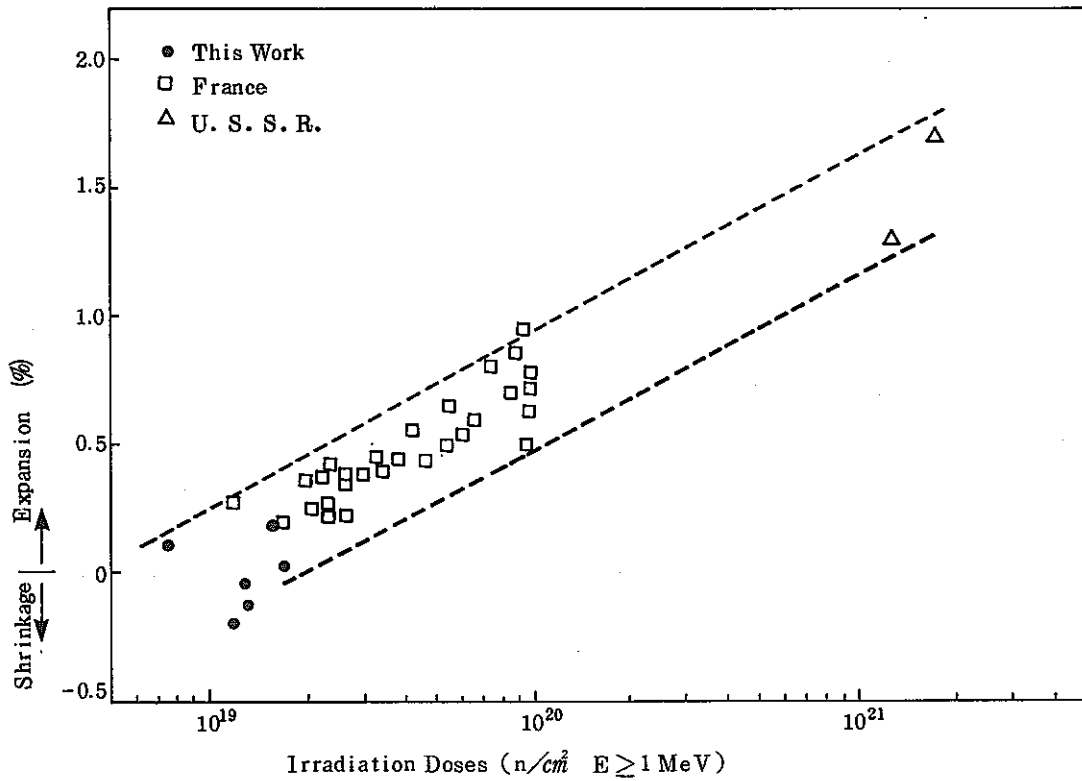


図-3・31 中性子照射量と長さ変化の関係

b) 重量変化

i) セメントの影響

蛇紋岩コンクリートにおけるセメントの種類の影響はアルミナセメントを除いた普通ポルトランドセメントと混合セメントではあまり大きな差は認められない。¹⁰⁾ アルミナセメントの加熱による重量減少率は普通ポルトランドセメントに比べて加熱温度 90°C で小さく、¹¹⁾ 300°C で大きくなり、温度条件の影響が大きいようである。

ii) 骨材の影響

蛇紋岩の産地による差は、長さ変化と傾向的に一致し、加熱による重量減少は吸水量および結晶水の多い骨材の場合ほど大きくなる。⁴⁾

蛇紋岩と他の骨材を比較した場合、加熱温度が 450°C 位までは両者の間に差は見られないが、^{10) 31)} 奥山らによると $500^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ で蛇紋岩コンクリートの方が大きく減少すると報告している (図-3・32)。

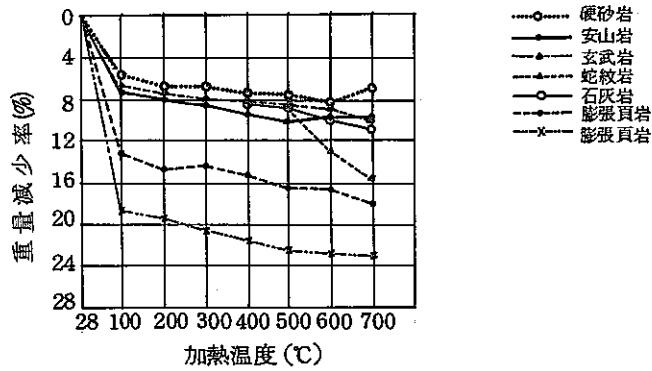


図-3・32 骨材の種類と重量変化の関係

iii) 昇温速度の影響

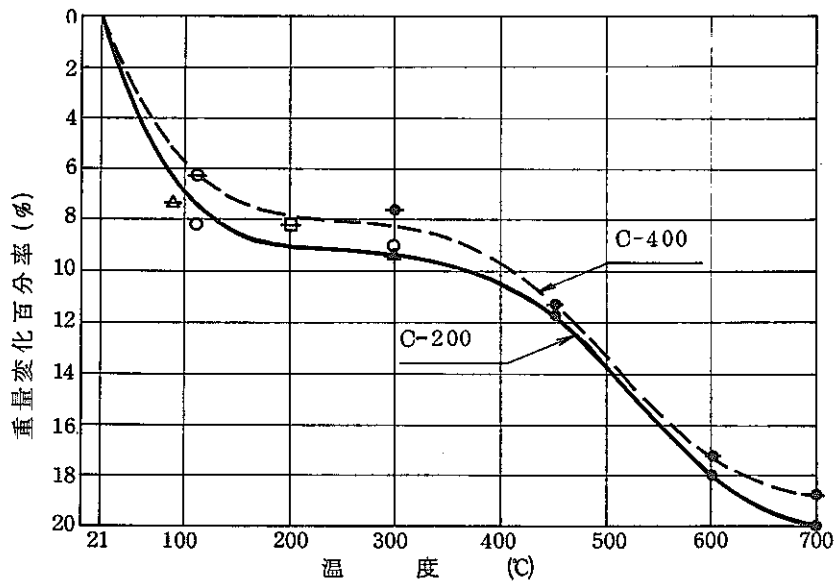
昇温速度を変化 (10, 50, 100°C/H) させても加熱による重量変化はほぼ同程度であり、差はみられない。¹⁴⁾

iv) 加熱期間の影響

加熱期間の影響は長さ変化と傾向的に一致し、加熱直後で著しく減少し、その後は横ばい状態で安定し長期加熱による変化はほとんど認められない。¹¹⁾

v) 加熱温度の影響

700°Cまでの高温加熱を受けると図-3・33に示すとおり21°C~100°C付近と450°C~600°C付近で急激に減少し、前項の2で述べたようにそれぞれ遊離水の蒸発および蛇紋岩結晶水とセメント水和物の分解が深い関わりを持っている。¹⁵⁾



注)

C-200: セメント量 200 Kg/m^3
 $W/C=1.07 \sim 1.10$
 C-400: セメント量 400 Kg/m^3
 $W/C=0.50 \sim 0.50$

図-3・33 加熱温度と重量変化の関係

vi) 熱サイクルの影響

50°C ~ 200°C の熱サイクルでは、長さ変化と傾向的に一致し、最初の測定サイクルで急激に低下するがその後は横ばい状態で安定し、200サイクルまでほとんど変化しない。¹⁶⁾

vii) 加熱後放置の影響

加熱後放置の場合、水分の存在下に置かれた蛇紋岩コンクリートは放置日数と共に回復し、特に水中養生すると加熱前の状態に回復する。^{10) 11), 14)}

viii) 中性子照射の影響

照射条件が高速中性子フルーエンス $2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$)、温度 200~250°C の場合の重量変化は図-3・34 に示すとおり、普通セメントを使用したコンクリート (PS) は照射試料と熱履歴試料との間に大きな差はないようである。²⁰⁾

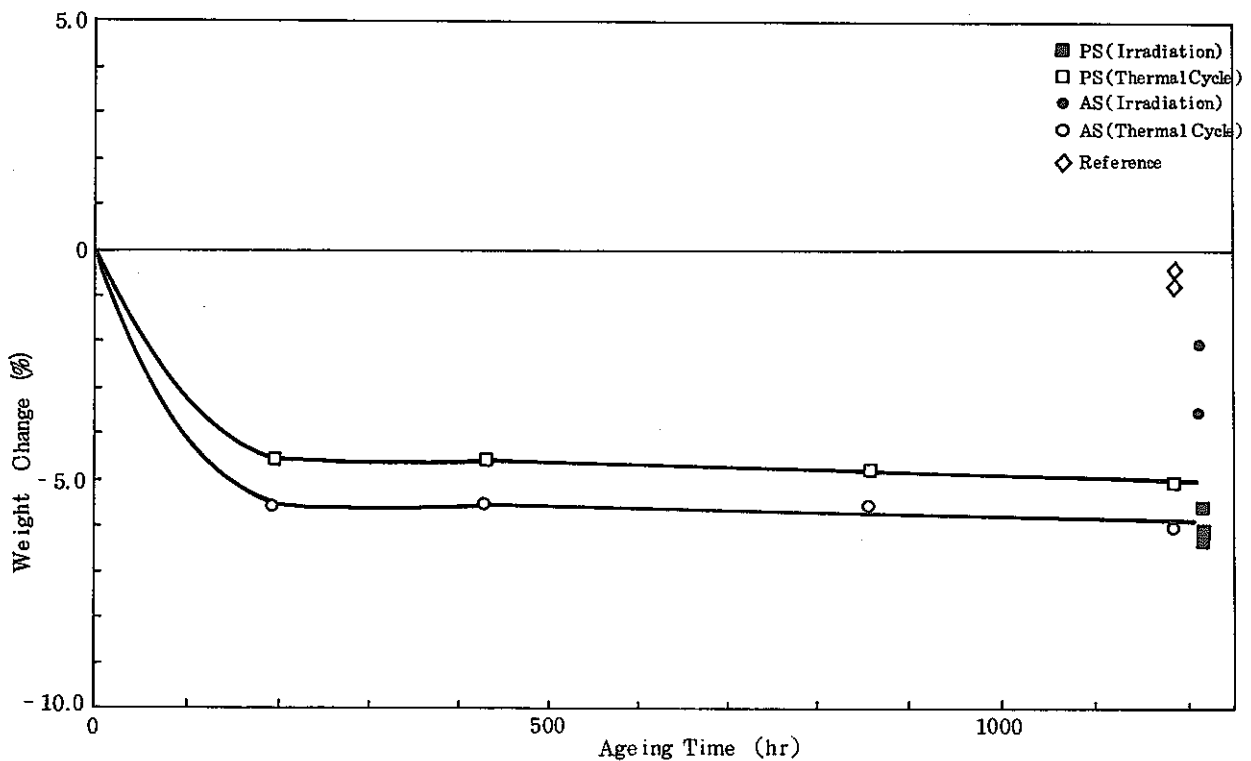


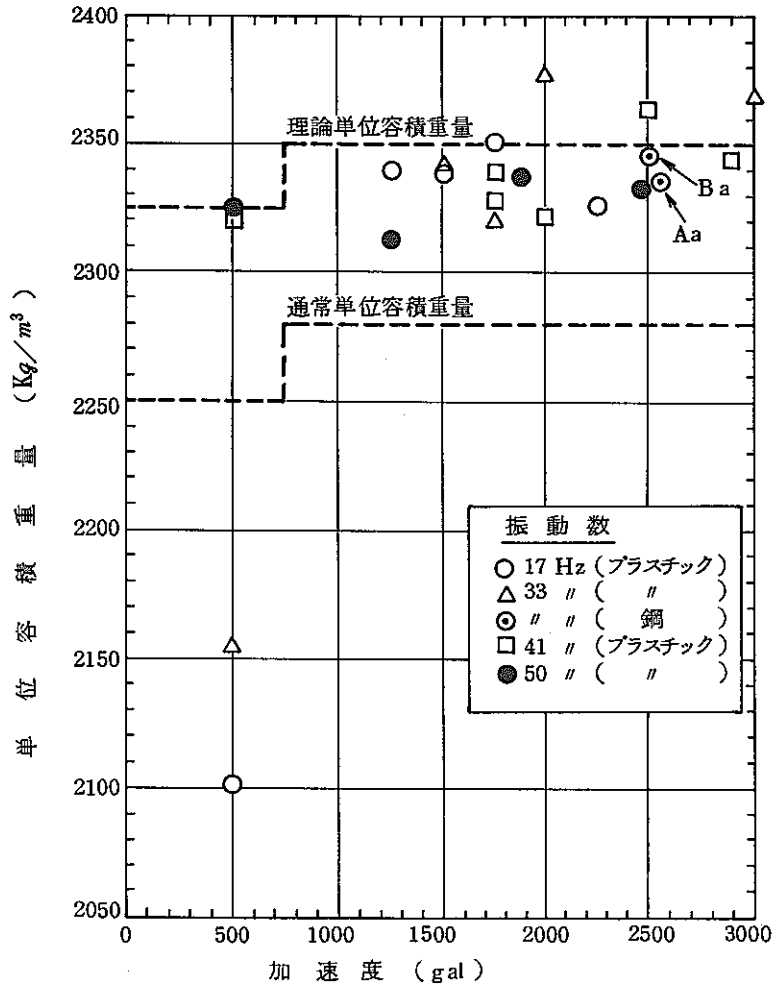
図-3・34 中性子照射された蛇紋岩コンクリートの重量変化

c) 単位容積重量

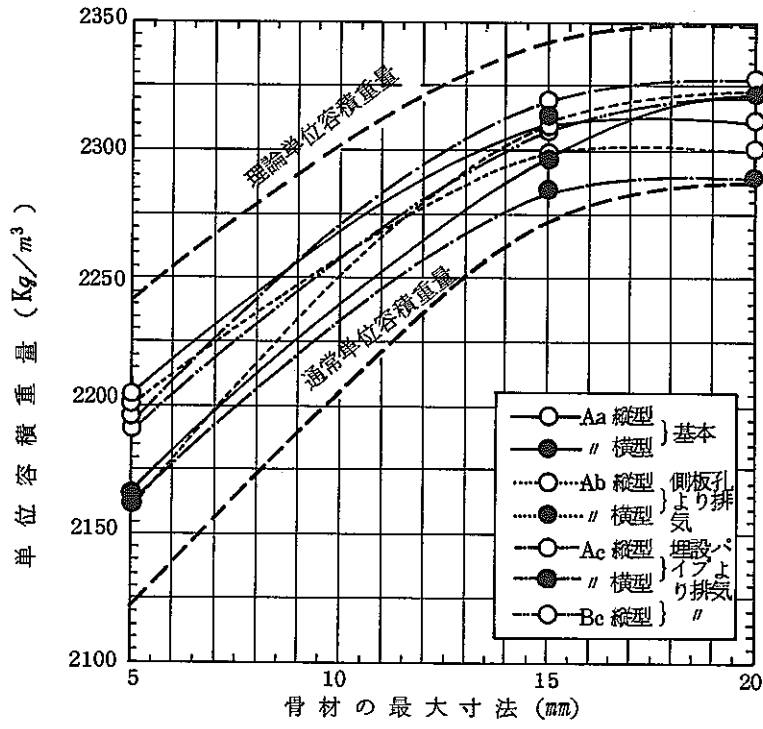
鋼製ベッセル (120×70×25cm) 詰め蛇紋岩コンクリートの振動締固めによる施工性は、加速度レベル、振動数、骨材最大寸法と単位容積重量との関係で表わすと図-3・35 ~

1)

3・36 のようになる。その結果，締固めエネルギーとしては加速度レベル 1000 ～ 1500 ガル，17～50 ヘルツで90秒程度が適当であり，空気の滞留する箇所に空気抜きを配置することにより所要の密度で均一なコンクリートを填充することができるが見出している。



図一 3・35 締固め振動数および加速度と単位容積重量との関係



図一 3・36 各種排気方式ベッセルにおける骨材の最大寸法と単位容積重量との関係

4. む す び

蛇紋岩コンクリートの諸性質は以上の通りであり、その挙動はマトリックスとしてのセメント、混和材に支配され、他骨材と大差のない挙動を示すことが明らかになると共に耐熱コンクリートの基本的挙動に関してもまだ解明されていない多くの事実を提言、解明することができた。

従来、蛇紋岩コンクリートは風化蛇紋岩の挙動や一部の断片的な報告例に影響され、特殊なコンクリートのように考えられてきたが、総合的な諸実験による多面的な検討・考察の結果、新鮮な蛇紋岩を用いれば一般のコンクリートと大差なく取扱うことができることが明らかとなった。

なお、このデータ集は蛇紋岩コンクリートの主要な性質を網羅しているが、一般のコンクリートの熱対応挙動にも十分適用できるものであり、耐熱コンクリートの設計、施工に十分寄与する諸点を包含すると共に今後の耐熱コンクリートの研究に多くのサゼッションを提供なし得たと考える次第である。

以 上

参考文献

- 1) 穂積 豊, 他 ; 原型炉用遮蔽体モックアップ試験(II), SJ230 79-02, 1979.
- 2) W. Czernin ; 徳根吉郎訳, 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 1版, 技報堂, 1980.
- 3) 穂積 豊, 他 ; FBR原型炉遮蔽体蛇紋岩コンクリートの熱間・冷間対比試験ならびにコンクリート構成各鉱物の熱変化試験, SJ230 80-01, 1980.
- 4) 汐崎孝允, 他 ; 高速増殖炉用遮蔽用, 原型炉用遮蔽体モックアップ試験(I), SJ230 78-02, 1978.
- 5) 山村 勤, 他 ; F. B. R.遮蔽用耐熱コンクリートの骨材調査, 試験, J230 72-01, 1972.
- 6) 森野奎二 ; コンクリート骨材のポップアウトに関する研究, 第33回土木学会年次講演会概要集, 1978.
- 7) 和泉意登志, 他 ; 蛇紋岩骨材に起因するコンクリートのポップアウトについて, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1981.
- 8) 宮坂駿一, 他 ; 高含水骨材を使用した遮蔽コンクリートの開発試験, JAERI-memo 第3020号, 1968.
- 9) L. F. ELLEUCH, et al. ; Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and their Components, proc Intern Seminar Concrete Nucl Reactors Berlin Vo 1. 2, 1972.
- 10) 渡部 雅, 他 ; 加熱蛇紋岩コンクリートの安定性追跡試験, SJ230 81-01, 1981.
- 11) 山村 勤, 他 ; 高速増殖炉(F. B. R)遮蔽用耐熱コンクリートの第一次実験, SJ230 75-01, 1975.
- 12) 山崎敏敏, 他 ; 長期間熱を受けるコンクリートの諸性質に関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, 24, 1976.
- 13) 山村 勤, 他 ; F. B. R.遮蔽用耐熱コンクリートの予備試験, J230 71-01, 1971.
- 14) 汐崎孝允, 他 ; 高速増殖炉(F. B. R.)遮蔽用, 蛇紋岩コンクリートの熱的使用限界把握試験(I), SJ230 77-01, 1977.

- 15) 汐崎孝允, 他 ; 高速増殖炉 (F. B. R.) 遮蔽用, 蛇紋岩コンクリートの熱的使用限界把握試験 (II), SJ230 78-01, 1978.
- 16) 石井民郎, 他 ; 高速増殖炉遮蔽用, 蛇紋岩コンクリートの熱サイクル実験 (III), SJ230 76-02, 1976.
- 17) G. N. Freskakis, et al. ; Civil Engineering and Nuclear Power Volume 1, A.S.C.E., Boston, 1979.
- 18) D. N. Crook, et al. ; Regain of Strength after Firing of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No 72, September 1970.
- 19) 原田 有 ; コンクリートおよび部材の火災特性について, コンクリートジャーナル, Vol. 11, No 8, 1973.
- 20) 鈴木和久, 他 ; 高速炉用遮蔽材料の照射試験, JMTR-SH(I) (71M-84P), SN941 75-93, 1975.
- 21) 伊藤正彦, 他 ; 高速炉用遮蔽材料の照射試験 (III), JMTR-SH(III), SN941 80-165, 1980.
- 22) S. Thelanderson ; Effect of High Temperatures on Tensile Strength of Concrete, Nordisk Betong, Feb. 1972.
- 23) G. Jonsson, et al. ; Experimental Investigation of the Temperature Dependence of the Tensile Strength for Concrete in Temperature Range Associated with Fires, Graduated work at Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Lund. 1968.
- 24) 鈴木和久, 他 ; 高速炉用遮蔽材料の照射試験 (II), JMTR-SH(II), SN941 77-26, 1977.
- 25) 近藤泰夫, 他 ; コンクリート工学ハンドブック, 10版, 朝倉書店, 1972.
- 26) 関 慎吾 ; 蛇紋岩コンクリートの熱特性に関する研究, J230 79-01, 1979.
- 27) A. E. DESOV, et al ; Some Peculiarities and Results of Investigations of Thermal Conductivity and diffusivity of Heavy Concretes, Proc Intern Seminar Concrete Nucl Reactors Berlin Vol. 2, 1972.
- 28) 磯 康彦, 他 ; 蛇紋岩を用いた中性子遮蔽用耐熱コンクリートの研究, セメントコンクリート No. 276, 1970.

- 29) 山村 勤, 他 ; 高速増殖炉 (F. B. R.) 遮蔽用, 耐熱コンクリートの第一次実験,
J230 73-02, 1973.
- 30) V. B. Dubrovskii, etal. ; Atomic Engineering, USSR, Vol. 23, No. 4, 1964,
- 31) 奥山治也, 他 ; コンクリートの耐熱性におよぼす骨材の影響に関する研究, その1 高
温加熱を受けた骨材およびコンクリートの性状変化, 日本建築学会大会
学術講演梗概集 (東北), 1973.