

コンクリートの引張特性に関する基礎研究

松 本 進

(受理 昭和60年 5月31日)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE TENSION PROPERTIES OF CONCRETE UNDER PURE TENSION AND BENDING MOMENT

Susumu MATSUMOTO

This paper examined the tension properties of concrete under pure tension and bending one. It was found that the pure tension properties of concrete were slightly different from its bending tension properties as far as deformation, young modulus, and maximum tensile strain are concerned. The adaptability of a stress-strain relation curve for pure tension to one for bending tension was also confirmed to a certain degree by introducing a parameter M.

1. 緒 言

元来、コンクリートは「圧縮に強く、引張に弱い」という力学的性質のため、鉄筋コンクリート構造物は引張力を受ける所では必然的にひびわれを許容せざるを得ないようになっており、現在の許容応力度設計方法では耐久性に対する考慮から、設計荷重作用時にコンクリートに生じるひびわれ幅が約 0.2 mm 以下程度となるようにして鉄筋の許容引張応力度が定められている¹⁾。

最近、塩害やアルカリ骨材反応による鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物の耐久性の問題が社会的に大きくクローズアップされてきており、特にコンクリートのひびわれ抵抗性がコンクリート構造物の耐久性を決定するのに極めて重要な要因であることが多くの研究者達によって指摘されている²⁾⁸⁾。

コンクリートの引張に関する当初の研究は、引張強度の点から数多く研究されてきており、その結果コンクリートの引張強度は圧縮強度の約 1/10 程度であるというのが現在定説となっているが、鉄筋コンクリート構造物ではこの力学的性質を構造的に利用できないのが現状である。次段階におけるこの種の研究は、乾燥収縮に対するものであって、この問題は構造的に引張を受けない部分にも鋼材の存在によっては引張応力

を発生させ、場合によってはコンクリートに簡単にひびわれを生じさせることになる。このひびわれは耐久性にも勿論のこと美観の点からも避けたい所であるが、コンクリートの乾燥収縮のメカニズムがある程度解明されてきたのにもかかわらず、最終的にはコンクリートの引張強度特性から考えればひびわれ改善にはつながらないことになる。最近のこの種の研究では、プレストレストコンクリート構造物の設計の中で、特に第Ⅱ種（パーシャル・プレストレス）の設計に当っては、コンクリートの引張強度が果たす役割は大きいものであり⁹⁾、コンクリートのもつ引張強度特性は経済的なプレストレストコンクリート構造物を造るに当っては極めて重要な要因であることは否めない。

上記してきたように、コンクリートの引張特性が耐久性、美観性および経済性に及ぼす影響が大きいにもかかわらず、コンクリートの引張特性については未だ未解明の部分が多く残されていて、弾塑性を含むコンクリートの引張応力・歪関係、最大引張歪（ひびわれ発生歪）、応力もしくは歪勾配による引張強度の相違等が上記した未解明の主な部分である。

この様な状況下で、コンクリートの引張特性に関する再検討を行うことは時期を得たものと考えられるのであって、本研究では上記の未解明の部分についての解明を行なおうとするものである。

2. 実験供試体および実験方法

2-1 実験供試体

実験供試体は図-1に示すようであって、一つはコンクリートの純引張性状を検討するためのいわゆる両引き供試体であって、他方は応力もしくは歪の勾配のついた場合のコンクリートの引張性状を検討するもので、曲げ供試体である。

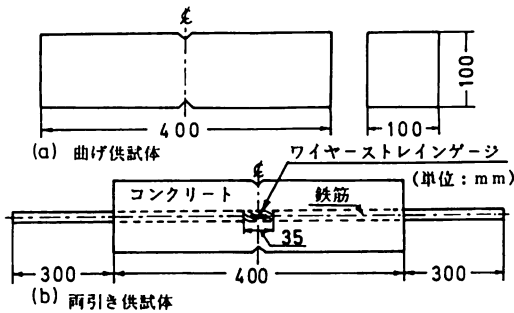


図-1 実験供試体

両引き供試体および曲げ供試体のコンクリートの断面は10×10 cmで、長さ40 cmのものである。また、コンクリート中央部の相対する2側面には、この部分でひびわれが生じる様に深さ5 mm程度のクサビ状の切欠きを施している。なお、両引き供試体には断面中央に長さ1 m程度の異形鉄筋(D16, 降伏点強度3500 kg/cm²)を埋込んでいる。

使用したコンクリートは強度の要因をみるために、表-1に示す様に、水セメント比(W/C)を変化させ目標圧縮強度として150 kg/cm², 300 kg/cm², 350 kg/cm², 450 kg/cm²となる様にした。また、表-2に上記の配合になる強度試験結果を併せて示す。

表-1 コンクリートの配合

種類	最大骨材寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
①	15	39	46	209	536	736	904
②	15	47	47	209	445	798	917
③	15	60	50	209	348	881	915
④	15	85	60	209	246	1114	759

表-2 コンクリートの圧縮強度

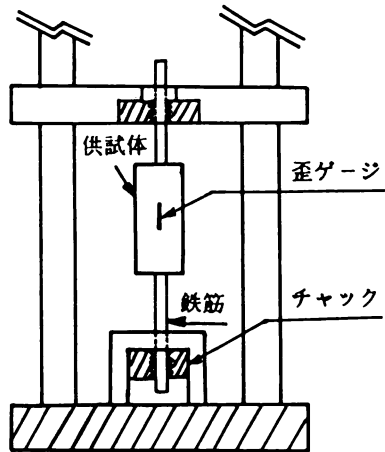
配合	圧縮強度(kg/cm ²) (平均)		供試体 №	
	(純引張)	(純曲げ)	(純引張)	(純曲げ)
①	426* 423	430	4, 5, 6 13, 14, 15	Ⅲ-1(1, 2, 3) Ⅰ-1(1, 2, 3)
②	383 370	377	7, 8, 9 19, 20, 21	Ⅱ-2(1, 2, 3) Ⅳ-2(1, 2, 3)
③	292 283	288	1, 2, 3 16, 17, 18	Ⅲ-3(1, 2, 3) Ⅰ-3(1, 2, 3)
④	160 146	153	10, 11, 12 22, 23, 24	Ⅳ-4(1, 2, 3) Ⅱ-4(1, 2, 3)

*各値は3本の平均値である。

2-2 実験方法

(1) 両引き試験

図-2は両引き試験の概略を示したもので、引張試



(引張試験機)

図-2 両引き試験方法

験機のチャック部に両引き供試体の両端部の鉄筋をセットし、この鉄筋を引張ることによって、コンクリートに純引張応力を作用させようとするものである。計測としては、図-1にも示したように埋込まれた鉄筋の中央部およびコンクリート中央部の相対する2側面の歪をワイヤーストレインゲージ(東京測器社製FLP-60, GF=2.01程度)を貼布し、歪の計測を行った。

なお、歪の記録は破壊に至るまでの歪を連続的にと

らえるため、ペンレコーダー（渡辺測器社製 MC6600）を使用した。

(2) 曲げ試験

この試験方法は JIS1106「コンクリートの曲げ強度試験」方法に準ずるもので、いわゆる 3 等分点曲げ試験方法である。この方法の概略は図-3 に示すよう

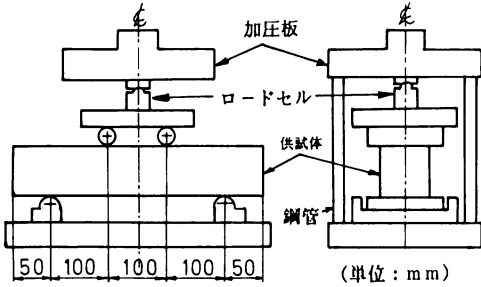


図-3 曲げ試験方法

であって、特に側面図にみられるように、曲げひびわれの発生と同時に供試体が急激に破壊しないように、鋼管をにおいて工夫を施してある。

計測については、供試体の最上下縁に上記と同じワイヤーストレインゲージを貼布して歪の測定を行った。なお、供試体本体に作用する荷重のチェックはロードセル（東京測器社製、CLP-20）で行い、この記録は歪同様ペンレコーダにて連続的に行った。

3. 解析方法について

3-1 純引張応力状態における解析方法

図-4 は両引き試験における供試体中央部の

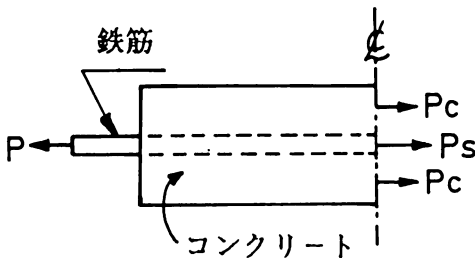


図-4 両引き供試体における力のつりあい

Free-Body 図を示したもので、これより外力 P と内力との間には次式が成立する。

$$P = A_c \times f_c(\epsilon) + A_s \times f_s(\epsilon) \quad (1)$$

ここに、 A_c 、 A_s ：コンクリート・鉄筋の純断面積
 $f_c(\epsilon)$ 、 $f_s(\epsilon)$ ：コンクリートおよび鉄筋に作用する各応力

一般には、鋼材に作用する応力度は歪の大きさが与えられれば簡単に求まることになるので、両引き試験の場合におけるコンクリートの応力・歪関係については結果的には(2)式で求めれば良いことになる。

$$f_c(\epsilon) = (P - A_s f_s(\epsilon)) / A_c \quad (2)$$

(2)式はコンクリートの純引張応力と歪の関係を実験的に求めるための手法であり、既往の研究では、この引張応力・歪関係をコンクリートの圧縮応力・歪関係と同じものを使おうとするものやコンクリートの曲げ引張強度までを完全弾性体としてとらえようとするものであるが、これらの方法はそれぞれに一長一短がありこの場合には適用し難い点多々ある。

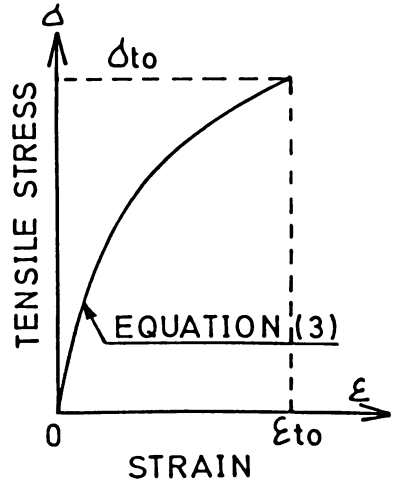


図-5 コンクリートの純引張応力・歪曲線

ここでは、コンクリートの純引張応力・歪関係については、以下に示す歪の 3 次式を適用することとした。なお、この式の妥当性に対しては後章にて詳細に検討する。(図-5 参照)

$$\sigma_t = \sigma_{to} \left\{ \frac{E_t \cdot \epsilon_{to}}{\sigma_{to}} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{to}} + \left(3 - \frac{2E_t \epsilon_{to}}{\sigma_{to}} \right) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{to}} \right)^2 + \left(-2 + \frac{E_t \epsilon_{to}}{\sigma_{to}} \right) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{to}} \right)^3 \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_{t0} : コンクリートの最大引張応力度
 (kg/cm²)
 ϵ_{t0} : σ_{t0} に到達するときの歪
 E_t : コンクリートの引張弾性係数
 (kg/cm²)

3-2 曲げ引張応力状態における曲げの解析方法

コンクリート部材が曲げの作用を受けると、コンクリートには当然のことながら中立軸を境にして圧縮応力状態と曲げ引張応力状態になっている。コンクリートの圧縮応力状態に関する研究は数多くなされていかなり精度良くその状態を推定できる。ここでは、コンクリートの圧縮応力状態についての応力・歪関係はCEB/FIP や BSI によって提案されているものを使用することとする。(図-6 参照) この圧縮応力・歪

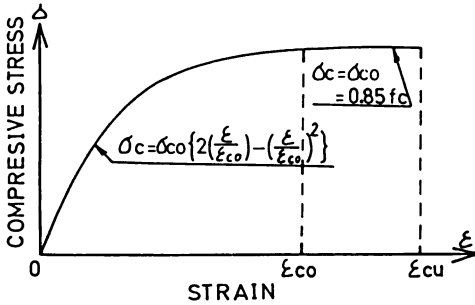


図-6 コンクリートの圧縮応力・歪曲線

の関係は歪の2次式で表わされ、次式で示されるとおりである。

(i) $0 < \epsilon_c < \epsilon_{c0}$ の場合

$$\sigma_c = 0.85 f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

(ii) $\epsilon_c > \epsilon_{c0}$ の場合

$$\sigma_c = 0.85 f_c \quad (5)$$

ここに、 f_c : コンクリートの圧縮強度
 ϵ_c : コンクリートに作用する歪
 ϵ_{c0} : f_c に到達するときの歪

コンクリートの引張応力状態については、前節で述べたようにここでは(3)式を適用することとした。

従って、圧縮ならびに曲げ引張に関する応力・歪関係について上記の様に規定できれば、曲げの解析は歪の適合条件と力の釣合い条件から求めることができる。

図-7 にこの場合の解析方法のフローチャートを示す。

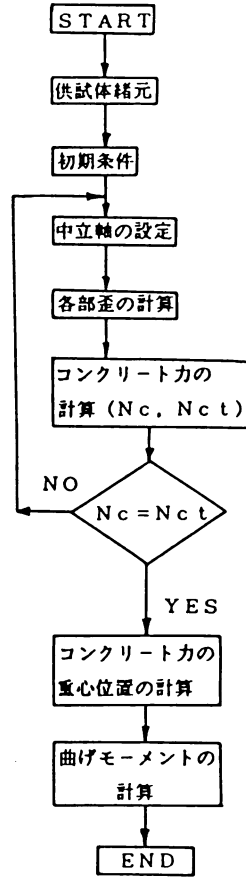


図-7 曲げ解析のためのフローチャート

4. 結果および考察

4-1 純引張特性について

図-8 はコントロール供試体より求められた圧縮の弾性係数と両引き試験から得られるコンクリートの引張応力・歪曲線より求めた引張弾性係数の関係をまとめて示したものであって、同図より、それぞれの弾性係数と圧縮強度との間には、相関係数 0.92~0.95 程度で、かなり良い相関がみられる。また、圧縮および引張の弾性係数の関係は、同一の圧縮強度に対しては引張弾性係数の方が圧縮弾性係数よりも大きくなる傾向がみられ、圧縮強度が大きくなるにつれて両者の差はさらに大きくなるようである。この原因としては、

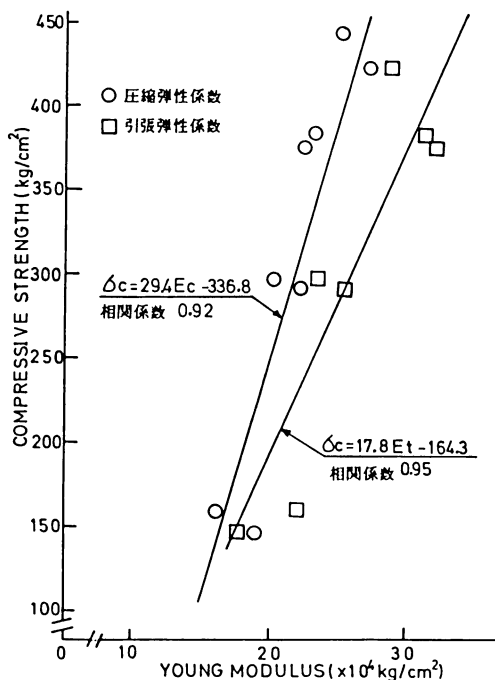


図-8 各弾性係数の実測値

推測の域を出ないがコンクリートは圧縮に対しては組織鈍感性であり、引張に対しては組織敏感性の相違からきているものと思われる。以上の事実からは少なくともコンクリートの応力・歪関係を決定するに当っては、応力状態による相違を考慮する必要があることを示している。

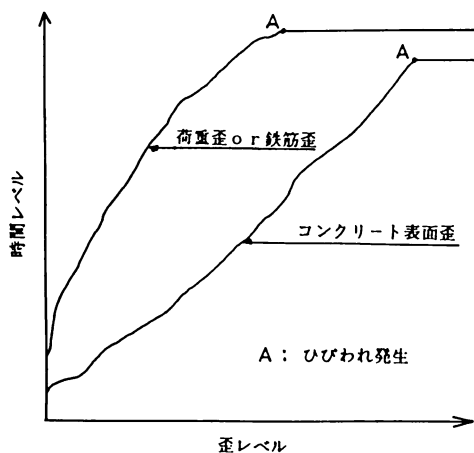


図-9 ペンレコーダによる記録の一例

図-9はペンレコーダによるコンクリートの歪とロードセルの歪の計測結果の一例を示したものであって、荷重の増大と共にコンクリートの歪は増大し、図中A点において荷重歪およびコンクリート歪は急激に増大する。これは、一般には供試体のもつ剛性と試験機のもつ剛性との間に大きな差があるためであると言われており、本来ならば最大引張応力度到達以降は引張応力の低下と歪の増大がみられる筈のものであるがここでは、試験機の事情により便宜的に同図中のA点をもって、コンクリートにひびわれが発生するときの歪とした。

図-10はこの様にして求めたひびわれ発生歪と最大引張応力度の関係を整理して示したものである。これ

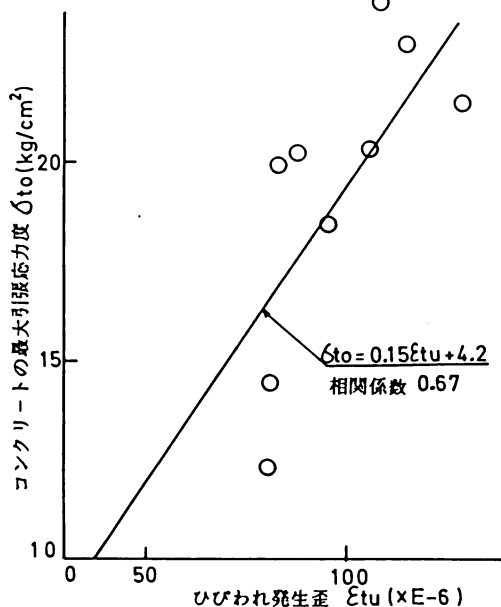


図-10 純引張試験より得られたひびわれ発生歪

より両者の間には最大引張応力度が大きくなれば、ひびわれ発生歪も増大する傾向がみられるものの、相関係数 0.67 と余り良い相関とは言えない様である。元来、ひびわれ変形そのものはマクロの変形であり、微小変形理論に基づく応力・歪の関係から考えれば、このひびわれ発生歪はミクロの変形とマクロの変形の境界にあたる所であって、上記した試験機の事情も加わって定量的に求めるに当っては難しく、定量化に対しては別の手段(例えば統計的処理等)に頼らざるを得ないと考えられる。

図-11は同一バッチで処理したコンクリートの両引き試験より得られた引張応力と歪の実測値の一例である。同図より、最大引張応力度の2/3~3/4程度以下

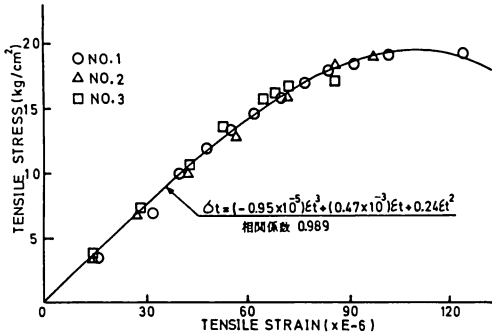


図-11 純引張応力・歪の実測値の一例

の範囲では、コンクリートは極めて弾性的な挙動をしていることが認められる。上記の範囲を越えるとわずかながら、塑性的な挙動が現われ始めていることが認められ、このようなコンクリートの引張応力性状は若干ながら圧縮のそれとは様相を異にしている。

表-3は両引き試験より得られた応力・歪の関係を歪の3次関数とした場合の近似式と相関係数をコンクリートの圧縮強度に応じて整理したものである。同

表-3 純引張応力・歪曲線の近似式

供試体番号	近似式	相関係数
№13-15	$\sigma_t = -0.14 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.40 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.33 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.83
№4-6	$\sigma_t = -0.32 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.39 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.17 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.99
№7-9	$\sigma_t = -0.20 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.14 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.28 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.99
№19-21	$\sigma_t = -0.20 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.10 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.29 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.98
№16-18	$\sigma_t = -0.15 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.18 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.18 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	1.00
№1-3	$\sigma_t = -0.10 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.05 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.24 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.99
№22-24	$\sigma_t = -0.22 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.24 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.15 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	0.98
№10-12	$\sigma_t = -0.26 \times 10^{14} \cdot \epsilon_t^3 + 0.22 \times 10^{13} \cdot \epsilon_t^2 + 0.12 \times 10^6 \cdot \epsilon_t$	1.00

平均 (0.97)
偏差 (0.05)

表より、相関係数は0.83~1.00(平均0.97)程度で、この場合の標準偏差は0.05であって、コンクリートの引張応力・歪関係については歪の3次関数で表わすのが極めて妥当であることが示された。

なお、最大引張応力度に到達した後の応力・歪の関係についてはここではその形をはっきりさせることはできなかった。

4-2 曲げ引張特性について

曲げ引張特性を検討するに当たっては、まずコンクリートの圧縮応力・歪関係および引張応力・歪関係が正しく求められなければ、適切な評価が下せないことは論を待たない所であるが、この適切な評価については5章において詳細に行うことにしているので、ここでは従来から行われている方法で曲げに対する引張特性を検討することにする。

図-12は弾性論から求めた曲げ引張応力度とコンクリートの曲げ引張歪の関係の実測値の一例を示したも

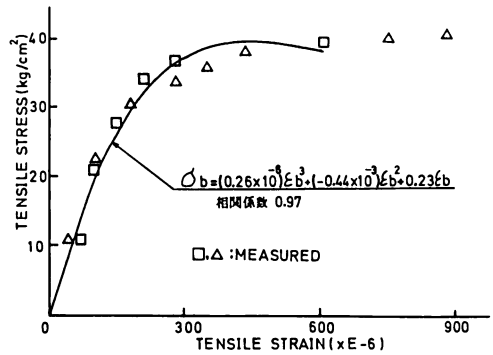


図-12 曲げ引張応力の歪の実測値の一例

のである。この図より気付く点は、曲げ引張応力と歪の間には歪の3次関数が適用できそうであるということ、最大の曲げ引張応力度(σ₀₀)に到達するときの曲げ引張歪(ε₀)が純引張に比べてかなり大きいことおよび試験方法で述べたように、鋼管の拘束によりε₀到達以降の歪が計測されており、しかもひびわれ発生歪が極めて大きいこと等がまず挙げられる。

そこで、ここでは上記の実測の曲げ引張の歪曲線に基づいて、曲げ引張弾性係数、曲げ引張強度および曲げひびわれ発生歪等について以下検討する。

表-4は曲げ試験より得られた曲げ引張弾性係数、最大曲げ引張応力度ならびにひびわれ発生歪の実測値

表-4 純曲げ試験による結果一覧

配合	圧縮弾性係数 E _c (×10 ⁹ kg/cm ²)	曲げ弾性係数 E _b (×10 ⁹ kg/cm ²)	比 E _b /E _c	最大曲げ引張 応力度(kg/cm ²)	ひびわれ 発生歪
①	26.6	18.9	0.71	45.4	798 × 10 ⁻⁴
②	23.0	22.6	0.98	43.4	788
③	21.4	20.0	0.94	34.7	636
④	18.3	17.2	0.94	30.3	607

平均 (0.89)

を整理し、一覧表に示したものである。

まず、曲げ引張弾性係数を圧縮弾性係数との比で比べてみると、同表より曲げ引張弾性係数の方が約1割程度小さく、純引張弾性係数に比べれば4-1でも検討したようにさらに小さくなることが予想でき、このことは弾性領域のかかなり初期の段階における曲げの変形が大きくなることを示すものである。本来ならば、曲げ引張側のコンクリートも純引張のように組織敏感性であると考えられそうであるが、上記の事実は曲げ引張域のコンクリートは組織敏感性でないことを示すもので、これは断面内に歪勾配が生じていて、最外縁のコンクリートにひびわれが生じて、純引張破壊の様一気に破壊せずに、ひびわれの伝搬とこれに対する応力再分配が内部で滑らかに行われていることを予想させるものである。

次に、図-13は曲げ引張強度と圧縮強度の相関を調べてみたもので、両者の間には相関係数0.90とかなり良い相関関係があることが認められる。また、この

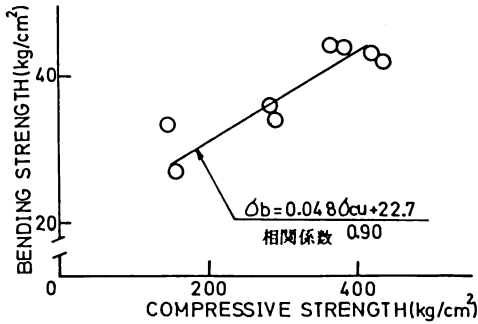


図-13 曲げ強度と圧縮強度の相関

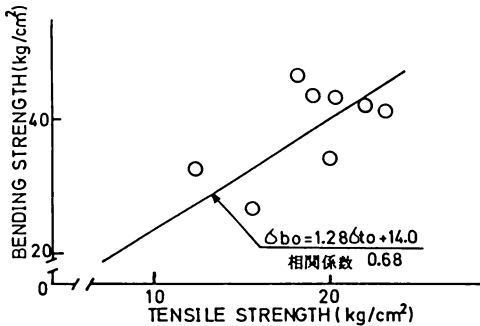


図-14 曲げ引張強度と純引張強度の相関

曲げ引張強度と純引張強度との間には図-14にも見られる様に、通常の土木用のコンクリートの圧縮強度の範囲(200~400 kg/cm²程度)では、純引張強度に対する曲げ引張強度の比は1.63~1.98程度であり、これは既往の研究結果(比1.60~2.00, 平均1.80)とほぼ同様の結果であった。

図-15は曲げ強度と曲げひびわれ発生歪の関係を示したものであり、圧縮強度の増大と共に曲げひびわれ

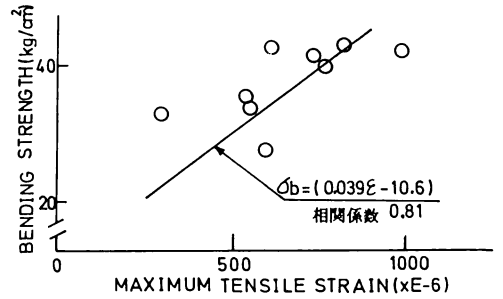


図-15 曲げ引張強度と曲げひびわれ歪の関係

発生歪も大きくなる様であり、この場合で相関関係が0.81程度で、両者の間にかかなりの相関性があることが認められる。また、この曲げひびわれ発生歪の大きさそのものをみてみると、純引張時におけるひびわれ歪に比べて約4~5倍程度大きく、このことは弾性係数の所でも検討したように、曲げ引張性状は歪もしくは応力勾配のために純引張性状とは異なった性状であることがここでも推測できる。

5. 純引張応力・歪関係の曲げ解析への適用性について

コンクリート部材の曲げ解析を行うに当たっては、コンクリートの圧縮応力・歪関係および引張応力・歪関係が正確にその現象を表現するものであれば、基本的には歪の適合条件と力の釣合い条件によって曲げの解析も正確に行える筈である。しかしながら、4章で検討したようにコンクリートの純引張性状ならびに曲げ引張性状には明らかに組織感性が異なっており、純引張応力・歪関係をそのまま曲げ解析へ適用できるかどうかは明らかではない。

純引張応力・歪曲線については4章で詳細に検討したように、歪の3次関数として取扱うことが合理的であることが示された訳で、この歪の3次関数をより一般的な形で表現すれば次式のようなになる。

$$\sigma_t = a\varepsilon^3 + b\varepsilon^2 + c\varepsilon + d \quad (6)$$

ここで、 a, b, c, d : 初期条件によってきまる定数

そこで、式をより一般的な形で取扱うためには、四つの初期条件を与えることにより、定数 a, b, c, d を決定すれば良い。その初期条件は以下の通りである。

(i) $\varepsilon = 0 \longrightarrow \sigma_t = 0$

(ii) $\left(\frac{d\sigma_t}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon=0} = E_t$

(iii) $\varepsilon = \varepsilon_{t0} \longrightarrow \sigma_t = \sigma_{t0}$

(iv) $\left(\frac{d\sigma_t}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon=\varepsilon_{t0}} = 0$

ここで、 E_t : コンクリートの引張弾性係数

σ_{t0} : コンクリートの最大引張応力度

ε_{t0} : σ_{t0} に到達するときの歪

上記の初期条件から、最終的には3章で示した(3)式が求まることになる。

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \left\{ \frac{E_t \varepsilon_{t0}}{\sigma_{t0}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}} \right) + \left(3 - \frac{2E_t \varepsilon_{t0}}{\sigma_{t0}} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}} \right)^2 + \left(-2 + \frac{E_t \varepsilon_{t0}}{\sigma_{t0}} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}} \right)^3 \right\} \quad (3)$$

次に、コンクリートの最大引張応力度に到達したあとの応力・歪関係については、両引き試験時において試験機の剛性の問題もあって明らかではないが、解析を進めるために図-16に示すような最大引張応力到達後の応力・歪関係は $M (= \varepsilon_{tu} / \varepsilon_{t0})$ をパラメーターとする右下りの直線で近似することとした。

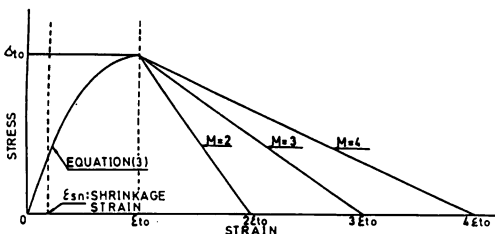


図-16 コンクリートの純引張応力・歪曲線のモデル (降下域を含む)

そこで、(3)式による解析値と実測値との相関性を検討してみることにする。ただし、実測値については次に示す実験式を用いることにする。

$$\sigma_{t0} = (\sigma_{tu} + 193) / 26.37 \quad (7)$$

$$E_t = (1.19 \times \sigma_{t0} + 4.03) \times 10^4 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{t0} = (\sigma_{t0} + 5.6) / (0.29 \times 10^6) \quad (9)$$

表-5 は、(3)式による解析値と実測値による値を比

表-5 実測値と解析値の比較

配合	最大引張応力度 σ_{t0}		σ_{t0} 時の歪 ε_{t0}		純引張弾性係数				
	実測値	解析値	実/解	実測値	解析値	実/解	実測値	解析値	実/解
①	23.5	23.7	0.99	99	101	0.98	30.0	31.9	0.94
②	20.9	21.6	0.97	92	95	0.97	28.5	29.7	0.96
③	20.5	18.3	1.12	111	83	1.34	23.2	25.7	0.90
④	14.0	13.2	1.06	87	65	1.34	16.1	19.7	0.82
	平均		(1.04)		平均	(1.16)	平均	(0.91)	

注) 実測値は表-3 に示した近似式より求めた。

較したもので、解析値に対する実測値の比は平均で、最大引張応力度については 1.04、 ε_{t0} については 1.16 および引張弾性係数については 0.91 程度であり、 ε_{t0} については若干その値が大きいものの、全体としては(3)式によるものを解析に用いても十分であると判断される。

図-17 は、例えばパラメーター $M=4$ としたとき

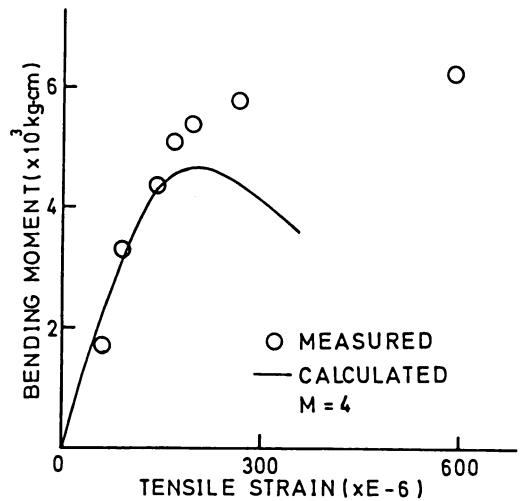


図-17 コンクリートの純引張応力・歪の解析の一例

の実測値と解析値との比較を示した一例であって、解析値によるものは最大曲げモーメントの大きさおよび最大曲げモーメント到達以降の変形状態において実測値の間に大きな差が現われており、この段階ではコンクリートの純引張応力・歪関係を曲げ解析に適用する

のには不十分であることがわかる。

上記の解析値が実測値に合わない理由としては、純引張応力・歪曲線において、最大引張応力度到達以降の応力の勾配が大きすぎることもおよび乾燥収縮により最大引張応力度が実際よりも小さくなっていたことが考えられるので、ここでは次の解析としてパラメーター M を 4, 15, 20, ∞ と変化させ、しかも乾燥収縮による最大引張応力度の低下の影響を考慮して解析してみた。ただし、ここでは乾燥収縮量を 200×10^{-6} とした。

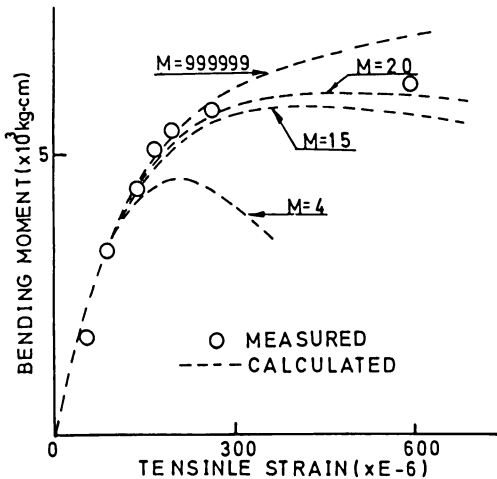


図-18 パラメータ M を変えた場合の解析例 (乾燥収縮考慮)

図-18はこの結果を示したもので、パラメーター $M=10 \sim 20$ 程度とし、乾燥収縮の影響を考慮してやれば、本方法による方法で曲げの解析がかなり正確にできる見通しがついた。

6. 結 言

コンクリート構造物の耐久性問題を考える上では、コンクリートに発生するひびわれは極めて重要であるが、“何時、どれ位の大ききでコンクリートにひびわれが生じるか？”という極めて簡単な問題に対して、統一された見解がないのが現状の様である。

本研究では、先づ両引き試験よりコンクリートの純引張性状の検討を詳細に行い、次いでこの純引張性状を曲げ引張性状へ適用するべく種々の検討を行った。

本研究の実験および解析を通して、次のことが言えると考えられる。

- (1) コンクリートの純引張性状は組織敏感性のために曲げ引張性状や圧縮性状とは弾性係数、最大引張応力度およびひびわれ発生歪等の点から若干ながら異なったものとなる。
- (2) コンクリートの曲げ引張性状は、むしろ組織鈍感性のようであり、この性質によりひびわれの進展に伴って内部で応力の再分配をしている傾向が認められ、このため最大曲げ引張応力度やひびわれ発生歪が純引張のもの比べて極めて大きいものとなる。
- (3) コンクリートの純引張応力・歪関係は(3)式で表わす歪の3次関数が良く適合する。
- (4) コンクリートの純引張応力・歪関係の曲げ解析への適用については、最大引張応力度およびひびわれ発生歪の取扱いに問題が残されているものの、最大引張応力度到達以降の応力・歪についてパラメーター M を適当に取入れれば、純引張応力・歪関係を曲げ解析へ十分適用可能である。

謝 辞

本研究は昭和59年度の卒業論文として取上げられたもので、取りまとめに尽力された中島純宏君（現在、日特建設KK勤務）に謝意を表します。また、本校技官前村政博氏には、実験の実施ならびに図面の作成に多くの労を取って頂いた。ここに厚く感謝します。

参考文献

- 1) 岡田清：鉄筋コンクリート工学，朝倉書店，昭和58年3月
- 2) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版，昭和59年5月
- 3) 趙力采：鋼繊維補強コンクリートの引張強度ならびにひびわれ拘束性能の評価方法に関する研究，東京大学，学位論文
- 4) 白田雅彦：コンクリートの引張特性に関する総合的研究，鹿児島大学工学部卒業論文，昭和58年度
- 5) 中島純宏：コンクリートの引張性状に関する基礎研究，鹿児島大学工学部卒業論文，昭和59年度
- 6) 清水昭之：コンクリートの引張クリープ，コンクリート工学第21号，1983年6月
- 7) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性をめぐる諸問題について，第54回コンクリート講習会テキスト，セメント協会，1983年2月
- 8) 武若耕司：塩分環境下における鉄筋の防食方法に

関する基礎的研究, 鹿児島大学工学部紀要第20号 昭和59年2月

9) 岡田清他2名: プレストレストコンクリート構造学, 国民科学社, 昭和56年3月