

正負繰返し面内応力下におけるRC板要素の解析モデル

ANALYTICAL MODEL FOR A REINFORCED CONCRETE PANEL ELEMENT SUBJECTED TO REVERSED CYCLIC IN-PLANE STRESSES

出雲淳一*・申鉉穆**・前川宏一***・岡村甫****

By Junichi IZUMO, Hyunmock SHIN, Kouichi MAEKAWA and Hajime OKAMURA

The aim of this study is to develop a constitutive law for a reinforced concrete panel element subjected to reversed cyclic in-plane stresses. The authors formulated the constitutive law for a reinforced concrete panel element by using the constitutive laws for cracked concrete and for reinforcement. These constitutive laws have been developed and verified with the reversed uniaxial testing of reinforced concrete elements. The proposed constitutive law for a reinforced concrete panel element have been verified with the experiments conducted by Ohmori et al. and Stevens et al.. The response of the reinforced concrete panel element subjected to reversed cyclic in-plane stresses can be predicted by the proposed analytical model.

Keywords : panel, constitutive law, cyclic loading, cracked concrete

1. はじめに

有限要素法(FEM)は、複雑な荷重条件および境界条件に対しても統一的に解析が行えるために、鉄筋コンクリート(RC)構造物の挙動を追跡するための有効な解析手段と考えられる。

FEMを用いてRC構造物の挙動を精度良く追跡するためには、構造物を構成するRC要素の応力に対する応答を的確に予測する解析モデルが必要となる(RC要素に作用する応力とひずみの関係を以後、RC要素の構成則とよぶ)。青柳・山田¹⁾およびCollins・Vecchio²⁾は、FEMに適用することを念頭において、一様な面内応力が作用するRC板の挙動に関する実験的研究を行っている。その後、多くの研究者によって、面内応力を受けるRC板要素の構成則に関する実験的研究、あるいは解析的研究が行われるようになってきた。著者らも単調載荷時に適用できるRC板要素の構成則について研究

を行ってきており、著者らが提案する解析モデルによって、青柳・山田¹⁾およびCollins・Vecchio²⁾が行った実験供試体の挙動を精度良く追跡できることを報告している³⁾。

しかし、RC構造物の耐震性能を評価するうえで、繰返し荷重を受けて、ひびわれ発生から終局に至るまでのRC構造物の挙動を予測できることが必要となる。繰返し荷重下のRC板要素の構成則に関する研究としては、Stevens⁴⁾らの研究あるいは井上⁵⁾らの研究が挙げられるが、Stevensらおよび井上らは、RC板の繰返し載荷実験を行い、実験結果に基づいて解析モデルを提案しているので、他の実験結果を用いて解析モデルの検証を行う必要があると考えられる。

本研究もまた、RCの構造解析にFEMを適用することを念頭において、正負繰返しの面内応力を受けるRC板要素の構成則を開発することを目的としている。本論文は、1軸応力下におけるひびわれたコンクリートの構成則(引張変形挙動に関する構成則^{6),7)}、圧縮変形挙動に関する構成則⁸⁾、およびせん断変形挙動に関する構成則⁹⁾)、およびRC中における鉄筋の構成則^{3),7)}を二次元平面応力場に拡張することにより、正負繰返し載荷を受けるRC板要素の構成則を提案するものである。さらに、既往のRC板要素の実験結果と比較を行うことに

* 正会員 工博 関東学院大学専任講師 工学部土木工学科 (〒236 横浜市金沢区六浦 4834)

** 学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113 文京区本郷 7-3-1)

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (同上)

より、開発したRC板要素の構成則の評価を行うものである。

2. RC 板要素の構成則

(1) RC板要素の構成則の構築に用いる仮定、および適用範囲

今回構成則の開発の対象としている RC 板は、ひびわれが分散して多数発生し、鉄筋も平均的に配置された平面部材である。このような RC 板の力学的性状は、1つ1つのひびわれの影響よりも、むしろひびわれを含んだ RC 板要素の平均的な挙動が重要となるので、RC 板要素の構成則には、分散ひびわれモデル（Smeared Crack モデル）を採用することにした。したがって、以後、応力およびひずみは、それぞれ要素内の平均応力および平均ひずみを意味することにする。

RC 板要素の応力は、Fig. 1 に示すように、ひびわれたコンクリート板要素の応力と、鉄筋応力との重ね合わせで表現することができる。ひびわれ後の RC 板におけるコンクリートの構成則は、常にひびわれ面と直交する方向の軸 (x 軸) とひびわれ面と平行方向の軸 (y 軸) とで構成される直交座標系に関して与えることにした。これは、RC 板要素においてコンクリートが受け持つ応力をひびわれ面と直交する方向の応力 σ_x 、ひびわれ面と平行方向の応力 σ_y 、およびひびわれ面に沿って作用するせん断応力 τ_{xy} とに分け、各方向の挙動をそれぞれ 1 軸応力下の実験から得られた解析モデルで表わすためである。また、正負繰返し荷重下においては、RC 板には主なひびわれが 2 方向に発生するが、ひびわれたコンクリートの応力は、常に最初に発生したひびわれ面に関する $x-y$ 座標系で与えることにした。RC 板において

一方, RC 板において鉄筋は直交 2 方向配置とし, 鉄筋応力は鉄筋軸を主軸とする $x'-y'$ 座標系で与えることにした (Fig. 1 参照). 鉄筋の構成則に対しても, コンクリートの構成式と同様に, 1 軸応力下における RC 棒部材の繰返し載荷実験から得られた解析モデルを用いることにし, 鉄筋のせん断抵抗はコンクリートのそれに比べて小さいものとして無視することにした. 以上の仮定より, RC 板における鉄筋の構成則は式 (2) で表現される.

$$\{\sigma_s\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{sx} & 0 & 0 \\ 0 & E_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、応力およびひずみの表記方法は Fig. 1 に従うものとする。また、 E_{sx} および E_{sy} は、それぞれ x' 軸および y' 軸方向の鉄筋の平均的な剛性を意味する。

RC板要素内のコンクリートおよび鉄筋の応力は、座標変換マトリックスを用いて、任意の方向に関する応力を変換できるので、コンクリート応力および鉄筋応力を基準座標系に関する応力に変換して足し合わせることにより、RC板要素の応力 $\{\sigma_{rc}\}$ として式(3)を得る。

ここに、 $[T(\theta)]$ は座標変換マトリックスであり、 θ_1 および θ_2 は、それぞれ X 軸と x 軸および X 軸と x' 軸とのなす角度である (Fig. 1 参照)。

また、ひずみも応力と同様に任意の方向に関するひずみに変換できるので、式(4)が成り立つ。

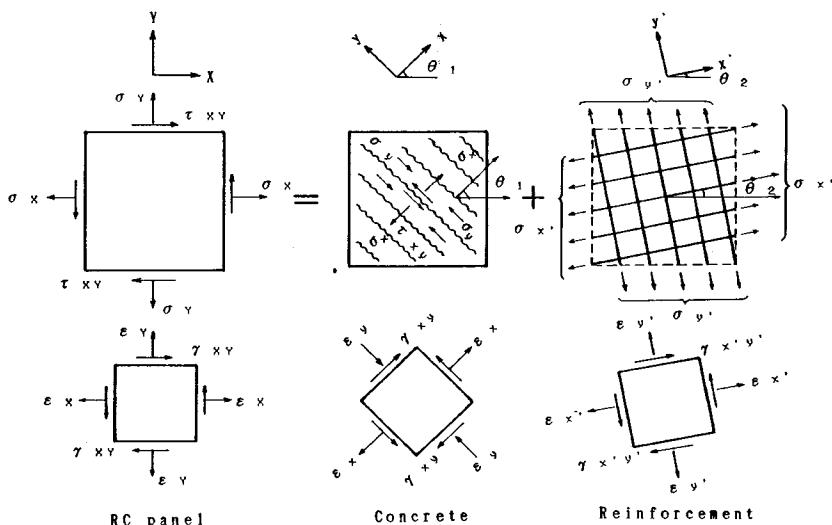


Fig. 1 Stresses and strains in a RC panel.

$$\{\varepsilon_{RC}\} = [T(-\theta_1)] \{\varepsilon_c\} = [T(-\theta_2)] \{\varepsilon_s\} \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに, $\{\epsilon_{RCl}\}$, $\{\epsilon_C\}$, $\{\epsilon_S\}$ はそれぞれ基準座標系, $x-y$ 座標系, $x'-y'$ 座標系に関するひずみベクトルである。

局所座標系に関するひずみで表わされたコンクリート応力 $\{\sigma_c\}$ および鉄筋応力 $\{\sigma_s\}$ は、式(4)を用いて基準座標系に関するひずみで書き換えることができる、結局、式(3)がRC板要素の構成則を表わしている。

(2) コンクリートの引張変形挙動に関する構成則

ひびわれ後も鉄筋との付着作用によってコンクリートが負担する引張力（Tension Stiffening）の繰返し載荷時の挙動を、岡村・前川モデル⁶⁾（包絡線部分）と島モデル⁷⁾（除荷・再載荷部分）とを用いて表わすことになった（Fig. 2 参照）。岡村・前川モデルの数値的表現は式（5）となる。

ここに、 f_t は 2 軸応力下のコンクリートの引張強度³⁾ (kgf/cm^2)、 ϵ_{tu} はひびわれ発生時のひずみ³⁾、 ϵ_x はひびわれ面と直交する方向の引張ひずみ、および c は鉄筋の形状等の付着性状の異なる影響を表わすパラメー

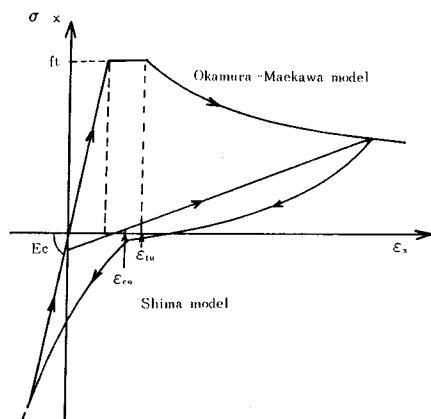


Fig. 2 Tension stiffening model for cyclic loading

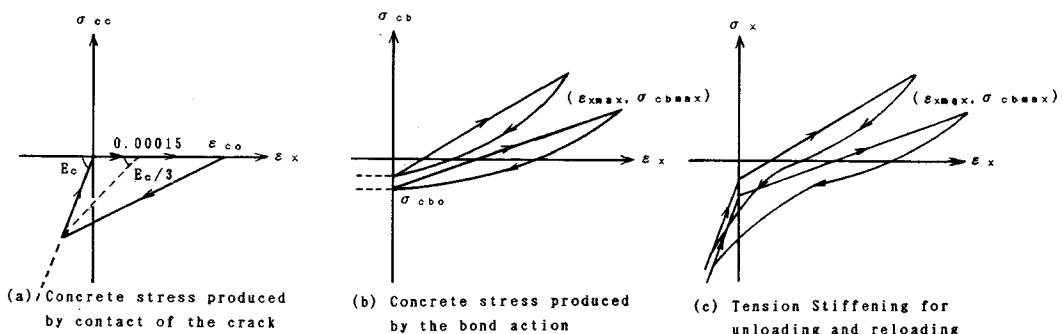


Fig. 3 Tension stiffening model for unloading and reloading.

後引張力が除荷されるとただちに式(6)に従うものとした。したがって、式(5)と式(6)とが除荷開始点において連続となるように応力 σ_{cbmax} は、式(10)で与えることにした。

$$\sigma_{cb\max} = f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_{c\max}} \right)^c \dots \dots \dots \quad (10)$$

また、除荷を受けたコンクリートがさらに再載荷される場合には、繰返し載荷による Tension Stiffening の劣化の影響は小さいものと考えて、包絡線上の除荷開始点に戻るものとした。

ひびわれ面の接触開始時のひずみ ε_{c0} の値は、島ら⁷の行った実験では、交番載荷時においてほぼ 0.015 % 程度であったことが報告されている。2 軸応力下では、ひびわれ界面における残留せん断ひずみの存在がひびわれ面の接触を早めることが予想される。しかし、ひびわれ界面における残留せん断ひずみを考慮して ε_{c0} を定量的に評価することは難しい。また、除荷時の計算において除荷曲線が一意的に決定されている方が計算が簡便であるので、残留せん断ひずみの影響を間接的に過去に経験した最大せん断ひずみで表わすことにし、 ε_{c0} として式 (11) を仮定することにした。

ここに、 γ_{xymax} は、コンクリートが過去に経験した $x-y$ 座標系に関する最大せん断ひずみである。

ε_{co} として式 (11) を用いるために、除荷時のひびわれ接触開始からひびわれ接触が完了するまでの応力 σ_{co} は、剛性が $E_c/3$ でひずみが 0.015 % の点を通る直線と剛性が E_c である直線との交点と ε_{co} とを結ぶ直線に従うものとした (Fig. 3(a) 参照).

応力 σ_{cb} は、除荷時には除荷開始点 ($\varepsilon_{x\max}, \sigma_{cb\max}$) と頂点 $(0, \sigma_{cb0})$ を通る 2 次曲線で表わされ、再載荷時には除荷開始点に向かう直線で表わされる島モデルをそのまま用いることにした (Fig. 3(b) 参照)。

(3) コンクリートの圧縮変形挙動に関する構成則

コンクリートにひびわれが存在する場合、ひびわれ面と平行方向のコンクリートの圧縮剛性は、ひびわれ近傍における応力緩和によって、ひびわれのないコンクリートの圧縮剛性よりも低下する^{2), 10)}。前川は、破壊パラメーター、および圧縮塑性ひずみを導入することにより、圧縮応力を受けるコンクリートの構成則を、包絡線、除荷および再載荷を含む任意の経路に対して定式化することに成功している（以下、前川モデル⁸⁾とよぶ）。ひびわれたコンクリートに対しても、前川モデルで表現される破壊パラメーターのみをひびわれ面と直交する方向の引張ひずみで低減することにより、任意の載荷経路におけるコンクリートの圧縮変形挙動を表現することにした。

繰返し載荷を受けるひびわれたコンクリートの圧縮変形

を表わす構成式は、式(12)で表わすことができる。

ここに, K はひびわれが存在する場合の破壊パラメーター, および ϵ'_{yp} は圧縮塑性ひずみで, 過去に受けた最大圧縮ひずみの関数で表わされる⁸⁾. 破壊パラメーター K は, ひびわれのない場合の破壊パラメーター K_0 を用いて, 式 (13) で表わすことができる.

$$\begin{cases} \omega = 1.0 & (\varepsilon_{x\max} \leq \varepsilon_1) \\ \omega = 1.0 - 0.4 \frac{\varepsilon_{x\max} - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & (\varepsilon_1 < \varepsilon_{x\max} \leq \varepsilon_2) \\ \omega = 0.6 & (\varepsilon_{x\max} > \varepsilon_2) \end{cases}$$

ここに、ひびわれによるコンクリートの剛性低下を表わす ω は、一度低下すると除荷・再載荷時においても回復することはないものとし、ひびわれ面と直交する方向の最大引張ひずみを用いて表わすことにし、 ϵ_1 および ϵ_2 にはそれぞれ 0.12 %、および 0.44 % の値を用いた³⁾。

Fig. 4 は、前川モデルおよび RC 板要素の構成則に用いる修正した前川モデル（修正前川モデル）を図示したものである。前川モデルでは、除荷・再載荷時の破壊パラメーター、および塑性ひずみは変化しないとするので、除荷・再載荷時には、弾性的な挙動を示す。既往の実験結果^{10),11)}の観察からは、除荷曲線は幾分下に膨らむ傾向がみられる。除荷時のこの膨らみは、コンクリート内部の微視的な破壊による遅れ弾性の影響と考えられる。

除荷曲線の膨らみが欠けると RC 板要素としての除荷時の挙動にも膨らみが欠ける結果となるので、解析モデルとしては、除荷曲線を修正することにした。すなわち、除荷時の曲線として除荷開始点で接線し、完全に除荷したときの残留ひずみ点を通過する円弧を用いることにした。これは、既往の実験結果^{10),11)}の観察から、除荷時の曲線の曲率がほぼ円の曲率で表わされると判断されたためである。除荷時のコンクリートの挙動については

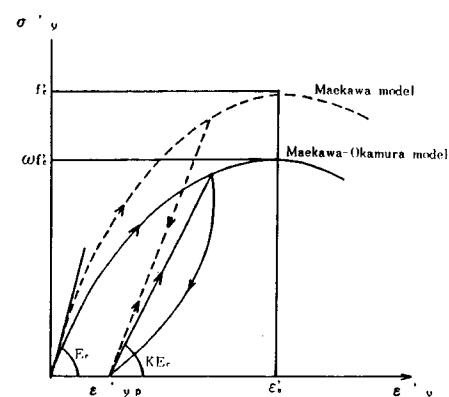


Fig. 4 Modified Meakawa model for compression.

今後さらに検討する必要があると考えられるが、解析モデルとしては除荷時に円弧曲線を採用しても差し支えないと考えられる。

(4) 正負交番載荷時のコンクリートの構成則

正負交番載荷時のRC板においては、コンクリートは引張応力と圧縮応力の履歴を受ける。正負交番載荷時のコンクリートの構成式を表わすために、前述の引張変形に関する構成式と圧縮変形に関する構成式を用いて、連続的なループを作ることにした。

Fig. 5は、正負繰返し載荷時のコンクリートの応力-ひずみ関係を示したものである。コンクリートが、圧縮の処女載荷を受けた後に引張の処女載荷を受ける場合には、コンクリートに作用する圧縮応力が完全に除荷されるまでは修正前川モデルに従い、その後は圧縮塑性ひずみ分だけ原点からシフトした位置からTension Stiffeningモデルに従うものとした。

Tension Stiffeningモデルと修正前川モデルとはそれらのモデルの交点で連続とし、引張載荷後圧縮の処女載荷の場合には、修正前川モデルの包絡線上の経路を通るものとし、すでに圧縮の履歴を受けている場合には、除荷開始点に向かう直線とした。また、コンクリートが圧縮の載荷を経て引張の載荷を受ける場合には、圧縮応力が完全に除荷されるまでは修正前川モデルに従い、その後はTension Stiffeningモデルの包絡線上の除荷開始点に向かう直線とした。

Fig. 5に示した正負繰返し載荷時のコンクリートの構成則は、コンクリートの平均ひずみで表わされる連続関数であり、ひびわれの開閉条件を意識することなしにコンクリート応力を求めることができる。

(5) ひびわれ面のせん断挙動を表現する構成則

ひびわれたコンクリートのせん断挙動を表わす構成則には、李・前川⁹⁾の研究成果を採用することにした。これは、李・前川が提案するモデル（李・前川モデル）が、正負繰返しせん断応力下におけるひびわれ界面のせん断

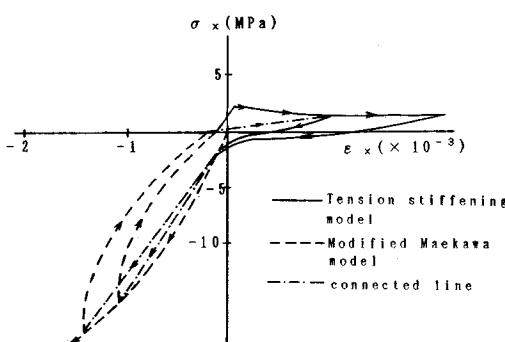


Fig. 5 Hysteretic loop of stress-strain relationship of cracked concrete.

挙動を精度良く追跡でき、しかも解析的にも簡便なモデルであるためである。李・前川モデルでは、式(14)に示すようにひびわれ面に作用するせん断応力が、接触面の方向に関する積分方程式で記述され、あらゆる載荷経路に対して、せん断伝達を予測できるものである。

$$\tau_{xy} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 10250 f_c'^{1/3} (\omega_\theta - \omega_{\theta p}) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad \dots \dots \dots \quad (14 \cdot a)$$

$$\sigma_c = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 10250 f_c'^{1/3} (\omega_\theta - \omega_{\theta p}) \sin^2 \theta d\theta \quad \dots \dots \dots \quad (14 \cdot b)$$

ここに、 f_c' はコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)、 θ は接触応力が作用する方向、 ω_θ は接触面と直交する方向の変位で式(15)で表わせられ、 $\omega_{\theta p}$ は接触面と直交する方向の塑性変位である。

$$\omega_\theta = -\delta \sin \theta + \omega \cos \theta \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

ここに、 ω はひびわれ界面におけるひびわれ幅、 δ はひびわれ界面におけるずれ変位である。

載荷経路が単調載荷の場合には、積分経路が一意的であるために、せん断応力 τ_{xy} および応力 σ_c は式(14)を数値積分することにより、ひびわれ間隔に関係なく $\delta/\omega (= \gamma_{xy}/\varepsilon_x)$ の一価関数で表わすことができる事が証明されている⁹⁾。したがって、単調載荷の場合には、李・前川モデルはひびわれ間隔にかかわらず分散ひびわれモデルに用いることが可能である。

繰返し載荷を受ける場合には、式(14)を載荷経路に応じて数値積分する必要があるために、ずれ変位 δ とひびわれ幅 ω をRC板要素内のひずみで表わすことが必要となる。RC板要素内の平均ひびわれ間隔を l とし、ひびわれ間のコンクリートの引張ひずみ、およびせん断ひずみが、それぞれ ω/l および δ/l に比べて無視できると仮定すると、ひびわれ幅およびずれ変位は、式(16)で表わすことができる。

$$\omega = l\varepsilon_x \quad | \quad \delta = l\gamma_{xy} \quad | \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

式(16)から、繰返し載荷時のRC板要素の構成則に李・前川モデルを用いる場合には、平均ひびわれ間隔 l の設定が必要となる。しかし、次章に示す実験供試体の解析において、平均ひびわれ間隔を5cmから100cmまで変化させて解析を行っても、平均ひびわれ間隔が解析に及ぼす影響はほとんど認められなかった。李・前川モデルは、ひびわれ間隔を意識することなく用いることができるので、RC板要素の構成則に利用しやすいモデルといえる。

また、ひびわれ面と直交する方向には圧縮応力 σ_c が発生し、この応力はTension Stiffeningを減少させるような働きをする。したがって、 σ_c が発生する場合には、ひびわれ面と直交する方向の応力 σ_x は、 σ_x に σ_c を加

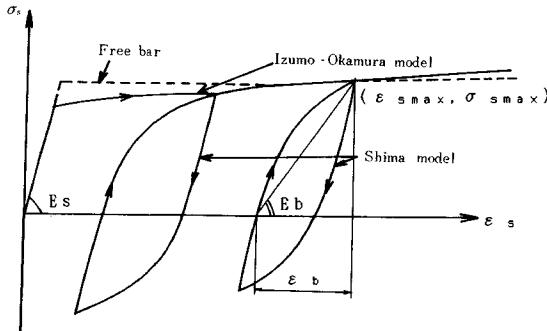


Fig. 6 Reinforcement model for cyclic loading.

えた値に修正することにした。

(6) RC 板要素に用いる鉄筋の構成則

繰返し応力下の RC 板の鉄筋の構成則は、鉄筋降伏前、および鉄筋降伏後の包絡線部分、除荷部分、再載荷部分に分けて、式 (17) で表わすことにした (Fig. 6 参照)。

$$\text{降伏前: } \sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (17 \cdot a)$$

降伏後

$$\text{包絡線: } \sigma_s = K_1 (\epsilon_s - K_2) \quad (17 \cdot b)$$

除荷・再載荷

$$\text{直線部: } \sigma_s = E_s (\epsilon_s - \epsilon_{s\max}) + \sigma_{s\max} \quad (17 \cdot c)$$

$$\text{曲線部: } \sigma_s = \frac{-a(a+1) \sigma_{s\max} \epsilon_{s\max}}{\epsilon_s - \epsilon_{s\max} (a+1)} - a \sigma_{s\max} \quad (17 \cdot d)$$

ここに、 σ_s は鉄筋応力、 ϵ_s は鉄筋ひずみ、 E_s は鉄筋のヤング率、 K_1 および K_2 は RC 中の鉄筋の応力分布を余弦関数と仮定することにより導出される係数³⁾、 $\sigma_{s\max}$ および $\epsilon_{s\max}$ はそれぞれ過去に経験した鉄筋の最大応力および最大ひずみである。また、 a はパラメーターで式 (18) で表わされる。

$$a = E_s / |E_s - (\sigma_{s\max} / \epsilon_b)| \quad (18)$$

ここに、 ϵ_b は繰返し載荷によって蓄積された塑性ひずみと $\epsilon_{s\max}$ との差を意味する。

鉄筋降伏前においては、鉄筋は弾性と考えて鉄筋の剛性に単体鉄筋の剛性をそのまま用いた。RC 中における鉄筋の降伏条件は、ひびわれ面における鉄筋応力が単体鉄筋の降伏応力に達したときとし、その後の包絡線部分の構成式には、著者らが提案するモデルを用いることにした³⁾。降伏後の除荷・再載荷時に対しては、単体鉄筋の繰返し載荷時の構成則を表わす加藤モデル¹²⁾を RC 中の鉄筋の構成則に用いることを提案している島モデル⁷⁾を採用した。

3. RC 板要素の解析および解析結果

(1) 解析方法

前述のコンクリートおよび鉄筋の構成則を式 (3) に代入することにより得られる RC 板要素の構成則は、応力とひずみに関する 3 元連立非線形方程式となる。解析は、RC 板要素の応力を既知として、この非線形連立方程式をひずみについて解き、RC 板要素の応力-ひずみ関係を求めるこによって行った。連立非線形方程式の解法には、Newton-Raphson 法を用いることにし、繰返し計算の際に用いる剛性には、接線剛性よりも大きめの値を与える定剛性を用いることにした。これは、RC 板要素を構成するおのの履歴曲線の接線剛性が変曲点において不連続になりやすく、剛性変化も大きいために生じる解の振動を避けるためである。また、剛性が負になることにより剛性マトリックスが特異なものとなって、解が発散することを防ぐために、負剛性はゼロとした。

定剛性には、包絡線部分および再載荷部分では、前ステップで収束したときの割線剛性（この剛性は接線剛性よりも常に大きい）を次ステップで用いることにし、除荷部分では除荷曲線の最大接線剛性を用いることにした。また、解の収束を早めるために、繰返しルーチンの 5 回に 1 回の割合で、定剛性を最も新しい割線剛性に置き換えて計算を行った。

(2) RC 板要素の解析条件

構築した解析モデルの検証には、Stevens ら⁴⁾および大森ら¹³⁾が行った実験結果を用いた。これらの実験供試体は、いずれも RC 板に正負繰返しの面内応力が作用する。

Table 1 は、Stevens らおよび大森らが行った供試体の実験パラメーターを示したものである。荷重は、いずれも比例載荷であった。供試体 SE 10 に純せん断応力と圧縮応力とが 3 : 1 の割合で作用し、その他の供試体には純せん断応力のみが作用している。解析に用いた実験供試体には異形鉄筋が用いられているので、Tension Stiffening モデルにおけるパラメーター c は 0.2 とした³⁾。

解析に用いるコンクリートの引張強度 f_t (kgf/cm^2) は、シリンダー強度 f'_c (kgf/cm^2) から求められる引張強度を修正した式 (19) で与えることにした。

$$f_t = 0.58 k f'_c^{2/3} \quad (19)$$

ここに、 k は修正係数である。

実験供試体のコンクリートの引張強度は、実験結果から逆に推定するとシリンダー強度から求められる引張強度の約 55~70 % であった。この原因として、乾燥収縮、寸法効果¹⁴⁾などの影響が考えられ、RC 板などの部材の

Table 1 Outline of test specimen

供試体寸法 (実験者) 辺長×辺長×板厚(cm)	供試体 呼び名	載荷応力比 $\sigma_x : \sigma_x : \tau_{xy}$	鉄筋比 P_x, P_y (%) (%)	鉄筋の偏角 θ_2 (degree)	降伏点 f_y (MPa)	ヤング率 $E_x \times 10^{-5}$ (MPa)	圧縮強度 f'_c (MPa)	最大耐力 τ_{XYmax} (MPa)
(Ohmori et al.) 250×250×14	KP6	0 : 0 : 1	2.0 2.0	0	469	2.08	29.0	8.03
(Stevens et al.) 152×152×29	SE8	0 : 0 : 1	2.94 0.98	0	x:492 y:479	1.85	37.0	5.76
	SE9	0 : 0 : 1	2.94 2.94	0	422	1.85	44.2	9.55
	SE10	-1 : -1 : 3	2.94 0.98	0	x:422 y:479	1.85	34.0	8.25

Table 2 Analytical conditions and analytical results.

供試体	k	$\tau_{peak}^{(1)}$ (MPa)	$\frac{\tau_{peak}}{\tau_{vmax}^{(2)}}$	$\tau_{vexp}^{(3)}$ (MPa)	$\tau_{vcal}^{(4)}$ (MPa)	$\frac{\tau_{vexp}}{\tau_{vcal}}$
KP6	0.70	6.20	0.8	—	—	—
SE8	0.60	5.76	1.0	5.0	5.48	0.9
SE9	0.55	9.55	1.0	—	—	—
SE10	0.55	8.25	1.0	7.8	7.94	0.92

1) 解析ループの最大せん断応力

2) 実験における最大せん断応力

3) 実験における降伏時のせん断応力

4) 解析における降伏時のせん断応力

引張強度に、シリンダー強度から求まる引張強度をそのまま用いることはできないことがわかる。引張強度は、ひびわれ発生荷重の評価、およびひびわれ後のRC板要素の挙動の追跡に影響を与えるが、この引張強度を解析的に求めることは現段階では難しい。したがって、解析では、コンクリートの引張強度は試行錯誤によって、実験結果のひびわれ発生荷重に一致するように、 k の値を定めることにした。解析に用いた k の値をTable 2に示す。

また、解析結果と実験結果との比較を容易にするために、実験結果の履歴曲線からひびわれ後のループを3ループ抜き出し、その抜き出したループと解析結果とを比較することにした。大森らの実験供試体からは、実験結果の最終ループを含む3ループとした。この場合の最大せん断応力の実験値に対する最終ループのピーク時のせん断応力の比は0.8であった。

Stevens らの実験では、最大耐力付近で数回繰返し載荷を行っている。最大耐力付近での繰返しループでは、繰返しによる劣化の影響が著しい。解析では、繰返しによる影響は考慮されないので、最大耐力付近での最初のループを含む 3 ループとした。

(3) 解析結果および考察

既往の実験結果の解析を行う前に、除荷曲線の感度解析を行うことにした。包絡線部分についての感度解析はすでに行っているので省くことにした。^{3), 6)}

Tension Stiffening モデルが RC 板の除荷曲線に及ぼす影響を調べるために、実験供試体 KP-6 の実験条件を

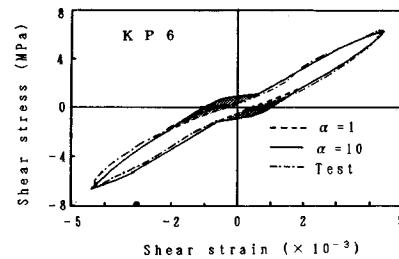


Fig. 7 The sensitiveness of concrete stress produced by contact to the analysis.

用いて、接触開始時のひずみ ε_{c0} および応力 σ_{c00} を変化させて解析を行ってみた。Fig. 7 は、接触開始時のひずみ ε_{c0} の値を変化させた場合の解析結果を示している。ただし、 ε_{c0} を変化させるために ε_{c0} として式 (20) を用い、パラメーター α を変化させることにより、解析を行った。

α に 1 と 10 の 2通りの値を用いて解析を行った。Fig. 7 は、最終ループの解析結果と実験結果とを示しており、斜線部分は α を変化させた場合の解析に影響を及ぼす部分である。 α の増加に伴い、ひびわれの接触が早まり、除荷時の途中からループ形状に膨らみが増す傾向が認められる。しかし、実験結果からは、ループ形状にはコンクリートのひびわれ面での接触による膨らみは、あまり顕著には認められないようである。

一方、 σ_{cbo} の解析への影響を調べるために、パラメータ β を導入して、 σ_{cbo} を式(21)で表わすことにした。ただし、 $\alpha=1$ とした。

Fig. 8 は、パラメーター β を 1 および 20とした場合の最終ループの解析結果と実験結果とを示したものである。解析からは、 β が増加するのに伴い、除荷時の曲線が全体的に膨らむ傾向がみられる。実験結果との比較からは、 $\beta=1$ の場合除荷時の曲線上に若干膨らみが足りないようであるが、おおむね実験結果の挙動を表わしている。

さらに、コンクリートの圧縮変形量が、RC板要素

の解析に及ぼす影響を調べるために、修正前川モデルにおける圧縮塑性ひずみ ϵ'_{yp} を変化させてその影響を調べることにした。Gunatilaka¹¹⁾は、ひびわれを含むコンクリートの繰返し載荷実験から、載荷速度が 0.14 MPa/s および 0.014 MPa/s 時の塑性ひずみの進行を式(22)および式(23)で表わしている。

$$\epsilon'_{yp} = \epsilon'_{y\max} - 0.00320(1 - \exp(-312 \epsilon'_{y\max})) \dots \dots (22)$$

$$\epsilon'_{yp} = \epsilon'_{y\max} - 0.00198(1 - \exp(-505 \epsilon'_{y\max})) \dots \dots (23)$$

ここに、 $\epsilon'_{y\max}$ は、過去に受けた最大圧縮ひずみである。
Fig. 9 は、前川モデルで与えられる塑性ひずみ、式(22)および式(23)で与えられる塑性ひずみを図示したもので、載荷速度が塑性ひずみの進行に影響を及ぼすことが理解される。また、これらの塑性ひずみを解析パラメータとして、解析を行った場合の履歴曲線を Fig. 10 に示している。ただし、パラメーター α および β は 1 とし、解析結果には最終ループのみを示した。塑性ひずみの進行が大きいほど、コンクリートの軟化が進行するためにループのピーク時近傍の剛性が低下する傾向にあり、その後の除荷曲線にも影響を及ぼすことが認められる。前川モデルで与えられる塑性ひずみは、載荷速度が 0.1 MPa/s の実験⁹⁾から導かれたものであり、載荷速度が 0.14 MPa/s の場合の塑性ひずみを用いたときとほぼ同じような解析結果を与えてくれる。しかし、載荷速度が著しく異なる場合には、その適用に注意を払う必要があると考えられる。

以上の感度解析から、今回の解析においては、 α および β はそれぞれ 1 とすることにした。また、圧縮塑性ひずみの進行速度の違いは、除荷時の曲線ばかりでなく

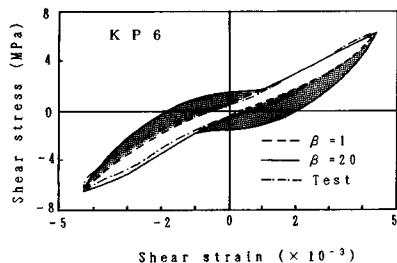


Fig. 8 The sensitiveness of concrete stress produced by bond to the analysis.

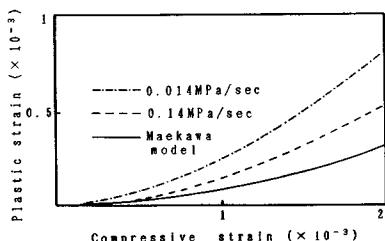


Fig. 9 Effect of loading rate on a compressive plastic strain.

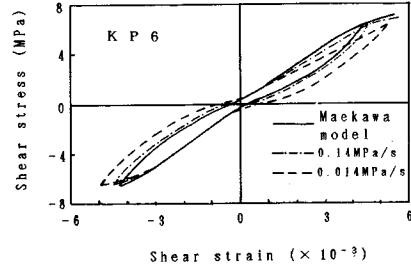


Fig. 10 The sensitiveness of a plastic strain to the analysis.

包絡線および終局耐力にも影響を及ぼすと考えられるが、実験供試体 KP 6 の解析と実験結果との観察からは、前川モデルで与えられる程度の塑性ひずみの方が良い結果を与えると判断されたので圧縮塑性ひずみは前川モデルで与えることとした。

Fig. 11 は、実験供試体 KP 6 の実験結果と解析結果から得られたせん断応力とせん断ひずみとの関係を各ループごとに示したものである。KP 6 の場合、鉄筋比が大きいために最終ループでも鉄筋は降伏しなかった。KP 6 の場合、正負繰返し純せん断応力が作用し、しかも等方配筋である。したがって、解析には、Tension Stiffening モデルと修正前川モデルが影響する。解析から求めた各段階ごとのループ形状は実験結果のそれとはほぼ一致していると判断される。

Fig. 12 は、Stevens らの実験供試体の解析結果を示したものである。SE 9 の場合には、正負繰返し純せん断応力が作用し、しかも等方配筋である。鉄筋は、KP 6 の場合と同じく降伏しなかった。したがって、SE 9 の場合には、Tension Stiffening モデルと修正前川モデルが解析に影響を及ぼす。本解析モデルでは、繰返し載荷によるダメージの影響は考慮されていないために履歴曲線は必ず除荷開始点に戻る。しかし、解析結果は、実験結果のループ形状をおおむね良く表わしていると判断される。

一方、SE 8 および SE 10 の場合、異方配筋であるために、ひびわれ面においてせん断応力が作用する。これらの供試体を解析するために、RC 板における平均ひびわれ間隔 l を 5 cm と 100 cm の極端な 2 通りの値を用いて計算を行った。解析結果はいずれの値を用いても全く同じになり、李・前川モデルが RC 板要素の解析においてもひびわれ間隔に関係なく用いることができる事が確認された。また、SE 8 および SE 10 の場合、鉄筋比が低い y' 軸方向の鉄筋が降伏する。Table 2 には、降伏時のせん断応力の解析値と実験値とを示しており、解析値と実験値との対応は良いようである。本解析結果からは、ひびわれ面にせん断応力が作用し、しかも鉄筋も降伏する場合にも、解析結果は実験結果の各段階の

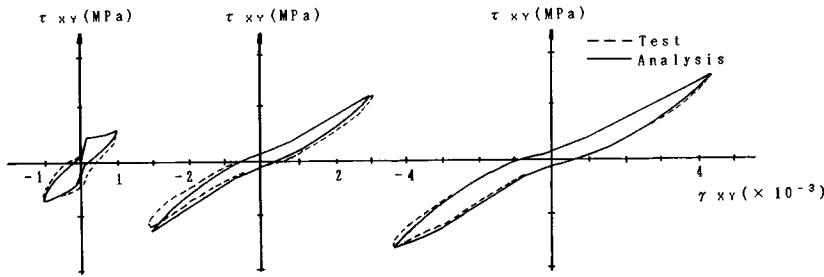


Fig.11 Test results and analysis (Ohmori et al.).

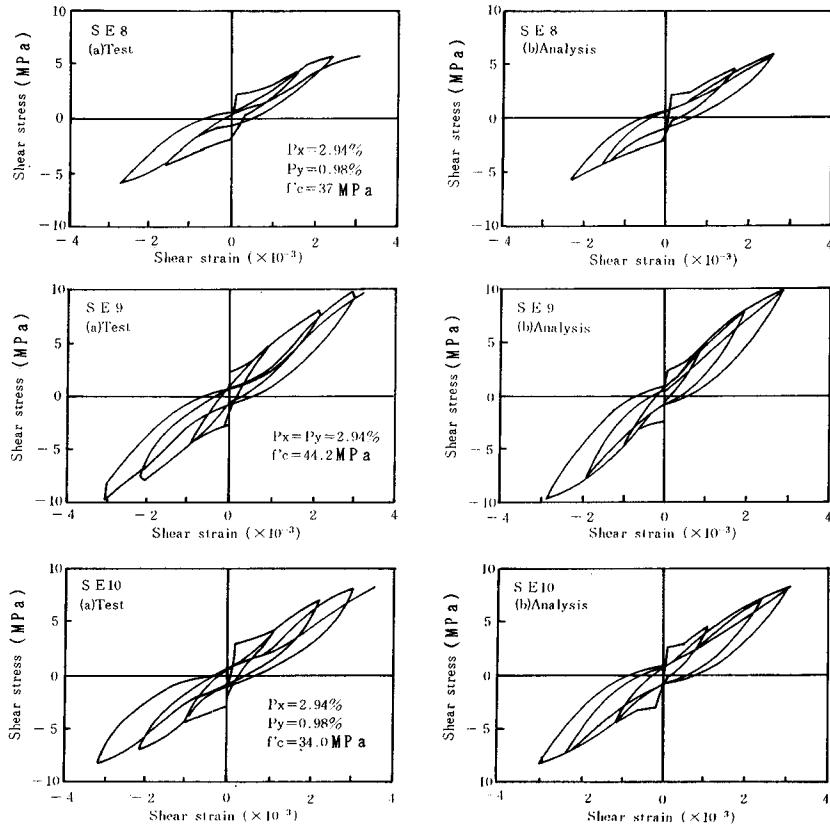


Fig.12 Test results and analyses (Stevens et al.).

ループ形状を良く表わしていると判断される。以上の解析の範囲においては、本解析モデルは繰返し載荷による面内応力を受ける RC 板要素の変形挙動を追跡できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、既往の 1 軸応力場におけるひびわれたコンクリートの構成則および鉄筋の構成則を二次元平面応力場に拡張することにより、正負繰返し載荷を受ける RC 板要素の構成則を構築し、その解析モデルの評価を行った。既往の RC 板要素の実験との検証の範囲にお

いては、RC 板要素の解析に適用することができると考えられる。しかし、正負繰返し載荷を受ける RC 板要素の実験例が現在のところ数少ないために、今後、実験資料の蓄積を行い、今回開発した解析モデルを他の実験結果を用いて検証していくことが今後の課題と考えられる。さらに、本解析モデルを FEM に取り入れ、耐震壁等の RC 部材レベルの実験との検証も行っていく必要もあると考える。

また、今回の RC 板要素の解析を通して、材料の応力履歴が、RC 板の復元力特性に大きく貢献しているようと思われるが、材料の載荷時間および繰返し載荷の影

響がRC板要素の復元力特性に及ぼす影響についても今後検討していく必要があると考えられる。

謝 辞：本研究を行うにあたり、貴重な実験データを頂いた鹿島建設技術研究所 坪田張二氏に心から感謝いたします。

なお、本研究を行うに際し、昭和62年文部省科学研究費補助金奨励研究A(No.62750441)を受けたことを付記します。

参考文献

- 1) 青柳征夫・山田一宇：面内力を受ける鉄筋コンクリートシェル要素の耐力変形特性、土木学会論文報告集、第331号、pp.167～180、1983.
- 2) Collins, M.P. and Vecchio, F. : The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, University of Toronto, March, 1982.
- 3) 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、Vol. 25, No. 9, pp. 107～120, 1987.
- 4) Stevens, N.J., Uzumeri, S.M. and Collins, M.P. : Analytical modelling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loading, University of Toronto, Dec., 1986.
- 5) Inoue, N. : Analysis of reinforced concrete members subjected to cyclic loads, IABSE Colloquium Delft, pp. 487～502, 1987.
- 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、土木学会論文報告集、第360号、pp.1～10, 1987.8.
- 7) Shima, H. and Tamai, S. : Tension stiffness model under reversed loading including post yield range, IABSE Colloquium Delft, pp. 547～556, 1987.
- 8) Maekawa, K. and Okamura, H. : The deformation behavior and constitutive equation of concrete using the elasto-plastic and fracture model, Journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo (B), Vol. XXXVII, No. 2, pp. 253～328, 1983.
- 9) 李 宝禄・前川宏一：接触密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、Vol. 26, No. 1, pp. 123～137, 1988.
- 10) 宮原長久・川上泰司・前川宏一：ひびわれを含む鉄筋コンクリート要素の1軸圧縮応力下における非線形挙動、土木学会論文報告集、第378号、pp. 249～258, 1987.
- 11) Gunatilaka, D. : Computational Model for Cracked Concrete under Compression, Master Thesis, The University of Tokyo, 1988. 3.
- 12) Kato, B. : Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action Bulletin D'information, No. 131, CEB, IABSE-CEB, Symposium, May, 1979.
- 13) Ohmori, N., Tsubota, H., Inoue, N., Watanabe, S. and Kurihara, K. : Reinforced concrete membrane elements subjected to reversed cyclic in-plane shear stresses, 9th SMIRT, 1987.
- 14) 長谷川俊昭・塩屋俊之・岡田武二：コンクリートのひびわれと寸法効果、セメントコンクリート、セメント協会, pp. 6～20, 1986. 8.

(1988.8.29・受付)