

## 報告 石灰石碎石を用いたコンクリートの強度特性

小畠 明<sup>\*1</sup>・鶴田 昌宏<sup>\*1</sup>・中村 秀三<sup>\*2</sup>

**要旨：**北海道、関東、東海および九州から取り寄せた石灰石碎石自身の物性ならびにそれらを用いたコンクリートの強度特性を、良質な硬質砂岩碎石を用いたものと対比することで検討を行った。その結果、石灰石碎石は硬質砂岩碎石と比較して骨材自体の強度は低い、コンクリートの圧縮強度、引張強度および曲げ強度は同等か同等以上の値を示した。さらに、 $150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートに用いても両者の間に差はなかった。また超高強度コンクリートの自己収縮は、石灰石碎石を用いた場合硬質砂岩碎石の60%となり小さかった。

**キーワード：**石灰石、骨材強度、圧縮強度、曲げ強度、引張強度、静弾性係数、自己収縮

### 1. はじめに

コンクリート用石灰石碎石の年産量は約3,600万tに達し、碎石の約2割を占めると言われコンクリートの主要な骨材の一種となっている。

石灰石碎石を用いたコンクリートは、硬質砂岩碎石を用いたコンクリートと比較して、自己収縮ならびに乾燥収縮および温度変化による長さ変化が小さい<sup>1)</sup>などの利点がある。

しかし、石灰石碎石が骨材に多量に使用されるようになってきたのは約20年程前からであり<sup>1)</sup>、このような長所の理解が十分得られているとは言えない。

一方石灰石碎石は方解石の塊であることから角張っており、単位水量が他の碎石に比較し大きいといった誤解や硬度が軟らかく擦れて粉化しやすいことから骨材自身の強度が、特に高強度コンクリートとしては不十分であるといった誤解があるように思われる。

そこで本報告では、北海道、関東、東海および九州から取り寄せた石灰石碎石を、それ自身の物性ならびにそれらを用いたコンクリートの強度特性を良質な硬質砂岩碎石を用いたものと対比することで検討を行った。

### 2. 石灰石碎石の物性評価実験

#### 2.1 実験概要

##### (1) 試料

本実験に使用した石灰石碎石は、北海道、関東、東海および九州地区でコンクリート用石灰石骨材(砕砂含む)を100万t/年以上生産する主要鉱山から取り寄せたもの(以下 Ga, Bu, Fu, Tu と記載する)である。また、比較用として良質な硬質砂岩碎石(Iw)を用いた。

##### (2) 物性試験項目と方法

碎石の基本物性として表乾密度、吸水率、実積率および粒形判定実積率を JIS に準拠して測定した。さらに、骨材強度の指標とするため400kN 破砕値(BS 812)および点載荷圧裂試験による引張強度<sup>2)</sup>を測定した。点載荷圧裂試験は、骨材上下を鋼球ではさみ載荷(写真-1)するものである。

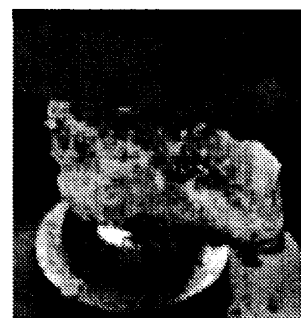


写真-1 点載荷圧裂試験

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第一研究部建設技術グループ (正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第一研究部建設技術グループ グループリーダー (正会員)

引張強度の計算式を以下の式(1)に示す。なお、 $St$ は引張強度、 $F_0$ は最大荷重、 $d$ は載荷点間距離をそれぞれ示している。

$$St = 0.9F_0 / d^2 \quad (1)$$

また、石灰石碎石については純度を知るため JIS M 8850 に準じ CaO 含有率(CaO=56%/純度 100%)を測定した。

## 2.2 実験結果

表-1に使用した石灰石碎石4種類および、比較用として用いた硬質砂岩碎石の物性値を示す。なお、参考のため表中の母岩の圧縮強度および引張強度を文献<sup>3),4)</sup>から引用して記した。

本実験に使用した石灰石碎石の母岩強度は100~125N/mm<sup>2</sup>であり石材としてはかなりの高強度であるが、骨材として一般的に用いられる石灰石碎石の圧縮強度が110~200N/mm<sup>2</sup>とされていること<sup>1)</sup>から特に高強度のものを選んで使用したわけではない。

各石灰石碎石の CaO 含有率は 52~55%(純度 93~98%)と高純度であり、骨材用として用いられる石灰石碎石の標準的な値<sup>1)</sup>であった。

石灰石碎石の表乾密度は 2.69~2.71g/cm<sup>3</sup>と硬質砂岩碎石の 2.64g/cm<sup>3</sup>より高く、吸水率は 0.34~0.71%と硬質砂岩碎石より 0.82%程度低く緻密と言える。実積率および粒形判定実積率はそれぞれ 59.0%以上、59.5%以上と他の岩種の碎石と同等以上<sup>1)</sup>であった。

石灰石碎石の 400kN 破砕値は 21.1~23.1%と、10.2%の硬質砂岩碎石のほぼ倍であった。400kN 破砕値の一般値は石灰石碎石で 16.8~25.6%<sup>1)</sup>、

硬質砂岩碎石では 10.9~18.4%<sup>1)</sup>となっており、前述の母岩強度と併せて考えると、本実験に用いた硬質砂岩碎石は良質の部類にあるものといえる。

点載荷圧裂試験により得られた石灰石碎石の引張強度は、Ga が 14.8N/mm<sup>2</sup>他の Bu,Fu,Tu の 9.2~10.1N/mm<sup>2</sup>に比較し高かった。硬質砂岩碎石のそれは 20.5N/mm<sup>2</sup>であった。コア供試体による引張強度と碎石の点載荷圧裂試験による引張強度を比較すると点載荷圧裂試験の値が若干高くなっている。これは点載荷圧裂試験が破砕された碎石を試料とし、節理等が除去されていることによると思われる。点載荷圧裂試験は供試体成形が要らず比較的簡単にできることから碎石の強度を知る有用な方法と評価できる。

図-1に 400kN 破砕値と骨材強度の関係を示す。石灰石碎石と硬質砂岩碎石との違いという視点で見れば 400kN 破砕値と骨材強度は相関しているが、石灰石碎石4種類で見ると両者の間に明確な相関は見られなかった。

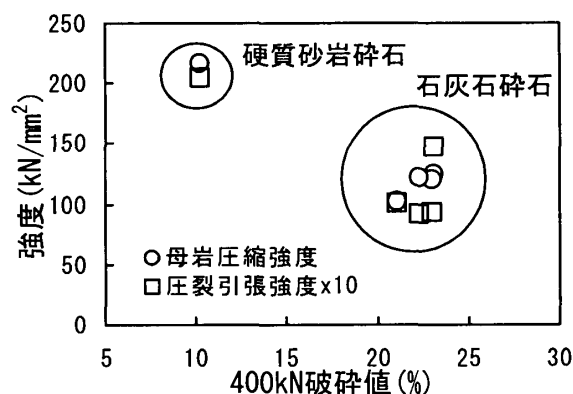


図-1 400kN 破砕値と骨材強度の関係

表-1 石灰石碎石ならびに硬質砂岩碎石の物性

碎石 記号	岩質 岩種	母岩		CaO 含有量 (%)	表乾 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定 実積率 (%)	400kN 破砕値 (%)	引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )							
Ga	緻密質 石灰岩	124.5 <sup>3)</sup>	9.9 <sup>3)</sup>	54.9	2.70	0.60	59.0	59.5	23.1	14.8
Bu		120.6 <sup>3)</sup>	8.3 <sup>3)</sup>	54.5	2.71	0.34	61.0	60.3	23.0	9.3
Fu		103.0 <sup>3)</sup>	---	52.6	2.69	0.71	61.6	62.7	21.1	10.1
Tu		122.6 <sup>3)</sup>	7.8 <sup>3)</sup>	55.2	2.70	0.48	60.9	59.7	22.3	9.2
Iw	硬質砂岩	216.4 <sup>4)</sup>	---	---	2.64	0.82	60.5	60.6	10.2	20.5

注) 文献3)の母岩強度はコア供試体による。

### 3. コンクリートの強度特性評価実験

#### 3.1 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。配合は、圧縮強度  $80\text{N/mm}^2$  以下の配合 N と  $140\text{N/mm}^2$  程度の超高強度である配合 H の 2 種類とした。

##### (1) 配合 N

コンクリートの水セメント比は 35, 45 および 55% の 3 水準とし、いずれの水セメント比においてもスランプの目標値は  $12 \pm 1\text{cm}$  とした。碎石ごとに W/C55% の水準で目標スランプを満足するよう単位水量に定めた。他の水セメントの場合もここで定めた単位水量を用い、スランプは混和剤添加量により調整した。空気量はいずれの配合でも  $4.5 \pm 0.5\%$  となるよう AE 剤で調整した。W/C45% および 55% の水準は AE 減水剤を W/C35% の水準は高性能 AE 減水剤を用いた。

##### (2) 配合 H

コンクリートの W/(LC+SF) は 16%, 単位水量はいずれの碎石を用いた場合でも  $150\text{kg/m}^3$  とした。また空気量については、強度への影響を排除するために消泡剤を用いて 1% 以下となるようにした。

#### 3.2 使用材料

表-3に使用材料を示す。なお、配合 N では普

通ポルトランドセメント、配合 H では低熱ポルトランドセメントおよびシリカフュームを用いた。

#### 3.3 供試体の養生

配合 N のコンクリートは所定材齢まで  $20^\circ\text{C}$  水中養生とした。配合 H のコンクリートは、前養生 48 時間後、蒸気養生(最高温度  $85^\circ\text{C}$  で保持時間 48 時間)のものおよび所定材齢まで  $20^\circ\text{C}$  水中養生のものの 2 種類とした。

#### 3.4 試験項目

##### (1) 配合 N

圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)を材齢 7,28 および 91 日に、曲げ強度試験(JIS A 1106)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)は材齢 28 日に実施した。

##### (2) 配合 H

蒸気養生直後および、標準養生の供試体について材齢 28 および 91 日において圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。

また、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  の供試体に埋込み型ひずみゲージを設置し、石灰石碎石 Ga および硬質砂岩碎石 Iw を用いた場合の打設直後からの自己収縮も測定した。

表-2 コンクリートの配合条件

碎石の種類	配合 N				配合 H				
	W/C (%)	s/a (%)	目標値		W/(LC+SF) (%)	Vg ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	SF/(LC+SF) (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	
			スランプ (cm)	空気量 (%)				W	SP
Ga,Bu,Fu, Tu,Iw	55	45	12	4.5	16	0.33	10	150	$P \times 1.6\%$
	45	43							
	35	41							

注) Vg : 単位粗骨材絶対容積, LC+SF : 単位結合材量

表-3 使用材料

材料	種類	記号	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	密度 : $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
	低熱ポルトランドセメント	LC	密度 : $3.22\text{g}/\text{cm}^3$
混和材	シリカフューム	SF	密度 : $2.24\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	陸砂	S	表乾密度 : $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ , 吸水率 : 1.56%, 実積率 : 69.5%, 粗粒率 : 2.88
粗骨材	石灰石碎石 4 種類	Ga,Bu,Fu,Tu	粗骨材の最大寸法 : 20mm
	硬質砂岩碎石	Iw	その他物性は表-1 参照
混和剤	AE 減水剤	AE	リグニンスルホン酸系
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系

### 3.5 配合Nの試験結果

#### (1) 単位水量

図-2に各碎石の実積率およびスランプ 12cmを得るための単位水量を示す。石灰石碎石は硬質砂岩碎石(Iw)に比較し、少ない単位水量で目標のスランプが得られた。特に Fu は粒形判定実積率、実積率とも他のものより高く単位水量が約  $7\text{kg/m}^3$  少なかった。既往の研究では実積率 1%の増加が単位水量を 2~4%減少<sup>5)</sup> させるとしており、この単位水量の低下は実積率の寄与によるものと思われる。Ga は Bu および Iw と比較し、実積率は低いが単位水量の増加はなかった。

#### (2) 圧縮強度

図-3に碎石別にコンクリートの圧縮強度を示す。いずれの水セメント比においても、硬質砂岩碎石と石灰石碎石ともほぼ同等以上の強度発現を示した。水セメント比 45%までで比較した既往の研究<sup>6)</sup>と同様の結果が 35%まで確認できた。石灰石碎石は硬質砂岩碎石と比較すると骨材自体の強度は低いがそれでも  $100\text{N/mm}^2$  以上はあり、 $80\text{N/mm}^2$  レベルのコンクリートでは両者の骨材強度差はコンクリート強度に影響を与えていないといえる。

#### (3) 曲げ強度

図-4に碎石別の曲げ強度試験結果を示す。いずれの水セメント比においても石灰石碎石のものは硬質砂岩碎石のものより曲げ強度が高く、特に水セメント比が低くなるとこの傾向がより顕著となった。水セメント比 45~65%のコンクリートの曲げ強度は、石灰石碎石を用いた方が硬質砂岩碎石よりも曲げ強度が高くなるとされており<sup>6)</sup>、水セメント比が 35%までこれと同様の結果が得られた。

#### (4) 引張強度

図-5に碎石別に引張強度試験結果を示す。石灰石碎石のものは硬質砂岩碎石のものに比較し W/C55%ではほぼ同等であったが、W/C35%では産地によっては上回る結果となった。石灰石碎石を用いたコンクリートの引張強度は、曲げ強度と同様硬質砂岩碎石を用いた場合よりも高く

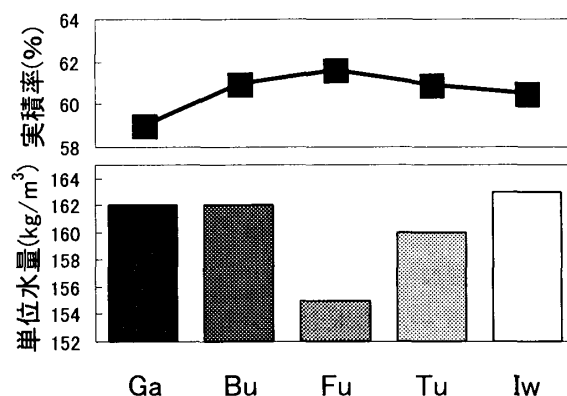


図-2 実積率および単位水量

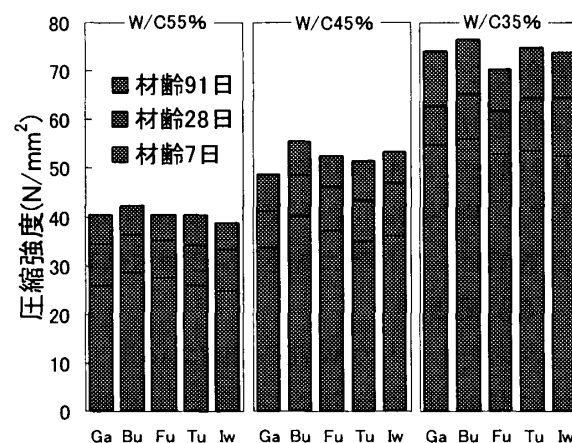


図-3 圧縮強度試験結果

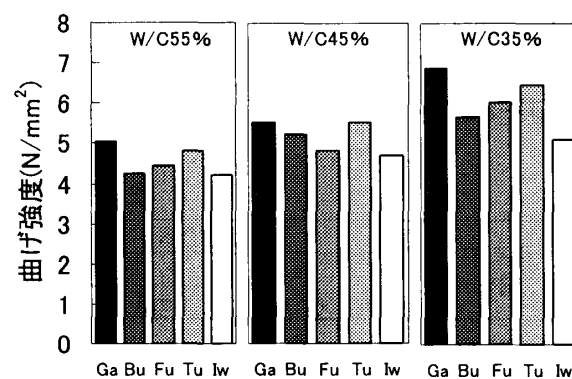


図-4 曲げ強度試験結果

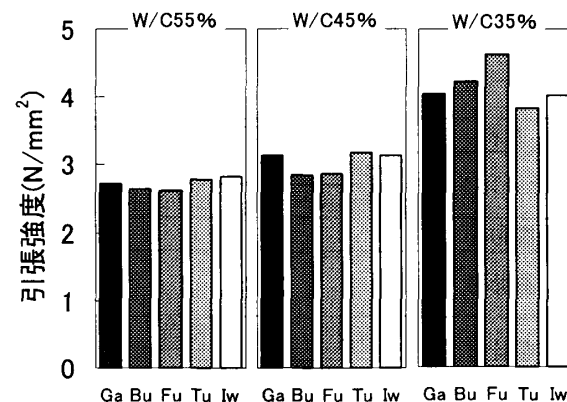


図-5 引張強度試験結果

なるとされているが<sup>6)</sup>、本実験では W/C35%を除き異なる結果を示した。

### (5) 圧縮強度と曲げ強度、引張強度の関係

図-6 に圧縮強度と曲げ強度の関係、図-7 に圧縮強度と引張強度の関係を示す。なお、図中の実線は硬質砂岩碎石の結果を回帰した線、破線は石灰石碎石 4 種類の結果の平均を回帰した線を示す。圧縮強度に対する曲げ強度および引張強度の割合は、石灰石碎石を用いた方が硬質砂岩碎石のものよりも大きくなる<sup>7)</sup>としたものや、ほぼ同等となる<sup>8)</sup>としたものがあるが、本実験の結果は同一圧縮強度で比較すると、石灰石碎石を用いたコンクリートの曲げ強度は硬質砂岩碎石を用いた場合と比較すると高くなり、引張強度は若干のバラツキがあるもののほぼ同等の値を示した。

### 3.6 配合 H の試験結果

図-8 に碎石別に超高強度コンクリートの圧縮強度を示す。蒸気養生を行った直後の強度は、石灰石碎石は硬質砂岩碎石よりも  $10 \sim 20 \text{ N/mm}^2$  低くなったものの、水中養生の材齢 28 日では  $2 \sim 13 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 91 日では同等か低下しても  $10 \text{ N/mm}^2$  以下にとどまり、超高強度コンクリートにおいても石灰石碎石を用いて硬質砂岩碎石コンクリートとほぼ同等の圧縮強度を得ることができると言える。なお、水結合材比 20% のコンクリートでの試験結果が過去に報告されており、石灰石碎石を用いたコンクリートの圧縮強度は、硬質砂岩碎石を用いた場合を大幅に上回る結果が示されている<sup>9)</sup>。また、高強度コンクリートにおいて骨材自体の圧縮強度や引張強度とコンクリートの圧縮強度は必ずしも対応しないこと<sup>10),11),12)</sup>も報告されている。以上より、本配合が低熱ポルトランドセメントを用いていることから材齢 91 日を設計基準強度と考えると、石灰石碎石でも  $150 \text{ N/mm}^2$  程度の高強度コンクリートにも十分に適用できるものと考えられる。

### 3.7 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-9 に、配合 N および配合 H のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。石灰

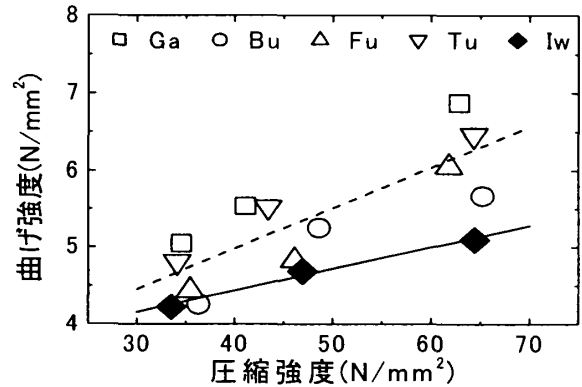


図-6 圧縮強度と曲げ強度の関係

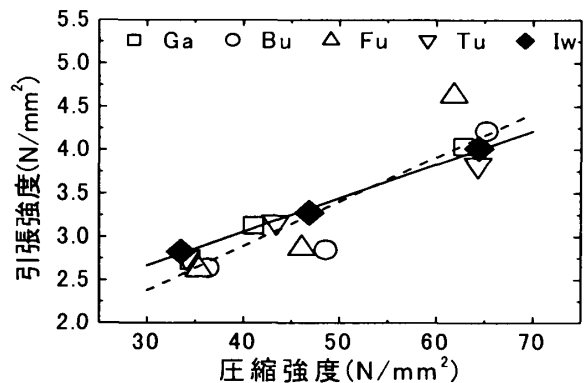


図-7 圧縮強度と引張強度の関係

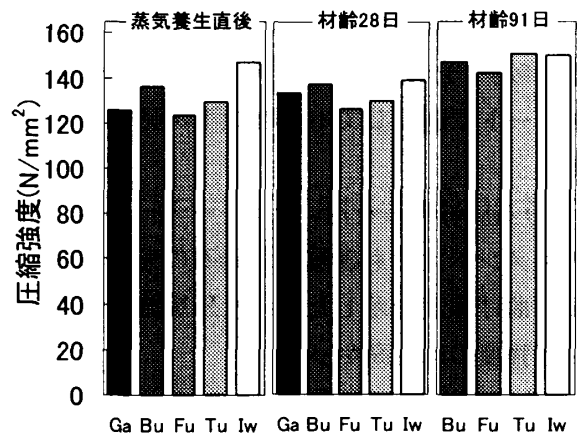


図-8 圧縮強度試験結果

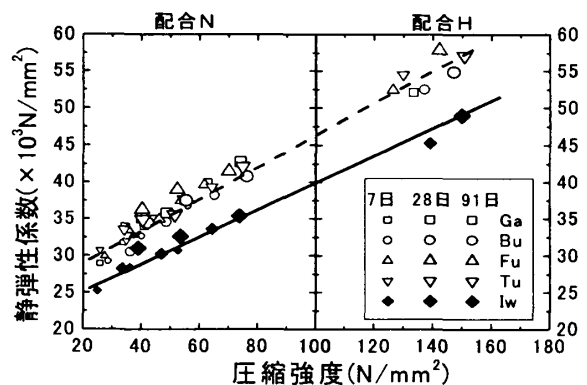


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

石碎石を用いたコンクリートは硬質砂岩碎石を用いた場合と比較すると、同一圧縮強度における静弾性係数が高くなった。石灰石碎石を用いたコンクリートの静弾性係数は、硬質砂岩碎石を用いた場合よりも高くなることは数多く報告されており、本実験も同様の結果となった。

### 3.8 自己収縮試験結果(配合 H)

図-10 に自己収縮試験結果を示す。石灰石碎石 Ga を用いたコンクリートの自己収縮は、硬質砂岩碎石 Iw を用いた場合の約 60% とかなり小さくなることがわかった。

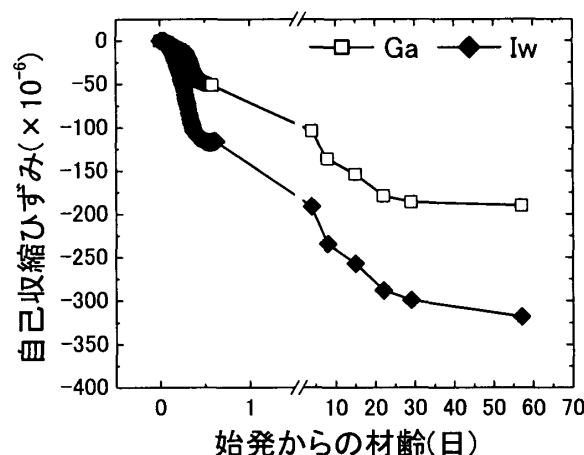


図-10 自己収縮試験結果

## 4. まとめ

本実験において 4 種類の石灰石碎石と良質な硬質砂岩碎石を比較し以下の結果が得られた。

(1) 石灰石碎石を用いたコンクリートは硬質砂岩碎石を用いたものに比較し目標スランプを得る単位水量が同等以下となった。

(2) 石灰石碎石を用いたコンクリートは、石灰石碎石が硬質砂岩碎石より低強度であったにも係わらず、 $150\text{N/mm}^2$  程度発現する超高強度コンクリートに適用しても強度低下が見られなかった。

(3) 石灰石碎石を用いたコンクリートは、同一水セメント比でも硬質砂岩碎石のものに比較し高い曲げ強度を示した。また圧縮強度に対する曲げ強度の比も高かった。

(4) 石灰石碎石を用いたコンクリートと硬質砂岩碎石のもの間に引張強度の差は見られなかった。

(5) 石灰石碎石を用いた超高強度コンクリートにおいて、その自己収縮は硬質砂岩碎石のもの約 60% とかなり小さかった。

## 参考文献

- 1) 石灰石鉱業会：石灰石骨材とコンクリート，pp.10-11，1989
- 2) 平松良雄ほか：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，Vol.81，No.932，pp.1024-1030，1965

- 3) 石灰石鉱業会：石灰石鉱山表(第7版)，1993.4

- 4) 梶尾 聡ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.65-70，2003

- 5) 長滝重義ほか：新体系土木工学 コンクリート材料，技報堂出版，1980

- 6) 大塩 明ほか：石灰石骨材を用いたコンクリートの基礎的諸物性，小野田研究報告，Vol.39-2，No.117，pp.108-120，1987

- 7) 大和竹史ほか：各種の砕砂および碎石を用いたコンクリートの諸特性，セメント技術年報，Vol.38，pp.277-280，1984

- 8) 庄谷征美ほか：石灰石コンクリートの品質特性に関する 2,3 の検討，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.122-127，1990

- 9) 安本礼持ほか：石灰石碎石を使用した高強度コンクリートの強度特性，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.479-485，2001

- 10) 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.30-33，1979.12

- 11) 森野奎二ほか：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 回年次学術講演会概要集，pp.914-915，1992.9

- 12) 桜本文敏ほか：超高強度コンクリートに関する開発研究 その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.495-496，1990.10