

# 論文 高強度コンクリートの収縮に及ぼす供試体寸法の影響

宮澤 伸吾\*1 ・ 黒井 登起雄\*1 ・ 松村 仁夫\*1

**要旨:** 本研究では、高強度コンクリートの収縮ひずみの予測式を構築するための基礎資料を得ることを目的とし、水セメント比20%のコンクリートの収縮ひずみに及ぼす部材寸法および相対湿度の影響について実験により検討した。得られた実測値と既往の予測式から求めた計算値を比較検討した。高強度コンクリートは高湿度環境下に露出した条件で膨張ひずみを生じる場合があること、また普通コンクリート用の収縮ひずみの予測式をそのまま高強度コンクリートに用いると、暴露開始後の収縮ひずみを精度良く予測できない場合があることを示した。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 自己収縮, 乾燥収縮, 供試体寸法, 相対湿度

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材やプレストレストコンクリート部材の長期変形やプレストレス力の経時変化を予測するためにはコンクリートの収縮ひずみを正確に予測することが不可欠である。既存の予測式としては例えば、土木学会<sup>1)</sup>やCEB-FIP Model Code1990<sup>2)</sup>の推奨式がある。

これらの予測式は圧縮強度60~80N/mm<sup>2</sup>程度以下のコンクリートを適用範囲としている。そのため、それ以上の強度を有するコンクリートに関しては収縮ひずみの予測手法が確立していない。特に、実物大の寸法を含めた部材寸法の影響に関してはいくつかの研究報告はあるが<sup>3)4)5)6)7)</sup>、まだ十分な検討が行われていないのが現状である。

そこで、本研究では高強度コンクリートの収縮ひずみの予測式を確立するための基礎資料を得るために、高強度コンクリートの自己収縮ひずみを

測定するとともに、乾燥を受ける場合の収縮ひずみに及ぼす供試体寸法および相対湿度の影響について実験により明らかにした。さらに、既往の収縮ひずみ予測式の高強度コンクリートへの適用性について検討した。

## 2. 実験概要

コンクリートの配合は、表-1に示すように、水セメント比20%とした。セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材および細骨材には、それぞれ葛生産砕石(密度2.63g/cm<sup>3</sup>, 吸水率1.03%, 粗粒率7.14, 最大寸法20mm)および鬼怒川産川砂(密度2.58g/cm<sup>3</sup>, 吸水率2.19%, 粗粒率2.68)を用いた。混和剤にはポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤を用いた。

自己収縮ひずみの測定には材齢24時間までは供試体長手方向の中央部の断面中心に設置した埋込

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 C×%	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
		W	C	S	G			
20	37	175	875	466	809	2.5	550×550	2.6

\*1 足利工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

\*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科(正会員)

型ひずみ計(測定長:100mm, ヤング係数:50N/mm<sup>2</sup>)を用いた。材齢24時間以降は埋込型ひずみ計およびコンタクトゲージを併用した。後者において測定位置は供試体長手方向の中央とし(測定長:300mm), 図-1に示すようにb=150mmおよび250mmの場合は高さ方向に100mm間隔で標点を設けた。

供試体寸法は50×100×400mm(小型), 150×300×900mm(中型), 250×500×1500mm(大型)の3種類とした(図-1参照)。型枠には鋼製のものを用い, 型枠底面にテフロンシートを設置し, 次に型枠内面にポリエステルフィルムを設置した。コンクリート打ち込み後, 水分の逸散を防ぐために打ち込み面をポリエステルフィルムと湿布で覆い, 材齢1日まで実験室内に静置した。コンクリート内部の温度を測定するために, CC熱電対を供試体の中央断面の2~3箇所に設置した。材齢1日で脱型しアルミ箔粘着テープで供試体全面をシールした後, 材齢7日まで20℃の室内に静置した。材齢7日で供試体の上下面のシールを剥がし, 温度20±1℃で相対湿度が40±2%, 60±2%および80±2%と異なる3種類の室内に静置した。従って供試体は寸法が3種類, 相対湿度が3種類で計9体である。なお標準養生したφ10×20cm供試体の圧縮強度は材齢14日で96.9N/mm<sup>2</sup>, 材齢28日で110.7N/mm<sup>2</sup>であった。

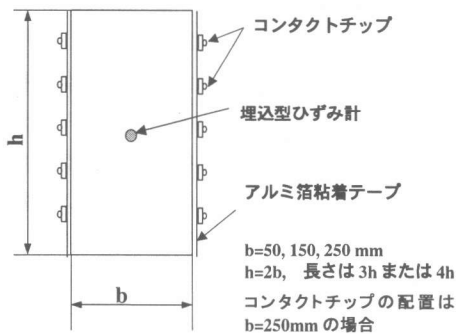


図-1 供試体の断面寸法および計測位置

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 自己収縮

図-2は供試体断面内の平均温度の経時変化を示したものである。この温度の測定結果は, 計測さ

れたひずみから温度ひずみを差し引いて自己収縮ひずみを求めるための温度補正に用いた。

供試体断面内のひずみ分布を調べた中型および大型供試体では, コンタクトゲージによる測定結果によると, 内部拘束の影響により供試体長手方向の中央位置におけるひずみの高さ方向分布はほぼ均一であった。また, 材齢24時間以降においてコンタクトチップにより測定されたひずみの平均値は埋込型ひずみ計による測定値とほぼ同じであったため, 以後の検討ではコンタクトチップによる測定値の平均値を用いた。図-3は, 自己収縮ひずみの経時変化を各供試体寸法3体の平均値で示したものである。ここではコンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度補正を行った。

著者らは, 供試体寸法が大きいほど若材齢における自己収縮速度が速いが長期材齢では自己収

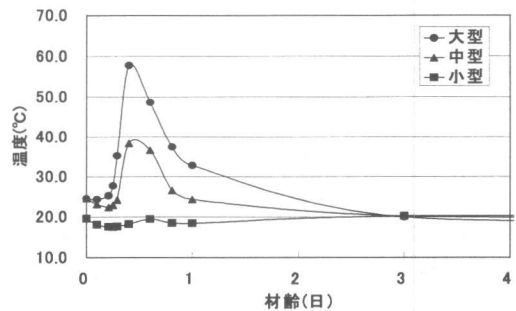


図-2 供試体温度の経時変化

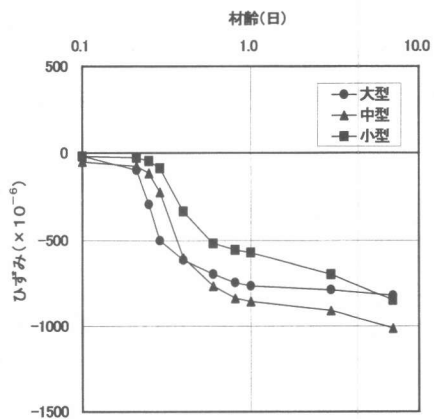


図-3 材齢と自己収縮ひずみの関係

縮ひずみの差は小さくなると報告しているが<sup>8)</sup>、本研究でも同様な傾向が認められた。供試体が大きいほど若材齢における自己収縮速度が大きくなったのは、セメントの水和熱による温度上昇量が大きくなり水和反応が活発になったためと考えられる。

著者らが既に提案した予測式(式(1))<sup>9)</sup>を用いて自己収縮ひずみを算出し本研究における実測値と比較した。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \varepsilon_{c0}(W/B) \beta(t) \quad (1)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t-t_0)^b\} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{c0}(W/B) = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (3)$$

ここに、

$\varepsilon_c(t)$ : 材齢 $t$ 日における自己収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )

$\beta(t)$ : 自己収縮ひずみの進行速度を表す関数

$\gamma$ : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数(普通ポルトランドセメントの場合 $\gamma=1.0$ )

$\varepsilon_{c0}(W/B)$ : 自己収縮ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )

$W/B$ : 水結合材比(ここでは水セメント比)

$a, b$ : 定数( $W/B=0.2$ の場合 $a=1.2, b=0.4$ )<sup>9)</sup>

$t_0$ : 凝結の始発(日)

$t$ : 材齢(日)

$t$ および $t_0$ はコンクリートの温度によって次式で補正する。

$$t \text{ および } t_0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (4)$$

ここに、

$\Delta t_i$ : 温度が $T^\circ\text{C}$ である期間の日数(日)

$T(\Delta t_i)$ : 期間 $\Delta t_i$ における温度( $^\circ\text{C}$ ),  $T_0=1^\circ\text{C}$

コンクリート温度が自己収縮に及ぼす影響を考慮するために、式(4)に示す有効材齢により図-3の結果を整理したものを図-4に示す。寸法の異なる供試体の自己収縮ひずみは温度の影響を式(4)で考慮することにより概ね評価できるものと考えられる。

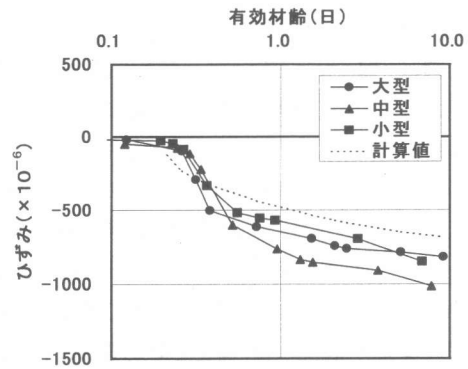


図-4 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

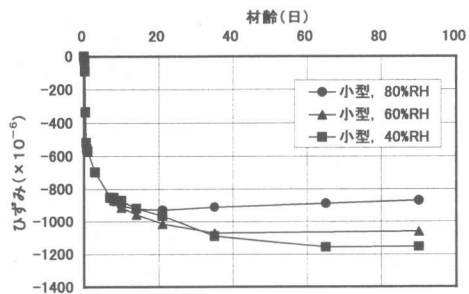


図-5 収縮ひずみ(小型供試体)

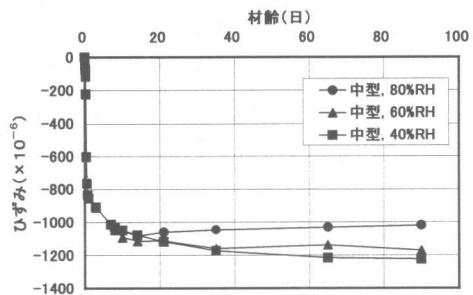


図-6 収縮ひずみ(中型供試体)

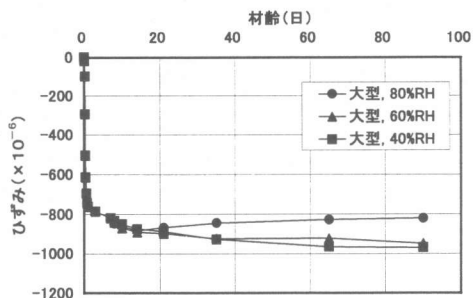


図-7 収縮ひずみ(大型供試体)

### 3.2 相対湿度の影響

図-5、図-6および図-7は、材齢7日までシール養生を行い、その後供試体の上下面のシールを剥がし各相対湿度条件下に暴露した場合の収縮ひずみの経時変化を供試体寸法別に示したものである。また、図-8、図-9および図-10は暴露開始時(材齢7日)を基準にした収縮ひずみを相対湿度別に示したものである。暴露開始(材齢7日)までの自己収縮ひずみは $800\sim 1000\times 10^{-6}$ 程度であり(図-5~7)、これと比較すると暴露開始以降の収縮ひずみは相対湿度40%の場合でも約3ヶ月で $300\times 10^{-6}$ 程度以下(図-8)と小さい。また相対湿度が80%の場合、収縮ひずみに及ぼす供試体寸法の影響は相対湿度40%および60%の場合と比較して小さい。相対湿度80%の場合、暴露開始後の収縮ひずみは $100\times 10^{-6}$ 程度以下と小さい。

著者らは、表面にシールを施さない $100\times 100\times 400\text{mm}$ 供試体すなわち体積露出面積比(V/S)が25mmの場合について収縮ひずみに及ぼす相対湿度の影響について報告した<sup>10)</sup>。すなわち、水セメント比が20%の場合、シール供試体と比較すると相対湿度75%以下で収縮が増加し、75%以上で収縮が減少し場合によっては膨張することを示した。このように、水セメント比が小さい場合に高湿度域で膨張がみられたのは、セメントの水和反応に伴いセメント硬化体が自己乾燥状態(Self-desiccation)となるため、供試体が空気中の水分を吸収したためと考えられる。また環境への暴露によりひずみが付加されない相対湿度はコンクリート内部の相対湿度とほぼ同じで、この相対湿度では水分の逸散や吸収が生じないことを示した。図-10より、相対湿度80%の場合いずれの供試体(V/S=50~250mm)においても、暴露開始から1~2週間までは収縮ひずみが増加し、その後膨張に転じている。外気からの水分補給が供試体表層部からある程度内部に進行するまでは自己乾燥の影響が大きく、その期間に収縮ひずみが認められたものと考えられる。

### 3.3 収縮ひずみの予測式による検討

設計基準強度が $80\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンク

リートの収縮ひずみの予測式はまだ確立されていない。そこで本研究では、圧縮強度が $60\sim 70\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までのコンクリートを対象とした土木学会式(式(5))<sup>1)</sup>による計算値と実測値の比較を行った。ここでは暴露開始材齢である材齢7日以降の収縮ひずみ(自己収縮ひずみ+乾燥収縮ひずみ)で比較した。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})] \varepsilon'_{sh} \quad (5)$$

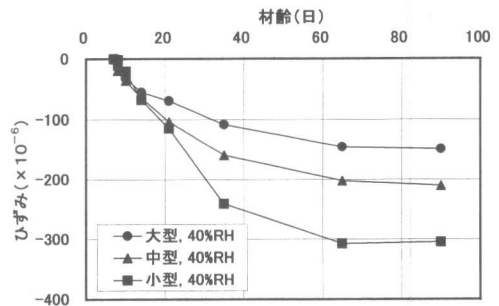


図-8 材齢7日以降の収縮ひずみ(40% R.H.)

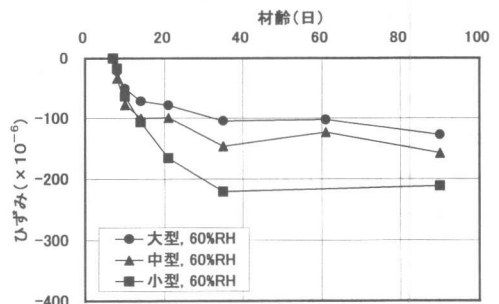


図-9 材齢7日以降の収縮ひずみ(60% R.H.)

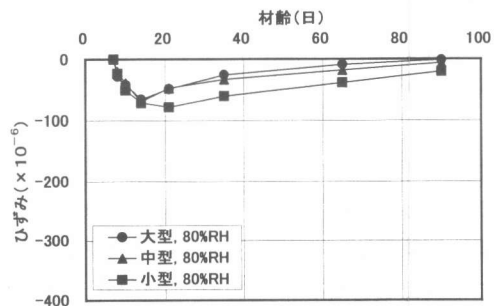


図-10 材齢7日以降の収縮ひずみ(80% R.H.)

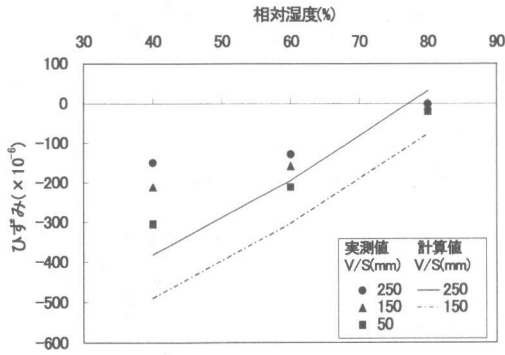


図-11 相対湿度と収縮ひずみの関係  
(計算値は土木学会式による)

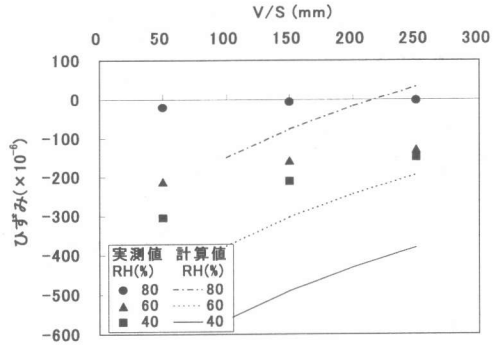


図-12 供試体寸法と収縮ひずみの関係  
(計算値は土木学会式による)

ここに、

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 [1 - \exp(\text{RH}/100)] + 38 \log_e W - 5 [\log_e (V/S)/10]^2$$

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ : コンクリートの材齢  $t_0$  から  $t$  までの収縮ひずみ ( $\times 10^{-5}$ )

$\varepsilon'_{sh}$ : 収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-5}$ )

$t$ : 材齢(日),  $t_0$ : 乾燥開始材齢(日)

RH: 相対湿度 (%) ( $45\% \leq \text{RH} \leq 80\%$ )

V/S: 体積表面積比 (mm) ( $100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$ )

W: 単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ( $130\text{kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230\text{kg}/\text{m}^3$ )

また、CEB-FIP Model Code 1990<sup>2)</sup>の収縮ひずみの予測式(式(6))では設計基準強度が $80\text{N}/\text{mm}^2$ までのコンクリートを対象としており、予測式は材齢28日の圧縮強度( $f_c$ )の関数となっている。本研究では $f_c=110.7\text{N}/\text{mm}^2$ であるが、CEB-FIP Model Codeの適用範囲を考慮して式(6)において $f_c=80\text{N}/\text{mm}^2$ とした。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \{160 + 50(9 - f_c/10)\} \times 1.55 \{1 - (\text{RH}/100)^3\} \beta_s(t - t_0) \quad (6)$$

ここに、

$$\beta_s(t - t_0) = \left[ \frac{t - t_0}{\{350((2V/S)/100)^2 + (t - t_0)\}} \right]^{0.5}$$

$f_c$ : コンクリートの28日圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

図-11および図-12は、土木学会式による予測値

と実測値の比較を材齢90日の場合について示したものである。実測ではV/Sが250mmと大きい場合は、相対湿度が収縮ひずみに及ぼす影響が小さくなっているが、予測式は相対湿度の影響を過大評価している。また相対湿度が80%と高い場合、予測式は供試体寸法の影響を過大評価している。相対湿度が40%の場合は収縮ひずみを過大評価している。

図-13および図-14は、CEB-FIP Model Codeによる予測値と実測値の比較を材齢90日の場合について示したものである。いずれの供試体寸法の場合も、予測式は相対湿度が収縮ひずみに及ぼす影響を過小評価している。また相対湿度が40~60%の場合、予測式は収縮ひずみを過小評価している。

以上のことから、土木学会およびCEB-FIPの推奨式をそのまま高強度コンクリートに用いると収縮ひずみを精度良く予測できない場合があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、水セメント比20%の高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす供試体寸法の影響(体積露出面積比50~250mm)および相対湿度の影響(相対湿度40~80%)について実験により検討した。その結果より明らかになった事項をまとめると以下の通りである。

- (1) 供試体寸法が大きいほど凝結直後の自己収縮速度が大きい。材齢7日程度で供試体寸法による自己収縮ひずみの差は小さくなった。

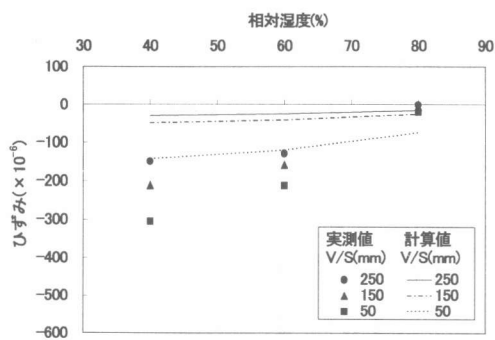


図-13 相対湿度と収縮ひずみの関係  
(計算値はCEP-FIPI式による)

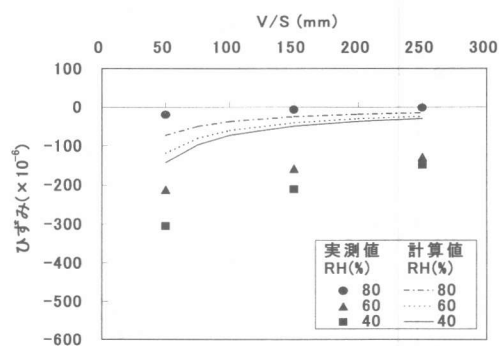


図-14 供試体寸法と収縮ひずみの関係  
(計算値はCEP-FIPI式による)

- (2) 相対湿度が80%の場合、暴露開始後の収縮ひずみは小さく、また供試体寸法が収縮ひずみに及ぼす影響は小さくなった。
- (3) いずれの供試体寸法の場合においても相対湿度80%の条件下に暴露してから1~2週間程度までの間に若干の収縮ひずみが認められ、その後膨張に転じた。
- (4) 供試体寸法が大きいほど相対湿度が収縮ひずみに及ぼす影響は少なくなった。
- (5) 既存の収縮ひずみの予測式をそのまま高強度コンクリートの収縮ひずみの予測に用いると、供試体寸法および相対湿度の影響を精度良く評価できない場合があることが認められた。
- 4) 阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮の予測式について、セメント技術年報, Vol.36, pp.263-266, 1982.12
- 5) 浅沼 潔, 竹下治之, 藤井 学: 部材厚さが乾燥収縮に及ぼす影響とその評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.621-626, 1995.6
- 6) 安田正雪, 柘田佳寛, 阿部道彦, 荒金直樹: 高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす試験体寸法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.613-618, 1997.6
- 7) 和田宣史, 佐藤良一, 袖山隆行, 雪田慶子: コンクリートのクリープ・収縮の寸法依存性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.769-774, 1999.6
- 8) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの体積変化に及ぼす供試体寸法の影響, 第23回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.16-21, 1996.10
- 9) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.211-219, 1997.8
- 10) Miyazawa, S. and Tazawa, E.: Autogenous shrinkage and drying shrinkage of high-strength concrete, Proc. of the 5th Int. Symposium on Utilization of High-strength/ High-performance Concrete, Vol. 2, pp.1254- 1263, 1999.6

#### 謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究C, 研究代表者:宮澤)の補助により行われたことを記し感謝の意を表す。また、実験に際しては足利工業大学卒研究生松永秀彦君に多大なご協力を受けたことに対し感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編) 平成8年版制定, pp.25-27, 1996
- 2) CEB-FIP: CEB-FIP Model Code 1990, 1990
- 3) A. M. Neville: Properties of Concrete, Longman, pp.440, 1995