

論文 ポルトランドセメントを使用したコンクリートの初期強度予測

中川 好正*¹・橋爪 進*²・西田 朗*³・木村 博*³

要旨：普通、早強および低熱（高ビーライト系）の3種類のポルトランドセメントを使用したコンクリートについて、初期材齢での強度発現性状を把握する目的で、凝結時間と材齢48時間までの圧縮強度を、10、20および30℃の各環境温度において時間単位で測定した。その結果、セメントのクリンカ鉱物中のエーライト組成量と始発時間からの積算温度を考慮すれば、ポルトランドセメントの種類、環境温度およびコンクリートの調合に関わらず、始発時間を測定することによって初期材齢での圧縮強度が予測できることを明らかにした。

キーワード：ポルトランドセメント、エーライト組成量、始発時間、積算温度

1. はじめに

近年、高強度コンクリートや高流動コンクリートの製造およびマスコンクリートにおける温度ひび割れ対策として、高性能AE減水剤や低熱セメント等の使用量が年々増加している。しかし、これらの材料を使用したコンクリートは、その材料特性に由来する凝結遅延や初期強度の増進割合の低さが知られている。そこで、初期材齢での強度予測は、せき板の存置期間や寒中コンクリートにおける初期養生期間の決定等、施工サイクルの観点から非常に重要である。

初期強度予測に関しては、笠井¹⁾²⁾や、仕入、地濃らの研究³⁾⁴⁾により種々の実験的な検証がなされているが、コンクリート調合やセメント種類等に対する一般化は図られていない。また、Powersの提案したゲル空隙比説⁵⁾に基づき、セメントの水和反応に着目する理論的あるいは実験的な強度発現モデル等で、水和反応量と強度発現の関係が数多く定量化されているが⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、簡易さや実用的な面において有用性に乏しい。

本研究は、凝結始発時間とセメントの初期強度に寄与する因子としてBogueとLerch⁹⁾らのいうクリンカ鉱物中のエーライト（以下C₃Sと称す）組成量に着目し、強度発現の予測法として広く知られている積算温度法（マチュリティー則）を用いて初期材齢での簡易的な圧縮強度予測を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通セメント（OP）、早強セメント（HP）および中庸熱ポルトランドセメントのJIS規格を満たす低熱セメント（LP）の3

表-1 セメントと骨材の特性値

セメント種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	構成化合物 (%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ A F
OP	3.16	3250	52	23	9	9
HP	3.14	4360	64	11	8	8
LP	3.20	4080	35	46	3	9

骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
君津産山砂	2.60	2.43	2.01
津久見産碎石	2.71	6.61	0.27

*1 藤沢薬品工業（株） 特薬事業部 筑波コンクリート研究所 （正会員）

*2 エフ・ピー・ケー（株） 技術部 （正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 建設技術研究部 （正会員）

種類のポルトランドセメントを用いた。

細骨材は君津産山砂を、粗骨材は津久見産石灰砕石2005を用いた。使用材料の特性値を表-1に示す。高性能AE減水剤は一般強度用のアミノスルホン酸系A、高強度用のポリカルボン酸系BおよびCを用いた。

2. 2 調合および養生条件

表-2に調合を示す。なお、単位水量が同一のNo. 2、8、13の調合において、C₃S組成量が同じになるように単位セメント量を設定した。また、全てnon AEコンクリートとした。養生条件は、各環境温度とも封かん養生とした。

2. 3 測定項目

凝結時間と圧縮強度を表-3に示す27試験区について測定を行った。

(1) 凝結試験

各環境温度において、JIS A 6204 付属書1に準じて測定を行った。

(2) 圧縮強度試験

Φ10×20cmの供試体を用いて、供試体数3本で圧縮強度の測定を行なった。測定時間は注水後12~48時間まで、凝結時間を考慮した上で決定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 凝結時間

図-1に環境温度の比較を、また、図-2にセメント種類の比較を示す。図-1から、同一コンシステンシーを得るための混和剤使用量は環境温度にあまり影響されなかった。凝結時間は環境温度が高くなるほど始発と終結時間がともに早くなり、その間隔も短くなる傾向にあった。図-1と2から、セメント種類間においても混和剤使用量の差はあまり観られないが、凝結時間はHP>LP>OPの順に遅くなった(プレーンコンクリートにおいてはLP、OPは同等)。表-1からC₃S組成量はHP>OP>LP、比表面積はHP>LP>OPとなり、凝結時間はセメントのC₃S組成量よりも比表

表-2 コンクリートの調合

調合No.	セメント種類	スランブ ^o or スランブ ^o フロ	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
1	OP	18±1.5 cm	60.9	50.9	165	271	978	983
2	HP						978	983
3	LP						980	985
4	LP				195	320	920	925
5	OP	21±1.5 cm	49.5	49.6	215	434	822	871
6	HP				220	444	811	859
7	LP				225	455	803	851
8	OP				165	333	928	983
9	HP						927	982
10	LP						929	985
11	OP	600±50 mm	33.3	45.8	165	495	796	982
12	HP						795	980
13	LP						798	985

注) ・調合No.4~7はプレーンコンクリート

表-3 凝結試験と圧縮強度試験区

環境温度 (°C)	水セメント比 (%)	高性能AE減水剤種類	混和剤使用量 [%/C]		
			OP	HP	LP
10	60.9	A	※	※	2.7
	49.5	A	※	※	2.7
	33.3	B	※	※	1.7
		C	2.1	2.1	2.2
20	60.9	プレーン	—	—	—
		A	2.5	2.5	2.5
	49.5	プレーン	—	—	—
		A	2.4	2.3	2.1
	33.3	A	※	※	3.3
		B	※	※	1.7
C	2.1	1.9	2.0		
30	60.9	A	※	※	2.5
	49.5	A	※	※	2.3
	33.3	B	※	※	1.7
		C	2.0	2.0	2.0

注) ・※印は実施していない試験区

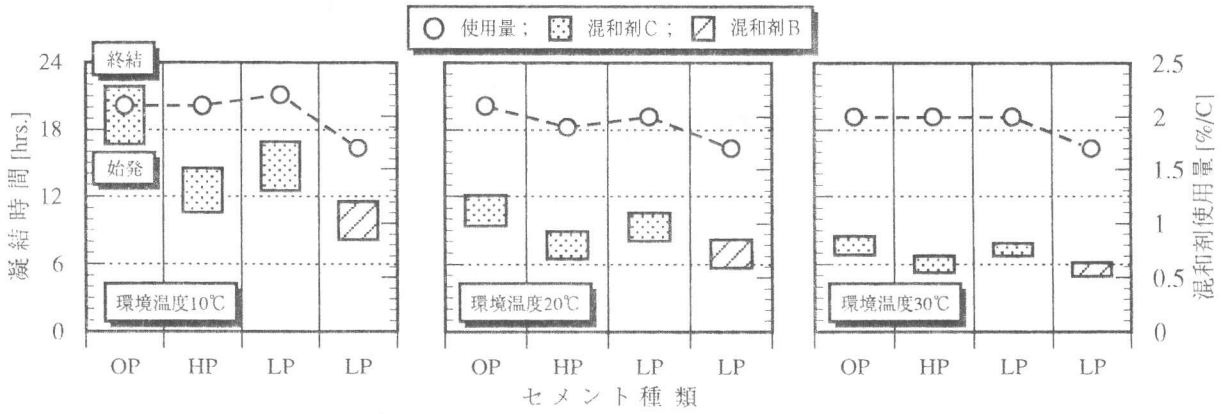


図-1. 環境温度が及ぼす影響 (W/C=33.3%)

面積（粉末度）の影響を強く受けると推察される。また、ポルトランドセメント構成化合物の中でC₃Sの水和反応が最も凝結時間に対して影響が大きく、この水和反応の主に第II期（ドルマント期）の延長によって凝結遅延は生じていると言われている¹⁰⁾。これらのことから、この第II期におけるC₃Sの水和反応は、組成量そのものより比表面積や混和剤使用量および環境温度と言った二次的な因子が支配的と推察される。

図-3に混和剤種類と水セメント比の比較を示す。図-3から、混和剤種類間と水セメント比間における凝結時間の差は、その剤の持つ減水性能に起因する使用量の差に非常にリンクする形となった。すなわち、混和剤種等にあまり関係なく使用量が増せば凝結時間が遅延する結果となっている。

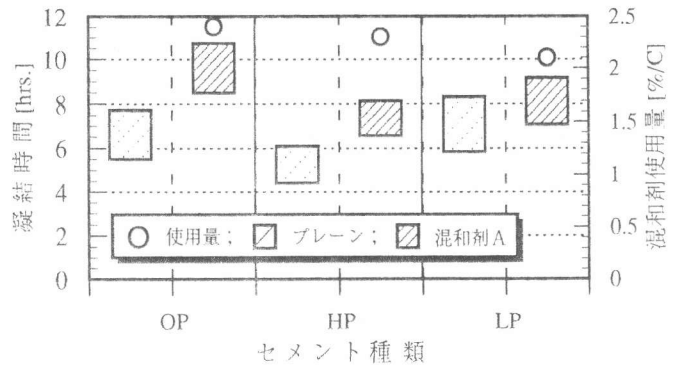


図-2. セメント種類の比較 (環境温度20°C; W/C=49.5%)

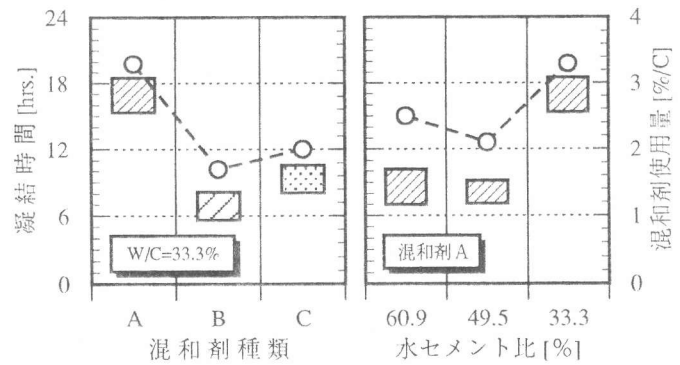


図-3. 混和剤種類と水セメント比の比較 (環境温度20°C; セメント LP)

3. 2 圧縮強度

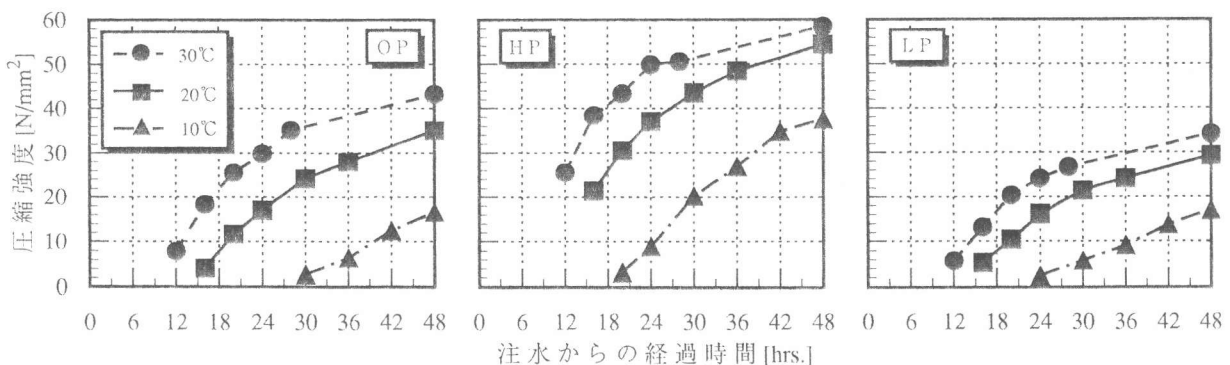


図-4. セメント種別、各環境温度での経過時間と圧縮強度の関係 (W/C=33.3%; 混和剤C)

図-4にセメント種別の各環境温度での経過時間と圧縮強度の関係を示す。なお、経過時間は注水時を起点とした。図-4から、各セメント種類において温度が低くなると強度発現時期が遅れた。これは前述した凝結時間の遅延に起因するものと推測される。また、強度発現に関しては各環境温度でHP>OP>LPの順、すなわち、C₃S組成量が増える順に強度増進の割合が大きくなる傾向があり、凝結時間において支配的であった比表面積の影響はあまり認められなかった。すなわち、C₃Sの水和反応が第II期を終了して第III期（加速期）に入ると比表面積よりもC₃S組成量が支配的な因子になると推察される。

4. 初期強度発現性状

4. 1 環境温度の影響

水セメント比別に各セメントの環境温度による強度発現性への影響を把握するため、積算温度の考え方をを用いて検討を行った。積算温度については式(1)に示すように、凝結遅延の影響を取り除くことを考慮し、C₃Sの水和反応が第III期に入った時期の通過点である始発時間を起点とした。なお、式(1)におけるαは0℃とした。図-5に各水セメント比における積算温度と圧縮強度の関係を示す。

$$M = \int_a^t (T + \alpha) dt \quad (1)$$

ここで、M；積算温度(℃・h)、a；始発時間(h)、t；経過時間(h)、T；環境温度(℃)、α；0(℃)

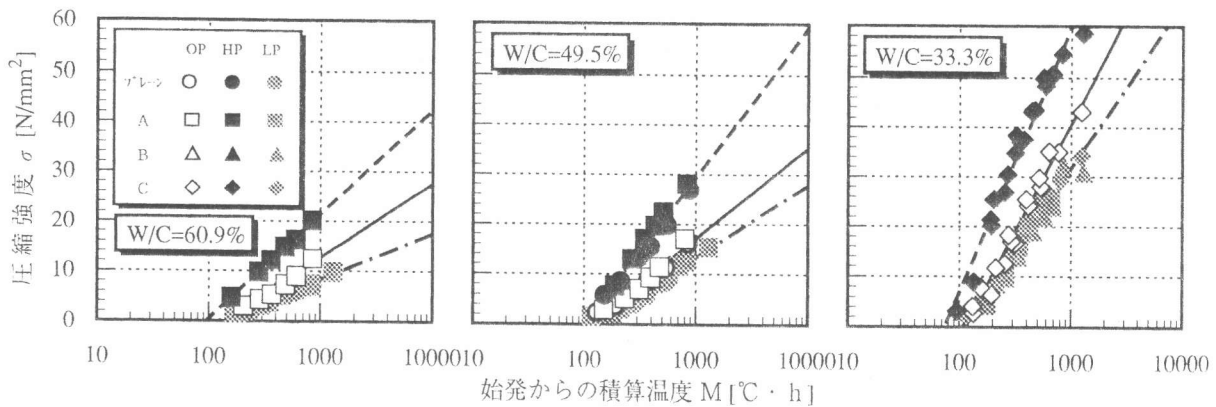


図-5. 積算温度と圧縮強度の関係

図-5から、各水セメント比において始発時間からの積算温度と圧縮強度の関係はセメント種類ごとに、混和剤の有無や種類に関わらず強い相関性を示し、初期材齢においてもマ

表-4. 各セメントの回帰式と相関係数

	W/C = 60.9 %	W/C = 49.5 %	W/C = 33.3 %
OP	$\sigma = 15.00 (\log (M) - 2.155)$ R = 0.9797	$\sigma = 18.12 (\log (M) - 2.053)$ R = 0.9830	$\sigma = 43.03 (\log (M) - 2.056)$ R = 0.9881
HP	$\sigma = 20.99 (\log (M) - 1.976)$ R = 0.9986	$\sigma = 29.68 (\log (M) - 2.008)$ R = 0.9843	$\sigma = 52.84 (\log (M) - 1.870)$ R = 0.9832
LP	$\sigma = 9.155 (\log (M) - 2.089)$ R = 0.9886	$\sigma = 14.52 (\log (M) - 2.080)$ R = 0.9859	$\sigma = 32.78 (\log (M) - 2.029)$ R = 0.9818

チュリティー則は成立した。表-4に回帰式と相関係数を示す。回帰式は式(2)の形で表わすことができた。

$$\sigma = k_i \times (\log (M) - c_i) \quad (2)$$

ここで、 k_i 、 c_i ；実験定数

k_i は調合やセメント種類で決まる強度増進の割合であり、また、 c_i はx軸との切片、すなわち、圧縮強

度の発現時期を示す。表-4の回帰式における c_1 の値は全て2付近(平均値=2.031)となっており、調合やセメント種類などにはあまり影響を受けず、始発時間からの積算温度が約 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ (例えば 20°C で5時間) 経過しないとコンクリートの圧縮強度は発現しない結果となった。

4. 2 C_3S の影響

セメントのクリンカー鉱物中、他の鉱物の影響もあると思われるが、ここでは、初期強度に最も寄与するといわれている主要鉱物である C_3S のみに着目し、セメント水比則を C_3S へ適用した。各調合とセメント種類間の強度増進割合の違いを、単位水量に対する単位 C_3S 量の重量比 (C_3S 水比) の影響として検討を加えた。図-5に示した各直線の傾き(強度増進の割合) k と C_3S 水比との関係を図-6に示す。両者の間には、式(3)の回帰式で表せる一次の強い相関関係(相関係数 $R=0.9574$) があることが分かった。

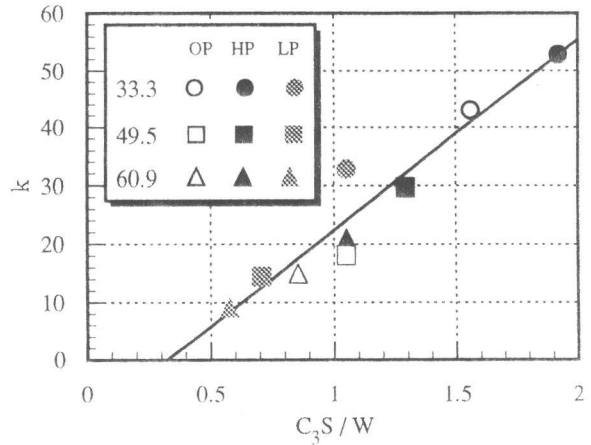


図-6. C_3S 水比と k の関係

$$k = 33.09 \times (\text{C}_3\text{S} / \text{W}) - 10.74 \quad (3)$$

すなわち、各調合とセメント種類間の積算温度に対する初期強度増進の割合は、 C_3S 水比の影響が支配的であると推察できる。

5. 初期強度予測

前章で検討した結果から、始発時間からの積算温度と圧縮強度ならびに C_3S 水比と強度増進の割合 k には密接な関係があることが分かった。したがって、圧縮強度は式(4)と(5)に示すようにコンクリートの調合やセメントの種類に関わらず一般化した形で表せた。

$$\sigma = k \times (\log(M) - c) \quad (4)$$

$$k = a \times (\text{C}_3\text{S} / \text{W}) + b \quad (5)$$

ここで、 σ ; 圧縮強度 [N/mm^2]、 k ; 強度増進の割合、 M ; 始発からの積算温度 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$]
 a, b, c ; 実験定数

次に、本実験データの場合、実験定数 $c=2.031$ (表-4における平均値) と、式(3)で表せた強度増進の割合 k をそれぞれを式(4)と(5)に代入すると式(6)のようになった。

$$\sigma' = (33.09 \times (\text{C}_3\text{S} / \text{W}) - 10.74) \times (\log(M) - 2.031) \quad (6)$$

ここで、 σ' ; 圧縮強度 [N/mm^2]、 M ; 始発からの積算温度 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$]

図-7に式(6)による圧縮強度の計算値 σ' と実測値 σ の関係、図-8に実験値/計算値のヒストグラムを示す。図-7と8から、式(6)によって求めた圧縮強度の計算値は実測値と良い対応を示していることが分かった。

本実験は、材齢48時間までという極初期材齢での、ポルトランドセメントを使用したコンクリートを対象とした検討結果である。よって、この方法は、コンクリートの調合やセメントの種

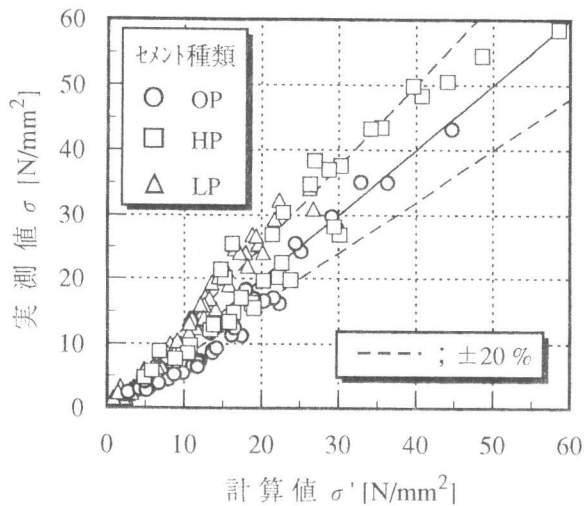


図-7. 圧縮強度の計算値と実測値の関係

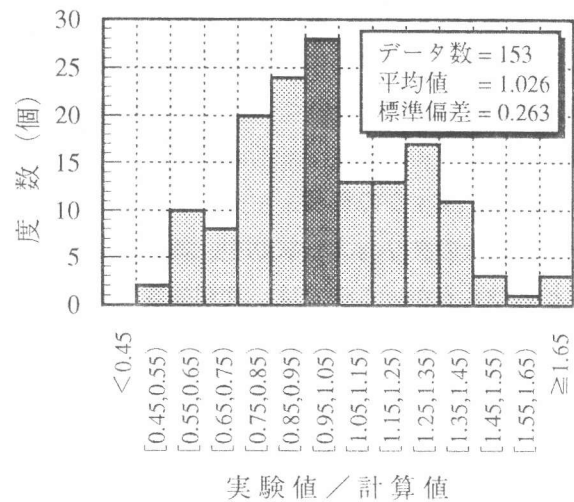


図-8. 実測値/計算値のヒストグラム

類に対して完全に一般化されたものとは言い難く、混合セメント等についてはこれからの検討が必要であるが、強度発現の予測法として広く知られている積算温度法（マチュリティー則）における一つの指標を示すものと思われる。

6. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 凝結時間は、比表面積（粉末度）、混和剤使用量および環境温度等の因子に支配されると考えられる。
- (2) 圧縮強度は、コンクリート調合やセメントの種類に関わらず、凝結始発時間を起点とした積算温度で評価すると、約100℃・h経過しないと発現しない。
- (3) 積算温度に対する初期強度の増進割合は、混和剤の有無、使用量および凝結時間にはあまり影響を受けず、C₃S水重量比によって決まる。
- (4) 凝結始発時間とC₃S水重量比を考慮すれば、積算温度法（マチュリティー則）によってコンクリート調合やセメントの種類に関わらず、初期強度の予測は可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 笠井芳夫：「コンクリートの初期圧縮強度推定方法」日本建築学会論文報告集, No.141, pp.1~9, 1967.11
- [2] 笠井芳夫：「先に提案したコンクリートの初期圧縮強度推定方法の適用性について」日本建築学会論文報告集 No. 163, pp.9~17, 1969.9
- [3] 仕入豊和・地濃茂雄：「コンクリートの凝結硬化に及ぼす温度条件（20~90℃）の影響—水和反応過程からの考察—」日本建築学会論文報告集, No.293, pp.1~10, 1980.7
- [4] 仕入豊和・地濃茂雄：「(同上)—ブロッカー貫入抵抗値の経時変化からの考察」日本建築学会論文報告集, No.313, pp.1~11, 1982.3
- [5] T. C. Powers : J. Amer. Ceram. Soc., 41, pp.1~6, 1958
- [6] 友沢史紀：「コンクリートの強度発現に関する速度理論的研究」日本建築学会大会学術講演集, 1026, 1971.11
- [7] 大井孝和：「コンクリート供試体におけるセメント水和の進行とコンクリート強度発現の関係」日本建築学会論文報告集, No.343, pp.1~12, 1983.9
- [8] 後藤考治・魚本健人：「ポルトランドセメントペースト硬化体の強度発現機構に関する研究」コンクリート工学論文集 Vol.5, No.1, pp.109~117, 1994.1
- [9] W. Lerch and R. H. Bouge : Ind. Engineering Chem., 28(8), pp.837~847, 1934
- [10] 魚本健人・大下健二：「高性能減水剤によるコンクリートの凝結遅延に関する研究」コンクリート工学論文集 Vol.5, No.1, pp.119~129, 1994.1