

# 石灰石を用いたコンクリートの強度・中性化について

## COMPRESSIVE STRENGTH AND CARBONATION OF LIMESTONE AGGREGATE CONCRETE

成田 一徳\*・西田 朗\*\*・桑原 隆司\*\*\*  
by Kazunori NARITA, Akira NISHIDA,  
and Takashi KUWAHARA

### 1. はじめに

コンクリート用天然骨材の枯渇化や自然環境保護に関する各種法規制等から、コンクリート用骨材として、碎石、砕砂の使用量が増加し、その中で、石灰石骨材の使用が増加している。これらの背景のもと、本資源・素材学会や建築学会、土木学会、セメント協会など各方面で骨材資源、環境問題等への取組みが進められている。

例えば、1992年8月の建築学会大会の材料施工研究協議会<sup>1)</sup>では、骨材資源問題が官民学共通の大きな課題として討議された。

表-1は、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。<sup>2)</sup> 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、一方碎石・砕砂の使用が増加し、特に碎石は粗骨材の過半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」の調査では、表-2のように石灰石採粗鉱量が約380億トンに上ることが示されている。<sup>3)</sup> 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%と少ない構成比率である。

さらに、図-3は石灰石鉱業協会の石灰石用途別出荷量を、<sup>4)</sup> 著者が図化したものである。全石灰石出荷量に占めるコンクリート骨材用出荷量は、1970年代中頃までは少量であったものが、1992年には15%(3,150万t)を越える迄に増加し、今後も続くものと推定されている。

しかし石灰石は将来資源として残すべきとの意見もある。

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、国内産石灰石を使用したコンクリートの品質特性、主に強度・中性化特性を把握するための実験を行ったので、その結果を報告する。<sup>5) 6) 7)</sup> なお、本報告は前報告<sup>8)</sup>の1年までの結果に、実験最終材令3年の結果を加えたものである。

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<sup>2)</sup>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

	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

調査鉱山数 326

注: 通商産業省資源エネルギー庁調査による。<sup>3)</sup>

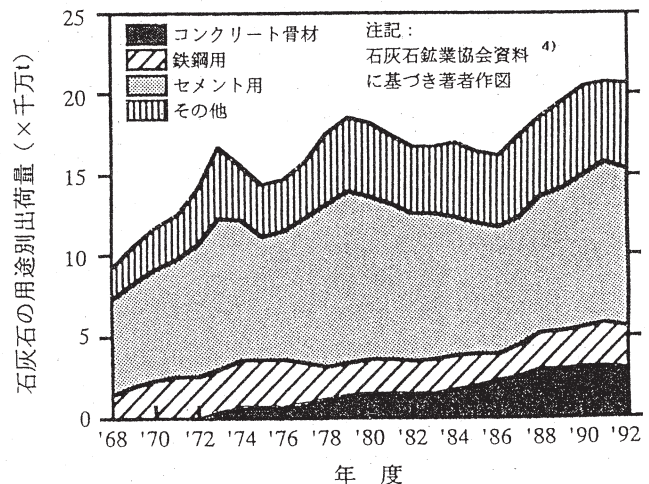


図-1 コンクリート用石灰石骨材の増加状態

\* 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・調査

実験で使用した材料と調査を以下に示す。

### (1) セメント

セメント種類：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：3270cm<sup>2</sup>/g(生コン用は3180cm<sup>2</sup>/g)

### (2) 骨材

実験に使用した骨材種類の一覧を表-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

混和剤として、AE減水剤標準型を使用した。

### (4) コンクリートの調査

実験に使用したコンクリートの基本調査と生コンクリートの調査を表-6に示す。

基本調査は、水セメント比(W/C)を55%とし、目標スランプを18cm、目標空気量を4%とした。なお、基本調査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、基本調査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、特に強度・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製し、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(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

標準水中養生を行ったコンクリート供試体について、材令3, 7, 28日で圧縮強度試験をし、あわせて弾性係数の測定を行った。

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)に養生した供試体について、材令6カ月、1年および3年で圧縮強度試験を行った。

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 <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) 【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 コンクリートの調査

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

表-7 使用した骨材の組合せ

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

## (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するデータを、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(10×10×20 cm)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った後、試験に供した。

急速炭酸化試験では、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>) 100%で圧力0.39MPa(4 kgf/cm<sup>2</sup>)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時間の水準のみで試験を行った。

試験装置と試験方法概要を図-2に示す。

## (3) 中性化試験

コンクリート供試体は材令3日まで標準水中養生を行い、その後材令6か月、1年、3年まで室内に養生した。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写真-1に示す。

## (4) 水酸化カルシウムCa(OH)<sub>2</sub>の定量

強度試験および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った。

供試体の半分を粗破碎し、粗骨材を取り除き、105 μ以下の試料として、熱分析装置で10℃/分で1000℃まで昇温した。熱分析に供した試料にはセメントペーストの他に骨材が混入している。測定されるCa(OH)<sub>2</sub>はセメントの水和過程で生ずるので、生成量を比較するために、まず試料量に占めるセメントペーストの量を求め、後にセメントペーストに対する生成Ca(OH)<sub>2</sub>の比率を求めた。なお3年予定は測定装置の関係から3年9か月で行った。

## 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。

スランブ値は18cmを目標にしたが、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、同一スランブ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<sup>9)</sup>の妥当性を示している。

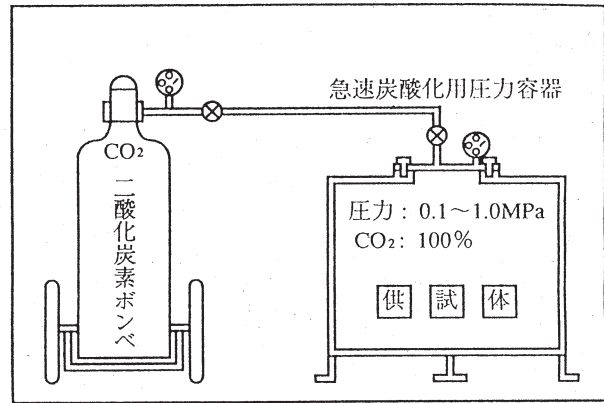


図-2 急速炭酸化試験方法

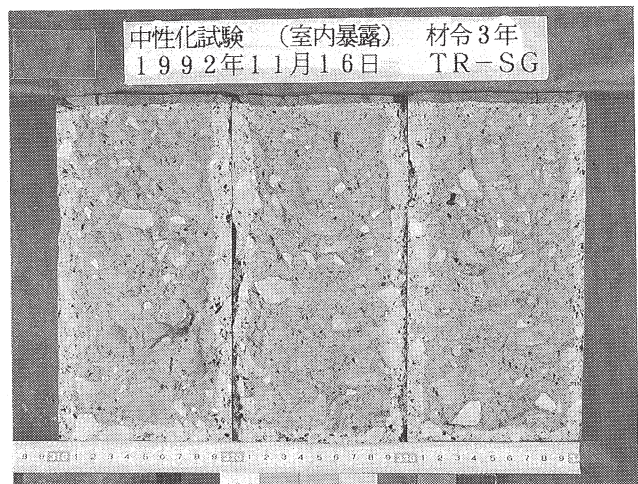


写真-1 室内試験体の中性化試験

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 <sup>3</sup>	コンクリート温度 ℃
(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

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)のコンクリートはすべ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やすいとする既往の知見<sup>9)</sup>の妥当性を示している。

4.2 圧縮強度

各コンクリートの圧縮強度試験結果を図-3に示す。

図-3において材令28日迄のコンクリートは標準水中養生を行い、材令6ヶ月、1年および3年のものは材令3日以後室内に養生した。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<sup>9)</sup>、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とされているが、本実験はそれを裏づけるものとなっている。材令6ヵ月から3年までは室内養生のためコンクリート種別にかかわらず、強度の伸びはわずであった。

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)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<sup>9)</sup>、川砂利、山碎石を用いたコンクリートと同程度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 Ca(OH)<sub>2</sub>

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、水酸化カルシウムの量は、バラツキがあり、材令の進行とともにやや増加する傾向であるが、1年以後低下するものもあり、材令との関係はそれ程明らかではなかった。

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若干大きな値を示した。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ため、そのことがセメントペーストに含まれる水酸化カルシウム量に影響を与えたと推定される。

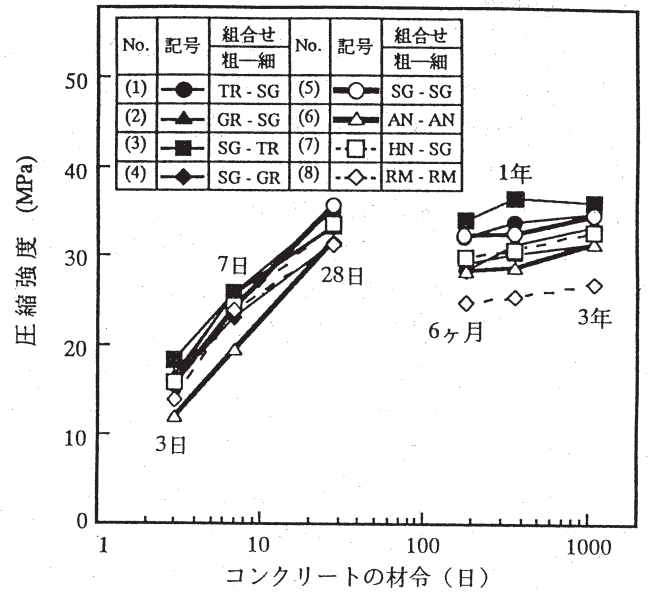


図-3 各コンクリートの強度発現

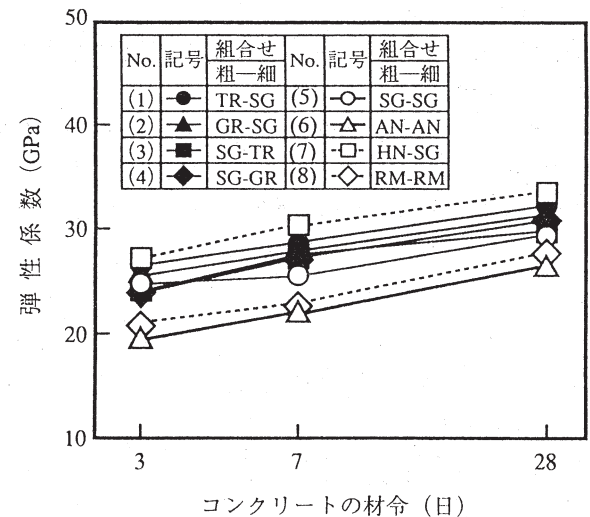


図-4 各コンクリートの弾性係数

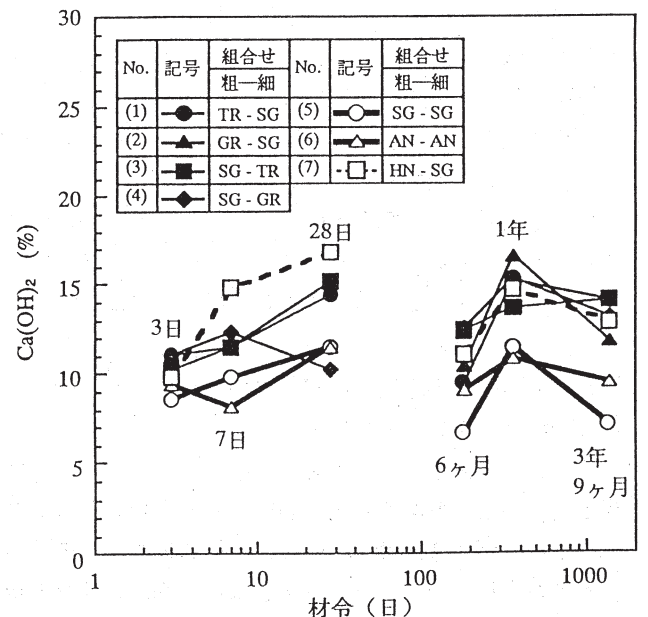


図-5 水酸化カルシウムの定量結果



#### 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、急速炭酸化深の時間が40時間の場合で、(1)~(4)のコンクリートと堆積岩を用いた(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。

急速炭酸化試験に基づくと、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)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

室内に置いた各コンクリート供試体の中性化試験結果を図-7に示す。

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(JASS5)の岸谷博士の式<sup>10)</sup>に基づき試算を行う。

水セメント比 $x$ が60%以下のときは次のようになる。

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

ここに

$y$ :  $c$ まで中性化する時間(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等から決まる値)

本実験に基づくと、 $x' = 0.55$ 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場合には $R = 1.5 \sim 3.0$ であるので、この値を(1)式に代入して6カ月、1および3年の中性化を求める。

試算結果によると、6カ月の中性化深さは約3.3~6.6mm、1年予測値約4.3~8.6mm、3年予測値約7.5~14.9mmとなり、図-7の各コンクリートの測定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、両者の間の明瞭な差は認められず、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。

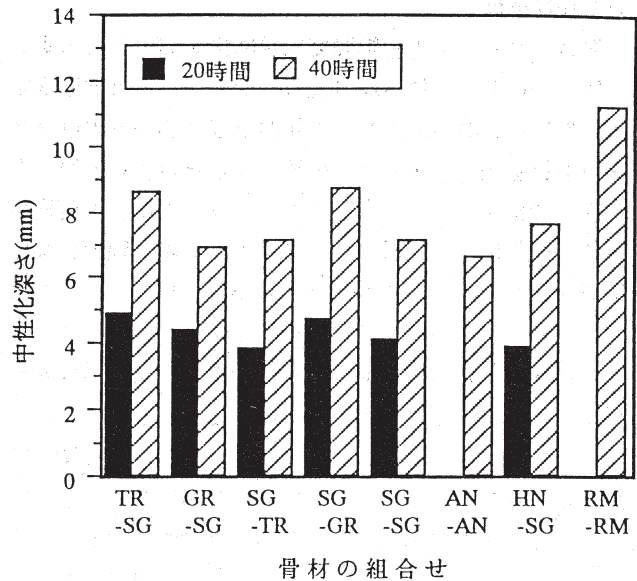


図-6 急速炭酸化試験結果

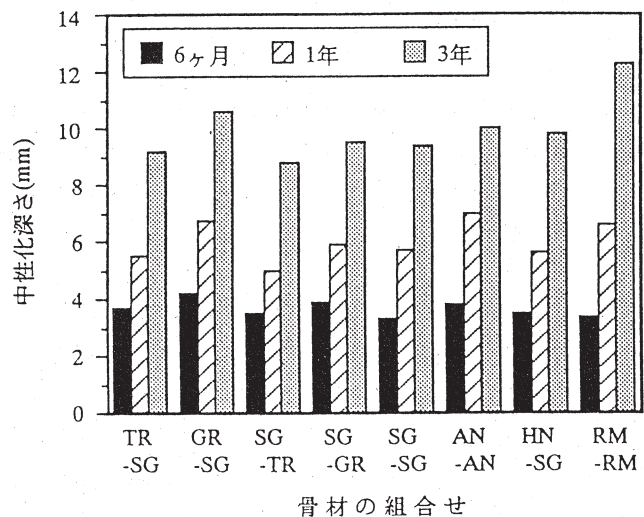


図-7 室内試験体の中性化試験結果

#### 4.7 圧縮強度と中性化深さの関係

図-8に、材令6カ月、1年および3年の圧縮強度とその時点の中性化深さの関係を示す。

図-8によると、材令1年、3年においては、その圧縮強度が大きいほど中性化深さは小さいものとなっており、骨材の種類による傾向の違いは認められない。

材令6カ月においては中性化深さが小さいこともあり強度と中性化の相関性は確認できなかった。

既往の研究では、中性化の進行と強度は高い相関性があり<sup>11)</sup>、特に部材の脱型時強度が中性化の進行に及ぼす影響が大きいといわれており、本実験の材令1年、3年の結果も一致した傾向を示した。

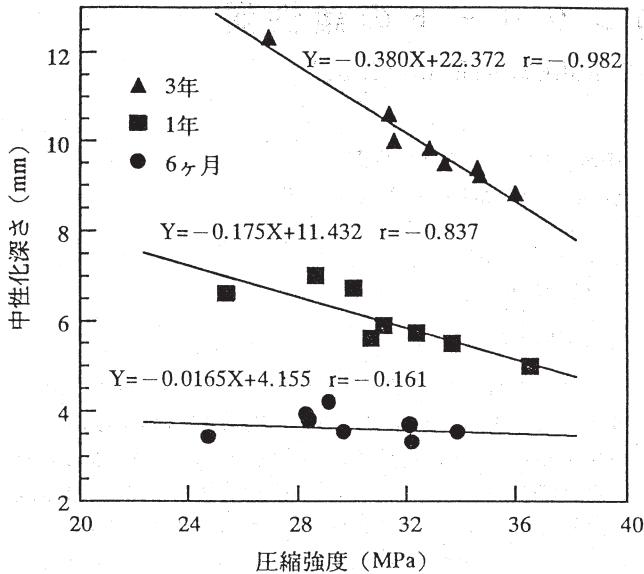


図-8 圧縮強度と中性化深さ

## 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に関する各種法規則等から、コンクリート用骨材として、碎石・砕砂、また石灰石を使用するケースが増加している。

このため、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・中性化を把握するための実験的検討を行った。

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養生し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傾向がある。また、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傾向がある。
- (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、バラツキがあるが、材令の進行と共にやや増加する傾向がある。その量は、骨材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がある。
- (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傾向がある。

## 〔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)の三社で進めた共同研究をとりまとめたものである。

研究遂行には(財)鉄道総合技術研究所 立松英信次長、佐々木孝彦研究員、日鉄鉱業(株)小川敬三前部長、山田尚男副部長の協力を得ました。また、コンクリート用骨材全般に関しては、岩崎孝 早稲田大学教授、重倉祐光 東京理科大学教授に御教示を戴き、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 : 1992年度大会材料施工研究協議会「コンクリート用骨材をめぐる諸問題」
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 石灰石鉱業協会: 石協だより、同協会、1993.6月、他
- 5) 桑原・成田・西田 : 骨材シンポジウム'90(沖縄) 骨材資源工学会、1990年11月
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 桑原・西田・成田 : 建設用原材料 Vol.1 No.2 1991
- 9) 石灰石鉱業協会: 石灰石骨材とコンクリート、1989.7
- 10) 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
- 11) (社) 建築業協会 : 合理的な初期養生方法に関する研究報告書 1989