

論文

[2020] 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力～すべり関係の影響要因

李 振宝\*1 · 大野義照\*2 · 鈴木計夫\*3

1. まえがき

鉄筋コンクリート(以下RCと略記)部材のたわみやひび割れ幅は、持続荷重下においてコンクリートのクリープ、乾燥収縮および時間経過に伴うコンクリートと鉄筋間のすべりの増加(以下付着クリープと呼ぶ)による付着応力の緩和によって増大する。既報[1]ではRC両引試験体の持続載荷実験を行い、異形鉄筋の基本的な付着クリープ特性および付着応力( $\tau$ )～すべり( $s$ )関係の経時変化を把握し、そのモデル化を行い、既報[2]でその $\tau$ ～ $s$ 関係のモデルを用いて片持梁の端部ひび割れ幅および端部鉄筋の抜け出しによる付加たわみを解析した。本報では、より詳細に異形鉄筋の付着クリープ特性を把握するために、鉄筋のふし形状、コンクリート強度、かぶり厚さ、コンクリートの乾燥収縮量および鉄筋の持続応力の大きさを実験要因にRCプリズム両引試験体の持続載荷実験を行い、各要因の鉄筋ひずみや端部すべり量の経時変化などへの影響を調べた。また求めた持続荷重下における $\tau$ ～ $s$ 関係モデルの適合性を鉄筋の抜け出しによる付加たわみやひび割れ幅の増大を調べた片持梁持続載荷の実験結果についての付着解析によって検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と種類

表1 試験体の種類

持続載荷試験体の形状を図1に、その種類を表1に示す。試験体の長さは、かぶり厚さに応じたRC部材のひび割れ間隔とし、かぶり厚さの大きいL-5とL-6試験体は各1体、他の試験体は各2体作製した。実験変数はかぶり厚さ、鉄筋のふし形状(3種類の市販鉄筋)、コン

試験体名	シールの有無	試験体寸法 a×a×L(cm)	鉄筋ふしの種類	コンクリートの目標強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	鉄筋の持続応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	乾燥収縮試験体	クリープ試験体		
L-1	無	12×12×27	横ふしI	400	2000	SH400	---		
L-2					2600		---		
L-3	有				2000	SH400S	---		
L-4					2600		---		
L-5	無	16×16×40	横ふしII	2000	SH400A	CR400A	---		
L-6								2600	
L-7	無	12×12×27	波ふし	500	2000	SH400	---		
L-8			横ふしI				---		
L-9			---				---	SH500	CR500
L-10							---		

クリート強度およびコンクリートの乾燥収縮量(シールの有無によって制御)とした。鉄筋持続応力は2000kgf/cm<sup>2</sup>を基準とし、付着応力 $\tau$ が最大値に達した後の付着性状を調べるため、一部は2600kgf/cm<sup>2</sup>とした。また、単調載荷時の付着応力～すべり関係を調べるために各種類とも単調載荷用試験体を各々2体ずつ同時に作製した。

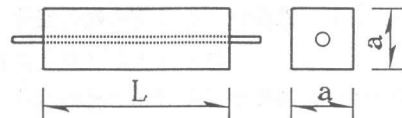


図1 試験体の形状

2.2 使用材料

コンクリートには早強ポルトランドセメント、川砂および最大粒径15mmの砕石を用いた。

- \*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻(正会員)
- \*2 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博(正会員)
- \*3 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

表2に持続荷重開始時の力学的性質を示す。鉄筋は図2に示すような異形鉄筋(横ふしⅠ、横ふしⅡと波ふしの3種類) D19を用いた。単調荷重試験ではすべりの大きい範囲まで  $\tau \sim s$  関係を得られるように、2種類の横ふし鉄筋は高周波焼入れ加工によって降伏点を7000kgf/cm<sup>2</sup>まで高め、波ふし鉄筋はSD490を用いた。持続荷重試験体に用いた鉄筋はSD345である。なお、ワイヤストレインゲージ(W.S.G)を貼付するため、鉄筋には縦リブを削って溝が設けられている。

### 2.3 荷重および測定方法

試験体は荷重日まで湿布養生を行い、図3に示すような持続荷重を試験体L-1~L-8はコンクリート材令14日、試験体L-9、L-10は28日から開始した。鉄筋ひずみは2.25cm(約2ふし)間隔に貼付した検長2mmのW.S.Gにより、コンクリートひずみはコンタクトストレインゲージ(C.S.G)にて測定し、端部すべり量は鉄筋に溶接固定した金具とコンクリート試験体端部との間の変位をC.S.Gにて測定することによって求めた。コンクリートの乾燥収縮およびクリープ(圧縮、持続応力60kgf/cm<sup>2</sup>)は両引試験体と同じ断面形状のコントロール試験体を用いて測定した。図4に乾燥収縮ひずみ( $S_h$ )およびクリープ係数( $\phi$ )を示す(同図中の試験体記号は表1参照)。なお持続荷重実験は温度20±1℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で行い、93日経過した現在も継続中である。また、単調加力時の付着応力-すべり関係を求めるための単調荷重実験は持続荷重開始時期にあわせて行った。

表2 コンクリートの力学的性質

目標強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
500	499	37.7	3.00
400	429	34.2	2.92
260	258	28.7	2.25

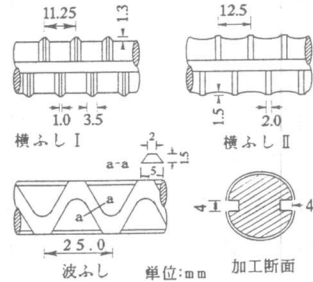


図2 鉄筋ふしと断面形状

に溶接固定した金具とコンクリート試験体端部との間の変位をC.S.Gにて測定することによって求めた。コンクリートの乾燥収縮およびクリープ(圧縮、持続応力60kgf/cm<sup>2</sup>)は両引試験体と同じ断面形状のコントロール試験体を用いて測定した。図4に乾燥収縮ひずみ( $S_h$ )およびクリープ係数( $\phi$ )を示す(同図中の試験体記号は表1参照)。なお持続荷重実験は温度20±1℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で行い、93日経過した現在も継続中である。また、単調加力時の付着応力-すべり関係を求めるための単調荷重実験は持続荷重開始時期にあわせて行った。

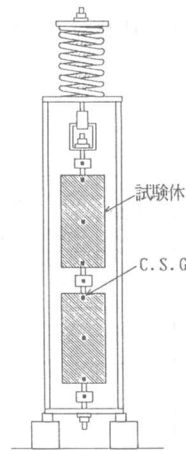


図3 持続荷重装置

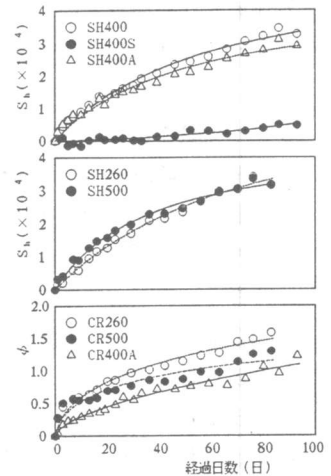


図4 乾燥収縮とクリープ性状

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 鉄筋ひずみ分布の経時変化

図5(a)、(b)および(c)に試験体L-1、L-2、L-3、L-4およびL-6の持続荷重中の鉄筋ひずみ分布の経時変化を示す(記号は実測値、曲線は後述の $\tau \sim s$ モデルを用いた解析値)。試験体L-1、L-2は荷重直後は内部ひび割れの進展などによる付着応力の緩和によって鉄筋ひずみは増加し、その後はコンクリートの乾燥収縮によるすべりによって付着応力が増大する結果、コンクリート中の鉄筋ひずみは逆にやや減少している。コンクリート表面をシールして乾燥収縮を制御した試験体L-3、L-4は乾燥収縮の影響を殆ど受けていないため、付着応力の緩和によって鉄筋ひずみは持続荷重後1日以内に大きく増加した後も若干増加している。図(c)の試験体L-6は、かぶり厚さが大きいことによってコンクリートの鉄筋に対する拘束作用が大きく、付着強度も大きくなり、また試験体も長いので鉄筋ひずみ分布の谷は深くなって

いる。1日目の付着応力の緩和による鉄筋ひずみの増大およびその後の乾燥収縮による鉄筋ひずみの減少はL-1, L-2と同じ傾向を示している。

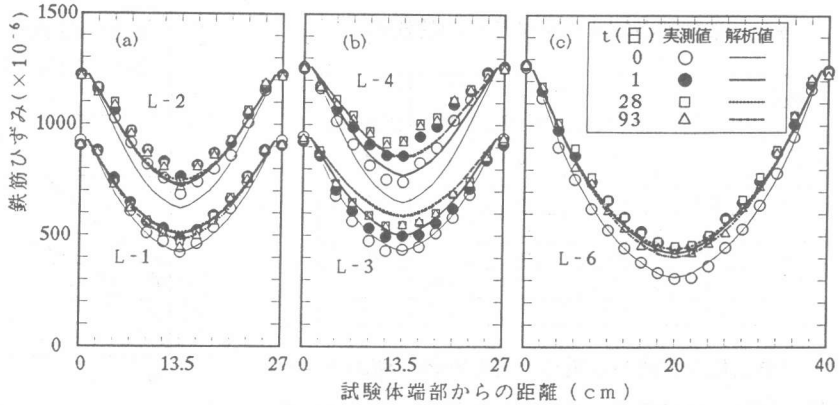


図5 鉄筋ひずみ分布の経時変化

### 3.2 付着応力～すべり関係の経時変化

図6 (a)、(b)、(c)にそれぞれ試験体L-1、L-3、L-6における鉄筋ひずみ分布から求めた単調および持続荷重下の $\tau \sim s$ 関係を示す。図中、原点から1つ目の記号○までは持続応力までの単調増加時の $\tau \sim s$ 関係で、○印は持続荷重開始時、2つ目の記号●は持続荷重開始後1日目、後は持続荷重中の関係を示している。各試験体において持続荷重開始後1日まですべりが増加するとともに付着応力が大きく減少している。その後、試験体L-1、L-6では試験体両端の1区間を除いて初載荷時よりやや小さい傾きでsの増大とともに $\tau$ も増加している。これらの試験体と鉄筋のふし形状あるいはコンクリート強度が異なる試験体L-7～L-10の $\tau \sim s$ 関係図は紙数の制限から省略するが、上記の傾向と同じ傾向を示している。一方、L-3試験体では乾燥収縮が少ないためすべり量が小さく、 $\tau$ は緩やかに減少している。

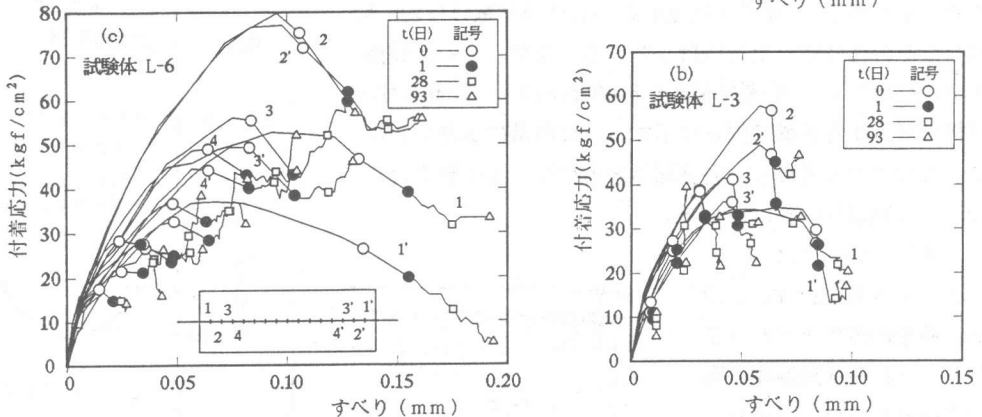


図6  $\tau \sim s$  関係の経時変化

### 3.3 持続荷重下の付着応力～すべり関係のモデル

#### (1) 単調載荷時の $\tau \sim s$ 関係

表3 単調載荷時 $\tau \sim s$ モデルの特性値

試験体名	$K_1$ (kgf/cm <sup>3</sup> )	$K_2$ (kgf/cm <sup>3</sup> )	$\tau_a$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$S_b$ (mm)	$\tau_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
L-1, L-2 L-3, L-4	24000	7810	10	0.06	54
L-5, L-6	22500	7000	15	0.08	66
L-7	26300	7720	10	0.06	53
L-8	24500	5900	10	0.06	40
L-9	22000	7350	10	0.06	50
L-10	24200	8970	10	0.06	60

図7に単調載荷実験から得られた単調載荷時の $\tau \sim s$ 関係をtri-linear曲線で近似したモデル(O-A-B-C)を持続荷重下の $\tau \sim s$ モデルとともに示す。なお、両端の各1区間(2ふし)の $\tau \sim s$ 関係については、内部ひび割れの発生による付着劣化を考慮して同じすべり $s$ に対応する付着応力 $\tau$ を他の区間の1/2に低減させる、各特性値( $K_1$ 、 $K_2$ 、 $\tau_a$ 、 $S_b$ 、 $\tau_b$ )を表3に示す。

(2)  $\tau_a$ について

$\tau \sim s$ 関係におけるA点は試験体内部ひび割れの発生点と考えられ[1][3]、その低下率( $\tau_{at}/\tau_{a0}$ )は、コンクリートの圧縮および引張クリープ限度が0.8前後である[4][5]ことから0.8とした。

(3) 付着剛性Kについて

図8に各試験体のそれぞれ各測定位置の第2剛性 $K_2$ の初載荷時の値に対する比の平均値( $k_2$ )の経時変化を示す。各試験体ともに最初の1日間に付着応力の緩和によって付着剛性は大きく低下して、 $k_2$ は約0.75~0.8になり、その後ゆっくり低下し、28日後には0.6~0.7(L-4試験体は約0.5)になりその後ほぼ一定を保持している。なお、 $\tau \sim s$ 関係モデルにおける $k_2$ の最終値が0.6か0.5かによる鉄筋ひずみ解析値に対する影響は図9に示すように非常に小さい。このようなことを考慮し、各試験体ともに $\tau \sim s$ モデルにおける $k_2$ の最終値を0.6とした。

(4)  $\tau_b$ について

$\tau \sim s$ 曲線における $\tau$ の最大値を測定できたL-2、L-4、L-6試験体の実験データを用いて求めた、 $\tau_b$ の初載荷時の値に対する比の平均値( $k_3$ )の経時変化を図10に示す。載荷後1

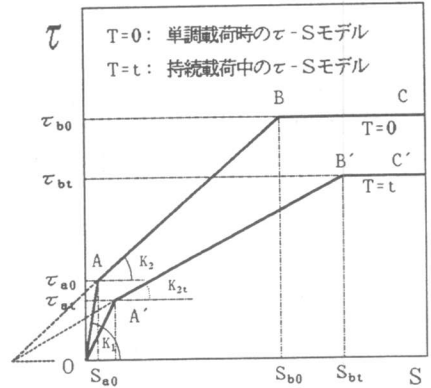


図7  $\tau \sim s$ 関係モデル

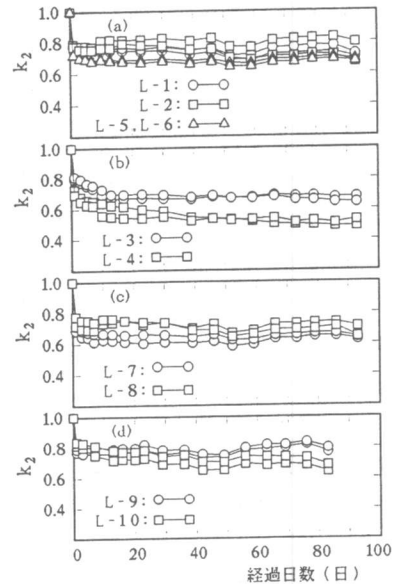


図8  $k_2$ の経時変化

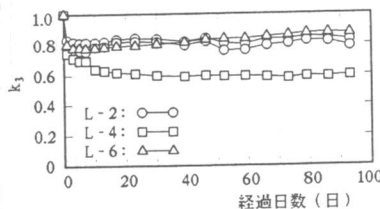


図10  $k_3$ の経時変化

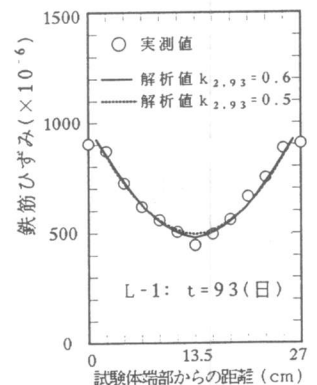


図9 鉄筋ひずみ分布

日に付着応力が大きく低下し、 $k_3$ が0.75~0.8になり、その後乾燥収縮を制御していない試験体L-2、L-6はほぼ一定で、乾燥収縮を制御した試験体L-4は漸減し28日以後には約0.6で一定値を保持している。

(5) 持続荷重下の $\tau \sim s$ モデル

以上の検討から持続荷重下における $\tau \sim s$ 関係を次のようにモデル化し、そのモデル曲線を前掲の図7に曲線OA'BC'で示す。

$$\tau_{at} = k_1 \cdot \tau_{a0}, \quad K_{2t} = k_2 \cdot K_{20}, \quad \tau_{bt} = k_3 \cdot \tau_{b0} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_{a0}$ 、 $K_{20}$ 、 $\tau_{b0}$ ：初載荷時における $\tau \sim s$ 曲線の $\tau_a$ 、 $K_2$ 、 $\tau_b$

$\tau_{at}$ 、 $K_{2t}$ 、 $\tau_{bt}$ ：持続荷重下における $\tau \sim s$ 曲線の $\tau_a$ 、 $K_2$ 、 $\tau_b$

$k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ：持続荷重下における $\tau_a$ 、 $K_2$ 、 $\tau_b$ の低減係数

$$k_1 = 0.8, \quad k_2 = \begin{cases} 0.75 & t = 1 \\ 0.75 - 0.05(t-1)^{1/3} & 1 < t < 28 \\ 0.6 & t \geq 28 \end{cases}$$

シールしていない試験体：  $k_3 = 0.8$

$$\text{シールしている試験体： } k_3 = \begin{cases} 0.75 & t = 1 \\ 0.75 - 0.05(t-1)^{1/3} & 1 < t < 28 \\ 0.6 & t \geq 28 \end{cases}$$

t：持続載荷日数

3.4 端部すべり量の経時変化

図11に各試験体の持続載荷開始後の端部すべりの実測値と解析値を示す。各試験体は載荷後1日に付着応力の緩和によって急増し、その後は乾燥収縮の影響を受けて緩やかに増加している。

上述の $\tau \sim s$ モデルを用い、既報[1]で誘導した付着解析法による解析値も同図中に示しているが、端部すべりの時間経過に伴う増加量の解析値は実測値をよく捉えている。なお、持続載荷開始時の解析値は実測値に合わせている。

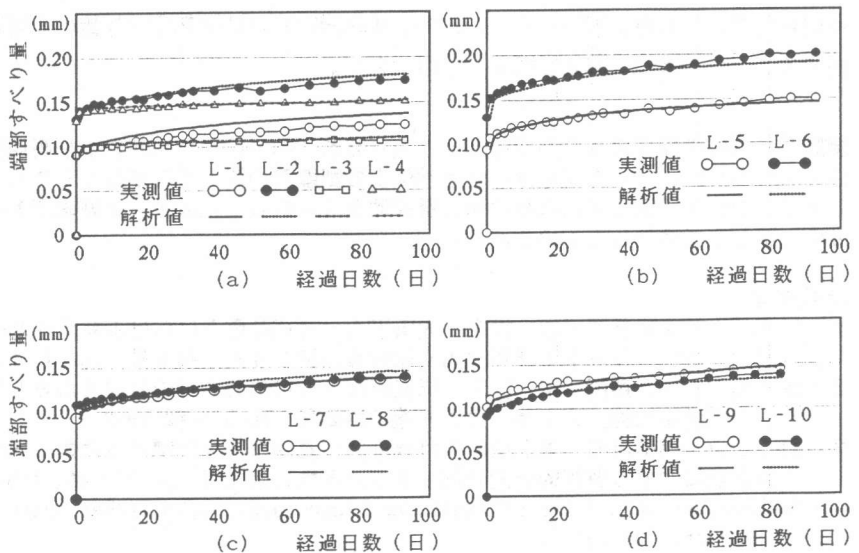


図11 端部すべり量の経時変化

#### 4. 片持ち梁実験結果の解析

本報で得た持続荷重下における $\tau \sim s$ モデルの適合性を検証するため、鉄筋の抜け出しによるひび割れ、たわみの増大を調べた2体の片持ち梁における端部ひび割れ幅の経時変化の実験結果の解析を試みた。実験概要：梁断面 $12 \times 20 \text{ cm}$ 、同長さ $75 \text{ cm}$ 、スタブ断面 $25 \times 35 \text{ cm}$ 、同長さ $75 \text{ cm}$ 、鉄筋のかぶり厚さ $5 \text{ cm}$ の片持ち梁に長期許容応力度までコンクリート材令14日から載荷した。異形鉄筋D19（前記横ふしI）および持続載荷開始時

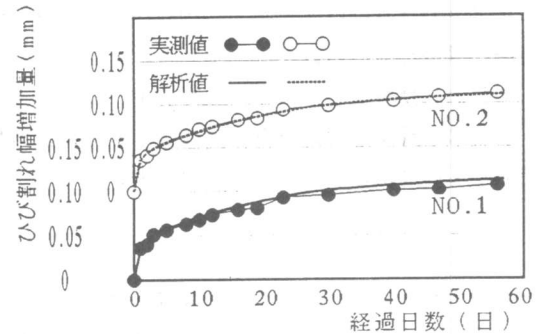


図12 片持ち梁端部ひび割れ幅の経時変化

圧縮強度 $396 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いた。なお、解析方法は参考文献[2]に提案したものを、持続載荷開始時のひび割れ位置鉄筋ひずみは実測値を用いた。片持ち梁の持続載荷中の端部ひび割れ幅増加量の実測値と解析値を図12に示す。解析値はよく実測値を捉えていることから本報で得られた持続載荷中の $\tau \sim s$ モデルの適当性が確かめられた。

#### 5. 結論

1) 持続荷重下における付着応力 $\tau$ とすべり $s$ は載荷後1日間に大きく動き、以後は主に乾燥収縮に応じて徐々に変化する（図6）。乾燥収縮を受けている試験体は $s$ の増大するとともに $\tau$ も徐々に増加するに対して、乾燥収縮を受けていない試験体は $s$ の増大量は少なく $\tau$ が緩やかに低下している。

2) 鉄筋ふしの形状、かぶり厚さは単調載荷時の $\tau \sim s$ 関係に大きく影響するが、持続載荷中の $\tau \sim s$ 関係の変化への影響は認められない。

3) 持続荷重下における $\tau \sim s$ 関係をモデル化し、これを用いてコンクリートのクリープ、乾燥収縮を考慮した付着解析を行い、鉄筋ひずみ分布および端部すべり量の経時変化を解析的に把握することができた（図5、図11、図12）。

謝辞 鉄筋の提供および高周波加工でそれぞれ（株）神戸製鋼所および高周波熱練（株）に御協力をいただいた。また実験は本学大学院生の劉鍵君の協力を得て行ったことを記して謝意を表します。なお本研究は文部省科学研究費補助金（一般C：代表者 大野義照）の交付を受けた研究の一部として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 鈴木計夫・大野義照・李 振宝・太田崇士：持続荷重下における異形鉄筋の付着応力～すべり関係 コンクリート工学年次論文報告集 第14巻 第2号 pp.51～56 1992.6
- 2) 鈴木計夫・大野義照・李 振宝・鍋沢斤吾：RC片持ち梁の長期たわみと付着解析 コンクリート工学年次論文報告集 第14巻 第2号 pp.57～62 1992.6
- 3) 藤井 栄・森田司郎：異形鉄筋の付着応力～すべり関係に関する考察 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.37～44、1983.10
- 4) H.Rüsch:versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone,Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, 120(1955).
- 5) P.L.Domone:Uniaxial tensile creep and failure of concrete, Magazine of Concrete Research, Sept,1974.
- 6) CEB-FIP MODEL CODE 1990 pp3-6