

論文

[2005] 正負交番載荷時の高強度鉄筋コンクリートの構成モデル

正会員○飯塚崇文(千葉大学大学院)

正会員 野口 博(千葉大学建築学科)

1. はじめに

一般に鉄筋コンクリート(RC)要素は、鉄筋とコンクリートの重ね合わせとして表現されている。RC内における鉄筋の構成則は、鉄筋とコンクリート間に付着作用が存在するため、鉄筋単体の構成則とは異なる。また、鉄筋コンクリートの引張剛性は、ひびわれ発生後もコンクリートが引張力を負担する Tension Stiffening 効果により鉄筋単体の引張剛性よりも高くなる。しかし、交番載荷を受ける鉄筋コンクリート内の鉄筋特性とひびわれ直交方向のコンクリート剛性に関する研究は、現在まで極めて数少ない[1][2]。本研究では、普通強度から高強度までを対象とした一軸応力場の交番載荷実験を行い、基礎実験成果に基づいた交番載荷時のRC内の鉄筋モデルとひびわれ直交方向の Tension Stiffening モデルを導き、既往の一軸応力場実験のFEM解析によりその適用性を検討した。

2. 交番載荷実験

2.1 試験体と載荷方法

試験体は、図1に示すひびわれ間隔内の鉄筋コンクリートを想定したコンクリート角柱に鉄筋を1

本埋め込んだものとした[3]。実験因子は、表1に示すようにひびわれ直交方向の剛性に影響を及ぼすと考えられるコンクリート強度、鉄筋の降伏強度、鉄筋比とした。ひびわれは、実験を通してノッチを導入した供試体中央部に1本発生した。部材の平均ひずみは、鉄筋のひずみゲージ値より算出した鉄筋の平均ひずみと同一とした。載荷装置を図2に示す。載荷方法は、鉄筋には引張力をコンクリートには圧縮力を作用させて、正負交番載荷を行なった。

2.2 実験結果

図3に、CIA5試験体の荷重、鉄筋の平均応力度及びコンクリートの平均応力度と平均ひずみの関係を示す。図3.(b)に示す鉄筋コンクリート内の鉄筋の降伏強度は、鉄筋単体の降伏強度より低く降伏棚が存在しないことが確認された[4]。このことは、RC内の鉄筋の構成則に鉄筋単体の完全弾塑性型の応力度-ひずみ関係を仮定することは、鉄筋の負担応力の過大評価を行い、コンクリートの Tension Stiffening (TS)特性が見かけ上圧縮応力になることを意味している。図3.(c)に示すコンクリートの平均応力度は、荷重から鉄筋の負担分を差し引

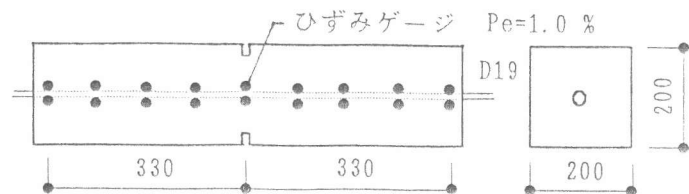


図1 試験体

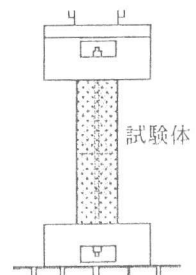


図2 載荷装置

表1 試験体一覧

試験体	f_c	f_t	P_e	f_y
CIA1	269.0	22.5	1.0	3470.0
CIA2				
CIA3				
CIA4				
CIA5				
IH1	889.0	53.6		10700.0
IH6				
IH7				
IH16				
IH24				
IH25	865.0	43.5		7700.0
IH26				
IH27				
IC8	653.5	38.8	0.5	

 f_c : コンクリートのシリンダー圧縮強度 (kgf/cm²) f_t : コンクリートの割裂強度 (kgf/cm²) P_e : 鉄筋比 (A_s/A_c : %) f_y : 鉄筋の降伏強度 (D19) (kgf/cm²)

(1). 鉄筋降伏前 $\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$ (3). 除荷域 $\sigma_s = \frac{-K_b \cdot f_{sy} (\varepsilon_s - \varepsilon_{s1})}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s1} - 2\varepsilon_{sy}}$ $E_{sp} = 0.02 E_s$: ひずみ硬化剛性 $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{smax} - \sigma_{smax} / E_s$ $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{smax} + \sigma_{smax} / E_s$	(2). 鉄筋降伏後 $\sigma_s = f_{sy}$ $\sigma_s = f_{sy} + E_{sp} (\varepsilon_s - \varepsilon_{sp})$ $[\varepsilon_s < \varepsilon_{sp}]$ $[\varepsilon_{sp} < \varepsilon_s]$ (4). 再載荷域 $\sigma_s = \sigma_{smax} (2\varepsilon_s / \varepsilon_{s2} - (\varepsilon_s / \varepsilon_{s2})^2)$ $\sigma_s = \frac{-K_b \cdot f_{sy} (\varepsilon_s - \varepsilon_{s2})}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s2} + 2\varepsilon_{sy}}$ $[\varepsilon_s < 0]$ K_b : バウシinger係数[5][6] 鉄筋単体の場合 : $K_b = \exp(7.2 \varepsilon_{smax})$ RC内の鉄筋の場合 : $K_b = \exp(\varepsilon_{smax}^{0.2})$	(1)
--	---	------------

いた後、コンクリートの断面積で除したものである。コンクリートのTS特性は、鉄筋降伏後も存在しておりRCの引張剛性は鉄筋単体の引張剛性より高くなっている。

3. 鉄筋モデル

3. 1 鉄筋単体モデル

鉄筋単体の構成則は、図4に示すようにバウシinger効果を忠実に定式化した曲線型とした。

3. 2 鉄筋コンクリート内の鉄筋モデル

鉄筋コンクリート内の鉄筋の平均応力度-平均ひずみ関係は、鉄筋とコンクリート間に付着作用が存在するため、図4に示す鉄筋単体の応力度-ひずみ関係とは異なる[7]。ひびわれ間の付着応力分布形と鉄筋のひずみ分布形及びコンクリートの応力分布形を模式的に図5に示す。コンクリート内の鉄筋が有効降伏強度に達した時のひびわれ安定後の付着応力分布は、ひびわれ面とひびわれ間の中央で接線の傾きが0であること及び付着応力は応力分布形の微分であることから、付着応力度 τ_x を次式の正弦関数で仮定する。

$$\tau_x = \tau_{max} \cdot \sin(2\pi x / L_{cr}) \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 τ_{max} : 最大付着応力度[8] (kgf/cm²)

L_{cr} : ひびわれ安定時のひびわれ間隔(cm) [9]

最大付着応力度 τ_{max} は、コンクリート圧縮強度 f_c の影響と定着長が短くなるに伴い τ_{max} が増加する定着長 L_{cr} の影響を考慮した次式で求めた。

$$\tau_{max} = f_c^{2/3} \exp(-L_{cr}^{-0.16}) \quad \text{----- (3)}$$

コンクリートの平均応力度 $a\sigma_c$ は、ひび割れ間内で付着作用により鉄筋表面からコンクリートに伝達される引張力をコンクリート断面積で除することにより求められる。

$$a\sigma_c = \frac{a\tau \cdot L_{cr} \cdot \phi}{A_c} \quad \text{----- (4) ここで、 } \phi : \text{鉄筋の周長(cm)} \\ A_c : \text{コンクリート断面積(kgf/cm}^2\text{)}$$

$$a\tau : \text{ひびわれ間の平均付着応力度(kgf/cm}^2\text{)} \quad |a\tau| = \frac{1}{L_{cr}} \int_0^{L_{cr}} |\tau_x| dx = \frac{2}{\pi} \tau_{max}$$

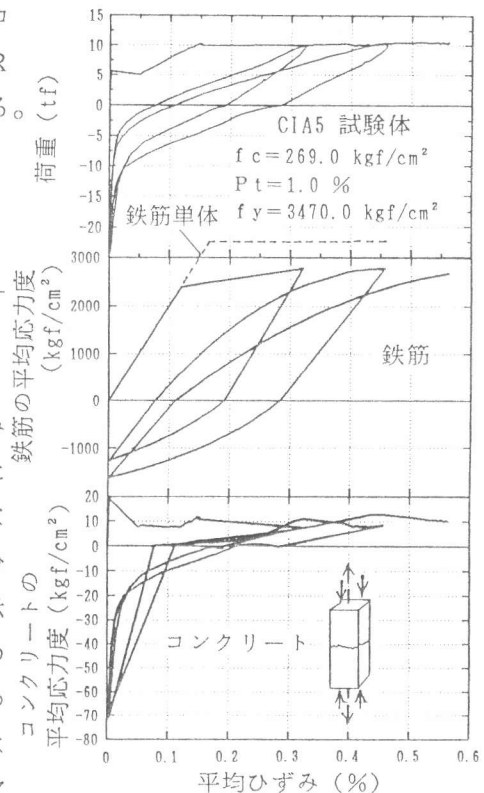


図3 荷重、各平均応力度と平均ひずみの関係

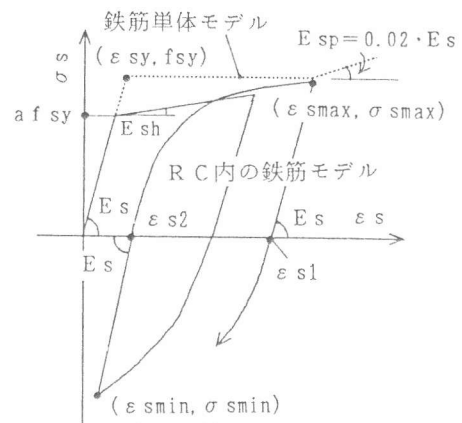


図4 鉄筋モデル

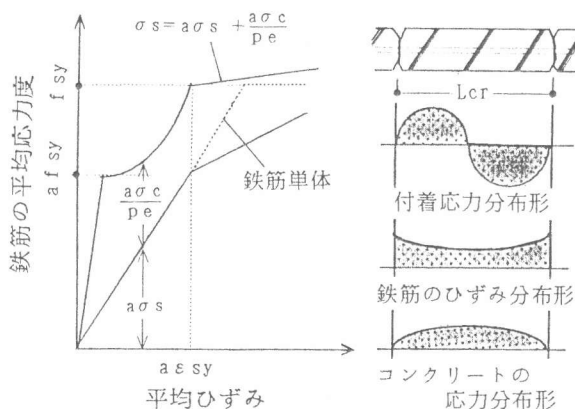


図5 ひびわれ間隔内の応力・ひずみ分布

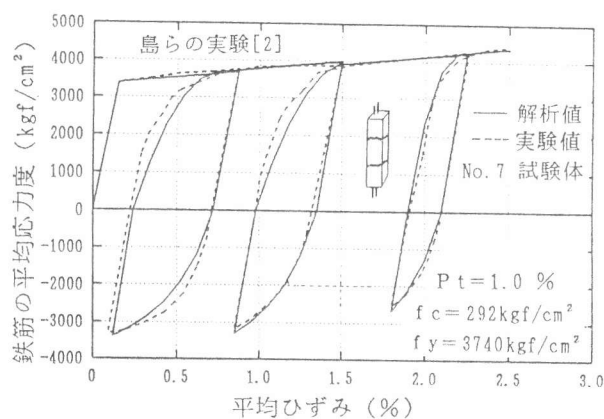


図6 鉄筋コンクリート内の鉄筋の平均応力度－平均ひずみ関係

図4に示す鉄筋の有効降伏強度 $a f_{sy}$ は、鉄筋の平均応力度 $a \sigma_s$ とコンクリートの平均応力度 $a \sigma_c$ の関係より次式で求められる。

$$\begin{aligned} a \sigma_s \cdot A_s &= \sigma_s \cdot A_s - a \sigma_c \cdot A_c \\ a f_{sy} &= f_{sy} (1 - a \sigma_c / f_{sy} \cdot p_e) \end{aligned} \quad \text{----- (5)}$$

ここで、 p_e : 鉄筋比 (A_s / A_c : %)、 f_{sy} : 鉄筋単体の降伏強度 (kgf/cm^2)

RC内の鉄筋の有効ひずみ硬化剛性 E_{sh} は、図4に示すようにRC内の鉄筋が鉄筋単体のひずみ硬化開始点で付着作用が完全に消滅し鉄筋単体と同様になると仮定した次式より得られる。

$$E_{sh} = \frac{f_{sy} - a f_{sy}}{\varepsilon_{sh} - a \varepsilon_{sy}} \quad \text{----- (6)}$$

よって、等価分布鉄筋に対する剛性マトリックス $[D_s]$ は、等価な異方性面材として配筋軸方向のみ剛性を有する次式で表現できる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{s1} \\ \sigma_{s2} \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} p_e E_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{sym} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{s1} \\ \varepsilon_{s2} \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \text{----- (7)}$$

ここで、 E_s : (6)式と(1)(5)式より求まる割線剛性

図6に、鉄筋コンクリート内の鉄筋の平均応力度と平均ひずみ関係の解析結果と実験結果[10]の比較を示す。解析結果は、有効降伏強度及び引張除荷域で実験結果と比較的よく対応しているが、再引張域で解析値のほうがやや実験値を下回る傾向を示している。それは、再引張域の応力度－ひずみ関係を2次曲線で仮定している為に、図4に示す塑性ひずみ差 ($\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{s2}$) が大きくなるほど曲線型となるためである。

4. ひびわれ直交方向の Tension Stiffening モデル

4. 1 コンクリートの平均応力度－平均ひずみ関係

図3.(c)に、交番載荷時のひびわれ直交方向のコンクリートの平均応力度－平均ひずみ関係を示す。平均応力度－平均ひずみ関係は、図7に示すように鉄筋とコンクリート間の付着作用とひびわれ面の開閉作用が複雑に組み合わされた応力分布形を示している。よって、コンクリートの平均応力度 $a \sigma_c$ を次式のように定義する。

$$a \sigma_c = a \sigma_{cb} + a \sigma_{cc} \quad \text{----- (8)}$$

ここで、 $a \sigma_{cb}$: 付着作用で生じる $a \sigma_c$ 、 $a \sigma_{cc}$: ひびわれ面の接触で生じる $a \sigma_c$

4. 2 付着作用で生じるコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係

ひびわれ発生後からひびわれ面の接触までのひびわれ直交方向のコンクリートの平均応力度 σ_c は、図7に示すようにひびわれ面では接触がないために付着作用のみコンクリートに応力度が生じる。この単調荷重領域のコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係は、既往の実験成果[2][3][11][12]に基づき、図8に示すようにコンクリート圧縮強度 f_c と鉄筋軸とひびわれ面のなす角度 θ をパラメータとする引張主ひずみ ε_{ct} の関数として次式で表される。

[単調荷重領域：TS1]

$$\sigma_{ct} = f_c (\varepsilon_{cr} / \varepsilon_{ct})^C, \quad C = 0.005 f_c^{2/3} (\theta / 90)^{-0.5} \quad \text{----- (9)}$$

ここで、 ε_{cr} ：ひびわれ発生時の引張主ひずみ（ $\approx 0.02\%$ ） C ：付着性状パラメータ
この提案モデルでは、コンクリート圧縮強度 f_c の増大及び鉄筋軸とひびわれ面のなす角度 θ が小さくなると平均応力度も低下する特性を与えている。これらは、既往の平板実験結果[13][14]においても同様の傾向が確認されている。この特性は、 f_c の増大によるコンクリートの塑性化特性の進展と θ の値による鉄筋とコンクリート間の付着性能を評価したものである。

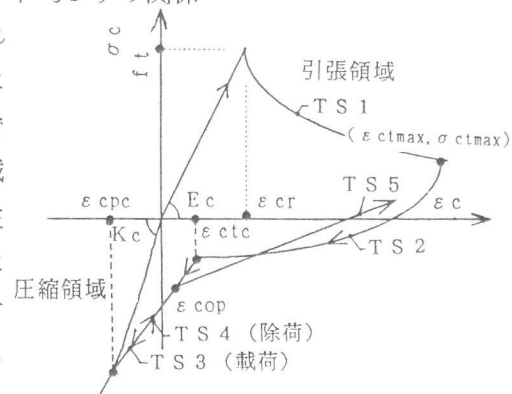


図7 ひびわれ直交方向の
Tension Stiffening モデル

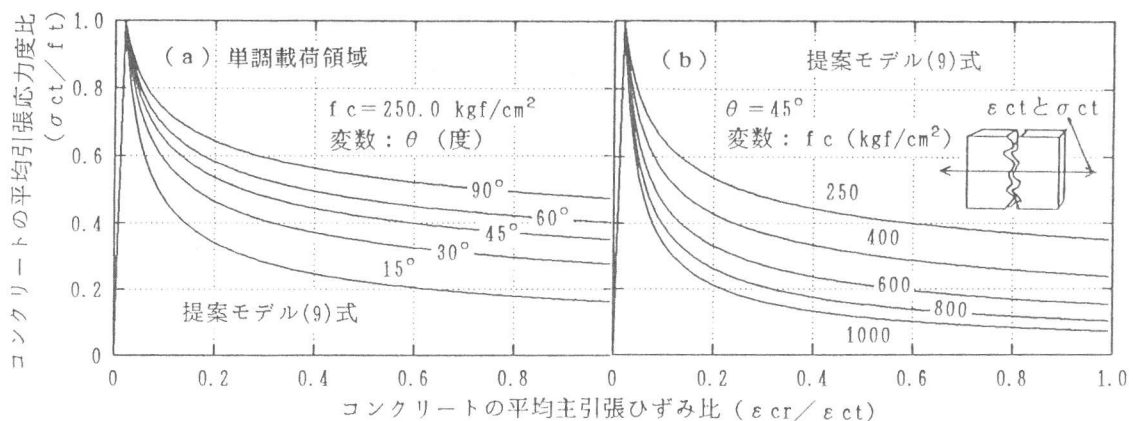


図8 単調荷重領域のコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係

また、引張除荷領域のコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係は、図9に示すように平均ひずみが大きい領域では付着が十分作用しているが、平均ひずみが小さくなるにつれ付着作用も低下することを次式で表現した。

[引張除荷領域：TS2]

$$\sigma_{cb} = (\sigma_{ctmax} - \sigma_{cb0}) (\varepsilon_{ct} / \varepsilon_{ctmax})^C + \sigma_{cb0} \quad \text{----- (10)}$$

$$C = 7 \sqrt{\varepsilon_{ctmax}}$$

ここで、 σ_{cb0} ：平均ひずみ0時の付着による σ_c 、 $\sigma_{cb0} = -0.0018 \cdot E_c \cdot \varepsilon_{ctmax}$
再開引張領域のコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係は、図7に示すように実験結果に基づき単調荷重包絡線上の除荷点を指向する次式により表される。

[再開引張領域：TS5]

$$\sigma_{ct} = \frac{\sigma_{ctmax} - \sigma_{cb0}}{\varepsilon_{ctmax}} a \varepsilon_c \quad \text{----- (11)}$$

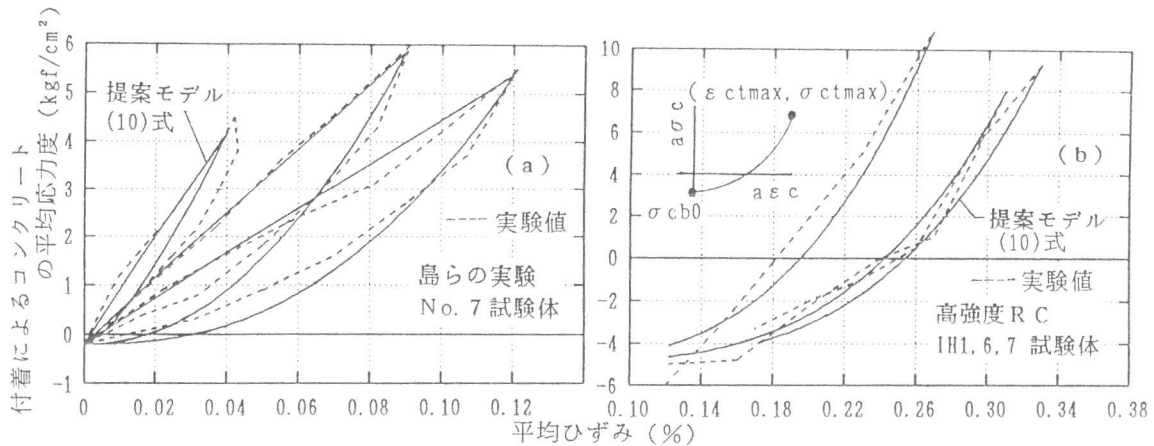


図9 引張除荷領域と再引張領域のコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係

図7に示す引張除荷領域におけるひびわれ面の局部接触時の平均ひずみ ε_{ctc} は、最大平均ひずみ ε_{ctmax} とひびわれ面のずれ変形による最大せん断ひずみ γ_{max} の関数式 (12. a) とし、また、再開ひびわれ時の平均ひずみ ε_{cop} は、最小平均ひずみ ε_{cmin} の関数式 (12. b) として各々を定式化した[3]。

$$\varepsilon_{ctc} = 0.14 \varepsilon_{ctmax} + 0.43 \gamma_{max}^{1.15} \quad \text{----- (12. a)}$$

$$\varepsilon_{cop} = 1.01 \varepsilon_{cmin} + 0.015 \quad \text{----- (12. b)}$$

4. 3 ひびわれ面の接触で生じるコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係

ひびわれ面の接触で生じる純圧縮領域は、ひびわれ面の局部接触後から完全閉合点までと完全閉合点からひびわれ面の再開ひびわれ点までである[2]。この領域の剛性は、図10に示すようにコンクリート強度の影響はなく、実験結果からひびわれ面の骨材の噛み合い作用を考慮して見かけ上の圧縮剛性の低減を定式化した。

[純圧縮領域: TS 3、4] --- (13. a, b, c)

$$\sigma_{cc} = 0.33 E_c (a \varepsilon_c - \varepsilon_{ctc}) \quad [a \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ctc}]$$

$$\sigma_{cc} = K_c \cdot a \varepsilon_c \quad [a \varepsilon_c < \varepsilon_{cpc}]$$

$$\sigma_{cc} = 0.33 E_c (\varepsilon_{cpc} - \varepsilon_{cop}) \quad [\varepsilon_{cpc} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cop}]$$

ここで、 E_c : コンクリートの初期弾性係数 K_c : コンクリートの単調載荷時の割線剛性

ε_{cpc} : ひびわれ面の完全閉合点の平均ひずみ、(13. a)式と(13. b)式の交点の平均ひずみしたがって、ひびわれ発生後のコンクリートに対する剛性マトリックス $[D_c]$ は、主応力方向に対して次式で表現される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{cc} \\ \sigma_{ct} \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & E_{ct} & 0 \\ \text{sym} & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{cc} \\ \varepsilon_{ct} \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \text{----- (14)}$$

ここで、 E_{cc} : 単調圧縮剛性、 E_{ct} : (9)(10)(11)(13)式より求まる割線剛性、 G : せん断剛性

5. 荷重—平均ひずみ関係の解析値と実験値の比較

図11に、荷重—平均ひずみ関係の解析結果と実験結果の比較を示す。解析方法は、図11.(b)に示すように鉄筋を軸方向剛性のみを有する等価な異方性面材として扱い、(7)(14)式を組み込んだFEM解析を用いた。図11.(a)の島ら[2]の普通強度RCの解析結果は、全体包絡線と鉄

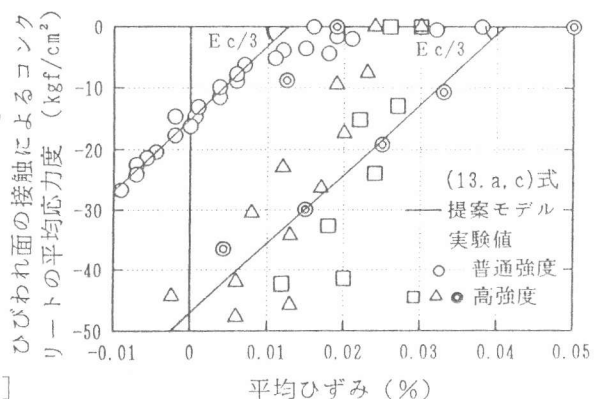


図10 ひびわれ面の接触で生じるコンクリートの平均応力度—平均ひずみ関係

筋降伏後の引張剛性で実験結果を比較的よく評価しているが、鉄筋降伏前までと引張除荷領域で解析における引張剛性の低下により若干変形が進行している。これは、鉄筋の有効降伏点を付着応力分布形を仮定することで算出しているのに対して、ひびわれ安定時のひびわれ間隔を実際より小さく評価したことによる鉄筋剛性の低下の影響と考えられる。図11.(b)の高強度RCの解析結果は、実験結果と良い精度で対応している。圧縮域での剛性急変については、高強度材料であることと純圧縮領域での一定剛性の影響と思われる。

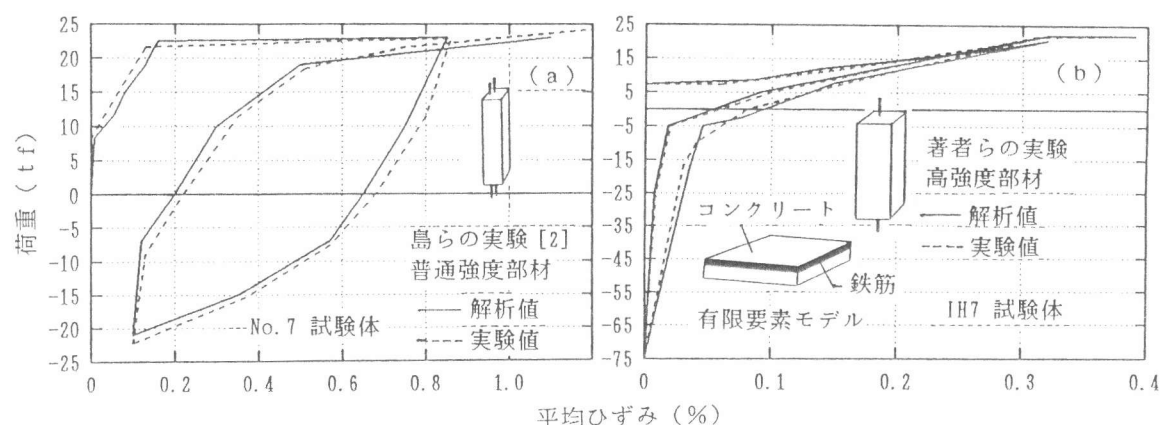


図11 荷重－平均ひずみ関係の解析結果と実験結果の比較

6. まとめ

- (1). 鉄筋特性に関する既往の実験成果とひびわれ間隔内の付着応力分布形の仮定に基づいて、普通強度から高強度までを対象とした交番載荷時の鉄筋コンクリート内の鉄筋モデルを提案した。
- (2). 一軸応力場の交番載荷実験を行い、ひびわれ発生後の交番載荷時におけるコンクリートの Tension Stiffening 特性をコンクリート圧縮強度と鉄筋軸とひびわれ面のなす角度をパラメータとする引張主ひずみの関数として、またひびわれ面の局部接触及び再開ひびわれ効果を過去に経験した平均ひずみの関数により定式化した。

【参考文献】 [1]佐藤稔夫、白井伸明ほか：RC耐震壁の履歴特性と非線形解析－解析用付着モデルとその検討－、AIJ大会梗概集、PP.1803-1804、S.55.9 [2]玉井真一、島 弘：正負交番載荷時のテンションステイフニング効果、JCI年次論文集、PP.85-90、1987.7 [3]飯塚崇文、野口 博：地震時の鉄筋コンクリートのひびわれ開閉挙動に関する基礎実験、JCIコロキウム論文集、PP.73-78、1989.10 [4]玉井真一、岡村 甫ほか：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係、土木学会論文集、No.378/V-6、PP.239-247、1987.2 [5]大芳賀義善、小倉弘一郎ほか：高強度鉄筋の開閉に関する研究－鉄筋の引張・圧縮正負くり返し実験－、AIJ梗概集、PP.677-678、1989.10 [6]Stevens, N. J. and Uzumeri, S. M. and Collins, M. P., "Analytical Modelling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loading", Publication No.87-1, University of Toronto, January 1987 [7]申：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析、東京大学博士論文、PP.29-29、1988.6 [8]山尾芳秀、二羽淳一郎ほか：付着応力－すべり関係に関する実験的研究、土木学会論文集、第343号、PP.219-228、1984.03 [9]村田二郎、河合紘茲：両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究、土木学会論文集、第378号、PP.107-115、1987.02 [10]玉井真一：鉄筋降伏後及び交番載荷時における鉄筋コンクリート要素の引張剛性モデル、東京大学修士論文、1987 [11]長沼一洋、山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションステイフニング特性のモデル化、AIJ梗概集、PP.649-650、1990.10 [12]角一行、四方照雄ほか：鉄筋コンクリート平板の面内せん断挙動に関する研究－せん断クラック発生後のコンクリートの挙動について、間組研究年報、PP.245-252、1986 [13]Vecchio, F.J. and Collins, M.P. : Response of Reinforced Concrete to In-Plane shear and Normal Stresses, Publication 83-03, University of Toronto, 1982.03 [14]角一行、川股重也：面内せん断力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的特性、JCI, Vol. 26, pp.97-110, 1988.10