

正負交番载荷下における鉄筋コンクリート ひびわれ面の局所的挙動

三島徹也*・山田一宇**・前川宏一***

ひびわれと鉄筋のなす角度および配筋の異方性を試験要因とし、あらかじめひびわれ発生位置を限定した RC 板の一軸正負交番载荷試験を実施し、RC 板中のひびわれ面の局所的な挙動について検討を行った。その結果、鉄筋とひびわれが任意の角度に交差する場合の鉄筋の抜け出し特性等の力学的挙動を明らかにするとともに、ひびわれ面におけるコンクリート応力を分離することにより、正負交番時のひびわれ面の応力伝達特性を実験的に示した。

Keywords : discrete crack, constitutive model, cyclic loading, RC plate

1. 序 論

鉄筋コンクリートに発生するひびわれに対して分散ひびわれモデルと離散ひびわれモデルを組合わせて用いることが、RC 構造の有限要素解析の高精度化に不可欠である¹⁾。多数のひびわれを含む領域に対して空間的に平均化された応力-ひずみ関係を適用する分散ひびわれモデル(要素)は、鉄筋コンクリートの構成則の研究により、正負交番応力履歴まで適用領域を広げるに至った^{2)~4)}。離散ひびわれモデルは、2次元分散ひびわれモデルで取り扱えない局所変形等を代表するものとして位置づけられる。申、著者らはひびわれ面での応力伝達モデル⁵⁾、鉄筋抜け出しモデル⁶⁾およびコンクリートの弾塑性破壊モデル⁷⁾を組み合わせて、異なる厚みを有する異種部材間の接合部に適用可能な離散ひびわれモデルを提案している^{1), 4)}。また、耐震壁構造中の部材接合変形を詳細に測定することでモデルの適用性を検証した¹⁾。

一方、部材接合部のみならず、単一部材中に導入される局所ひびわれ挙動にも、離散ひびわれモデルを応用することが期待される。例えば、はり・柱のせん断ひびわれやマスコンクリートの温度ひびわれ等は、極小数本のひびわれが全体挙動を支配する。この場合、壁部材と異なり、分散ひびわれモデルでは対処しきれず、個々のひびわれを忠実にモデル化する必要がある。今日、履歴依存性を考慮したひびわれ面での応力伝達モデル^{5), 8)}や鉄筋付着モデル⁶⁾が提案されており、部材中のせん断ひびわれ等を解析的に扱う素地は揃ってきた。しかし、個々の構成モデルは理想化された環境条件の下に検証されたものであり、単に既往の材料モデルを重ね合わせただけ

で、鉄筋コンクリート部材中の局所ひびわれ挙動を予測し得るものかどうかは、保証の限りではない。局所ひびわれ挙動を詳細に測定した結果が解析モデルの構築と検証に不可欠なのである。

従来の RC 板载荷実験^{9)~11)}の眼目は分散ひびわれモデルの構築にあり、部材の平均的なひずみと応力の関係を得ることにある。多数のひびわれを含む板の全体挙動から個々の離散ひびわれ挙動を推測するには、ひびわれ間のコンクリートの変形を仮定しなければならず、現実には難しい。以上の背景から、本研究は、正負交番载荷を受ける鉄筋コンクリート板中に導入される 1 本のひびわれに着目し、その力学的挙動を詳細に測定するとともに、一般化された鉄筋コンクリート接合要素(離散ひびわれモデル)の開発に不可欠な検証データを得ることを目的とするものである。そのため、以下の点に留意して载荷実験を実施した。

1) 離散ひびわれ挙動を明瞭に抽出する目的から、板に離散ひびわれ発生目地を設けて位置を限定するとともに、部材厚さ方向に貫通した均一なひびわれ面を人工的に誘発させる。この条件下で、構成式の検討に直接用いられるデータを取得する。

2) 繰り返し载荷に対するモデル化を主眼として、ひびわれ直交方向に正負交番载荷を行う。一本のひびわれ挙動に着目するため、対象とするひびわれに交差する、あるいは近接する、第 2 のひびわれを避けるように载荷を行う。実験結果からひびわれの変位挙動を報告するとともに、既往の材料モデルの本実験条件下における適用性についても検討を行うこととした。

2. 載荷試験

(1) 試験体と試験条件

試験体は図-1 に示すように、試験体中央部に加力方向と直交する長さ 1000 mm の貫通ひびわれを有する

* 正会員 前田建設工業(株) 技術研究所
(〒179 練馬区旭町 1-39-16)

** 正会員 工博 前田建設工業(株) 技術研究所

*** 正会員 工博 東京大学助教授(1992年まで AIT に派遣)
工学部土木工学科

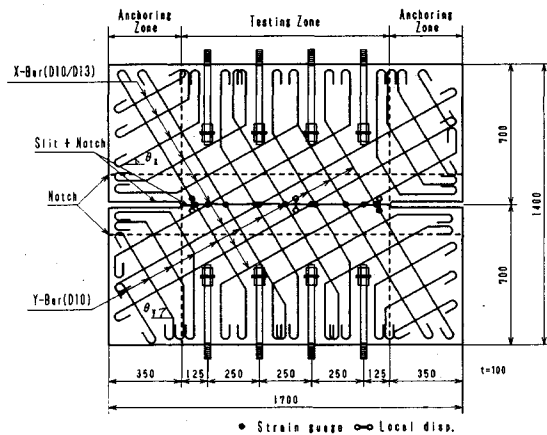


図-1 RC板試験体

表-1 試験体一覧

項目 試験体	コンクリート 強度 (MPa)	X鉄筋			Y鉄筋				
		鉄筋径	角度 (deg.)	鉄筋比 (%)	鉄筋径	角度 (deg.)	鉄筋比 (%)		
No. 1	37.6	D10	90	1.14	D10	0	1.14		
No. 2	40.4		45			45			
No. 3	38.6		30			60			
No. 4	39.2		D13			45		2.02	45
No. 5	24.5		D10			30		1.14	60
No. 6	26.2		D13			45		2.02	45
No. 7	18.1		D10			90		1.14	0

RC板(板厚100mm)である。試験体中央の切り欠きはひびわれ発生位置を制御するために設けられたものであり、この切り欠きによって誘発される貫通ひびわれが本試験の測定対象である。なお、同図に示すように、試験体中央断面と150mm離れた位置に第二のひびわれ誘発目地を設けた。これは、試験断面の極近傍にそれと平行して発生する有害なひびわれを防止することにより、試験対象ひびわれ周辺の剛性を確保し、対象ひびわれの測定精度を一定に保つためである。

板試験体の配筋は直交2方向、上下2段配筋であり、試験ひびわれ面と配筋方向の角度が主要な試験パラメータとなっている。試験区域の両側には、スリットを持つ定着ゾーンを配した。

各試験体の諸元および試験条件を表-1に記す。各試験体の特徴は以下の通りである。

○等方かつ対称配筋された試験体

No.1試験体は、ひびわれ面に直交配筋された鉄筋の抜け出し特性を明らかにすることを主目的としており、ひびわれ面と鉄筋のなす角度は90°である。また、No.2試験体は、ひびわれ面に対して斜め配筋された鉄筋の抜け出し特性を検討することを主目的としており、ひびわれ面と鉄筋のなす角度は、共に45°である。各方向の鉄筋比は同じであり、ひびわれに沿ったせん断ズレ(以下、ズレ変位と呼ぶ)が発生しないものである。

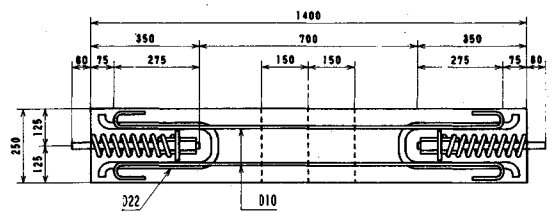


図-2 小型試験体

表-2 鉄筋の材料特性

項目	No. 1-4, 7		No. 5, 6	
	D10	D13	D10	D13
降伏強度(MPa)	403	409	414	429
弾性係数(GPa)	183	197	192	200
破断強度(MPa)	536	561	550	562

表-3 コンクリートの配合表

試験体	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位重量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE
No. 1-4	20	42.5	45.0	159	375	805	997	4.13
No. 5-7	20	61.5	47.8	163	265	894	989	2.92

45°程度に鉄筋と交差するひびわれは、梁、柱のせん断ひびわれによく見られるケースである。

○異方および非対称配筋された試験体

No.3試験体は、No.2試験体と同様に2方向等方配筋されているが、配筋が加力軸に対して非対称となっており、ひびわれ面と鉄筋のなす角度はそれぞれ30°と60°である。No.4試験体は2方向異方配筋であり、ひびわれ面と鉄筋のなす角度はそれぞれ45°である。配筋角度は加力軸に対して対称であるが、鉄筋量が異なるため、No.3試験体と同様、ひびわれ面にズレ変位が発生する。これらの試験体は鉄筋の抜け出し特性のみならず、コンクリートの応力伝達特性の検討も目的としている。なお、コンクリート強度の影響を把握するため、比較的低強度のNo.5,6試験体を補助的に作製した。これらの試験体の諸元はコンクリート強度を除いて、それぞれNo.3,4試験体と同一である。

○小型試験体

No.7試験体は、隣接ひびわれ相互の影響を調べる目的で実施されたものであり、直交配筋された小型供試体である。図-2に示すように、各断面の応力状態が等しくなるよう、ひびわれ間隔制御用の誘発目地のみが設けられている。

鉄筋は高炉製の異形鉄筋とし、D10とD13の2種類を使用した。試験体の鉄筋間隔は一定とし、鉄筋比は鉄筋径を変えることによって調整した。一般に、板試験体は鉄筋の定着不良が生じやすいため、試験区間に十分な鉄筋の定着領域を設け、定着を確保した⁹⁾。表-2に各鉄筋の材料特性を示す。

面内均一応力下での面外曲げ変形を除去するためには、鉄筋かぶりの精度が非常に重要となるため、鋼製ス

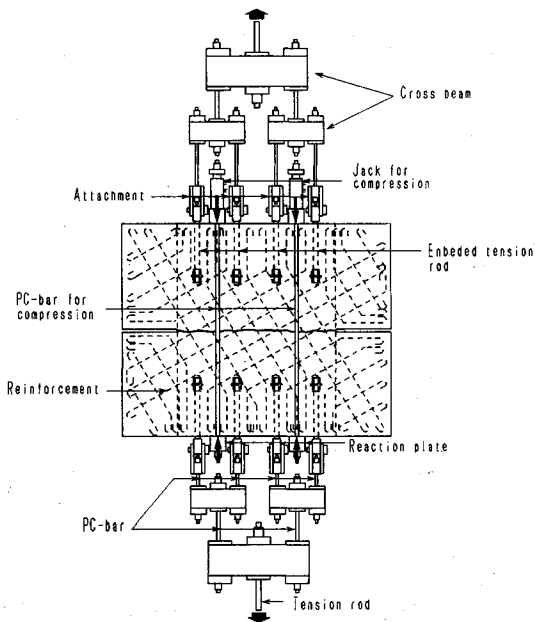


図-3 載荷方法

ペーサーにて鉄筋を固定し、かぶりの精度確保には特に注意を払った。コンクリートの最大骨材寸法は 20 mm であり、コンクリートのブリージング等によって鉄筋の付着性状が悪化しないよう、コンクリートの配合にも注意を払った。打設方法は横打ちとし、約 1 カ月間の湿潤養生を行った後、試験に供した。表-3 に使用したコンクリートの配合を示す。

試験体に異形 PC 鋼棒を埋め込み、この PC 鋼棒に引張力を加える方法を採用したため、周辺コンクリートの割裂破壊を防止することが不可欠となる。本試験では、定着プレートをナットで固定することによって PC 鋼棒を定着し、さらに、スパイラル筋と溶接金網を併用して周辺コンクリートを補強する方法を採用した。この結果、各試験体とも、鉄筋降伏以降まで安定して載荷可能であり、有害な 2 次ひびわれの発生も見られなかった。補強方法の詳細は小型試験体の配筋図(図-2)に詳しい。

(2) 載荷方法

試験対象ひびわれと直交方向に 1 軸正負交番載荷を実施し、試験体の配筋角度を変化させることによってひびわれ面でのコンクリートおよび鉄筋の負担応力を変化させた。引張側と圧縮側にそれぞれ別系統のジャッキを用意し、加力方向に応じて油圧系統を切り替えて正負交番載荷を行った。

図-3 に示すように引張載荷については、山田・青柳が採用したトーナメント方式を使用した⁹⁾。本方式は、ジャッキの引張荷重を順次 PC 鋼棒に振り分け、最終的に試験体に埋めこまれた 4 本の PC 鋼棒に均等な引

張荷重を加えることによって、一様な面内引張応力を試験体に作用させるよう工夫された方法である。圧縮載荷については 4 本のジャッキを使用し、それぞれのジャッキが等荷重になるように直列に配管することによって、一様な面内力を試験体に作用させた。

重力による面外曲げの影響を除去するために重力方向と加力方向を一致させた載荷方法を採用したところ、板の両面のひびわれ幅は鉄筋降伏後、最大で 25 % 以内の差にとどまった。

(3) 測定方法

鉄筋降伏以降の高非線形領域の変形挙動を明らかにするには、鉄筋降伏以降の鉄筋ひずみを交番載荷時においても安定して測定する必要がある。No. 1~4 試験体に対して、焼き付けタイプの箔ストレインゲージを使用した結果、30 000 μ 以上の鉄筋ひずみを安定して測定することが出来た。

鉄筋応力については、鉄筋の応力-ひずみ関係を用いて測定ひずみから計算する方法を用いた。なお、試験断面を貫通する全鉄筋にひずみゲージを添付し、試験断面での鉄筋応力とコンクリートに採用する応力を正確に分離できるようにした(図-1)。

ひびわれ面のズレ変位と開口変位は、非接触タイプの高精度変位計を標点間距離 50 mm で試験断面に取り付けることによって測定した(図-1)。なお、試験体の表裏の各 3 点に測定点を設け、それらを平均したものを試験断面の相対変位とした。

(4) 載荷

各試験体とも以下の手順に従って載荷を行った。

- ① 引張載荷によって貫通ひびわれの発生を確認した後、除荷し、応力にして 2.0~3.0 MPa 程度の圧縮載荷を行う。
- ② 鉄筋弾性範囲で徐々に応力レベルを上げながら、2~3 回程度、引張載荷と圧縮載荷を繰り返す。
- ③ 鉄筋降伏を確認するまで引張載荷を行った後、1~2 回引張載荷と圧縮載荷を繰り返す。

この時の圧縮応力レベルは、試験ひびわれと直交する 2 次ひびわれが発生しないように 2.0 MPa を最大とした。このひびわれは、抜け出した鉄筋の塑性変形により圧縮載荷時に鉄筋が圧縮力を受け持ち、その結果 1 次ひびわれ平行方向に引張応力が導入されることによって発生するものである¹²⁾。

- ④ 最後に 1~2 回引張と圧縮載荷を繰り返す。この圧縮載荷は、ひびわれが完全に再接触したことが確認されるまで載荷するものとした。

3. 鉄筋ひずみとひびわれ面の相対変位の関係

(1) 直交配筋の場合

離散ひびわれモデルの構築において、鉄筋のコンク

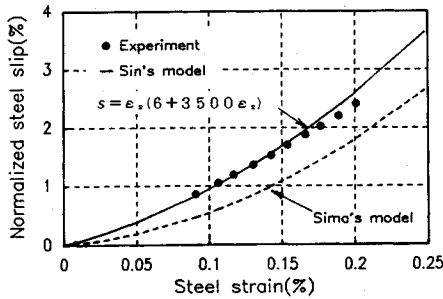


図-4 鉄筋降伏前の鉄筋ひずみ-すべり関係

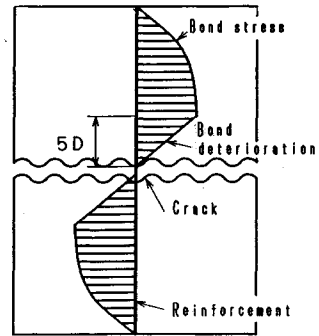


図-5 ひびわれ近傍での付着劣化の考慮

リートからの抜け出し特性、およびひびわれ幅との関係は不可欠な項目である。本章では、鉄筋の抜け出し挙動と、それに対応するひびわれ幅の関係を、局所ひびわれの測定より抽出し、合わせて既往のモデルの適用性について議論する。

a) 単調荷重時 (鉄筋降伏前)

図-4に、鉄筋降伏前のNo.1試験体の鉄筋ひずみ-すべり関係を示す。同図には、島らが提案した鉄筋ひずみ-すべりモデル (島モデル⁶⁾) および申らが提案したひびわれ面近傍での付着劣化を考慮したモデル (申モデル⁴⁾) を比較のために記してある。ここで、鉄筋すべり S は、50 mm のゲージ長の下に測定されたひびわれ幅 W がひびわれ両側からの鉄筋すべり量の和に等しいとの仮定を設け、次式を用いて算定した。

$$S = W/2 \dots\dots\dots (1)$$

なお、図-4の縦軸は鉄筋径 D 、コンクリート強度 f_c (MPa) を考慮した無次元化鉄筋すべり $s (s = S \cdot K_{fc} / D, K_{fc} = (f_c/20)^{2/3})$ である。No.1試験体の鉄筋すべり量は、島モデルの同一ひずみ値に対するそれと比べるとかなり大きいことが分かる。島らのモデルは、荷重端でのコンクリートの縦ひびわれの発生を極力押さえる等、理想的な条件下で行われた試験を基に導かれたものであり、荷重端近傍での付着劣化はモデル化の対象外である。一方、鉄筋コンクリート中に発生したひびわれ面を通る鉄筋の場合、ひびわれ面近傍での付着劣化は避けられず¹³⁾、鉄筋ひずみ-すべり関係のモデル化には、この影響を考慮することが不可欠である。

申モデルは、付着劣化区間をひびわれ面から $5D$ の区間と仮定し、さらに、この区間での付着応力分布は直線分布であると考え (図-5)、島モデルを発展させたものである。申モデルはNo.1試験体の試験結果とよく一致している。鉄筋降伏付近では、試験結果の鉄筋すべりが1割程度解析結果を下回っているが、これは後で議論するように、隣接ひびわれの発生に伴う定着の影響と考えられる。全体として、申の仮定がほぼ妥当なものであることが分かる。付着劣化程度はひずみレベルが大きくなるほど進行すると考えられ、この意味では「付着劣化

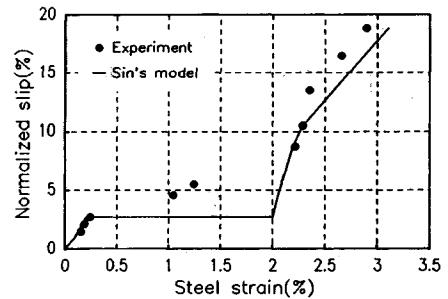


図-6 鉄筋降伏後の鉄筋ひずみ-すべり関係

区間を一定」と考える申の仮定はあくまで近似的なものであるが、試験結果と申モデルの差異はすべり量の予測に対して高々10%以内にある。本試験条件下においては、付着劣化区間長を鉄筋ひずみに依存しない一定値と考えても工学上、問題ないであろう。

ただし、島、申らのモデルとも、鉄筋の定着長は十分長いものを対象として導かれたものである。一方、No.1試験体は、試験断面と隣接するノッチ断面にもひびわれが発生しており、定着条件が試験と解析モデルで異なっている。したがって、両モデルと試験結果を単純に比較することは、前述のように、やや早計である。これについては、後に、小型試験体を用いてさらに検討を加える。

b) 単調荷重時 (鉄筋降伏後)

鉄筋降伏前の単調荷重時と同様に、申は島らの付着応力-ひずみ-すべりモデルを基に、鉄筋径、降伏強度等をパラメータとした解析を行い、付着劣化を考慮した鉄筋降伏後の鉄筋ひずみ-すべりモデルを提案している⁴⁾。これは、異種部材接合部の変形の観察により、過去に検討されたものである。

図-6にNo.1試験体の鉄筋降伏後の鉄筋ひずみ-すべり関係と申モデルの比較を示す。申モデルと実験値は比較的よく一致している。これより、鉄筋降伏後の部材中の局所挙動においても、付着劣化区間を $5D$ とする申モデルが有効であることが分かる。ただし、鉄筋降伏

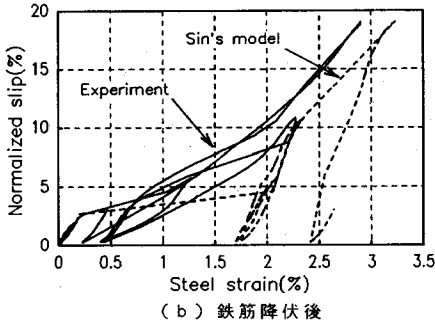
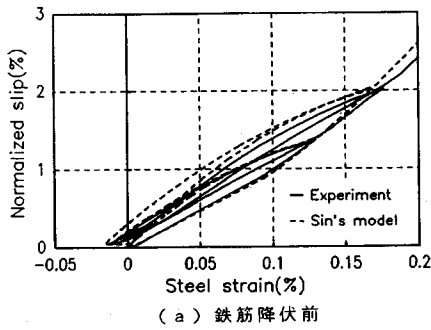


図-7 繰り返し載荷時の鉄筋ひずみ-すべり関係

後、解析モデルの鉄筋ひずみが不連続にひずみ硬化開始ひずみ (ϵ_{sh}) まで変化しているのに対して、試験結果では不連続な現象はみられず、鉄筋降伏時の挙動が穏やかである点に若干の差異がみられる。単数の鉄筋の場合、鉄筋降伏直後に、鉄筋ひずみは不連続にひずみ硬化開始ひずみまで変化することが一般に知られており、解析モデルはこの事実を忠実に反映している。これに対し、実験では試験断面を複数本の鉄筋が貫通しており、これらの鉄筋が同時に降伏せず、若干の時間的遅れが生じる。降伏時の挙動は、すべての鉄筋の挙動を平均化したものとなり、見かけ上、鉄筋ひずみの実験値は、降伏ひずみからひずみ硬化開始ひずみへ連続的に変化するように見えるのである。しかしながら、鉄筋応力-抜け出し関係の観点に立てば、この部分の実験値と解析モデルの差異の影響は非常に小さい。ひびわれ面の鉄筋抜け出しに対するモデルとして最終的に必要なのは、鉄筋抜け出し量に対して鉄筋応力を精度よく与えるモデルであることから、単数の鉄筋に対して定式化された申モデルが、ひびわれ面を貫通する複数本の鉄筋の平均的な鉄筋ひずみ-すべりモデルとして適用可能であると言える。

c) 繰り返し載荷時

図-7(a) に、No.1 試験体の鉄筋降伏前の繰り返し載荷時の鉄筋ひずみ-すべり関係を示す。図中の解析値は、申の提案モデル⁴⁾によるものである。鉄筋降伏前については、申の提案モデルと試験結果はよく一致してい

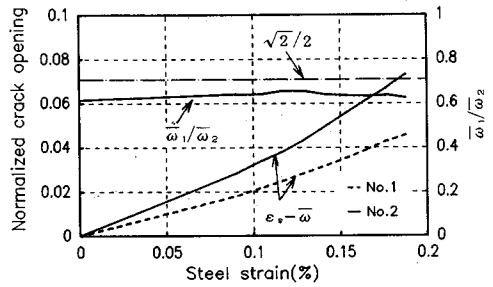


図-8 開口変位と鉄筋ひずみの関係

る。

図-7(b) は、鉄筋降伏後の鉄筋ひずみ-すべり関係である。引張載荷時に $30\,000\mu$ 程度まで引張変形を受けた鉄筋（この時、全ての鉄筋はひずみ硬化域に達していると考えられる）のひずみ値が、圧縮載荷によって、 $5\,000\mu$ 程度まで回復していることに注目したい。この事実は、圧縮載荷時に、鉄筋が十分に圧縮材として機能していることを意味しており、鉄筋降伏以降の鉄筋ひずみ-すべり関係をモデル化する際に重要な検証項目と考えられる。申は、鉄筋降伏以降も、鉄筋降伏前と同一の繰り返しモデルを用いている。高塑性を経験した鉄筋の除荷挙動は申モデルに含まれてはいるものの、さらに圧縮載荷されて“すべり戻し”が卓越する領域では、モデルの改良の余地が残されている。鉄筋降伏以降を含めた、より一般的な鉄筋ひずみ-すべり関係については、別報でその詳細を報告する予定である。

(2) 斜め配筋の場合

a) ひびわれ面での変形の適合条件

ひびわれ面に対して斜め配筋された鉄筋の場合、開口変位のみならず、ズレ変位によっても鉄筋の抜け出しが生じるものと考えられる。本節では、斜め配筋された鉄筋のひずみ値とひびわれ面の相対変位の関係、すなわち、局所変形の適合条件について考察する。

図-8 は、No.1 と No.2 試験体の正規化開口変位 $\bar{\omega}$ と鉄筋ひずみ ϵ_s の関係を比較したものである。ここで、正規化開口変位とは、コンクリート強度 f'_c と鉄筋径の影響を考慮して、開口変位 ω に K_{fc}/D を乗じて正規化したものである。両試験体とも、加力方向と配筋が対称であるため、ひびわれ面にズレ変位 δ は生じていない。両試験体の $\bar{\omega}$ - ϵ_s の関係は見かけ上、大きく異なっており、開口変位と鉄筋ひずみの関係は、ひびわれ面と鉄筋のなす角度の影響を強く受けることが分かる。

同図に示すように、No.1 と No.2 試験体の同一鉄筋ひずみの時の正規化ひびわれ幅の比 $\bar{\omega}_1/\bar{\omega}_2$ は、鉄筋ひずみによらず、ほぼ一定となっていることから、この差は、主に、配筋角度の違いという幾何学的な差異に起因しているものと思われる。そこで、幾何学的な条件のみ

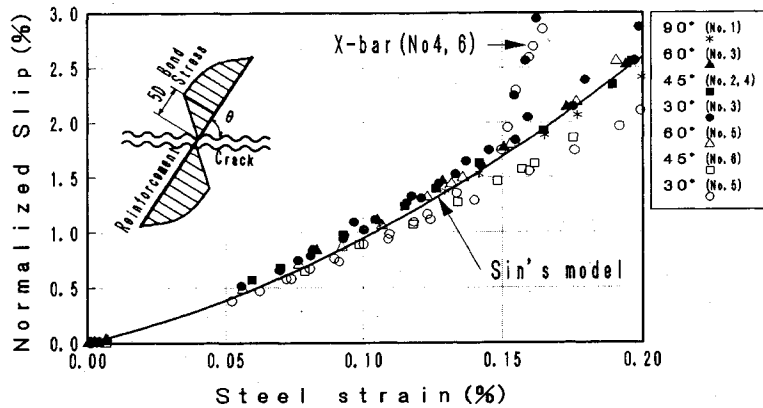


図-10 各鉄筋の鉄筋ひずみ-すべり関係 (降伏前)

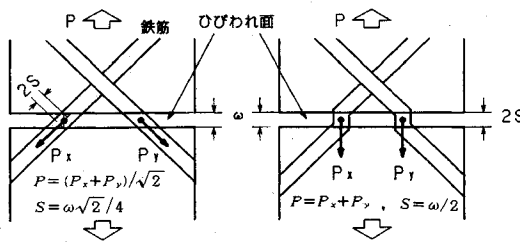


図-9 ひびわれ面での鉄筋の変形状態

を考慮して、図-9(a)に示すように、ひびわれ面の相対変位 ω 、 δ の鉄筋軸方向成分、すなわち、鉄筋の軸変位 ω_s に注目する。この時、 ω と ω_s の関係は、

$$\omega_s = \delta \cos\theta + \omega \sin\theta \quad (2)$$

となる。ここに、 θ は鉄筋軸とひびわれ面がなす角度である。直交配筋の場合と同様に、ひびわれ面の両側からの鉄筋すべり量を足し合わせたものが鉄筋の軸変位 ω_s であると考え、次式が成り立つ。

$$S = \omega_s / 2 \quad (3)$$

この時、任意の配筋角度を持つ鉄筋に対する鉄筋すべり S とひびわれ面の相対変位 ω 、 δ の関係は次式となる。

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

無次元化鉄筋すべり s を用いて表すと、

$$S = (\bar{\delta} \cos\theta + \bar{\omega} \sin\theta) / 2 \quad (5)$$

となる。ここに、 $\bar{\omega}$ 、 $\bar{\delta}$: 正規化相対変位

No.1 試験体と No.2 試験体の鉄筋ひずみ-すべり関係は近似的に同一であると仮定すると、同一鉄筋ひずみ時の正規化開口変位の比 $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2$ は、式 (5) に $\delta = 0$ を代入することによって、

$$\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2 = \sin\theta = \sin 45^\circ = \sqrt{2} / 2 \quad (6)$$

となる。実際、図-8に示すように、試験の $\bar{\omega}_1 / \bar{\omega}_2$ は、ほぼ、上式と一致している。

一方、極端な例として、鉄筋がひびわれ面で完全にキ

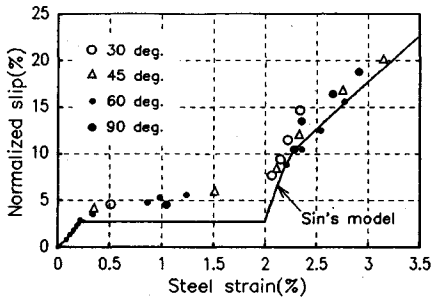
ンク (折れ曲がり) し、図-9(b) の変形状態になった場合を想定すると、鉄筋すべり S は θ によらず一定の $S = \omega / 2$ となる。これは、先に述べた、 ω と ϵ_s の関係が配筋角度 θ に依存するという事実と反する。したがって、鉄筋の変形状態は、図-9(a) にかかなり近いと考えられ、ひびわれ面の相対変位の鉄筋軸方向成分 ω_s を鉄筋すべり量 S と関係づけることの妥当性が確認される。

式 (2) は、鉄筋を線材と考え、ひびわれ面の相対変位を鉄筋軸方向に変換することによって得られる変形の適合条件にほかならない。したがって、同式を導くにあたって、「ひびわれ面の相対変位が微小である」と「ひびわれ面での鉄筋のキンは無視し得る」という2つの仮定を導入していることに他ならない。前者の仮定については特に議論の必要はないと思われるが、後者についても、鉄筋径がひびわれ面での相対変位量に対して十分大きいことを考えると、ひびわれ面で鉄筋が大きくキンクしているとは考えにくく、本試験パラメータ内では、妥当な仮定と考えられる。なお、ひびわれ面での鉄筋のキンクについては、4章にて再度議論する。

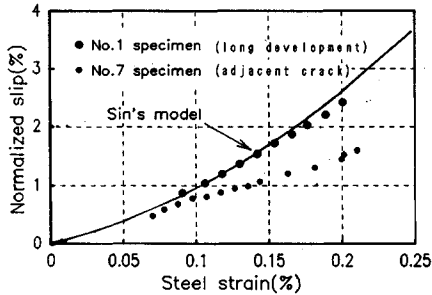
b) 付着劣化の影響について

直交配筋の場合、ひびわれ面近傍の付着劣化の影響を無視し得ないことは前述した通りであるが、斜め配筋の場合も同様に、ひびわれ面近傍のコンクリートの局所破壊が予想される。配筋角度 θ および鉄筋と直交方向の相対変位 δ_s がどの程度、鉄筋ひずみ-すべり関係に影響を及ぼすかを調べる目的で、全試験体の鉄筋に対して式 (4) を用いて算定した鉄筋すべり S から得られる無次元化鉄筋すべり $s (= S / D \cdot K_R)$ と鉄筋ひずみ ϵ_s の関係を鉄筋弾性範囲に限ってプロットしたものが図-10である。

各鉄筋で、若干のばらつきはあるものの、直交配筋に対するモデルを中心としてばらついている。このデータを見る限り、 θ や δ_s の鉄筋の抜け出し特性に対する強い影響は見られない。図-10には低強度試験体 (No.5, 6) のデータも含まれており、コンクリート



図—11 各鉄筋の鉄筋ひずみ-すべり関係 (降伏後)



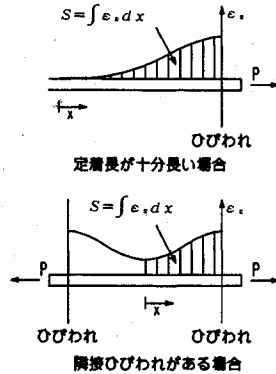
図—12 小型試験体の鉄筋ひずみ-すべり関係

強度の影響は K_{rc} で考慮できることが確認できる。また、図—11 は鉄筋降伏以降の各鉄筋の無次元化鉄筋すべりと鉄筋ひずみの関係を示したものである。鉄筋降伏前と同様に、各鉄筋とも鉄筋降伏直後の不連続挙動を除けば、申の提案モデルとよく一致している。

ただし、図—10 を見る限り、No. 3, 5 の X 鉄筋ひずみが 1.5 % 程度になった時点で、申モデルと実験結果の対応が悪化する傾向が見られる。後述するように、異方配筋された No. 3, 5 試験体では、X 鉄筋ひずみが 1.5 % 程度の時に Y 鉄筋が降伏し、それ以降の増分変位で見ると、開口変位 Δw と同程度のズレ変位 $\Delta \delta$ が発生している。この増分変位を鉄筋軸方向に変換すると、X 鉄筋では $\Delta w_s \approx 0$ であり、鉄筋と直交方向変位 $\Delta \delta_s$ のみが生じる変形状態となる。鉄筋と直交方向の変位 δ_s が大きくなると鉄筋線材の仮定が成立しないため、式 (4) の変形適合条件に問題が生じ、モデル精度が低下したものと推定される。ただし、他の鉄筋では大きな問題は見られず、 δ_s が小さい範囲では、式 (4) ならびに付着劣化区間を $5D$ とする仮定が、鉄筋の配筋角度、鉄筋直交方向の変位 δ_s によらず成立すると考えて問題なさそうである。大変形領域での精度に若干問題が残るが、本研究では δ_s が極端に大きくなった場合の影響は無視することとした。

(3) 隣接ひびわれの影響

ひびわれ面近傍が等応力場であり、ひびわれ間隔が小さい場合、隣接ひびわれの影響を無視し得ないことは前述した通りである。図—12 に隣接ひびわれを有する小



図—13 鉄筋軸に沿った鉄筋のひずみ分布

型試験体 (No. 7) の無次元化鉄筋すべりと鉄筋ひずみの関係を示す。これより、No. 7 試験体の鉄筋ひずみ-すべり関係は、定着長が十分長い鉄筋を対象とした申モデルと異なっていることが分かる。鉄筋すべり S は鉄筋ひずみを鉄筋軸に沿って積分することによって得られるが、隣接ひびわれがある場合、ひびわれとひびわれの中間点からの鉄筋ひずみを積分したものとなる (図—13)。したがって、隣接ひびわれがある場合の鉄筋すべり S は定着長が十分長い場合のそれに比べて小さくなるのである。

No. 1 でも隣接した補助ノッチにひびわれが入ったことが観察されている。しかし、試験体に設けられたスリットにより、試験断面の応力は隣接ひびわれ面に比べて大きく、試験断面以外のひびわれ幅は試験断面の 10~20 % となっている。No. 1~No. 6 試験体では試験断面に変形が集中し、スリットと十分な定着ゾーンの設定によって、定着長が十分長い場合の抜け出し挙動に近い状態がもたらされたものと思われる。

4. 鉄筋応力に関する検討

(1) 加藤モデルの適用性

鉄筋応力は直接、測定が不可能であるため、鉄筋ひずみから鉄筋の構成則を用いて計算して求めることとした。鉄筋の曲げの影響を極力除去するため、各々の鉄筋軸に対して対称位置に添付された 2 枚の鉄筋ひずみゲージの値からそれぞれ鉄筋応力を計算した後、これらの応力値を平均したものを各鉄筋の軸応力とした。以下の検討では、このようにして得られた鉄筋応力を、測定値に準ずるものとして使用した。なお、繰り返し載荷を考慮可能な鉄筋の構成モデルはいくつか提案されているが、本研究では、島ら⁶⁾、申ら⁴⁾の研究に用いられ、その精度がすでに確認されている加藤モデル⁴⁾を用いた。

No. 1 試験体は直交配筋であるため、ひびわれが接触していない時には、鉄筋力の総和と外荷重は等しくなら

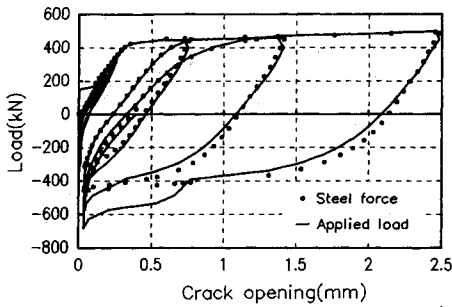


図-14 No.1 試験体の鉄筋力と外力の関係

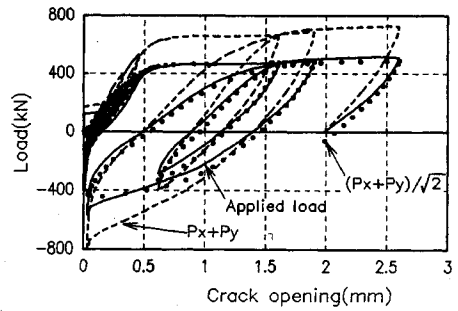


図-15 No.2 試験体の鉄筋力と外力の関係

なければならない。図-14はNo.1試験体のひずみ値から求めた鉄筋応力に鉄筋面積を乗じることによって得られた鉄筋力の総和外荷重を比較したものである。ひびわれが接触していると推定される区間を除いて、繰り返し载荷時においても、鉄筋力の総和外荷重はよく一致している。これより、本試験の鉄筋応力測定精度は満足いくものであり、さらに、加藤モデルが繰り返し载荷時の鉄筋の応力-ひずみ関係を精度よく表現していることが確認できる。

(2) 鉄筋応力と外力の関係

先に、変形状態に注目して、コンクリート中の鉄筋が「線材」として挙動することを指摘したが、コンクリート中の鉄筋を、正負交番载荷時のあらゆる状態に対して力学的に線材と見なしてよいことを確認するには、線材のもう一つの仮定、すなわち、「線材に作用する力の方向は材軸方向に一致する」ことを確認する必要がある。ここでは、No.2試験体の鉄筋力と外力の関係から、その検討を行う。

No.2試験体のX, Y鉄筋の鉄筋力の総和をそれぞれ P_x, P_y とする。図-9(a)に示すように、鉄筋が線材として挙動している場合、ひびわれ面での力のつり合いから、外力 P と鉄筋力 P_x, P_y の間には次式が成り立つ。

$$P = P_x \sin\theta + P_y \sin\theta (\theta = 45^\circ)$$

$$= (P_x + P_y) / \sqrt{2} \dots\dots\dots (7)$$

一方、応力の方向においても図-9(b)に示す状態になっている場合を想定すると、鉄筋力の向きは加力方向と一致し、

$$P = P_x + P_y \dots\dots\dots (8)$$

となる。

したがって、式(7)が成立するか否かで、鉄筋を線材と見なしてよいかどうかを確認できる。図-15は、No.2試験体の作用荷重 P と $(P_x + P_y) / \sqrt{2}$ を比較したものである。同図より、ひびわれが再接触していないと推定される区間では、式(7)がほぼ成立していることが認められる。「鉄筋力の方向が鉄筋軸方向と一致すること」「鉄筋のひびわれ面からの抜け出し量がひびわれ

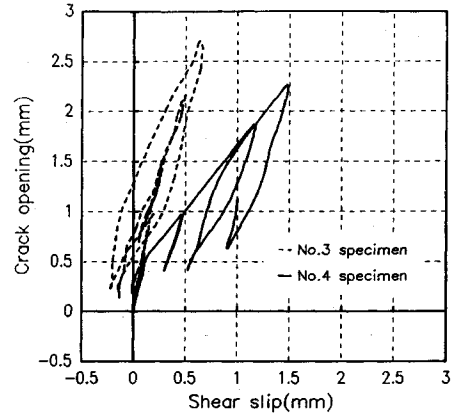


図-16 No. 3, 4 試験体の開口変位とズレ変位の関係

面の相対変位を鉄筋軸方向に変換したものに等しい」ことの2点が確認されたことより、鉄筋コンクリートひびわれ面での鉄筋を線材と見なしてよいこと、すなわち、鉄筋のキンクは、本試験の範囲においては、無視しえることが確認された。ひびわれを含む広い領域を平均的に扱った分散ひびわれモデルにおいては、上記の項目は、既にRC板の平均挙動より間接的に検証されている^{2),3)}。本研究より、ひびわれ面の局所変形の観点からも直接、検証された訳である。なお、極めて大きいせん断ズレが発生するようなケースでは、本研究の範囲内だけでは結論できない。

5. ひびわれ面の相対変位とコンクリート応力

(1) 開口変位とズレ変位の関係

No.3, 4試験体は、加力方向に対して配筋が非対称あるいは、非等量であるため、ひびわれ発生後、ズレ変位が生じる。特に、鉄筋降伏以降はズレ変位が顕著になり、これによって骨材のかみ合い作用が生じる。骨材のかみ合いによる伝達応力は、ひびわれ面の開口変位とズレ変位の比に大きく影響を受ける⁵⁾ため、ここでは、開口変位とズレ変位の関係にまず着目する。

図-16にNo.3, 4試験体の開口変位-ズレ変位関係をそれぞれ示す。非対称配筋された試験体 (No.3) では、

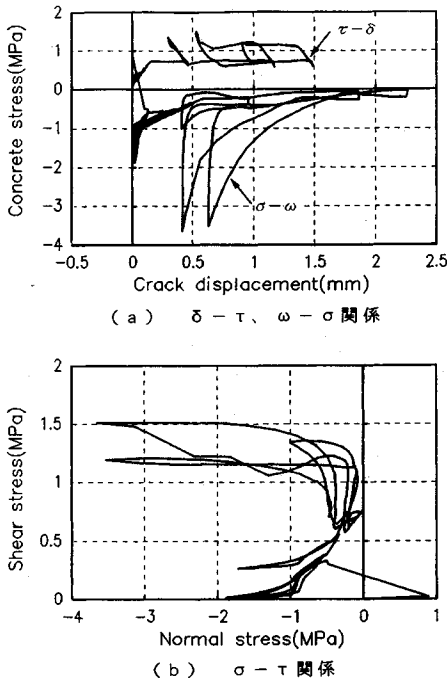


図-17 ひびわれ面におけるコンクリートの伝達応力

鉄筋降伏後に若干のズレ変位が生じているが、開口変位に比べて相対的に小さい値となっている。No.3の挙動はひびわれ面に対して直交配筋されたNo.1試験体の挙動にむしろ近く、主に鉄筋の非線形挙動に支配されると考えられる。

これに対して異方配筋試験体 (No.4) では、Y鉄筋降伏後に開口変位と同程度のズレ変位が生じている。したがって、ひびわれ開口時にも、骨材のかみ合いによる伝達応力が発生しているものと考えられる。さらに、除荷時、圧縮時についても、開口変位とズレ変位が同時に変化している点もその特徴として挙げられる。なお、部材間接合面では、隣接部材の剛性低下により開口変位とズレ変位が同時に発生することはむしろまれであり¹⁾、これが一般部に発生するひびわれ面の変形経路と異なる点である。

(2) ひびわれ面のせん断伝達応力

本試験では、試験ひびわれ面を貫通する全ての鉄筋のひずみを測定しているため、ひびわれ面に作用するコンクリート応力と鉄筋応力を分離することが可能である。No.4試験体のコンクリート応力と鉄筋応力は、以下のようにして分離することができる。すなわち、X, Y鉄筋の鉄筋力の総和を P_x, P_y 、外荷重を P 、ひびわれ面の断面積を A とすると、コンクリートのせん断断力と直断力 τ, σ は次式で求められる。

$$\tau = (P_x - P_y) / \sqrt{2}A, \quad \sigma = \{P - (P_x + P_y) / \sqrt{2}\} / A \quad \dots\dots\dots(9)$$

このようにして求めた、コンクリート応力とひびわれ面の相対変位の関係を図-17に示す。ひびわれ発生後の動きにやや不自然な点が見られ、その精度に若干の問題があるが、これは、鉄筋応力を鉄筋ひずみから計算する際に生じた誤差によるものと思われる。X鉄筋降伏後に、ひびわれ面の応力伝達によって、1.5 MPa程度のせん断断力が発生しており、異方配筋試験体では、ひびわれ面での応力伝達特性を無視し得ない。また、同図から分かるように、正負交番荷重を受けるひびわれ面で伝達されるコンクリート応力の履歴性状は非常に複雑である。特に、異方配筋試験体では、先に述べたように、除荷・再載荷時を通じてひびわれ開口とすべり(せん断ズレ)が同時に変化している。これらの挙動を解析で精度よく表現するためには、ひびわれ面での合理的な応力伝達モデルが不可欠である。著者らは、このような応力経路を受けるケースにおいても高精度の予測を与えるモデルを、接触面密度関数に基づき既に発表⁸⁾しているが、この検討は、別報において議論する予定である。

6. 結 論

ひびわれと鉄筋のなす角度および配筋の異方性を主な試験要因としたRC板の1軸正負交番荷重試験を実施した。試験体は、大きな切り欠きを有する大型の板試験体と切り欠きを持たない小型試験体の2種類とした。大型の板試験体は、隣接ひびわれの影響を排除し、鉄筋の定着長が十分長い場合のひびわれ面の力学的性状を検討するために実施されたものである。一方、小型試験体はひびわれ間隔を15 cmに設定し、隣接ひびわれの影響を考慮するためのものである。両試験体とも、ひびわれ発生位置をあらかじめ限定したため、ひびわれ位置での開口・せん断ズレ変位と鉄筋ひずみを正確に測定可能であった。これらのひびわれ面での局所的な変形挙動の測定結果に基づき、正負交番荷重時のRC板中のひびわれ面の力学的性状の検討を行った。以下に、その結果をまとめる。

- 1) ひびわれ面と鉄筋が直交し、かつその定着長が十分長い場合の鉄筋ひずみ-すべり関係を検討するために、鉄筋すべり(抜け出し)量をひびわれ幅の半分であると仮定し、ひびわれ開口幅から鉄筋すべりを求め、鉄筋ひずみとの関係を実験的に求めた。その結果、単調荷重時については、ひびわれ面近傍での付着劣化を考慮して島らの鉄筋ひずみ-すべり関係を修正した、申らのモデルが有効であることが分かった。一方、鉄筋降伏後の圧縮荷重時については、申らのモデルは鉄筋ひずみの回復量を少な目に見積もる傾向にあることを示し、正負交番荷重時の鉄筋ひずみ-すべりモデルには改良の余地があることを明らかにした。
- 2) ひびわれ面と鉄筋が斜めに交差する場合のひびわ

れ面の開口・せん断ズレ変位と鉄筋ひずみの関係および鉄筋応力と外力の関係を詳細に検討することにより、RC板中の鉄筋を線材としてモデル化すると、1)の鉄筋ひずみ-すべりモデルがそのまま適用可能であることを明らかにし、さらに、鉄筋の線材仮定に基づき、ひびわれ面の変位と鉄筋抜け出し量の関係を定量化した。

3) 複数のひびわれを有する小型板試験体の鉄筋ひずみ-すべり関係を実験的に求めることにより、ひびわれ面からの鉄筋の抜け出し特性は隣接ひびわれの影響を受けることを示し、ひびわれ間隔を考慮した鉄筋ひずみ-すべりモデルを構築する必要があることを示唆した。

4) ひびわれ面の応力からコンクリート中のひびわれ面内で実際に伝達されるコンクリートの負担応力とひびわれ面の局所変形の間接関係を求め、コンクリートの伝達応力特性を実験的に求めた。特に、異方配筋試験体では、コンクリートに発生する伝達応力の履歴特性は複雑な性状を有することを示すとともに、ひびわれ面での応力伝達モデルの検証データをRC部材レベルより得ることができた。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京大学 岡村甫教授から貴重なご意見、ご指導を賜った。ここに深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 申・前川・岡村：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力解析、コンクリート構造物の靱性とその評価方法に関するコロキウム論文集, JCI-C12, pp. 2-45~2-56, 1988年3月。
- 2) 出雲・島・岡村：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年7月。
- 3) 出雲・申・前川・岡村：正負繰り返し面内応力下におけるRC板要素の解析モデル, 土木学会論文集, No. 408/

V-11, pp. 51~60, 1989年8月。

- 4) 申 鉉穆：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, 東京大学博士論文, 1988年6月。
- 5) 李・前川：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, pp. 123~137, 1988年1月。
- 6) Sima, H., Chou, L. and 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, 1987.
- 7) Maekawa, K. and Okamura, H.: The deformational behavior and constitutive equation of concrete using elasto-plastic and fracture model, Journal of faculty of engineering, The University of Tokyo (B), Vol.37, No.2, 1983.
- 8) Bujadham, B., LI, B. and 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, JCI, pp.65~72, Oct. 1989.
- 9) 青柳・山田：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, No. 331, pp. 167~180, 1983年3月。
- 10) Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, University of Toronto, March 1982.
- 11) 角・川俣：面内純せん断応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, コンクリート工学, JCI, Vol. 26, No. 10, pp. 97~110, 1988年10月。
- 12) 三島・申・前川：ひびわれ直交方向の圧縮応力伝達機構における鉄筋の有効性, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 668~669, 1988年10月。
- 13) 周・山尾・岡村：フーチング中埋め込まれた鉄筋のひずみ分布, 第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 417~420, 1982年。
- 14) Kato, B.: Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action, Bulletin D'Information No.131, CEB, AICAP-CEB symposium, Rome, pp.7~27, 1979. (1991.5.23 受付)

LOCALIZED DEFORMATIONAL BEHAVIOR OF A CRACK IN RC PLATES SUBJECTED TO REVERSED CYCLIC LOADS

Tetsuya MISHIMA, Kazuie YAMADA and Kohichi MAEKAWA

Tests of RC plates reinforced in two directions subjected to uniaxial reversed cyclic loading are reported. The aim of this study is to investigate the local behavior of a crack in a RC plate which is supposed to serve the development of the discrete crack modeling. By separating the stresses carried by concrete and steel individually at a crack plane, the characteristics of the steel slip from a crack and the shear transfer along a crack in RC plates are discussed. Comparing these test results with the prediction by previous constitutive models, the authors seek the items to be enhanced and improved for general discrete crack modeling with greater versatility in future.