

石灰石コンクリートの強度・中性化特性

Durability of Limestone Aggregate Concrete

桑原 隆司*・西田 朗**・成田 一徳***

By Takashi KUWAHARA, Akira NISHIDA, Kazunori NARITA

1. はじめに

近年のコンクリート用天然骨材の枯渇化や自然環境保護を目的とする各種法規制の強化等が進行する中、コンクリート用骨材として砕石、砕砂の使用量が増加を続けており、特に石灰石を骨材として使用するケースが急増している。これらの背景のもと、本資源・素材学会や日本建築学会、土木学会、セメント協会など各学協会で骨材資源問題、環境問題等への取り組みが進められている。

表-1は、日本建築学会が1989～1990年に全国生コンクリート工業組合連合会の協力を得て、全国426社の生コンクリート工場に「コンクリート用骨材に関する実態」をアンケート調査した結果の一部である。1) 前回調査(1981年)から今回調査にかけて、河川等からの天然骨材の入手は益々困難になっており、一方、砕石・砕砂の使用件数は増加を続け、特に砕石はコンクリート用粗骨材の過半の件数を占めるに至っている。

また、土木学会が1989～1990年に行った「コンクリートの現状と将来」に関する調査活動の中では、表-2に基づき石灰石可採粗鉱量が約380億トンに上ることが示されている。2) さらに、土木建築向け骨材種別における石灰石の比率は、英国34%、米国28%に対して日本は6.6%と未だ少ない構成比率であることが示されている。これらは、石灰石のコンクリート用骨材としての使用量が今後更に増加してゆくであろうことを示唆している。

さらに、図-3は石灰石鉱業協会が石灰石用途別出荷量を通商産業省資源統計年報に基づきまとめたものを、3) 著者が図化したものである。図によると、全石灰石出荷量中に占めるコンクリート骨材用出荷量は、1970年代中頃迄はごく少量であったものが、1990年には15%を超える迄に(3,150万t)増加しており、この傾向は今後さらに続くものと判断される。

このような背景のもと、著者らは資源・素材学会建設用原材料部門委員会活動の一環として関係機関の協力を得て、国内産石灰石を骨材として使用したコンクリートの品質特性、特に強度・中性化特性を把握するための実験・検討を進めているので報告する。4)5)6)

表-1 生コンクリート用骨材の種類と割合

調査年	粗骨材の種類と割合 (%)					
	砕石	川砂利	陸砂利	山砂利	海砂利	その他
1981年	44.1	28.3	19.1	5.5	0.0	3.0
1989年	60.6	17.9	16.0	4.7	0.6	0.2
調査年	細骨材の種類と割合 (%)					
	砕砂	川砂	陸砂	山砂	海砂	その他
1981年	11.7	26.1	18.5	18.3	18.8	6.6
1989年	17.5	17.4	21.3	16.4	21.4	6.0

注) 建築学会資料¹⁾に基づき著者作表
割合は、調査件数に対する割合

表-2 石灰石埋蔵および可採粗鉱量一覧

調査鉱山数 326

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量	
	鉱量 (千t)	CaO (%)	鉱量 (千t)	CaO (%)
確定	11,867,143.1	54.2	9,727,102.5	53.9
確定	9,101,211.5	54.1	7,065,032.5	54.1
予想	36,845,691.3	54.3	21,239,067.5	54.3
計	57,814,045.9	54.2	38,031,202.5	54.2

注: 通商産業省資源エネルギー庁調査による。²⁾

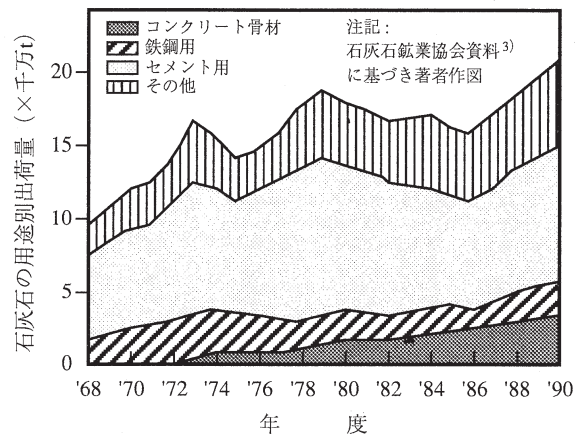


図-1 コンクリート用石灰石骨材の増加状態

* 清水建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒135 東京都江東区越中島3丁目4-17)

** 同 研究員 *** 同 主任研究員

2. コンクリートの材料・調合

実験で使用した各材料と調合を、以下に示す。

(1) セメント

セメントの種類：普通ポルトランドセメント

比重：3.14（生コン用は3.16）

ブレン値：3270 cm²/g（生コン用は3180 cm²/g）

(2) 骨材

実験に使用した骨材の一覧を表-3に示す。また、各骨材の化学分析値を表-4に、粗骨材・細骨材としての品質を表-5に示す。

石灰石はその生成した時代や産地等により成分の変動があるため、実験では典型的な石灰石骨材として、カルサイトを主成分とするもの（TR）とカルサイトにドロマイトを少量含むもの（GR）の2種類を使用した。

比較用の非石灰石骨材としては堆積岩系硬質砂岩（SG）を使用した。また、参考用として、安山岩（AN）とドロマイト系骨材（HN）を使用し、一部の試験では石灰石混合粗骨材を用いた生コンクリート（RM）も使用した。

(3) 混和剤

コンクリート用の混和剤として、AE減水剤標準型を使用した。

(4) コンクリートの調合

実験に使用したコンクリートの基本調合と生コンクリートの調合を表-6に示す。

基本調合は、水セメント比（W/C）を55%とし、目標スランプ18 cm、目標空気量4%として定めた。なお、基本調合における骨材重量は、表-7に示す骨材の組み合わせによって若干異なる。また、生コンクリートは、基本調合とほぼ同等のものをレデーミクストコンクリート工場から購入して使用した。

3. 実験計画

石灰石を粗骨材あるいは細骨材として使用したコンクリートと、石灰石骨材を使用せずに硬質砂岩等を使用したコンクリートの品質、とくに強度・中性化特性を比較検討する目的で、表-7に示した(1)~(7)の7通りの骨材の組み合わせのコンクリートを実験室で作り、以下の試験項目に基づき実験検討を進めた。なお、一部の試験項目については、表-7の(8)の生コンクリートを用いた試験も実施した。

(1) 強度試験

標準水中養生を行なったコンクリート供試体を、材令3, 7, 28日で圧縮強度試験し、あわせて弾性係数の測定を行なった。

また、材令3日まで標準水中養生を行ない、その後室内（東京都内）に置かれた供試体について、材令6ヶ月と1年で圧縮強度試験を行なった。

表-3 実験に使用した骨材

記号	内 容
TR	石灰石（カルサイト）
GR	石灰石（カルサイト+ドロマイト少量）
HN	ドロマイト（カルサイト少量含、参考用）
SG	硬質砂岩（堆積岩系）一般的な非石灰石骨材
AN	安山岩（火山岩系）参考用非石灰石骨材
RM	生コン（石灰石混合粗骨材使用）

表-4 骨材の化学分析値

記号	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%) 【T.Fe】
TR	55.7	0.31	0.00	0.00	0.00
GR	53.5	1.84	0.59	0.01	0.07
HN	41.3	12.1	0.40	0.08	0.19
SG	4.59	2.99	61.7	16.4	4.04
AN	1.01	1.11	70.0	14.7	2.52

表-5 骨材の品質

骨材	比 重	吸水率 %	洗い試験 %	粘土塊量 %	粗粒率 (F.M.)	
粗骨材	TR	2.71	0.24	2.15	1.25	6.53
	GR	2.71	0.32	0.53	0.30	6.66
	HN	2.78	0.44	0.82	0.55	6.71
	SG	2.67	0.89	0.46	0.13	6.65
	AN	2.61	2.10	0.67	0.35	6.55
	RM	2.67	0.50	0.35	0.00	6.67
細骨材	TR	2.63	1.35	6.59	0.97	2.61
	GR	2.65	1.33	6.14	3.41	3.08
	SG	2.62	1.95	3.50	1.09	3.07
	AN	2.54	2.92	3.53	1.76	3.19
RM	2.63	2.10	2.00	0.20	2.49	

表-6 コンクリートの調合

調 合	W/C %	スランプ cm	空気量 %	重量, kg/m ³			
				W	C	S	G
基本調合	55	18	4.0	180	327	833	959
生コン用	55	18	4.0	179	326	795	997

表-7 使用する骨材の組合せ

骨 材	組 合 せ No.							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
粗骨材	TR	GR	SG	SG	SG	AN	HN	RM
細骨材	SG	SG	TR	GR	SG	AN	SG	RM

なお、強度試験はJIS A 1108（コンクリートの圧縮試験方法）とJIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）に基づいて行なった。

コンクリート強度試験の状況を、写真-1に示す。

(2) 急速炭酸化試験

各コンクリートの中性化特性を相互に比較検討できるデータを、短時間で入手する目的で急速炭酸化試験を実施した。試験を行なうコンクリート供試体（10×10×20cm）は、材令14日まで標準水中養生を行ない、その後材令28日まで室温20℃、湿度60%RHの環境下で養生を行なった後、試験に供した。

急速炭酸化試験では、二酸化炭素（CO₂）100%で圧力0.39MPa（4kgf/cm²）の圧力容器内にコンクリート供試体を入れ、容器内で20時間と40時間の高圧下における促進炭酸化を行なった。その後、供試体を取り出し割裂して、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧し中性化深さを測定した。なお、No(6)と(8)のコンクリートは、急速炭酸化の時間を40時間の一水準のみで試験を行なった。

試験装置と試験方法概要を、写真-2と図-2に示す。

(3) 中性化試験

材令3日まで標準水中養生を行ない、その後材令6か月と1年まで室内に置かれたコンクリート供試体について、強度試験終了後に供試体を割裂し、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧し中性化深さを測定した。

中性化試験の状況を、図-3に示す。

(4) 水酸化カルシウムの定量

強度試験と中性化試験を終了したコンクリート供試体を用いて熱分析を行ない、ここで試料中の骨材の影響を補正し、セメントペースト中の水酸化カルシウムCa(OH)₂量を求めた。

4. 実験結果と検討

4.1 フレッシュコンクリートの性質

実験に使用したコンクリートの、フレッシュな状態における性質を表-8に示す。

スランプ値は18cmを目標としたが、石灰石骨材を使用した(1)~(4)のコンクリートは全て大きめの値を示しており、特に石灰石を細骨材として使用した(3)と(4)のコンクリートは大きめの値を示している。この傾向は、同一スランプを得るためのコンクリート中の単位水量は、石灰石コンクリートが一般の山砕石コンクリートよりも小さいとする既往の知見の妥当性を示している。

また、コンクリート中の空気量は4%を目標としたが、硬質砂岩を用いた(5)に対して石灰石骨材を使用した(1)~(4)のコンクリートは全て大きめの空気量を示した。この傾向は、石灰石骨材を用いたコンクリートでは空気が入り易いとする既往の知見の妥当性を示している。

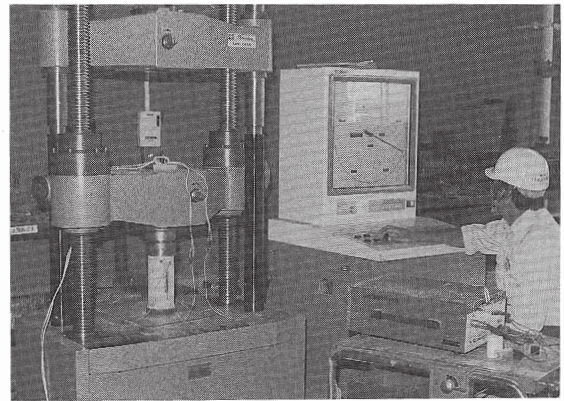


写真-1 圧縮強度試験の状況

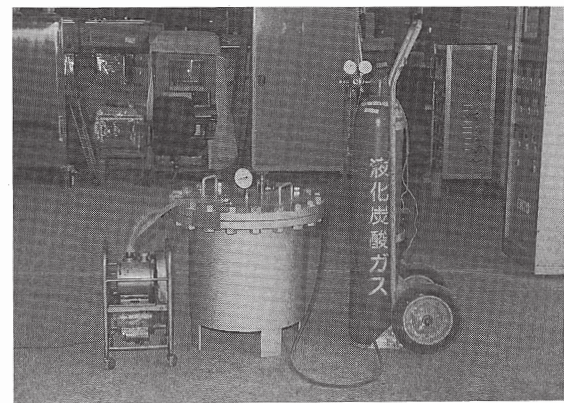


写真-2 急速炭酸化試験装置

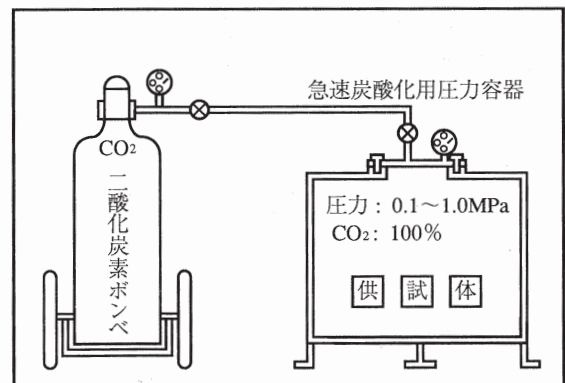


図-2 急速炭酸化試験方法

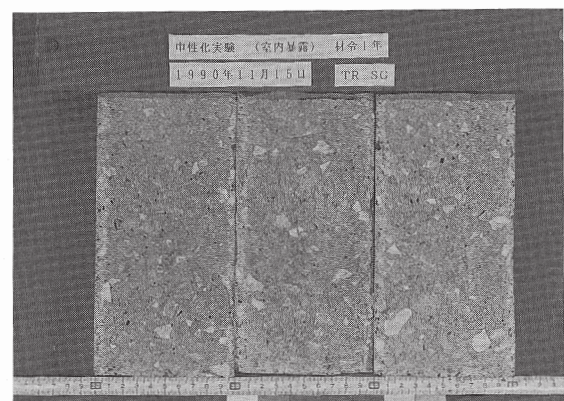


写真-3 室内試験体の中性化試験

4.2 強度特性

各コンクリートの圧縮強度試験結果を図-3に示す。

図-3における材令28日迄のコンクリートは標準水中養生を行ない、材令6カ月と1年のものは材令3日以降室内に置かれたが、実験結果によるといずれの場合も石灰石骨材を用いた(1)~(4)のコンクリートは、堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)のコンクリートと大略同程度の強度発現を示している。また、火山岩系安山岩を用いた(6)のコンクリートと石灰石骨材を用いた(1)~(4)のコンクリートを比べると、特に材令7日までの若材令時に石灰石骨材を用いたコンクリートは高めの強度を示している。

石灰石骨材を用いたコンクリートの強度発現に関する既往の報告では、川砂利、山碎石を用いたコンクリートと同程度かそれ以上の強度を示すようであるとされているが、本実験結果はそれを裏付けるものとなっており、特に材令7日迄の若材令時には若干高めの強度発現を示す傾向が認められる。

4.3 弾性係数

各コンクリートの弾性係数測定結果を、図-4に示す。

図-4によると、石灰石骨材を用いたコンクリートの弾性係数は、堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)のコンクリートと同等以上の値を示しており、また火山岩系安山岩を用いた(6)のコンクリートと比べると20~30%程度大きな値を示している。

石灰石骨材を用いたコンクリートの弾性係数に関する既往の報告では、川砂利、山碎石を用いたコンクリートと同等以上の値を示すとされており、本実験で得られた結果と一致する。なお、石灰石骨材を用いたコンクリートの弾性係数が、他の骨材を用いたコンクリートよりも大きめの値を示す理由としては、石灰石骨材表面部におけるセメント水和生成物の付着が他の骨材の場合よりも強固であることなどが推察される。

4.4 水酸化カルシウム

各コンクリートのセメントペースト中に含まれる水酸化カルシウムの定量結果を図-5に示す。

図-5によると、セメントペースト中に含まれる水酸化カルシウムの量は、ばらつきはあるものの、材令の進行とともに増加する傾向にあり、図-3に示した各コンクリートの強度発現と比較的類似した傾向が認められる。

また、石灰石骨材を用いた(1)~(4)とドロマイト系骨材を用いた(7)のコンクリートのセメントペースト中に含まれる水酸化カルシウムの量は、堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)や火山岩系安山岩を用いた(6)における水酸化カルシウムの量よりも大きな値を示した。なお、石灰石骨材やドロマイト系骨材では、表-4に示したように、他の骨材よりも多くのカルシウム分を含んでいるが、その事がセメントペースト中に含まれる水酸化カルシウムの量に影響を与えているか否かについては明らかでない。

表-8 フレッシュコンクリートの性質

骨材の組合せ	スランブ cm	空気量 %	単位容積重量 kg/m ³	コンクリート温度 °C
(1) TR-SG	19.1	4.6	2294	20.0
(2) GR-SG	18.8	5.0	2299	20.2
(3) SG-TR	20.0	5.2	2287	19.9
(4) SG-GR	21.5	5.8	2275	20.1
(5) SG-SG	18.8	4.1	2294	20.0
(6) AN-AN	19.5	5.2	2234	21.0
(7) HN-SG	19.1	4.4	2236	20.0
(8) RM-RM	17.5	4.8	2244	23.0

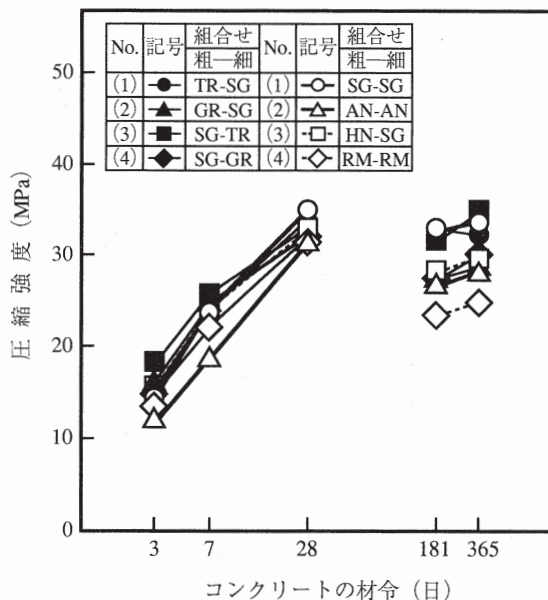


図-3 各コンクリートの強度発現

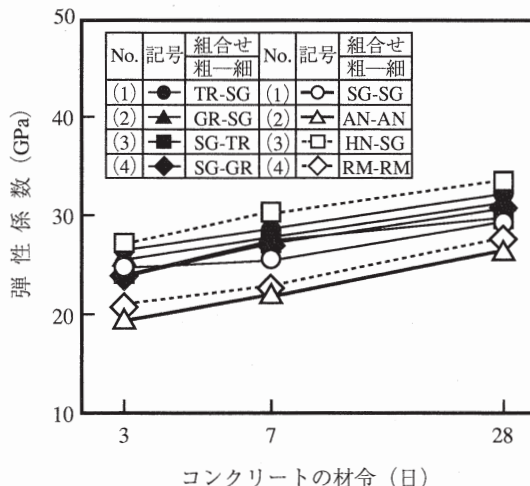


図-4 各コンクリートの弾性係数

4.5 急速炭酸化

各コンクリートの急速炭酸化試験結果を図-6に示す。

図-6によると、石灰石骨材を用いた(1)~(4)のコンクリートと非石灰石骨材である堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)のコンクリートの中性化深さは顕著な差を示していない。すなわち、急速炭酸化の時間が20時間の場合で、(1)~(4)のコンクリートと、堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)のコンクリートの中性化深さ(4.1mm)との差は全て1mm以内となっている。また、急速炭酸化の時間が40時間の場合で、(1)~(4)のコンクリートと堆積岩系硬質砂岩を用いた(5)のコンクリートの中性化深さ(7.1mm)との差は、全て2mm以内となっている。

以上の急速炭酸化試験結果に基づくと、我が国の石灰石骨材と非石灰石骨材を用いたコンクリートの炭酸化(中性化)特性には顕著な差はなく、大略同程度と見なすことが可能と推察される。

4.6 中性化特性

室内に置かれた各コンクリート供試体の中性化試験結果を、図-7示す。

ここで、コンクリートの大気中における一般的な中性化進行速度について、日本建築学会建築工事標準仕様書(JASS 5)で用いられている下記の岸谷孝一博士の式(8)に基づき試算を行なう。

水セメント比 x が 60%以下のとき

$$y = \frac{7.2}{R^2(4.6x' - 1.76)^2} c^2 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、

y : c まで中性化する期間(年) c : 中性化深さ(cm)

x : 強度上の水セメント比(%) x' : $x/100$

R : 中性化率(コンクリートの種類や環境条件等から決まる値)

本実験条件に基づくと、 $x'=0.55$ であり、また、仕上げのない普通ポルトランドセメント使用コンクリートを屋内に置いたこと等から $R=1.5\sim 3.0$ となるので、この値を(1)式に代入して6カ月後と1年後の中性化の進行を求める。

上記の試算結果によると、6カ月後の中性化深さは約3.0~6.1mm、1年後の同予測値は約4.3~8.6mmとなり、図-7の各コンクリートの実験値はいずれもこの範囲内にあり、特に異常は認められない。

また、図-7における石灰石骨材を用いたコンクリートと非石灰石骨材を用いたコンクリートの中性化深さを比較しても、両者の間に明瞭な差異は認められず、両者はほぼ同程度の値を示している。

これらの結果と、「4.5 急速炭酸化」における試験結果とを合わせて判断すると、石灰石骨材を用いたコンクリートの中性化(炭酸化)特性は、硬質砂岩などの非石灰石骨材を用いたコンクリートとほぼ同程度の性質を示すものと判断される。

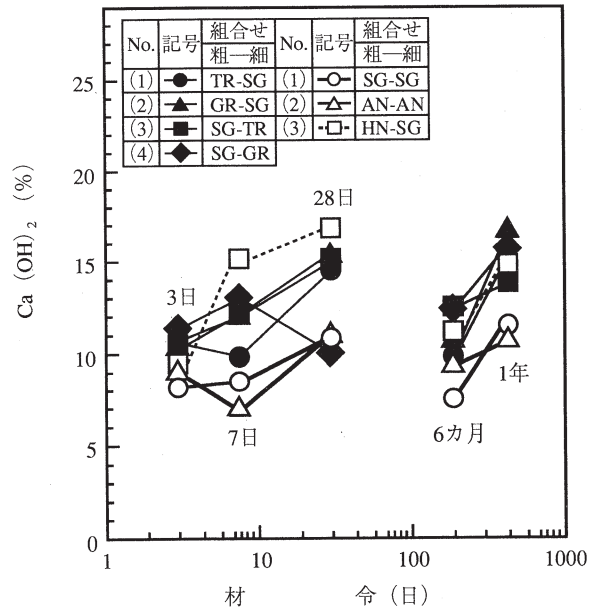


図-5 水酸化カルシウムの定量結果

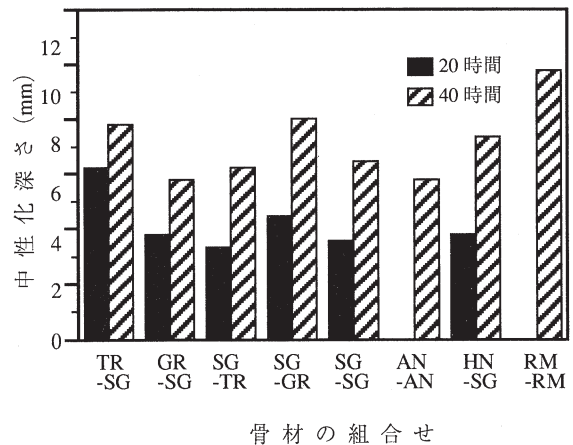


図-6 急速炭酸化試験結果

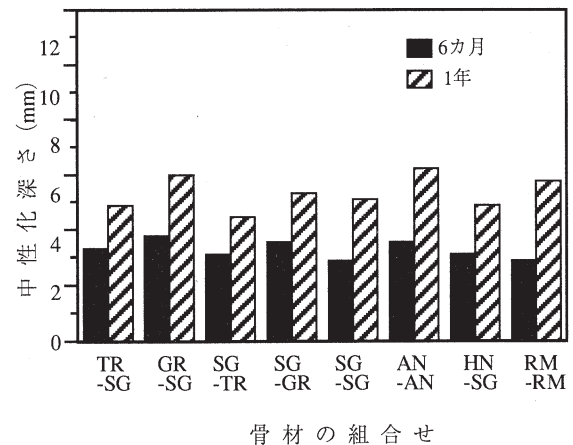


図-7 室内試験体の中性化試験結果

5. まとめ

コンクリート用天然骨材の枯渇化や自然環境保護を目的とする各種法規制の強化等が進行中、コンクリート用骨材として石灰石を使用するケースが急増していることなどから、国内産石灰石を使用したコンクリートの品質特性、特に強度・中性化特性を把握するための実験・検討を進めた。

本実験の範囲で得られた結果を、以下に要約する。

- (1) 石灰石を骨材として用いたコンクリートの中性化（炭酸化）特性は、急速炭酸化試験および室内に置かれたコンクリートの中性化試験のいずれの結果からも、硬質砂岩などの非石灰石骨材を用いたコンクリートとほぼ同程度の性質を示すものと判断される。
- (2) 石灰石を骨材として用いたコンクリートの強度発現は、非石灰石骨材を用いたコンクリートと比べて同程度またはそれ以上の値を示す。特に、コンクリート打ち込み後材令7日迄の若材令時には高めの強度を示す。
- (3) 石灰石を使用したコンクリートの弾性係数は、非石灰石骨材を用いたコンクリートの弾性係数と同等以上の大きめの値を示す。
- (4) 各コンクリートのセメントペースト中に含まれる水酸化カルシウムの量は、材令の進行と共に増加する傾向にある。また、その量は、骨材中にカルシウム分を多く含む石灰石やドロマイト系骨材を使用したコンクリートで大きめの値を示す傾向にある。
- (5) 石灰石を使用したコンクリートのスランプと空気量は、同一調合の非石灰石骨材を用いたコンクリートの値よりもやや大きめの値を示す。

【 謝 辞 】

本論文は、(社)資源・素材学会建設用原材料部門委員会活動の一環として、(財)鉄道総合技術研究所、日鉄鉱業(株)と清水建設(株)の三社で進めている共同研究の内容を取りまとめたものである。ここに、(社)資源・素材学会建設用原材料部門委員会委員長 岩崎孝早稲田大学教授、(財)鉄道総合技術研究所 立松英信室長、佐々木孝彦研究員、日鉄鉱業(株) 小川敬三部長に深く感謝致します。

また、コンクリート用骨材全般に関して、日本建築学会骨材小委員会主査 重倉祐光東京理科大学教授に御教示戴き、土木学会、セメント協会、石灰石鉱業協会の関係各位からは貴重な資料、情報の提供を戴いた。

ここに、関係各位に深く謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会材料施工委員会 : コンクリート用骨材に関する実態調査報告書、同委員会資料、1990年12月
- 2) 土木学会コンクリート委員会 : コンクリートの現状と将来、土木学会コンクリートライブラリー68、1991年3月
- 3) 石灰石鉱業協会 : 石協だより、同協会、1991年6月、他
- 4) 桑原・成田・西田 : 骨材資源シンポジウム'90 (沖縄) 骨材資源工学会、1990年11月
- 5) 桑原・西田・立松・佐々木 : 日本建築学会大会学術講演梗概集、日本建築学会、1990年10月、1991年9月
- 6) 西田・桑原・成田 : 第45回セメント技術大会講演集、セメント協会、1991年5月
- 7) 石灰石鉱業協会 : 石灰石骨材とコンクリート、1989年7月
- 8) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS5)、日本建築学会、1991年7月