

論文 各種砕石を用いた高強度コンクリートの強度特性

小畠 明^{*1}・中村 秀三^{*2}・酒井 英司^{*3}

要旨：本研究は，砕石の物性値が超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討を行ったものである。その結果，砕石自身の各種強度値は超高強度コンクリートの圧縮強度を決定する主要因に必ずしもならず，モルタルと砕石の静弾性係数差の影響が大きいと考えられた。また，コンクリートの静弾性係数を構成材料の静弾性係数から算定するモデルを考えた時，構成材料の静弾性係数の差に着目し，マトリクスをペーストとし骨材を細骨材および粗骨材として考えることが好ましいことがわかった。

キーワード：砕石，超高強度コンクリート，引張強度，圧縮強度，静弾性係数

1. はじめに

近年， 100N/mm^2 を越える超高強度コンクリートの施工事例が増加しており，中には 180N/mm^2 と砕石の圧縮強度を上回っているようなコンクリートの事例も報告されてきている。

こうした超高強度コンクリートの砕石には，原石強さが高いものが適していると考えられている。その一方で，砕石の各種強度値はコンクリートの圧縮強度を決定する主要因になっていないとする既往の文献^{1), 2)}も見受けられ，超高強度コンクリートの圧縮強度を決定する主要因として砕石の各種強度値の評価は定まっていないのが現状である。

そこで本研究は，3 岩種，5 産地の砕石をもちい，それら自身の物性値と超高強度コンクリートの強度性状との関係について検討を行った。

2. 各種砕石の物性評価試験

2.1 試験概要

2.1.1 検討対象とした砕石

砂岩，安山岩および石灰岩の 3 種の岩石を母岩とする砕石(砂岩 2 産地，安山岩 2 産地，石灰岩 1 産地)の計 5 種類とした。各砕石の記号を表 - 1 に示す。

2.1.2 試験項目

各種砕石の表乾密度，吸水率，実積率，粒形判定実積率および粗粒率の基本的物性値は，それぞれ JIS に定める方法に従い評価を行った。またこれらに加え，砕石自身の強度を評価する方法である，BS 812 part110「骨材破砕値試験方法」の 400kN 破砕値および点載荷圧裂試験による引張強度³⁾の測定を実施した。点載荷圧裂試験とは，骨材粒を鋼球ではさみ，点載荷することにより引張強度を求める試験方法である。なおこの引張強度は，式(1)で算出される。

$$St = 0.9Ft / d^2 \quad (1)$$

ここに， St ：引張強度(N/mm^2)， Ft ：最大破壊荷重(N)， d ：載荷点間の距離(mm)

2.2 試験結果

試験結果を表 - 1 に示す。砕石の吸水率は，低いものから $S2, L, S1, A1, A2$ の順となった。400kN 破砕値は，低いものから $S2, S1, A2, A1$ ，大きく離れて L の順となった。また引張強度は，高いものから $S1, S2, A2, A1$ ，大きく離れて L であった。よって，概略的に砕石の強度は，高いものから砂岩($S1 > S2$)，安山岩($A1 > A2$)，石灰岩(L)の順であると思われる。

図 - 1 に砕石の吸水率と 400kN 破砕値ならば

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 資源開発チーム (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 資源開発チーム チームリーダー (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 資源開発チーム

表 - 1 砕石(2005)の物理的物性値

砕石の種類		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定 実積率(%)	粗粒率	400kN 破砕値(%)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 ¹ (N/mm ²)
砂岩砕石	S1	2.64	0.72	60.3	60.2	6.73	10.2	21.9	311.8
	S2	2.71	0.49	60.6	61.0	6.72	9.1	19.8	287.7
安山岩砕石	A1	2.70	1.80	60.4	60.5	6.73	11.8	17.6	262.5
	A2	2.60	2.55	61.6	61.6	6.72	11.2	16.9	254.5
石灰石砕石	L	2.69	0.69	61.7	62.7	6.85	21.1	11.4	191.5

1：既往の文献⁴⁾中の関係式より引張強さから算定

に引張強度の関係を示す。吸水率と 400kN 破砕値，引張強度との関係に顕著な相関は認められず，石灰石砕石は他に比べ吸水率は低い引張強度および 400kN 破砕値とも高強度側の値を示さなかった。しかし石灰石砕石を除くと，吸水率と引張強度には弱い相関関係が認められた。

図 - 2 に，砕石の 400kN 破砕値と引張強度の関係を示す。両者の間には概ね相関関係が認められるが，おのおの砂岩および安山岩の内で両者の値が逆転しているのは 400kN 破砕値が砕石の粒形の影響を受けるためと思われる。

以上から，点載荷圧裂試験は砕石自身の強度評価法として優れていると思われる。なお引張強度の値は，骨材粒径の影響とばらつきを抑えるため試験は粒径 15～20mm の試料を用い，かつ 20 個の平均とした。

3. 各種砕石を用いたコンクリート実験

3.1 実験概要

3.1.1 使用材料

粗骨材は上記の 5 種類の砕石を用いた。

表 - 2 コンクリートの配合

砕石の種類		水結合材比 (%)	単位粗骨材容積 (m³/m³)	単位量(kg/m³)						
				W	LC	SF	S	G	SP ¹	ARA ¹
砂岩砕石	S1	16	0.33	150	844	94	562	870	C × 1.0%	C × 0.2%
	S2							895		
安山岩砕石	A1							890		
	A2							857		
石灰石砕石	L							887		

1：各混和剤は，結合材質量に対する割合で混和した。

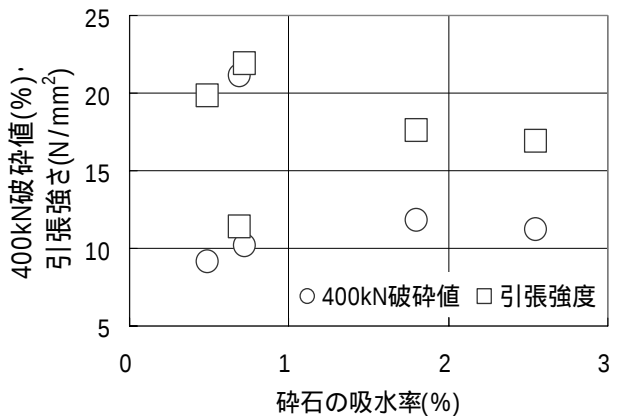


図 - 1 吸水率と 400kN 破砕値・引張強度の関係

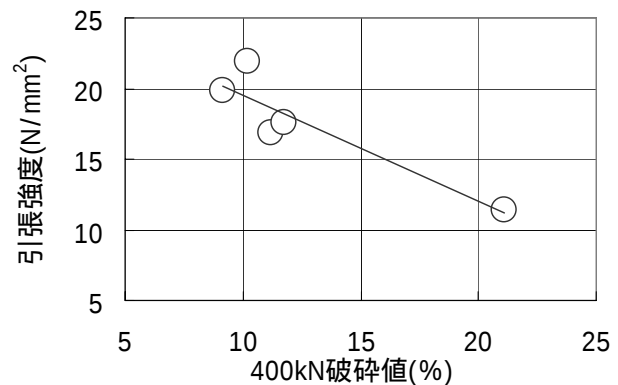


図 - 2 400 k N 破砕値と引張強度の関係

セメントは低熱ポルトランドセメント(LC)，混和材はシリカフューム(SF)を使用した。また細骨材は，陸砂(S，吸水率：1.70%，安定性：0.60%)を用い，混和剤はポリカルボン酸系高性能減水剤(SP)および消泡剤(ARA)を用いた。なお，ARAはコンクリートの空気量が圧縮強度に及ぼす影響を極力排除するために用いたものであり，本検討における空気量はいずれの砕石を用いた場合でも $1.0 \pm 0.2\%$ の範囲内となった。

3.1.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表 - 2 に示す。いずれの砕石を用いたコンクリートの配合も，水結合材比 16%，単位水量 150kg/m^3 ，単位粗骨材容積 $0.33\text{m}^3/\text{m}^3$ の一定条件とした。

3.1.3 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは強制練り二軸ミキサを用い，粗骨材以外の材料を 5 分間練混ぜ，その後粗骨材を投入し 90 秒間練混ぜ排出した。

3.1.4 コンクリートの養生方法

試験時まで 20 水中養生を行った。

3.1.5 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い実施し，試験材齢は材齢 7，28 および 91 日とした。

(2) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は，JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い，圧縮強度試験と同時に実施した。

3.2 砕石物性値とコンクリートの圧縮強度

3.2.1 砕石強度の影響

図 - 3 にコンクリートの圧縮強度発現を示す。また図 - 4 に砕石の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係，図 - 5 に砕石の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係，図 - 6 に砕石の引張強度とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。

砕石の吸水率とコンクリートの圧縮強度の間には相関関係は認められなかった。

図 - 5 より，400kN 破砕値の増加に伴い圧縮

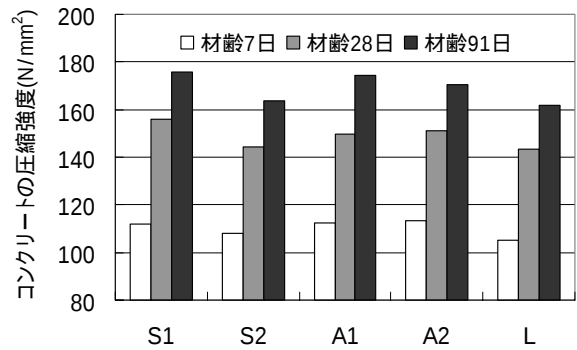


図 - 3 コンクリートの圧縮強度発現

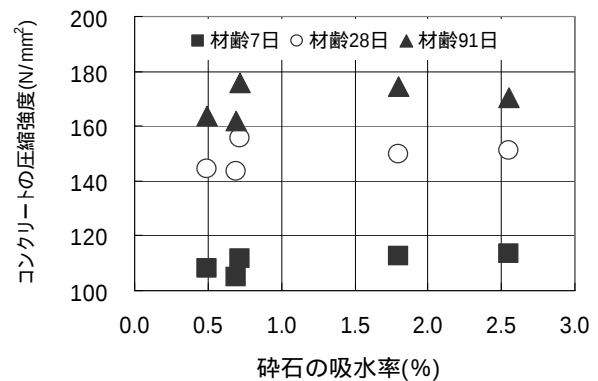


図 - 4 砕石の吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係

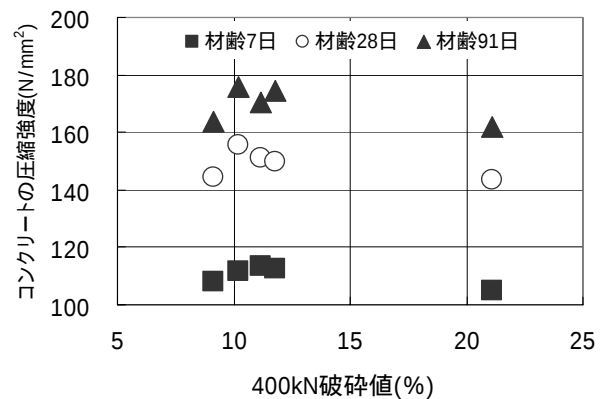


図 - 5 砕石の 400kN 破砕値とコンクリートの圧縮強度の関係

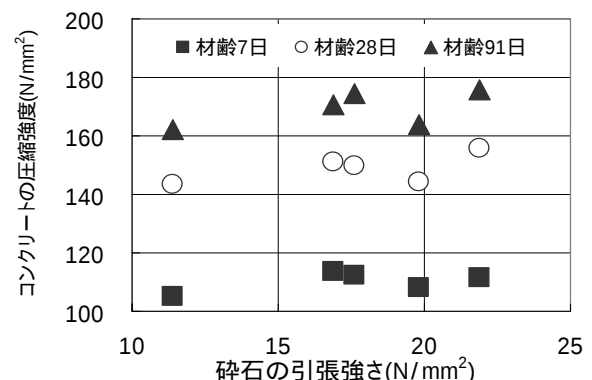


図 - 6 砕石の引張強度とコンクリートの圧縮強度の関係

強度は低下するように思える。しかし，最も 400kN 破砕値の小さい S2 と最も大きい L では 2 倍の差があるが，コンクリートの圧縮強度は同等，また S1 と L を比較しても 400kN 破砕値および引張強度に 2 倍の差があるのに対し，それぞれを用いたコンクリートの圧縮強度には材齢 91 日においては約 6%の差しか見られなかった。したがって，超高強度コンクリートの強度は碎石自身の各種強度値のみが支配要因ではないと考えられた。

3.2.2 碎石の静弾性係数の影響

(1) 碎石の静弾性係数の算出

本検討では，試料調達の制約から碎石自身の静弾性係数の測定が実施できなかった。そこで碎石自身の静弾性係数をマトリクスの静弾性係数 E_m と骨材の静弾性係数 E_a ならびに，それぞれのコンクリートに占める体積率 V_m ， V_a から複合体の静弾性係数 E_c を求めることができる Hashin-Hansen モデルを変形させた式(2)を用いることにより算出することとした。

$$E_a = E_m \times \frac{V_m E_m - (1 + V_a) E_c}{V_m E_c - (1 + V_a) E_m} \quad (2)$$

ここに， $V_a + V_m = 1$

この Hashin-Hansen モデルを用いる場合，マトリクスをモルタル，骨材を粗骨材と考えるモデル(モデル A)とペーストをマトリクスとし細骨材および粗骨材を骨材とみなすモデル(モデル

B)の二つが考えられる。モデル A は，構成材料の寸法の違い(粒径 5mm を境とした)に着目した相別，モデル B はペーストと骨材の静弾性係数差に着目した相別と言える。

コンクリートのペースト部およびモルタル部の静弾性係数はそれぞれの部分と同一配合のものを別練し，コンクリートと同一養生を行った寸法 $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ の円柱供試体により測定した。

表 - 3 にペースト，モルタルおよびコンクリートの材齢 91 日の静弾性係数と，碎石の静弾性係数の算出結果を示す。陸砂の静弾性係数は，ペーストとモルタルの結果から算出した。モデル A では， E_m および V_m はモルタルの値を用いた。算出された碎石の静弾性係数の内，3 つはコンクリートの弾性係数を下回り，1 つはペーストの弾性係数をも下回っており現実的でなかった。

モデル B による碎石の静弾性係数の算出は，まずペーストをマトリクス，細骨材を骨材と考え，モルタルの静弾性係数実測値から式(2)により細骨材の静弾性係数を求めた。次にペーストをマトリクス，骨材を細骨材および粗骨材と考え，コンクリートの静弾性係数実測値から細骨材および粗骨材の合成された静弾性係数を求めた。この合成された静弾性係数は，細骨材および粗骨材のコンクリート中の体積割合で決まるものとし，これと先に求めた細骨材の静弾性係数算定値を用いて粗骨材の静弾性係数を求めた。

算出された碎石の静弾性係数は，石灰石碎石の値が既往の研究結果に比較し若干おおきめと思われるが全体に妥当な値と思われた。

表 - 3 各碎石の静弾性係数

骨材			静弾性係数(kN/mm ²)				
			ペースト	モルタル	コンクリート	砕石(算定値)	
						モデル A	モデル B
細骨材	陸砂		40.9	49.5	---	52.1(砂)	
粗骨材	砂岩砕石	S1			47.2	42.8	53.9
		S2			51.2	54.8	68.5
	安山岩砕石	A1			49.3	48.9	61.4
		A2			45.4	38.0	47.8
	石灰石砕石	L			53.4	62.3	76.9

したがって、コンクリートの静弾性係数をマトリクスと骨材のそれぞれの静弾性係数から算出する場合、構成材料の寸法差により相別した場合(モデル A)よりも静弾性係数差によって相別した場合(モデル B)の方が好ましいと考えられた。

(2) 砕石の静弾性係数がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

図 - 7 に、上記の手法(モデル B)で求めた各砕石の静弾性係数とモルタルの静弾性係数の差(以下、静弾性係数差)と、各材齢におけるコンクリートの圧縮強度の関係を示す。静弾性係数差とコンクリートの圧縮強度は高い相関関係が認められ、静弾性係数差が小さくなるほどコンクリートの圧縮強度は高くなる傾向となった。

超高強度コンクリートの圧縮強度は、砕石の各種強度値だけでなく砕石とモルタルとの静弾性係数差に大きな影響を受けることがわかった。

4. モルタルおよび砕石の物性値をパラメータとしたコンクリートの圧縮強度算定式

コンクリートを骨材とマトリクスの複合体としての強度算定モデルは、図 - 8 に示すよう立方体中心に骨材体積相当のコア立方体(一辺 $Va^{1/3}$)を置き、骨材 - マトリクス混在部分の骨材とマトリクスのひずみは等しいとし、マトリクスと骨材との界面の影響から骨材にはある割合(R 値)にしか応力が伝わらないとする複合モデルを筆者らは提案した⁴⁾。この複合モデルでは、マトリクスと骨材は弾性体で、破壊は骨材 - マトリクス混在部分のいずれかの部分のひずみが破壊ひずみに達した時に起こるとし、破壊ひずみは強度 f と静弾性係数 E から f/E とした。こうした考え方から、複合体の圧縮強度 f_c は以下に示す式(3)により計算されるとした。

$$f_c = R \times Va^{\frac{2}{3}} \times Ea \times \text{Min}\left(\frac{f_m}{E_m}, \frac{f_a}{E_a}\right) + \left(1 - Va^{\frac{2}{3}}\right) \times Em \times \text{Min}\left(\frac{f_m}{E_m}, \frac{f_a}{E_a}\right) \quad (3)$$

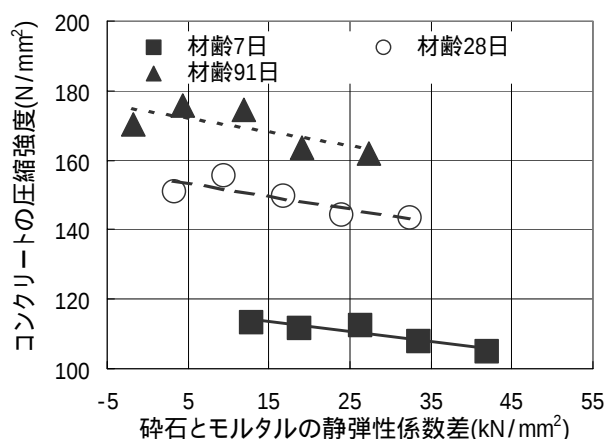


図 - 7 静弾性係数差とコンクリートの圧縮強度の関係

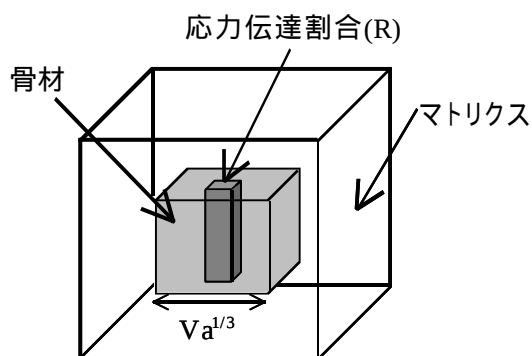


図 - 8 複合モデル

ここに、マトリクスおよび骨材の圧縮強度、静弾性係数、体積率をそれぞれ f_m , f_a , E_m , E_a , V_m , V_a , 応力伝達割合を R 値とする。

本検討では、マトリクスをモルタル、骨材を砕石と考え、実測したモルタルおよびコンクリートの強度物性値と、前述した砕石の静弾性係数算定値を用いて R 値を算出した。ここで静弾性係数の場合のモデル化と異なり、寸法差を重視したモデルとしたのは、破壊においては界面が重要な役割を担っていると考えたためである。

R 値の算出結果を図 - 9 に示す。 R 値は、材齢の経過に伴い大きくなった。特にこの傾向は石灰石砕石 L で顕著であった。

そして石灰石砕石を除くと、他の砕石は種類によらずほぼ同じ関係を示した。また、石灰石砕石を用いたものの R 値は、他のものより大きな値を示した。これらは、両者の静弾性係数差が縮小すると砕石とモルタル間界面に発生する応力が低減され、破壊まで多くの面で力が伝達し一体として変形すること、さらに石灰石砕石の場合は材齢の進展に伴いモルタルとの付着が高まる影響によると考えられる。石灰石砕石の場合は傾向が異なるが、砕石とモルタルの静弾性係数差との相関が高い R 値によりある程度コンクリートの圧縮強度の推定が可能と考えられる。

コンクリートの強度はモルタルと砕石それぞれによって支えられる。よってコンクリート強度は、モルタル部だけの強度や砕石自身のみの各種強度値のみならず、両者の強度値と静弾性係数のバランスにより決定される。本研究の場合、砂岩砕石 S2 を用いたコンクリートの強度が、強度の劣る安山岩砕石 A1 ならびに A2 と比較し小さくなったことは、S2 の静弾性係数に対する強度の比(砕石の換算圧縮強度/静弾性係数)4.20 が、A1 の 4.28、A2 の 5.32 に比較して小さいことによって生じたと考えられる。超高強度コンクリート用の細骨材や砕石の選択にあたり、各材料の能力を最大限に生かすにはその各種強度値に着目するだけでなく静弾性係数も考慮する必要がある。

5. まとめ

- (1) 砕石の引張強さと 400kN 破砕値には相関関係が認められた。
- (2) 超高強度コンクリートの圧縮強度は、砕石の各種強度値の大小のみで直接的に決定されない。
- (3) 超高強度コンクリートの圧縮強度は、砕石とモルタルの静弾性係数差に大きく左右される。
- (4) 本研究の範囲内において、コンクリートの静弾性係数を構成材料の静弾性係数から算定するモデルを考えた時、構成材料の静弾性係数の差に着目して、マトリクスをペーストとし骨材を細骨材および粗骨材として考えることが好まし

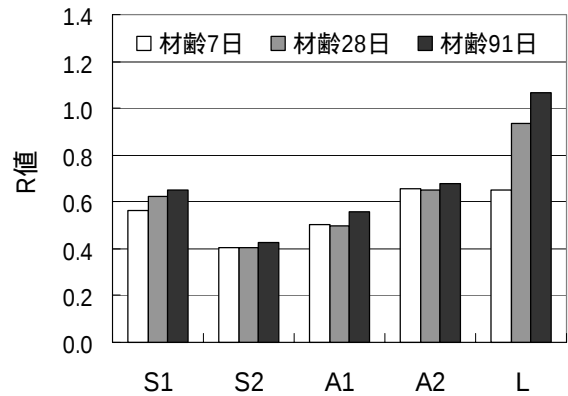


図 - 9 各砕石の R 値の比較

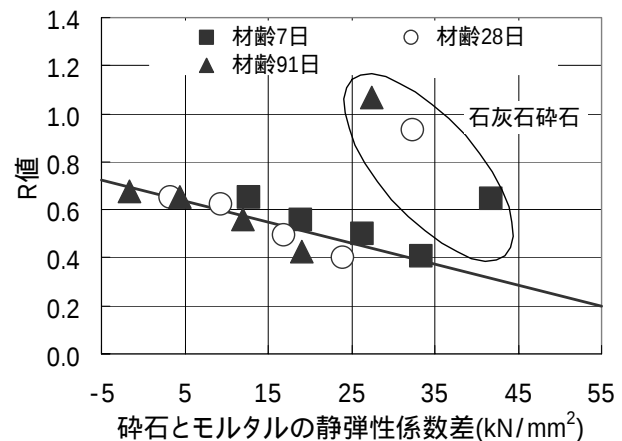


図 - 10 静弾性係数差と R 値の関係

いと考えられた。

(5) 砕石とモルタルの静弾性係数差と相関のある R 値によりコンクリートの圧縮強度の推定は可能である。

参考文献

- 1) 飛坂基夫: 高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響, セメント・コンクリート, No.394, pp.30-33, 1979
- 2) 森野奎二, 田中良典: 高強度コンクリートの強度性状に及ぼす各種骨材の影響, 土木学会第 47 回年次学術講演概要集, 第 5 部, pp.914-915, 1992
- 3) 平松良雄, 岡 行俊, 木山秀朗, 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, 81 巻, 931 号, pp.1024-1030, 1965
- 4) 梶尾 聡, 中村秀三, 小畠 明: 高強度コンクリートの強度特性に及ぼす骨材物性の影響, 太平洋セメント研究報告, 第 146 号, pp.21-32, 2004