

二軸応力下にある鉄筋コンクリート板要素の構成則と ねじり部材への適用

A CONSTITUTIVE LAW OF REINFORCED CONCRETE PLATE ELEMENT UNDER
BIAXIAL STRESS STATES AND ITS APPLICATION TO REINFORCED
CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO TORSION

長瀧重義*・岡本享久**・曾我寿孝***・安達孝行****

By Shigeyoshi NAGATAKI, Takahisa OKAMOTO, Toshitaka SOGA and Takayuki ADACHI

Biaxial compressive-tensile tests were conducted on reinforced concrete plate members. In the average stress-average strain curves, steel starts to yield below its yield strength and the length of yield plateau is zero. In addition, the relationships between average tensile stress and average tensile strain on concrete at biaxial compressive-tensile stress states is different from those in uniaxial tensile stress states. Constitutive equations of steel and concrete in reinforced concrete plate element under biaxial stress states are proposed. These equations are then applied to the analysis of torsional behaviours of reinforced concrete members. The experimental and analytical values on the members subjected to torsion are found in good agreement.

Keywords : biaxial compressive-tensile stress, reinforced concrete plate, average stress and average strain curve, constitutive equation, torsion

1. はじめに

ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の荷重-変形関係を精度よく算定する方法として、部材をRC板要素モデルの集合と考える解析^{2),3)}が進歩しつつある。この背景として、RC構造物を対象とした分散ひびわれ(型)モデルに基づくFEM解析¹⁾の発達が挙げられ、これに関連しRC板要素内の鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ挙動に関する数多くの既往の研究が発表された。著者ら¹⁰⁾もねじりモーメントを受けるRC部材の荷重-変形関係を求めるにあたり、これらの成果を参照してコンクリートの引張剛性を取り入れる手法を提案している。

RC要素の構成則に関する最近の研究として、RC部材内におけるコンクリートの引張特性に関し、一軸引張部

材を対象とした森田ら¹²⁾、白井ら¹³⁾および岡村ら¹⁴⁾の研究、さらにはRC板部材に面内せん断力を作用させた実験に基づく、Vesshio and Collinsら¹¹⁾および角ら¹⁵⁾の研究などがある。また、RC部材内の鉄筋の引張特性に関し玉井ら⁴⁾は鉄筋比が低い場合鉄筋単体の応力-ひずみ関係と異なることを指摘している。このように、解析上必要となるRC部材内の鉄筋とコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係は鉄筋とコンクリートの付着挙動を介して相互に影響を及ぼし合い、鉄筋とコンクリートの付着力が大きくなる初ひびわれ直後から鉄筋降伏までの挙動を精度よくとらえることは現在でも重要な課題である¹⁶⁾。ねじりモーメントを受けるRC部材では、ひびわれ間のコンクリート-ストラットは二軸の圧縮-引張の応力状態にあり、一軸引張状態下の構成則をそのまま適用することは実際の挙動と異なる仮定に立脚していることになる。

以上のことより、本研究はねじりモーメントを受けるRC部材の解析上必要となる二軸の圧縮-引張応力下にあるRC板要素内の鉄筋およびコンクリートの基本的な力学性状を把握することを目的とした。すなわち、水平方向のみ配筋したRC板を製作して鉄筋軸方向に引張力、軸方向と垂直方向に側圧を作用させる載荷試験を実

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科
(同上)

*** 学生会員 東京工業大学工学部土木工学科大学院生
(同上)

**** 鹿島建設・東京支店 設計部設計課
(〒163 港区元赤坂1-3-8)

施し、二軸の圧縮-引張応力下にある RC 板要素における鉄筋とコンクリートの引張特性に及ぼす側圧、供試体の寸法効果および載荷経路の影響を定量的に評価し定式化するとともに、提案した構成則を Compression Field Theory に基づく RC 部材のねじり耐荷機構に関する解析に適用し、その整合性についても検討を行った。

2. 実験概要

「二軸の圧縮-引張応力下にある RC 板要素の引張特性」を論ずる際の問題点として、根拠となる加力方法がある。既往の研究を整理すると、加力方法として RC パネルを用いた純せん断試験と、一軸方向に配置した RC 供試体に配筋方向と垂直に側圧を作用させ鉄筋に引張力を加える方法の 2 種がある。この場合前者の実験では、配筋した鉄筋の定着部の状態、かぶり厚さおよび乾燥収縮、場合によってはクラック誘発目地の間隔がコンクリートの引張剛性に影響を及ぼし、特に定着部の状態が不完全な場合、比較的小さい平均ひずみでコンクリートの引張力が 0 からマイナスに移行し、評価が難しい^{13),15)}。一方、後者の場合、側圧を作用させた後に鉄筋に引張力を作用させるが、側圧による摩擦およびポアソン効果が引張挙動に及ぼす影響を定量的に評価しなければならない等の問題点がある。したがって、本研究では純せん断試験で二軸の圧縮-引張応力下の RC パネルの引張挙動を評価することが「ねじりを受ける RC 部材に及ぼすコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係の影響の評価」を行ううえで対応させやすいが、加力方法が難しいことより、RC 引張部材に側圧を作用させる簡単な方法を採用した。

(1) 供試体

構成則に及ぼす供試体の寸法効果の影響を調べる目的で、図-1 に示すように高さ 75、幅 80、長さ 300 mm (タイプ A)、高さ 300、幅 80、長さ 600 mm (タイプ B) の 2 種類の供試体を用いた。配置した鉄筋は図-1 に示すように A タイプでは断面中心に D10 を 1 本、B タイプでは板部材の板厚方向中央に D10 を 75 mm 間隔に 4 本

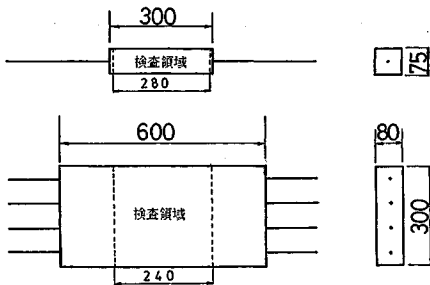


図-1 供試体寸法 (単位: mm)

である。この場合の鉄筋比は A, B タイプともに 1.06% である。鉄筋軸方向のひずみ分布を知る目的で A, B タイプともに溝切り鉄筋を用いた。鉄筋への引張力の導入にあたって、埋め込まれる鉄筋の両端に D-16 のねじ切り鉄筋を溶接し、鉄筋ねじ切り部での破断を避けた。

(2) 使用材料

a) 鉄筋

実験に用いた D-10 の鉄筋の物理的性質および単体としての応力-ひずみ関係をそれぞれ表-1 および図-2

表-1 使用鉄筋の物理的性質

降伏強度 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²	溝切り鉄筋 断面積cm ²	溝なし鉄筋 断面積cm ²
4133	6042	2.07×10 ⁶	0.593	0.674

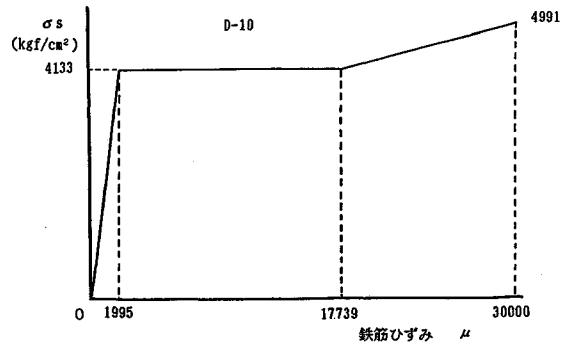


図-2 鉄筋単体の応力-ひずみ関係

を示す。鉄筋の溝切り部の寸法は幅 2.5 mm、深さ 2 mm であり、横リブ上の両面に溝が切っである。

b) コンクリート

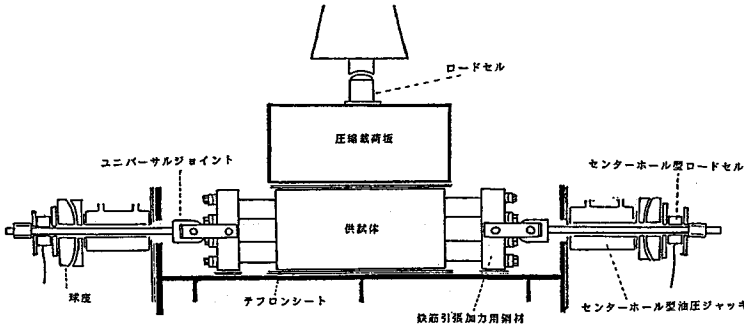
コンクリートは載荷時の目標圧縮強度を 300 kgf/cm² (29.4 N/mm²) として配合を定め、A タイプでは W/C=58%, s/a=47.3%, 単位水量=167 kgf/m³、一方 B タイプでは W/C=65%, s/a=48.7%, 単位水量=167 kgf/m³ とした。

(3) ゲージの貼付方法と位置

鉄筋ゲージには、ベースが 5.5 mm×1.5 mm (ゲージ長さ 2 mm) のものを用いた。ゲージの貼付にあたり、まず切削した溝の底部をやすりで磨いて平滑にし、アセトンにて脱脂したのちゲージを貼付した。さらにブレンダムをゲージ上に置き耐衝撃性を高めると同時に、防水のためエポキシ樹脂でその上を覆った。リード線は 1 ゲージ 3 線法であり、リード線にはエナメル線を用いた。ゲージを貼付した範囲は図-1 で示す検査領域である。すなわち、A タイプでは中央部 28 cm、B タイプでは中央部 24 cm であり、ゲージの貼付間隔は 20 mm とした。

(4) 載荷装置

載荷装置の概要は図-3 に示すとおりである。圧縮力



図一三 載荷装置

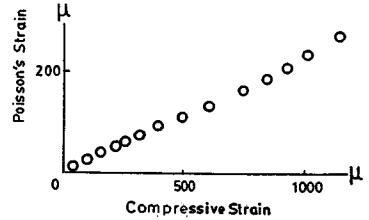
は載荷板を介して供試体の長辺上に鉄筋軸方向に沿って均等圧縮応力分布になるように与えた。引張力は供試体の短辺の両方向からセンターホールジャッキにより加えた。センターホールジャッキと鉄筋との間にはずれ吸収用のユニバーサルジョイントおよび球座が挟んであり、各鉄筋に等しい変位が与えられるようにした。圧縮力による供試体の長辺方向に沿う拘束を除去する目的で、供試体と載荷台ならびに載荷板との間にシリコングリースを挟んだ1 mm厚のテフロンシート2枚と0.1 mm厚のもの1枚を挿入した。なお0.1 mm厚のテフロンシートは軸方向に沿って2 cmごとに短冊状に切断してある。

(5) 実験計画

供試体は15体であり、うち無筋供試体が4体、D-10を配筋した供試体が11体であり、表一2に示す計画に基づいて実験を行った。

表一2 実験計画

載荷条件	Aタイプ D10×1本 鉄筋比1.06%	Bタイプ D10×4本 鉄筋比1.06%
側圧一定載荷 圧縮応力=0 引張応力変化	○	○
側圧一定載荷 圧縮応力=0.25 f _c ' 引張応力変化	○	○○
側圧一定載荷 圧縮応力=0.5 f _c ' 引張応力変化	○	○○○
引張力=0 圧縮応力変化	無筋コンクリート ○	無筋コンクリート ○○○
比例載荷 引張応力/圧縮応力 =0.25	—	○
比例載荷 引張応力/圧縮応力 =0.5	—	○

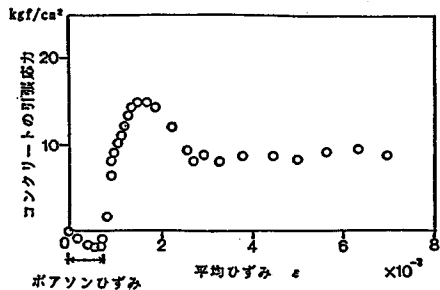


図一四 ポアソン比 (無筋コンクリート供試体)

3. 二軸の圧縮-引張応力下にある RC 板要素の引張特性

(1) ポアソン効果

二軸の圧縮-引張応力下の RC 板要素の力学挙動を考える場合、載荷方法として主に圧縮力を与えた後引張力を与える方法を本研究では採用しており、要素内の鉄筋とコンクリートの引張方向のひずみ挙動において、ポアソン効果によるものと鉄筋に引張力を与えることにより生ずるものの2種類のひずみが存在することとなる。図一4は無筋コンクリート供試体について圧縮試験を実施し、その際の圧縮ひずみと圧縮方向に垂直方向の横ひずみとの関係を示したものである。なお、この際のコンクリートゲージの貼付位置は供試体鉄筋軸方向中心線上に供試体中央から両側へ10 cm 間隔で表裏10か所であり、それぞれの箇所について側方向と鉄筋軸方向の2枚、合計20枚貼付した。圧縮強度(この場合297 kgf/cm²)の約50% (圧縮ひずみにして1000×10⁻⁶) まではポアソン比は0.20であり、ほぼ一定値を示した。図一5は側圧=0.5 f_c'を作用させた供試体におけるポアソン効果を含めたコンクリートの平均引張応力と平均引張ひずみ関係を示すものである。鉄筋およびコンクリートの平均引張ひずみは2.(3)で示した鉄筋ゲージと玉井らの方



図一五 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係に及ぼすポアソン効果の影響 (B Type, 0.5 f_c)

法⁴⁾を参照して供試体全長の伸びから求めた。側圧載荷終了時のコンクリートには鉄筋軸方向に圧縮力が導入され、その後鉄筋に引張力が作用しても初期段階ではコンクリートに圧縮応力が残留していることが認められた。この理由として鉄筋軸方向のコンクリートにはポアソン効果による引張りずみが生ずるが、鉄筋とコンクリートの界面の付着、リブの物理的摩擦作用により界面付近のコンクリートは拘束を受け、一種の拘束型枠中の膨張コンクリートの挙動に類似した挙動をとる。ところが、コンクリートに引張応力が導入されるのは全引張方向ひずみがこのポアソン効果によるひずみに一致したときであり、全ひずみからポアソン効果の影響によるひずみを差し引くことによって純粋な引張りひずみを求めることができる。今回の要素内の鉄筋とコンクリートの引張挙動を論議するうえでこのポアソン効果に相当する分は除去して考察を行う。

(2) 側圧がRC板要素の引張特性に及ぼす影響

a) 引張荷重-平均ひずみ関係

鉄筋に与えた引張力(T)と供試体の鉄筋軸方向の平均ひずみ(ϵ)との関係について応力経路すなわち側圧(C)を所定の値まで作用させたのち引張力を作用させるタイプ(側圧一定載荷)と側圧および引張力を同時に作用させるタイプ(比例載荷)をパラメーターに図-6に示す。側圧=0.5 f_c' の比例載荷では T/C の比率は0.5であり、側圧=0.25 f_c' の比例載荷では T/C の比率は0.25である。なお、ポアソン効果の影響は3.(1)の結果に従って除去してある。比例載荷タイプの T - ϵ 関係は側圧一定載荷タイプの側圧0ならびに0.5 f_c' における引張挙動の間に位置し、しかも側圧0の供試体の引張挙動から側圧=0.5 f_c' の引張挙動に載荷荷重の増大とともに移行していることがわかった。

側圧一定載荷のAタイプおよびBタイプにおける引張荷重(T)と平均引張りひずみの関係を、側圧をパラメーターにして図-7に示す。側圧の作用によって、ひびわれ発生から降伏開始までの挙動が側圧0の供試体と異なったものとなった。なお、この種の載荷方法で最も問

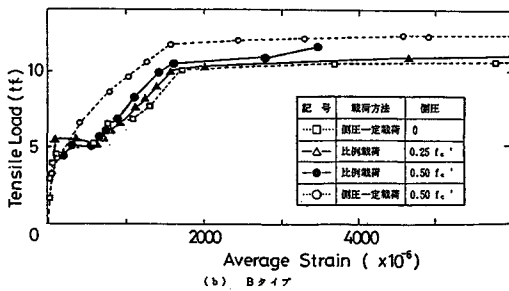


図-6 載荷経路が作用引張荷重と平均ひずみに及ぼす影響

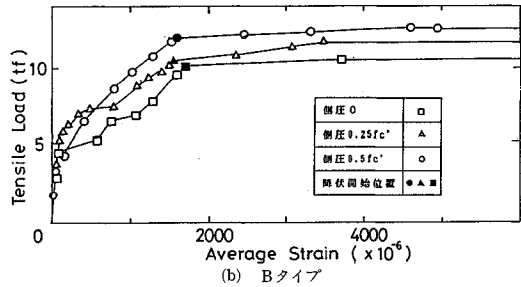
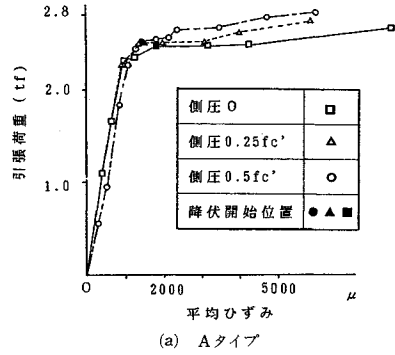


図-7 引張荷重(T)と平均引張りひずみの関係

題となるのが、供試体と載荷板、供試体と載荷台の「摩擦」の影響である。Aタイプ供試体を用いて側圧=0.5 f_c' の場合について片引き試験で静止摩擦係数を求めたところ0.03~0.05であった。載荷試験はほぼ連続して鉄筋に引張力を与えたので、この値より一般的に小さな運動摩擦係数に依存し、図-7のAタイプに示すように摩擦の影響は載荷板、載荷台および供試体の研磨とテフロンシート、シリコングリースの挿入で比較的小さいようであり、本研究では無視した。なお、Bタイプ供試体における発生したひびわれ本数は、側圧0で3本、側圧0.25 f_c' で7本、側圧0.5 f_c' で11本であった。

b) 鉄筋およびコンクリートの平均引張応力-平均ひずみ関係

RC供試体の鉄筋に関する平均応力と平均ひずみの関係を図-8に示す。この場合、縦軸の鉄筋の平均応力は鉄筋単体の降伏点応力で除して無次元化した。なお、

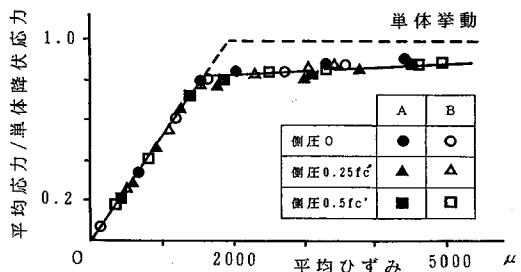
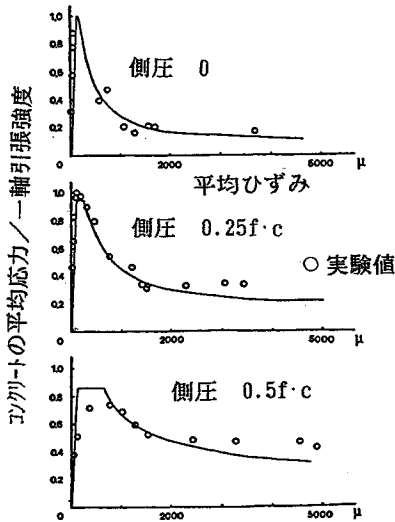


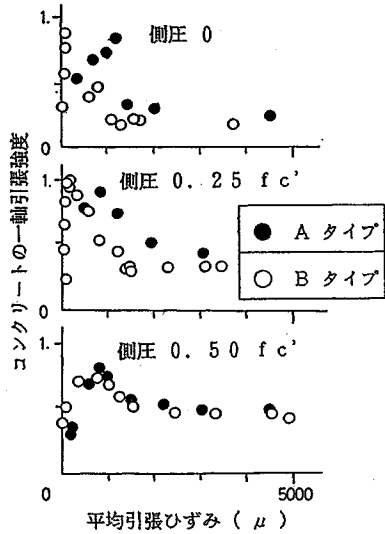
図-8 要素内の鉄筋の平均引張応力と平均引張りひずみの関係

鉄筋の平均応力は鉄筋に貼付したひずみゲージによるそれぞれの値を鉄筋単体の引張応力-ひずみ関係に代入することによって求め、ポアソン効果の影響は除去してある。RC板要素内にある鉄筋の平均応力-平均ひずみに基づく鉄筋の見掛けの降伏点は玉井らりの結果と同様に鉄筋単体のものより低下した。しかしながら、この降伏点降下に及ばず側圧の影響はきわめて小さい。図一七と図一八の結果を用いて、 $A_c \cdot \sigma_c = T - A_s \cdot \sigma_s$ の関係よりRC板要素内のコンクリートの平均引張応力-ひずみの関係を求めると図一九のようになる。なお、縦軸のコンクリートの平均引張応力はコンクリートの一軸引張強度 ($f_c = 0.5 f_c^{2/3}$)によって無次元化した。初ひびわれ発生までの $\sigma_c - \epsilon$ の関係は側圧の影響を受けず同一の剛性を有するが、初ひびわれ発生以後は側圧が大きいかほど引張剛性の低下割合が小であった。これは側圧が大きいかほど鉄筋とコンクリートの界面と直角方向に生ずる微細ひびわれの振幅が抑制され、その結果界面直角方向に発生する微細ひびわれ本数が増えることによるものと思われる。

AタイプとBタイプの供試体では鉄筋比は同一であるが、供試体長さおよび変形・鉄筋ひずみに関する測定領域(すなわち、図一に示す検査領域)が異なる。Aタイプでは測定領域がひびわれ面(ここでは供試体両端部)に近いので、鉄筋の平均ひずみの算定にあたってこの両端部の影響が含まれ、一方Bタイプでは測定領域が供試体両端より離れているため、この影響は少ない。その結果、図一十に示すようにAタイプではBタイプに比べて同一引張荷重下での鉄筋の分担分がコンクリートの分担分より見掛け上大きくなり、コンクリートの平均引張応力-平均引張ひずみ関係における応力ピーク値までの



図一九 RC板要素内のコンクリートの平均引張応力-ひずみの関係



図一十 コンクリートの引張剛性(AタイプとBタイプの比較)

剛性が低くなる。したがって、実験では供試体の長さが限られており、初期剛性の評価をするときこれらに留意する必要がある。しかし、可視ひびわれが供試体に発生した後は、これらの影響は少なくなり、A、Bタイプともに同一の引張剛性を有することとなる。なお、側圧が $0.5 f_c'$ と高い場合には所定の側圧作用までに鉄



写真一 鉄筋近傍のひびわれ性状(側圧0)



写真二 鉄筋近傍のひびわれ性状(側圧 $0.5 f_c'$)

筋とコンクリートの界面近傍に微細ひびわれが生じ、その後引張荷重を作用させた場合この微細ひびわれの影響によって初期剛性は低下するが、明瞭な可視ひびわれまでには進展しにくく、応力ピーク以後では側圧0の場合より剛性は高くなる。このことは写真一1および写真一2にも明瞭に現われている。

c) RC板要素の構成則

上述のa)およびb)の結果を参照して、側圧作用下の鉄筋コンクリート板内のコンクリートに関する構成則を実験結果に基づいて仮定すると図-9の実線で示ようになる。初ひびわれ発生時については岡村ら⁹⁾の二軸応力下の無筋コンクリートの構成則より求め、引張剛性が一定の区間については実験値より、剛性低下の曲線については下降曲線を指数関数⁶⁾で仮定し最小二乗法で求めた。これらの関係式を表-3に示す。鉄筋については、ひびわれ面の引張力と平均面における表-3で求めたコンクリートの平均引張力および鉄筋の平均引張力の和とのつり合い条件より、平均面での見掛けの降伏ひずみを算出する。見掛けの降伏点以後における鉄筋の応力-ひずみ関係の傾きは $(f_y - \sigma_y) / E_{sh} = 0.01$ ⁹⁾とした。今回の実

表-3 RC板要素の構成則 (コンクリート)

領域	側圧0	側圧0.25 f_c'	側圧0.50 f_c'
一次ひびわれ発生前 $0 \leq \epsilon_t < 0.000075$	$\sigma_t = E_c \times \epsilon_t$ ここで、 $E_c = f_{ct} / 0.000075$ σ_t, ϵ_t : コンクリートの引張応力, ひずみ		
降伏域 $0.000075 \leq \epsilon_t < \epsilon_{tu}$	$\sigma_t = K \times f_{ct}$ K: 側圧による低減係数		
	$\epsilon_{tu} = 0.000075$ K = 1	$\epsilon_{tu} = 0.000250$ K = 0.97	$\epsilon_{tu} = 0.000500$ K = 0.87
ひずみ軟化域 $\epsilon_{tu} < \epsilon_t$	$\sigma_t = f_{ct} (\epsilon_t / \epsilon_{tu})^c$ ϵ_{tu} : 降伏終了ひずみ		
	C = 0.48	C = 0.49	C = 0.34

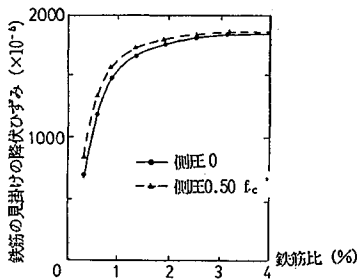


図-11 RC要素の見掛けの降伏ひずみと鉄筋比の関係

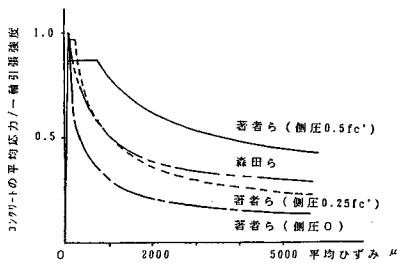


図-12 既往の提案式との比較

験条件に関する鉄筋の見掛けの降伏ひずみと鉄筋比の関係は図-11のようになり、鉄筋比が1%を越えると鉄筋比および側圧が見掛けの降伏ひずみに及ぼす影響は少ない。なお、森田らおよび岡村らの提案式は図-12に示すように本研究の側圧が0.25 f_c' の場合に近い。

4. 側圧を考慮したRC板の構成則のねじりを受けるRC部材の挙動解析への影響

(1) ねじりを受けるRC部材の耐荷機構と解析の現状

著者らはRC中実断面部材のねじり試験結果^{7),8),10)}より、ねじりを受ける部材の耐荷機構の特徴は、中実断面部材であっても斜めひびわれ発生後は中空断面部材と同様に面部材として扱えること、ひびわれ間のコンクリートストラットが二軸の圧縮-引張応力下にあり、圧縮応力の影響によって鉄筋とコンクリートの付着応力が向上し、ひびわれ分布性状にも影響を与えること、さらにはかぶりコンクリートの剝離が図-13に示すように、ねじりを受けしかも円形あるいは円筒断面部材より長方形断面部材では生じやすいことを確認した。ねじりを受けるRC部材の解析はつい最近まで、ひびわれが十分に入り込んだ状態を想定し立体トラス理論によって解析を行ってきた。この解析では部材の終局状態付近のねじり挙動はとらえることはできるが、初ひびわれ発生後からひびわれが進展する段階の挙動をとらえることができない。その後、二羽⁹⁾、著者ら¹⁰⁾によってコンクリートの引張剛性を考慮したCompression Field Theoryに基づく解析が提案され、ねじり挙動を比較的精度よく求めることが可能となった。しかしながら、解析におけるコンクリートの引張剛性は一軸下の実験結果に基づくもので二軸の圧縮-引張応力下の引張剛性については実験資料の不足と相まって考慮しておらず合理的とはいえない。さらに、かぶりコンクリートの剝離現象のねじり挙動への影響が大なることを指摘しながら定量的評価には触れていない。

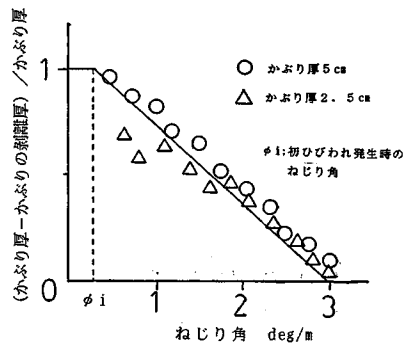


図-13 ねじり角とかぶりコンクリートの剝離

(2) 二軸の圧縮-引張応力下にある RC 部材の構成則のねじり部材への適用

ねじり解析にあたっての方法は文献 10) で発表したものを、その解析のフローチャートを図-14 に示す。構成則のねじりを受ける RC 部材への適用にあたって、RC 要素内のコンクリートの平均引張応力-平均引張ひずみ関係には表-3 に示した提案式を用い、コンクリートの平均圧縮応力-平均圧縮ひずみの関係には Vecchio and Collins¹¹⁾ の提案式を用いた。また、かぶりコンクリートの剝離現象には著者らの実験結果¹⁰⁾ に基づき図-12 に示すようにねじり角の増大とともにコンクリート表面からの剝離が線形的に進む仮定を設けた。解析結果と実験結果の比較を図-15 から図-18 に示す。断面寸法が幅 1200、高さ 740、壁厚 80 mm とほぼ実大の RC 中空断面部材のねじり挙動は、図-16 に示すように実験値は作用ねじりモーメントの増加とともに、側圧が 0 の場合の解析値から 0.5 f_c の解析値に移行していることがわかる。なお、最大耐力については、供試体の軸方向長

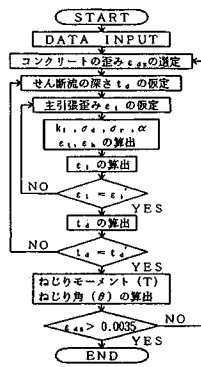


図-14 ねじり解析のフローチャート¹⁰⁾

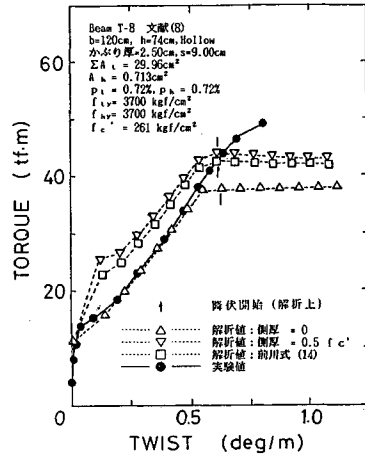


図-16 Torque-Twist Curve

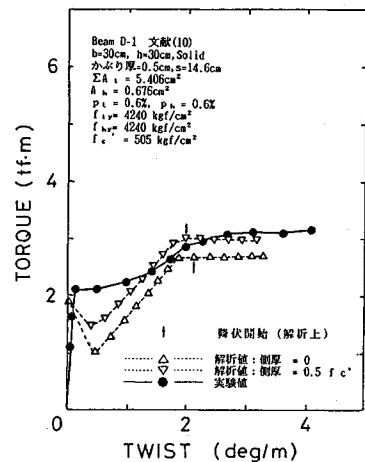


図-17 Torque-Twist Curve

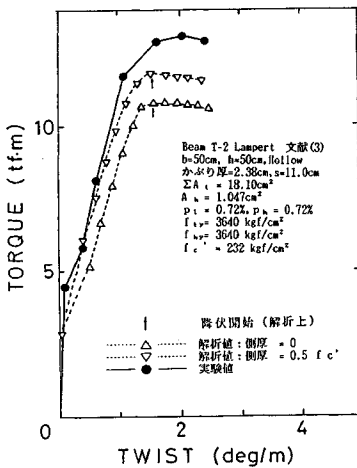


図-15 Torque-Twist Curve

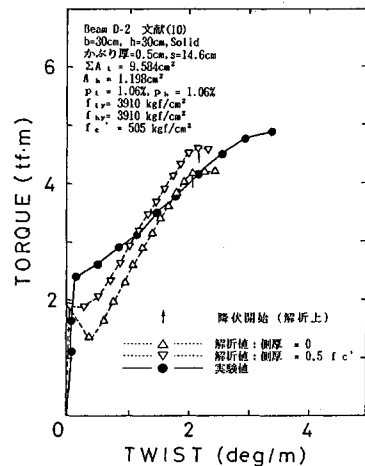


図-18 Torque-Twist Curve

さが1200mmと断面寸法に比較して短いこと、載荷において供試体の両端が剛性の高い鉄板で圧着してあることより、そり拘束の影響により実験値が解析値を上回る事となった。森田、岡村らの構成則を用いた解析値は $0.25 f_c$ と $0.5 f_c$ の場合の中間の挙動をとる。中空断面部材では解析値は初ひびわれ発生時から最大耐力まで妥当な精度で推測可能である。しかしながら、中実断面部材では解析値は実験値をいくぶん過小評価する傾向にある。これは有効厚を仮定した解析により中実断面に対して断面中心部を無視していることが一因として挙げられる。

5. 結 論

本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 二軸の圧縮-引張応力下にある鉄筋コンクリート板要素内のコンクリートの引張剛性は側圧の影響を受ける。すなわち、側圧によりRC要素内の鉄筋とコンクリートの界面と直角方向に生ずる微細ひびわれの進展状況が一軸状態下のもとは異なり、同一すべり量に対する付着剛性が高まることからひびわれ発生後の剛性の低下割合は一軸状態下より二軸状態下のもの方が少ない。

(2) 二軸の圧縮-引張応力下にある鉄筋コンクリート板要素内の鉄筋の平均引張応力-平均引張ひずみ関係は鉄筋単体のものと異なり、見掛けの降伏点が低下し、この見掛けの降伏点はひびわれ面と平均面のつり合い条件より算出できる。なお、鉄筋の平均引張挙動はコンクリートの引張挙動ほどに側圧の影響を受けない。

(3) RC要素内の鉄筋およびコンクリートに関する平均応力-平均ひずみ関係は供試体寸法と変形・ひずみの測定領域の影響を受け、構成則を求める際にはこの点を留意する必要がある。

(4) 本研究にて提案した二軸圧縮-引張応力下の鉄筋およびコンクリートに関する引張挙動に関する式は、RC中空断面部材のねじり挙動解析に適用した結果、実験値とよい整合を得た。

参 考 文 献

- 1) たとえば、Cheng-Shung Lin and Alexander C.Scordelis: Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form, ASCE ST-3, March, pp.523~538, 1975.
- 2) Collins, M.P. and Mitchell, D.: Shear and Torsion

Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams, PCI, Vol. 25, No. 5, pp.32~100, 1980.

- 3) Hsu, T.T.C. and Mo, Y.L.: Softening of Concrete in Torsional Members, Dept. of Civil Eng. Univ. of Houston, March, pp.1~107, 1983.
- 4) 玉井信一・島 弘・出雲淳一・岡村 甫: 一軸引張部材における鉄筋の鉄筋降伏以降の平均応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No. 378/V-6, pp. 239~247, 1987.
- 5) 前川宏一・岡村 甫: 2軸応力下(圧縮-引張領域)にあるコンクリートの変形特性, コンクリート工学論文, No. 88.3-2, pp. 111~121, 1983.
- 6) 岡村 甫・前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析, 土木学会論文集, No. 360/V-3, pp. 1~10, 1985.
- 7) 岡本享久・長瀧重義: 曲げ・せん断とねじりを同時に受ける鉄筋コンクリート部材の耐力と変形, 土木学会論文集, No. 360/V-3, pp.81~89, 1985.
- 8) 長瀧重義・岡本享久・山岡 暁・李 承漢: 鉄筋コンクリート部材のねじり特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 372/V-5, pp.157~166, 1986.
- 9) 二羽淳一郎・椛貝 勇: コンクリートのテンションスティフニングを考慮した鉄筋コンクリート部材の純ねじり解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9-2, pp. 91~96, 1987.
- 10) 長瀧重義・李 承漢・岡本享久: 鉄筋コンクリート部材のねじり耐荷機構に関する一考察, 土木学会論文集, No. 390/V-8, pp.179~188, 1988.
- 11) Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, March-April, pp.219~231, 1986.
- 12) 森田司郎・角 徹三: 鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究, 第18回セメント技術年報, pp. 426~430, 昭和39年.
- 13) 佐藤稔雄・白井伸明: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その6, 7), AIJ大会概要集, pp. 1615~1618, 1978.
- 14) Maekawa, K., Okamura, H., Izumo, J.: Reinforced Concrete Element Subjected to Cyclic Loading, IABSE Colloquium Delft, August, pp.575~590, 1987.
- 15) 角 一行・川股重也: 面内せん断下の鉄筋コンクリート平板におけるコンクリートの力学特性, コンクリート工学論文, No. 88, pp.97~110, 1988.
- 16) 出雲淳一・島 弘・岡村 甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No. 87.9, pp.107~120, 1987.

(1989.4.7・受付)