

交番載荷によるRCひびわれ面でのせん断剛性低下のメカニズム

三島徹也*・原 夏生**・前川宏一***

本研究は、単一ひびわれのみを持つRC柱試験体に対して正負交番載荷と片振り繰り返し載荷の2通りの繰り返し載荷を行うことにより、単一ひびわれ面の履歴特性がRC部材の復元力特性に及ぼす影響を検討したものである。離散ひびわれモデルを曲げとせん断を同時に受ける応力場に拡張し、モデルの検証を行った後、載荷経路依存性について解析的検討を行い、正負交番載荷では構造的にひびわれ面のコンクリートせん断剛性低下が生じることを明らかにした。

Keywords: restoring force, ductility, cyclic load, discrete crack, joint element

1. 序 論

正負交番載荷を受けるRC部材の復元力特性と靱性の評価は、耐震設計および動的解析の主題である。過去の実験的検討^{1)~3)}により、交番載荷を受けるRC部材の靱性や復元力特性は片振り繰り返し載荷時の挙動と大きく異なることが明らかにされており^{1),3)}、この特性を解析的にも明らかにする必要がある。ひびわれが部材内に分散して導入される平面部材については、復元力特性やエネルギー吸収能力を材料の構成則から解析的に予測する手法が提案されている⁴⁾。一方、少数のひびわれが部材の挙動を支配する柱、はり、大型部材等の載荷経路に依存する応答を解析的に予見するには、壁部材の解析で用いられた分散ひびわれモデルの仮定が適用できず、載荷経路の違いがこの種の部材挙動の復元力に及ぼす影響は、現段階では実験的アプローチに依っている。

著者らは、分散ひびわれモデルに基づく構成則の開発^{4)~6)}とともに、離散ひびわれモデルの一般化を図ってきた^{7)~10)}。本研究の目的は、離散ひびわれモデルを応用してRC部材中に導入されるひびわれ面での変形を予測する手法を開発・検証することにある。そして、単純化された条件の元で、部材復元力特性の載荷経路依存性を解析的に検討することであり、本研究においては、柱部材の水平加力試験を実施した。一般に、柱の復元力特性は複数の離散ひびわれの変形特性に依存するが、本試験では部材に導入された一本のひびわれが部材全体の挙動を支配するように配慮した。本試験の眼目が離散ひびわれモデルに基づく解析手法の検証とひびわれ面での変形に現れる載荷経路依存性にあるからである。

著者らが提案してきた離散ひびわれモデル⁸⁾は、ひびわれ面に沿って開口変位が一樣な条件下で検証されてきた⁹⁾。本研究では、ひびわれ幅がひびわれ面の各位置で変化する、より一般的な場合を対象とし、ひびわれ面の伝達力として曲げ・せん断・軸力を、一般化変位として回転角・せん断ズレ・平均開口変位を採用した。これを用いて、載荷経路による、内部応力の負担機構の違いを明らかにし、正負交番と片振り載荷での復元力特性の違いと靱性低下について解析を行う。

2. 繰り返し載荷試験

(1) 離散化したひびわれ一本のみを含む試験体

試験体は図-1に示すような、 a/d が0.5~1.5のRC柱であり、柱脚部に切り欠きを設けた。これは、ひびわれ発生箇所を柱と基礎部の接合面(以下、柱脚部と呼ぶ)に限定することを目的としたものである。せん断補強筋は、柱全体にせん断ひびわれが万一発生した場合に、極力そのひびわれ幅を押さえる目的で配されたものである。実際に、全試験体とも柱脚部にのみ、ひびわれが発生した。したがって、部材の非線形挙動のすべては、導入された一本のRCひびわれ面に起因すると仮定できるのである。なお、柱断面は鉄筋径が異なることを除いて、各試験体とも同一であり、図-1に示す通りである。

各試験体の試験要因は、載荷方法、 a/d 、鉄筋比である。試験体数は片振り載荷試験体1体、正負交番載荷試験体5体の計6体である。試験体一覧を表-1に示す。コンクリートの最大骨材寸法は20mmであり、全試験体とも同一の配合を使用した。なお、試験体は、約1ヶ月の湿潤養生を行った後、試験に供した。

(2) 繰り返し載荷方法

油圧ジャッキを用い、水平荷重のみを作用させ、 a/d は加力点を移動させて調整した。載荷点の水平変位によって、載荷を制御した。

*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 工修 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

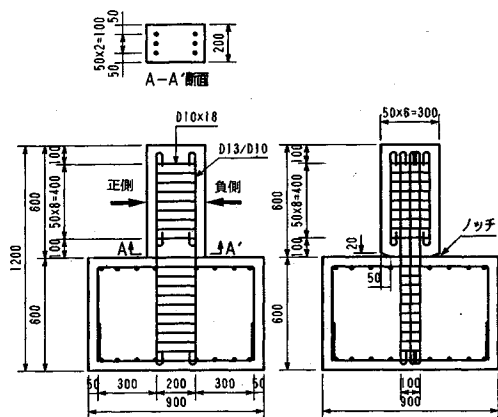


図-1 試験体 (単位: mm)

表-1 試験体一覧

試験体	項目	載荷方法	断面 n × b (mm)	コンクリート 強度 (MPa)	せん断 スパン a (mm)	a/d	鉄筋比 p, p'	鉄筋量 As, As' (cm ²)※	鉄筋				
									降伏 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)			
No. 1	試験体	片側載荷 正負交番	300 ×200 d=250	19.2	250	1.0	0.42 (p=p')	3×D10 = 2.14	403	183			
No. 2											20.3	125	0.5
No. 3											19.2	250	1.0
No. 4											23.5	375	1.5
No. 5											19.6	250	1.0
No. 6											23.5	375	1.5

※引張・圧縮鉄筋とも3本ずつ配置

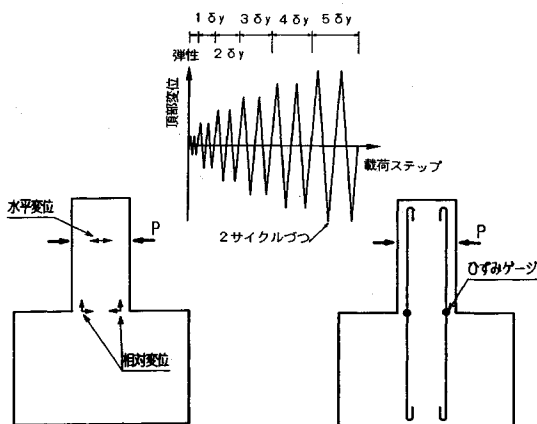
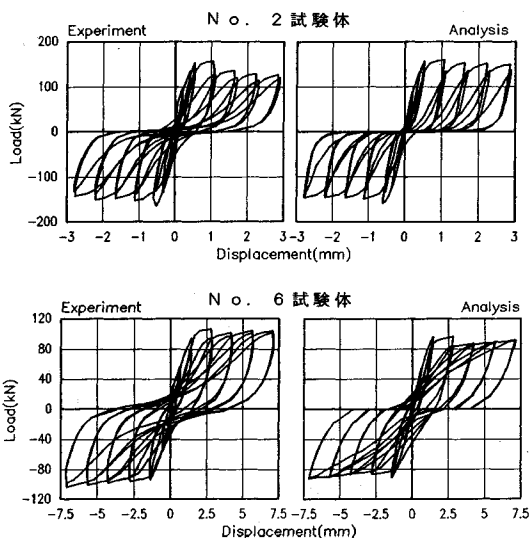


図-2 計測方法と載荷方法

No. 2~6 試験体の載荷パターンは正負交番であり、鉄筋降伏時の水平変位 (δ_y) の整数倍の変位をそれぞれ 2 回ずつ、 $5\delta_y$ まで繰り返すこととした。No. 1 試験体では、片振りの繰り返し載荷を行った後、試みに、 $5\delta_y$ 変位で正負交番載荷を 3 回繰り返した。なお、鉄筋降伏前に、ひびわれ発生時および鉄筋降伏変位の 7~8 割の変位時に、それぞれ 1 回の正負交番載荷を行った。載荷パターンを図-2 に示す。

(3) 解析モデル検証を目的とした計測

主な計測項目は、鉄筋ひずみ、ひびわれ面の相対変位



(a) 試験結果 (b) 解析結果

図-3 荷重-変位関係

(せん断ズレ・開口変位)、加力点の水平変位である。これらはすべて、今回開発した一般化離散ひびわれモデルによって解析的に予測可能なものである。鉄筋ひずみの測定にはひずみゲージを用い、計測位置は、柱脚部のひびわれ位置のみとした(図-2)。ひびわれ面の相対変位の測定は非接触型の高性能変位計を用いて行い、水平変位は接触型の変位計を用いた。図-2に、相対変位と水平変位の測定位置を示す。

3. RC ひびわれ面における履歴特性と靱性

(1) 正負交番載荷に対する応答

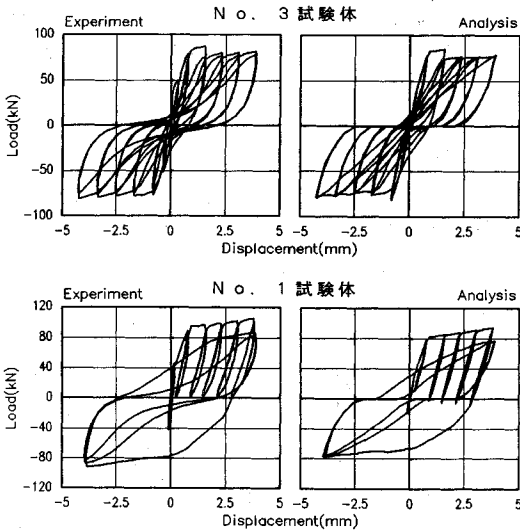
図-3 (a) に示された、No. 2, 6 正負交番載荷試験体の荷重-加力点水平変位関係(以下、荷重-変位関係と記す)は、典型的な逆 S 型になっており、ひびわれが柱脚部に限られているにもかかわらず、エネルギー吸収能力がかなり低いことが観察された。その他の試験体も同様の変形性状を示しているため、個々の説明は省略し、試験結果を表-2 に示すにとどめる。これらを基に、正負交番載荷を受けるひびわれ面の履歴特性の主な特徴をまとめると、以下ようになる。なお、載荷方向については、最初に降伏を経験した変位方向を正側、その逆方向を負側と定義する。

1) 正側載荷の $3\delta_y$ ループの最大荷重は、 $2\delta_y$ ループのそれに比べて大きく低下しており、その結果として、 $2\delta_y$ ループ時に最大耐力を記録する。負側載荷では、 $3\delta_y$ ループ時の荷重低下は顕著でなく、最大耐力を記録する変位ループは、試験体によってまちまちである。

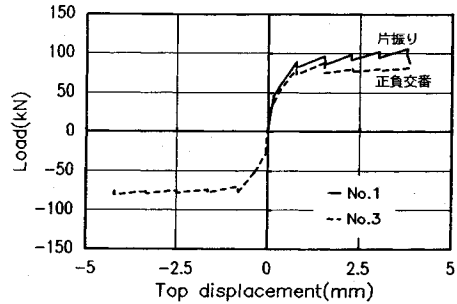
2) a/d が小さい試験体、特に a/d=0.5 では、 $3\delta_y$ ループ以降は、変位レベルが大きくなるにしたがって、

表一 試験結果一覧

試験体	載荷方向	最大耐力 (kN)	最大耐力時変位	各ループの最大荷重 (kN)									
				1 δy		2 δy		3 δy		4 δy		5 δy	
				1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
試験結果	No. 1 正側	105.7	5 δy	88.9	82.1	96.4	86.1	98.7	91.2	102.0	94.4	105.7	97.7
	No. 2 正側	157.8	2 δy	154.1	136.8	157.8	127.7	136.7	121.0	129.4	115.2	127.4	120.5
		負側	-164.6	1 δy	-164.6	-130.9	-153.1	-137.6	-148.5	-139.3	-151.4	-138.6	-142.9
	No. 3 正側	87.5	2 δy	79.3	72.7	87.5	75.1	80.3	76.6	80.5	77.9	81.8	79.0
		負側	-80.9	5 δy	-76.9	-70.0	-77.9	-73.9	-78.1	-75.2	-79.2	-76.5	-80.9
	No. 4 正側	64.4	2 δy	56.8	52.2	64.4	54.1	56.3	52.7	-	-	57.5	56.1
		負側	-60.4	5 δy	-59.0	-54.3	-56.7	-53.8	-55.7	-54.4	-	-60.4	-59.2
	No. 5 正側	87.5	2 δy	144.4	136.0	152.4	131.8	143.2	134.7	141.3	133.2	142.5	135.2
		負側	-139.5	5 δy	-137.6	-131.6	-132.1	-125.6	-133.9	-126.0	-130.5	-128.7	-139.5
	No. 6 正側	106.7	2 δy	94.6	83.6	106.7	94.3	101.9	97.8	104.5	101.4	104.6	102.0
		負側	-103.7	5 δy	-93.8	-87.1	-96.9	-91.0	-98.2	-93.9	-101.7	-97.3	-103.7



(a) 試験結果 (b) 解析結果
図一四 荷重-変位関係



図一五 No. 1, 3の包絡線 (試験結果)

最大荷重が徐々に低下する。

3) 負側載荷の最大耐力は、正側載荷の最大耐力より小さい。すなわち、後から降伏した側の最大荷重が小さくなる。

4) 同一の変位レンジ内での1サイクル目から2サイクル目に移行した際に、最大荷重は大きく低下するが、2サイクル目から3サイクル目の荷重低下は比較的小さい。

5) 鉄筋降伏以前の各サイクルでの荷重低下はそれほど顕著ではない。

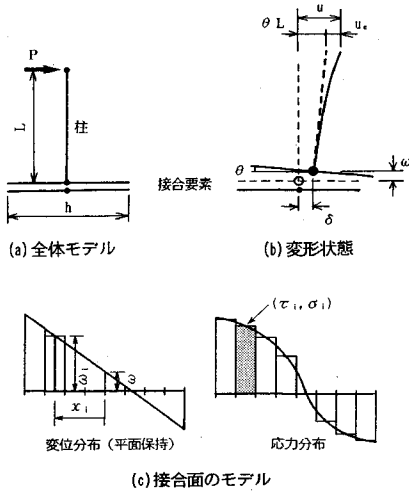
上記特徴は、RC橋脚の正負交番載荷試験体でも同様に指摘されており³⁾、本試験体の履歴特性と橋脚試験体の履歴特性は定性的に類似している。橋脚等のRC部材の正負交番試験の復元力特性を支配している要因は、コンクリートの圧縮に対する履歴特性、ひびわれ面でのせん断伝達、鉄筋抜け出しの履歴特性など多数あり、し

かも、複数のひびわれが発生することを考えると、本試験のような単一ひびわれ面の履歴特性とRC部材の復元力特性を同一レベルで論ずることはできない。しかし、RC部材と単一ひびわれ面の履歴特性が類似していることから、単一ひびわれ面の履歴特性がRC部材の復元力特性に少なからず影響を及ぼしているといえよう。RC部材の全体挙動を定量的に把握するためには、離散ひびわれモデルを組み入れた接合要素を複数、空間的に配置することが必要であるが、まず、単一ひびわれ面の履歴および復元力特性を正確に把握しておくことが肝要である。

(2) 片振り載荷に対する応答

図一四(a)に片振り載荷された試験体No.1と、それに対応する正負交番載荷された試験体No.3の荷重-変位関係を示す。また、図一五に両試験体の荷重-変位関係の包絡線を比較したものを示す。片振り載荷では、同一変位ループ内での1サイクル目から2サイクル目での荷重の低下割合が少ない。ところが、交番載荷では、1サイクル目と2サイクル目に大きな荷重低下が見られる。さらに、交番載荷試験体では、変位レベルが大きくなるにしたがって、最大荷重が徐々に低下しているのに対して、片振り載荷では、鉄筋降伏移行も、徐々に荷重が増加しているのである。

一般のRC部材では、片振り載荷の包絡線は単調載



図一六 解析モデル

荷時のそれに近く、正負交番載荷の包絡線は単調載荷時に比べて低下することが報告されているが^{1), 2)}、同様の現象が一本のひびわれに支配される部材の履歴特性にも現れることが、確認された。

異なる履歴特性の現れる理由は、RC ひびわれを構成している材料の変形履歴依存性に依ることは明らかである。これらが、いかに定量的に関連しているかを解明するには、実験的な検討では限界がある。解析的アプローチを採用することが不可欠と考えられる。

4. 接合要素モデルによる履歴特性の検討

本章では、一様応力場に対する離散ひびわれモデル⁸⁾を、曲げとせん断を同時に受けるひびわれ面を代表する、一般化接合要素の定式化に応用する。これを基に、モデルの検討を行うとともに、RC ひびわれ面での履歴特性の解明に応用する。

(1) 一般化接合要素の定式化

解析モデル作成にあたって、以下の仮定を設けた。

- ① 柱部にはひびわれが発生しないことから、試験体の変形を、柱本体の弾性変形と柱脚部のひびわれ断面の変形の2つに大別する。
- ② コンクリート部の変形はひびわれ幅に対して十分小さいと考えられることから、ひびわれ断面に平面保持が成立する。
- ③ 柱脚部のひびわれ断面を微小区間に細分割し、各微小区間内では一様応力場の離散ひびわれモデルが成立する。

図一六に解析モデルを示す。②の仮定から、ひびわれ面の自由度は、滑り変位 δ 、平均開口変位 ω 、回転角 θ の3つである。載荷点の水平、鉛直変位を、それぞれ u 、 v とすると、

$$u = \delta + \theta L + u_e, v = \omega \dots \dots \dots (1)$$

が成立する。ここに、 u_e は柱部の弾性変形による水平変位、 L は載荷点からひびわれ面までの距離である。

①の仮定より、柱部を弾性片持梁としてモデル化し、せん断変形を考慮すると、次式が成立する。

$$u_e = PL^3/3EI + PL/GA \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 E : コンクリートの縦弾性係数

G : コンクリートのせん断弾性係数

I : 柱部の断面2次モーメント

A : 柱部の断面積、 P : 載荷点での水平荷重

ひびわれ断面の第 i 区間のせん断変位 δ_i と局所開口変位 ω_i は、 i 番目の微小区間の断面図心からの距離を x_i とすると、②の仮定より、

$$\delta_i = \delta, \omega_i = \omega + x_i \theta \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる(図一六)。本研究で用いる離散ひびわれモデルはせん断変位と開口変位に対して定式化されたものであり⁸⁾、③の仮定を用いると、ひびわれ面の第 i 微小区間の応力は次式で表される。

$$\tau_i = \tau(\delta_i, \omega_i), \sigma_i = \sigma(\delta_i, \omega_i) \dots \dots \dots (4)$$

したがって、微小区間の長さを Δx_i とすると、ひびわれ断面の曲げモーメント M 、せん断力 V 、軸力 N は、それぞれ δ 、 ω 、 θ の関係として、

$$\left. \begin{aligned} V &= b \sum \tau_i \Delta x_i = V(\delta, \omega, \theta) \\ N &= b \sum \sigma_i \Delta x_i = N(\delta, \omega, \theta) \\ M &= b \sum (x_i - h/2) \sigma_i \Delta x_i = M(\delta, \omega, \theta) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

で表される。ここに、 b は奥行き方向の長さであり、 h はひびわれ断面の長さである。なお、本研究では、ひびわれ面の断面形状として、矩形断面を前提としており、 b は定数として扱う。

以上を整理すると、モデルの全自由度は $(\delta, \omega, \theta, u_e)$ の4個であり、各自由度に対する一般力 (V, N, M, P) との間に成立する支配式が式(2)、(5)である。構成材料モデルが非線形であるため、つり合い解を求めるためには繰り返し計算が必要となる。載荷点の変位制御によって解析を行う場合の手順を以下に示す。

頂部変位 u が $u = u_0$ となる時のつり合い解を求めることは、 $(\delta, \omega, \theta, u_e)$ の4個を未知数とする以下の非線形連立方程式を解くことに帰着する。下式の初めの3式は、柱部の力のつり合いから導かれるものである。

$$\left. \begin{aligned} V - P &= 0, N = 0, M - PL = 0 \\ \delta + \theta L + u_e &= u_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

この非線形連立方程式の解法としては、断面中立軸を繰り返し計算によって求める方法等、いくつか考えられるが、有限要素解析に組み込む際の拡張性を考慮して Newton-Raphson 法を用いる事とした。

変位 $(\delta^1, \omega^1, \theta^1, u_e^1)$ を式(6)の近似解とした場合、より精度の高い第二近似解 $(\delta^2, \omega^2, \theta^2, u_e^2)$ を得ると

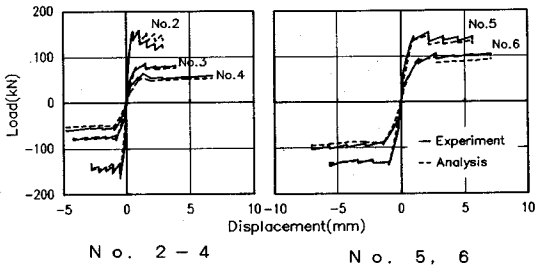


図-7 各試験体の包絡線

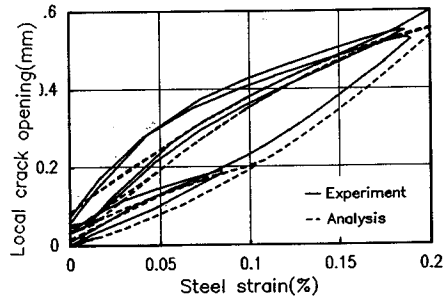


図-8 ひびわれ幅-鉄筋ひずみ関係 (No.3)

めの変位修正量 ($\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta\theta, \Delta u_e$) は, $(\delta^1, \omega^1, \theta^1, u_e^1)$ を中心として式 (6) をテーラ展開することによって得られる。例えば, 第一式 ($V-P=0$) の場合,

$$V(\delta^1 + \Delta\delta, \dots, \theta^1 + \Delta\theta) - P(u_e + \Delta u_e) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

を $(\delta^1, \omega^1, \theta^1, u_e^1)$ 回りでテーラ展開すると,

$$V(\delta^1, \omega^1, \theta^1) + \partial V / \partial \delta \cdot \Delta\delta + \dots + \partial V / \partial \theta \cdot \Delta\theta - P(u_e^1) - \partial P / \partial u_e \cdot \Delta u_e = 0 \dots\dots\dots (8)$$

となり,

$$\partial V / \partial \delta \cdot \Delta\delta + \dots + \partial V / \partial \theta \cdot \Delta\theta - \partial P / \partial u_e \cdot \Delta u_e = P^1 - V^1 \dots\dots\dots (9)$$

を得る。ここに, V^1, P^1 は変位 $(\delta^1, \omega^1, \theta^1, u_e^1)$ 時の一般化力であり, 例えば, $V^1 = V(\delta^1, \omega^1, \theta^1)$ である。他の式に対しても同様の処理を行うことにより, 結局, 次式を得る。

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & -D_e \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & -D_e L \\ 1 & 0 & L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta\theta \\ \Delta u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^1 - V^1 \\ -N^1 \\ P^1 L - M^1 \\ u_0 - \delta^1 - \theta^1 L - u_e^1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ここに, $D_e, D_{11}, \dots, D_{33}$ は, 式 (2), (5) を各自由度で偏微分することによって計算される ($D_{11} = \partial V / \partial \delta$ 等)。

式 (7) の左辺は本解析モデルの接線剛性マトリクスであり, 右辺は不平衡ベクトルと考えることができる。式 (7) を解くことによって得られる第二近似解を, 新たな第一近似解とみなし, 式 (7) を用いて修正解を求める手順を繰り返すことによって収束解を得ることができる。式 (7) の厳密なつり合い解は, 不平衡ベクトルがゼロとなった時に得られるが, 下式の収束判定条件を用いて, 不平衡ベクトルの大きさが許容範囲以内になった時をもって, 収束解が得られたものと判断し, 次の変位ステップに移ることとした。

$$|(P-V)/A| + |N/A| + |(M/L-P)/A| < R \dots\dots\dots (11)$$

応力と同じ次元を持つ R (MPa) が 0.05 程度の値であれば, 十分な精度で収束解を得ることができることが確認できたため, $R=0.05$ を用いて解析を行った。

(2) 解析結果と試験結果の比較

a) 包絡線

図-7 に正負交番荷重された全試験体の荷重-載荷点水平関係の包絡線を示す。解析と試験結果はよく一致しており, 解析モデルが十分な精度をもっていることが確認できる。以下では, 代表的な試験体を対象に, 解析モデルの精度を詳細に検証し, その後, 正負交番荷重および片振り荷重による復元力特性の相違について, 断面内力の構成からその原因を解明する。

b) 繰り返し荷重時の荷重-変位関係

a/d が小さいほど, ひびわれ面でのせん断伝達応力が大きくなり, コンクリートモデルが全体挙動に及ぼす影響が大となる。また, a/d が大きいほど, ひびわれ面での曲げ挙動が卓越するため, 鉄筋の抜け出しモデルが全体挙動に対して支配的となる。したがって, a/d の大小と解析精度を観察することによって, 鉄筋モデルとコンクリートモデルの精度を検査することができる。 a/d が 0.5 (No.2 試験体) と 1.5 (No.6 試験体) に対する解析結果を図-3 (b) に示す。なお, ひびわれ発生後の挙動が主な検討対象であるので, ひびわれが最初から入っているものとして解析を行ったため, 初期剛性が試験結果と異なっている。本試験は正負交番荷重であり, a/d が最も小さい試験体でも, 鉄筋降伏荷重の 2~3 割時にひびわれが貫通するため, 以降の挙動への影響はほとんどないと考えられる。

解析は, 第 3 章で述べた試験結果の履歴特性の特徴をよくとらえている。同一変位ループ内では, 1 サイクルから 2 サイクル目で荷重低下が著しい点や, 正側荷重の 3 δ_e 時の最大荷重低下が著しい点等よく一致している。両試験体に対する解析精度に有意な差は認められず, 本分散ひびわれモデルの適用範囲が十分広いことが確認できる。特に, a/d が非常に小さい No.2 試験体において, 鉄筋降伏後の耐力低下傾向についても比較的よく一致している。さらに, a/d が小さい試験体ほど, その履歴曲線が逆 S 字型のループとなる傾向についても, 解析はこれをよく表現している。このことは, 本モデルが繰り返し荷重にともなう復元力特性の変化のメカニズ

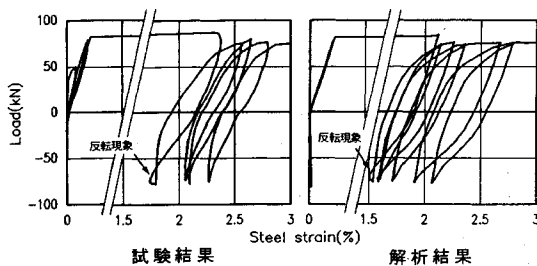


図-9 鉄筋ひずみ-荷重関係 (No. 3)

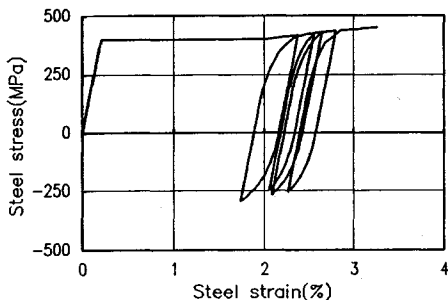


図-10 鉄筋の応力-ひずみ関係 (解析値)

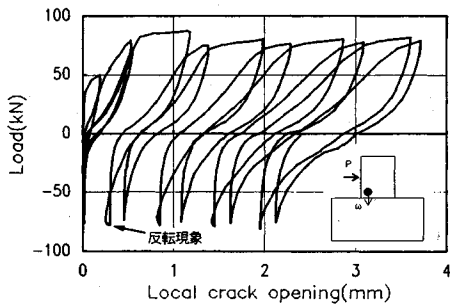


図-11 鉄筋位置における局所ひびわれ幅-荷重関係(試験結果)

ムを定量的に検討する手段となり得ることを意味している。これは本研究の主眼であり、後章でさらに詳細に議論する。

c) 鉄筋ひずみ

図-8にNo.3試験体の鉄筋弾性範囲でのひびわれ幅-鉄筋ひずみ関係を示す。解析は試験結果とよく一致しており、一般化接合要素の基礎たる離散ひびわれモデルはひびわれ幅が一樣の場合に対してのみ検証されたものであったが、本試験のようにひびわれ幅が一樣でない場合についても十分、適用可能であることが分かる。

さらに、図-9にNo.3試験体の鉄筋降伏以降の鉄筋ひずみ-荷重関係の一例を示す。試験結果と解析は、鉄筋降伏以降についても比較的良好一致しており、降伏以降のモデルの妥当性が確認できる。ひずみの測定値から加藤モデル¹¹⁾を用いて計算される鉄筋応力を図-10に記すが、鉄筋圧縮時に降伏応力の7割程度の圧縮応力が

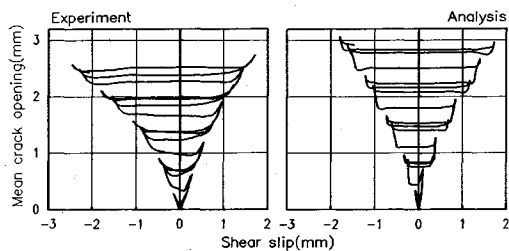


図-12 平均開口変位-ズレ変位関係 (No. 3)

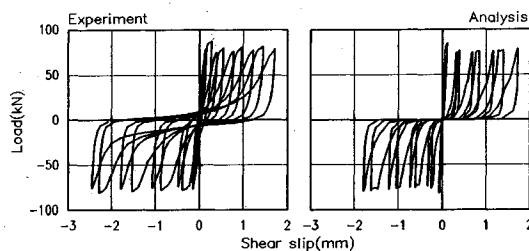


図-13 せん断ズレ変位-荷重関係 (No. 3)

作用しており、鉄筋降伏後については、圧縮鉄筋が負担する応力を無視できないことが分かる。鉄筋の圧縮応力が単一のひびわれ面の復元力特性に及ぼす影響については、後章にて詳しく論ずる。

図-9を詳細に観察すると、曲げ圧縮を受けている鉄筋のひずみが圧縮から引張増分に転じている部分があり、曲線が小さいループを描いている箇所が認められ、荷重の向きから推定される動きと実際の鉄筋ひずみの動きが反転する現象が起きている。解析結果にも同様の反転現象が現れており、さらに、鉄筋位置での局所ひびわれ幅と荷重の関係(図-11)においても同様の反転現象が現れていることが確認できる。

d) ひびわれ面の相対変位

せん断ズレの発生は、一般に、開口変位を同時に誘起する¹²⁾(ダイレイタシンシー効果)。同時に作用する高せん断力の作用とダイレイタシンシー効果によって、曲げ圧縮側ひびわれ面が開口する機構が考えられる。解析結果が、このようなせん断ズレに起因する変位の反転現象を定量的にも予測していることは、高応力レベルでのコンクリートモデル¹⁰⁾が妥当なものであることを示している。なお、この現象はあくまで、水平荷重と局所変形との間で生ずる現象であり、ひびわれ面で負の仕事が行われていることを意味するわけではない。

図-12は、ひびわれ面の平均開口変位-せん断ズレ関係の一例を示したものである。正負交番載荷を受けるRC部材は、繰り返回数が増えるにつれて伸長現象が顕著になることが一般に知られているが、本試験体でも、同様の現象が起きていることが確認できる。解析と試験結果は比較的良好一致しているが、解析のせん断ズレ

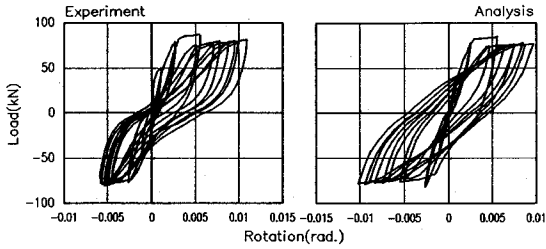


図-14 回転角-荷重関係 (No. 3)

変位が若干小さくなっている。a/d が小さい試験体では、ひびわれ周辺コンクリートの弾性変形から、ひびわれ面の平面保持が成立していない等の原因が考えられるが、その原因は明確ではない。ただし、解析と試験結果の差はわずかであり、本解析が実用上十分な精度を持つものと考えられる。

e) ひびわれ面の相対変位と荷重関係

図-13は、ひびわれ面のズレ変位と水平荷重の関係の一例を示したものである。試験結果と解析は概ね一致していると言える。ただし、解析では、荷重方向が反転する際に、剛性が全くゼロとなる区間が存在する点に、差異が見られる。この区間は、図-12の平均開口変位-せん断ズレ曲線が水平となっている区間に対応しており、この区間ではひびわれ面の接触が全く生じていないため、剛性が完全にゼロとなるのである。試験結果でも、このようなスリップ現象は認められるが、若干の剛性がみられ、荷重がわずかに上昇している。解析では、鉄筋のせん断剛性を考慮していないことも一因と考えられるが、再接触に対してひびわれ応力伝達モデルの精度向上にまだ余地があると、著者らは考えている。ただし、この区間の剛性は試験結果でも非常に小さく、繰り返し荷重にともなう見かけ上の靱性低下や復元力特性の解析には、大きな問題とならないと思われる。

図-14はひびわれ面の回転角θと荷重の関係を示したものである。この履歴曲線は紡錘型に近く、特に解析結果は典型的な紡錘型である。せん断ズレと荷重の関係に見られたスリップ現象は認められない。荷重変位曲線が典型的な逆S型ループを描くことを述べたが、これはひびわれ面のせん断ズレ変位成分に大きなスリップ現象が生じることに起因していることが分かる。

5. 正負交番荷重と片振り荷重に対するせん断抵抗機構

(1) 変形性状

図-4 (b) に正負交番荷重された試験体 No. 3 と片振り荷重された試験体 No. 1 の荷重-水平変位関係の解析結果を示す。解析結果は片振り荷重時と正負交番荷重時の復元力特性の違いをよく捉えている。No. 1 試験体で

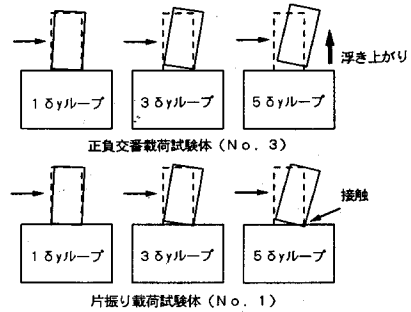


図-15 片振りと正負交番荷重時の変形状態の違い (試験結果)

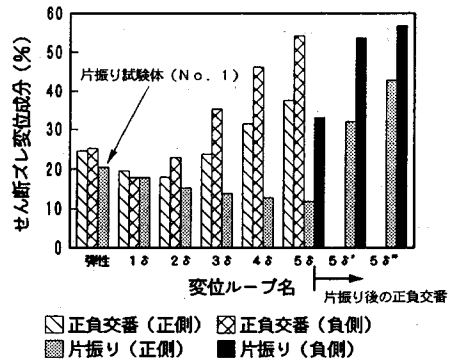


図-16 ズレ変位が全変形に占める割合 (試験結果)

は、片振り荷重後、正負交番荷重を2サイクル行ったが、正負交番荷重に移った時点から、急激に剛性が低下し、荷重初期から正負交番荷重を行った No. 3 試験体の荷重-変位曲線に近づく傾向が見られる。解析もこの特徴を精度よく表現している。

No. 1 試験体の解析による荷重値が試験結果に比べて1割程度低くなっている等、若干の乖離が認められるが、荷重-変位関係の曲線形状はほとんど一致しており、本解析モデルが、解析結果を用いて単一ひびわれ面を有するRC部材の復元力特性と靱性低下の検討を行うに十分な精度を有しているものと判断される。

図-15は、両試験体の変形状態を各荷重段階ごとに拡大して示したものである。正負交番 No. 3 試験体では、鉄筋降伏後の各変位ループの最大荷重時に圧縮側のひびわれが完全に閉じていないことがわかる。さらに、圧縮側ひびわれ幅は荷重変位が大きくなるとともに増加する傾向がみられる。一方、片振り荷重の No. 1 試験体では、このような現象はみられず、圧縮ひびわれは常に閉じており、引張側のひびわれ幅のみが鉄筋の降伏程度に応じて増加している。

ひびわれ面のズレ変位に注目すると、正負交番荷重された試験体はひびわれ面に大きなズレ変位が発生しているのに対して、片振り荷重された試験体では、ズレ変位はほとんど発生していない。このようなことから、正負

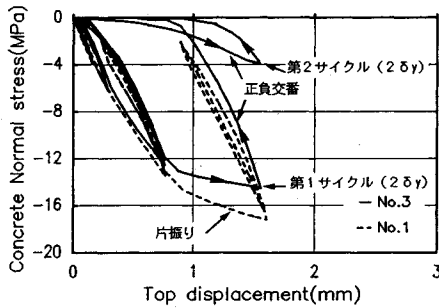


図-17 圧縮縁コンクリートの応力 (試験結果)

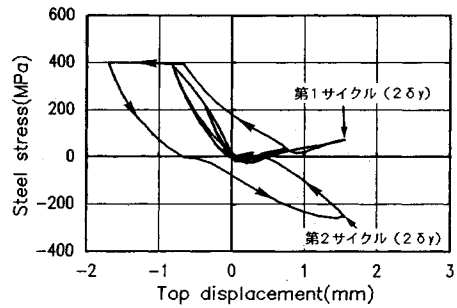


図-18 鉄筋の応力履歴 (解析結果)

交番载荷と片振り载荷では、ひびわれ面のせん断変形性状が大きく異なっていることが分かる。

No. 1, 3 試験体とも柱部にひびわれは発生していないことから、試験体の非弾性変形はひびわれ面の非弾性変形によるものと考えられる。したがって、試験体の载荷点水平変位は、鉄筋の抜け出しによるひびわれ面の回転に起因する変位 (以下、回転成分と呼ぶ) とひびわれ面のズレによる変位の 2 つに分離することができる。

図-16 は、両試験体の変形の中で、ズレ変位成分が占める割合を示したものである。正負交番载荷試験体に注目すると、鉄筋降伏前は、回転成分が変形の大部分を占めているが、変位レベルが大きくなるにしたがって、ズレ変位成分が増加し、 $5\delta_y$ ループでは、ズレ変位成分が 60% 程度までに達している。一方、No. 1 試験体の片振り载荷時に注目すると、鉄筋降伏後も曲げ成分が変形の大部分を占めており、その割合もほぼ一定であることが分かる。本試験体は、 a/d が 1.0 であり、作用せん断力が曲げに対して比較的大きいため、ズレ変位成分が大きくなることはある程度予想されるが、片振り载荷と正負交番载荷では、ズレ変位成分の割合が全く異なることは注目に値する。すなわち、変形の成分が、正負と片振り载荷では極めて異なるのである。また、No. 1 試験体の片振り载荷後の正負交番载荷では、ズレ変位成分の割合が急速に No. 3 試験体のそれに近づいており、正負交番载荷はひびわれ面のせん断ズレ成分を誘起することがわかる。

(2) 鉄筋およびコンクリート面に作用する応力

正負交番载荷時と片振り载荷時で変形性状が大きく異なることの原因を検討するため、ここでは、ひびわれ面の応力状態に注目する。試験結果からひびわれ面の応力状態を推定することは困難である。しかし、解析では、材料に作用する応力を明確に算出し、機構の解明に用いることができる。本問題に対して解析的アプローチを採用する最大の利点がこの点にある。

図-17 は、 $2\delta_y$ ループの 1 サイクル目と 2 サイクル目の正載荷時に圧縮側となる圧縮縁コンクリートの負担直応力を比較したものである。正負交番载荷では、2 サ

イクル目でコンクリートに作用している直応力が大きく低下していることが分かる。これに対して、片振り载荷では、このような低下現象は顕著でない。先に、正負交番载荷時の復元力特性の特徴として、 $2\delta_y$ ループの 2 サイクル目で水平荷重が大きく低下することを述べたが、見かけ上の靱性低下は、コンクリートが分担している直応力が 1 サイクル目と 2 サイクル目で大きく異なっていることに起因していると推定される。

図-18 は、正載荷時に圧縮側となる鉄筋の $2\delta_y$ ループまでの载荷点変位-鉄筋応力関係を示したものである。 $2\delta_y$ ループ 1 サイクル目と 2 サイクル目で、発生している圧縮応力が大きく異なっていることが分かる。正負交番载荷時には、圧縮側鉄筋も、その直前の引張载荷によって、大きな引張塑性変形を受けるため、解析上、次の正側载荷時にひびわれが閉じる際に、大きな圧縮応力が鉄筋に作用するのである。本試験はひびわれ面に軸力を作用させていないため、ひびわれ面でのつり合いを考えると、鉄筋応力とコンクリート直応力の総和は、全断面でゼロとならなければならない。圧縮側鉄筋に大きな圧縮応力が発生すれば、当然、コンクリートの直応力は、圧縮鉄筋の負担分だけ低下する。したがって、ひびわれ面でのせん断剛性は大きく低下し、大きなせん断ズレ変位がこれに関連して導入され、変形モードがいわゆる逆 S 字型に移行したのである。

正負交番载荷時には、鉄筋の履歴特性にともなう、圧縮側鉄筋の圧縮応力負担分を無視することはできないのである。片振り载荷時には、圧縮側鉄筋は塑性変形を受けないため、圧縮側鉄筋に発生する応力は無視し得るほど小さく圧縮降伏後のループでも、コンクリートの分担直応力にそれほど大きな変化は生じない。実際、コンクリートの直応力 σ_c とせん断応力 τ_c をひびわれ断面で積分することによって得られるコンクリートの負担軸力 N_c と負担せん断力 V_c の関係を図-19 に示すが、正負交番载荷では、鉄筋降伏後のループである $2\delta_y$ ループ以降で、 N_c が大きく低下していることが分かる。曲げ圧縮によるひびわれ面の拘束力の低下に伴い、大きなせん断変位が導入され、復元力特性が大幅に変化すること

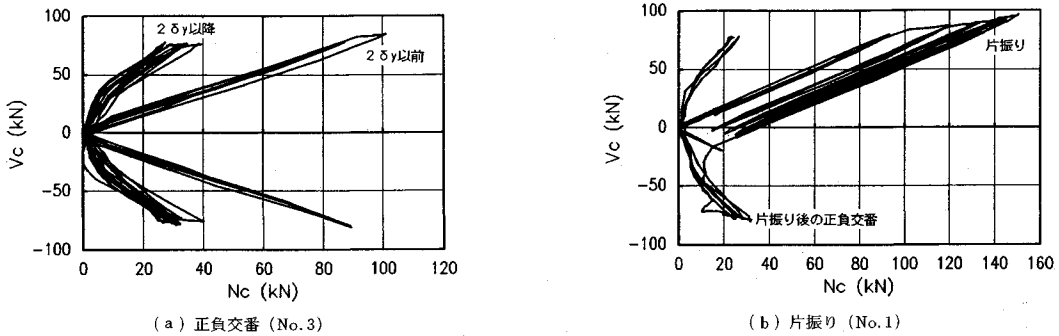


図-19 コンクリートの負担荷重の比較

は言うまでもない。

同様に、正負交番載荷時に同一変位ループ内の2サイクル目で荷重が大きく低下する原因も、主に、圧縮側鉄筋の応力状態の違いにある。すなわち、「コンクリートの直応力負担分が1サイクル目比べて低下し、それに伴うせん断剛性の低下が、靱性および復元力特性を大きく変化させている」という解釈が、解析による結論である。1サイクル目で新たな引張塑性変形を受けた鉄筋も、2サイクル目ではほぼ応力の再分配を終了し、3サイクル目では断面内の応力状態は落ちつくため、3サイクル以降の荷重低下現象はそれほど進行しないのである。

なお、離散ひびわれモデルの構成モデルは、繰り返しによる材料劣化挙動、ならびに時間効果はモデル化されていない。上記の現象は鉄筋とコンクリートの経路依存性を組み合わせた複合効果として、解析的に説明されたものである。

6. 結 論

従来、正負交番載荷を受けるRC部材と片振り載荷下の部材とでは、靱性やエネルギー吸収能力が異なることが、数多くの部材実験から認められてきた。この理由が、主として、構成材料に作用する応力振幅や時間効果の違いと、それに伴う材料特性の劣化度の差異に求められてきたと思われる。この要因はまさに材料レベルでは確実に存在するものであり、部材レベルでの議論においても当然、考慮されなければならない。

一方、本研究で解析的に検討した通り、経路依存性の異なる2つの材料（鉄筋とコンクリート）を組み合わせた所産として生ずる構造的機構、すなわち、繰り返し載荷のパターンによって部材中のひびわれ面の靱性と復元力特性が大きく変化する機構も、今後明確に考慮していく必要がある。現実の柱等の交番繰り返し載荷では、複数の交差するせん断ひびわれが存在し、本研究が対象とした条件以上に複雑である。したがって、RC部材の交番載荷における見かけ上の靱性低下を、構成材料の履歴特性の複合機構すべてに原因を求めるのは、早計である。

しかし、ひびわれ面での応力伝達と、鉄筋の引き抜け履歴特性の複合効果のみを考慮することで、一本の離散ひびわれを含む、単純な柱の靱性と復元力特性が精度よく予測されたことは、本研究の眼目としたところである。一般のRC柱部材の復元力特性と靱性の解明においても、材料の繰り返し劣化とともに、載荷パターンによるせん断抵抗機構の変化とそれに伴う変形モードへの影響を、今後さらに検討していく予定である。

以下に本研究の結論をまとめる。

1) 著者らが開発してきた、等応力場における離散ひびわれモデルを、より一般化した曲げを有する場合に拡張し、RC部材中の離散ひびわれモデルに適用できる形にまとめた。モデルを検証する目的で、一本の離散ひびわれが部材の非弾性挙動を支配する柱供試体を意図的に作製し、交番および片振り載荷に対する応答を実験的に求めた。

2) 解析では繰り返し載荷による材料特性劣化は無視され、ひびわれ面での応力伝達および鉄筋の引き抜け挙動の経路依存性のみが考慮された。異なる経路依存性を持つ材料の組合せ効果として、正負および片振り載荷に対する履歴依存性が、解析によって精度よく追跡できることが確認された。

3) 正負交番載荷を受ける場合、過去に曲げ引張で導入された塑性変形のために、再度曲げ圧縮を受ける際に、鉄筋が大きな圧縮力を伝達する。このため、コンクリート面の負担圧縮力は低減し、ひびわれ面のせん断剛性も低下する。その結果、ひびわれ面に相対的に大きなせん断ズレが導入されることが、実験および解析によって示された。

4) 片振り載荷の場合、曲げ圧縮側の鉄筋は引張塑性履歴を受けないため、常に高い圧縮力がコンクリートひびわれ面に作用することが解析的に認められた。その結果、せん断ズレはほとんど発生しない、すなわち、曲げ卓越型の変形を示すことが分かった。

5) コンクリートと鉄筋の材料履歴特性を組み合わせた結果として、外力に抵抗する機構が繰り返し載荷のバ

ターンによって変化し、併せて変形モードと部材の靱性・復元力特性が変化することが解析的に認められた。

謝 辞：本研究を遂行するにあたって東京大学教授 岡村 甫博士から始終有益なご指導を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 太田 実：繰り返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 282，pp. 65～74，1979年12月。
- 2) 石橋・吉野：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究，土木学会論文集，No. 390，V-8，pp. 57～66，1988年2月。
- 3) 中村・鈴木・尾坂：交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の履歴特性及び靱性評価，コンクリート工学年次論文報告集，No. 11-2，pp. 269～274，1989年。
- 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) 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9月。
- 6) 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。
- 7) 三島・山田・前川：正負交番載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，土木学会論文集，No. 442/V-16，pp. 161～170，1992年2月。
- 8) 三島・Bujadham, B.・前川・岡村：鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発，土木学会論文集，No. 442/V-16，pp. 171～179，1992年2月。
- 9) 三島・Bujadham, B.・前川：正負交番載荷に適用可能な RC 離散ひびわれモデルの開発とその適用範囲，土木学会論文集，No. 442/V-16，pp. 181～190，1992年2月。
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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。

(1991. 5. 23 受付)

THE ANALYTICAL APPROACH TO THE EFFECT OF CYCLIC LOADING ON THE REDUCED SHEAR STIFFNESS OF RC CRACK PLANES

Tetsuya MISHIMA, Natsuo HARA and Kohichi MAEKAWA

Loading tests under two sorts of cyclic loading paths on RC columns with a single discrete crack was carried out to investigate the effect of loading path on the restoring force characteristics and the ductility of RC members. The joint element based upon the discrete crack model is presented and is verified by these test results, which show that the joint element is applicable to a crack plane subjected to reversed cyclic shear and moment. Hereafter, analytical approach using the joint element is introduced and the discussion about the difference of restoring force characteristics between crack planes subjected to reversed cyclic loading and one-side cyclic loading is presented. Even though the constitutive models do not take account of material deterioration due to cyclic loading, it is shown that the model can explain the reduce ductility of a crack plane subjected to reversed cyclic loading and the analytical approach is verified to be effective for path-dependent ductility and energy dissipation.