

## 論文 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ性状に関する実験的研究

阿部浩幸<sup>\*1</sup>・大城壮司<sup>\*2</sup>・余国雄<sup>\*3</sup>・武知勉<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリート材料のひび割れやすく脆いという短所は、鉄筋コンクリート構造物においてひび割れが鉄筋に達しやすく、耐久性の低下や供用性を損なう原因となっている。鋼繊維補強コンクリートは、このようなコンクリートの短所を改善する目的で適用されているが、ひびわれ幅に関する算定方法が確立されていないため、その特性が十分に活用されていない状況にある。本研究では、鋼繊維補強効果の確認と共に、ひび割れ幅に対する鉄筋かぶりの影響の検討を目的とし、引張試験を行った。その結果より、普通コンクリートと同様に（ひび割れ幅／鉄筋ひずみ）とかぶりの間に比例関係があることがわかった。

キーワード：鋼繊維補強，ひび割れ，鉄筋ひずみ，かぶり，両引き引張試験

## 1. はじめに

ひび割れの発生を許容する鉄筋コンクリートやパーシャルプレストレストコンクリート構造物における過大なひび割れは、耐久性の低下、構造物の機能や美観を損なう大きな原因となっている。また、コンクリート標準示方書などの各種基準では、環境条件、耐用年数および水密性などから供用期間中における構造物の所要の性能を確保する目的で、最大ひび割れ幅の制限値を設けている<sup>1)</sup>。このように、コンクリート構造物の設計においてひび割れ幅を制御することは、極めて重要な限界状態のひとつとなっている。しかし、コンクリート材料は、外的要因によって容易にひび割れを発生しやすく脆いという宿命的な短所を有している。

このようなコンクリート材料の短所を改善する目的で、鋼繊維をコンクリートに混入する鋼繊維補強コンクリート（SFRC；Steel Fiber Reinforced Concrete）が数多く研究され、実際の構造物へ適用されている<sup>2)</sup>。これまでの適用例では、SFRCを用いることで曲げ性状や疲労性状などの強度特性が、構造物の性能を向上させるとい

う目的で適用されてきた。近年、前述したように耐久性照査の重要な項目としてひび割れ幅の検討が行われる状況において、SFRCのもう一つの特性であるひび割れ抵抗性を定量的に判断することで、更なる有効性が見出されると考えられる。

SFRCが、ひび割れ幅の制御に効果があるという報告は多く、小林ら<sup>3)</sup>や穴戸ら<sup>4)</sup>の研究によると、RC構造に比べてSFRC構造は、ひび割れ間隔やひび割れ幅が小さくなることが明らかにされている。しかしながら、SFRC構造のひび割れ幅やひび割れ間隔を算出する方法が確立されていないのが現状である。

角田の報告<sup>5)</sup>では、RC部材において、鉄筋のかぶりはひび割れ幅に影響する重要な要因であることが多くの実験によって検証され、鉄筋のかぶりとひび割れ幅の関係を定式化した。そこで、本研究では、SFRC部材において、鉄筋かぶりとひび割れ幅の関係に着目し、鉄筋径（D10，D25）とかぶり（61，40，35mm）を要因として、普通コンクリートとSFRCの供試体による引張試験を行った。

\*1 オリエンタル建設（株） 技術研究所主任研究員 工修（正会員）

\*2 日本道路公団 技術部 構造技術課（非会員）

\*3 オリエンタル建設（株） 第二技術部 工博（正会員）

\*4 オリエンタル建設（株） 第二技術部（非会員）

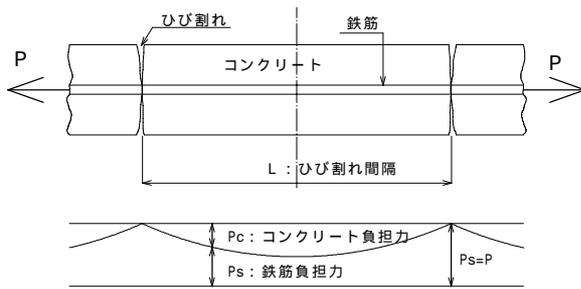


図 - 1 ひび割れ間の分担力の模型図

## 2. 既往の RC 部材ひび割れ算定式について

図 - 1 に示すような鉄筋コンクリート構造物におけるひび割れは、鉄筋とコンクリートとの間の付着力によって一体として挙動していたものが、コンクリートに発生する引張応力度が引張強度に達した時点で発生する。このとき、ひび割れ幅は、ひび割れ間の鉄筋の伸びとコンクリートの伸びの差によって生ずるものである。一般に示されているひび割れ幅算定式は、例えば、CEB-FIB モデルコード<sup>6)</sup>、日本建築学会 PRC 指針<sup>7)</sup>、土木学会コンクリート標準示方書、ACI318-83<sup>8)</sup>があり、ひび割れ間隔に関する項と鉄筋のひずみ（応力）に関する項との積で与えられている。いずれの算定式も、ひび割れ間隔は鉄筋のかぶりや配置間隔を基にしている。以下に代表として、土木学会コンクリート標準示方書式を示す。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon_{csd} \right] \quad (1)$$

ここに、 $w$  はひび割れ幅、 $k_1, k_2, k_3$  は鉄筋の形状、品質、段数に関わる係数、 $c$  は鉄筋のかぶり、 $c_s$  は鉄筋の間隔、 $\phi$  は鉄筋径、 $\sigma_{se}$  は鉄筋位置のコンクリート応力度が 0 の状態からの鉄筋引張応力度の増加量、 $\epsilon_{csd}$  はコンクリートの収縮およびクリープなどによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。この算定式を図 - 1 に示す一本鉄筋の状態にあてはめ、収縮およびクリープを考慮しないとした場合、以下のような簡略式に置き換えることができる。

$$w = k_4 c \epsilon_s \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon_s$  は鉄筋ひずみである。土木学会コンクリート示方書式の基になった角田は、ひび割れ最大間隔  $l_{max}$  とかぶりの関係を  $l_{max} = k_4 c$  としており、(2) 式はひび割れ間隔と鉄筋のひずみの積でひび割れ幅を算出する式となる。

一方、図 - 1 を SFRC とした場合、ひび割れ部分において鋼繊維とコンクリート（モルタル）との付着力による引抜け抵抗を示すことから、ひび割れ断面において鉄筋と鋼繊維が引張力を分担する。また、鋼繊維を混入することにより、鉄筋とコンクリートとの付着力は高まる。このことから、普通コンクリートに比べひび割れ間隔およびひび割れ幅は小さくなると考えられ、普通コンクリートのひび割れ算定式のかたちをそのまま適用することができるかどうかは不明である。

本研究では、普通コンクリートのひび割れ性状を表した (2) 式のひび割れ幅、鉄筋応力およびかぶりの関係が、SFRC のひび割れにおいても成り立つかどうかを確認する目的で、図 - 1 に示すような断面中央に鉄筋を配置した供試体を用いて、実験を行った。

## 3. 実験概要

### 3.1 実験方法と要因

実験は、図 - 2 に示すような両引き試験を行い、純引張応力状態下のひび割れ性状を測定した。ひび割れを誘発するために幅 20mm、高さ 10mm の切欠きを設け、断面中央部分に鉄筋とコンクリートとの付着を絶つ区間を設けることでコンクリートに一樣な引張り応力を生じさせるように計画した。計測は、引張り荷重、切欠き部分に取り付けたゲージにてひび割れ幅および鉄筋表面に貼付したゲージにて鉄筋ひずみを測定した。供試体の種類は、表 - 1 に示すような鉄筋径、かぶりおよびコンクリート種別の組合せとし、全部で 8 要因とした。実験は各要因について 3 体、全部で 24 体の供試体を製作した。F10-35

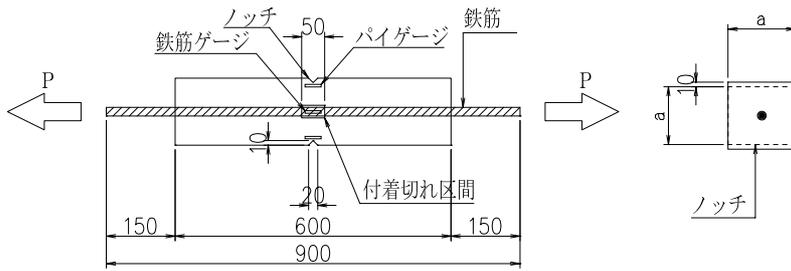


図 - 2 両引き実験供試体の形状寸法

の3体内の1体は、切欠き断面全面にひび割れが発生しなかった。その結果は、除外するものとした。実験状況を写真 - 1 に示す。

### 3.2 使用材料と製作

SFRC に用いた鋼繊維は、長さ 30mm で公称直径 0.6mm (アスペクト比 50) のものを用いた。コンクリートへの鋼繊維容積混入率は、一般に 0.5 ~ 2% といわれていることから、本試験においては 1% とし、 $1\text{m}^3$  当り 80kg を混入した。SFRC に用いた配合を表 - 2 に示す。普通コンクリートは、SFRC とは異なる細骨材率 44% で同じ水セメント比の配合のものを使用した。鉄筋は、異形鉄筋 D10 および D25 を使用し、同じロットから採取した試料に供試体と同じ要領でゲージを貼付し、引張試験を行い荷重とひずみの関係を測

定した。その強度試験結果を表 - 3 に示す。

供試体は切欠き部が側面となるよ

うに型枠をセットし、供試体を水平に置いた状態でコンクリートの打設を行った。供試体は、気中養生とし、普通コンクリートは材齢 16 日、SFRC は材齢 17 日で試験を行った。試験時の SFRC および普通コンクリートの強度試験結果を表 - 4 に示す。圧縮強度に対する引張強度の比は、普通コンクリートで 1/13、SFRC で 1/9 を示し、繊維補強により引張抵抗力が増加する結果であった。

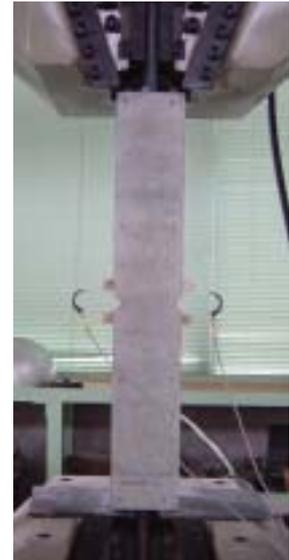


写真 - 1 実験状況

表 - 1 供試体の種類

種類	コンクリート種別	鉄筋径 (mm)	断面寸法 (mm)	かぶり (mm)
F25 - 61	SFRC	25	147	61
F25 - 40			105	40
F25 - 35			95	35
F10 - 40	SFRC	10	90	40
F10 - 35			80	35
N25 - 61			RC	25
N25 - 40	105	40		
N25 - 35	95	35		

表 - 2 鋼繊維コンクリート配合表

W/C (%)	細骨材率 (%)	繊維混入率 (%)	配合 (kg/m <sup>3</sup> )				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
50	50.5	1	350	175	868	857	80

表 - 3 鉄筋試験結果

	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D10	346	193
D25	382	180

表 - 4 コンクリート強度試験結果

	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鋼繊維コンクリート	17	38.2	28.48	4.26
普通コンクリート	16	40.4	30.72	3.17

#### 4. 試験結果

##### 4.1 ひびわれ幅および鉄筋ひずみの検討

D25 を用いた SFRC と普通コンクリート供試体の荷重とひび割れ幅挙動の比較の一例を図 - 3 ~ 5 に示す。いずれも、SFRC 供試体のひび割れ発生荷重は普通コンクリートに比べ大きい結果を示している。普通コンクリート引張強度に対する SFRC の引張強度の比は 1.3 に対し、供試体のひび割れ発生荷重の比は、かぶり 35 および 40 では約 1.2 を、かぶり 61 では約 1.5 とばらつきがあった。両者とも、ひび割れ発生後において荷重の増加とともにひび割れ幅は比例して増加して、その勾配はほぼ等しいことがわかる。同じ荷重でのひび割れ幅は、普通コンクリートに比べ SFRC が小さくなっており、かぶりが大きいほど両者のひび割れ幅の差も大きくなっている。荷重 100kN 時の各かぶり供試体ひび割れ幅の平均値を普通コンクリートに対する SFRC の比率で示すと、かぶり 61mm で 0.55、かぶり 40mm で 0.76、かぶり 35mm で 0.95 であった。これは、かぶりが大きいほど鋼繊維の抵抗が大きくなっていることを示し、かぶりが大きいほど断面に存在する鋼繊維量が多いことによるものと考えられる。

図 - 6 に F25-61 と N25-61 供試体の荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。この図も、荷重とひび割れ幅の関係と同様に、ひび割れ発生後の荷重と鉄筋ひずみの勾配はそれぞれほぼ等しく、同じ荷重での鉄筋ひずみは、N25-61 に比べ F25-61 の方が小さい結果を示した。この傾向は、かぶりが異なる供試体においても同じであり、ひび割れ幅同様にかぶりが小さいほどその差が小さくなる結果となった。

図 - 7 に D25 鉄筋を用いた普通コンクリート供試体のひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係を、図 - 8 には SFRC 供試体の結果を、図 - 9 には D10 鉄筋を用いた SFRC 供試体の結果を示す。普通コンクリート N25 シリーズの結果より、ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係は、角田の報告<sup>5)</sup>が示すようにほぼ直線の関係を示した。また、かぶ

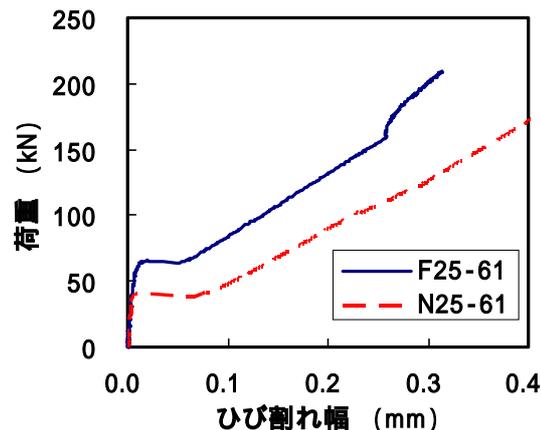


図 - 3 ひび割れ幅の比較 (D25, かぶり 61mm)

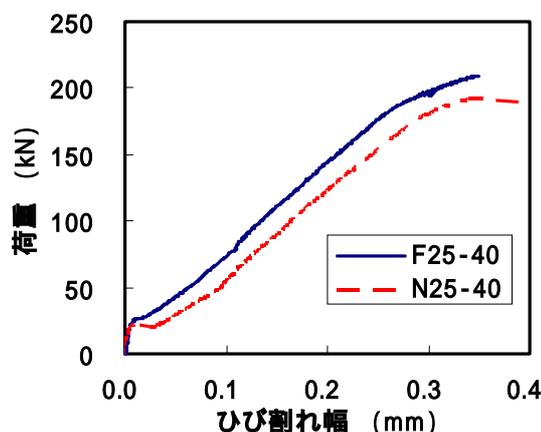


図 - 4 ひび割れ幅の比較 (D25, かぶり 40mm)

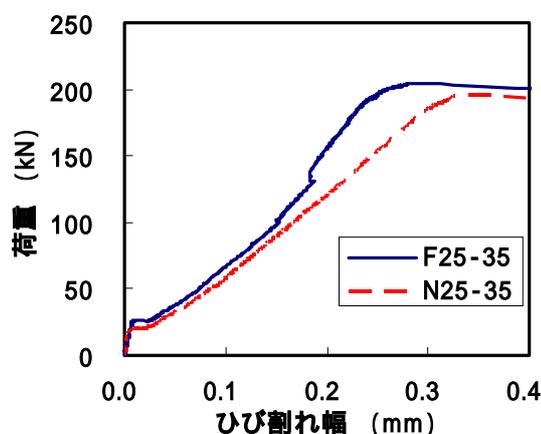


図 - 5 ひび割れ幅の比較 (D25, かぶり 35mm)

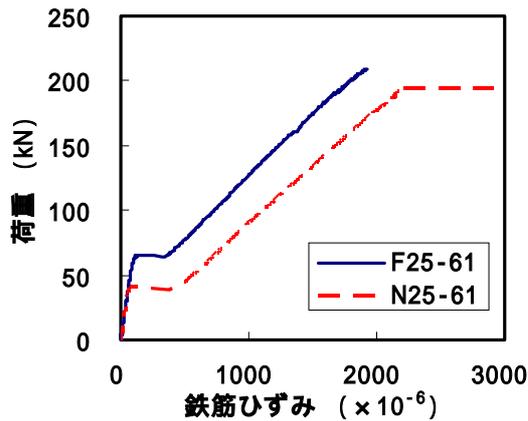


図 - 6 荷重と鉄筋ひずみの関係の比較

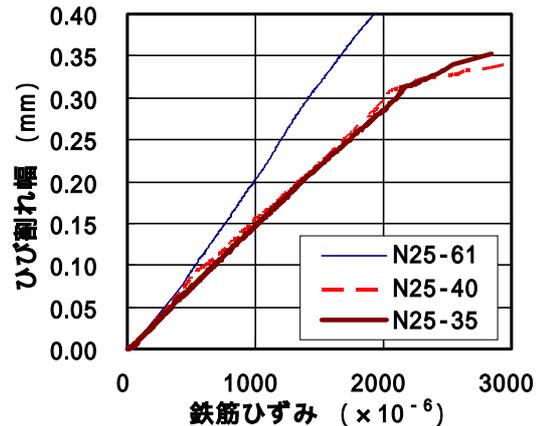
りが大きいほどその勾配は大きい。一方、鉄筋径の同じ SFRC の F25 シリーズの結果は、鉄筋ひずみ約  $1500 \times 10^{-6}$  まで普通コンクリートと同様にほぼ直線関係を示していることがわかる。また、かぶりによる影響も普通コンクリートと同様で、F25-61 は F25-40 および F25-35 に比べ勾配が大きい結果を示した。鉄筋ひずみ  $1000 \times 10^{-6}$  時のかぶり 61mm のひび割れ幅平均値は、普通コンクリートで 0.211mm、SFRC で 0.193mm と若干 SFRC が小さく、かぶりの小さい 40mm および 35mm タイプについては、ほぼ同じ結果であった。これは、かぶりは小さいほど、鋼繊維の影響は小さくなるためと考えられる。鉄筋径の小さい D10 を使用した供試体の場合、勾配が途中わずかであるが変化しているものの、この場合もほぼ直線的な挙動を示しているといえる。

#### 4.2 かぶり、ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係

式(2)より普通コンクリートにおいて、

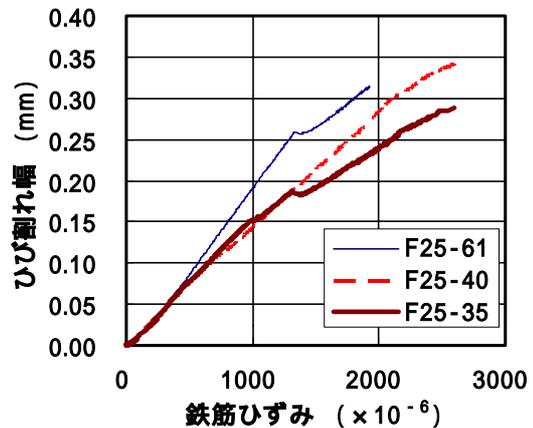
$$\frac{w}{\epsilon_s} = k_4 c \quad (3)$$

の関係が得られる。本実験の場合において、式(3)の関係を普通コンクリートと SFRC で比較検討してみた。図 - 10 は、鉄筋ひずみ約  $1000 \times 10^{-6}$  での試験データから ( $w$ , ) を取り出し、かぶりとの関係を示したものである。この図より、N25 および F25 の結果はかぶりが大きくなることにより  $w/$  の値が増加する同じ傾向を示していることがわかる。また、鉄筋径の異なる F10



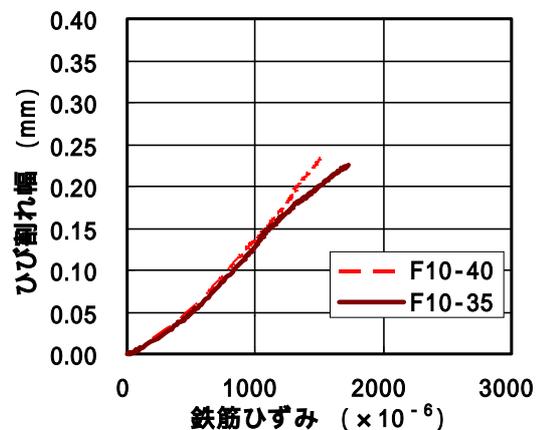
(普通コンクリート, D25)

図 - 7 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係



(鋼繊維補強コンクリート, D25)

図 - 8 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係



(鋼繊維補強コンクリート, D10)

図 - 9 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係

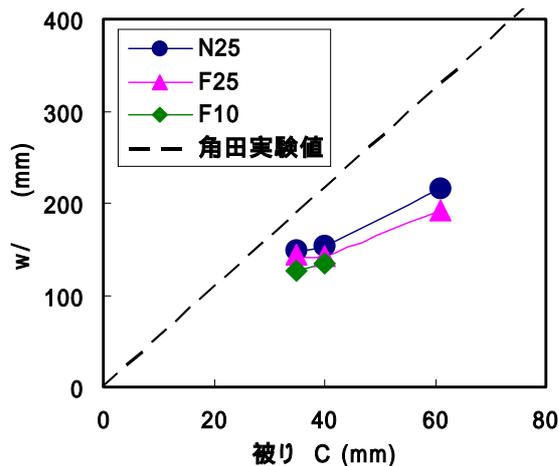


図 - 10  $\frac{w}{\epsilon_s}$  とかぶり c の関係の比較

に関して同じ傾向があることが示された。同図には、角田によって行われた RC 両引き実験<sup>5)</sup>から得られた両者の関係(勾配 5.4)を示す。本実験の結果は角田報告の提案値の下方にある。これは角田の報告では、平均鉄筋ひずみを用いており、実験結果では、切欠きを設けたことにより計測位置で最大ひずみを示したと考えられ、それによる影響ではないかと思われる。

以上の結果より、SFRC においても普通コンクリート同様にひび割れ幅、鉄筋ひずみおよびかぶりの間に同じ関係があることが示された。言い換えれば、SFRC においても、RC のように、ひび割れ幅の計算式は以下のかたちになる。

$$w = k_5 c \epsilon_s \quad (4)$$

しかしながら、SFRC と RC において係数は異なると考えられる。SFRC における  $k_5$  係数、ひび割れ間隔、最大鉄筋ひずみと平均鉄筋ひずみの関係についての検討を、著者による曲げ実験によって報告する予定である。

## 5. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

(1) 同じ荷重において、普通コンクリート供試体より、鋼繊維補強コンクリート供試体のひび割れ幅は小さくなる。かぶりが大きいほど、その差異が大きくなる。

(2) 同じ荷重において、普通コンクリート供試体より、鋼繊維補強コンクリート供試体の鉄筋ひずみは小さくなる。かぶりが大きいほど、その差異が大きくなる。

(3) 鋼繊維補強コンクリートにおいても(ひび割れ幅/鉄筋ひずみ)とかぶりの関係は、普通コンクリートとほぼ同様に比例関係にあることが確認された。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002年制定
- 2) 社団法人鋼材倶楽部：スチールファイバーコンクリートの手引き，1998.10
- 3) 小林一輔，趙力采：鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験方法，土木学会論文報告集，No.300，1980.7
- 4) 穴戸薫，関口幹夫：鋼繊維補強コンクリートのひびわれ分散について，都土木技研年報，1978
- 5) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅，コンクリート・ジャーナル，Vol.8, NO.9, pp1-9, Sept. 1970
- 6) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures，1978
- 7) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(種 PC)構造設計・施工指針・同解説，2003.2
- 8) Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI318-83, 1983