

ひびわれを含む鉄筋コンクリート板要素の 一軸圧縮応力下における非線形挙動

NONLINEAR BEHAVIOR OF CRACKED REINFORCED CONCRETE
PLATE ELEMENT UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

宮原長久*・川上泰司*・前川宏一**

By Takehisa MIYAHARA, Taiji KAWAKAMI and Koichi MAEKAWA

In recent studies on prediction of the behavior of reinforced concrete structures, it has been reported that compressive strength of cracked concrete is lower than that of uncracked concrete. But the overall behavior and the mechanics as to the strength reduction were not clear.

In order to examine the strength reduction, the authors conducted the experimental research using hollow-cylinder type of reinforced concrete specimens.

The result shows that strength reduction can be expressed by the function of crack width and crack spacing. But within the experimental range, however, average tensile strain normal to crack uniquely decides the nonlinear behavior of cracked concrete.

Keywords: compressive strength, cracking, finite element method, reinforced concrete element, constitutive equations

1. 序論

鉄筋コンクリート構造物（以下RCと省略）の大型化・多様化が進む今日、従来の巨視的な一次元解析（設計）モデルからさらに一步進めて、構造物の二次元的あるいは三次元的形状と応力状態を考慮した非線形解析を設計に適用しようとする気運が高まっている。一方、RC構造の有限要素解析手法について研究が進められてきており、解析上の問題点も解決されつつある状況にある^{1),2)}。特に、面的な部材で構成されている容器・耐震壁・タンク等のRC構造物は、材料モデルの精度向上が直接、解析結果の信頼性に反映され、有限要素解析の設計への応用が最も期待されている構造形式の1つと考えられる。

面的な広がりをもつ部材で構成されているRC構造物は、一般にひびわれを含む鉄筋コンクリート有限要素を解析の出発点として、構造物の応答はそれらの集合体として解析される³⁾。したがって、この要素の面内、面外変形に対する断面力の予測が解析精度を大きく左右す

るのである。

鉄筋コンクリート面内応力構成式は、一般に1) 鉄筋の特性、2) ひびわれに挟まれたコンクリートの特性、3) ひびわれ面での応力伝達、4) 鉄筋とコンクリートとの付着とダボ効果の非線形な組合せとして記述される。この観点から、おのおのの機構に対して精力的な研究が進められている^{4)~6)}。これらの研究のうち、ひびわれ間のコンクリートの巨視的な構成式は、ひびわれ履歴のない、コンクリートの構成式と異なり、一般にひびわれ平行方向の剛性と強度が低下することが認められている^{7),8)}。しかしながら、ひびわれを有する鉄筋コンクリートの受ける応力状態や履歴、配筋ならびに寸法等が過去の研究において多岐にわたるため、ひびわれの存在のみに依存する低下のメカニズムや非線形挙動については、なお多くの未解明な部分を残しているのが現状である。

以上の背景から、RC有限要素の構成式を得るために基礎研究の一環として、本研究はひびわれ平行方向の一軸圧縮応力-ひずみ関係について焦点をあてて検討したものである。特に、一軸応力下といった単純な条件を設定することによって、ひびわれ平行方向の非線形挙動とひびわれ間隔・ひびわれ幅との関係を明確にしようとする点に本研究の特色がある。

* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科(同上)

2. 剛性・強度低下の影響因子

Collins らは、ひびわれを含む鉄筋コンクリート要素の圧縮強度が低下することを、ひびわれを含む要素の平均主ひずみの関数として初めて定量的に指摘した³⁾。この研究は、その後、RC はりのねじり理論¹⁰⁾や壁式構造物のせん断解析^{19)~21)}に大きな影響を及ぼした特筆すべきものとして位置づけられる¹⁾。また、ひびわれ平行方向の剛性と強度の評価は配筋、鉄筋降伏強度、荷重条件によっては RC 要素の面内耐力に支配的な要因となる場合があることが感度解析でも指摘されており³⁾、無視することができない。

しかし、従来提案してきたひびわれを含むコンクリートの圧縮破壊基準は適用範囲が明確ではなく、耐力の低下がいかなる機構とパラメーターに依存しているかも明らかでない。したがって、構成モデルを提案するにしても、どのような定式化（あるいは式の“形”）が現象論的に妥当であるかを議論することが重要であると著者らは考えている。

ここで、ひびわれを含むコンクリートの強度・剛性が低下する要因について過去の研究から推測してみたい。

(A) 局所的な応力の不均一性

ひびわれは大まかには引張主応力方向に直交して入るが、骨材の存在等で蛇行して導入されるため、ひびわれ間のコンクリートの境界は直線ではない（図-1 参照）。したがって、ひびわれにはほぼ平行の平均圧縮主応力を受けてもコンクリートの局所的な応力分布は一様ではなく、見掛けの耐力を低下させる方向に働くと考えられる¹¹⁾。

(B) 多軸効果

鉄筋の存在によって変形が拘束されるために、たとえ外力が一軸でも内的には多軸拘束を受け、耐力や韌性を

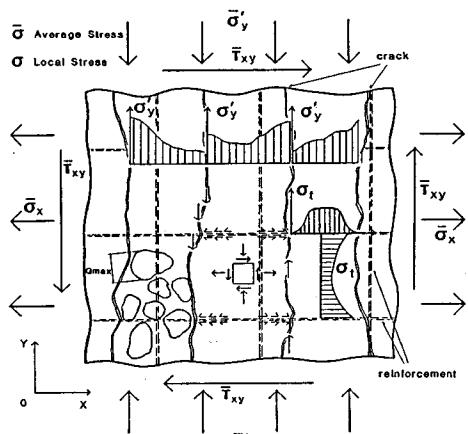


図-1 推定されるひびわれ間のコンクリートの応力状態

向上させる要因として働く。一方、鉄筋からコンクリートに付着によって伝達される引張応力、およびひびわれ面でのせん断伝達応力がひびわれ間のコンクリートに作用するため、一般に圧縮-引張応力状態になっている（図-1）。この多軸効果は、逆にひびわれ間のコンクリートの耐力を低下させる方向に働く¹²⁾。付着強度を高めるとひびわれ間のコンクリートに相対的に大きな引張応力が発生するため、見掛け上、破壊が早期に起こることが野口らの耐震壁のパラメーター解析¹³⁾で示されており、この影響因子を示唆するものとして興味深い。

(C) 寸法効果

圧縮供試体の寸法に対して骨材の最大寸法が大きくなると圧縮強度が低下することが指摘されている。ひびわれの発生によってひびわれ間隔に対する骨材寸法が相対的に大きくなるために同様の効果が現われ、強度を低下させることができると考えられる。これは、鉄筋コンクリート板要素の厚さ方向にも関係する可能性がある。

その他、鉄筋とコンクリートとの付着によって損傷が導入される効果も現在は不明である。以上のように、考えられる影響因子は数多いが、これらを個別に評価したひびわれ間のコンクリートの構成式は現段階ではまだ作成されていない。そこで、最も簡単な応力状態であり、かつ基本となる特性として、ひびわれ平行方向の鉄筋コンクリートの一軸圧縮応力下の非線形挙動がひびわれの状態によっていかに変化するかについて実験的検討を行った。

3. 実験

(1) 実験供試体

円周方向にのみ配筋された鉄筋コンクリート円筒供試体（外径 332 mm、厚さ 37 mm）に内圧を作用させて、ひびわれを供試体軸方向に導入した後、円筒軸方向に圧縮して応力-ひずみ関係を求めた。図-2 に供試体外形と鉄筋組の様子を示す。鉄筋の継手は重ね継手とし、継手部が供試体軸方向に集中しないようにそれぞれ分散させて配筋した。鉄筋の存在による拘束の影響を極力排除するため特に低い鉄筋比を採用し、0.3% から 0.9% とした。コンクリートの断面に対して鉄筋径が大きいと、応力集中やコンクリートの充填不良の原因となることを考慮して D3 鉄筋を使用し、供試体軸方向には組立鉄筋として D6 鉄筋 3 本のみを配置した。図-3 に各鉄筋比の配筋方法を示す。

供試体の成形精度および配筋精度はそれぞれ 0.5 mm と 1 mm である。この範囲内の誤差であれば供試体軸方向の一軸圧縮強度には影響を及ぼさない¹⁴⁾。

配筋状態および供試体断面の寸法を考慮して、粗骨材の最大寸法を 10 mm とした。使用したコンクリートの

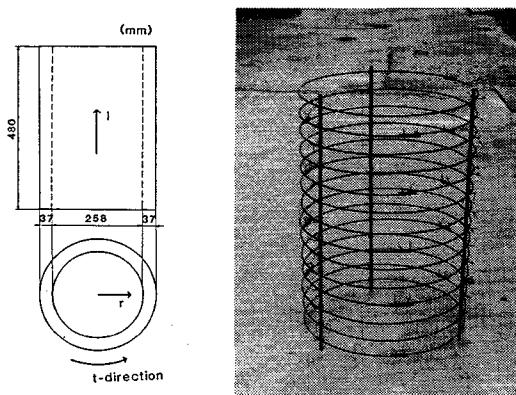


図-2 円筒形供試体寸法および鉄筋組手の配置状況

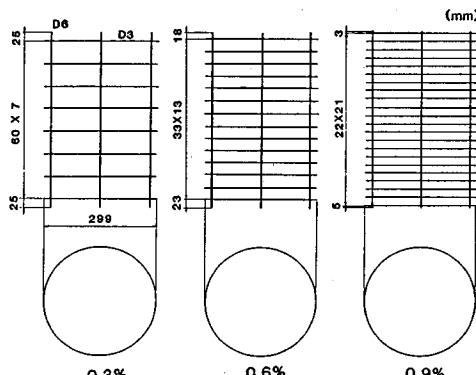


図-3 各鉄筋比における鉄筋組寸法

表-1 コンクリートの示方配合

配合 タイプ	W/C (%)	S/A (%)	単位量 kg/m ³			
			W	C	S	G
A	63	52	184	292	951	878
B	54	52	157	302	982	907

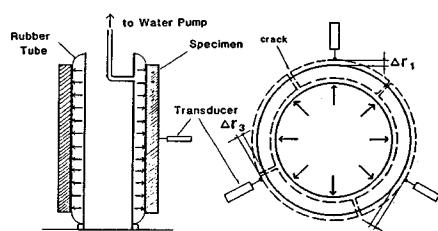


図-4 ひびわれの導入方法と平均ひずみの測定

配合を表-1に示す。コンクリートの打ち込みについては、型枠に木槌で打撃・振動を加えて入念に締め固めて作製し、湿潤養生2~4週間を経て実験に供した。

(2) 載荷方法

鉄製のガスパイプの外側に繊維補強ゴムを巻きつけた

内圧発生装置を製作し、これを供試体内部に装填しポンプで水を送ることによって圧力を加え、ひびわれを導入した(図-4)。所定のひびわれを導入した後に内圧を除荷して内圧発生装置を供試体から取り出し、変位制御型載荷装置によって供試体軸方向の一軸圧縮試験を行った。したがって、圧縮載荷中は圧縮軸直交方向に外力としての引張力は作用させていない。

一軸載荷では、載荷板と供試体端面の摩擦を除去するためにシリコングリースを塗布したテフロンシートを挿入した。なお、載荷板と供試体面の接触を均一なものとするために、供試体とシートの間に石膏ペーストを挟み、0.15 MPa程度の余圧をかけた状態で硬化させた後、載荷を開始した。載荷は変位制御で行い、約-20 μ/秒で除荷・再載荷を繰り返した。

(3) 計測

円周方向の平均ひずみは供試体厚さ方向のひずみが十分小さいと仮定できる場合は、変形適合条件から半径方向の平均ひずみに等しいとしてよい。そこで、ひびわれ導入時および一軸載荷時において図-4に示すように3点で半径方向のふくらみを測定し、その平均を基準長さ(半径)で除した半径方向の平均ひずみをもって、ひびわれ直交方向(円周方向)の平均ひずみ ϵ_t とした。なお、ひびわれ導入時の ϵ_t を特に ϵ_{tt} と定義する。

また、ひびわれ平行方向、すなわち供試体軸方向の平均ひずみを ϵ'_t とする。 ϵ'_t の値は、軸方向に取り付けた3か所の変位計の測定値の平均を基準長で除して算出した。また、軸圧縮荷重を供試体断面積で除した平均圧縮応力を σ'_t と定義する。なお、応力およびひずみの符号は引張を正とするが、ダッシュを付けると符号が反転するものとする。

4. ひびわれたコンクリートの圧縮変形性状

(1) ひびわれたコンクリートの応力-ひずみ関係

圧縮載荷前のひびわれ直交方向の平均ひずみ ϵ_{tt} を0~1000, 2000, 7000 μ程度となるようにひびわれを導入した供試体に圧縮荷重を作成させたときの、ひびわれ平行方向の応力-ひずみ関係($\sigma'_t/f'_c, \epsilon'_t$)を図-5(a)から図-5(c)に示す。また、各供試体の諸元および実験結果は表-2に示すとおりである。ひびわれ直交方向の鉄筋比を変化させたのは、ほぼ同じ ϵ_{tt} に対して平均ひびわれ間隔 l_c とひびわれ一本当たりの平均ひびわれ幅 w の値が異なるデータを得るためにある。

ひびわれ導入時の状態および破壊時のスケッチを図-5にあわせて示した。実線はひびわれを導入したときの状態を表わし、点線は圧縮破壊により新たに発生したひびわれを示したものである。また、図-6はC6供試体の圧縮破壊時の様子である。最大耐力に達した後、ひび

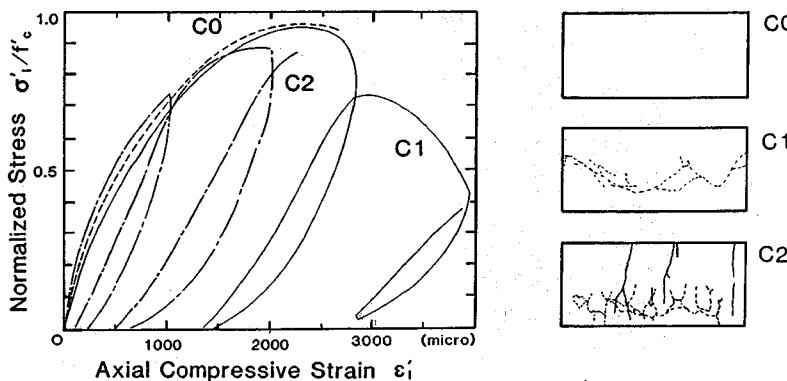


図-5(a) ひびわれをわずかに導入した鉄筋コンクリートの軸圧縮応力-軸ひずみ関係と供試体スケッチ

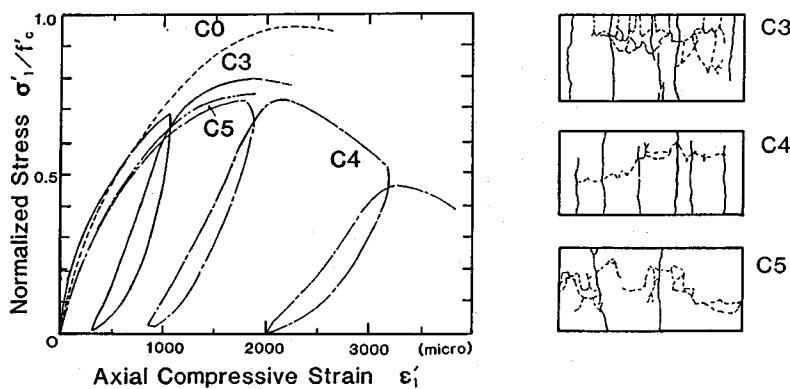


図-5(b) 中程度のひびわれを導入したときの軸圧縮応力-ひずみ関係と供試体スケッチ

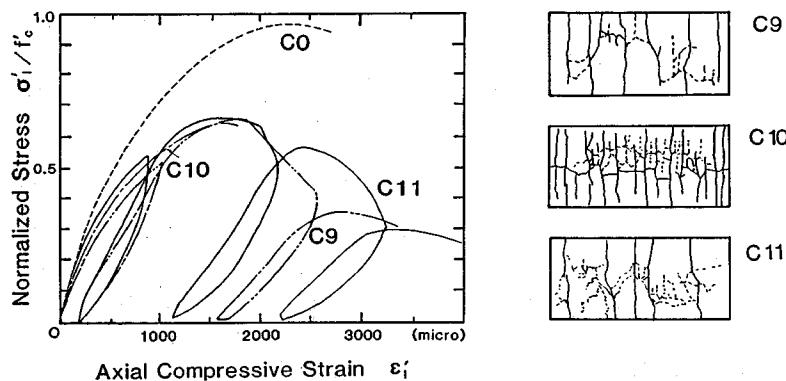


図-5(c) ひびわれ直交方向に大きな損傷を導入したときの軸圧縮応力-ひずみ関係と供試体スケッチ

われに挟まれたコンクリートに微細なひびわれが発生し、さらに変形を進めると円柱供試体の破壊モードと同様のすべり面が形成されて、円筒の内外両方向に破壊した。

ひびわれを導入していない供試体C1(鉄筋比0.6%)の応力-ひずみ関係は無筋供試体のそれとほとんど差がない(図-5(a))、また圧縮強度もシリンダー強度の96%であった。これは、載荷端面の摩擦を除去したこと

による効果と鉄筋によるコンクリートの多軸拘束効果の所産と思われる。しかし、圧縮強度の変動係数が5%程度であることを考慮して、ひびわれを導入しない状態での圧縮強度を $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ のシリンダー強度 f'_c で代表させることにした。

シリンダー強度 f'_c に対するひびわれたコンクリートの圧縮強度 σ'_{tu} の比を $\lambda (= \sigma'_{tu}/f'_c)$ と定義する。ひびわれ履歴を受けると明らかに圧縮強度が低下し、さらに

表-2 供試体諸元および実験結果

No.	$\frac{\epsilon_{\text{cr}}}{(\mu)}$	鉄筋比 $P_f (\%)$	$f_c' (\text{MPa})$	耐力比 $\frac{\sigma_{\text{cu}}}{f_c'}$	ひびわ れ本数 n	平均ひび われ間隔 $t_e (\text{mm})$	平均ひび われ幅 $\omega (\text{mm})$	配 合
C0	0	0	30.4	0.95	0	-	-	A
C1	0	0.6	21.4	0.96	0	-	-	A
C2	760	0.9	28.6	0.90	3	348	0.26	A
C3	1900	0.9	36.7	0.80	5	209	0.40	A
C4	1910	0.6	21.4	0.74	6	174	0.33	A
C5	2170	0.3	28.6	0.74	2	522	1.13	A
C6	3750	0.3	27.3	0.67	4	149	1.05	A
C7	3865	0.6	44.2	0.71	6	174	0.67	B
C8	3950	0.6	36.7	0.73	3	348	1.37	A
C9	7080	0.6	44.2	0.67	7	149	1.05	B
C10	7600	0.9	28.6	0.65	15	70	0.53	A
C11	8070	0.3	27.3	0.67	5	209	1.68	A

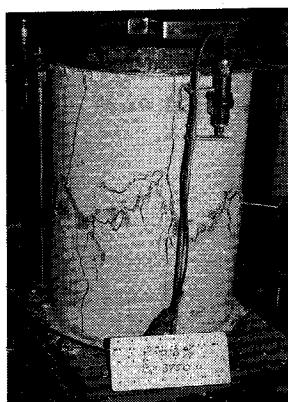


図-6 最大耐力直後の破壊状況（C6 供試体）

最大耐力時の圧縮ひずみ ϵ'_{tu} も減少しているのがわかる。また圧縮載荷前のひびわれ直交方向ひずみ ϵ_{ct} が小さいものほど強度の低下は小さい。しかしひびわれ導入レベルが同じ程度であれば、ひびわれの本数が異なっても見掛けの応力-ひずみ関係はあまり変化しないことが図-5の各図より読み取られる。

初期の剛性についてもひびわれの存在によって若干低下しているが、強度 σ'_{tu} および最大ひずみ ϵ'_{tu} ほど明確な差は現れていない。応力-ひずみ曲線は線形に近い領域ではひびわれの導入による変化は小さいとみることができるが、最大耐力付近でひずみが大きく増加し、急速に破壊に近付くといった挙動を示している。換言すれば、ひびわれを含むことによって、小さい応力レベルで非線形領域に入るとみることができる。

図-7は応力-ひずみ関係を最大応力 σ'_{tu} と最大応力時のひずみ ϵ'_{tu} で正規化したものである。応力-ひずみの包絡線は、図に示すようにほぼ相似形とみなすことができるが、除荷-再載荷曲線の相似性についてはこの図からは判断しにくい。除荷-再載荷曲線を議論するには、塑性挙動を把握することが必須であるので、後章で触れ

ることにする。

(2) ひびわれ直交方向の変形とひびわれひずみ

一般に、ひびわれ直交方向の平均ひずみ ϵ_t は、ひびわれ間の連続体としてのコンクリートのひずみ ϵ_{ct} と、ひびわれ幅に起因する平均ひずみ ϵ_{cr} との和として測定される（図-8）。対象区間に存在するひびわれ幅の合計 $\sum \omega$ に対して、次の関係が成立する¹¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= \epsilon_{ct} + \epsilon_{cr} \\ \epsilon_{cr} &= \sum \omega / L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

L : 基準長さ（本実験では外周長）

ひびわれを導入した後に内圧を除荷した段階では、ひびわれ間のコンクリートのひずみ ϵ_{ct} は圧力の除去とともに弾性回復するので、ひびわれひずみ ϵ_{cr} に比較して十分無視できる。したがって、軸圧縮力を作用させる前の段階では、測定された平均ひずみ ϵ_t はひびわれひずみ ϵ_{cr} に等しいと考えてよい。

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_t \quad (2)$$

載荷途上における横方向平均ひずみ ϵ_t の挙動の例を図-9に示す。なお、図-9の ϵ_t の原点はおののの供試体の ϵ_{tu} に一致させている。圧縮応力の増加に伴って ϵ_t は漸増するが、応力-ひずみ関係が線形に近い領域（最大耐力の 50 % 程度）では、ひびわれのない鉄筋コンクリートのボアソン効果による変形とほとんど差がみられない。この結果から、ひびわれ間のコンクリートの t

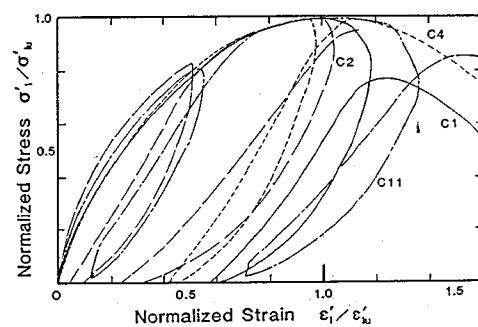


図-7 最大強度と対応するひずみで正規化した応力-ひずみ曲線

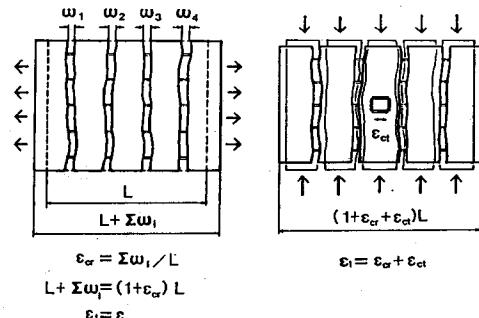


図-8 ひびわれ幅と平均ひびわれひずみの関係

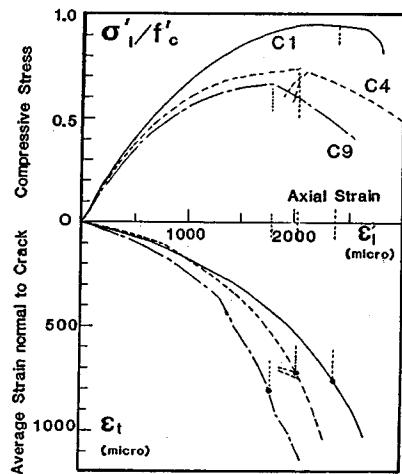


図-9 一軸圧縮応力下における鉄筋コンクリート要素の主ひずみの働き

方向ひずみ ϵ_{ct} は弾性領域ではひびわれの影響を受けず、ひびわれのないコンクリートと同様に増加すると仮定できる。これは載荷途上においてひびわれひずみ ϵ_{cr} がほぼ一定であり、ひびわれ幅が一軸圧縮載荷に伴って変化しないことを意味する。

(3) ひびわれの存在による圧縮強度低下の性状

軸圧縮載荷前のひびわれひずみ ϵ_{tt} と強度比 λ の関係を図-10(a) に示した。この図から、両者の間にはほぼ一意的な関係があることが読み取れる。このことは、ひびわれの本数および間隔がたとえ異なっていても、ひびわれ直交方向の平均ひずみ ϵ_{tt} が同じであれば、強度比 λ は同じとなることを意味している。したがって分散ひびわれモデルを用いると、有限要素解析の取り扱いが簡便なものとなる。

しかし、この結果だけでは現象を十分に説明しているとはいえない。そこで次に、ひびわれ一本当たりの平均ひびわれ幅 w と強度比 λ の関係を図-10(b) に示した。平均ひびわれ間隔 l_c のほぼ等しいデータ ($l_c = 350 \text{ mm}$ 以上, $150 \text{ mm} \sim 210 \text{ mm}$, 70 mm 以下) ごとに両者の関係を示したところ、それぞれのひびわれ間隔に対して、強度比 λ と平均ひびわれ幅 w の間には明確な相関関係が認められる。どのひびわれ間隔に対しても共通してひびわれ幅の増加によって強度が低下する。強度比とひびわれ幅の関係はひびわれ間隔に依存し、ひびわれ間隔が大きいほど、ひびわれ幅の開きに対する圧縮強度の低下速度は遅いことが図-10(b) から認められる。つまり、ひびわれ幅が同じであればひびわれ間隔が大きい方が強度は高く、同じひびわれ間隔の場合はひびわれ幅が大きくなるほど強度は低くなるということである。したがって図-10(a) は、対象区間に存在するひびわれの本数が

異なっても、平均ひずみが同じであれば、両方の効果が相殺されて結果的に耐力低下がほぼ同じとなっていることを示している。また、ひびわれ幅がある程度開いてしまうと、それ以上ひびわれ幅を増しても圧縮強度比 λ はほぼ一定となることがわかった。

ひびわれ幅の増加に伴って強度が低下する理由は現在のところ明確ではないが、ある程度ひびわれが開くとひびわれ面での相互の接触が失われてしまうことを考えれば、少なくとも強度低下が頭打ちになることは自然に理

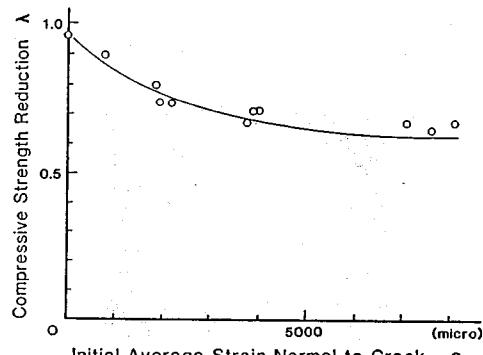


図-10(a) 平均ひびわれ直交ひずみと耐力比

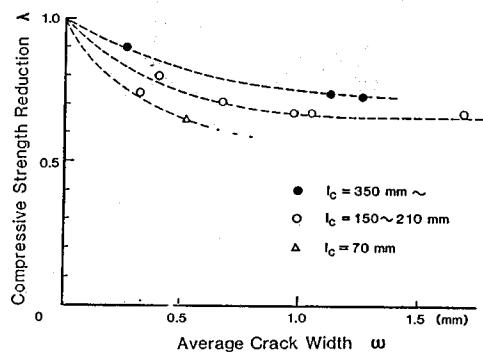


図-10(b) 平均ひびわれ幅と耐力比

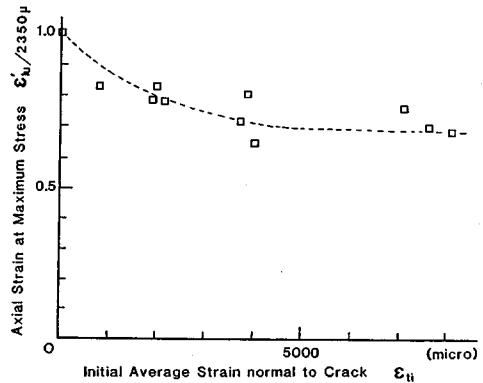


図-11 導入した平均ひびわれひずみと最大耐力時の軸圧縮ひずみ

解される。なお、強度低下のメカニズムについては後章で再度議論したい。

各鉄筋比における最大応力時のひずみ ε'_{tu} もひびわれひずみ ε_{cr} の増加に応じて低下するとともに、一定値に収束する傾向がある(図-11)。しかし、低下の度合は強度の場合ほど明確ではなく、ばらつきも若干大きい。

ここで、過去に提案されているひびわれたコンクリートの強度低下式と本実験結果との適合性について議論してみたい。Collins⁸⁾、Hsu¹⁰⁾等が提案、ならびに解析に使用している提案式を本実験の条件に従って書き直すところになる。

$$\lambda = \frac{1}{0.85 + 0.27 \varepsilon_{tu}/\varepsilon_t} \quad \dots \dots \dots \quad (3 \cdot a)$$

さらに、Vecchio、Collins⁹⁾は最近、式(3-a)を修正して次の圧縮強度比算定式を提案している。

$$\lambda = \frac{1}{0.80 + 0.34 \varepsilon_{tu}/0.002} \quad \dots \dots \dots \quad (3 \cdot b)$$

(右辺 ≥ 1 となるとき: $\lambda=1$)

また、CervenkaはCollinsらの研究を参考にして、式(3-c)を提案して鉄筋コンクリート板の解析を行っている¹⁶⁾。

$$\lambda = 1 - 0.45 \frac{\varepsilon_{tu}}{0.005} \quad \dots \dots \dots \quad (3 \cdot c)$$

前川らは1983年の解析コンペティション⁷⁾に参加するにあたり、無筋コンクリート板に1本のひびわれを入れて実験した結果をもとに、ひびわれ方向の強度低下を表現している¹¹⁾。

これらの強度低下モデルと本実験結果とを図-12に合わせて表記した。Collinsらのモデルでは、ポアソン効果によるひびわれ間のコンクリートの圧縮軸直交方向のひずみの増加を含めており、最大耐力時のひびわれ直交平均ひずみ(ε_{tu} と定義する。式(1)参照)で耐力低下を評価している。そこで、比較のために本実験の結果も、 ε_{tu} の実測値でプロットした点もあわせて表示した。

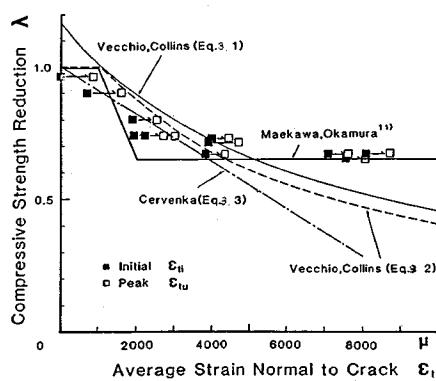


図-12 既往の解析モデルによる耐力比の予測

CollinsらやCervenkaの提案式では、ひびわれによるひずみが大きい領域でも強度低下が進行している点が本実験とは大きく異なっている。本実験では純粹にひびわれに起因する強度低下を評価する目的で、一軸圧縮・一方向配筋といった単純な条件を設定した。それに対して、Collinsらの実験では、より複雑な多軸応力・二方向配筋といった条件を設定している。両者の実験条件の差が、大ひずみ域での強度比の差として現われたものと思われる。

いずれのモデルにおいても強度低下率をひびわれ直交方向の平均ひずみの関数としている点については同じであり、本実験結果もこれを支持する結果となっている。平均ひずみで処理できることは、分散ひびわれモデルによる有限要素解析の応用にとって、モデルが簡単に表現できるという定式上の長所となる。しかし、これはあくまで限定された範囲で現象をとらえたものであり、あらゆる条件下での強度低下機構を表現したものではないことに留意すべきである。

5. ひびわれたコンクリートの塑性・破壊挙動と強度低下のメカニズム

前章では、ひびわれの状態がひびわれ平行方向の非線形応力-ひずみ関係に及ぼす影響を議論したが、一見して複雑に見えるこれらの挙動は、より簡単な現象の組合せで説明することができるのではないかと考えた。そこで、非線形挙動を塑性と弾性挙動に分離して考察することにした。ここで、ひずみは応力を除去してもなお残留する塑性ひずみ ε'_{ip} と回復し得る弾性ひずみ ε'_{ie} の和として考えるものとする¹¹⁾。

(1) ひびわれを受けたコンクリート要素の塑性挙動

図-5に示されるとおり、載荷経路に除荷経路を含めたので、実験から直接塑性ひずみ(残留ひずみ)を求めることができる。そこで、塑性ひずみ ε'_{ip} と過去に受けた最大圧縮ひずみ ε'_{imax} の関係を図-13に示してみた。

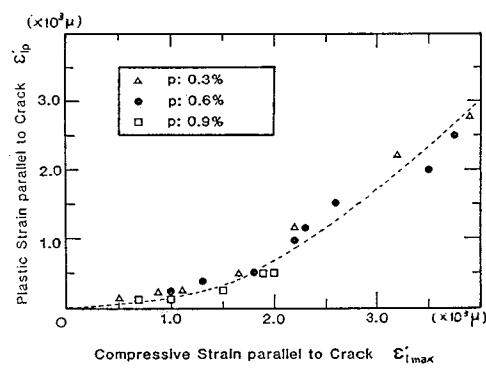


図-13 ひびわれ平行方向の塑性ひずみと過去に受けた最大圧縮ひずみ

このとき両者の関係はひびわれ導入レベルにかかわらず一定であることが認められる。しかも“ひびわれの状態”(l_c, ω)による差もほとんどみることができない。見掛け上、応力-ひずみ関係に現われる非線形性は、ひびわれ導入時のひずみ ε_{it} によって大きく異なるにもかかわらず、圧縮軸方向の塑性進行に関する非線形性には、ひびわれの状態の違いによる影響は現われないのである。

一方、三軸拘束を受けるコンクリートの塑性挙動についても本研究と同様の結果が報告されている¹⁷⁾。すなわち、リング状の鋼材で拘束されているコンクリート円柱供試体の軸方向の塑性ひずみと最大圧縮ひずみの間に、拘束リングの剛性や強度に依存しない一意的関係が存在する。本実験とは全く異なった応力状態においても塑性進行特性に一意的な規則が存在することは、大変興味深い。

(2) ひびわれを含むコンクリート要素の弾性挙動

次に、除荷-再載荷時の弾性挙動について考える。応力-ひずみ関係の表現方法に、以下の弾塑性破壊式をあてはめることができる¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \sigma'_i &= E_0 K \varepsilon'_i \\ \sigma'_i &= E_0 K (\varepsilon'_i - \varepsilon'_{ip}) \end{aligned} \quad \left\{ \dots \right. \quad (4)$$

ここに、 E_0 : 定数、 K : 破壊パラメーター (弾性剛性低下率)、 ε'_{ip} : ひびわれ方向の塑性ひずみ

式(4)は概念的には、弾塑性挙動する材料の有効な断面積 K (あるいは並列に存在する弾塑性ばね要素が壊された割合) が履歴に応じて低下していく過程¹⁸⁾ (これを破壊と定義する) を表現したものである。前節の議論から、弾塑性構成要素の塑性挙動はひびわれの影響を受けず、塑性ひずみ ε'_{ip} は ε_{cr} によらず、次のように記述できることが判明した。

$$\varepsilon'_{ip} = \varepsilon'_{ip}(\varepsilon'_{imax}) \dots \quad (5)$$

鉄筋コンクリートの塑性挙動がひびわれひずみ ε_{cr} の影響を受けないのにもかかわらず、見掛けの圧縮応力-ひずみの関係 ($\sigma'_i - \varepsilon'_i$ 関係) が異なるという事実は、すなわち破壊の進行挙動 (除荷・再載荷時の平均弾性剛性の低下) が ε_{cr} によって変化することを示唆している。

そこで、図-14に式(4)と5.(1)の結果から逆算した破壊パラメーターの変化を、塑性挙動と同様に過去に受けた最大圧縮ひずみ ε'_{imax} で表わした。なお、初期剛性係数 (E_0) は $\varepsilon'_i = 200 \mu$ における割線剛性をもって決定した。ひびわれ幅が大きい場合ほど、同一の ε'_{imax} に対して K 値が低くなっていることがわかる。ひびわれが入ることにより、ひびわれ平行方向の構成要素が壊れやすくなつたことは物理的に考えやすい表現である。したがって、変形挙動のメカニズムを反映させて応力-ひずみ関係を記述する際には、以下のように定式化するのが最適であると著者らは考えている。

$$\sigma'_i = E_0 K \cdot (\varepsilon'_i - \varepsilon'_{ip})$$

$$= E_0 K (\varepsilon'_{imax}, \varepsilon_{cr}) \cdot |\varepsilon'_i - \varepsilon'_{ip}(\varepsilon'_{imax})| \dots \dots \dots \quad (6)$$

K 値および ε'_{ip} の関数は、板厚の効果、骨材寸法、鉄筋の効果、載荷速度、多軸応力状態等の影響をも考慮して今後、系統的に実験を行って求める必要がある。

(3) 剛性・耐力の低下メカニズムの一考察

ひびわれ履歴によってひびわれ平行方向の剛性・強度が低下するメカニズムは、ひびわれによる破壊パラメーターの低下、換言すれば見掛けの有効断面積の減少として合理的に記述できることが認められた。では、有効断面積の低下がいかなる状況で起こるかについて考察してみたい。

図-15は、ひびわれ間のコンクリートのほぼ中央とひびわれ近傍のひずみの挙動を測定したものである。応力 (平均応力) の上昇とともに 2か所のひずみは上昇する。しかし、わずか 6 cm の距離をおいてもひずみの値は大きく異なっているのである。このように、ひびわれの発生によって、ひびわれ平行方向のコンクリートの局所的なひずみ (あるいは応力) 分布が一様でなくなることがわかる。

局所的なひずみがどの位置においても線形領域にあれば、ひずみの平均値に対して平均応力も線形に対応すると考えられる。しかし、同じ平均ひずみが発生している

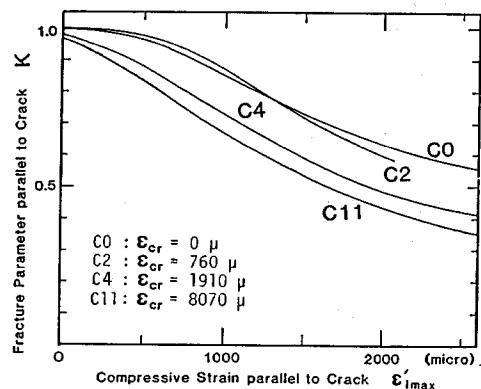


図-14 ひびわれたコンクリートの破壊パラメーターの進行特性

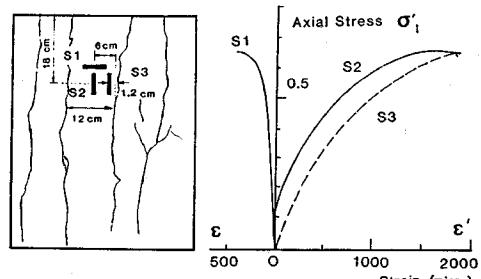


図-15 ひびわれ間のコンクリートの局所ひずみの挙動

状態でも、局所的なひずみの分布が大きく変動している場合、大ひずみ域、すなわち非線形域にあるコンクリートの面積が増え、その結果見掛けの有効断面積である破壊パラメーターを低下させていると考えることができる（図-14参照）。したがって、ひびわれ直交方向のひずみの増大がひびわれ間のコンクリートの局所的なひずみ（あるいは応力）分布の不均一性を促進することができる。その際、平均ひびわれ間隔 l_c が大きい場合は、その中央部で比較的広い範囲が均一な応力状態を保っていて非線形領域に入る部分は小さいが、間隔が狭くなると全断面にわたって応力が不均一となって、ひびわれ幅が同じでも耐力が低くなるものと考えられる。

また、ひびわれ幅が小さい範囲で強度が連続的にひびわれ幅によって低下するのは、ひびわれ面の接触部が減少して応力の伝達機構が損なわれることで、局所的な応力の分布が不均一になっていくことによるものと考えられる。

6. 結 論

本実験の範囲内で得られた結果から、以下の結論を得ることができた。

(1) ひびわれの導入によって、ひびわれ平行方向の一軸圧縮強度が低下する。強度低下の割合はひびわれ間隔とひびわれ幅によって変化するが、見掛け上平均ひびわれひずみによって強度の低下を予測できることが、本実験の範囲内において実証された。ただし、圧縮軸直交方向の引張力や主応力軸の回転、および鉄筋の影響は含めていないので、解析に際してはこれらの影響を別に評価する必要がある。

(2) 圧縮強度の低下とともに、強度点におけるひびわれ平行方向の圧縮ひずみも低下する。これらの低下率はひびわれ方向のひずみが 4000μ 以上でほぼ一定値に収束する傾向がある。

(3) ひびわれ平行方向の塑性ひずみは、過去に受けた最大の圧縮ひずみのみで決定され、ひびわれ直交方向の平均ひずみには依存しない。また、除荷・再載荷を含めたひびわれを有するコンクリートの応力-ひずみの関係は、弾塑性破壊式を用いて合理的に表現でき、破壊パラメーターのみがひびわれの影響を受ける形で構成式を定式化することの妥当性が実証された。

(4) ひびわれの導入による耐力の低下の一因として、ひびわれ面での接触が減少することによって内部応力状態が不均一になる点が考えられる。その他にも強度を低下させる微視的レベルの原因が考えられるので、さらに詳細に検討を加える必要がある。

謝 辞：本研究を行うにあたり、東京大学 岡村

甫教授、出雲淳一助手から貴重なご意見、ご指導をいただいた。実験装置作成にあたっては、横浜ゴム株式会社 小林辰夫氏および太田 亘氏のご協力をいただいた。また、鉄筋購入にあたり鹿島建設技術研究所 村山八州雄氏に便宜をはかっていただいた。心より謝意を表する次第である。

なお、本研究は昭和 58 年文部省科学研究費補助金 奨励研究 A および昭和 60 年三菱財團研究助成金（岡村代表）の一部を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、1984. 12.
- Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Vol. 1 and 2, Tokyo, Japan Concrete Institute, May, 1985.
- 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析、土木学会論文集、第 360 号／V-3, pp. 1 ~10, 1985 年 8 月.
- 玉井真一・島 弘・出雲淳一・岡村 甫：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、第 378 号／V-6, pp. 239 ~247, 1987 年 2 月.
- Aoyagi, Y. and Yamada, K. : Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Shell Elements Subjected to In-Plane Force, Proc. of JSCE, No. 331, pp. 167 ~180.
- 吉川弘道・田辺忠顯：ひびわれを有する鉄筋コンクリート板の平面応力場における構成方程式、コンクリート工学、論文 No. 86. 6, pp. 93 ~110, 1986. 6.
- Collins, M. P. and Vecchio, F. : An International Competition to Predict the Response of Reinforced Concrete Panels, Festschrift Prof. Dr. Bruno Thurmann zum 60. Geburtstag, pp. 471 ~491, 1983.
- Vecchio, F. and Collins, M. P. : The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses, Publication No. 82-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Mar. 1982.
- Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proceedings Vol. 83, pp. 219 ~231, March-April 1986.
- Hsu, T. T. C and Mo, Y. L. : Softening of Concrete in Torsional Members—Theory and Tests, ACI Journal, Proceedings Vol. 82, No. 3, pp. 290 ~303, May-June 1985.
- 前川宏一：弾塑性破壊理論に基づくコンクリートの構成則、第 2 回 RC 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、コンクリート工学協会、pp. 1 ~8, 1983 年 10 月.
- 前川宏一・岡村 甫：2 軸応力下にあるコンクリートの変形特性、コンクリート工学論文、Vol. 21, No. 3, コンクリート工学協会、pp. 111 ~121, 1983 年 3 月.

- 13) 野口 博・長沼一洋：RC パネルの非線形パラメータ解析, 第 2 回 RC 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, コンクリート工学協会, pp. 147~154, 1983 年 10 月.
- 14) Li, B. L. and Maekawa, K. : Elasticity and Plasticity of Concrete Under Principal Stress Rotation, Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Vol. 2, Tokyo, Japan Concrete Institute, pp. 21~38, May, 1985.
- 15) 上迫田和人・岡村 甫・前川宏一：コンクリートの 1 軸圧縮強度, 第 4 回コンクリート工学年次講演会論文集, コンクリート工学協会, pp. 177~181, 昭和 57 年 6 月.
- 16) Cervenka, V. : Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete, ACI Journal, Proceedings Vol. 82, pp. 877~882, November-December 1985.
- 17) 大島正康・橋本親典：リング拘束下におけるコンクリートの力学的特性, 土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集第 5 部門, 土木学会, pp. 309~310, 昭和 59 年 10 月.
- 18) 田畠昌伸・前川宏一：時間を考慮したコンクリートの塑性・破壊の予測モデル, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, コンクリート工学協会, pp. 269~272, 昭和 59 年 6 月.
- 19) 井上範夫・小鹿紀英・鈴木紀雄・速水由紀夫：コリンズ理論に基づく立体 RC 耐震壁の弾塑性解析, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, コンクリート工学協会, pp. 689~692, 1986 年 6 月.
- 20) 白井伸明：ひびわれ鉄筋コンクリート要素の応力-ひずみ関係, RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集, コンクリート工学協会, pp. 147~150, 1984 年 12 月.
- 21) 谷口 元・毛井崇博・上田真穂：斜め方向入力を受けるボックス壁の力学的性状に関する解析的研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, コンクリート工学協会, pp. 685~688, 1986 年 6 月.

(1986. 7. 15・受付)