

鉄筋コンクリート構造物の非線形FEM解析における付着すべりモデルの精密化

REFINED BOND-SLIP MODEL FOR FEM ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

彦坂 熙*・John BOLANDER Jr.**・劉 玉 擎***

By Hiroshi HIKOSAKA, John BOLANDER Jr. and Yuqing LIU

A nonlinear bond stress-slip model, which accounts for changes in bonding behavior induced by nearby cracking in reinforced concrete structures, is proposed in this paper. Link elements are used to represent the concrete-steel interface. Link properties are modified as cracking forms transverse to the reinforcing steel. A nonlocal measure of damage is used to quantify crack formation and to transition bond behavior between two envelopes; 1) an outer envelope modeling bond conditions sufficiently far from cracking, and 2) an inner envelope modeling bond conditions at the face of a transverse crack.

Experimental and analytical results of a T-shape reinforced concrete bridge pier under eccentric loadings are presented. Results from the proposed model compare well with experimental results.

Key Words: interface modeling, bond-slip, smeared cracking, nonlocal damage

1. 緒 論

近年、ワークステーションやパーソナルコンピュータの普及と性能の向上により、コンクリート構造物の解析と設計に有限要素法(FEM)を用いる機会が増加している。鉄筋コンクリート工学にFEMが導入されたのは1960年代後半¹⁾であるが、1970年代に入ってコンクリート材料の破壊基準や構成関係の研究が進展し²⁾、また各種の構造物が大型化および複雑化したことがFEMの応用を促した。さらに1980年代には、ひびわれの発生と成長によって引き起こされる破壊現象を対象とする破壊力学(fracture mechanics)をコンクリート材料に応用する研究が急速に発展し³⁾、その成果を取り入れた非線形FEM解析の有用性と信頼性が一段と高められつつある。

コンクリートの引張強度はかなり小さいため、鉄筋コンクリート構造物の終局強度解析および設計に際してコンクリートの引張領域は通常無視される。しかし、引張ひびわれの生じたコンクリートも構造全体の非

* 工博 九州大学 教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** Ph.D 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (同 上)

*** 工修 九州大学大学院 土木工学専攻博士課程 (同 上)

線形挙動に大きな影響を及ぼすので、FEM解析ではひびわれのモデル化が重要となる。本研究では、ひびわれが生じた要素を直交異方性連続体として扱う分布ひびわれモデルを採用する。近年、コンクリート構造の劣化防止と耐久性向上のためひびわれ制御技術への関心が高まっているが、実構造物に離散的に生じるひびわれの間隔やひびわれ幅を、分布ひびわれモデルにより精度良くシミュレートすることはかなり難しい。

鉄筋コンクリート部材においては、コンクリート自身の引張強度や破壊力学的特性のみならず、鉄筋とコンクリートとの付着作用がひびわれ性状と鉄筋応力に重要な影響を及ぼすことは言うまでもない。しかし、分布ひびわれモデルを用いた既往の非線形FEM解析は、完全付着（鉄筋とコンクリートとの相対すべりが生じない）を仮定したものが多く、本論文では、鉄筋コンクリート部材のひびわれの発生に伴って、ひびわれの近傍に起こる付着劣化を考慮した新しい付着すべりモデルを提案する。ひびわれ近傍における異形鉄筋とコンクリートの付着性状に関しては、林ら⁴⁾が引抜き試験とはりの曲げせん断実験を行い、ひびわれ近傍での付着劣化とその影響範囲を明らかにしている。林らは同時に、実験によりひびわれパターンおよび付着劣化特性が既知となったはり供試体について、付着応力-すべり関係をひびわれからの距離に応じて予め変化させた離散ひびわれモデルによるFEM解析の結果を実験結果と比較している。これに対し本研究は、分布ひびわれモデルを用いて離散的なひびわれパターン、付着応力分布、鉄筋応力分布などをシミュレートすることを主目的とし、ひびわれの伸展に伴ってひびわれ近傍のリンク要素の付着劣化特性が連続的かつ自動的に組み込まれるスキームに特徴がある。その際、非局所的損傷度の概念を導入してひびわれの形成状態と付着劣化特性を定量化する。なお、圧縮応力下のコンクリートの降伏条件、破壊条件など非線形性の取扱いは塑性理論^{5, 6)}に従う。

本モデルと解析手法の妥当性を示すために、偏載荷重を受ける鉄筋コンクリートT形橋脚の模型実験と二次元非線形FEM解析を行い、ひびわれ性状、主鉄筋の応力分布などについて実験および解析結果を比較検討する。また、すべりのない完全付着モデルによる解析結果とも比較し、本モデルの有効性を明らかにする。

2. 分布ひびわれによるコンクリートの引張破壊のモデリング

引張ひずみ軟化域において、平面応力状態にあるコンクリートのひびわれとそれに直交するひびわれ局所座標系に関する応力-ひずみ関係は次式で与えられる⁷⁾。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon^f \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)_a$$

ここに、Eはヤング係数、Gはせん断弾性係数、 ν はポアソン比、 ε^f は破壊ひずみ(fracture strain)、 β はせん断剛性低減係数である。また σ_{11} 、 σ_{22} 、 τ_{12} および ε_{11} 、 ε_{22} 、 γ_{12} は、ひびわれ面に垂直な方向を1とする応力およびひずみを表す。

式(1)_aの右辺を整理すれば、同式は次のように書き換えられる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)_b$$

ここに、 ω はコンクリートの引張ひずみ軟化特性を表すために導入した損傷度パラメータで、 $\omega = 0$ （無損傷）から $\omega = 1$ （完全損傷）までの任意の値をとる。損傷度 ω と式(1)_a の破壊ひずみ ε^f の間には次の関係がある。

$$\varepsilon^f = \frac{\omega}{1 - \omega} \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (2)$$

損傷度 ω は、ひびわれ面に垂直な応力 σ_{11} が図-1のごとく解放されるように調整される。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 0 & (\varepsilon_{11} \leq \varepsilon_t) \\ \omega &= 1 - \frac{f_t}{E \varepsilon_{11}} \exp \left[-\frac{\kappa}{\varepsilon_0} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_t) \right] & (\varepsilon_{11} > \varepsilon_t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 ε_t と f_t は引張軟化開始点のひずみと応力、 ε_0 は軟化曲線において応力を 0 と見なしうるひずみ、また κ は指数曲線ひずみ軟化の度合を調整するパラメータで、 $\kappa = 5$ により直接引張試験で観察されるひずみ軟化を近似できる。

本研究では、材料の引張軟化曲線を有限要素の寸法に応じて調整することにより、適当な破壊エネルギーが消費されるようにした⁷⁾。

3. コンクリートと鉄筋間の付着すべりのモデリング

鉄筋コンクリート部材においては、コンクリートと鉄筋間の付着作用がひびわれ性状と鉄筋の応力分布に重要な影響を及ぼす。本研究では、図-2に示す付着リンク要素を用いてコンクリートと鉄筋間の付着作用をモデル化した。鉄筋軸に垂直方向には相対変位が生じないように、リンク剛性 K_{nn} に非常に大きな値を与えた。鉄筋軸方向のリンク剛性 K_{tt} は、以下に述べる非線形の付着応力-すべり関係により調整した。

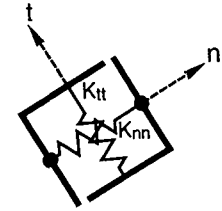


図-2 付着リンク要素

3.1 付着応力-すべり関係

従来の付着リンク要素を用いるFEM解析において、リンク剛性 K_{tt} は鉄筋の引抜き試験（図-3）より得られる付着応力-すべり関係に基づいて与えられる例が多い。しかし、鉄筋コンクリート部材の付着応力-すべり関係は、引抜き試験のそれとは必ずしも対応していないと考えられる。

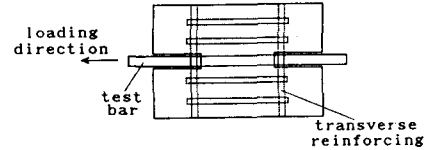


図-3 鉄筋の引抜き試験

また、付着応力-すべり関係は部材の主鉄筋全長にわたって一様ではなく、ひびわれが発生するとその近傍では付着劣化が生じる。後藤⁸⁾は鉄筋コンクリート両引供試体を用いた実験より、異形鉄筋に交叉する主ひびわれの発生後まもなく、その主ひびわれに近い異形鉄筋のふしからコーン状に内部ひびわれが発生し始め、鉄筋応力度の増加とともに遠いふしからも発生するようになり順次その数を増していくことを見出している。本研究の分布ひびわれモデルはこの主ひびわれを二次元的に解析するために用いるものであり、三次元内部ひびわれの影響は、付着応力-すべり関係の非線形性およびコンクリートのコーン状損傷領域として考慮される。

図-4は、異形鉄筋の引抜き試験に基づいて理想化された、2つの両極端の付着応力-すべり関係包絡線

を示したものである⁹⁾。まず、図-3のようにコンクリートの横方向拘束が十分な場合、付着応力-すべり関係は図-4の曲線C（外縁包絡線）で理想化できる。他方、試験体の横方向鉄筋による拘束が不十分な場合には、曲線Cの最大付着応力 $\tau_{\max}$ に達する前に鉄筋軸方向の割裂を生じたり、また付着部が材端（引抜き端）に近いとコンクリートがコーン状に抜け出して、図-4の曲線U（内縁包絡線）のように付着応力は急速に低下する。

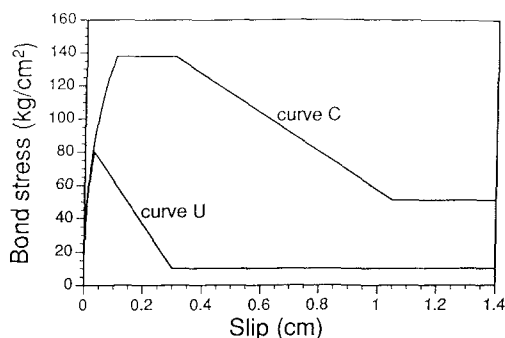


図-4 理想化された付着応力-すべり関係

図-5のように、試験体に埋め込んだ異形鉄筋を材端から引抜く場合には、材端からの距離 d によって付着性状が異なり、材端に近いほど付着応力が小さく、材端から鉄筋径 d_b の4～5倍離れたと一定の最大付着応力 $\tau_{\max}$ に達することが知られている⁴⁾。このとき、異形鉄筋のふし部から発生するコーン状の内部ひびわれは材端に近いほど多くかつ長いことが観察されており¹⁰⁾、特性長 $\ell = (4 \sim 5) d_b$ のコーン状損傷領域が形成されることができると考えられる。

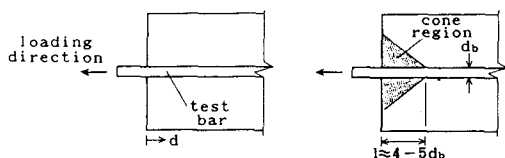


図-5 コンクリート表面近傍の損傷領域

3.2 非局所的損傷度による付着特性制御のスキーム

鉄筋コンクリート部材において鉄筋に交叉する引張ひびわれが生じるときは、式(5)の損傷度パラメータ ω が次第に増大してひびわれ面近傍は図-5の状態に漸近すると考えられる。すなわち、ひびわれ面近傍に鉄筋を中心とするコーン状の損傷領域が形成され、この領域外($d > \ell$)の付着特性は図-4の外縁包絡線を維持するが、損傷領域内($d \leq \ell$)の付着特性は、コンクリートの引張軟化の度合 ω に応じて外縁包絡線と内縁包絡線の間を連続的に遷移するものと仮定する。本論文で提案するひびわれ近傍の付着劣化のシミュレーションのスキームは、次の通りである（図-6参照）。

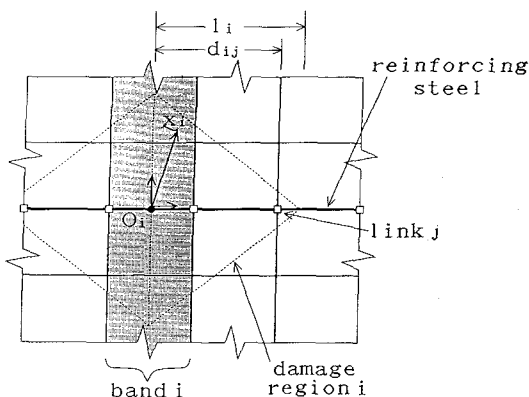


図-6 鉄筋近傍の有限要素メッシュ

1) 分布ひびわれモデルによるFEM解析において、分布ひびわれは1要素幅のひびわれ帯(crack band)に局所化して伸展する。鉄筋を横切る任意のひびわれ帯 band i において、band i の中心線と鉄筋軸との交点 O_i に関する非局所的損傷度 $\bar{\omega}_i$ を計算する。 $\bar{\omega}_i$ は band i の全体積にわたるコンクリートの損傷度パラメータ ω の重み付き平均値として次式で与えられる。

$$\bar{\omega}_i = \frac{1}{V_i} \int_V \alpha(x_i) \omega(x_i) dV \quad (4)$$

ただし

$$V_i = \int_V \alpha(x_i) dV \quad (5)$$

ここに、 x_i は原点 O_i に関する空間座標ベクトル、 $\alpha(x_i)$ は原点 O_i からの距離が増すとともに直線的に0に漸減する重み関数で band i の外では $\alpha(x_i) = 0$ とする。ひびわれの発生位置が鉄筋に近いほど

付着性状に及ぼす影響が大きいはずであるから、 O_i に近い損傷ほど大きい重み $\alpha(x_i)$ が与えられる。非局所的損傷度 $\bar{\omega}_i$ は、原点 O_i を視点場として band i におけるひびわれ状態を定量化した尺度となる。なお、式(4)、(5) の演算は、ガウス積分を用いて有限要素法プログラムに容易に組み込むことができる。

2) 各リンク j について、式(4) の ω_i を特性長 ℓ_i のコーン状損傷領域 i 内のリンク位置 d_{ij} に応じて線形補間することにより、リンク j の損傷度 ω_j^* を計算する。すなわち、

$$\omega_j^* = \sum_i \left(1 - \frac{d_{ij}}{\ell_i}\right) \bar{\omega}_i \leq 1 \quad (6)$$

上式において $\omega_j^* \leq 1$ の条件を付したのは、ひびわれが近接して生じる場合に、リンク j が2個以上のコーン状損傷領域の影響を同時に受ける可能性があるためである。

3) 式(6) の ω_j^* を用いて、リンク j の付着特性を図-4の2つの非線形付着応力-すべり関係を、すなわち、①ひびわれから十分に離れた位置での付着特性を表す外縁包絡線、および②完全に開口したひびわれ面における付着特性を表す内縁包絡線、の間で連続的に遷移させる。本研究では、図-7に示すように付着応力-すべり曲線上の3点 (s, τ) を指定することにより、両包絡線およびリンク損傷度 ω^* を用いて遷移させた付着特性が定まるようにした。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} s_q &= s_q^o - \omega^*(s_q^o - s_q^i) \\ \tau_q &= \tau_q^o - \omega^*(\tau_q^o - \tau_q^i) \end{aligned} \right\} \quad q = 1, 2, 3 \quad (7)$$

ここに、肩字 o と i はそれぞれ外縁および内縁包絡線を表す。両包絡線は、コンクリート強度、鉄筋径、拘束鉄筋量、コンクリートかぶり等の影響を考慮して、適当な実験結果に基づき近似されるものである。

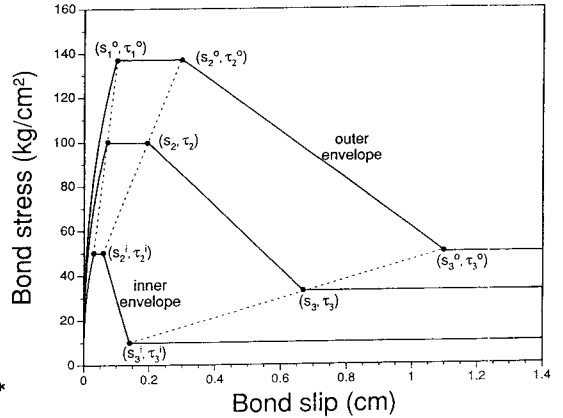


図-7 数値解析に用いる付着応力-すべり関係

4. 偏載荷重を受ける鉄筋コンクリートT形橋脚の模型実験とFEM解析

4.1 実験概要

実構造を約 1/10 に縮尺して製作したT形橋脚供試体の寸法および配筋概要を図-8に示す。本供試体は、最近よく見られるT形橋脚の片側張出梁上のみ上部工を暫定施工して供用する場合を想定し、斜引張応力が生じる柱梁節点部の設計法を確立するために著者らが行った一連の実験用に製作したもの(全18体)の1つである。実験における加力装置の概要は図-9の通りであり、供

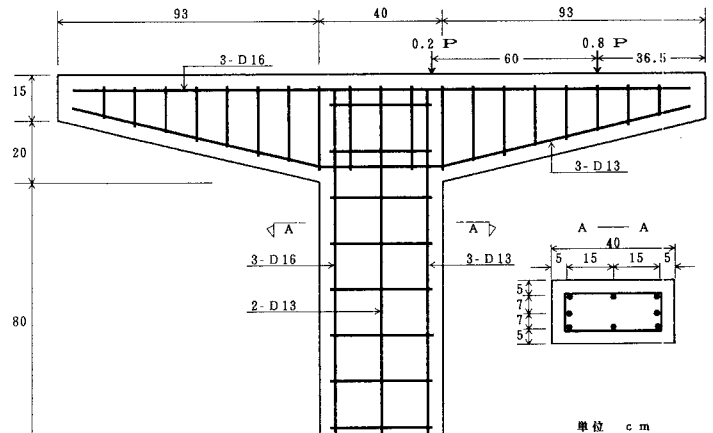


図-8 偏載荷重を受けるT形橋脚供試体の諸元と配筋

試体の片側張出梁上で2点支持・荷重梁に鉛直荷重Pを加えて、供試体には0.2Pおよび0.8Pの2点荷重となるようにした。供試体は $P=4.8$ tfを設計荷重として道路橋示方書¹¹⁾に基づく許容応力度法で設計されており、張出梁上縁と柱部材には同時に最初の曲げひびわれが発生する。

一連の実験結果の一部^{12), 13)}は既に発表したが、ここに取り上げる図-8の供試体のみは、本論文の付着すべりモデルの妥当性の検証を兼ねるため、他の17体とは異なる鉄筋の加工とひずみゲージの追加貼付を行った。すなわち、軸圧縮力と等曲げモーメントを受ける柱部材の主鉄筋(3-D16)に着目し、そのセンター筋1本のみを断面積がD16筋と等しい中空のD19筋で置き換えた。この実験では、ひびわれの発生、伸展にともなう付着劣化状況を鉄筋ひずみ分布の変化から測定する目的で、鉄筋のひずみゲージを密に貼付することにしたが、そのためには

異形鉄筋のふしを多数削り取る必要がある。それによる付着特性の変化を避けるため、図-10のようにD19筋を軸方向に半割りにして溝切り加工(幅9mm、深さ4.5mm)を行い、柱部材中央部48cmの測定区間について、溝の底面にゲージ長2mmの電気抵抗線ひずみゲージ17枚を3cm間隔で貼付した。ひずみゲージにはワックスでコーティングを施し、リード線は特殊な細線を用いてフーチング内の鉄筋下端から引き出した。ひずみゲージの貼付、コーティング、リード線の結線が完了した後、半割りの鉄筋切断面をエポキシ樹脂で接着して9×9mmの正方形孔をもつ中空のD19筋を製作したものである。

本実験全体の測定項目は、ほかに柱梁節点部コンクリート表面の3方向ひずみ、同節点部補強鉄筋(スターラップ、帯鉄筋)のひずみ等多岐にわたるが、本論文では上述の柱部測定区間における主鉄筋ひずみ、ひびわれ性状および付着特性に絞って考察を行う。

実験結果の一例として、最終破壊時のひびわれ分布および $P=4.8$ tf(設計荷重)と $P=12$ tfにおいて柱部測定区間の17点のひずみゲージより得られた主鉄筋ひずみ分布を図-11に示す。破壊荷重は $P=13.2$ tfで梁部の曲げ破壊と観察されたが、破壊時には柱部の主鉄筋も概ね降伏ひずみ

(約 1700μ)に達している。柱部の48cmの測定区間に約15cm間隔で4本の曲げひびわれが生じており、後の解析結果と比較検討するのに十分なデータが得られた。柱部材は軸圧縮力と等曲げモーメントを受けるので、主鉄筋のひずみは設計計算上は一定であるが、実際にはひびわれ開口部でひずみ突出する分布を示

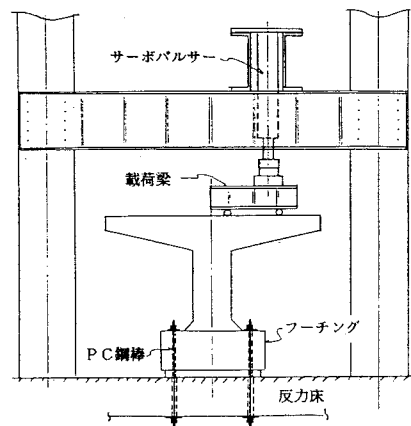


図-9 加力装置

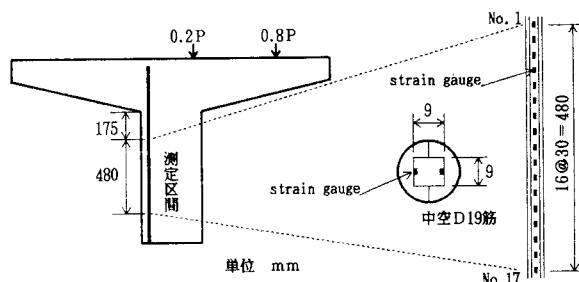


図-10 柱部測定区間の鉄筋溝切り加工

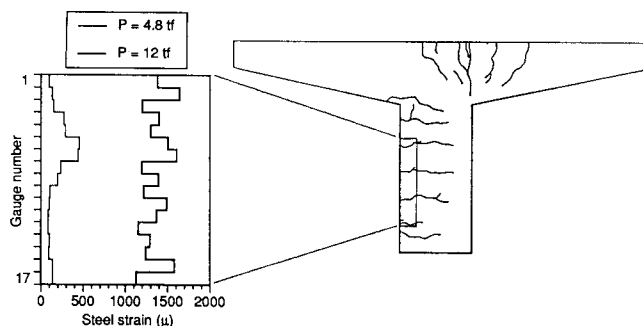


図-11 主鉄筋ひずみ分布(実測値)とひびわれ分布(破壊時)

し、コンクリートが引張力に抵抗しているひびわれ間の鉄筋ひずみとの間に大きな差が生じている。ひびわれ本数が増加する破壊時近傍においても、主鉄筋ひずみ分布の凹凸はかなり大きいことが分かる。

4.2 二次元非線形 FEM 解析

図-12に供試体の有限要素メッシュを示す。コンクリートには定ひずみ三角形平面応力要素、鉄筋には一次元棒要素を用いた。付着リンク要素は、柱部および梁部の主鉄筋の全節点位置に挿入した。分布ひびわれモデルにより離散的なひびわれパターンを得るためと、ひびわれ近傍の付着応力、付着すべりおよび鉄筋応力分布を精度良くシミュレートするために、要素メッシュをかなり細かくした。

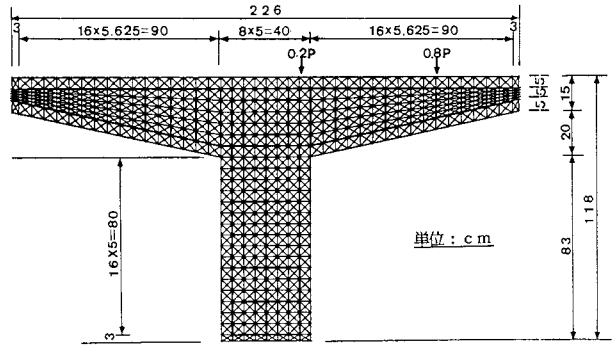


図-12 T形橋脚の有限要素メッシュ

コンクリート（粗骨材の最大寸法20mm）の材料定数は表-1の実測値を用い、破壊エネルギーを $G_f=0.1$ kgf/cm、せん断剛性低減係数を $\beta=0.1$ と仮定した。供試体に用いた鉄筋はすべてSD 295Aで、ヤング係数は $E_s=2.1 \times 10^6$ kgf/cm²、降伏点強度は実測に基づく $\sigma_y=3,600$ kgf/cm²を用い、ひずみ硬化係数 $0.01E_s$ のバイリニア応力-ひずみ関係を仮定した。

付着リンク要素に関しては、ひびわれ近傍のコーン状損傷領域(図-6参照)を定義する特性長を $\ell=5d_b$ に設定し、また付着応力-すべり関係の外縁および内縁包絡線は既往の研究⁹⁾を参考にして図-7のように与えた。

表-1 コンクリートの材料定数

圧縮強度	239	(kgf/cm ²)
引張強度	21.4	(kgf/cm ²)
ヤング係数	2.2×10^5	(kgf/cm ²)
ポアソン比	0.18	

4.3 解析・実験結果の比較および考察

鉄筋とコンクリート間の付着の取り扱いが全く異なる2つのFEM解析を行った。ここでは、すべりのない完全付着を仮定した解析をPB(Perfect Bond)、リンク損傷度 ω^* に応じて付着特性が変化するリンク要素を用いてすべりを考慮した解析をVB(Variable Bond)と略称する。本橋脚供試体のマクロな力学特性(荷重-変位曲線、最終破壊荷重など)については既にPBによる詳細な解析結果が実験値と比較され、鉄筋コンクリート構造物の種類と解析目的によっては単純なPBの実用性が認められている⁶⁾。ここでは、本研究の主目的であるひびわれ性状、ひびわれ近傍の鉄筋の応力分布などに限ってPB、VB両者の解析結果と実験結果を比較、考察する。

(1) ひびわれパターン

図-13は、4つの荷重段階 $P=4.8, 7.2, 9.6$ および 13.44 tfにおけるひびわれパターンの解析結果をPBとVBについて比較したものである。本構造の最終破壊荷重の解析値は 14.4 tfであり、 $P=13.44$ tfは破壊近傍の荷重となる。図中には、式(2)で求められる破壊ひずみ ϵ^f の大きさと方向が各積分点でベクトル表示されている。本論の分布ひびわれモデルによれば、 ϵ^f の大きさはひびわれ幅に比例するので、同図よりひびわれ幅の大きさとひびわれ面の方向を含むひびわれパターンの概略を把握できる。

PBとVBによるひびわれパターンを詳細に比較観察すると、特に鉄筋近くのひびわれパターンに関して、両解析結果に明瞭な違いが認められる。完全付着を仮定するPBでは、梁部、柱部とも破壊ひずみ ϵ^f が主鉄筋沿いに切れ目なく分布してプロットされている。これに対し、付着すべりを許すVBでは、荷重の増加につれて ϵ^f が離散的(局所的)に伸展しており、実験における図-11のひびわれパターンに類似するとともに、実際のひびわれ間隔とも良く対応している。

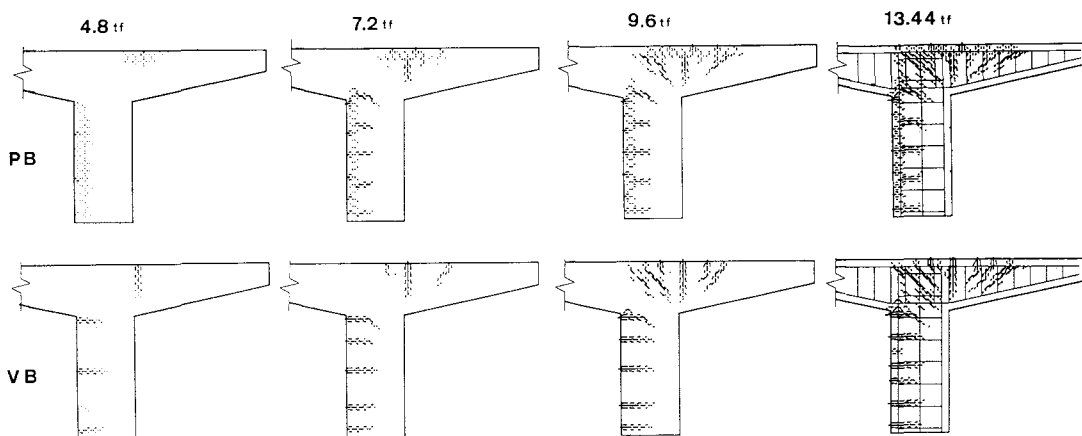


図-13 PBおよびVBモデルによるひびわれパターンの解析結果比較

PBによるひびわれパターンの細部には、ほかにも現実的でない挙動が見出される。PB、VBの何れの解析においても最初の曲げひびわれが引張側コンクリートかぶりの外縁にまず発生することは変わらないが、それが主鉄筋位置に到達した後、PBにおける主ひびわれの中には隣接する要素（ひびわれ帯）にシフトして伸展するものがある。これは、完全付着の仮定により鉄筋がコンクリートを不自然に拘束するためと考えられ、主ひびわれ近傍の付着剛性が低下するVBにおいては全く見られないことである。

(2) ひびわれ幅

本実験では、柱部の測定区間に生じた4本の曲げひびわれについて、クラックルーペ（顕微鏡）を用いて各載荷ステップ毎に表面ひびわれ幅を測定した。図-14のように、柱部の幅40 cm、高さ48 cmの測定領域に予め縦の測線をマークし、ひびわれの全長にわたる幅の分布を記録したものである。

他方、柱部の曲げひびわれは概ね水平に伸展するので、FEM解析によるひびわれ幅 w_c が式(2)の ϵ^f を用いて近似的に次式にて求められる。

$$w_c = \epsilon^f h \quad (8)$$

ここに、 h はひびわれ帯の幅、言い換えれば鉛直方向の要素幅である。

図-15は、荷重 $P=4.8$ tfと12 tfにおける、最も大きいひびわれの全長にわたる幅 w_c の分布および測定区間に生じたひびわれの w_c の平均値を、それぞれプロットしたものである。図中には、PBとVBについてそれぞれ式(8)より求めた解析値が実測値とともに与えられている。

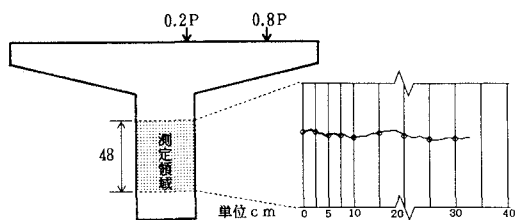


図-14 ひびわれ幅の測定位置

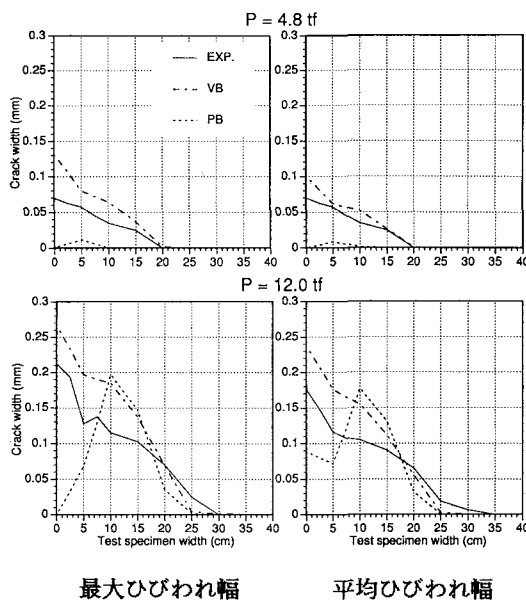


図-15 最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の分布

前項(1)でも述べたようにPBによる解析では、曲げひびわれがコンクリートかぶり外縁から主鉄筋を越えて部材内部にスムーズに伸展しないことがある。この結果、コンクリート表面のひびわれ幅が主筋位置や部材内部のそれに比べて極端に小さいという不自然な分布が得られている。ただし、完全付着を仮定する解析であっても、内部ひびわれの影響を考慮して鉄筋回りのコンクリートの剛性を減ずることによりひびわれパターンのを改善できると思われ、ここに用いたPBは最も極端な解析モデルである。本論の二次元モデルによるひびわれの解析結果を供試体表面の実測ひびわれと比較することには難点があるが、VBによるひびわれ幅は全長にわたって実測結果に概ね良く対応した分布を示している。

(3) 主鉄筋のひずみおよび付着応力分布

図-12に示すように、柱部主鉄筋は23個の棒要素でモデル化され、VBによる解析では全23節点に付着リンク要素が用いられている。図-16は、23個の棒要素の鉄筋ひずみ(PB, VB)とリンク要素の付着応力(VBのみ)の分布を、荷重 $P=4.8\text{ tf}$ と 13.44 tf の場合についてそれぞれプロットしたものである。参考のため、PBおよびVBによるひびわれパターンの解析結果も併せて示した。

柱部材は軸圧縮力と等曲げモーメントを受けるので、ひびわれが生じなければ鉄筋ひずみが一様に分布し、付着応力は存在しない。しかし、曲げひびわれ発生後はひびわれ位置において突出する鉄筋ひずみ分布を示し、ひびわれを挟んで逆符号の付着応力が作用している。荷重が増加してひびわれ本数が増えると鉄筋ひずみは次第に平均化されてゆくが、付着すべりを考慮するVBによればひびわれが離散的に伸展するので、最終破壊荷重に近い $P=13.44\text{ tf}$ においてもなおひびわれ開口部の鉄筋ひずみが突出する分布を示している

(図-11参照)。これに対し、完全付着のPBによるひびわれは主筋全長に分散するので鉄筋ひずみが平均化され、実験結果に対応していない。なお、橋脚供試体の柱部主鉄筋は下端のフーチング内と上端の柱梁節点部内に定着されているが、 $P=13.44\text{ tf}$ ではこれら定着部の付着応力が特に大きくなっている。

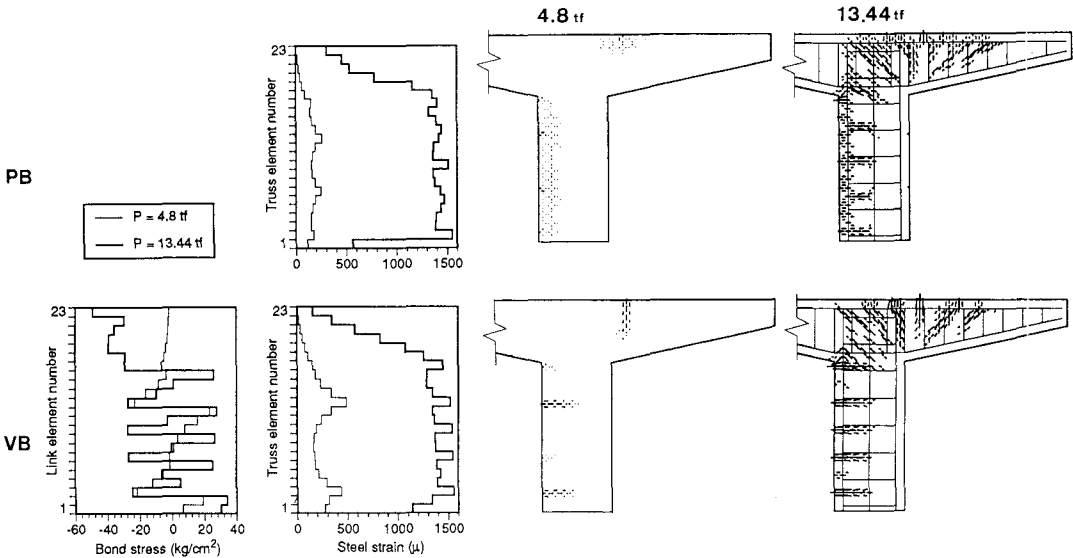


図-16 柱部の主鉄筋ひずみおよび付着応力の分布

5. 結 語

コンクリート構造の劣化防止と耐久性向上のためひびわれ制御技術への関心が高まっていることに鑑み、実構造物のひびわれ性状を有限要素法(FEM)で精度良くシミュレートすることを主目的として、付着す

べりの新しい解析モデルを提案した。すなわち、鉄筋に交叉するひびわれの成長につれてひびわれ近傍のコンクリートと鉄筋間の付着特性が連続的に変化する事実に基づき、付着リンク損傷度 ω^* を導入して付着劣化特性をリンク要素の剛性に自動的に組み入れるスキームを開発した。

本モデルによる解析結果を模型構造実験および完全付着の解析結果と比較検討し、

- 1) ここに提案した解析手法 (VB) によれば、分布ひびわれモデルを用いているにもかかわらず離散的なひびわれパターンが形成され、ひびわれ間隔、ひびわれ幅、鉄筋ひずみ分布なども実験結果に良く対応すること、
 - 2) 等曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の主鉄筋応力は、破壊時近傍においても一様に分布せず、ひびわれ開口部とひびわれ間で大きな応力差が存在すること、
 - 3) 解析目的を構造物のマクロな力学特性 (荷重-変位関係、最終破壊荷重など) に限れば、単純な完全付着モデル (PB) の有用性を認めうるが、PB によればひびわれの開口を鉄筋が不自然に拘束し、離散的なひびわれが形成されにくいこと、
- などが確認された。

分布ひびわれモデルは、例えば耐震壁のように多数のひびわれが比較的一様に生じる鉄筋コンクリート構造の解析に用いるのが適当とされ、離散的な主ひびわれの伸展や開口のシミュレーションには離散ひびわれモデルを用いるべきとする見方が一般にある。他方、離散ひびわれモデルには、ひびわれの発生位置と伸展経路の予測を必要とする客観性の欠如、ひびわれの伸展にともない要素の再分割を行う繁雑さなどの難点が指摘される。本論文に提示したひびわれ解析のスキームは、分布ひびわれモデルを用いた FEM プログラムに容易に組み込むことができ、分布ひびわれモデルの適用範囲を主鉄筋に交叉する離散的なひびわれパターンのシミュレーションにまで拡大するものである。ただし本研究において、ひびわれ近傍で付着特性が劣化するコーン状損傷領域はまだ比較的少ない実験データに基づいて設定されており、主鉄筋が多段配筋される場合の損傷領域の取り扱いを含めて、付着すべりモデルの精密化のための今後の研究課題といえる。

〔謝 辞〕本研究の模型実験には松下博通教授 (九州共立大学工学部) の御指導を得たことを記して、深甚なる謝意を表する。同じく実験に御協力頂いた佐竹正行氏 (鋼構造技術センター) および数値計算の一部を担当された海老原俊弘氏 (九州大学大学院) と村田 一氏 (鋼三菱重工業) にも厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Ngo, D., and Scordelis, A.C.: Finite element analysis of reinforced concrete beams, J. Am. Concrete Inst., 64(3), pp.152~163, 1967.
- 2) Chen, W.F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw Hill Co., New York, 1982.
- 3) ACI Committee 446 on Fracture Mechanics (Z.P. Bazant, chairman): Fracture mechanics of concrete: concepts, models and determination of material properties, ACI Special Publication, Am. Concrete Inst., Detroit, 1991.
- 4) 林 静雄・吉田弘行・黒正清治: ひびわれ近傍における異形鉄筋とコンクリートの付着性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第384号, pp.86~97, 1985年2月.
- 5) Bolander, J.E., and Wight, J.K.: Towards realistic FE models for reinforced concrete shear wall buildings subjected to lateral loadings, The University of Michigan Department of Civil Engineering Report No.89-2, January 1989.
- 6) 彦坂 熙・Bolander, J.E.・佐竹正行・松下博通: 鉄筋コンクリート張出式橋脚の偏載荷重による破壊挙動の二次元 FEM 解析, 土木構造・材料論文集 第8号, pp.93~103, 1992年11月

- 7) Bazant, Z.P., and Oh, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete, Materials and Structures, RILEM, 16, pp.155~177, 1983.
- 8) Goto, Y.: Cracks formed in concrete around deformed tension bars, J. Am. Concrete Inst., 68 (4), pp.244~251, 1971.
- 9) Eligehausen, R., Popov, E., and Bertero, V.: Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of Calif., Berkeley, 1983.
- 10) 後藤幸正・大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集 第294号, pp.85~100, 1980年2月.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編, 1991年7月.
- 12) 彦坂 熙・佐竹正行・松下博通・Bolander J.E.: 偏載荷重を受ける張出式コンクリート橋脚の節点部補強法に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 38A, pp.1245~1254, 1992年3月.
- 13) 韓 相昊・Bolander J.E.・彦坂 熙・松下博通: 偏載荷重を受けるT形および逆L形コンクリート橋脚の終局強度特性, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集Ⅰ, 1993年9月.
- 14) 三島徹也・Bujadham B.・前川宏一・岡村 甫: 鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発, 土木学会論文集 V-16, No.442, pp.171~179, 1992年2月.

(1993年9月16日受付)