

繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル

AN ANALYTICAL MODEL FOR REINFORCED CONCRETE PANELS UNDER CYCLIC STRESSES

長沼一洋*, 大久保雅章**

Kazuhiko NAGANUMA and Masaaki OHKUBO

This paper describes an analytical model for reinforced concrete panels subjected to reversed cyclic in-plane stresses. Stress-strain relationships of concrete under stress reversals in tension, compression and shear along cracked directions are idealized and calibrated using the existing experimental results. The proposed model gives a good representation of unloading-reloading responses observed in the past experiments. Simulation analyses were carried out for three panel specimens subjected to cyclic shear or combined shear and biaxial compression. Hysteresis loops obtained from the analyses correspond reasonably well with their experimental counterparts.

Keywords: Reversed cyclic load, Nonlinear analysis, Finite element method, Constitutive law

正負繰返し荷重, 非線形解析, 有限要素法, 構成則

1. はじめに

地震力を受ける鉄筋コンクリート部材や構造物の力学的挙動を解析で予測する場合、コンクリートや鋼材の繰返し応力下の材料構成モデルの精度が解析結果を大きく左右する。耐震壁のように主に面内せん断が卓越する部材を対象として、荷重を単調増加させる解析は、壁体の一部を模擬した鉄筋コンクリート平板の面内せん断実験が数多く行われ、それらの結果が材料構成モデルに反映されたことで、解析の精度は大幅に向上した。

近年は、耐震壁を対象として、実際の地震力を模擬した正負交番の繰返し荷重を与える解析や、動的時刻歴応答解析なども有限要素法の適用範囲に含まれるようになってきた。これらの解析では実験と良好な対応が得られているものもあるが、材料構成モデルの妥当性は部材レベルの解析結果からは把握しにくい面があり、各モデルの特性が明瞭に現れるような単純な条件下での検証が不可欠である。

既往の繰返し応力下のモデルの中では、岡村・前川¹⁾が材料レベルの様々な実験を重ねてモデルを開発し、検証している。Stevens ら²⁾、栗原ら³⁾は平板実験を通してモデルの誘導と検証を行っている。この他にも、コンクリートの圧縮特性や引張特性、ひびわれ面のせん断伝達特性、鉄筋の履歴特性など、それぞれの特性に関する繰返し応力下のモデルは数多く提案されているが、部材レベルの解析に必要なものを組み合せて総合的に検証している例は少ない。

また、既往の解析例の中には、コンクリートにひび割れが発生した後のせん断剛性を、単純な一定値、あるいは、ひび割れ直交方向のひずみの関数として定義しているものが多いが、ひび割れ幅を一定とし

たひび割れ面のせん断力～ずれ変位関係は、除荷、再載荷に伴って履歴面積を生じることが分かっており、前述のような仮定では、ひび割れ面でのエネルギー吸収を正しく表現できないことは自明である。

本論文は、筆者らが既に提案したコンクリートの引張、圧縮、及び、ひび割れ方向のせん断に関する繰返し応力下の履歴特性モデル^{4), 5)}に関して、既往の様々な基礎実験の結果に基づいて改良と検証を行い、さらに既存の鉄筋の履歴特性モデルと組み合わせて、それらのモデルの有効性を鉄筋コンクリート平板の繰返し載荷実験の解析により明らかにしたものである。

2. コンクリートの圧縮応力下の履歴特性

プレーンコンクリートの繰返し載荷時の応力～ひずみ関係に関しては、文献⁶⁾で既往の実験結果とモデルが紹介されている。一軸圧縮応力下での履歴特性を調べた例として、図1にKarsan ら⁷⁾、小阪、谷川⁸⁾、Sinha ら⁹⁾の実験結果の一部を示す。いずれも同様の傾向を示しており、除荷一再載荷時の履歴特性は曲線で、除荷点のひずみが大きくなる程、除荷、再載荷時の剛性は低下している。また、図1のb)のように、高圧縮応力域で一定の応力振幅の繰返し載荷を行うと、徐々にひずみが増大していく傾向がある。

これらの特徴を考慮して、コンクリートの圧縮応力下の履歴特性を図2に示すようにモデル化する。圧縮強度到達点をP、包絡線上の除荷開始点をE、除荷から再載荷に転じる点をR、除荷後に応力零となる点をZ、除荷曲線と再載荷曲線の交点をCとする。点Eにおける応力とひずみをそれぞれ σ_E 、 ε_E とし、他の点についても同様に添字

* 梶大林組技術研究所 博士(工学)

** 梶大林組建築事業本部生産技術部 工修

Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

Construction Engineering Department, Obayashi Corporation, M. Eng.

は点を表す。 ε_Z に関しては、次式に示す Karsan ら⁷⁾の提案式がある。

$$\varepsilon_Z = \left[0.145 \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \right)^2 + 0.127 \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \right) \right] \varepsilon_P \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

上式は除荷開始点のひずみが大きい程、除荷及び再載荷剛性が低下する傾向を表現できるが、 ε_E が約 $4\varepsilon_P$ を超えると E_{EZ} が減少から増加に転じ、 ε_E がおよそ $6\varepsilon_P$ を超えると E_{EZ} が負になるなどの不合理な点がある。そこで、 ε_E が $4\varepsilon_P$ 以上の場合には、 ε_E の増大に伴って E_{EZ} が漸減し続けるように、次式を適用する。

$$\varepsilon_Z = \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} - 2.828 \right) \varepsilon_P \quad (|\varepsilon_E| \geq 4.0 |\varepsilon_P|) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

包絡線上からの除荷開始時の剛性は、実験では初期剛性を上回っている部分や、応力が低下しながら、ひずみは増大する現象が見られ、いわゆる遅れ弾性の影響が含まれていると思われる。実際には経験した最大ひずみが大きくなる程、剛性は低下するものと考えられるため、除荷開始時の剛性 E_E は E_{EZ} に比例するものとして、次式で与える。

$$E_E = \alpha_1 E_{EZ} \quad (\leq E_0 : 初期剛性) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

係数 α_1 は実験との対応性から 1.5 とする。但し、除荷剛性は初期剛性 E_0 を越えないものとする。また、点 Z での剛性が零以下にならないとの条件から、 E_E の上限を次式で規定する。

$$E_E \leq \frac{2\sigma_E}{\varepsilon_E - \varepsilon_Z} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

包絡線上の除荷開始点 E から点 C までの間は直線とし、その後は次式に示す 2 次曲線で応力零の点 Z に向かうものとする。

$$\sigma = a \varepsilon^2 + b \varepsilon + c \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、定数 a, b, c は、点 C と点 Z を通過し、点 C で剛性 E_E であるとの条件より、以下のように求められる。

$$a = \frac{E_E(\varepsilon_E - \varepsilon_Z) - \sigma_E}{(\varepsilon_E - \varepsilon_Z)^2} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$b = E_E - 2a \varepsilon_E \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$c = \sigma_E - a \varepsilon_E^2 - b \varepsilon_E \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

再載荷時の剛性は直前の除荷剛性に対して α_2 倍に増大するものとして、係数 α_2 は点 R が点 C に一致する場合に 1.0、点 R が点 Z に一致する場合に α_{2Z} とし、その間は線形補完して次式で与える。但し、再載荷剛性は初期剛性を越えないものとする。

$$\alpha_2 = \frac{(\alpha_{2Z} - 1.0)}{(\varepsilon_Z - \varepsilon_C)} (\varepsilon_R - \varepsilon_C) + 1.0 \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$\alpha_{2Z} = 2.0 \quad \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \leq 1.0 \right) \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

圧縮強度到達後のひずみ軟化域からの除荷では、点 Z における剛性がかなり小さくなり、 $\alpha_{2Z}=2.0$ では実験の再載荷時の剛性と履歴面積を過小評価する。そこで、次式により ε_E の増大に伴って α_{2Z} を大きくすることで、再載荷時の剛性と履歴面積の対応性を向上させる。

$$\alpha_{2Z} = 2.0 \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} \quad \left(\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_P} > 1.0 \right) \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

再載荷は式(5)と同様の 2 次曲線で点 R から点 C に向かうものとし、 σ_C の算定は Darwin ら¹⁰⁾の提案に従う。Darwin らは除荷曲線と再載荷曲線の交点の応力 σ_C を次式で算定することで、Karsan ら⁷⁾の実験との対応性が良いことを確認している。符号は圧縮を負とする。

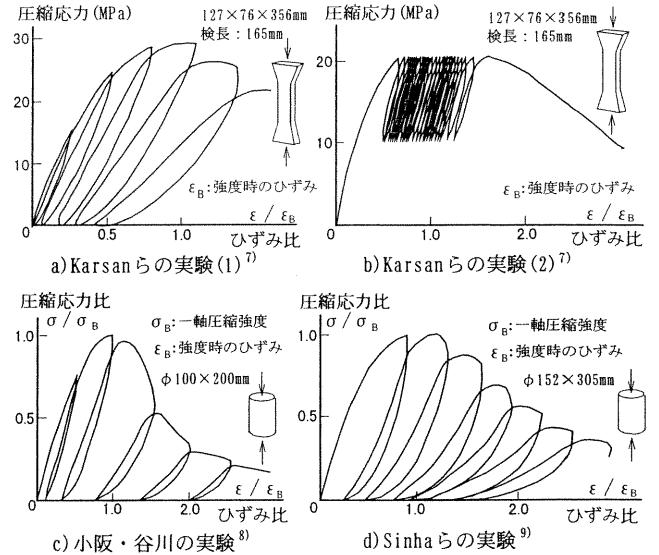


図 1 既往のコンクリートの繰返し圧縮載荷実験の結果

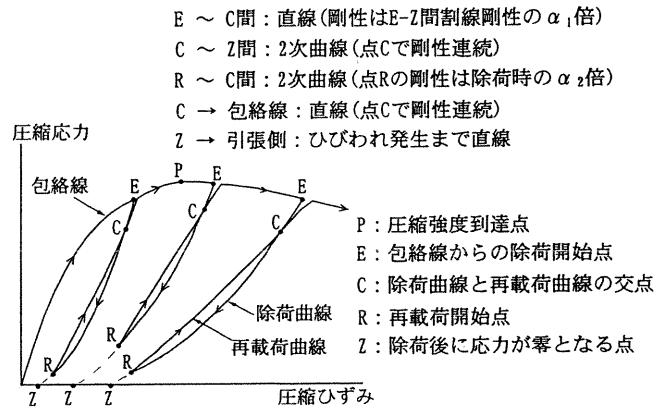


図 2 コンクリートの圧縮履歴特性のモデル化

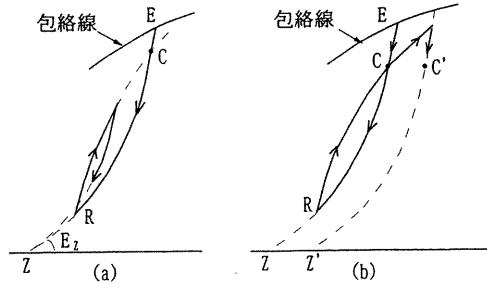


図 3 除荷-再載荷-再除荷時のルール

$$\sigma_C = \frac{5}{6} \sigma_E \quad (\varepsilon_E \geq \varepsilon_P) \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

$$\sigma_C = \min \left(\frac{2}{3} \sigma_E, \sigma_E - \frac{1}{6} \sigma_P \right) \quad (\varepsilon_E < \varepsilon_P) \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

再載荷状態から再び除荷に転じる場合は、図 3 (a)に示すように、点 Z に 2 次曲線で向かうものとし、点 Z での剛性 E_Z を、最後に包絡線から除荷した時の E_Z に一致させる。その後、再び載荷に転じた場合は、その点を新たな点 R と定義し直し、前述の方法で点 C に向かう。その後の点 Z と点 C の間の繰返しに対しては、点 Z と点 C を固定して扱う。但し、点 C と包絡線の間で除荷が生じた場合には、図 3 (b)に示すように、包絡線からの除荷曲線がその点を通るように点 C と点 Z

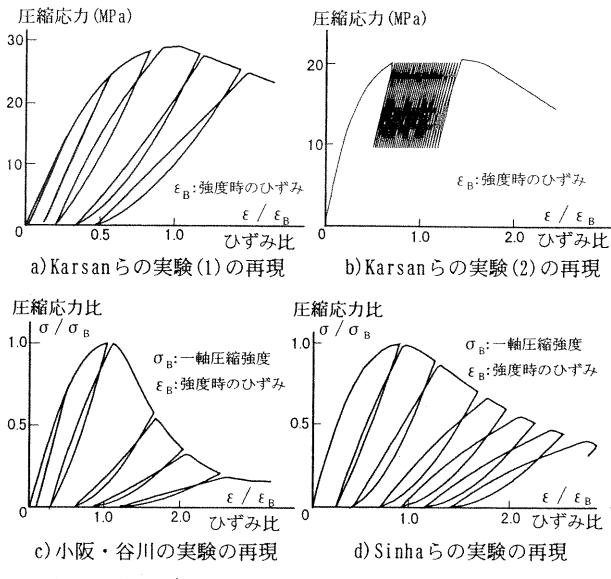


図4 本モデルによる繰返し圧縮載荷時の履歴曲線

を定義し直す。この方法によって、図1(b)に示した実験のように、ある応力振幅での除荷、再載荷の繰返しによって、ひずみが漸増する現象を定性的に再現することができる。

本モデルにより、図1に示した実験と同様のひずみ履歴を与えた場合の結果を図4に示す。除荷、再載荷時の履歴ループの比較が目的であるため、包絡線は実験結果を多点折線により近似して与えた。図1(a)と図4(a)の比較では、実験は点C付近から包絡線に向かう部分で剛性が徐々に低下する曲線を描くのに対して、モデルでは直線で、剛性がやや大きい点が異なるものの、ひずみの増大に伴って履歴曲線の描く面積も増大していく傾向が表現されている。図1(b)と図4(b)の比較では、ループの形状や1振幅毎のひずみの増大量は多少異なっているが、繰返し載荷により、ひずみが増大していく傾向が現れている。但し、応力振幅の大きさやサイクル数に応じた定量的な対応性については、今後、より多くの実験データに基づいて検討する必要がある。図1(c)と図4(c)の比較では圧縮強度時のひずみを大きく越える領域からの除荷と再載荷時の剛性に、本モデルと実験では差が見られるが、ひずみがこの領域に入るような解析は、単調載荷の場合でも要素の大きさの影響を受けるなど、未だ精度の面で不十分であり、当面、この領域は検討の対象外とする。

3. コンクリートの引張応力下の履歴特性

コンクリートの引張側の履歴特性は、ひびわれ発生までは線形弾性とする。ひびわれ後の軟化域における除荷及び再載荷曲線の実験結果の例^{11), 12)}を図5に示す。いずれも除荷点のひずみが大きくなる程、除荷、再載荷時の剛性は低下している。また、除荷点のひずみが大きい場合には、圧縮応力に移行してもひずみが引張域に留まる傾向が顕著となり、除荷一再載荷時の履歴ループの面積が大きくなっている。

これらの特徴を考慮して、コンクリートのひびわれ後の履歴特性を図6に示すようにモデル化する。包絡線上の除荷開始点をG、除荷から再載荷に転じる点をR、除荷後に応力零となる点をH、除荷曲線と再載荷曲線の交点をLとする。実験結果の特徴を考慮して、G-H間の割線剛性 E_{GH} は除荷開始点のひずみの増大に伴って減少するものとして、ひびわれ時のひずみ ε_T を用いて次式で与える。

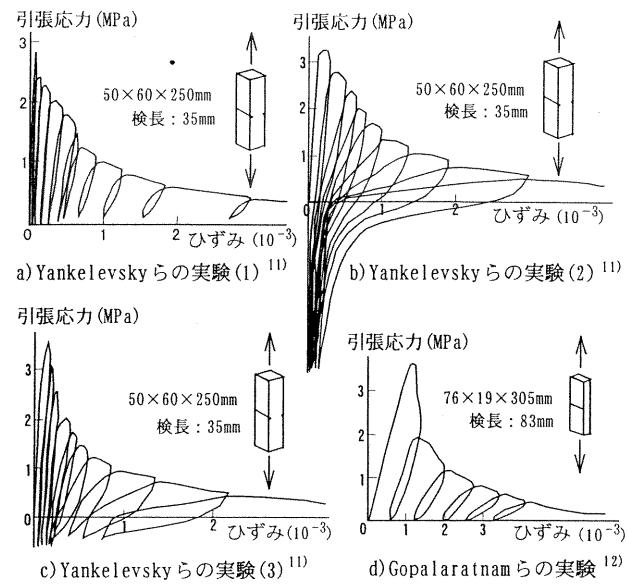


図5 既往のコンクリートの繰返し引張載荷実験の結果

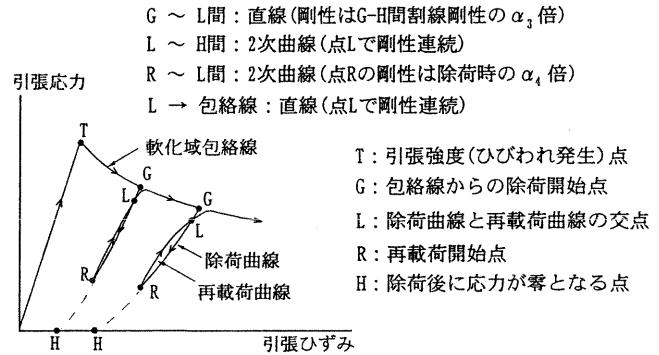


図6 コンクリートの引張履歴特性のモデル化

$$E_{GH} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_G} E_0 \quad (E_0: \text{初期剛性}) \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

圧縮側と同様に、除荷開始時の剛性 E_G はG-H間の割線剛性 E_{GH} に比例するものとして、次式で与える。

$$E_G = \alpha_3 E_{GH} \quad (\leq E_0: \text{初期剛性}) \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

係数 α_3 は実験との対応性から1.5とする。但し、除荷剛性は初期剛性を越えないものとする。点Gから点Lまでの間は直線とし、その後は応力零の点Hに式(5)と同様の2次曲線で向かうものとする。

再載荷時の剛性に関しても圧縮側と同様に、直前の除荷剛性の α_4 倍に増大するものと仮定し、係数 α_4 は点Rが点Lに一致する場合は1.0、点Rが点Hに一致する場合は α_{4H} とし、その間は線形補完して次式で与える。但し、再載荷剛性は初期剛性を越えないものとする。

$$\alpha_4 = \frac{(\alpha_{4H} - 1.0)}{(\varepsilon_H - \varepsilon_L)} (\varepsilon_R - \varepsilon_L) + 1.0 \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

$$\alpha_{4H} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

再載荷は点Rから点Lに式(5)と同様の2次曲線で向かうものとし、点Lの応力 σ_L は次式で与える。

$$\sigma_L = 0.9\sigma_G \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

点Hと点Lの間で除荷、再載荷を繰り返す場合は、圧縮の場合と同様に点Hと点Lを固定する。再載荷後に点Lと包絡線の間で再び除荷

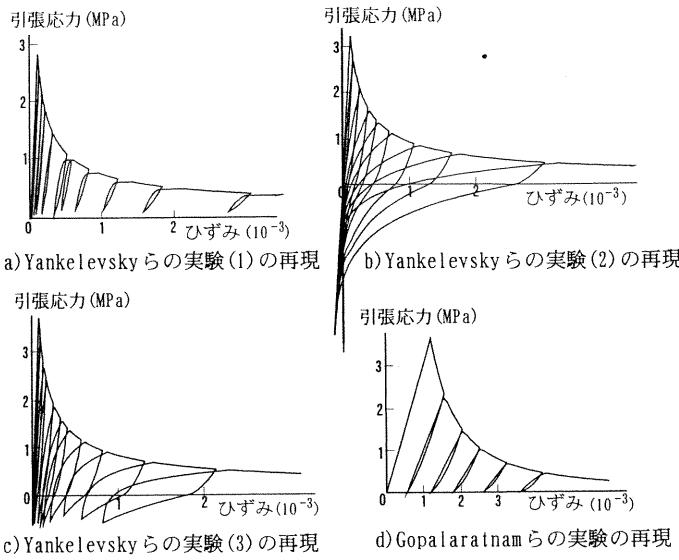


図7 本モデルによる繰返し引張載荷実験の履歴曲線

となる場合も、圧縮の場合と同様に包絡線からの除荷曲線が再除荷点を通るように点Lと点Hを定義し直す。

本モデルにより、図5に示した実験と同様のひずみ履歴を与えた場合の結果を図7に示す。包絡線は実験結果を近似して与えた。図7(a), (d)のように、包絡線と応力零の間の繰返し載荷では、本モデルの方が履歴面積がやや小さいものの、包絡線からの除荷点のひずみが増大する程、除荷及び再載荷剛性が低下し、履歴面積が大きくなる特徴を再現している。

4. コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性

コンクリートにひびわれが生じた後の引張～圧縮間の履歴特性が実験的に得られている例は極めて少ない。Stevensらは鉄筋コンクリート平板の面内せん断実験²⁾により、図8に示す履歴特性を得ている。この実験では配筋方向に関して純せん断となるような載荷が行われており、図8に示す履歴特性は主応力方向（配筋方向から45度の方向）のコンクリートの平均応力と平均ひずみの関係である。大森ら¹³⁾による平板実験でも同様の結果が得られている。

そこで、Stevensらの実験結果²⁾を基に、引張～圧縮間の履歴特性を図9に示すようにモデル化する。引張側除荷曲線から圧縮側包絡線あるいは再載荷曲線への移行点をJとし、圧縮側包絡線から引張側再載荷曲線への移行点をKとする。実験では、引張側と圧縮側は連続的に滑らかな曲線で結ばれている点を考慮して、引張側からの除荷で応力が零となる点Hから点Jに向かう曲線、及び点Kから引張側の除荷曲線との交点Lに向かう曲線を、次式に示す対数曲線で表現する。

$$\sigma = (\log_e(\varepsilon + a) + b) \cdot c \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

ここで、 a, b, c は係数で、2点を通過し、その内1点における剛性から決定することができる。

点Jの応力 σ_J は引張強度 σ_T （ひびわれ発生応力）に比例するものと仮定して、次式で与える。

$$\sigma_J = -\alpha_5 \sigma_T \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

既往の実験結果より、除荷開始点Lのひずみ ε_L が大きい程、点Jの応力も大きくなる傾向が見られる。この原因として、ひびわれ幅

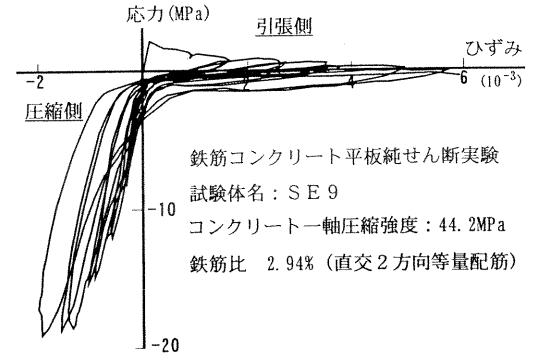
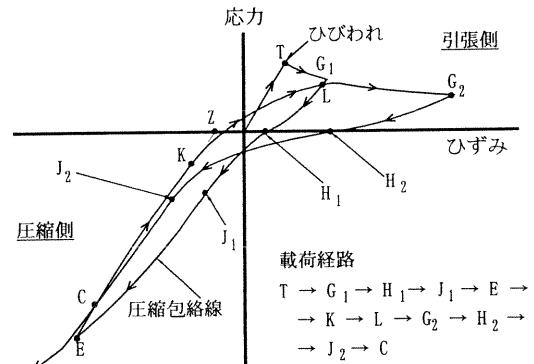
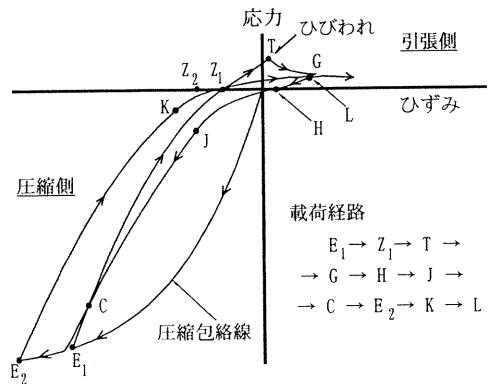


図8 コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性の実験結果²⁾

- J：引張除荷曲線から圧縮包絡線/再載荷曲線への移行点
- K：圧縮除荷曲線から引張再載荷曲線への移行点
- H → J：対数曲線（点Jで剛性連続）
- J → C：2次曲線（点Jで剛性連続）
- C → K：2次曲線（点Kは点C→点Zへの除荷曲線上）
- K → L：対数曲線（点Kで剛性連続）



a) 引張側でひびわれ後に圧縮側に移行する場合



b) 圧縮側からの除荷後に引張側に移行する場合

図9 コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性のモデル化

の増大に伴い、ひびわれ面のずれが生じ、ひびわれ閉合時に早期に骨材の接触を生じることが考えられるが、ここでは簡略に係数 α_5 を ε_L の関数として、係数 α_5 を次式で算定する。

$$\alpha_5 = 1.0 + 0.02 \left(\frac{\varepsilon_L - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

点Kの応力 σ_K は点Jの応力に比例するものと仮定して、実験結果を参考に、次式で与える。

$$\sigma_K = 0.5 \sigma_J \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

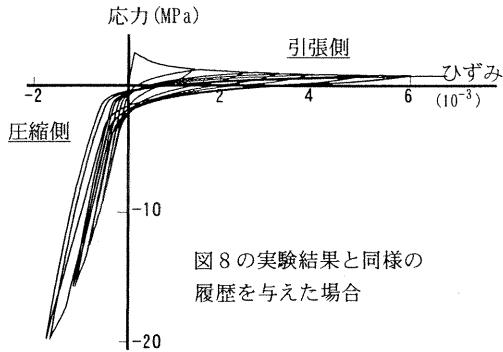


図8の実験結果と同様の履歴を与えた場合

図10 本モデルによるコンクリートの引張～圧縮間の履歴特性

圧縮側から除荷した後にひびわれが生じる場合は、圧縮履歴によるコンクリートの劣化が剛性低下に現れていると思われ、引張強度もその影響で小さくなるものと考えて、引張強度 σ_T を次式で低減する。

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \frac{E_{EZ}}{E_0} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

ここで、 σ_{T0} は圧縮履歴を受けない場合の引張強度、 E_{EZ} は E-Z 間の割線剛性である。

図9の b) に示すように、圧縮包絡線から除荷した後に引張側に移行する場合は、点 Z から点 T (ひびわれ発生点) までは点 Z における除荷剛性で直線とし、ひびわれ発生後は点 Z を原点と考えて引張側の除荷・再載荷ルールを適用する。

本モデルで図8と同様の履歴を与えた場合の結果を図10に示す。やや履歴ループの面積は小さいが、図8の実験結果と定性的に対応する履歴性状が得られている。

5. ひびわれ方向のせん断伝達履歴特性

分布ひびわれモデルでは、ひびわれ面のせん断伝達特性はひびわれ方向のせん断応力～せん断ひずみ関係で表現される。ひびわれ幅を一定とした状態でのひびわれ面の繰返しせん断載荷実験^{14)～16)}の結果は、いずれも同様の履歴特性を示しており、図11にそれらの例を示す。

ひびわれ方向のせん断応力～せん断ひずみ関係の包絡線は既報のモデル¹⁷⁾に従い、除荷、再載荷時の履歴特性を図12に示すようにモデル化する。包絡線上の除荷開始点を D、除荷後に応力零となる点を F、再載荷開始点を R、除荷曲線と再載荷曲線の交点を M とする。除荷及び再載荷は4次曲線で表現すると実験結果との対応が良いことから、点Dから点F、及び点Rから包絡線に向かう曲線を次式で与える。なお、せん断応力を τ 、せん断ひずみを γ とする。

$$\tau = a(\gamma - b)^4 \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

式(24)の a, b は係数で、点D～F 間は、 $b = \gamma_F$ (点Fのひずみ)、 a は点Dを通過する条件より決定できる。点Fのひずみは包絡線上の除荷開始点Dのひずみに比例するものと仮定して次式で与える。

$$\gamma_F = 0.5\gamma_D \quad (\leq \gamma_D - \frac{4\tau_D}{G_o}) \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

点R～包絡線間は、点Rと点Mの2点を通過する条件より決定できる。式(25)の括弧内の制限は、除荷開始時の剛性が初期せん断剛性 G_o を越えないとの条件を満たすためのものである。点Mの応力 σ_M は包絡線上の除荷点の応力 σ_D を用いて次式で与える。

$$\sigma_M = 0.9\sigma_D \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

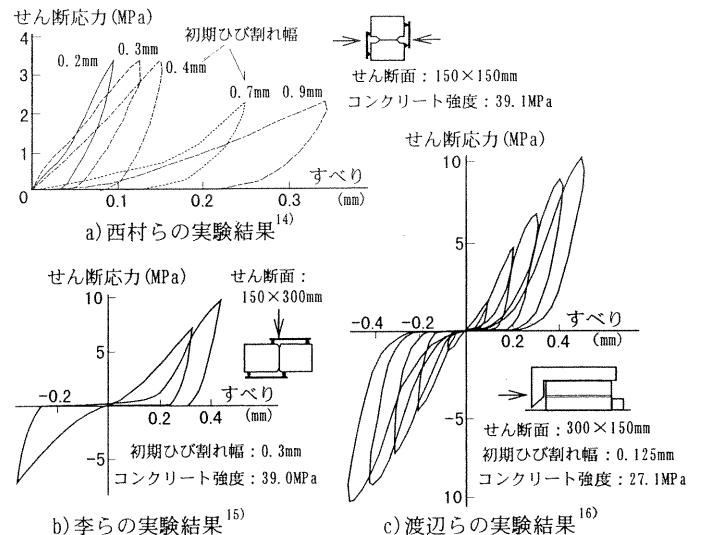


図11 既往のひびわれ面のせん断応力～すべり関係の実験結果

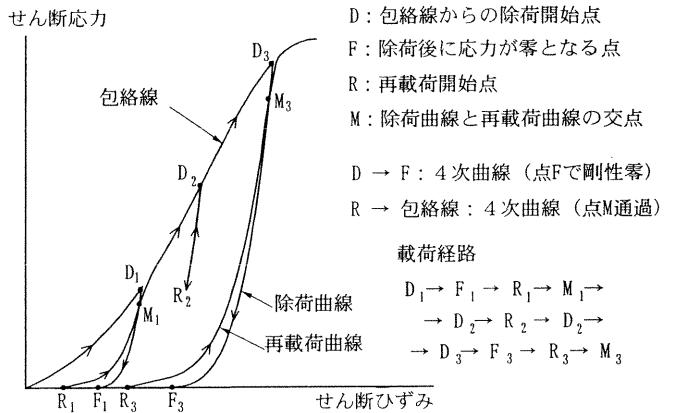


図12 ひびわれ方向のせん断履歴特性のモデル化

除荷曲線は点Fを通過する時点で剛性が零となり、さらにひずみが減少する場合は、応力零のまま推移し、ひずみが増加に転じる点が再載荷点Rとなる。なお点Rが点Dと点Fの間にある場合は、除荷曲線上をそのまま戻るものとする。また、点F通過後に点Rと包絡線の間で除荷、再載荷を繰り返す場合は、最初に定義された点Rからの再載荷曲線上を動くものとする。

再載荷後に点Mと包絡線の間で再び除荷となる場合は、包絡線からの除荷曲線が再除荷点を通るように点Rと点Mを定義し直す。せん断ひずみの符号が正から負に変わる場合、負の領域に初めて移行する場合には包絡線に乗り、それ以外の場合は、原点を再載荷点Rとして、負側の除荷曲線との交点Mに向かうものとする。

本モデルにより、図11と同様の載荷履歴を与えた場合の結果を図13に示す。モデルではひびわれ間隔を100mmと仮定して、ひびわれ幅とひびわれ面のすべりを、それぞれ区間100mmの平均引張ひずみと平均せん断ひずみで表現している。除荷、再載荷曲線の形や履歴ループの面積など、実験結果を良好に再現している。

6. 鉄筋の繰返し応力下の履歴特性

引張と圧縮の繰返し応力を受ける一般的な鉄筋の履歴特性は、降伏前は線形弾性で、降伏後の塑性流れ域はほぼ直線であるが、除荷から

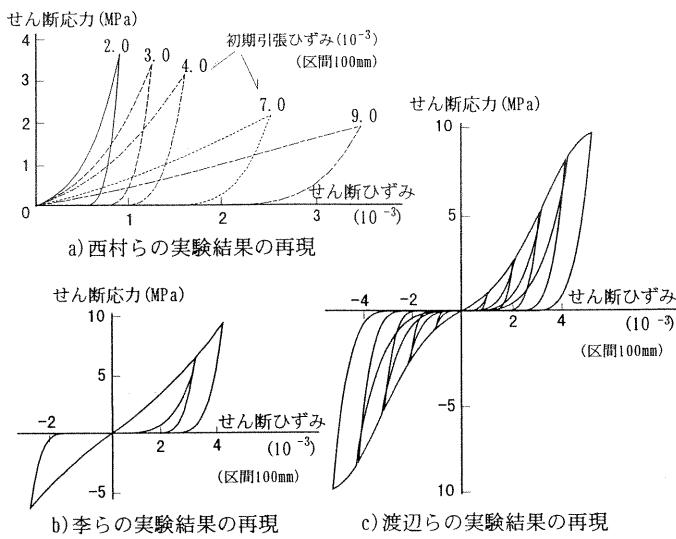


図13 本モデルによるひびわれ方向のせん断伝達履歴特性

再載荷にかけての履歴ループは曲線となる。この傾向を表現できるモデルとして、Ciampi ら¹⁸⁾による修正 Menegotto-Pinto モデルがある。このモデルではひずみの関数として応力が一義的に求められる点が特徴で、Ramberg-Osgood モデルのように応力からひずみを求めるための反復計算が不要である。応力～ひずみ関係の包絡線は、降伏点を $(\sigma_y, \varepsilon_y)$ 、ひずみ硬化率を H とすると、次式で表現される。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = H \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} + \frac{(1-H)\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}}{1 + \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \right|^R} \quad \dots \dots \dots (27)$$

$$R = R_o - \frac{a_1 \varepsilon_{\max}}{a_2 + \varepsilon_{\max}} \quad \dots \dots \dots (28)$$

ここで、 ε_{\max} はそれまでに経験した最大の塑性ひずみ、 R_o 、 a_1 、 a_2

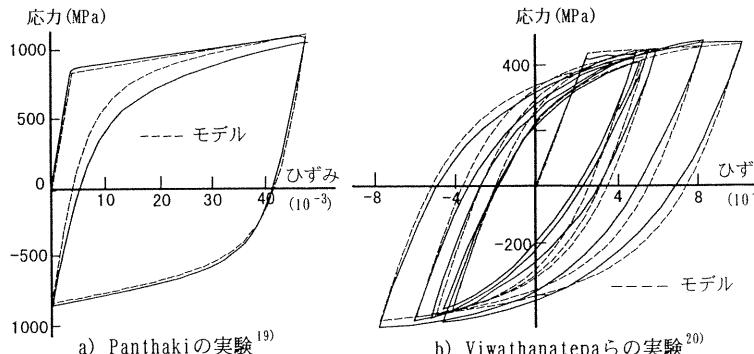


図14 鉄筋の繰返し応力下の履歴特性の実験結果と Ciampi らのモデルの比較

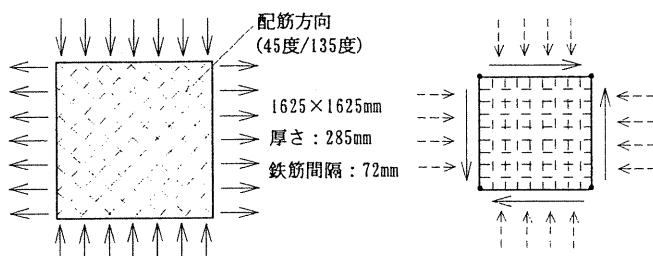


図15 Stevens らの平板試験体と載荷方法

図16 一要素モデル

は曲線の形状を決めるパラメータである。除荷及び再載荷曲線は、式(27)において、 σ/σ_y を $(\sigma-\sigma_i)/2\sigma_y$ に変え、 $\varepsilon/\varepsilon_y$ を $(\varepsilon-\varepsilon_i)/2\varepsilon_y$ とする。 σ_i 、 ε_i は載荷方向が反転する点の応力とひずみである。各パラメータの標準値は $R_o=20.0$ 、 $a_1=18.5$ 、 $a_2=0.00015$ とされており、これらの係数を用いて、既往の実験結果^{19)~21)}を再現したものを図14に示す。特に係数の変更を施さなくても普通強度から高強度まで、比較的良好に履歴特性が再現できることが分かる。

7. 要素レベルの解析

繰返し応力下における各履歴特性モデルの有効性を基礎的な条件下で検討するため、鉄筋コンクリート平板の面内載荷実験を対象とした有限要素解析を実施した。解析対象には正負繰返し載荷が行われた Stevens ら²²⁾の試験体を選んだ。実験は図15に示すように一様な応力場を想定し、配筋方向に関して純せん断、あるいはせん断+二軸等圧縮となるように載荷されているため、図16に示すように1要素でモデル化した。試験体は全3体で、実験パラメータは以下の通りである。

S E 8 : 純せん断加力、不等量配筋（縦筋比 0.98%、横筋比 2.94%）

S E 9 : 純せん断加力、等量配筋（鉄筋比 2.94%）

S E 10 : せん断 (τ) + 二軸圧縮 ($\sigma = |\tau/3|$)、配筋は S E 8 と同一

既報の材料構成モデル¹⁷⁾に従い、コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルとし、前節までに述べた履歴特性モデルを組み合わせた。コンクリートの主軸方向は主応力方向とし、ひびわれ発生後はひびわれ方向（水平より 45 度、135 度）に固定した。比較のため、一部の履歴特性を図17に示すような直線でモデル化した解析、及び、ひびわれ発生後のせん断剛性をひびわれ直交方向の引張ひずみの関数で低減する Al-Mahaidi の式²³⁾を適用した解析も実施した。載荷は要素の4つの節点にせん断力と軸力を漸増荷重として与えた。各ループの制御は、実験のせん断応力、あるいはせん断ひずみのいずれかに達したステップで除荷に移行するようにした。

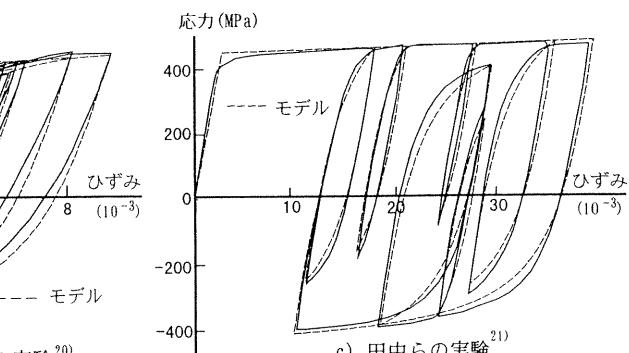


図17 直線型の履歴特性モデル

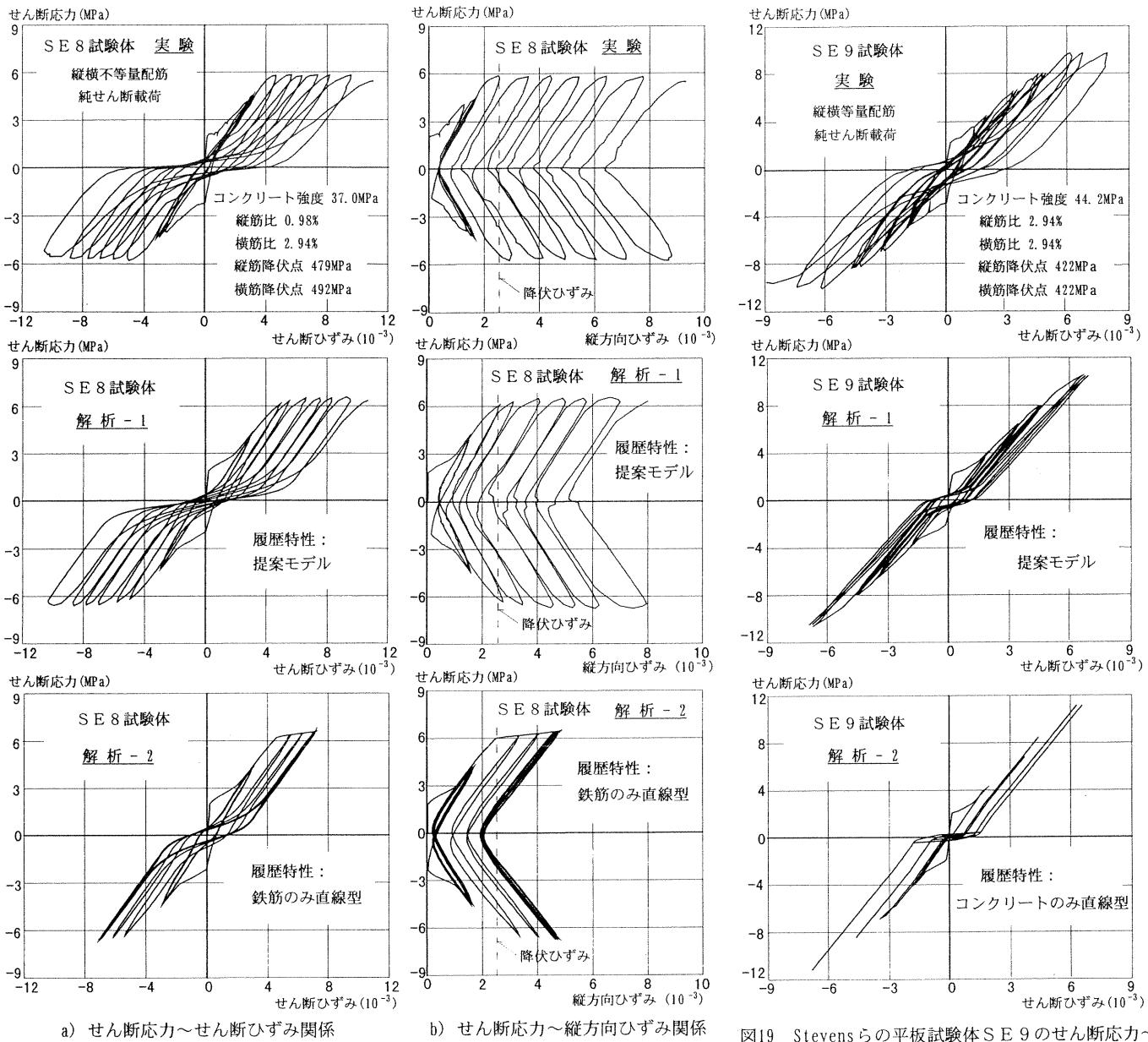


図18 Stevensらの平板試験体SE 8の実験結果と解析結果の比較

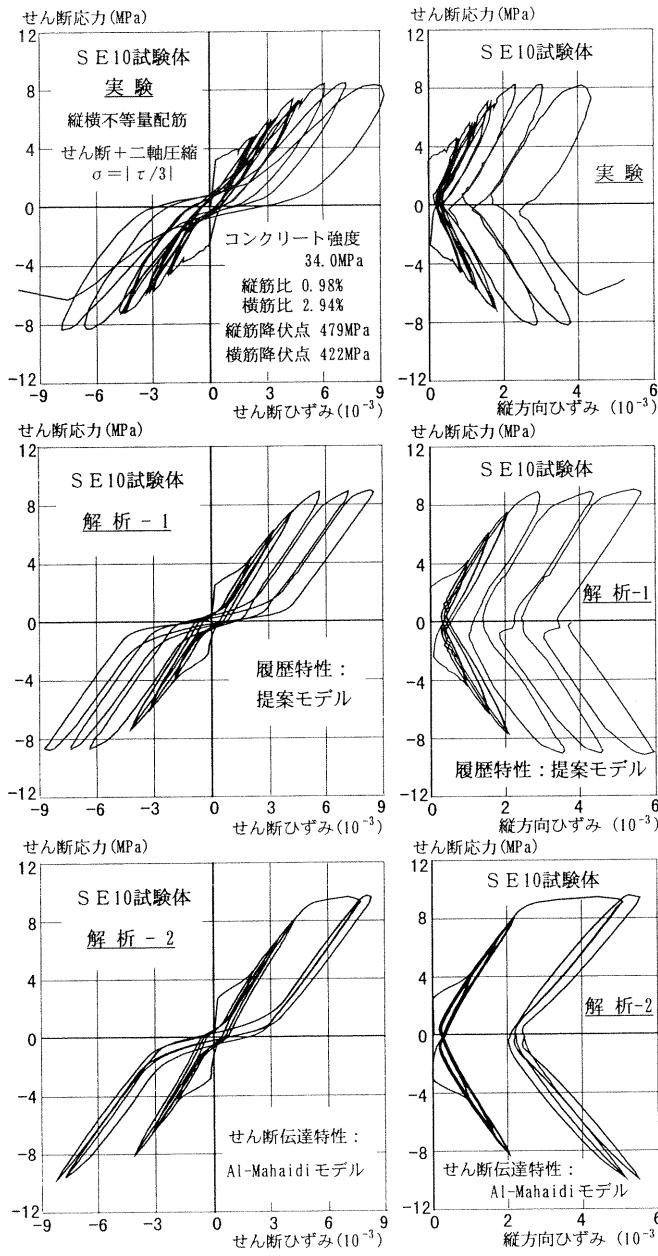
図18にSE 8試験体のせん断応力～せん断ひずみ関係とせん断応力～縦方向（鉄筋比0.98%の方向）ひずみ関係を、それぞれ実験と解析で比較して示す。この試験体は鉄筋降伏型で、鉄筋が降伏ひずみを大きく超えるレベルまで繰返し載荷が行われているため、鉄筋の履歴特性の影響を調べるために適している。履歴特性に本提案モデルを用いた場合（解析-1）は、実験にかなり近い履歴性状が得られているが、鉄筋の履歴特性を図17のb)に示す直線型モデルとした場合（解析-2）は、履歴面積が小さく、鉄筋のひずみも最終的に実験の半分程度しか生じていない。

図19はSE 9試験体のせん断応力～せん断ひずみ関係の実験結果と解析結果を比較したものである。この試験体は直交2方向に等量配筋され、純せん断を受けるコンクリート破壊型であることから、コンクリートの圧縮～引張間の履歴特性の影響を見ることができる。実験では最も荷重の高いサイクルにおいて、せん断ひずみが徐々に増加して、履歴ループが膨らんでいる。履歴特性に本提案モデルを用いた場

合（解析-1）は、定性的な傾向は再現されているが、履歴面積は実験より小さい。この原因として、実験結果には遅れ弾性によるひずみの増大の影響が含まれている可能性があるが、解析では応力振幅を一定とした正負繰返し時のひずみの進展が不十分であることが考えられる。コンクリートの履歴特性を図17のa)に示す直線型モデルとした場合（解析-2）は、履歴ループがほとんど面積を描かず、エネルギー吸収の無い履歴特性となっている。

図20はSE 10試験体のせん断応力～せん断ひずみ関係とせん断応力～縦方向（鉄筋比0.98%の方向）ひずみ関係を実験と解析で比較したものである。この試験体はせん断+二軸等圧縮が載荷されており、直交2方向で鉄筋比が異なることから、ひびわれ面でそれが生じるため、ひびわれ方向のせん断伝達特性の影響を調べるために適している。実験では鉄筋降伏後に最終サイクルの負方向載荷でコンクリートの破壊が生じている。履歴特性に本提案モデルを用いた場合（解析-1）、最終サイクルの履歴面積は実験よりかなり小さく、破壊に至っていない。

図19 Stevensらの平板試験体SE 9のせん断応力～せん断ひずみ関係の実験結果と解析結果の比較



a)せん断応力～せん断ひずみ関係 b)せん断応力～縦方向ひずみ関係
図20 Stevensらの平板試験体SE 10の実験結果と解析結果の比較

い。この原因としてSE 9試験体の場合と同様に、解析では一定の応力振幅下でのひずみの進展が不十分であることが考えられる。解析-2はひびわれ方向のせん断剛性にAl-Mahaidiモデル²²⁾を用いたものであるが、このモデルは引張ひずみの関数でせん断剛性を決めるタイプで、せん断履歴特性は定義されていない。解析ではせん断ひずみを制御することが困難であり、正側の最大応力に向かうループでせん断ひずみが急増したため、このループでは大きな履歴面積を生じたが、それ以外はほとんどエネルギー吸収の無いループ形状を示している。

9.まとめ

コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性と、ひびわれ方向のせん断履歴特性を、それぞれ実験結果に基づいてモデル化し、既往の鉄筋の履歴特性モデルと組み合わせて、3体の鉄筋コンクリート平板の繰返

し載荷実験の解析を行った結果、簡略な直線型の履歴特性を用いた場合や、ひびわれ方向のせん断伝達に関して履歴特性が定義されていないモデルを用いた場合に比較して、提案モデルでは、より実験に近い結果が得られることが分かった。今後は、耐震壁のような一般的な条件下の解析に適用して、モデルの精度や問題点を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991.5
- 2) Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P. : Analytical Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loadings, Pub. No.87-1, Department of Civil Engineering, Univ. of Toronto, Jan. 1987.
- 3) 栗原和夫、他5名：繰返し面内せん断力を受けるコンクリート平板の弾塑性解析モデルに関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第410号、pp.93～105、1990.4
- 4) 大久保雅章、長沼一洋：正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁の解析（その1）コンクリートの履歴特性のモデル化、日本建築学会関東支部研究報告集、構造系、pp.133～136、1995.3
- 5) 長沼一洋、大久保雅章、表佑太郎：正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート板の解析、（その1）コンクリートの履歴特性のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.823～824、1995.8
- 6) 「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム、委員会報告書、第III編 構造素材と部材の変形および耐力劣化性状、「2.2 コンクリート」、JCI-C46、日本コンクリート工学協会、pp.115-128、1998.8
- 7) Karsan, I. D., and Jirsa, J. O. : Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.95, No.ST2, pp.2543-2563, Dec. 1969.
- 8) 小阪義夫、谷川恭雄：高圧縮ひずみ領域におけるコンクリートの履歴特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.449～450、1978.9
- 9) Sinha, B.P. et al. : Stress-Strain Relations for Concrete Under Cyclic Loading, Journal of the American Concrete Institute, Vol.61, No.2, pp.195-211, Feb. 1964.
- 10) Darwin, D., and Pecknold, D.A. : Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, Civil Engineering Studies, SRS No.409, Univ. of Illinois, 1974.
- 11) Yankelevsky, D. Z., and Reinhardt, H. W. : Uniaxial Behavior of Concrete in Cyclic Tension, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.115, No.1, pp.166-182, Jan. 1989.
- 12) Gopalaratnam, V. S., and Shah, S. P. : Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI Journal, May-June, pp.310-323, 1985.
- 13) 大森信次、他5名：繰返し面内せん断力を受けるコンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第403号、pp.105～118、1989.9
- 14) 西村昭、他3名：ひびわれRC部材のせん断伝達作用に対するひびわれ面性状の影響、土木学会論文集、第360号、V-3, pp.91～100, 1985.8
- 15) 渡辺史夫、河野進、六車熙：ひびわれ面における骨材のかみ合い作用とそのモデル化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.2, pp.311～316, 1989
- 16) 李宝禄、前川宏一：接触面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、コンクリート工学論文、No.88-1, Vol.26, No.1, pp.123～137, 1988.1
- 17) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル、日本建築学会構造系論文報告集、第421号、pp.39～48, 1991.3
- 18) Ciampi, V. et al. : Analytical Model for Concret Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Nov. 1982.
- 19) Panthaki, F. D. : Low Cycle Fatigue Behavior of High Strength and Ordinary Reinforcing Steels, MS thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of New York, 1991.
- 20) Viwathanatepa, S. et al. : Effects of Generalized Loadings on Bond of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks, Report No.EERC-79/22, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, 1979.
- 21) 田中良仁、水野英二、宇佐美勉：繰り返し引張・圧縮を受ける鋼素材の挙動、土木学会第44回年次学術講演会、pp.248～249, 1989.10
- 22) Al-Mahaidi, R. S. H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dept. of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979.

(1999年12月10日原稿受理、2000年5月11日採用決定)