

論文 石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究

高木 亮一^{*1}・長塩 靖祐^{*2}・吉本 稔^{*3}・伊與田 紀夫^{*4}

要旨：本研究では、石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究を行った。その結果、石灰石は、安山岩と比較して、細孔量が少なく緻密であること、静弾性係数が高いことが確認できた。また、石灰石の圧縮強度は層の影響を受けることが明らかとなった。石灰石を用いたコンクリートの静弾性係数は、安山岩を用いた場合と比較して、同一強度の場合高い結果にあった。石灰石を用いたコンクリートの静弾性係数が高いのは、石灰石の静弾性係数が高いことによる影響が大きいのではないかと考えられた。

キーワード：石灰石粗骨材、圧縮強度、静弾性係数、細孔径分布、複合理論

1. はじめに

石灰石は、CaCO₃を主成分とする堆積岩であり、珊瑚礁や生物遺骸が集積、固化して生成されたものである。日本の石灰石鉱床は古生代石炭紀からジュラ紀にかけて生成された、塊状で緻密なものが大半である。石灰石の使用用途は、セメント原料、鉄鋼、石灰、タンカルなどの多岐にわたる。2006年度には1億5700万t/年が出荷されており、その中でコンクリート用石灰石骨材の出荷量は、3500万t/年である¹⁾。石灰石骨材の出荷量は、河川砂利の採取規制に伴う粗骨材へのシフトに対応して1970年代から増加していった。コンクリート用骨材の総需要が落ち込む中で、その割合に対する比率は増加傾向にある²⁾。これは、石灰石粗骨材がアルカリ骨材反応に対する安全性が高いことや、コンクリートの収縮抑制効果が確認されていること²⁾などが要因であると推測することができる。

著者らは、石灰石を用いたコンクリートの基礎的検討を行ってきた。その中で既報³⁾において、石灰石粗骨材を使用したコンクリートは、砂岩砕石を使用した場合に比べて、同一強度における静弾性係数が高いことを確認している。コンクリートの静弾性係数が高くなった理由について、骨材自体の静弾性係数や骨材界面の付着が影響しているとの考察を示したが、そのことを直接示す実験結果は得られていない。石灰石を用いた場合、骨材界面の付着が良くなることが挙げられているが、石灰石自体の静弾性係数については統一した見解が得られていないのが現状である³⁾。

そこで本研究は、コンクリートの静弾性係数に影響を及ぼす要因として挙げられている骨材自体の静弾性係数を明らかにし、石灰石を用いたコンクリートの静弾性

係数に関する基礎的研究を行ったものである。

2. 実験概要

本研究では二つのシリーズに分け試験を行った。シリーズIでは、骨材としての物性を把握するため、圧縮強度、静弾性係数試験、水銀圧入法による細孔径分布測定を行った。石灰石は堆積岩であるため層が存在しており、この堆積している層の影響にも着目した。シリーズIIではシリーズIで測定を行った骨材を使用し、コンクリートに関する試験を行った。

2.1 シリーズI（骨材物性）

(1) 使用材料

表-1に使用した粗骨材の物理的性質および化学成分を示す。比較用として安山岩を使用した。石灰石の方解石(CaCO₃)含有量は97%であり、物理的性質は吸水率が低く、表乾密度が高いことが特徴である。なお、石灰石および安山岩ともに関東産を用いた。写真-1に骨材表面の走査電子顕微鏡観察結果を示す。顕微鏡観察に使用した試料は5mmの粗骨材を試料調整したものを使用した。石灰石は堆積岩であるため、数多くの層が積み重なっていることがわかる。この層は肉眼でも確認することができる。安山岩は火成岩であるため、このような層はみられなかった。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験および静弾性係数試験は岩の試験・調査方法の基準⁴⁾「岩石の一軸圧縮試験方法」に準拠して行った。供試体は原石からコアを採取し、ダイヤモンドカッターで切断した。この際、石灰石は堆積している層の方向に沿って斜め(LA)、縦(LL)、横(LS)の3方向、安山岩は1方向からコア抜きを行った。供試体寸

*1 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設・資源材料チーム 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設・資源材料チーム (正会員)

*3 太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発部建設・資源材料チームリーダー 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社資源カンパニー鉱業部資源グループリーダー 理修

表-1 骨材の物理的性質および化学成分

記号	岩種	物理的性質					化学成分 (%)			
		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
L	石灰石	2.69	0.41	6.65	61.4	1.65	0.17	0.29	56.2	0.11
A	安山岩	2.61	2.51	6.58	60.8	1.55	17.7	55.2	8.65	7.45

表-2 コンクリート配合

骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/L)				
						W	C	S	G	Ad
L	50	43.1	0.63	12±2.5	4.5±1.5	163	326	789	1040	0.82
A		45.8				163	326	825	977	0.82

法はφ25×50mmとし、試験は各水準とも3体実施した。

(3) 水銀圧入法による細孔径分布測定

細孔径分布の測定試料は、骨材をダイヤモンドカッターで切断し、数mm角に切断したものをを用いた。

2.2. シリーズⅡ (コンクリート)

(1) 使用材料

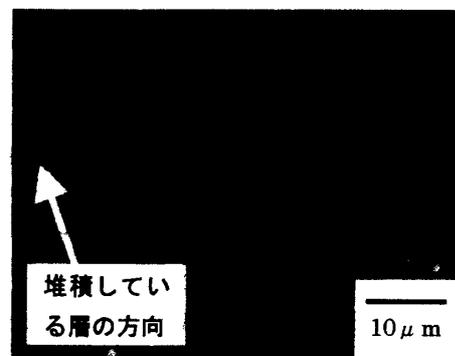
試験に使用した材料は、普通ポルトランドセメント (密度: 3.15 g/cm³, 比表面積: 3280 cm²/g, 記号: C), 細骨材 (陸砂, 表乾密度: 2.61g/cm³, 吸水率: 1.73%, 粗粒率: 2.68, 記号: S), 粗骨材 (石灰石 (記号: L) および安山岩碎石 (記号: A)), AE減水剤 (リグニンスルホン酸系, 記号: Ad), 空気量調整剤 (界面活性剤, 記号: AE) である。

(2) コンクリート配合

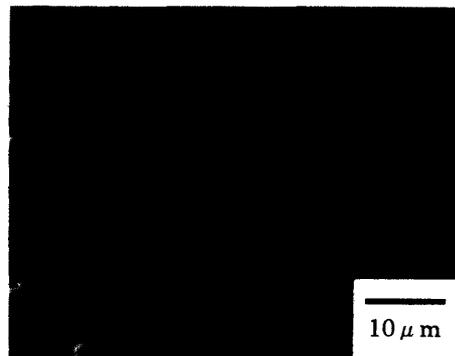
表-2にコンクリート配合を示す。コンクリート配合はW/C=50%, 単位粗骨材かさ容積およびAE減水剤添加量(C×0.25%)を一定とし、目標スランプ12±2.5cm, 目標空気量4.5±1.5%となるように、単位水量の調整により行った。練混ぜはパン型ミキサーを使用し、セメント、砂、砂利を投入し20秒、その後水および混和剤を投入し90秒間行った。養生は標準養生とした。

(3) 試験方法: 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験はJIS A 1108に、静弾性係数試験はJIS A 1149に準拠して行った。本研究ではコンクリートの静弾性係数の考察として、一部複合理論^{5) 6)}による検討も行っている。この複合理論では、コンクリートの静弾性係数を求める際にモルタルの静弾性係数が必要であるため、モルタルについても試験を行った。モルタルはコンクリートからウェットスクリーニングを行い、粗骨材を除去したものをを用いた。モルタルの供試体寸法はφ5×10cmとし、コンクリートの供試体寸法はφ10×

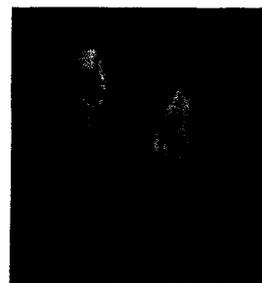


石灰石

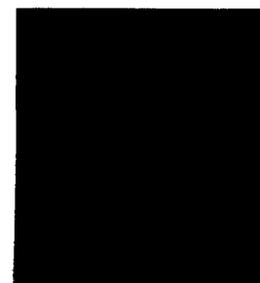


安山岩

写真-1 走査電子顕微鏡観察結果



石灰石



安山岩

写真-2 骨材の破壊性状

20cm とした。試験材齢は3, 7 および 28 日とした。

3. 試験結果および考察

3.1 シリーズ I (骨材)

(1) 圧縮強度および静弾性係数

表-3 に圧縮強度試験結果を示す。変動係数はすべて10%以内に収まっていた。骨材は異方性や不均質性を有している⁷⁾ため、試験結果がばらつくことが懸念されたが、各水準とも精度良く計測することが出来た。石灰石と安山岩を比較した場合、圧縮強度は安山岩の方が高かった。石灰石の圧縮強度は堆積した層(以下、層と呼ぶ)の影響を受けており、層の方向が斜め、縦、横の順で高くなった。

写真-2 に安山岩および層の方向が斜めの場合の石灰石の破壊形状を示す。石灰石は層の方向に沿って破壊していた。岩石学の分類では石灰石は堆積岩に属し、層状になっていることが特徴である。石灰石は、骨材に力が作用した場合、層と層の境界に沿ってせん断力が働き破壊に至ったと考えられる。そのため、今回の圧縮強度の結果は、石灰石の層と層の境界のせん断力に対する抵抗が大きいと考えられる順に高くなったと考えられる。一方、安山岩の破壊は円錐状の断片が周辺の破片とともに残る楔形の破断面であり、この破壊形態はコンクリートの場合と同様であった。楔形の破断面を持つ破壊は、骨材の組織や構造が比較的一定であり内部の応力状態が同じようになる場合に起こる⁷⁾。安山岩はこの破壊形態であったため、石灰石に見られる層の境界でのずれ破壊は起こっていないと考えられる。石灰石の圧縮強度は層の方向の影響を受けることが明らかとなった。

図-1 に骨材の応力-ひずみの関係を示す。図中の関係は、最大荷重の1/2相当までの応力を示している。石灰石および安山岩とも応力-ひずみはほぼ直線の関係であり、弾性的な挙動を示していることがわかる。応力-ひずみの関係が弾性的な挙動を示しているため、骨材の静弾性係数は最大荷重の1/3と原点を結んだ直線の傾きより求めた。

表-4 に骨材の静弾性係数の試験結果を示す。変動係数はすべて10%以内に収まっており、骨材の静弾性係数も圧縮強度と同様に、各水準とも精度良く計測することが出来た。石灰石は $8.44 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、安山岩は $6.47 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。石灰石と安山岩を比較した場合、石灰石の方が安山岩よりも1.3倍程度と高い結果であった。石灰石の場合は層が異なる場合でも静弾性係数はほぼ同等であった。石灰石の静弾性係数は安山岩に比べ高いが、圧縮強度は安山岩より低い。圧縮強度が高いほど、静弾性係数も高くなると考えるのが一般的である⁸⁾が、石灰石の場合は、そのような結果となっていない。前述

表-3 骨材の圧縮強度試験結果

種類	層の方向	変動係数 (%)	圧縮強度 σ_a (N/mm ²)	
LA	斜	7.9	79.9	97.5
LL	縦	8.8	101.6	
LS	横	6.4	111.0	
A		3.5	186.0	

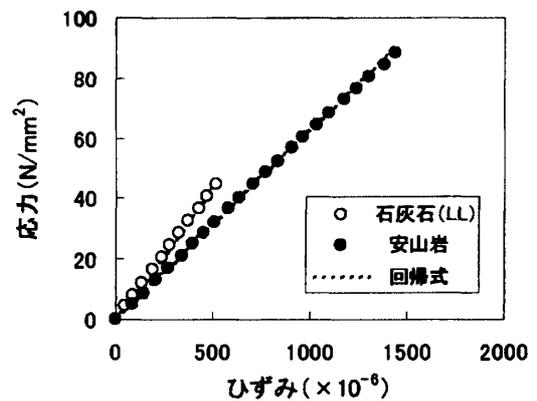


図-1 応力-ひずみの関係

表-4 静弾性係数試験結果

種類	層の方向	変動係数 (%)	静弾性係数 E_a ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	
LA	斜	1.4	8.42	8.44
LL	縦	4.8	8.34	
LS	横	6.9	8.40	
A		2.1	6.47	

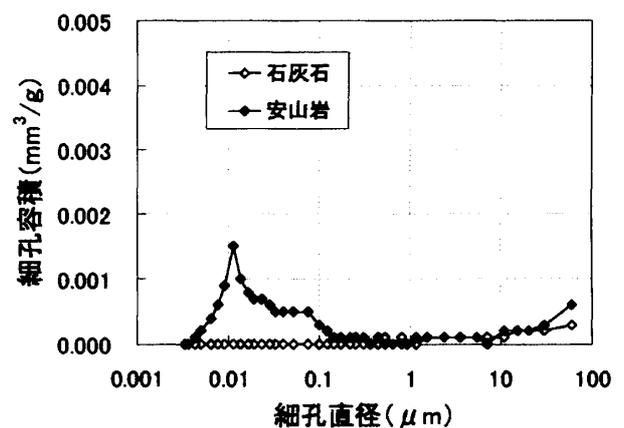


図-2 骨材の細孔径分布

したように、石灰石の圧縮強度は層の影響を受けた結果となっている。静弾性係数の結果から考えた場合、石灰石の圧縮強度は層の影響がないと仮定すれば、石灰石の圧縮強度は安山岩よりも高いのではないかと推察する

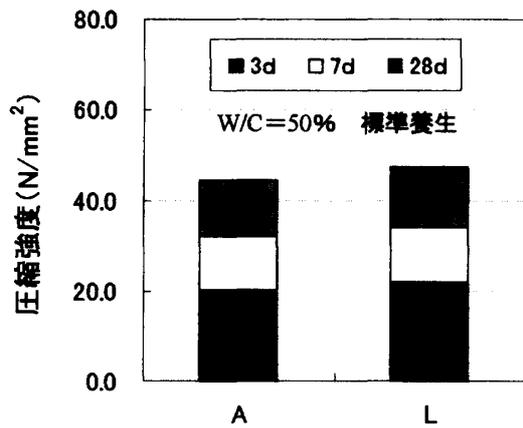


図-3 コンクリート圧縮強度

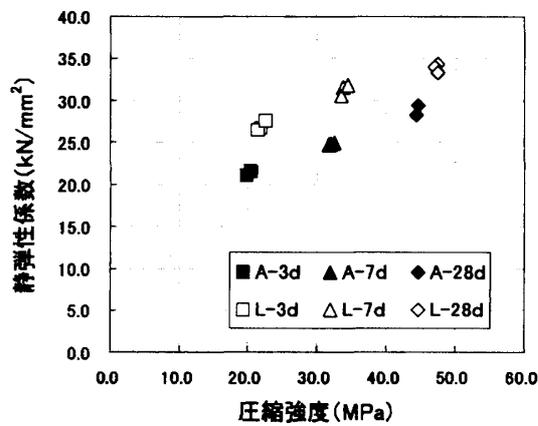


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

ことができる。一方、静弾性係数については、最大荷重の1/2相当までは弾性的な挙動を示していること、また図-1から、石灰石は安山岩と比較して、初期の応力段階からひずみが小さく、静弾性係数が高いことが読み取れ、本試験結果で得られた静弾性係数の結果については、ほぼ妥当ではないのかと考えている。

(2) 細孔径分布

図-2に細孔径分布測定試験結果を示す。石灰石と安山岩では $0.5\mu\text{m}$ 以上の細孔量および分布には大きな差は見られなかった。しかし、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の細孔量は石灰石が極めて少ない。これは既往の研究⁹⁾と同様の結果であった。総細孔容積は石灰石が $0.0023\text{mm}^3/\text{g}$ 、安山岩が $0.0126\text{mm}^3/\text{g}$ であった。石灰石の総細孔容積は、安山岩よりも大幅に少ない量であった。この結果から、石灰石は細孔量が少なく緻密であることがわかる。一般的に材料の物性は材料そのものの組成と構造に依存すると考えられている。例えばコンクリートの場合、その圧縮強度の支配的要因としては細孔量が挙げられており、その他に水セメント比も挙げられているが、ここでは細孔量の観点から骨材についての考察を行うこととする。骨材においてコンクリートと同様なことが当てはまると考

えれば、骨材中の細孔量が少ないほど骨材自体の圧縮強度は高くなると考えられる。しかし、石灰石は安山岩に比べて細孔量が少ないにも係わらず、圧縮強度は小さい結果となっている。今回得られた石灰石の圧縮強度は層の方向の影響を受けており、そのため圧縮強度が小さい。空隙構造の観点から考えた場合でも、石灰石の圧縮強度は高いことが考えられ、石灰石の圧縮強度の評価に当たっては、層の影響を加味する必要がある、今後検討していく必要がある。

3.2 シリーズⅡ (コンクリート)

(1) 圧縮強度および静弾性係数

図-3に圧縮強度試験結果を示す。石灰石および安山岩を用いた場合の圧縮強度は、各材齢においてほぼ同程度であった。著者らは既報³⁾において、石灰石と砂岩碎石を用いた場合の材齢28日の圧縮強度を比較しほぼ同等であることを確認している。また強度発現に関係すると言われている $50\mu\text{m}$ 以上の空隙量¹⁰⁾についても同程度であることを確認し、骨材種類による空隙量への影響は見受けられていないことが判明している。本研究では比較用として砂岩碎石ではなく安山岩碎石を使用しているが、今回の圧縮強度の試験結果は既報の結果と同様の理由によるものではないかと考えられる。

図-4に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同一強度で考えると、安山岩を使用した場合よりも石灰石を使用した場合の方が、静弾性係数は高かった。これは既往の研究³⁾と同様の結果であった。今回の実験結果では、石灰石を用いた方が安山岩よりもコンクリートの静弾性係数は、1.2倍程度高い結果にあった。石灰石を使用したコンクリートの弾性係数は高いことが明らかになったことから、次項で静弾性係数についての検討を行った。

(2) 静弾性係数についての検討

コンクリートの静弾性係数に及ぼす要因としては、前述したように、骨材の静弾性係数および骨材とペーストとの付着性状が挙げられる¹¹⁾。ここでは、得られた実験結果および複合理論による理論値と実験値の相違から石灰石を用いたコンクリートの静弾性係数に及ぼす影響について整理を試みた。

実験結果から、骨材自体の静弾性係数は、石灰石の方が安山岩より1.3倍程度高い。一方、コンクリートの静弾性係数は、石灰石の方が安山岩を用いた場合よりも1.2倍程度高い。骨材自体の静弾性係数の高いことが、コンクリートの静弾性係数の高いことに繋がっている結果となっている。実験結果からは、骨材自体の静弾性係数の差がコンクリートの静弾性係数の差に繋がったと考えられ、骨材自体の静弾性係数がほぼ支配要因となると推察される。

表-5 静弾性係数の実験値と理論値

供試体	材齢	実験値					理論値 Ec(Gpa)	E/Ec	
		体積率		静弾性係数(Gpa)					
		Vm	Va	Em	Ea	E			
A	3 d	0.627	0.373	18.1	64.7	21.3	28.0	0.76	0.80
	7 d			20.5		24.8	30.7	0.81	
	28 d			24.0		28.8	34.7	0.84	
L	3 d	0.613	0.387	17.9	84.4	26.8	29.8	0.90	0.89
	7 d			22.3		31.3	35.2	0.90	
	28 d			25.4		33.8	38.7	0.87	

一方、複合理論とは各構成素材のヤング係数を用いて複合体のヤング係数を表現するものである。複合体の弾性係数評価モデルとして Hashin-Hansen モデル⁵⁾⁶⁾が提案されている。このモデルは、コンクリートをモルタルと骨材の2相複合体として扱うこととし、マトリクス（モルタル部分）の弾性係数 E_m と骨材の弾性係数 E_a ならびにそれぞれの体積率 V_m , V_a から複合体の弾性係数 E_c を得るものである。式 (1) に Hashin-Hansen モデルの理論式を示す。

$$E_c = E_m \times \frac{V_m E_m + (1 + V_a) E_a}{(1 + V_a) E_m + V_m E_a} \quad (1)$$

ここに、 $V_a + V_m = 1$

E_c : コンクリートの弾性係数 (理論値)

E_m, E_a : マトリクスおよび骨材の弾性係数 (実測値)

V_m, V_a : マトリクスおよび骨材の体積率

ここでは、このモデルを用いて、コンクリートの静弾性係数について整理を行ってみた。この理論では、コンクリート、モルタル、骨材の弾性係数をそれぞれ測定する必要がある。表-5 にその試験結果をまとめたものを、また E_m , E_a , V_m および V_a を代入し、複合体の理論値となる弾性係数 (E_c) を算定したものを示す。更に理論値に対する実験値の比率 (以下、 E/E_c) も併せて示す。コンクリートからウェットスクリーニングを行ったモルタルの静弾性係数は使用した粗骨材が異なってもほぼ同様の値であった。本実験で使用した材料は、粗骨材以外すべて同じであり、単位粗骨材かさ容積、単位水量、 W/C が同じであったため、モルタルの静弾性係数は同等の値となったと考えられる。したがって、 E_c の値は E_a の値が支配的であると言える。 E/E_c の値は、平均で石灰石の場合 0.89 であり、安山岩は 0.80 であった。 E/E_c は 1 より小さい値を示しており、実験値は理論値に比べて小さいことがわかる。この複合理論では、骨材境界面に起因するコンクリートの非弾性的挙動がその弾性係数に

及ぼす影響や骨材境界面に生じるマイクロクラックは考慮されていない⁵⁾。そのため、一般的には実験値は理論値よりも小さい値となり、また骨材界面の付着性状が高い方がより 1 に近い値となる⁵⁾。石灰石の方が安山岩よりも E/E_c がより 1 に近いということは、石灰石の方が安山岩に比べ骨材界面の付着性状がよいことを示唆している。しかしながら、石灰石と安山岩の E/E_c の差で考えた場合には、それほど大きな差とはなっていないのではないかと思われる。石灰石と安山岩の E/E_c の差が骨材界面の付着の差と仮定した場合、その差はあるが付着の影響の要因としてはそれほど大きくないのではないかと思われる。

今回の整理を実施した範囲では、石灰石コンクリートを用いた静弾性係数が高いのは、骨材自体の静弾性係数が高いことの方が影響していると思われた。ただし、石灰石を用いたコンクリートでは、骨材とペーストとの付着性状が良いことが表-5 の結果から示唆されており、正確に評価するにあたっては、これらを考慮しなければならず、今後の検討課題である。

5. まとめ

本研究では、骨材自体の静弾性係数を明らかにし、石灰石を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究を行った。本研究の実験より得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 石灰石は、安山岩と比較して、細孔量が少なく緻密であること、静弾性係数が高いことが確認できた。
- (2) 石灰石は堆積岩であるため、圧縮強度は層の影響を受けることが明らかとなった。
- (3) 石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は、安山岩を用いた場合と比較して、同一強度の場合高い結果にあった。これは、石灰石の静弾性係数が高いことによる影響が大きいのではないかと考えられた。

参考文献

- 1) 経済産業省生産動態統計，非金属鉱物資料平成 18 年年報
- 2) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート，2005
- 3) 長塩靖祐・藤田仁・吉本稔・伊奥田紀夫：産地の異なる石灰石粗骨材を使用したコンクリートのフレッシュおよび強度性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.129-134，2007
- 4) 社団法人地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書，2003
- 5) 川上英男：粗骨材コンクリートの静弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.203-308，2002
- 6) 趙力采・小林一輔：コンクリートの静弾性係数における複合特性，コンクリートジャーナル，Vol.12，No.7，1974
- 7) 山口梅太郎・西松裕一著：岩石力学入門，東京大学出版会
- 8) 野口貴文・友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，1-10，Aug.，1995
- 9) 立松和彦ほか：関西地方における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.203-308，Nov.，1995
- 10) 内川浩ほか：混合セメントモルタルおよびコンクリートの硬化体構造が強度発現に及ぼす影響，セメントコンクリート論文集，No.44，pp.330-335，1990
- 11) 鶴田浩章：高強度コンクリートの圧縮強度・静弾性係数に及ぼす粗骨材物性の影響に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.43，No.2，pp.76-83，2005.2