

論文 石炭灰を大量使用したコンクリートの強度・中性化特性

小山 智幸*1・松藤 泰典*2・仲田 康司*3・伊藤 是清*4

要旨: 筆者らは、石炭灰をコンクリートに大量に使用方法を提案し、調査方法や得られるコンクリートの性状に関して検討を行ってきた。本研究は、石炭灰およびセメント使用量と強度および中性化の関係を実量的に明らかにすること、即ち、圧縮強度および中性化速度に関する等ポテンシャルラインを確定することにより、石炭灰の外割調合則を確立することを目的として検討を行ったものである。その結果、石炭灰を使用した幅広い調査範囲で圧縮強度および中性化速度を実量化し、調査段階で石炭灰を使用したコンクリートの強度および中性化性状の予測が可能となった。

キーワード: 石炭灰, フライアッシュ, 調合則, 圧縮強度, 中性化, 等ポテンシャルライン

1. はじめに

筆者らは、石炭灰をコンクリートに外割調合で大量に使用方法を提案し、その概念を示した¹⁾。また、石炭灰や他の材料の使用量と得られるコンクリートの種類、例えば普通コンクリートや高流動コンクリートといった関係を示した²⁾。本研究では、これらに続いて石炭灰およびセメント使用量と強度および中性化の関係を定量的に明らかにすること、即ち、圧縮強度および中性化速度に関する等ポテンシャルラインを確定することにより、石炭灰の外割調合則を確立することを目的として検討を行った。

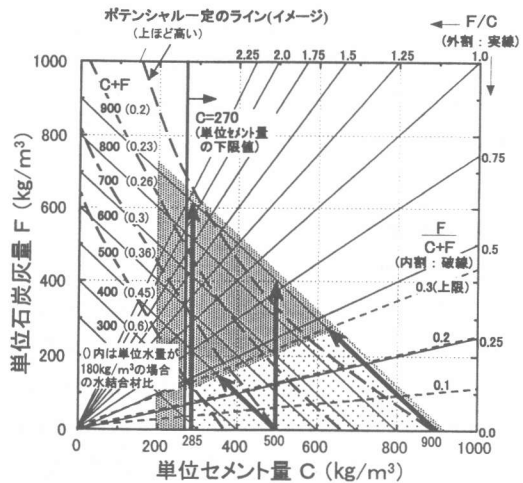


図-1 石炭灰の内割と外割の関係

2. 石炭灰の内割調合と外割調合

図-1 に石炭灰の内割調合と外割調合の違いを示す。内割の場合の単位石炭灰量は、内割置換率の上限 30%、単位セメント量の下限值 270kg/m³、練混ぜ可能な水結合材比の下限值約 20%の各直線で囲まれる領域(ハッチをつけた四角形)の中で定められることになる。この領域内で、単純に単位石炭灰量を大きくしようとすると必然的に単位セメント量を大きくする必要があるので、単位石炭灰量の最大値は 300kg/m³程

度である。一方、外割の場合の単位石炭灰量は、練混ぜ可能な水結合材比の下限值 20%、および単位セメント量の下限值に囲まれる領域、内割の領域を含む三角形の中で定められ、コンクリート 1m³当たり 600kg を越える石炭灰を混合することが可能となる。外割調合では単位セメント量が小さい場合の方が単位石炭灰量を大きくすることができるという特徴がある。

同図中に強度および耐久性等に関するポテン

*1: 九州大学助教授 大学院人間環境学研究院 工博 (正会員)

*2: 九州大学教授 大学院人間環境学研究院 工博 (正会員)

*3: 沖縄県生コンクリート工業組合技術部長

*4: 九州大学大学院 人間環境学研究所空間システム専攻 工博

シャル一定のライン（イメージ）を示す。ポテンシャルは上側のライン程高い。内割調合では置換率の増大に伴って、斜めの矢印上で調合を行うことになる。この場合、矢印の先端に近づくほど（置換率が大きくなるほど）単位セメント量が低下するため、条件によってコンクリートの性能が低下する場合と向上する場合が生じる。即ちポテンシャル一定のラインに対して、斜めの矢印が普通ポルトランドセメント単味の場合よりも上側にくるとき（例：図中単位セメント量 $900\text{kg}/\text{m}^3$ から始まる矢印）は性能が向上し、下側にくるとき（例：図中単位セメント量 $500\text{kg}/\text{m}^3$ から始まる矢印）は低下する。

一方、外割調合では単位セメント量一定の縦の矢印に沿って調合を行うため、置換率の増大に伴い矢印は必ずポテンシャルの高い側に向かうため、強度および耐久性等の性能が向上すると予想される。

3. 実験概要

前節での検討をもとに、圧縮強度および中性化に関する等ポテンシャルラインを確定することにより、石炭灰を外割大量使用したコンクリートの強度性状および中性化性状を調合段階において設定可能とするために、種々の外割調合における強度性状および中性化性状に関して実験検討を行った。

3.1 使用材料および調合

使用材料および調合条件を表-1~3に示す。石炭灰は JIS A 6201(コンクリート用フライアッシュ)のII種に適合するものである。

調合は単位水量を $185\text{kg}/\text{m}^3$ 一定として水セメント比を変化させ、さらに水セメント比毎に単位石炭灰量を変化させたコンクリートの調合から粗骨材を除いたモルタルとした。

3.2 実験方法

試験体は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の簡易型枠に打込み、温度 20°C 一定の恒温室内で所定の試験材齢まで封緘養生とした。

圧縮強度試験は材齢 7, 28 および 91 日で行っ

表-1 使用材料(石炭灰については表-2 参照)

セメント	普通ポルトランドセメント, 比重: 3.16
細骨材	壱岐産海砂, 表乾比重 2.58
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2 石炭灰の品質

二酸化けい素 (%)	48.7	
湿分 (%)	0.1	
強熱減量 (%)	1.1	
密度 (g/cm^3)	2.36	
メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.29	
比表面積 (cm^2/g)	3,830	
フロー値比 (%)	108	
活性度指数 (%)	28 日	82
	91 日	103
45 μm ふるい残分 (%)	9	

表-3 調合条件

C (kg/m^3)	W/C (%)	F (kg/m^3) (括弧内は水結合材比(%))
206	90	0 (90), 164 (50), 257 (40), 411 (30), 534 (25), 719 (20)
285	65	0 (65), 85 (50), 244 (35), 332 (30), 455 (25), 640 (20)
370	50	0 (50), 93 (40), 159 (35), 247 (30), 370 (25), 555 (20)
463	40	0 (40), 66 (35), 154 (30), 278 (25), 463 (20)
617	30	0 (30), 56 (27.5), 123 (25), 206 (22.5), 308 (20)
740	25	0 (25), 82 (22.5), 185 (20)
925	20	0 (20)

※ C: 単位セメント量, W/C: 水セメント比,

F: 単位石炭灰量

※ 単位水量は $185\text{kg}/\text{m}^3$ 一定

た。促進中性化試験は、温度 20°C 、相対湿度 60%、炭酸ガス濃度 5% の環境下で行い、試験体は材齢 91 日で脱型後、 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室にて 1 週間の乾燥を行っている。中性化深さの測定はフェノールフタレイン 1% 溶液を割裂面に噴霧した後、呈色しない部分をノギスで測定し、その平均値を中性化深さとした。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度に関する等ポテンシャルライン

図-2 に一例として材齢 28 日における圧縮強度と単位石炭灰量の関係を示す。石炭灰を混入した場合の強度は、同一水セメント比ではセメ

ント単味の場合よりも常に大きく、また単位石炭灰量の増加に伴って大きくなっている。従って、単位石炭灰量と圧縮強度には明瞭な相関があり、両者の関係を式(1)で表すことができる。

$$f_c(W, C, F, t) = \alpha_1 + \beta_1 \frac{F}{F + \gamma} \quad (1)$$

ここに $f_c(W, C, F, t)$: 圧縮強度 (N/mm²)

W : 単位水量 (185kg/m³)

C : 単位セメント量 (206 ≤ C ≤ 925kg/m³)

F : 単位石炭灰量 (0 ≤ F ≤ 640kg/m³)

t : 材齢 (7 ≤ t ≤ 91 日)

また、式(1)中の第1項 α_1 はセメント単味の場合の圧縮強度であり、水セメント比の関数として、図-3 に示す実測値との整合により、式(2)で表される。

$$\alpha_1 = \frac{135 + 70.5/t}{(6.50 + 94.6/t)^{W/C}} \quad (2)$$

また、式(1)中の第2項は圧縮強度に対する石炭灰の寄与の大きさを示しており、実験結果より、 β_1 は材齢のみの関数として、 γ は材齢や単位石炭灰量に無関係にそれぞれ以下のように定めることができた。

$$\beta_1 = \frac{53.0 t}{t + 13.0} \quad (3)$$

$$\gamma = 200 \quad (4)$$

これらの式をまとめると、式(1)は以下の式(5)で表される。

$$f_c = \frac{135 + 70.5/t}{(6.50 + 94.6/t)^{W/C}} + \frac{53.0t}{t + 13.0} \frac{F}{F + 200} \quad (5)$$

以上より、圧縮強度に関する等ポテンシャルラインを表す単位石炭灰量と単位セメント量の関係式が得られ、式(6)で表される。

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{f_c - \alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1 - f_c} \quad (6)$$

図-4 は、式(6)中の分母 ($\alpha_1 + \beta_1 - f_c$) および

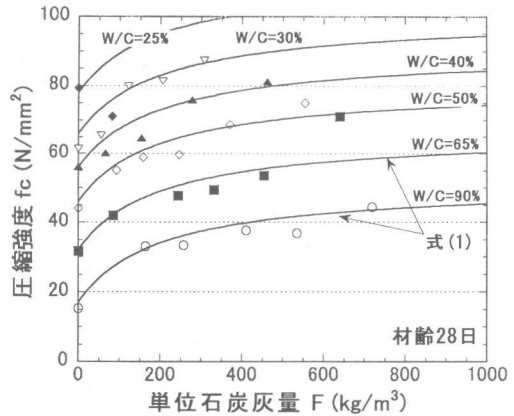


図-2 単位石炭灰量と圧縮強度の関係

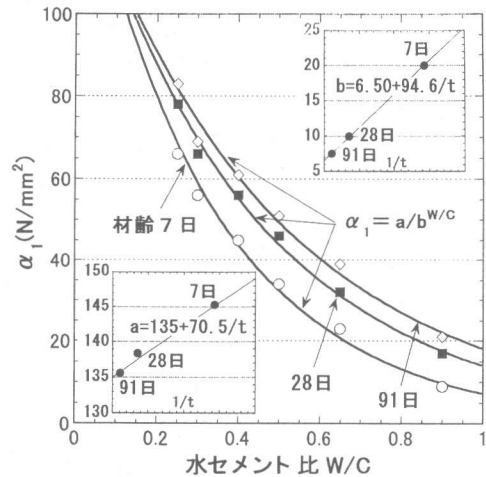


図-3 式(1)中の α_1 と水セメント比の関係

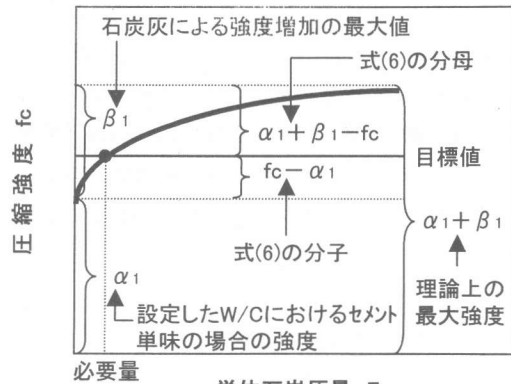


図-4 式(6)の概念図

分子 ($f_c - \alpha_1$) と圧縮強度の関係を示している。

式(6)中の左辺は、普通ポルトランドセメント単味の場合に、目標強度 f_c と設定した水セメン

ト比で得られる強度 α_1 との差が大きいほど大きく、同様に、石炭灰を外割混合して得られる強度の最大値 $\alpha_1 + \beta_1$ と目標強度 f_c との差が小さいほど左辺は大きくなり、単位石炭灰量を大きくする必要がある。

図-5a)~c)に、それぞれ、材齢7日、28日、および91日において、式(6)を用いて算定される圧縮強度に関する等ポテンシャルラインを $10\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$ までプロットしたものを示す。各図中の黒丸●は圧縮強度の実測値である。

例えば材齢28日に関して示した図-5b)中で内割調査を示す斜めの矢印に着目すると、単位セメント量 740 kg/m^3 から始まる矢印の場合には置換率20%程度まで圧縮強度は向上し、それ以上の置換率では低下する。一方、単位セメント量 463 kg/m^3 から始まる調査の場合には置換率の増加に伴って強度が低下する。他の材齢の結果も比較すると、内割調査の場合には単位セメント量や材齢により普通ポルトランドセメント単味と比較して圧縮強度が低下する場合と向上する場合があることがわかる。これに対し、外割調査を示す縦の矢印は、単位石炭灰量の増加に伴って常にポテンシャルの高い方に向かっており、外割調査の利点が確認される。また、単位セメント量が小さい領域においても調査が可能であり、単位セメント量 200 kg/m^3 の調査でも単位石炭灰量が 100 kg/m^3 を超える領域で 30N/mm^2 以上の圧縮強度が得られている。

4.2 中性化速度に関する等ポテンシャルライン

中性化速度係数は、硬化体の水酸化カルシウム量と透気係数から式(7)³⁾のように表すことができる。

$$A = \sqrt{k' \frac{K}{Q}} \quad (7)$$

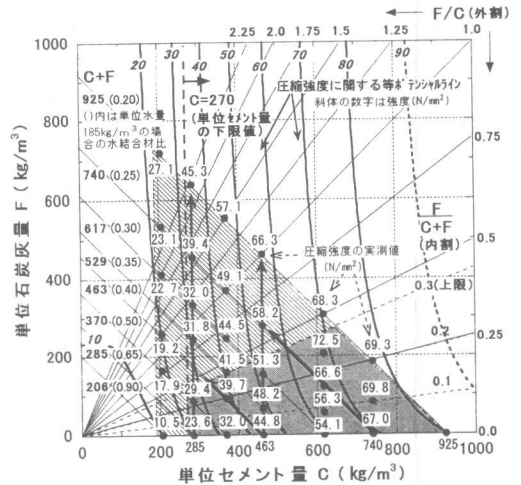
$$\text{ただし、 } k' = \frac{2k_1 \cdot \Delta p \cdot S}{\eta c}$$

ここに A : 中性化速度係数

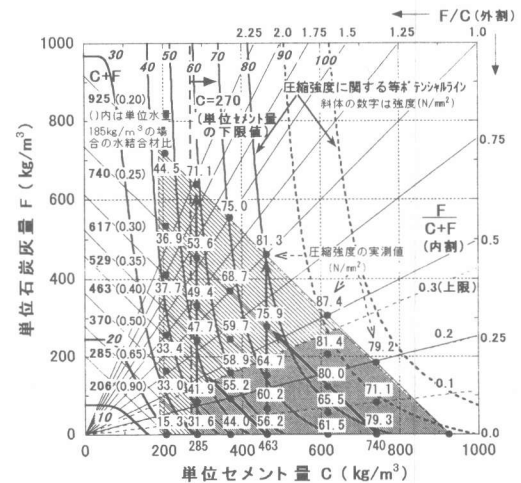
K : 透気係数

Q : 水酸化カルシウム量

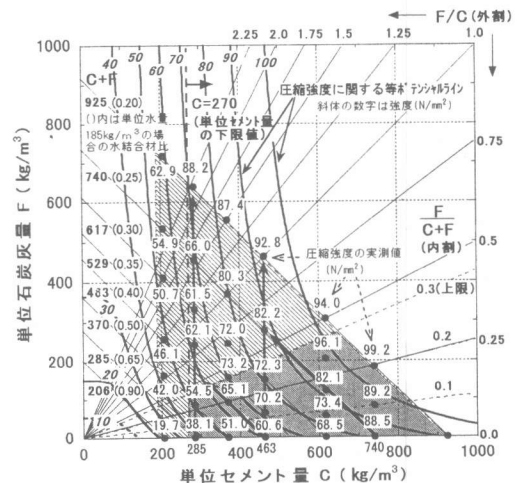
S : 中性化深さ方向に直交するコンク



a) 材齢7日



b) 材齢28日



c) 材齢91日

図-5 圧縮強度に関する等ポテンシャルライン

リートの透気面積

Δp : 二酸化炭素分圧

ηc : 二酸化炭素の粘性係数

k_1 : 定数

また、水酸化カルシウム量 Q および透気係数 K はそれぞれ式(8)および式(9)のように表すことができる³⁾。

$$Q = \frac{\alpha^2}{F + \beta_2} \quad (8)$$

$$K = \frac{\alpha^3}{F + \beta_3} \quad (9)$$

次にこれらを式(7)に代入すると中性化速度式は単位石炭灰量の関数として式(10)のように表される。

$$A = \sqrt{\alpha \frac{F + \beta_2}{F + \beta_3}} \quad (10)$$

ただし、 $\alpha = k' \alpha_3 / \alpha_2$

図-6 に中性化速度係数と単位石炭灰量の関係を示す。なお、中性化速度係数は各試験材齢における実験結果を \sqrt{t} 則により近似して求めたものである。

水セメント比 90%では他と比較して著しく中性化速度が大きくなっている。ただし、いずれの水セメント比においても石炭灰の使用量が大きくなるに伴い中性化速度係数が小さくなっていることから、水セメント比に関わらず石炭灰の大量使用は中性化に対して有効であることが明らかである。

また、図中の実線は実測値に式(10)を近似した結果であるが水セメント比に関わらず実測値の傾向をよく示していることがわかる。

ここで、式(10)における実験定数 α 、 β_2 および β_3 の値はそれぞれ単位セメント量の関数として図-7 に示す実測値との整合によりそれぞれ式(11)~(13)のように表すことができる。

$$\alpha = 596 \exp(-0.0168C) \quad (11)$$

$$\beta_2 = 1.15 C + 250 \quad (12)$$

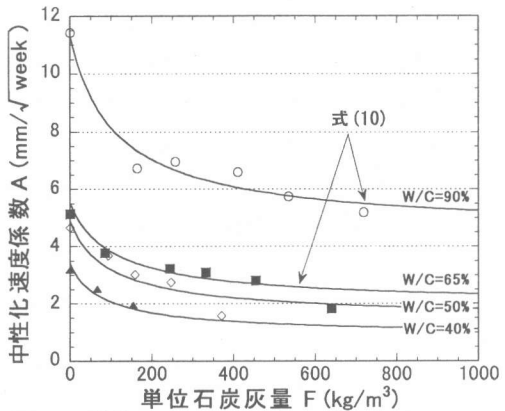


図-6 単位石炭灰量と中性化速度係数の関係

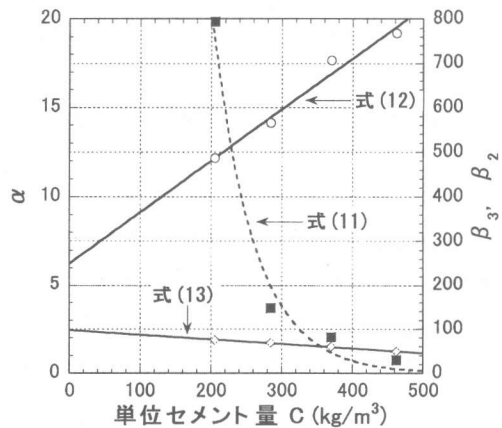


図-7 式(10)中の α, β_2, β_3 と単位セメント量の関係

$$\beta_3 = -0.104 C + 97.6 \quad (13)$$

これらの結果をまとめると、式(10)は以下の式(14)で表される。

$$A = \sqrt{596 \exp(-0.0168 C) \frac{F + (1.15 C + 250)}{F + (-0.104 C + 97.6)}} \quad (14)$$

以上より、中性化速度に関する等ポテンシャルラインを表す単位石炭灰量と単位セメント量の関係式が得られ、式(15)で表される。

$$\frac{F}{\beta_3} = \frac{\alpha \frac{\beta_2}{\beta_3} - A^2}{A^2 - \alpha} = \frac{A^2(F=0) - A^2}{A^2 - A^2(F=\infty)} \quad (15)$$

図-8 は式(15)における分母および分子と中性化速度係数の関係を示している。

ここで、式(15)の左辺は、目標とする中性化

速度係数 A とセメント単味の場合に得られる中性化速度係数 $A(F=0)$ の自乗の差が大きいほど大きく、同様に目標とする中性化速度係数 A と石炭灰の外割混合により低減される中性化速度係数の限界値 $A(F=\infty)$ との自乗の差が小さいほど左辺は大きくなり、単位石炭灰量を大きくする必要はある。

図-9 に式(15)から算出される中性化速度に関する等ポテンシャルラインを示す。なお、各等ポテンシャルラインは促進試験の結果を自然状態(炭酸ガス濃度: 0.035%と仮定)に換算⁴⁾したものであり、設定値は 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.55, 0.69 および 1.01 とした。これらのうち、0.55, 0.69 および 1.01 は、かぶり厚さを 40mm とした場合の JASS 5⁵⁾ に規定される計画供用期間の級として一般(30年)、標準(65年)、長期(100年)に相当する値である。

中性化速度に関しても圧縮強度と同様に、内割調合を示す斜めの矢印では、置換率の増大に伴い普通ポルトランドセメント単味と比較して低下する場合と向上する場合がみられる。ただし、ポテンシャルラインはある置換率を超えると横軸に対して垂直になることから内割調合では普通ポルトランドセメント単味と比較して急激に中性化抵抗性が低下することがわかる。

一方、外割調合を示す縦の矢印は、単位セメント量に関わらず単位石炭灰量の増加に伴って常にポテンシャルの高い方に向かっていることから、外割調合の利点を確認される。また単位セメント量が 200kg/m^3 のように少ない場合においても、石炭灰を使用することで性能が向上することがわかる。

5. まとめ

本研究は、石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合則を確立することを目的として、圧縮強度および中性化性状に関して検討を行った。その結果、石炭灰を大量使用した場合の圧縮強度ならびに中性化性状は良好であり、また、幅広い調合の範囲でこれらを定量化することに

より圧縮強度および中性化速度一定の等ポテンシャルラインを示すことができた。これにより、調合段階において石炭灰を使用したコンクリートの上記性状の予測が可能となった。

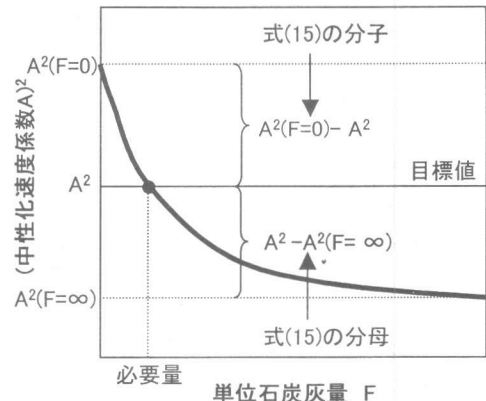


図-8 式(15)の概念図

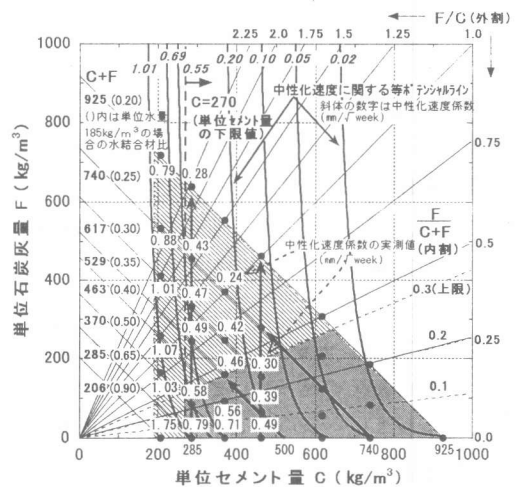


図-9 中性化速度に関する等ポテンシャルライン

参考文献

- 1) 松藤泰典他：フライアッシュを外割大量使用する場合の調合則に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No. 51，pp. 150-155，1997
- 2) 松藤泰典他：フライアッシュを外割大量使用コンクリートの調合に関する研究—単位水量 165kg/m^3 における調合則—，日本建築学会学術講演梗概集，第 38 号 1，pp. 433-434，1999. 9
- 3) 松藤泰典他：石炭灰を大量に用いたコンクリートの中性化挙動に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No. 54，1999
- 4) 三橋博三他：コンクリートの中性化進行速度に及ぼす気象条件の影響に関する研究，コンクリート工学論文集第 10 巻第 1 号，pp. 143-148，1999. 1
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，1997