

論 文

[2049] 一般化されたRC接合要素の検証

正会員○三島 徹也（前田建設工業技術研究所）

正会員 Buja BUJADHAM（東京大学大学院）

正会員 前川 宏一（東京大学工学部）

1. はじめに

RC部材の復元力特性の解析精度向上を図る目的で、著者らは、繰り返し荷重を受けるRC接合要素の開発を行っており、ひびわれと鉄筋が直交する場合の基本モデルについて報告を行った[1], [2]。さらに、梁・柱のせん断ひびわれのように、部材中に発生するひびわれにも適用可能な接合要素を、①ひびわれと鉄筋の交差角の影響、②隣接ひびわれの影響を考慮して一般化しており、材料モデルを中心にその詳細を報告した[2], [3]。しかし、モデル精度の詳細な検討が不十分であった。

本論文は、RC板の1軸交番載荷試験およびプッシュオフ試験を対象とした解析を行い、ひびわれ面の変形を解析と比較する事により、一般化RC接合要素モデルの検証を行うものである。

2. RC接合要素モデル2. 1 RC接合要素の定式化

接合要素の概要を図-1に示す。この接合要素の接合面はコンクリートのひびわれを模擬したものであり、鉄筋と接合面のなす角度は θ である。鉄筋は接合要素内に一様に分布していることを前提としている。また、図-1および本節の定式化は1方向配筋に限られているが、多方向配筋されている場合にも、各鉄筋の応力を要素応力に加算することによって、容易に拡張することが可能である。

(1) 要素応力

接合要素の応力 $\{\sigma_j\}$ は、コンクリート応力 $\{\sigma_{jc}\}$ と鉄筋応力 $\{\sigma_{js}\}$ の和で表され、鉄筋とコンクリートの応力は互いに独立な構成則で記述されることを仮定する。すなわち、

$$\begin{aligned} \{\sigma_j\} &= \{\sigma_{jc}\} + \{\sigma_{js}\} \\ &= [\sigma_c + p^* \sigma_s \cdot \sin \theta, \tau_c + p^* \sigma_s \cdot \cos \theta]^T \quad (1) \end{aligned}$$

ここに、 σ_c 、 τ_c はそれぞれコンクリートの直応力、せん断応力であり、 σ_s は鉄筋応力、 p^* は鉄筋比（接合面を通る鉄筋の総断面積／接合面の面積）である。より一般的な、鉄筋と直交する断面での鉄筋比を p とすると、このふたつの鉄筋比の間に次式の関係がある。

$$p^* = p \sin \theta \quad (2)$$

(2) 要素変位

ジョイント要素の変形を接合面のせん断変位 δ と平均開口変位 ω で代表させ、接合要素変位 $\{u\}$ を次式で表すものとする。

$$\{u\} = [\omega, \delta]^T \quad (3)$$

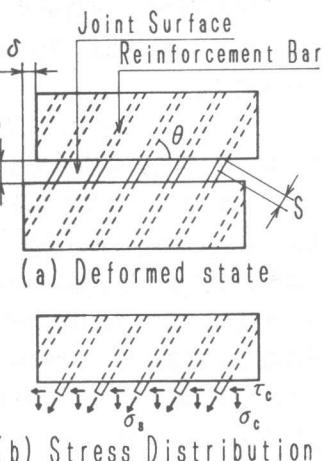


図-1 接合要素図

コンクリート応力 $\{\sigma_{sc}\}$ は接合要素変位 $\{u\}$ から直接算定することが可能であるが、鉄筋応力 σ_s は鉄筋抜け出し量 S の関数で与えられる。ここで、鉄筋応力 σ_s を算定するためには、接合変位 $\{u\}$ と鉄筋抜け出し量 S との関係を導く必要がある。斜め配筋された鉄筋について、鉄筋応力方向は鉄筋軸方向角 θ に常に等しい（微小変位）と仮定し、さらにコンクリートのひびわれ平行方向の圧縮変形を無視することによって、以下に示す接合要素変位 $\{u\}$ と鉄筋抜け出し量 S に対する変形の適合条件が得られる。

$$S = (\delta \cos \theta + \omega \sin \theta) / 2 \quad (4)$$

本解析では、接合面直交方向の物理的な要素長を 0 としているため、分散ひびわれ有限要素と組み合わせて用いる場合、接合面の変形を 2 重に見積もらないうよう注意する必要がある。すなわち、接合要素に隣接する要素を弾性要素とする等の工夫が必要である。

2.2 材料モデル

(1) 鉄筋モデル

本要素の鉄筋モデルは、島らの鉄筋ひずみ-すべりモデル[4]に基づいている。(4)式から得られる鉄筋抜け出し量 S に対する鉄筋ひずみ ε_s を、この鉄筋ひずみ-すべりモデルより算定し、さらに鉄筋応力 σ_s を、鉄筋ひずみ ε_s から、加藤モデルによる鉄筋の応力-ひずみ関係を用いて算定した。

本モデルは除荷、再載荷時についても適用が可能であり、任意の応力履歴を考慮したモデルである。モデルの詳細は、参考文献[2]に詳しいので、ここでは、鉄筋降伏までの単調載荷モデルのみを記す。

$$S = \varepsilon_s \cdot (6 + 3500 \cdot \varepsilon_s) \quad (5)$$

ここに、 S :無次元鉄筋すべり ($= S / D * (f_c / 200)^{2/3}$)、 ε_s :鉄筋ひずみ、 D :鉄筋径、 f_c :コンクリート強度 (kgf/cm^2)

(2) ひびわれ面の応力伝達モデル

本要素モデルで用いているコンクリートのひびわれ面での応力伝達モデルは、李・前川モデル[5]を基に、①ひびわれ面での摩擦、②接触面の破壊、③モルタル内での骨材の支持状態の影響を考慮して拡張された、Buja モデル[3]である。

このモデルは、原モデルと同様に接触密度関数に基づくものであり、ひびわれ閉合とすべりの混在する変形モードへの対応性をさらに向上させたものである。傾斜角 θ を持つ単位ひびわれ要素の接触力密度を Z とすると、コンクリート応力 σ_c 、 τ_c は次式で与えられる。

$$\sigma_c = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Z \cdot \sin(\theta \pm \mu) d\theta, \quad \tau_c = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Z \cdot \cos(\theta \pm \mu) d\theta \quad (6)$$

ここに、 μ は接触摩擦角である。

3. RC板試験

接合要素の応力状態は直応力とせん断応力が同時に作用する場合が一般的であるが、本章では、直応力のみが作用する場合を対象として、著者らが行ったRC板の1軸正負交番載荷試験結果と解析結果を比較する。検証用試験体は、各試験体とも加力軸に対して左右非対称であるため、ひびわれ発生後、せん断変位（ズレ）が発生すると考えられる。したがって、この試験結果と解析を比較する事によって、鉄筋モデルとコンクリートの応力伝達モデルを同時に検証することが可能である。

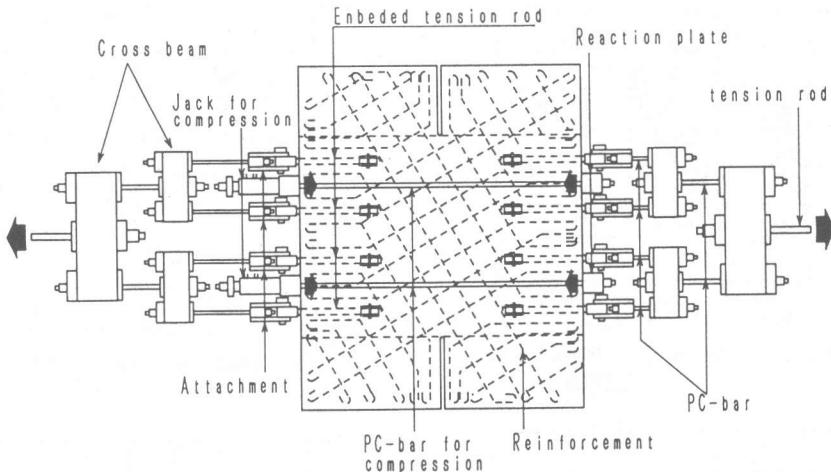


図-2 試験体および加力装置図

表-1 試験体の仕様一覧表

3.1 試験概要

試験体は、2方向直交配筋されたRC板であり、その形状を図-2に示す。試験体数は等方配筋と異方配筋の2体で、表-1に示す通りである。なお、これらの試験体はひびわれ間隔を制御するため、あらかじめ15cmピッチで切り欠が設けられており、実際に発生したひびわれ間隔も15cmであった。

載荷は図-2に示す加力装置を用い、試験体に引張力と圧縮力を交番で載荷することによって行った。引張載荷用と圧縮載荷用に、それぞれ独立のジャッキを用いており、これらを順次切り替えて交番載荷を行った。本試験は面外曲げに対して非常に敏感であり、試験体をバネで支える等の工夫を施し、試験精度の確保に注意を払った。

ひびわれが発生すると予想されるノッチ中央断面に、局所変形測定用の変位計を取り付け、ひびわれ面の開き、せん断変位を測定した。なお、標点距離は50mmであり、測定変形量はこの区間のコンクリートの変形を含んだものである。したがって、厳密に言うと、測定値をひびわれ面のみの変形と考えることはできない。本接合要素を用いた解析と比較する場合、この変形を測定値から差し引いたものを用いることが望ましいが、コンクリートの変形はひびわれ面の変形に対して十分小さいと考えられるので、本論文では、この影響を無視することとした。

一般に、補強筋に異形鉄筋を用いた場合、鉄筋位置でのひびわれ幅は小さく、鉄筋から離れるにしたがってひびわれ幅が大きくなることが知られている。したがって、試験体表面での測定ひびわれ幅を平均開口変位と考えることはできない。しかし、本試験体のように鉄筋かぶりが少なく、しかも鉄筋が断面内に均等に配筋されている場合、平均開口変位と表面ひびわれ幅はほぼ等しいと考えられる。以下の解析では、表面ひびわれ幅は平均開口変位に等しいと仮定した。

No.1 試験体	コンクリート強度	245 kgf/cm ²
	X 鉄筋	鉄筋径 D10(30°)
		鉄筋比 1.14%
	Y 鉄筋	鉄筋径 D10(60°)
		鉄筋比 1.14%
No.2 試験体	コンクリート強度	262 kgf/cm ²
	X 鉄筋	鉄筋径 D10(45°)
		鉄筋比 1.14%
	Y 鉄筋	鉄筋径 D13(45°)
		鉄筋比 2.02%
鉄筋材料特性	降伏強度 (kgf/cm ²)	D10 4135 D13 4285
	ヤング率 (kgf/cm ²)	D10 1.92×10 ⁶ D13 2.00×10 ⁶
	破断強度 (kgf/cm ²)	D10 5500 D13 5620

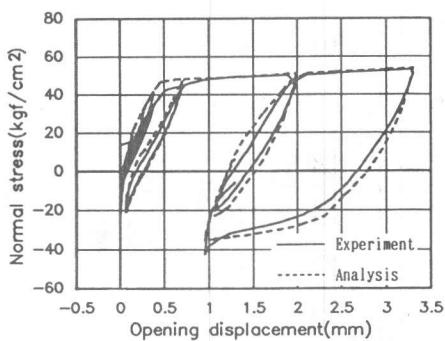


図-3(a) 開口変位-鉛直応力関係
(No.1試験体)

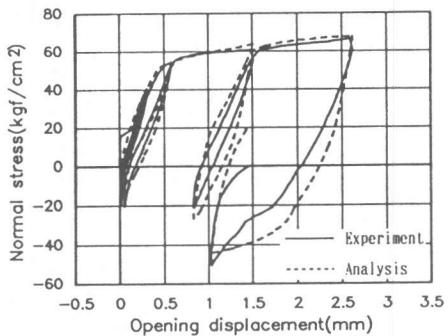


図-3(b) 開口変位-鉛直応力関係
(No.2試験体)

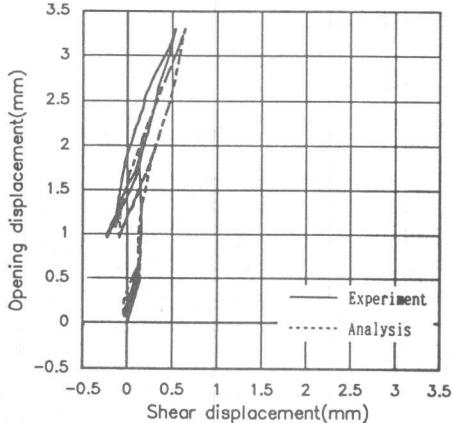


図-4(a) 開口変位-せん断変位関係
(No.1試験体)

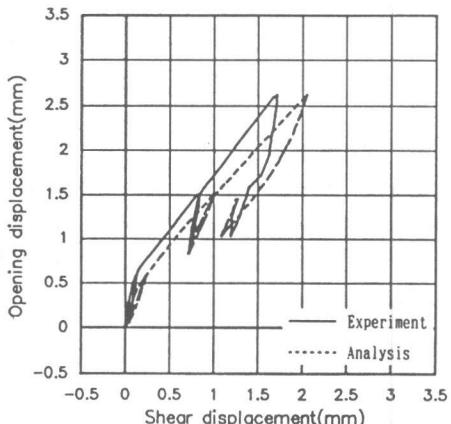


図-4(b) 開口変位-せん断変位関係
(No.2試験体)

3.2 試験結果との比較

(1) 鉛直応力-開口変位関係

図-3に各試験体の鉛直応力-開口変位の解析および試験結果を示す。同図より、載荷、除荷、再載荷曲線とも、各試験体でよく一致しており、本解析モデルが十分な精度を有していることが確認される。ただし、圧縮載荷時に、ひびわれ再接触によって剛性が急激に増大する様子が、実験ではみられるが、解析では再接触開始が遅れる傾向にあるため、若干の差異を生じている。今後、ひびわれ再接触に対するモデルの精度向上を図る必要がある。

(2) 開口変位-せん断変位関係

図-4に開口変位-せん断変位関係を示す。No.1試験体は、鉄筋降伏後も、ほとんどせん断ズレを生じていない。ひびわれ再接触時を除いて、コンクリート応力は鉄筋応力に比べて十分小さく、No.1試験体の挙動を支配しているのは、主に鉄筋の抜け出し特性であることがわかる。したがって、No.1試験体の実験結果と解析がよく一致していることは、鉄筋の繰り返し載荷モデルが妥当であることを示している。

これに対して、No.2試験体は鉄筋降伏後に、開口変位と同程度のせん断変位が生じており、せん断伝達によるコンクリート応力が発生する。No.2試験体の解析結果が実験結果とよく一致していることから、鉄筋モデルだけでなく、コンクリートの応力伝達モデルの妥当性が確認される。

なお、鉄筋降伏後に開口変位と同程度のせん断変位が生じることは、以下の考察から説明できる。すなわち、ひびわれ平行方向のつり合いに対して、コンクリート応力の寄与分が少ないと仮定すると、D10鉄筋の降伏進行中は、D13鉄筋の応力増分はゼロであり、鉄筋すべり増分もゼロである。一方、(4)式より、鉄筋すべり増分がゼロの場合のひびわれ変位方向は鉄筋直交方向であり、No.2試験体が45°。配筋のため、D10鉄筋降伏後に開口変位と同程度のせん断変位が生ずるのである。

4. プッシュオフ試験

接合要素にせん断応力のみが作用する場合、および一定鉛直応力下でせん断力が作用する場合を対象として、解析モデルの検証を行う。検証用試験体は、Mattockら[6]、山田ら[7]によるプッシュオフ試験体であり、あらかじめひびわれを導入した後せん断載荷された試験体のみを選定して、検証に使用した。第3章で変形特性の検証を議論したのに対し、本章では、最大せん断耐力を議論の対象とする。

(1) 直交配筋の場合

Mattockら、山田らの実験データのうち、せん断面に鉄筋が直交補強されている試験体を選定して計59体に対する解析を行い、最大せん断耐力の比較を行った。解析結果の例を表-2に示す。また、実験値と解析値を比較したものを図-5に示す。全試験体の最大せん断耐力に対する解析値/実験値の平均は1.18、変動係数は14.6%となっており、解析が実験値より高めの最大耐力を与えることがわかる。特に、Mattockらの実験データについては、解析値の方が実験値に比べてかなり大きくなっている。しか

表-2 直交配筋されたプッシュオフ試験体の解析結果一覧表

試験体名	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	鉄筋 降伏強度 (kgf/cm ²)	鉄筋比 (%)	鉄筋径 (mm)	最大せん断応力		解析値 — 実験値	
					計算結果 (kgf/cm ²)	実験結果 (kgf/cm ²)		
山田ら	4.1AH	424	3464	1.267	19	90	80.4	1.12
	4.1BH	424	3757	1.267	13	94	93.8	1.00
	4.1BL	219	3757	1.267	13	83	63.3	1.31
	4.2AH	419	3464	2.534	19	115	110.5	1.04
	4.2BH	419	3757	2.534	13	120	118.0	1.02
	4.2BL	219	3757	2.534	13	95	87.8	1.08
	4.3AH	443	3464	3.801	19	124	134.2	0.92
	4.3BH	443	3757	3.801	13	129	139.3	0.93
	4.3BL	254	3757	3.801	13	105	97.7	1.08
	4.4BH	444	3757	5.068	13	132	146.0	0.90
	4.4AH	444	3464	5.068	19	128	133.9	0.96
	4.1BH6	407	3790	0.317	6	48	47.3	1.01
	4.3BH6	426	3790	0.950	6	82	92.4	0.89
	4.5BH6	404	3790	1.584	6	105	114.8	0.91
	4.2AH13	421	3757	1.126	13	89	81.9	1.09
Mattock et al.	4.3AH13	401	3757	1.689	13	107	95.9	1.12
	M21	218	3570	0.442	9.5	49	41.5	1.18
	M22	218	3570	0.884	9.5	69	47.8	1.44
	M23	275	3570	1.326	9.5	88	59.1	1.49
	M24	275	3570	1.768	9.5	99	70.3	1.41
	M25	294	3570	2.210	9.5	105	91.5	1.15
	M26	294	3570	2.670	9.5	108	97.5	1.11
	M31	284	3520	0.100	3.2	26	16.9	1.54
	M32	282	4000	0.139	6.4	52	36.6	1.42
	M33	218	3570	0.884	9.5	69	47.8	1.44
	M34	284	3320	1.570	12.7	92	72.3	1.27
	M35	284	2980	2.460	15.9	102	81.1	1.26

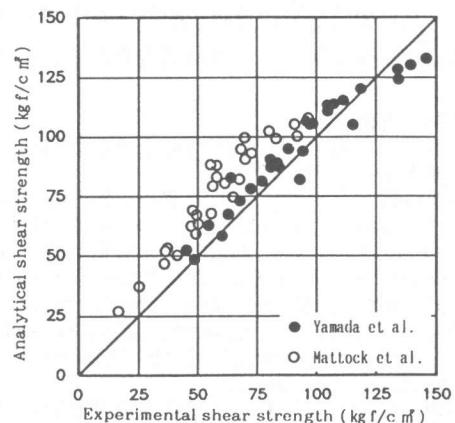


図-5 せん断耐力の比較

し、山田らの実験データ29体については、解析値／実験値の平均は1.05、変動係数は8.7%であった。プッシュオフ試験は最大耐力付近での挙動が不安定で試験の制御が難しく、最大耐力を正確に検出できない場合もある。両データの乖離は試験方法などによるものと思われるが、その原因は明確でない。

(2) 斜め配筋の場合

山田らのプッシュオフ試験のうち、せん断面を通る鉄筋量を一定（鉄筋比 $p^* = 1.27\%$ ）として、鉄筋とひびわれ面の角度をパラメータとして行われた試験に対する解析結果を図-6に示す。鉄筋角が 150° の試験体のように、ひびわれ面と鉄筋のなす角度が大きい場合に、実験値との差が大きくなる傾向がみられるが、広範囲の角度に対して概ね一致している。ひびわれと 150° 以上の角度で交わる鉄筋がひびわれ面の力学的特性に及ぼす影響度合いは少なく、斜め配筋に対する取扱いも本モデルで実用上十分と思われる。

5.まとめ

R C板試験およびプッシュオフ試験の結果を用いて、R C接合要素モデルの精度を検証した結果、以下の結論を得た。

- 1) R C板試験との比較から、本解析で使用した鉄筋モデル、コンクリートの応力伝達モデルが、繰り返し荷重を受けるひびわれ面の挙動を予測するに十分な精度を有していることが確認された。
- 2) プッシュオフ試験との比較から、本解析モデルが、ひびわれ面の変形性状だけでなく、耐力についても予測可能であることがわかった。
- 3) R C板試験および斜め配筋されたプッシュオフ試験結果との比較より、本接合要素の斜め配筋に対するモデル化が概ね妥当であることが示された。

【参考文献】

- 1) 申鉢穆：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、東京大学土木工学科博士論文、1988.6
- 2) 三島徹也、申鉢穆、前川宏一：繰り返し載荷を考慮した鉄筋コンクリート接合要素モデル、JCIコロキウム「R C構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集、pp.79-86、1989.10
- 3) Bujadham,B., LI,B., Maekawa,K.: "Path-Dependent Stress Transfer along Crack in Concrete", Proceedings of the JCI Colloquium on Analytical Studies on Shear Design of Reinforced Concrete Structures, Oct. 28, 1989, pp.65-72.
- 4) Sima,H., Chou,L., Okamura,H.: "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete", Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.39, No.2, pp.133-194, 1987
- 5) 李 宝録、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、JCI, Vol.26, No.1, 1988.1
- 6) Mattock,A.H., Hawkins,N.M.: "Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.17, No.2, March-April, 1972, pp.55-75
- 7) 山田一宇、青柳征夫：ひびわれ面におけるせん断伝達、第2回R C構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.19-26, 1983.10

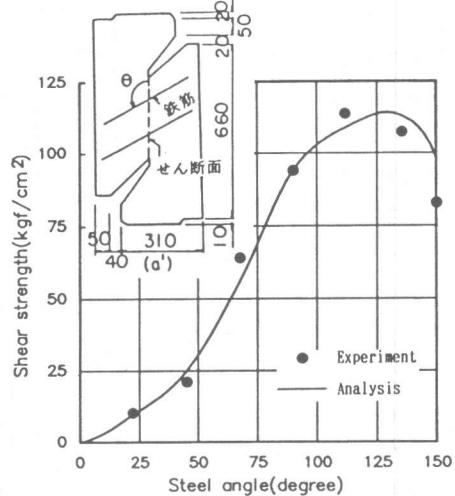


図-6 斜め配筋された試験体のせん断耐力