

[50] コンクリートの諸特性に及ぼす炭酸化の影響に関する研究

正会員 尼崎省二 (立命館大学理工学部)

1. まえがき

近年、老朽化した鉄筋コンクリート構造物が多くなっており、これら構造物の耐久性評価に関心が高まっている。しかしながら、長期材令コンクリートの品質を非破壊的に評価する方法は確立されていないのが現状である。これはコンクリートの炭酸化(中性化)に伴う品質変化が明らかになっていないためであると思われる。そのため、反発硬度法により長期材令コンクリートの品質を評価する場合には、表面の炭酸化層を取り除くことがBS, ASTM, RILEM等に示されている。

コンクリートの炭酸化深さに関する研究は鉄筋コンクリート構造物の耐久性の観点から数多くの研究がなされているが、炭酸化がコンクリートの諸特性に及ぼす影響についての研究は数少ないのが現状である。一方、鉄筋の錆を考慮しなくても良いプレキャストコンクリート製品を人工的に炭酸化させて、炭酸化コンクリートの特性を利用しようとする研究が盛んになりつつある^{1), 2)}。本研究は非破壊試験の精度を良くすることを目的として、コンクリートの強度、反発硬度等に及ぼす炭酸化の影響について炭酸化促進実験により検討したものである。

2. 実験の概要

表-1: コンクリートの示方配合

実験は表-1の示方配合により作製したコンクリート及び5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルについて実施した。使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、細骨材が野洲川産川砂(比重2.65、吸水率1.90%、粗粒率2.70)を2.5mmでふるい分けしたもの、粗骨材が高槻産の硬質砂岩砕石(比重2.69、吸水率0.70)である。尚、水中養生

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単体量 (kg/m ³)				備考 水中養生期間
					W	C	S	G	
20	7~9	4±1	4.5	3.7	172	382	620	1125	1 週
			5.5	3.9		313	675	1125	
			6.5	4.1		265	737	1119	
			7.5	4.3		229	773	1093	
			6.5	4.4		265	794	1064	4 週

4週のコンクリートに用いた細骨材は2.5mmふるいでふるい分けはしていない。供試体は強度測定用にφ10×20cm(モルタルはφ5×10cm)、反発硬度測定用に20cm立方体を用い、材令1週間迄の水中養生(20±2°C)後、材令63日まで恒温恒湿室(20±2°C, 90±5%RH)に保管した。其の後、炭酸ガス濃度20%を含む気密室(常温, 50%RH)で炭酸化促進試験を行った。気密室内部の空気はファンで攪はんし、炭酸ガス濃度は1日1回の検知器による手動制御とした。比較のため、外気の出入りの無い密閉養生(常温)及び実験室内養生も行った。更に、前養生条件の相違が炭酸化コンクリートの性状に及ぼす影響を調べるために、材令4週間迄の水中養生後、約13週間恒温恒湿室に保管した供試体についても炭酸化促進試験を行った。

試験は炭酸化促進材令4, 12, 20週で実施した。材令20週での試験終了後、各供試体を1週間程度水中に浸漬し、各特性に及ぼす湿潤の影響も調べた。測定項目は重量、静・動弾性係数、強度、反発硬度及び炭酸化の程度である。反発硬度は200トン試験機を用いて、圧定力3トンの下でシュミットハンマー(NR-10)により測定した。また炭酸化の程度は圧縮強度試験終了後の供試体中央断面をコンクリートカッターで切断し、翌日切断面にフェノールフタレイン1%エタノール溶液を吹き付け、未着色部分を炭酸化部分として測定した。比較のため、炭酸化材令12週及び実験終了後の立方供試体についても、同様に、炭酸化の程度を測定した。

3. 実験結果及び考察

(a) 炭酸化深さについて。

円柱供試体の平均炭酸化深さと炭酸化促進材令との関係を図-1に、又室内及び密閉養生供試体の炭酸化深さを表-2に示す。炭酸化を促進させた供試体のフェノールフタレイン溶液による着色程度は、図-2に示す様に、

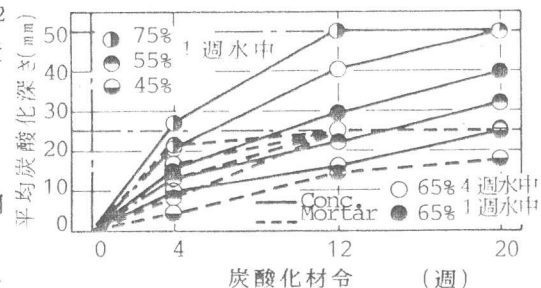


図-1: 炭酸化促進供試体の平均炭酸化深さ

全く赤変しない部分と十分に赤変する部分との間にわずかではあるが赤変する部分が見うけられ、自然暴露供試体とは異なった傾向になった。本実験では十分に赤変した部分を未炭酸化コンクリートとして、炭酸化深さを測定した。この不完全赤変部分は炭酸化促進材令の経過とともに全く赤変しない炭酸化部分に変化し、また水中養生4週間後、約13週間恒温恒湿室に保管した供試体は自然暴露供試体と同様な着色を呈した。平均炭酸化深さは炭酸化材令4週後はほぼ材令に比例しているが、これは50%RH環境下での炭酸化実験の影響と思われる。水セメント比65%で水中養生4週供試体の炭酸化深さが水中養生1週供試体よりも大きいのは供試体製作上何等かの相違があったものと思われる。

(b) 重量変化について。

コンクリート円柱供試体の重量変化を図-3に示す。室内及び密閉供試体はいずれも材令の経過とともに減少し、一定値に漸近する傾向にあり、供試体の乾燥条件の相違を示している。一方、炭酸化促進供試体はより乾燥しやすい環境にありながら、S.E. PihlajavaaraあるいはK. Kamimura等の研究結果²⁾³⁾と同様に、炭酸化層の増大と共に増加しており、炭酸化はコンクリートの密度増を伴うことは明らかである。これはセメントの水和生成物と炭酸化物との差によるものと思われる。炭酸化による重量増の傾向は水セメント比の小さいものほど大きくなっている。

(c) 弾性係数について。

炭酸化に伴う弾性係数の変化の一例として、コンクリートの動弾性係数の変化を図-4に示す。密閉養生供試体の動弾性係数は材令と共に漸増し、一定値に近づいているが、室内養生の場合には逆に低下している。これはコンクリートの乾燥による影響と思われる。一方、炭酸化促進供試体は炭酸化材令1月で室内養生の場合よりも低下し、その低下割合は水セメント比の小さいもの程顕著になっている。しかしながら、炭酸化材令4週以後は、W/C=75%を除いて、増

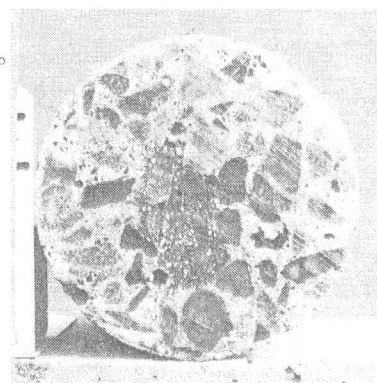


図-2：炭酸化促進供試体の着色

表-2：炭酸化深さ (mm) 水中養生1週間

供試体	W/C (%)	養生	コンクリート					モルタル		
			円柱供試体			立方供試体		円柱供試体		
			材令 (日)			材令 (日)		材令 (日)		
			108	179	242	179	242	108	179	242
4.5		室内	0.2	0.3	0.4	0.3	0.6	0.3	0.4	0.4
		密閉	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.2
5.5		室内	0.5	0.6	0.8	0.8	1.1	0.3	0.8	1.1
		密閉	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.	0.3	0.3
6.5		室内	0.7	1.1	1.2	0.8	1.4	1.4	1.5	1.3
		密閉	0.1	0.2	0.1	0.4	0.5	0.	0.4	0.8
7.5		室内	1.3	2.6	1.5	2.1	4.4	1.2	2.9	3.0
		密閉	0.8	0.6	1.3	0.7	0.4	0.	0.6	0.8

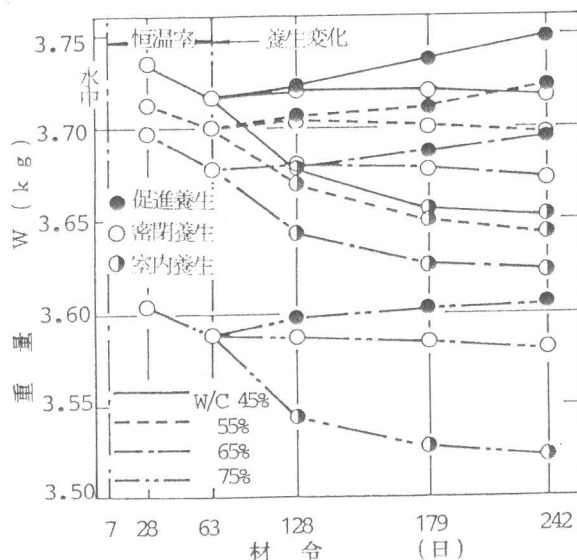


図-3：コンクリート重量の経時変化

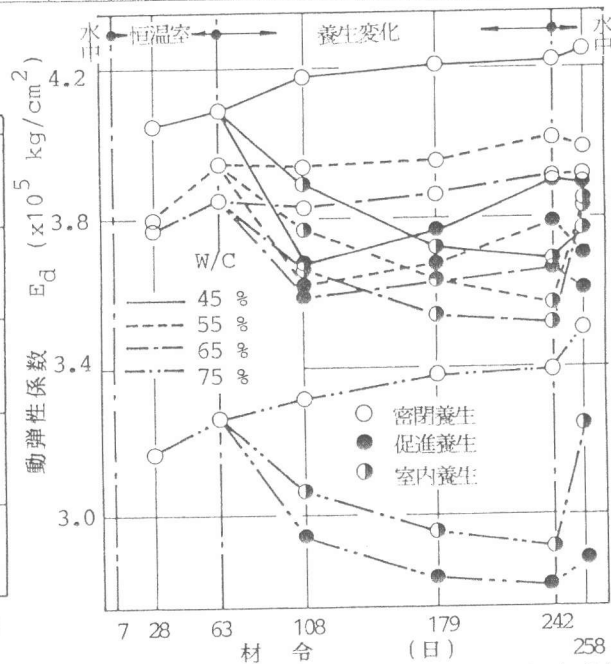


図-4：コンクリートの動弾性係数の経時変化

加する傾向にあり、増加割合は水セメント比の小さいもの程大きくなる傾向にある。この傾向は静弾性係数の場合もほぼ同様である。図-4は炭酸化部分と未炭酸化部分の混在している供試体の結果であるが、炭酸化促進供試体を炭酸化部分と未炭酸化部分の組合せ部材と考えて、炭酸化部分のコンクリートの動弾性係数を密閉養生及び炭酸化促進供試体の動弾性係数から式： $E_d = \{E - E_2(1 - \alpha)\} / \alpha$ （但し、 E 、 E_2 はそれぞれ炭酸化促進及び密閉供試体の動弾性係数、 α は炭酸化面積率）により推定すると、図-5のようになる。即ち、炭酸化したコンクリートの弾性係数 E_d は、炭酸化部分の少ない低水セメント比コンクリートほど炭酸化に伴う弾性係数の増大が見られる。一方、炭酸化部分の多いモルタル及び $W/C=75\%$ のコンクリートでは、一定もしくは僅かに減少の傾向にある。これらの相違は炭酸化促進の影響と思われる。

(d) 圧縮強度について。

圧縮強度の変化を図-6に示す。コンクリートの圧縮強度は炭酸化により、増大することが明らかである。その増加の程度は水セメント比及び炭酸化促進までの養生条件によって異なるが、本実験結果では、室内養生コンクリートよりも最大約 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の増加が見られた。一方、室内養生コンクリートの強度増進は炭酸化促進開始時から約6ヶ月間にせいぜい $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であり、 $W/C=75\%$ の場合にはほとんど強度増は見られない。これらのコンクリートを約1週間水中に浸漬し、湿潤状態で試験すると、最大で炭酸化供試体の $220\text{kg}/\text{cm}^2$ 、最低でも室内及び密閉養生の約 $60\text{kg}/\text{cm}^2$ の低下が見られた。本実験は炭酸化促進実験であり、また $W/C=75\%$ 及び 65% （水中養生4週）のコンクリートを除いて、未炭酸化部分が混在しているために、自然環境下で炭酸化した場合の強度増加については更に検討する必要があると思われる。一方、モルタルでは、 $W/C=45\%$ 以外は炭酸化材令20週ですべての供試体が完全に炭酸化しており、約 $15\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の増加であるが、 $W/C=45\%$ では、約 $250\text{kg}/\text{cm}^2$ も増加している。

(e) 反発硬度について。

シュミットハンマー試験結果を図-7に示す。反発硬度は圧縮強度とは異なり、炭酸化促進供

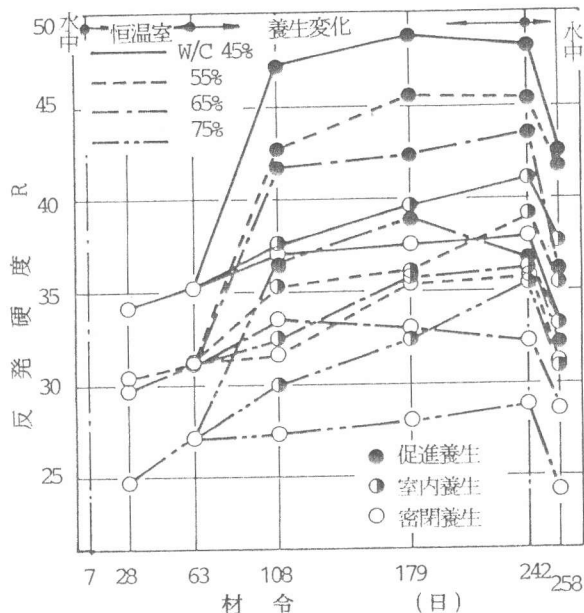


図-7：反発硬度の経時変化

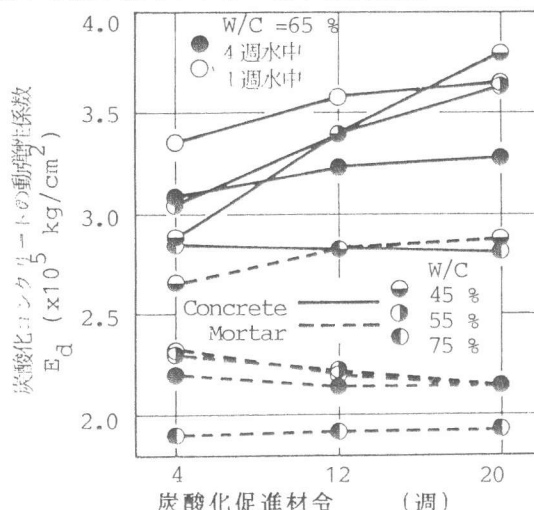


図-5：炭酸化コンクリートの動弾性係数

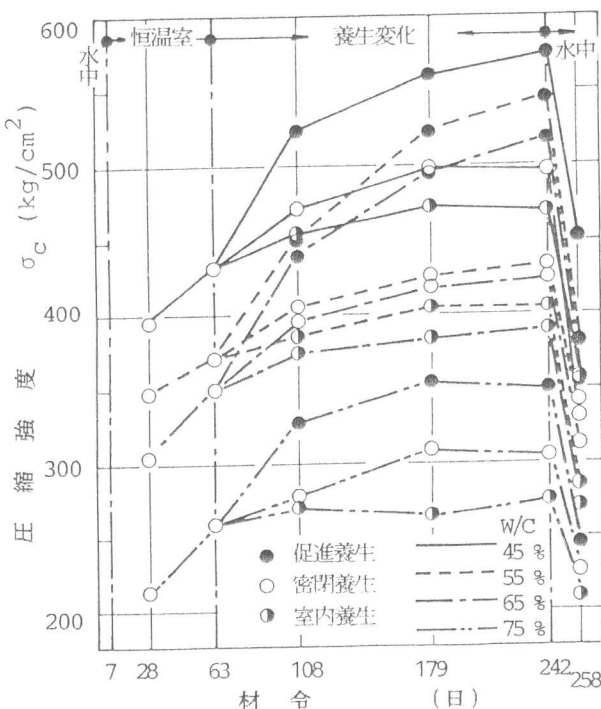


図-6：圧縮強度の経時変化

試体では炭酸化材令1月で非常に大きな増加を示したが、其の後は殆ど増加していない。これは、炭酸化促進供試体の炭酸化深さが炭酸化材令1月で10mm以上あり、シュミットハンマーの反発硬度にはコンクリートの表面から5~10mmまでの表層部コンクリートの性質のみが影響を及ぼすとの俣野の研究結果⁴⁾とよく一致している。一方、密閉養生供試体では材令と共に僅かな増加しかないのに対して、室内養生(7日水中養生)では、材令にはほぼ比例して比較的大きく増加しており、水セメント比の小さいコンクリートほど増加が大きい傾向が見られる。室内養生供試体の炭酸化深さは反発硬度に影響を及ぼす程のものではなく、反発硬度の増加は乾燥によるものと思われる。しかしながら水中養生28日の場合には、炭酸化促進時に比較して大きな変化はなく、前養生の相違が影響しているものと思われる。以上の結果、反発硬度には炭酸化丈でなく乾燥も大きく影響することがわかる。

(f) 圧縮強度と反発硬度との関係

図-8に圧縮強度 σ_c と反発硬度Rの関係を示す。 σ_c -R関係は養生条件により全く異なった傾向を示している。即ち、前養生が同じ密閉養生と炭酸化促進養生との σ_c -R関係の勾配は殆ど同じであり、同じ反発硬度でも推定強度は約100 kg/cm²の差が生じることになる。しかしながら、炭酸化は強度も増加させるため、強度推定には炭酸化の程度を判断する必要がある。一方、室内養生コンクリートの σ_c -R関係は圧縮強度により傾向が異なり、これらを1つの σ_c -R関係で表すことは困難であると思われる。室内養生でのこの相違は強度増進に比べて、乾燥による反発硬度の増大が著しいためであると思われる。28日間水中養生コンクリートの σ_c -R関係は、養生条件にかかわらず7日水中養生の炭酸化促進供試体とほぼ同様の関係にある。即ち、炭酸化が σ_c -R関係に及ぼす影響は前養生条件によって異なると考えられる。反発硬度による長期材令コンクリート強度の推定には材令による補正係数⁴⁾を乗じる方法が多く用いられているが、以上の結果から、補正係数はコンクリートの養生条件により異なるものと考えられる。従ってコンクリート強度をより精度良く推定するには、補正係数の検討が必要であると思われる。

4. まとめ

データの数も少なく、炭酸化促進実験ではあるが、本実験の結果を纏めると次の様になる。

- 1) 炭酸ガス濃度20%、常温環境下でのコンクリートの炭酸化深さは炭酸化材令にほぼ比例するが、その程度は前養生条件により異なる。
- 2) コンクリートの炭酸化は反発硬度だけでなく重量及び圧縮強度も増大させるが、反発硬度は乾燥によっても増大する。
- 3) 圧縮強度と反発硬度の関係は養生条件及び炭酸化の程度によってことなり、長期材令コンクリート強度をより精度良く推定するには、補正係数について更に検討する必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金(課題番号:57850155)の分担研究として実施したものである。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Reported by ACI Committee 517, Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure-State of the Art, ACI Journal, Nov.-Dec., 1980.
- 2) Pihlajavaara, S.E., The Deliberate Carbonation of Concrete to Produce Special Properties, State of Art Report-Special Concrete, FIP, May, 1982.
- 3) Kamimura, K., P.J. Serede and E.G. Swenson, Change in weight and dimension in the drying and carbonation of Portland cement mortar, Mag. of Conc. Research, Vol. 17, No. 50, 1965.
- 4) 俣野, 「経年コンクリートのシュミットハンマーによる推定強度とコア強度との関係」, 第5回コンクリート工学年次学術講演会論文集 1983年.

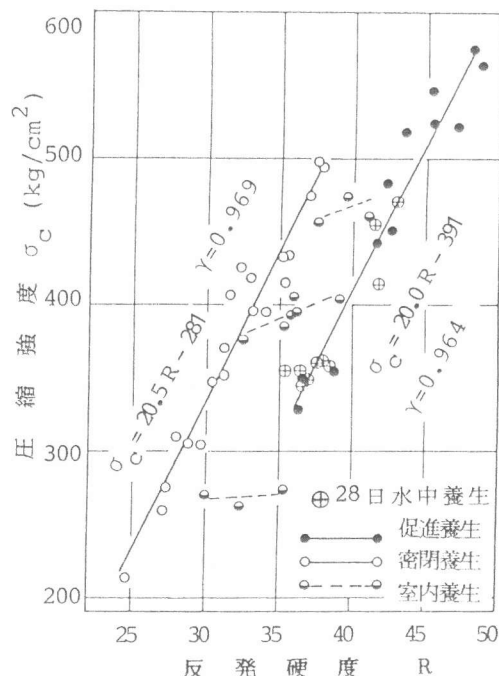


図-8: 圧縮強度と反発硬度との関係