

## 論文

## [1061] コンクリートの極初期強度による迅速強度評価と要因定式化による品質管理に関する研究

正会員 加藤 清志 (防衛大学校)

正会員 ○ 加藤 直樹 (浅野工学専門学校)

津田 悦弘 (読売東京理工専門学校)

## 1. まえがき

社会資本および民間財産としてのコンクリート構造物の耐久性および強度の信頼性確保の重要性は、全世界的な課題であり、このための品質の可否の迅速な判定は、わが国内外を含め依然として根強く研究が行われている[1]。

一般に、生コンの場合には運搬時間の制約から、品質評価時間は60分以内である。

本研究は、前報[2]で従来の物理的・化学的・複合的迅速評価法をふまえ、より迅速・簡易・安価・無公害・実用的で、精度よく特性値を求めることができることという社会的ニーズに対応できる手法を開発したが、特性値の3次元座標表示法、2変数多項式表示、さらに、これらの品質管理への適用法について考察したものである。

## 2. 提案品質迅速評価方法の要点と特徴[2]

## 2.1 迅速評価法の概要

練りませ直後のフレッシュコンクリートをバール缶に採取し、急結剤(セメント系、主成分：カルシウムアルミネートおよび炭酸ソーダ、C×7%)を30秒間でませあわせる。このバサバサコンクリートをφ10×20cmの型わくに詰め、ランマー(土質試験用、2.5kgf、落高30cm、2層、各層25回)で突き固め成型する。急結剤添加時点から40分で脱型し、直ちに「極初期強度」を求めた。なお、キャッピングは、急結セメントペーストによった。

## 2.2 提案法の特徴

本法は、特別な装置や専門的知識を要せず、スクリーニングモルタルの作製不要、通常の型わくで作製し、従来のルーチンワークの一環と大同小異の手法で「極初期強度」を求め、短・長期強度、セメント水比、単位セメント量の推定、さらには、強度の品質管理にも応用できる。

## 3. コンクリート配合

表-1 示方配合

| Mix Proportion | Slump (cm)    | Air Content (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit Weight(kgf/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |
|----------------|---------------|-----------------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|------|
|                |               |                 |         |         | W                                | C   | S   | G    |
| 1:1:2          | 15(15.1~17.0) | 1.0~1.5         | 41.5    | 33      | 217                              | 523 | 523 | 1046 |
| 1:1.5:3        | 15(14.1~15.7) | 0.8~1.4         | 49.0    | 33      | 191                              | 391 | 586 | 1172 |
| 1:2:4          | 15(14.0~16.0) | 0.5~1.5         | 59.0    | 33      | 182                              | 309 | 618 | 1236 |
| 1:3:6          | 15(15.0~16.8) | 0~1.0           | 87.0    | 33      | 188                              | 216 | 649 | 1298 |

セメントは普通と早強の2種、粗骨材最大寸法は20mm、示方配合を表-1に示す。  
 実験の手順は2.1による。

4. 実験結果の3次元座標表示と定式化並びに品質管理図への適用

4.1 記号の定義

E: 極初期強度 ( $ef'_c$ ),  $f'_{c3} \cdot f'_{c7} \cdot f'_{c28}$ : 材令3日・7日・28日の管理供試体強度.

R: セメント水比 (C/W), C: 単位セメント量

4.2 普通セメントの場合

(1) 極初期強度・セメント水比・管理供試体強度との関係

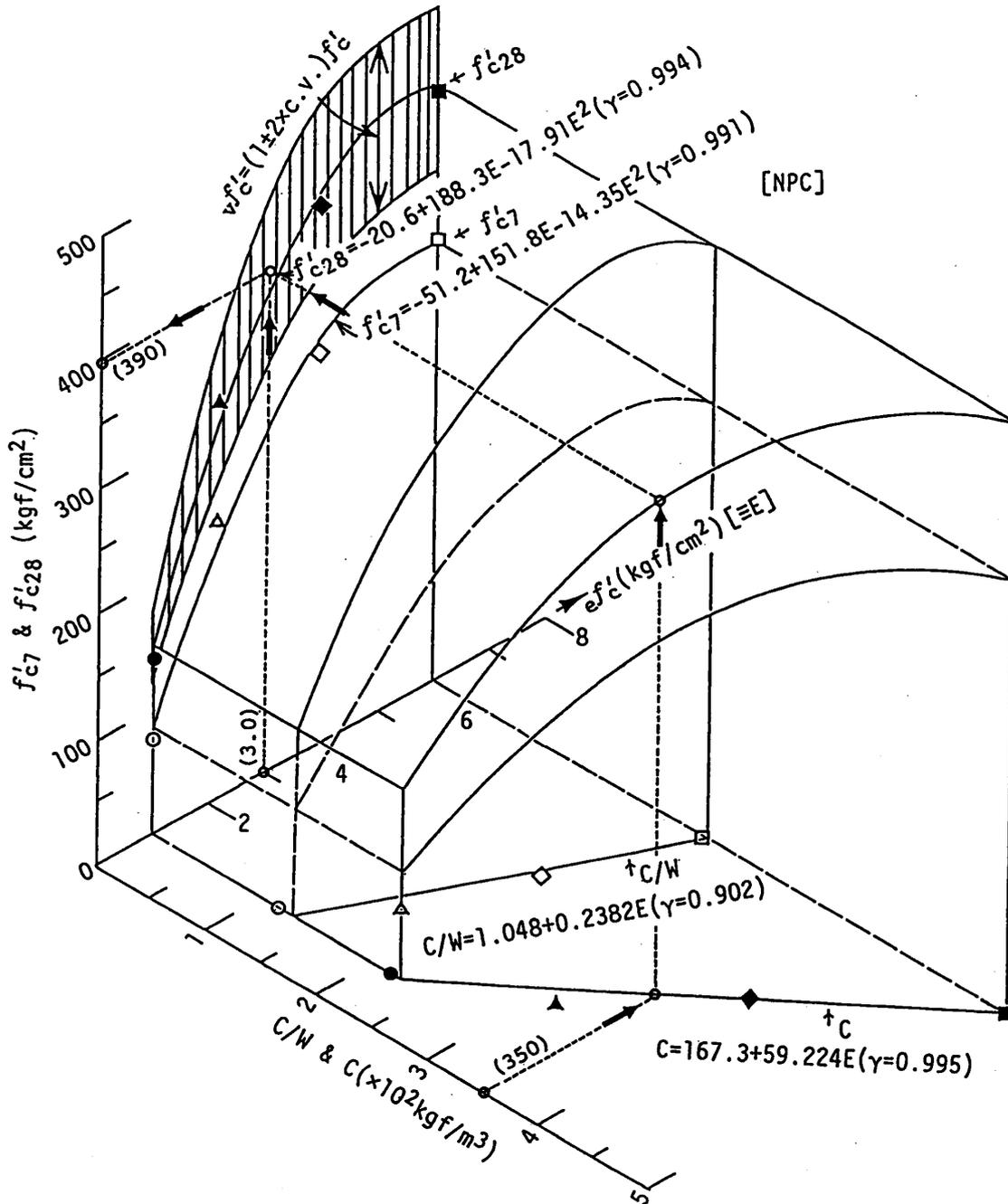


図-1 普通セメントコンクリートの極初期強度・セメント水比・セメントの単位量との関係

3要因の関係は、図-1に示す3次元座標上に展開できる。また、推定強度は2変数多項式で表される。なお、各点は3個の平均値で、おのおのの平均誤差比は5%以下である。

$$f'_{c7} = -109.5 + 265.3E - 40.41E^2 - 124.0R + 15.71ER + 6.032E^2R + 101.9R^2 - 46.92ER^2 + 4.358E^2R^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$f'_{c28} = -140.2 + 224.8E - 15.45E^2 + 0.9575R - 37.44ER + 12.18E^2R + 112.7R^2 - 37.82ER^2 - 0.1838E^2R^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 極初期強度・単位セメント量・管理供試体強度との関係  
 3要因の関係を、図-1に併記した。推定強度は次式より与えられる。

$$f'_{c7} = -61.35 + 115.9E - 10.85E^2 - 0.2830C - 0.1910EC - 0.05040E^2C + 0.002433C^2 + 6.904 \times 10^{-4}EC^2 + 1.024 \times 10^{-7}E^2C^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

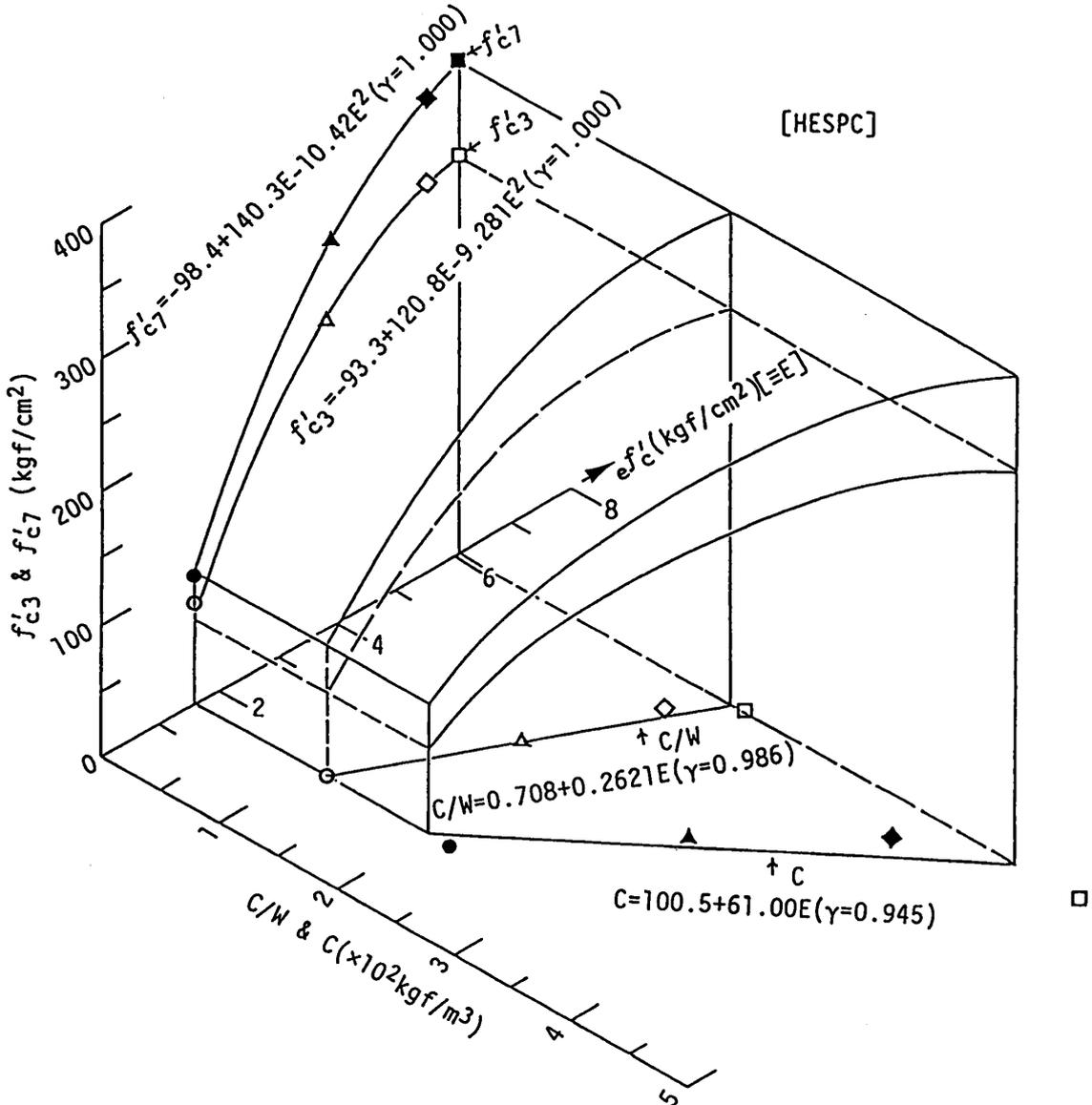


図-2 早強セメントコンクリートの極初期強度・セメント水比・セメントの単位量との関係

$$f'_{c28} = -181.4 + 167.8E - 10.68E^2 + 0.8662C - 0.1523EC - 0.05398E^2C + 6.929 \times 10^{-5}C^2 + 3.480 \times 10^{-4}EC^2 + 4.858 \times 10^{-5}E^2C^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

4.3 早強セメントの場合

(1) 極初期強度・セメント水比・管理供試体強度との関係

3要因の関係は図-2に、また、相関式は次のように与えられる。

$$f'_{c3} = -729.8 + 39.59E + 41.16E^2 + 757.8R - 161.0ER - 10.51E^2R + 84.95R^2 - 15.16ER^2 + 3.622E^2R^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f'_{c7} = -309.1 + 170.1E - 4.528E^2 + 260.1R - 50.58ER - 3.358E^2R - 50.25R^2 + 6.193ER^2 + 1.400E^2R^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2) 極初期強度・単位セメント量・管理供試体強度との関係

3要因の関係を図-2

に併記し、相関式を次に示す。

$$f'_{c3} = -399.3 + 15.24E - 7.532E^2 + 2.025C + 0.05517EC + 0.03138E^2C + 7.259 \times 10^{-4}C^2 - 4.374 \times 10^{-4}EC^2 - 4.203 \times 10^{-5}E^2C^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f'_{c7} = 440.3 + 105.3E + 10.62E^2 - 3.333C + 0.2640EC - 0.08946E^2C + 2.075 \times 10^{-3}C^2 + 5.984 \times 10^{-4}EC^2 - 2.951 \times 10^{-6}E^2C^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

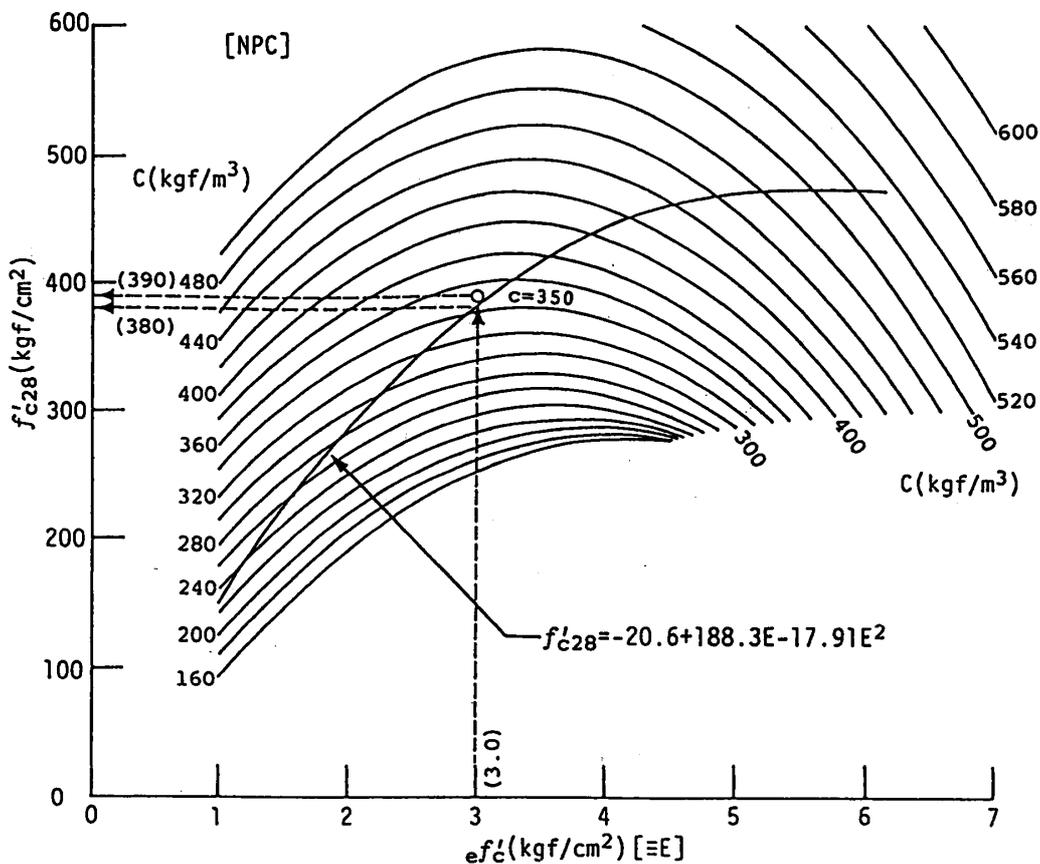


図-3 普通セメントコンクリートの3要因2次元表示

#### 4.4 品質管理図への適用とケーススタディ

品質管理上、強度の安定領域は  $f'_c = f'_c \pm 2\sigma$  で与えられる。いま、 $C.V. = 8\%$  の場合について、図-1に併記した。[EX.1] 普通セメント  $C = 350\text{kgf/m}^3$ 、 $E = 3.0\text{kgf/cm}^2$ 、 $f'_{c28} = ?$ ；図-1または式④から、 $f'_{c28} = 390\text{kgf/cm}^2$  (管理：安定)

#### 5. 3要因2変数多項式の2次元表示

図-1の開曲面表示法を、図-3の2次元表示法に拡張することができる。後者は前者に比し、さらに実用的となる。なお、図-2についても同様に表示することができる。

[EX.2] 図-3で、 $E = 3.0\text{kgf/cm}^2$  とすると、1変数推定曲線によると28日強度は  $380\text{kgf/cm}^2$  であるのに対し、単位セメント量  $350\text{kgf/m}^3$  を考慮すると、推定強度は  $390\text{kgf/cm}^2$  (式(4)では  $389\text{kgf/cm}^2$ ) となり、より推定精度が高くなることがわかる。

#### 6. 定式化により管理精度の検出

式(1)～(8)を用いると、式(9)で与えられる“誤差伝播の法則”により、要因変動が推定強度に及ぼす影響を明らかにすることができる。

$$(df'_c)^2 = (\partial f'_c / \partial E \cdot dE)^2 + (\partial f'_c / \partial R \cdot dR)^2 + (\partial f'_c / \partial C \cdot dC)^2 \dots (9)$$

[EX.3] [EX.2]で、実測平均誤差  $dE = 0.21\text{kgf/cm}^2$  ( $E \times 7\%$  相当)、材料計量誤差  $dC = 7.0\text{kgf/m}^3$  ( $C \times 2\%$  相当)と式④とから、 $df'_c = 7.1(0.21+1)^{1/2} = 7.8\text{kgf/cm}^2$ 。よって、とくに、セメントの計量は嚴重にされねばならないことがわかる。

[EX.3]で明らかのように、3要因による誤差が強度誤差に及ぼす影響度が同一バリティーであることが望ましい。よって、式(9)に対し、式(10)が成り立つ。

$$\partial f'_c / \partial E \cdot dE : \partial f'_c / \partial R \cdot dR : \partial f'_c / \partial C \cdot dC = 1 : 1 : 1 \dots (10)$$

一例として、普通セメントで材令28日強度推定曲線式(4)の場合には、式(11)が成り立つ。

$$dC = (\partial f'_{c28} / \partial E) dE / (\partial f'_{c28} / \partial C) \dots (11)$$

極初期強度  $E$  とその平均誤差  $dE$  との比率をパラメーターとしたときの極初期強度とセメントの計量誤差  $dC$  との関係、図-4に示す。一般の工事現場では、セメントの計量誤差は最大2%であるが[3]、この限界値を図-4に併記した。図-4から、極初期強度の大きいものほど、大きな平均誤差比まで限界範囲内に両者のバリティーが成り立っている。一方、低強度ほど小さな平均誤差比を保持しなければ、限界範囲に入らない。

[EX.4] 普通セメント  $C = 375\text{kgf/m}^3$ 、 $E = 3.5\text{kgf/cm}^2$ 、 $dE = 0.175\text{kgf/cm}^2$  ( $E \times 5\%$ )、 $f'_{c28}$ 、 $dC$ 、 $df'_c = ?$ ；図-1または3から  $f'_{c28} = 420\text{kgf/cm}^2$ 、図-4から  $dC = 7.3\text{kgf/m}^3$  (限界内)、式(4)・(11)から  $df'_c = 11.9\text{kgf/cm}^2$  すなわち、推定強度は  $420\text{kgf/cm}^2$  で、極初期強度の平均誤差比5%に対し、要因影響度がバリティーのセメント計量誤差は  $7.3\text{kgf/m}^3$  となり、計量限界内にある。平均誤差と計量誤差による強度変動の大きさは約  $12\text{kgf/cm}^2$  であることを意味する。

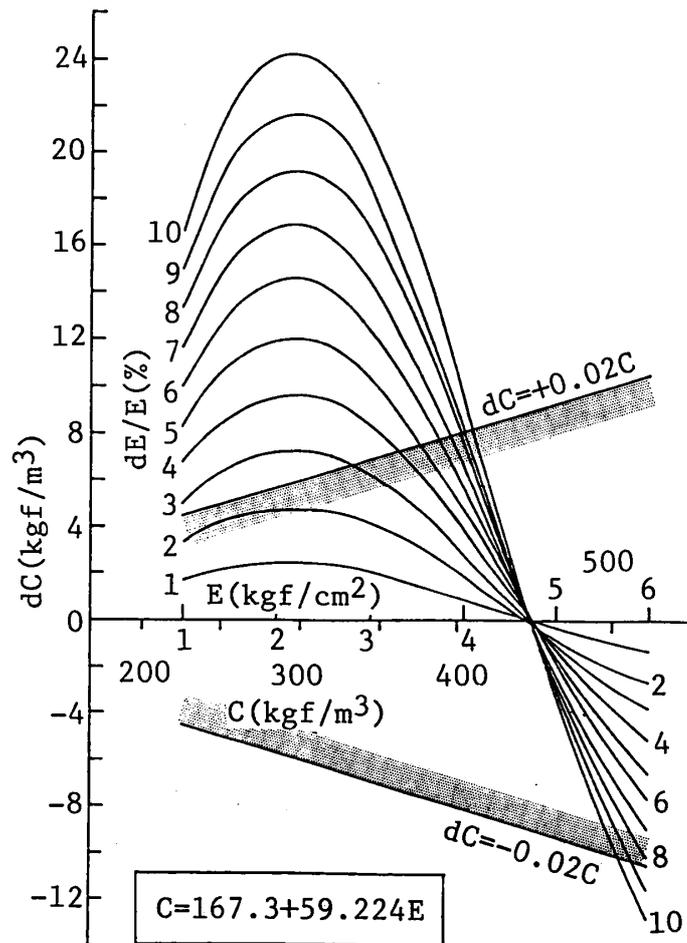


図-4 要因誤差が同一パリティを与える相関図

## 7. まとめ

- (1) フレッシュコンクリートに急結剤添加とランマー締め固めで、40分後の極初期強度から短・長期強度、セメント水比、単位セメント量を推定できる。
- (2) 三次元座標表示を二次元三要因表示法へ展開でき、管理図としても利用できる。
- (3) 2変数多項式を用い、要因変数解析を行うことができ、実験値測定精度・材料計量誤差等の影響度を明らかにできる。

【謝辞】 本研究には、防衛大学校 佐藤純一事務官の助力を受けた。付記して謝意を表する。

## 【参考文献】

- 1) たとえば, Schlüssler, K.H. u. a.: Schnellmethode zur Bestimmung der Zementfestigkeit, betontechnik, B.9, N.3, S.91 (1989).
- 2) 加藤清志・加藤直樹・湯沢敏雄・増川勲: 急速硬化促進されたコンクリートの極初期強度による長期強度および単位セメント量の迅速評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集12-1, pp.343-346 (1990).
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】、pp.51-53、(1986)。