

論文 コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響

千歩 修*1・浜 幸雄*2・松村 光太郎*3・袴谷 秀幸*4

要旨: 石灰岩粗骨材を用いたコンクリートは、耐凍害性がやや低下するとの報告があり、ここでは石灰岩の特徴である線膨張係数の小ささと石粉の多さが耐凍害性に及ぼす影響を検討した。石粉の影響では、石粉はその成分によらず、耐凍害性を向上させる効果と空気量を低下させる効果をあわせもっているといえる。さらに、石灰岩粗骨材とモルタルの線膨張係数との差によって生ずる微視的温度応力を検討し、これはコンクリートの耐凍害性を低下させる原因のひとつと考えられたが、この大きさだけでは耐凍害性を説明できず、これによって発生するひびわれの量が影響することが考えられた。

キーワード: 耐凍害性, 石灰岩, 粗骨材, 石粉, 線膨張係数

1. はじめに

粗骨材はコンクリートの耐凍害性に影響をおよぼす重要なものであり、JASS 5「26節凍結融解作用を受けるコンクリート」の性能区分BおよびCでは、粗骨材の吸水率・安定性損失質量を制限している。しかしながら、このような規定を満足する粗骨材を用いた場合でも耐凍害性の劣るものがあり、本研究室でも石灰岩を粗骨材として使用した場合に他の粗骨材を用いた場合に比べ、ややコンクリートの耐凍害性が低下するという結果¹⁾が得られている。

ここでは、まず、各地から石灰岩を中心に粗骨材を集め、粗骨材の基礎性状とこれらの粗骨材を用いたコンクリートの耐凍害性を検討する。次に、石灰岩特有の石粉の多さに注目し、石粉がコンクリートの耐凍害性におよぼす影響を検討する。さらに、粗骨材とモルタルの線膨張係数の差によって生ずる微視的温度応力に着目し、コンクリート中の粗骨材の体積・表面積を変化させることによってこの応力の大きさを変化させ、耐凍害性に対する影響を検討する。

2. 実験の概要

本研究は3つのシリーズからなる。表1にシリーズの概要と使用した粗骨材の種類を示す。

シリーズIでは、各地から骨材を集め、基礎性状と耐凍害性の関係を検討し、石灰岩粗骨材の特性を明らかにする。なお、実験の実施時期によって96と97のふたつのグループがある。シリーズIIでは、石灰岩粗骨材の特徴である石粉がコンクリートの耐凍害性におよぼす影響について検討する。なお、石粉の種類は石灰岩石粉の他に、比較に使用した安山岩の石粉も用いた。

石灰岩は、他の岩石に比べ、線膨張係数が小さいという特徴があり、温度変化時の応力がコ

表1 シリーズの概要および使用骨材

シリーズ	概要	使用骨材種類
I	粗骨材の基礎性状と凍害劣化の関係	(96)安山岩12, 石灰岩1 (97)安山岩1, 石灰岩21
II	粗骨材の石粉が凍害劣化におよぼす影響	安山岩1種 石灰岩1種
III	粗骨材の体積・表面積が凍害劣化におよぼす影響	安山岩1種 石灰岩1種

*1 北海道大学助教授 大学院工学研究科材料性能学研究室 工博(正会員)

*2 北海道大学助手 大学院工学研究科材料性能学研究室 博士(工学)(正会員)

*3 北海道大学大学院生 大学院工学研究科建築工学専攻 工修(正会員)

*4 戸田建設(株) 工修

ンクリートの耐凍害性に影響していることが考えられ、この場合の応力は骨材の体積の影響が大きくなる。また、骨材とセメントペースト界面の特殊性²⁾が影響することも考えられる。このため、シリーズⅢでは粗骨材の体積・表面積がコンクリートの凍害劣化におよぼす影響を明らかにするため、コンクリート中の粗骨材を図1に示すように変化させた試験体を作製し、耐凍害性におよぼす影響を検討する。なお、ここで用いた粗骨材は粒度分布をもたせたもので、粗粒率(最大寸法)は、5.9(15mm)、6.6(20mm)、7.25(25mm)とした。

3. 実験方法

3.1 骨材試験

- ①比重・吸水率・安定性損失質量および洗い損失量…JIS A 5005により試験を行った。
- ②線膨張係数…牧の方法³⁾を参考に、平滑に加工した粗骨材に3線式表面接着型ひずみゲージを貼り、試料温度を60℃から30℃に低下させたときのひずみから求めた。なお、ダミーには石英ガラスを用い、モルタルも同様に測定した。
- ③粗骨材の表面積…JIS A 1104の実積率試験に準じ、シリンダー型簡易型枠に骨材を詰め、ホワイトセメントのペーストを流し込み、固まったものを切断し、切断面の骨材の周長をプランニメーターで測定した。この値を切断面と垂直方向に積分することで粗骨材の表面積を求め、単位体積当たりの数値に換算した。
- ④骨材のヤング係数…コンクリートとモルタルのヤング係数から式(1)⁴⁾を用いて算出した。

$$E_a = (V_a \cdot E_c \cdot E_m) / (E_m - E_c \cdot V_m) \quad \dots(1)$$

E:ヤング係数 V:体積

(添字)a:骨材 c:コンクリート m:モルタル

3.2 試験体の作製

各シリーズの調合表を表2に示す。なお、シリーズⅡおよびⅢの調合は基準コンクリートの調合であり、シリーズⅡでは、石粉を表3に示すように置換し、シリーズⅢでは粗骨材の一部

を表4に示すように変化させ、体積や表面積、粒度分布の異なる試験体を作製した。

シリーズⅠでは、骨材自体の影響を明らかにするためNonAEとした。また、シリーズⅡおよびⅢで目標空気量を3.5%と5.5%の2種類としたが、これは耐凍害性におよぼす空気量の影響が大きいため、補正を行い、同一空気量における耐久性指数を算出するためである。なお、各種

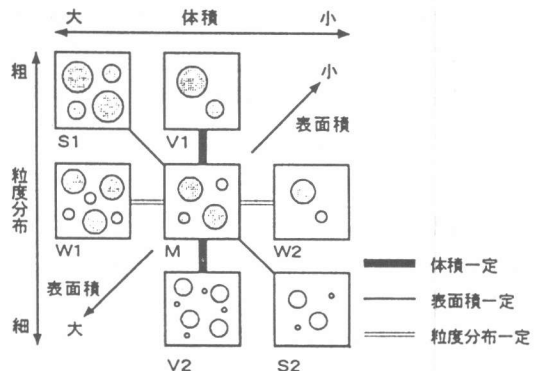


図1 シリーズⅢの調合のモデル

表2 各シリーズの調合表

シリーズ	空気量 (%)	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)		
				C	S	G
I	1.0	55.0	190	109	319	372
Ⅱ, Ⅲ	3.5	55.0	180	104	302	380
	5.5	55.0	180	104	302	360

注) C:普通ポ、S:勇払産陸砂(表乾比重2.71)

表3 シリーズⅡの石粉の種類・置換率

骨材	石粉	置換率	骨材	石粉	置換率
安山岩	なし	0.0	石灰岩	なし	0.0
	安山岩	1.5		安山岩	1.5
		3.0			3.0
	石灰岩	1.5		石灰岩	1.5
		3.0			3.0

表4 シリーズⅢの粗骨材絶対容積 (ℓ/m³)

記号	安山岩		石灰岩	
	空気量3.5%	5.5%	3.5%	5.5%
M	380	360	380	360
V1	380	360	380	360
V2	380	360	380	360
W1	397	378	397	378
W2	361	340	361	340
S1	486	463	486	463
S2	257	242	257	242

の検討の結果、ここでは空気量と耐久性指数の関係のグラフ上で直線補間することによって同一空気量における耐久性指数を求めた。

3.3 コンクリートの試験

- ①スランプ・空気量…JIS A 1101・1128による。
- ②気泡組織…ASTM C-457による。
- ③圧縮強度…JIS A 1108による。
- ④凍結融解試験…試験体は7.5×7.5×40cmとし、養生条件を2週水中とした。試験条件はASTM C-666 A法に準じ、最低温度-18℃、最高温度5℃、6c/日とした。

4. 実験結果および考察

4.1 石灰岩の基礎性状（シリーズI）

結果の概要を表5に示す。石灰岩は線膨張係数が小さいものが多い。なお、石灰岩の中には

粗骨材として使用しないものも含まれている。

耐久性指数と各性状値との関係を図2の(1)から(4)に示す。全体的にみると石灰岩は安山岩に比べ、やや耐久性指数が低いことがわかる。

図2(1)および(2)をみると、石灰岩は比重が大きく、吸水率が小さく、しかも産地による差が小さいという特徴があることがわかる。また、吸水率と耐久性の関係は比較的よい相関があるようにようにみえるが、この傾向は一般的にいわれていることと全く逆の関係であり、粗骨材の吸水率だけでは耐久性指数を説明できないといえる。

図2(3)をみると、石灰岩の安定性損失質量は他の性状と比べるとばらつきは大きくなってきている。また、安定性損失質量と耐久性の間には明確な傾向は認められない。

表5 試験結果の概要（シリーズI）

注）*：シリーズII・IIIでも使用した粗骨材

グループ	記号	岩種	骨材の性状					コンクリートの性状			
			表乾比重	吸水率 (%)	安定性 (%)	線膨張係数 (x10 ⁻⁴ /℃)	Ea (GPa)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	耐久性指数
96	AK	安山岩	2.72	1.75	3.1	8.3	49.5	16.0	1.2	35.3	0.86
	HM	"	2.77	2.47	7.9	12.6	20.7	16.0	1.3	38.0	1.02
	MN	"	2.56	2.11	4.6	19.1	48.8	18.0	1.3	31.8	0.89
	MS	"	2.66	2.87	8.4	12.0	37.9	14.0	1.5	38.0	0.89
	OT	"	2.70	2.37	4.9	11.1	33.3	18.5	1.4	38.4	1.02
	RM	"	2.81	2.20	8.6	12.0	77.8	17.0	1.2	33.8	1.33
	SP	"	2.58	3.19	4.8	9.7	16.1	15.0	1.4	36.3	0.90
	SY	"	2.79	2.88	4.9	7.9	19.5	10.5	1.6	38.7	0.94
	TI	"	2.68	2.00	11.5	6.0	64.5	16.0	1.3	28.9	0.73
	TK96	"	2.68	2.47	5.9	8.2	20.9	15.5	1.3	36.6	0.94
	TR	"	2.58	3.14	6.1	8.0	21.5	17.0	1.3	36.9	0.87
	TU	"	2.56	1.87	5.8	9.7	54.6	16.5	1.1	33.4	0.92
	GR96	石灰岩	2.74	0.49	3.2	4.2	72.5	18.0	1.2	28.6	0.70
	97	TK97*	安山岩	2.68	2.63	9.5	7.6	33.0	19.0	1.4	39.7
NT		石灰岩	2.72	0.38	3.3	5.8	33.4	20.5	0.6	39.8	0.60
KO		"	2.71	0.39	3.3	7.0	34.0	20.0	0.5	37.0	0.83
KT		"	2.68	1.24	9.4	4.8	63.0	20.5	0.5	40.7	0.57
HS		"	2.72	0.41	3.2	6.4	36.3	20.0	1.5	37.6	0.69
GR97*		"	2.73	0.38	1.3	6.4	56.8	21.0	1.4	38.8	0.59
SM		"	2.73	0.25	1.3	5.7	103.5	18.5	1.1	38.8	0.60
HH		"	2.73	0.20	2.4	5.6	35.3	20.0	1.0	40.9	0.73
SW		"	2.73	0.20	5.4	5.9	53.9	21.0	1.6	38.1	0.76
OH		"	2.72	0.41	2.7	6.5	55.3	20.0	1.4	39.8	0.63
TM		"	2.72	0.38	4.1	7.6	34.9	20.5	1.5	38.4	0.75
HT		"	2.73	0.24	3.6	8.2	17.9	20.0	1.7	39.2	0.90
AS		"	2.74	0.92	6.1	10.2	33.1	21.0	1.6	40.5	0.63
TT		"	2.73	0.22	0.2	6.2	53.0	22.0	1.5	38.8	0.80
IN		"	2.73	0.29	4.5	4.7	45.5	21.0	2.1	38.2	0.83
OG		"	2.72	0.27	2.0	5.9	72.6	19.0	1.7	39.0	0.80
AT		"	2.71	0.47	2.5	4.6	69.2	20.5	1.2	40.5	0.83
MN		"	2.72	0.22	2.5	5.6	64.1	20.5	1.6	36.3	0.60
AN		"	2.71	0.43	4.2	5.5	57.7	20.0	1.4	38.3	0.56
SZ		"	2.72	0.35	1.4	6.4	94.6	20.5	0.9	39.4	0.59
KK	"	2.73	0.34	13.0	10.4	21.3	21.5	1.6	39.7	0.53	
TS	"	2.73	0.32	0.8	6.1	49.7	20.5	1.7	39.8	0.59	

図2(4)をみると、石灰岩を用いると同じ水セメント比でも、コンクリートの圧縮強度は安山岩を用いたものに比べ、若干大きな値を示しているが、圧縮強度と耐久性指数の間には明確な傾向は認められない。

石灰岩は線膨張係数が小さいという特徴があり、凍結融解過程の温度変化によって粗骨材とモルタルの線膨張係数の差から微視的な温度応力が生じていることになる。個々の粗骨材とモルタルの界面に生ずる温度応力 $P(N/mm^2)$ は、J. Selsingの式⁵⁾により以下のように計算できる。

$$P = \frac{(\alpha_m - \alpha_a) \Delta T}{(1-\nu_m)/2E_m + (1-\nu_a)/E_a} \quad \dots(2)$$

α :線膨張係数 ΔT :相対温度
 E :ヤング係数 ν :ポアソン比
 (添字) m:モルタル a:骨材

ここでは、温度応力 P がコンクリート全体におよぼす影響を検討するため、複合材料の近似手法⁶⁾に基づき、(3)式を用いて平均垂直応力度 σ_m を算出した。これは、図3に示すように温度応力によるコンクリートの力学挙動は、中心に小さな圧力を発生する球形の骨材を持つコンクリートで構成される球殻として表し、すべての粗骨材による応力は、個々の粗骨材に発生する応力を重ね合わせることで求めることができると仮定している。

$$\sigma_m = P \cdot Va / (1 - Va) \quad \dots(3)$$

P :ひとつの骨材の界面に生ずる温度応力
 Va :骨材のコンクリート全体に対する体積割合

耐久性指数と平均垂直応力度との関係を図4に示す。この図から平均垂直応力度の増加に伴って耐久性指数が低下する傾向がみられ、特に石灰岩の場合には発生する応力が大きくなっている。ここで、応力が小さいにもかかわらず耐久性指数が小さい骨材もあるが、これらの骨材は安定性損失質量や吸水率が他の骨材よりも大

きく、この影響を受けていると考えられる。このことから温度変化によって粗骨材とモルタルの界面に生ずる温度応力は、コンクリートの耐凍害性に影響を与えているものと考えられる。

4.2 石粉の影響 (シリーズII)

空気量におよぼす石粉の影響を図5に示す。これらのグラフから混練後に比べて硬化後の空気量が減少する傾向がみられ、この傾向は石粉を置換した試験体のほうが大きくなっている。

図6に空気量・石粉の置換率と耐久性指数の関係を示す。図6(1)に示すように空気量が耐久性指数におよぼす影響は大きいので、補正により求めた混練後の空気量4.5%のときの耐久性指数を図6(2)に示す。この図から粗骨材の一

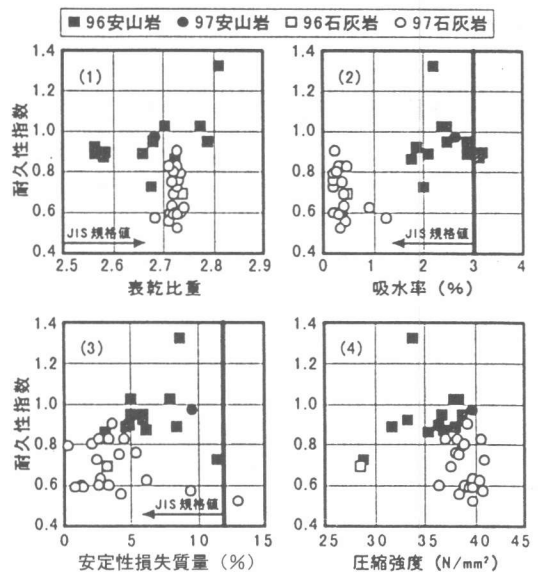


図2 各種性状値と耐久性指数の関係

コンクリートの任意の点に生じる応力
 σ_r :半径方向 σ_θ :接線方向
 σ_ϕ :接線方向(紙面に垂直)

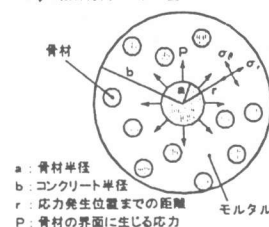


図3 1個の骨材に発生する応力のモデル

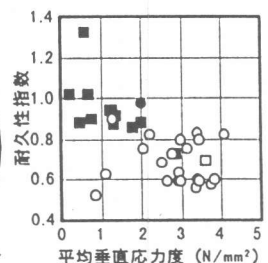


図4 平均垂直応力度と耐久性指数

部を石粉に置換した影響は粗骨材の種類によって異なっているが、これには硬化までに空気量が減少する影響も含まれていると考えられる。

そこで、硬化後の空気量について図6(1)および図6(2)と同様の関係を示したものが図6(3)および(4)である。ここで、硬化後の空気量はばらつきが大きかったため、図6(4)では空気量が3.3%のときの耐久性指数を求めた。この図から石粉の種類によらず、石粉を置換すると耐久性指数は増加する傾向があることがわかる。なお、石粉の置換率の影響は明確ではない。

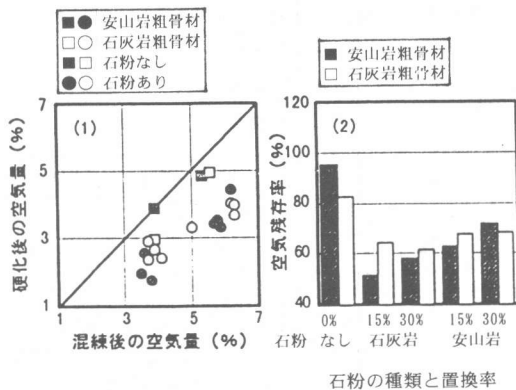


図5 空気量におよぼす石粉の影響

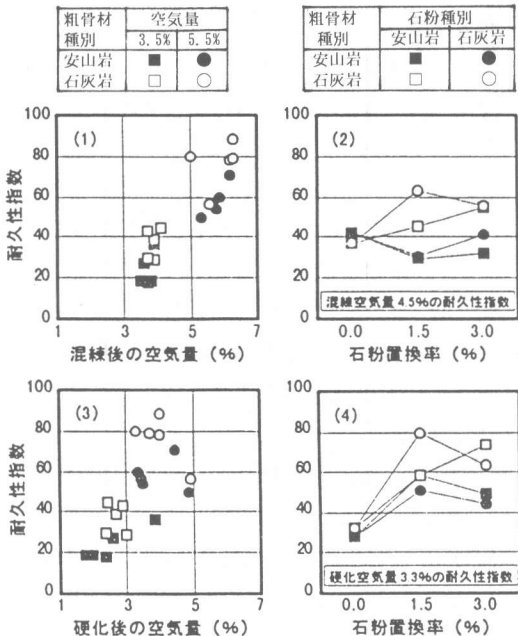


図6 耐久性指数におよぼす石粉の影響

4.3 粗骨材の体積・表面積の影響 (シリーズIII)

粗骨材の絶対容積・表面積とフレッシュ時の性状の関係を図7に示す。図7(1)では、粗骨材の体積が増えるとスランプの値は低下しているのがわかる。また、スランプの値は粗骨材の絶対容積が同じ程度ならば、安山岩に比べて石灰岩を用いたコンクリートのほうが大きくなっている。

図7(2)をみると、粗骨材の表面積が大きくなると混練後の空気量が増大する傾向がみられる。また、石灰岩は安山岩と同様の空気量を得るためにはより多くのAE剤が必要であった。

耐久性指数と各性状値の関係を図8に示す。なお、ここで使用した耐久性指数および各性状値は、補正により算出した混練後の空気量4.5%のときの値である。

図8(1)をみると、体積一定の場合は粗骨材の全表面積が増加すると耐久性指数は減少し、表面積一定の場合は粗骨材の絶対容積の増加に伴い、耐久性指数は増加している。また、粒度分布一定の場合は粗骨材の絶対容積の変化が小さいので耐久性指数の値の変化は小さくなっている。

図8(2)の平均垂直応力度はシリーズIIと同様に粗骨材とモルタルの線膨張率の差から計算したものである。この図をみると体積一定の場合には粗骨材の表面積が増加しても平均垂直応力度の値はほとんど変動しないが、耐久性指数は大きく減少している。また、表面積一定の場

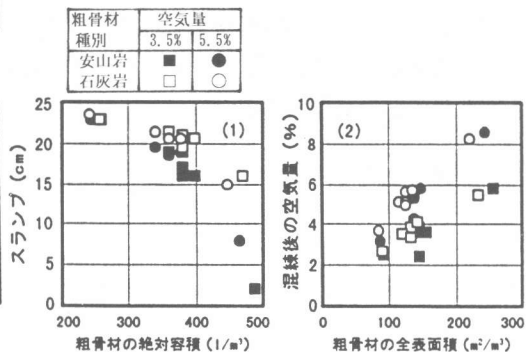


図7 粗骨材の体積・表面積とフレッシュ性状

合は粗骨材の体積の増加に伴って平均垂直応力度は増加し、耐久性指数も増加する傾向がみられる。このことから平均垂直応力度だけ、あるいは粗骨材の表面積だけでは耐久性指数を説明できないといえる。

図8(3)は、横軸に1 m³当たりの粗骨材の個数を計算したものと耐久性指数の関係であるが、体積一定の場合でも表面積一定の場合でも、1 m³当たりの骨材の個数が増加すると、耐久性指数が減少する傾向がみられる。粗骨材の数が増加すると発生するひびわれの量が増加し、これによって耐久性指数が低下するものと考えられる。

5. まとめ

- (1) 石灰岩は、比重が大きく、吸水率が小さく、産地によるこれらの品質のばらつきは小さい。また、今回の実験では石灰岩を粗骨材として使用したnonAEコンクリートは、安山岩を使用したものに比べるとやや耐凍害性が低くなっていた。
- (2) 石灰岩の線膨張係数は安山岩に比べて小さく、粗骨材とモルタルの線膨張係数との差によって生ずる微視的温度応力はコンクリートの耐凍害性を低下させるひとつの原因と考えられる。
- (3) コンクリートの耐凍害性は、粗骨材とモルタルの線膨張係数との差によって生ずる微視的温度応力だけ、あるいは粗骨材の表面積だけでは説明できず、様々な要因が複雑に影響しているものと考えられる。
- (4) コンクリート中の粗骨材の個数は耐久性指数に影響をおよぼし、粗骨材の個数が増加すると耐久性指数は低下する。

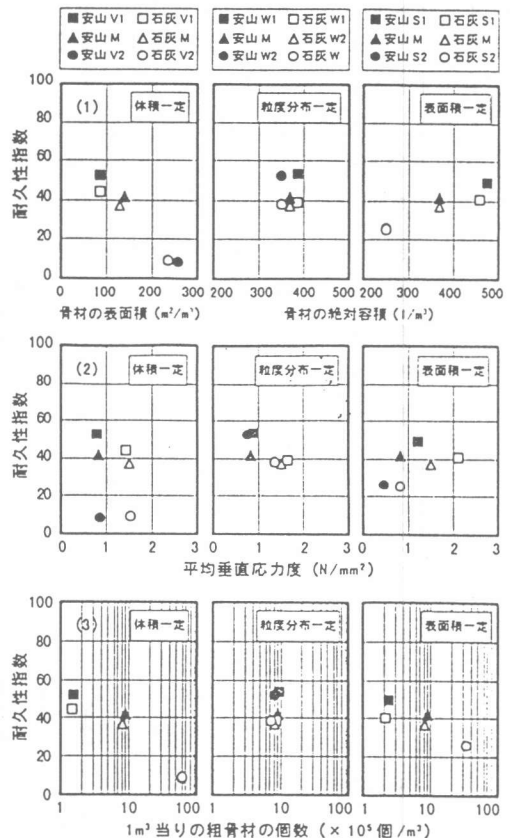


図8 各種性状と耐久性指数の関係

参考文献

- 1) 橘 伸太郎他, 粗骨材がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 29-32, 1997
- 2) 内川 浩, 組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト, モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点, セメント・コンクリート, No. 507, 33-46, 1989
- 3) 牧 隆輝他, モルタル試験体の線膨張係数の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 111-112, 1994
- 4) T. C. Hansen, Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Concrete, ACI 1965
- 5) J. Selising, Internal Stress in Ceramics, American Ceramic Society, 1961
- 6) L. Holiday, Composite Materials, Elsevier Publishing Company 1996