

アンボンド PRC 部材の曲げひびわれ性状について

竹 本 靖

Flexural Cracking Behaviors of Unbonded Partially Prestressed Concrete Members

Yasushi Takemoto

Abstract

Five concrete beam specimens with different prestress levels, i.e., from zero to full prestress, were tested to investigate the flexural cracking behaviors of unbonded partially prestressed concrete members. This paper describes the test results, and in comparisons with these results, reviews the special features and applicabilities of several crack-predicting expressions proposed previously by a number of researchers both in Japan and abroad.

概 要

アンボンド tendon を用いたプレストレスト鉄筋コンクリート部材の、曲げひびわれ性状を明らかにするために、ゼロからフルプレストレストまでの5段階のプレストレストレベルとした5体の供試体によって、鉛直荷重を想定した曲げ試験を実施した。本報告は、この結果を述べると共に、内外の研究者による既往のひびわれ予測式と比較・対照し、諸式の特徴と適用性について論評を加えたものである。

1. はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 部材は、設計荷重 (長期) の下での曲げひびわれ発生を認めている。設計者は、構造物の使用目的や環境その他、種々の設計条件を考慮して、部材に許しうるひびわれの程度を定め、これをひびわれ予測計算によって裏づけなければならない。この予測法については、すでに多種多様な計算式が提案されているが、同一条件に対しても互いにかなり異なった結果を与えるなど、まだ決定的な評価を得たものはない。

本報告は、アンボンド tendon を用いた PRC 部材の構造特性に関する一連の実験¹⁾ から、鉛直荷重を受けるはりの曲げひびわれ性状についての結果をまとめ、これを用いて、既往の各種ひびわれ予測式を検証・評価しようとしたものである。

2. 既往の予測式

コンクリート部材のひびわれ性状を決定する要因は、対象を荷重による曲げひびわれに限っても、きわめて多く、したがって、各提案者による予測式は、考慮した変

数の種類がまちまちである。しかし、基本的な考え方として、ひびわれ (最大ひびわれ幅で表現) は、その部分の鉄筋の応力度またはひずみ度に比例する、という方式と、コンクリートの仮想引張応力度に比例する、という方式の二つに大別できる。

鉄筋応力度型では、ひびわれ幅を、(ひびわれ間隔) × (その間の鉄筋ひずみ) で表した、CEB/FIP 国際指針式²⁾ が代表的なものの一つであり、日本建築学会 PRC 指針³⁾ にはこれを改良した鉄木・大野式⁴⁾ が採用されている。もう一つの代表例は、かぶりなどの断面特性を鉄筋応力の比例定数とした Gergely・Lutz⁵⁾ の予測式で、これを単純化して ACI コード⁶⁾ が採用している。

Janovic・Kupfer⁷⁾, Bennett⁸⁾, Nawy⁹⁾ らの提案式も、鉄筋応力を主変数としたタイプである。

コンクリート仮想応力度型では、Beeby・Taylor¹⁰⁾, Krishna-Raju¹¹⁾, Meier・Gergely¹²⁾ らの諸式があり、英国規準 CP 110¹³⁾ も、この方式によっている。

表-1 に、これら各式を掲げる。いずれも、原式の記号を、建築学会 PRC 指針の定めるところに合わせ、かつ単位を、英米式または国際単位から、kgf, cm に変換してある。

略称	提案者	予測式(鉄筋応力度型)	略称	提案者	予測式(コンクリート応力度型)
GL	Gergely, Lutz	$\frac{1.08 \cdot \sqrt[3]{C \cdot Ace/m}}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{Cs}{d-x_n}} \cdot \sigma_t \times 10^{-6}$	BT	Beeby, Taylor	$1.75(D-x_n) \cdot \frac{\sigma_{ct}}{E_c}$
BV	Bennett, Veerasubramanian	$0.002 + 6.5C \cdot \frac{\sigma_t}{E_s}$	KR	Krishna-Raju 他	$73.5 \cdot \frac{c}{P_t} \cdot \sigma_{ct} \times 10^{-6}$
NC	Nawy, Chiang	$9.26 \frac{Ace}{\sum \pi \phi} \cdot \sigma_t \times 10^{-7}$	MG	Meier, Gergely (1)	$12 \cdot \frac{\sigma_{ct}}{E_c}$
SO	鈴木, 大野	$1.5 \left\{ 2(C + \frac{S}{10}) + \frac{0.1\phi}{at/Ace} \right\} \varepsilon_{t,av}$	MG	Meier, Gergely (2)	$4.5C \sqrt{Ace/m} \cdot \frac{\sigma_{ct}}{E_c}$
JK	Janovic, Kupfer	$1.41(5 + 0.637 \cdot S) \cdot \frac{\sigma_t}{E_s}$	諸記号：建築学会PRC指針による 単位：kgf および cm		

表一 既往の代表的なひびわれ幅予測式

3. 実験計画

3.1. 供試体

表一2の一覧表および図一1の詳細例で示したように5体の供試体はいずれも形状・寸法が共通であるが、プレストレスのレベルが変えてある。また、端部上端と中央下端の鉄筋は、各供試体で曲げ耐力がほぼ等しくなるよう定められている。テンドンプロフィールは、供試体を治具に固定したあとでプレストレスを導入した時に、不静定モーメントが生じない形とした。

用いた主要材料の特性を表一3に示す。

3.2. 荷重方法

連続ラーメンのほりに鉛直荷重が作用した状態を想定して、特殊荷重治具¹⁾により、供試体両端の回転を完全拘束、一端のみ水平移動自由とし、これの中央部2点に一方向漸増くり返し荷重を与えた(図一2)。

3.3. 計測上の特記事項

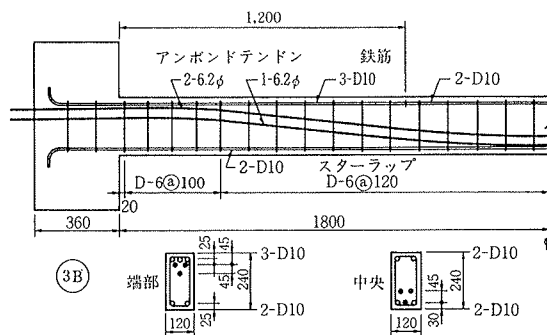
材端モーメント：供試体スタブ部分を治具に圧着したPC鋼棒に、センターホール型ロードセルをとりつけ、検出した鋼棒張力の変動で曲げモーメントを計算。

ひずみ：供試体端部および中央で、コンクリート縁ひずみと、主筋のひずみをストレインゲージで測定。

ひびわれ：コンクリート表面のひびわれ変動を、薄い金属帯の曲げひずみとして検出するクラックゲージ(東京測器製)を用いた。供試体ごとに、初期のひびわれがある程度進展し、どのひびわれが主として発達するかを見きわめた上でクラックゲージを(1体につき、端部2点中央部曲げスパン内4点)鉄筋位置にとりつけ、そのままいったん除荷、ひびわれが閉じた状態でゲージのゼロ点調整を行なった(図一3)。ひびわれをはさんでコンクリート面に貼付した先端チップの間隔は10mm弱で、その間のコンクリート自身のひずみ変動は無視できる。ゲージの感度は、 $1,000 \times 10^{-6}/1\text{mm}$ 程度である。

供試体	上端筋数 (D10)		下端筋数 (D10)		スターラップ間隔 (D6)cm		テンドン数	平均プレストレス Kgf/cm ²	部材種別
	端	中央	端	中央	端	中間			
OB	6	2	2	4	10	12	0	0	RC
1B	5	2	2	3	10	12	1	10	PRC
2B	4	2	2	2	10	12	2	20	
3B	3	2	2	2	10	12	3	30	
4B	2	2	2	2	10	12	4	40	フルPC

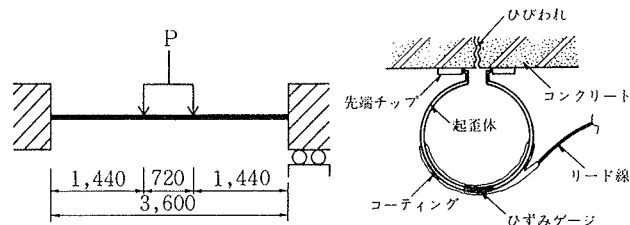
表一2 供試体の種類



図一1 供試体の詳細例

材料	圧縮強度 kgf/cm ²	引張強度係数 kgf/cm ²	降伏荷重 t	引張荷重 t	ヤング係数 kgf/cm ²
コンクリート (試験時)	248	22.6	—	—	2.16×10^5
鉄筋 D10	—	—	2.60	3.73	2.10×10^6
アンボンドテンドン 7本より6.2φ	—	—	3.66	4.11	1.97×10^6

表一3 使用材料



図一2 荷重条件

図一3 クラックゲージ

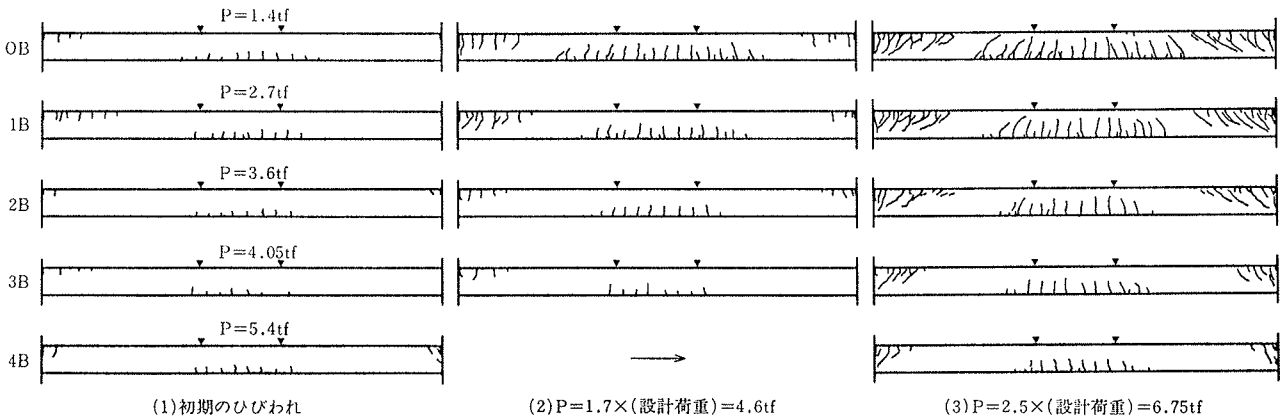


図-4 ひびわれ分布

4. 実験の経過と結果

各供試体の、荷重にともなうひびわれの進展状況を、図-4に示す。図中(1)は、比較的初期、主なひびわれが出そろった時の状況で、プレストレスの差に応じて荷重Pの値が異なっている。供試体右端でひびわれが少ないのは、荷重治具の回転拘束がやや不十分であったことによる。(2)は、想定した設計荷重 (P=2.7tf) の1.7倍を作用させた時のもので、プレストレス最大の4Bは、この時点でまだひびわれが発生していない。(3)は、設計荷重の2.5倍時で、この値は、最大荷重のそれぞれ80~90%に相当する。

各供試体の、初ひびわれ荷重は以下の通り: (tf)

	0B	1B	2B	3B	4B
端部上	0.8	0.8	2.6	3.4	4.2
中央下	0.6	2.0	2.6	3.4	4.8

各供試体の中央部(曲げスパン内)から代表的なひびわれ1点を選び、荷重とひびわれ幅wの関係性をプロットしたのが図-5である。各曲線の中に見られる直線部分は、そのサイクルの折返し点からゼロまで直接、荷重をくり返したことによる。3Bと4Bの下限荷重がゼロでないのは、プレストレスによる逆向きのモーメントを考慮したためである。各プロット共、ひびわれ幅が0.3mmを越えたものについては、それ以降をカットした。

図-6は、図-5で示したものと同じひびわれについて、スパン中央下端鉄筋の応力度 σ_s とwの関係性をプロットしたものである。0Bで、 σ_s の原点が上っているのは、供試体自重の影響であり、2B、3Bで原点が下っているのは、下限荷重がそれぞれのデコンプレッション荷重よりも低く、鉄筋が圧縮状態に置かれたことを示している。4Bでは、下限荷重がデコンプレッション状態にほぼ一致している。3Bの σ_s が他に比べて低いレベルで終わっているが、鉄筋の降伏点3,650 kgf/cm²には達している。

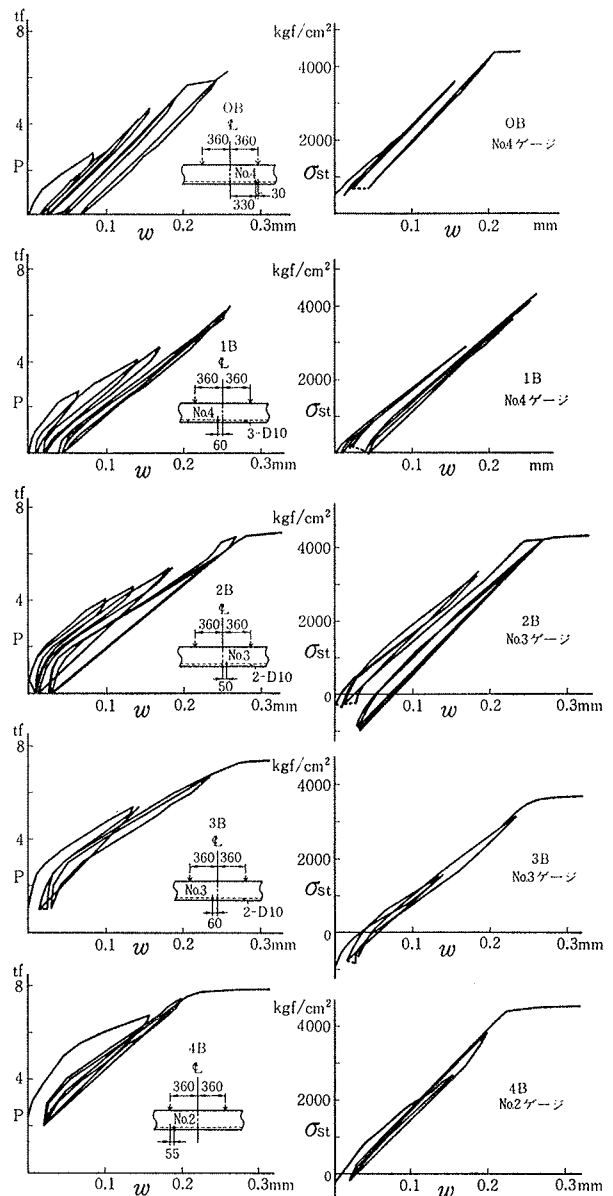
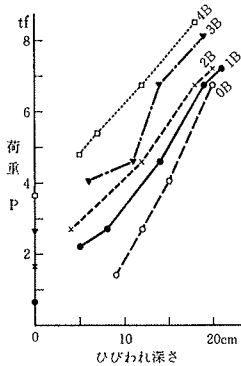
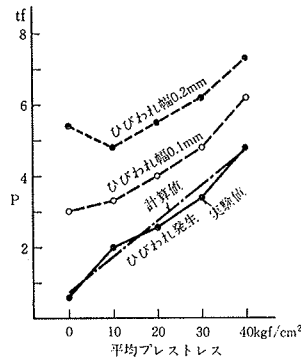


図-5 荷重—ひびわれ幅

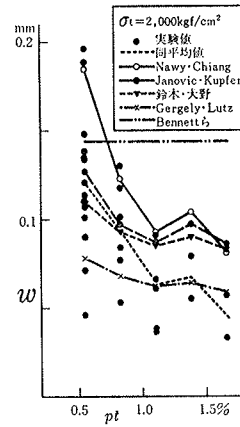
図-6 鉄筋応力度—ひびわれ幅



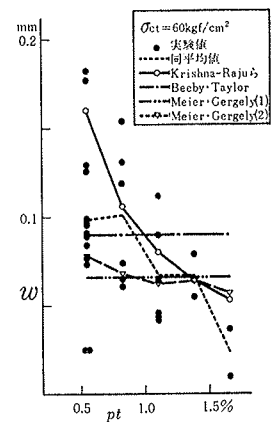
図一七 荷重—ひびわれ深さ



図一八 荷重—プレストレス



図一九 ひびわれ幅—鉄筋比(1)



図一〇 ひびわれ幅—鉄筋比(2)

5. 考察

5.1. ひびわれ分布

5.1.1. ひびわれ間隔 図一4(1)の曲げスパン部分では、ひびわれの初期(発生後、0.6~1.0tf 荷重上昇時)にはその平均間隔が、どの供試体についても約120mmであり、鉄筋量(0B: 4-D10, 1B: 3-D10, その他2-D10)の影響が見られない(テンドンはアンボンドなので、ひびわれの分散効果は期待できない)。鉄筋量の影響が出てくるのは、同図(3)のように曲げ破壊に近い過大荷重になってからである。

5.1.2. ひびわれ発生範囲 図一4でわかるように、RCである0Bでは最終段階までに、端部上端と中央下端の両方からのひびわれ域がほとんど重なるのに対し、フルプレストレスの4Bでは、曲げ破壊時にも、せん断スパン部分に新たなひびわれがほとんど発生せず、そのため、はり全体として、両端と載荷点直下の4点にヒンジを持つ直線材のような形になる。PRCである1B~3Bは、上記2者を明確に補間している。

5.1.3. ひびわれ深さ 図一7に、各曲げスパン内で最も伸長したひびわれの深さ(長さ)を荷重との関係で示す。Y軸上の各供試体に対応する記号は、それぞれのデコンプレッション荷重計算値である。同図によれば、ひびわれ深さは荷重にほぼ比例している。0Bを除く各供試体のプロットを、ひびわれ深さゼロ点(Y軸)に延長すると、デコンプレッション荷重にほぼ帰着することから、PC・PRC部材の復元性のよさが証明される。その点、0Bは荷重をゼロにしても、ひびわれ深さはゼロに戻らず、残留ひびわれの存在を示している。

5.2. ひびわれ幅

5.2.1. 鉄筋応力度との関係 図一6でわかるようにひびわれ幅 w は、鉄筋の降伏まではその応力度 σ_t とほ

ぼ比例関係にあり、 w を σ_t によって予測することの妥当性を示している。

5.2.2. プレストレス量との関係 図一8に、曲げスパン内の代表的ひびわれについて、初ひびわれ発生時、 $w=0.1$ mm時、 0.2 mm時のそれぞれ荷重を供試体別に示す。併記した初ひびわれ荷重計算値($1.8\sqrt{F_c}$ 仮定)は、実験値とよく一致している。図によればどのひびわれ段階でも、プレストレスの効果は顕著であるが、0Bの場合、荷重増大にともなってひびわれ幅拡大傾向が鈍化している。これは、5.1.2.で述べた、高荷重下でのひびわれ数の増加現象に対応している。

5.2.3. 鉄筋量との関係 同一鉄筋応力度のもとで、鉄筋量がひびわれ幅に及ぼす影響を知るため、全測定点につき、 $\sigma_t=2,000\text{kgf/cm}^2$ 時のひびわれ幅を、その位置の鉄筋比に対してプロットしたのが図一9である。ばらつきはあるものの、鉄筋が増すほど w 、特にその最大値が小さくなる傾向が明らかである。

5.2.4. 仮想コンクリート引張応力度との関係 はりのコンクリート全断面を有効とみなした時の、仮想コンクリート引張縁応力度 σ_{ci} でひびわれ幅を評価することの有効性を見るため、 $\sigma_{ci}=60\text{kgf/cm}^2$ にとって、 w と鉄筋比の関係をプロットしたのが図一10である。 σ_{ci} はデコンプレッション荷重以後の曲げモーメント増分を、断面係数で割った値である。図一10は、図一9とかなりよく似た傾向を表しており、 σ_{ci} を用いる方式もまた、有効であることを示唆している。

5.3. 既往の予測式との比較

表一1に掲げた既往のひびわれ幅予測式を、本実験の各供試体に適用し、諸式の特徴を検討する。

鉄筋応力度型予測式で求めた供試体ごとの「最大」ひびわれ幅($\sigma_t=2,000\text{kgf/cm}^2$)を図一9に、コンクリート仮想応力度型によるもの($\sigma_{ci}=60\text{kgf/cm}^2$)を図一10にそれ

ぞれ、実験結果と重ねて記入してある。

(1) 鉄筋応力型 「GL」(略称、表-1参照)は、どの鉄筋量に対してもひびわれ幅を小さく、すなわち危険側に評価している。「JK」と「SO」は、実験結果の傾向を比較的よく表しているが、低鉄筋比に対する予測が小さい。「BV」は、鉄筋量の項を含まないので当然、実験値の傾向と合わないが、ひびわれ幅予測レベルとしては妥当である。特にアンボンド用として提案された「NC」は、どの鉄筋量に対しても、実験結果の最大値に非常によく一致している。

最大ひびわれと平均ひびわれの比は、実験値の場合、1.48で、「JK」と「SO」がそれぞれ式中で表現している1.7、1.5は、妥当なレベルと言える。

なお、 $p_t = 1.4\%$ の供試体(1B)に対し、計算値にピークが出ているのは、2段配筋(5-D10)の効果であり、実験結果もそれを裏づけている。

(2) コンクリート仮想応力型 「BT」「MG」はいずれも、低鉄筋比(PCR, PC)に対して危険側である。「KR」は、ややひびわれレベルが低いものの、実験結果とよく対応している。コンクリート応力を用いる場合でも、鉄筋量を式中で評価する妥当性が示されたと言えよう。

5.4. 実験式の試案

以上の結果のみから新たなひびわれ予測式を導くことはできないが、本実験結果に対応する実験式を、既往式の改良という形でまとめてみると、以下が得られる：

$$\text{鉄筋応力式} \quad w = \frac{0.8A_{ce}}{\Sigma \pi \phi} (\sigma_t + 500) \times 10^{-6} (\text{cm})$$

$$\text{コンクリート式} \quad w = (4 - 200p) (\sigma_{ct} + 15) \times 10^{-4} (\text{cm})$$

図-11に、鉄筋およびコンクリートの応力度を設定して実験式から求めたひびわれ幅を、実験結果の鉄筋比最大値とあわせて示した。

6. 結び

本実験結果と既往式の検討から言えたことは：

(1) ひびわれの発生荷重と進展は、プレストレスの量によって明確な差を生じる。

(2) ひびわれ間隔に対する鉄筋量の効果は、初期の段階ではあまり見られない。

(3) ひびわれ幅は、筋鉄応力度にはほぼ比例する。

(4) ひびわれ幅は、鉄筋量と負の比例関係に近い。

(5) 既往の予測式では、Nawy・Chiang 式と Krishna-Rajn らの式が本実験結果によく合う。

(6) アンボンド tendon 使用の場合、ひびわれ幅がボンドの場合よりやや大きくなると見るのが妥当である。

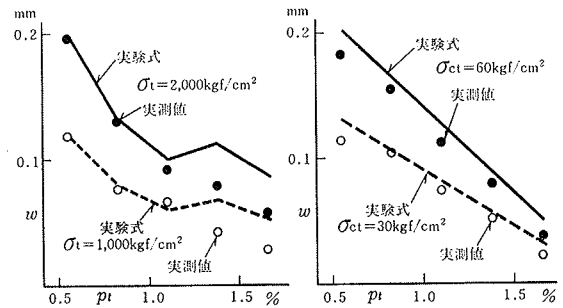


図-11 実験式と最大ひびわれ幅

参考文献

- 1) 竹本: アンボンド PRC 部材の曲げ終局時 tendon 応力について, 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 49~54
- 2) CEB-FIP 合同委: International recommendations for the design and construction of concrete structures, C & CA, (1970)
- 3) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 日本建築学会, (1985)
- 4) 鈴木・大野: プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究(その1), 初期ひびわれ幅について, 日本建築学会論文報告集, 第303号, (1981.5), pp. 9~19
- 5) Gergely, Lutz: Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, ACI, SP-20, (1968)
- 6) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77), ACI, (1977)
- 7) Janovic, Kupfer: Beschränkung der Rißbreite bei teilweiser Vorspannung, Bauingenieur, 57, (1982)
- 8) Bennett, 他: Behavior of Nonrectangular Beams with Limited Prestress after Flexural Cracking, ACI-Journal, No. 48~69, (1972.9)
- 9) Nawy, Chiang: Serviceability Behavior of Post-tensioned Beams, PCI-Journal, (1980.1/2)
- 10) Beeby, Taylor: Cracking in Partially Prestressed Members, FIP 6th Congress, Proceedings, (1970.6)
- 11) Krishna-Raju, 他: Flexural Behaviour of Pretensioned Concrete Beams with Limited Prestress, Building Science, Vol. 8, (1973)
- 12) Meier, Gergely: Flexural Crack Width in Prestressed Concrete Beams, Proceedings of ASCE, Structural division, (1981.2)
- 13) Code of Practice for The Structural Use of Concrete (CP 110) Part 1, British Standards Institution, (1972)