

論文

[2052] ひびわれを含むコンクリートの圧縮劣化特性

正会員 白井伸明 (日本大学理工学部)

正会員 ○松井洋司 (大林組)

佐藤稔雄 (日本大学理工学部)

1. まえがき

ひびわれを含む鉄筋コンクリート (以下、RC) のひびわれに平行な方向のコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、コンクリート・シリンダーに比べ、その強度・剛性とも低下することが Collins らにより指摘された [1]。その後、RC 部材のせん断挙動を解析的にシミュレートするためには、ひびわれコンクリートの強度および剛性の低下を適切に考慮する必要があることが明かとなった [2]。ひびわれコンクリートの圧縮特性を評価する既往の実験的研究は、加力方法により、①せん断型と②引張・圧縮型加力形式に分類され、両加力形式とも、ひび割れコンクリートの圧縮強度および剛性は、ひび割れに垂直な方向の平均ひずみの増大に伴って低下する結果を与えている。しかし、平均ひずみの増大に伴う強度低下率は、せん断型と引張・圧縮型の加力形式で顕著な差異が認められる。本研究では、第 1 ステップとして、引張・圧縮型加力によるコンクリートおよび RC 平板の実験を行い、ひびわれコンクリートの圧縮特性について検討する。

2. 実験概要

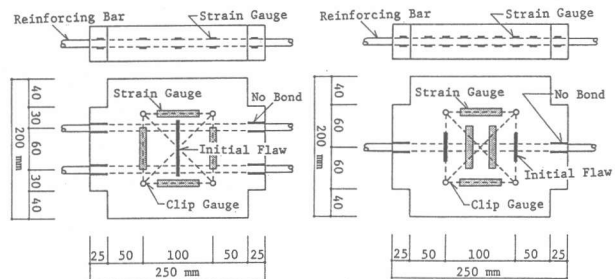
本実験で用いた代表的な試験体を図 1 に示す。試験体は、RC 平板 54 体、コンクリート平板 37 体の計 91 体である。その寸法は、幅 (l) × 高さ (h) × 厚さ (t) が 20cm × 20cm × 5cm である。変動因子は、初期欠陥の長さおよび本数、鉄筋の径および本数、加力方法とした。コンクリート中に厚さ 1.5mm のプラスチックシートを挿入することにより初期欠陥を設け、これよりひび割れをモデル化した。なお、試験体高さ h に対する初期欠陥の長さ h_0 の比 h_0/h を "初期欠陥比" と呼ぶ。試験体名は、例えば、87-RM-2×20-2×0.7-1 と名付ける。最初の数字 "87" は実験実施年度 19

表 1 試験体数と変動因子の関係

Flaw Ratio	Steel Ratio	0%		20%		40%		2X20%		2X30%	
		*M	*C	M	C	M	C	M	C	M	C
0%	1986	4	4	4	3	2	2				
	1987	3	3	3	3	3	3				3
0.32% (D8)	1986			2							
	1987										
0.50% (D8)	1986	2		2		2					
	1987					3	3				
0.57% (D10)	1986			2							
	1987										
0.71% (D10)	1986			2							
	1987										
1.27% (D13)	1986	2	1	2	1	2	1				
	1987	3	3			3	3	3			3
2x0.71% (2xD10)	1986										
	1987					3	3				
2x1.27% (2xD13)	1986										
	1987					3					

* "M" or "C" indicate the monotonic or cyclic loading.

87年、次の "RM" の R は RC 平板 (コンクリート平板は P)、M は単調荷 (繰返し荷は C)、次の "2×20" は 20% の初期欠陥が 2 本 (1 本の場合は省略)、次の "2×0.7" は鉄筋比 0.7 の鉄筋が 2 本、最後の "1" は同一試験体の通し番号を意味する。試験体数と変動因子の関係を表 1 に示す。また、使用した鉄筋およびコ



(a) 87-RM-40-2×0.7 (b) 87-RM-2×30-1.2

図 1 試験体

ンクリートの材料特性を表2および3に示す。なお、コンクリートの調合には、最大骨材寸法15mmの砂利を使用した。図2に加力装置を示す。本加力装置の特色は、ピーク後のひずみ軟化域にまでわたる応力-ひずみ関係を得るため、簡易高剛性試験装置を併用した点にある。なお、加圧板と試験体間にはテフロンシートを挿入した。試験体への加力方法は、最初に、加力フレームに取り付けた左右2台のジャッキにより鉄筋に引張力を作用させ、引張力が所定の値に達したら、その引張力を保持したまま、容量200tfのアムスラー試験機により試験体に圧縮力を所定の値まで作用した。このプロセスを交互に繰返して加力を進行させた。鉄筋への引張加力は、86年度と87年度の実験では、異なった方法で行った。つまり、86年度は図3(a)、87年度は図3(b)のルールに従うものとした。本実験では、試験体の変位、コンクリート及び鉄筋のひずみを測定した(図1参照)。コンクリートの縦ひずみは、試験体の表および裏面の各2箇所 に貼付したひずみゲージ(検長:60mm)、また、一部の試験体については、横ひずみを表および裏面の各2箇所 に貼付したひずみゲージにより測定した。なお、圧縮力の加力方向を縦方向、鉄筋の引張加力方向を横方向と呼ぶ。鉄筋のひずみは、鉄筋の材軸に沿う5または10箇所 に貼付したひずみゲージ(検長:2mm)により測定した。また、試験体の縦、横、対角線方向の相対変位をパイゲージにより、上・下加圧板間の相対変位を、試験体の表および裏側にセットした4台のダイヤルゲージにより測定した。

表2 鉄筋の材料特性

Test Year	Concrete Cylinder Tested for	f_c' (kgf/cm ²)	$\epsilon^{\circ}u$	f_t' (kgf/cm ²)
1986	Concrete Panels	252 (259)	$(2.11 \times 10^{-3})'$	18
	R/C Panels	274 (274)	$(2.05 \times 10^{-3})'$	23
1987	Monotonic Loading	275 (268)	$(1.89 \times 10^{-3})'$	28
	Cyclic Loading	287 (269)	$(2.23 \times 10^{-3})'$	26

* f_c' indicates the compressive strength, $\epsilon^{\circ}u$ the strain corresponding to f_c' and f_t' the tensile strength. The values in the parenthesis indicate the mean value of cylinders in which longitudinal strains were measured.

表3 コンクリートの材料特性

Test Year	Type of Bars	Diameter (cm)	Area (cm ²)	$f_s^{\circ}y$ (kgf/cm ²)	$f_s^{\circ}u$ (kgf/cm ²)	E_s° (kgf/cm ²)
1986	D 6	0.6	0.32	4063	5766	1.92×10^6
	D 8	0.8	0.50	4960	7260	1.88×10^6
	D10	1.0	0.71	3733	5437	1.90×10^6
	D13	1.3	1.27	3780	5591	1.84×10^6
1987	D 8	0.8	0.50	3322	5117	1.95×10^6
	D10	1.0	0.71	3575	5315	1.82×10^6
	D13	1.3	1.27	3231	5140	1.84×10^6

3. 実験結果および検討

図4に試験体の代表的な破壊状況の例を示す。図5, 6, 7は、実測の圧縮応力($\sigma^{\circ}c$) - ひずみ($\epsilon^{\circ}c$) 曲線の上限値と下限値の包絡線をプロットしたものである。最初に、図5(a)および(b)は、86と87年度の単調載荷による試験体の $\sigma^{\circ}c - \epsilon^{\circ}c$ 曲線を比較したものである。コンクリート平板の場合、87年度の試験体の $\sigma^{\circ}c - \epsilon^{\circ}c$ 曲線は、86年度に比べ、初期から最大耐力に至るまでの変動幅が大きい。これは、87年度の試験体に複数欠陥のものが含まれており、初期欠陥比の増大によると考え

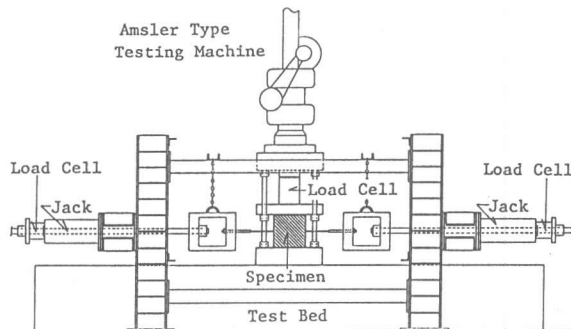
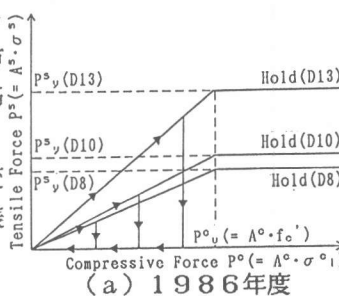
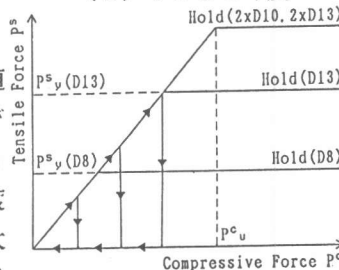


図2 加力装置



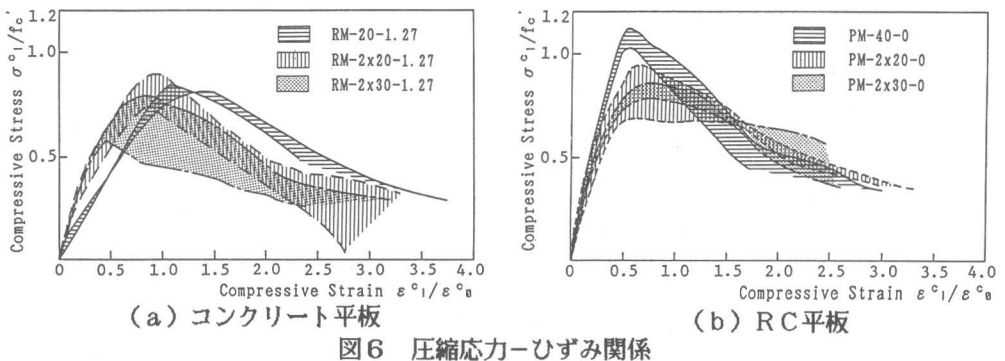
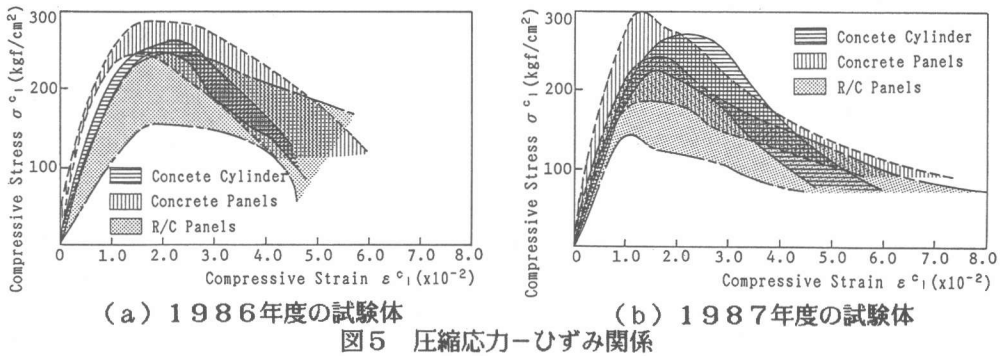
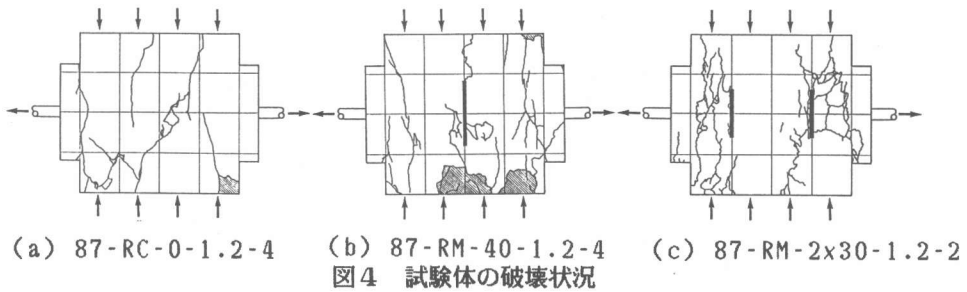
(a) 1986年度



(b) 1987年度

図3 鉄筋に対する加力方法

られる。次に、RC平板の場合、86年度の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線は、87年度に比べ、初期から最大耐力に至るまでの変動幅が大きく、剛性低下が大きい試験体が含まれている。これは鉄筋に対する引張加力方法が異なることに加え、86年度の鉄筋の降伏強度が87年度より高かったことによると考えられる。また、最大耐力は、87年度の方が86年度より低くなる場合がある。これは、87年度の試験体に複数の欠陥または鉄筋が含まれるものがあり、初期欠陥比や鉄筋比の増大によると考えられる。次に、図6(a)および(b)は、初期欠陥比を変動因子としたコンクリート平板とRC平板の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線を比較したものである。コンクリート平板の場合、同一の欠陥比であっても、欠陥が複数の方が耐力は低くなる傾向にある。これは、前川らが指摘するように[3]、ひびわれ間隔が小さくなると、ひびわれ間コンクリートの応力状態が不均一になりやすいことによると考えられる。次に、RC平板の場合、最大耐力は初期欠陥比が増すに従って低下する傾向がある。最後に、図7(a)および(b)は単調载荷と繰返し载荷に対する $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線を比較したものである。いずれの場合も、繰返しによる影響は顕著でない。ひびわれコンクリートの強度および剛性低下の原因は、コンクリートに生じる損傷(マイクロクラックを含むひびわれ)の累積によると考えられる。ここでは、ひびわれ(初期欠陥)に直交する方



向の横ひずみと鉄筋の引張力および付着特性に注目し、実験結果の検討を試みる。最初に、図8はコンクリート平板2体、RC平板2体の $\sigma^{\circ}_1 - \varepsilon^{\circ}_1$ 曲線を示す。また、図9は、ひびわれに直交する方向のひびわれを含まないコンクリートの横ひずみ ε°_t と縦ひずみ ε°_l の関係を示したものである。これらの試験体の $\sigma^{\circ}_1 - \varepsilon^{\circ}_1$ 曲線には差異が認められ、RC平板の強度および剛性は、コンクリート平板に比べ、低下する傾向がある。これは、図9に示すように、RC平板の横ひずみが、コンクリート平板の横ひずみに比べ、早期に成長していることに対応する[4]。つまり、圧縮力と同時に横筋に引張力を作用させるRC平板の場合、付着作用によりコンクリート内部にマイクロクラックが発生し、これが強度および剛性低下の原因になったと考えられる。今、コンクリート・シリンダーの圧縮強度 f_c' に対するひび割れコンクリートの圧縮強度 σ°_{1u} の比 $\lambda = |\sigma^{\circ}_{1u}| / f_c'$ を強度低減係数と定義し、 λ の推定式を提案する。図10はコンクリートおよびRC平板の実験結果より求めた λ とひびわれを含む平均横ひずみ $\bar{\varepsilon}^{\circ}_t$ の関係をプロットしたものである。 λ は、バラツキが大きく、 $\bar{\varepsilon}^{\circ}_t$ のみの関数として強度低下を説明するのは困難である。そこで、まず、鉄筋の無いコンクリート平板の結果について検討する。図11

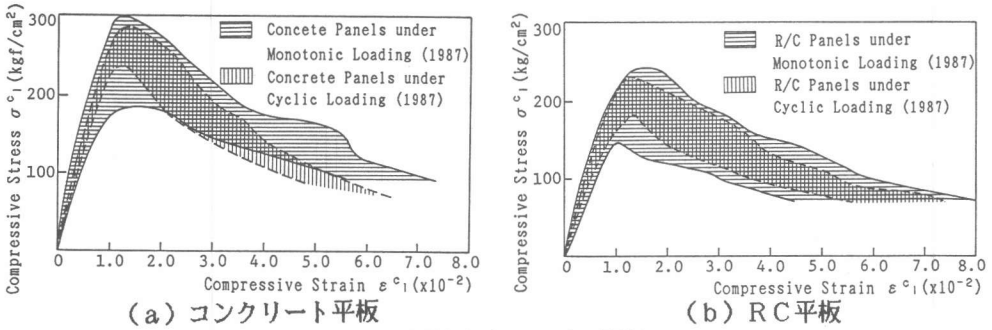


図7 圧縮応力-ひずみ関係

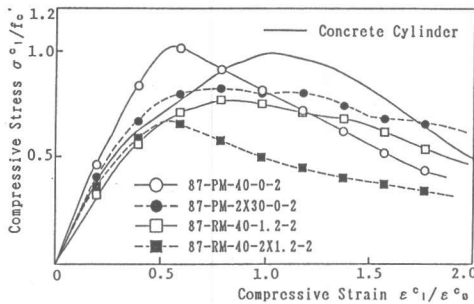


図8 基準化圧縮応力-ひずみ関係

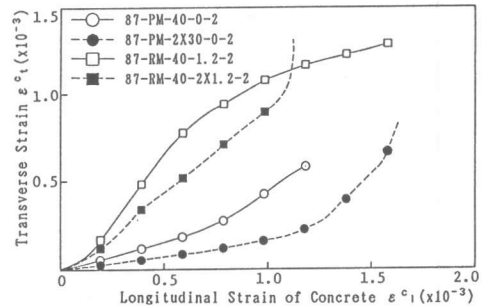


図9 横ひずみと縦ひずみの関係

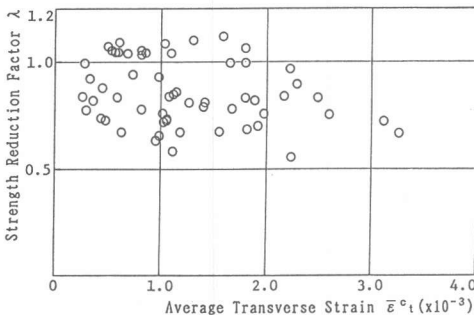


図10 $\lambda_t - \bar{\varepsilon}_t^{\circ}$ 関係

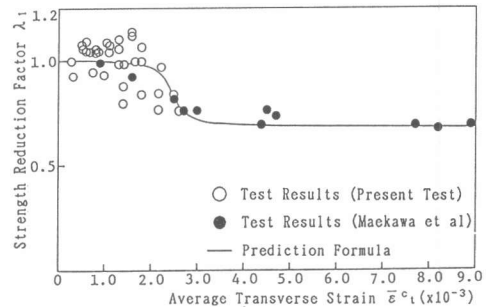


図11 $\lambda_{tc} - \bar{\varepsilon}_t^{\circ}$ 関係 (コンクリート平板)

は、コンクリート平板の実験結果より求めた λ_1 と $\bar{\varepsilon}_t$ の関係を示す。図中の曲線は、コンクリート平板に対する強度低減係数 λ_1 の推定式であり、次式のように定義する。

$$\lambda_1 = - (0.34/\pi) \cdot \arctan (4820 \cdot \bar{\varepsilon}_t + 11.82) + 0.84 \quad (1)$$

次に、RC平板の強度低減係数に対する鉄筋の引張力と付着特性の影響について検討する。今、鉄筋による強度低減係数 λ_2 を次式のように定義する。

$$\lambda_2 = (\lambda_1 - | \sigma_u | / f_c') / \lambda_1 \quad (2)$$

図12は、RC平板の λ_2 と付着作用により伝達されるコンクリートの平均引張応力 $\bar{\sigma}_t$ の関係を示す。なお、図中の実線は、鉄筋による強度低減係数 λ_2 の推定式であり、次式のように定義する。

$$\lambda_2 = -5.9 \cdot \bar{\sigma}_t / f_c' + 1.0 \quad (3)$$

式(3)中の $\bar{\sigma}_t$ は、鉄筋両端に引張力 P^s を受けるRCプリズムを考え、鉄筋軸に沿う付着応力度分布は、端部でピーク値、中央で零となるように線形変化すると仮定し、次式により求めた。

$$4P^s / \{ (1+np) \Sigma \psi \cdot e_{av} \} \leq \tau_{max} \text{ のとき } \bar{\sigma}_t = 2P^s / \{ 3A^c (1+np) \} \quad (4.a)$$

$$4P^s / \{ (1+np) \Sigma \psi \cdot e_{av} \} > \tau_{max} \text{ のとき } \bar{\sigma}_t = \psi \cdot e_{av} \cdot \tau_{max} / 6A^c \quad (4.b)$$

ここに、 p は鉄筋比、 n はヤング係数比、 A^c はコンクリート断面積、 e_{av} は平均ひびわれ間隔、 $\Sigma \psi$ は鉄筋周長の総和、 τ_{max} は最大付着応力度であり、本研究では日本建築学会RC規準の定める短期許容付着応度 [5] の2倍と仮定した。結局、ひびわれを含むコンクリート及びRC平板の強度低減係数の推定式は、 $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2$ と定義される。図13は、強度低減係数の実験値と本論の推定式による計算値を比較したものである。計算値に対する実験値の比の平均は 0.99、標準偏差は、0.13 である。一方、Colins等の推定式による計算値に対する実験値の比を求めたところ、比の平均値は 0.88、標準偏差は 0.16 であった。従って、本手法のように、

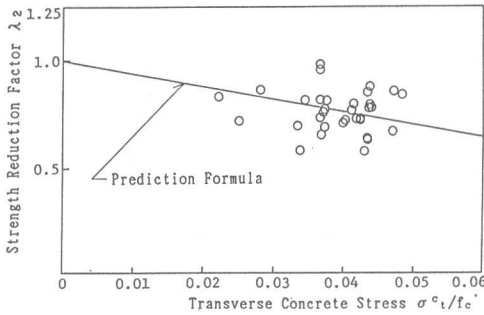


図12 $\lambda_{ts} - \bar{\sigma}_t / f_c'$ 関係

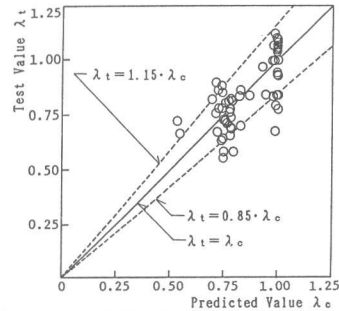
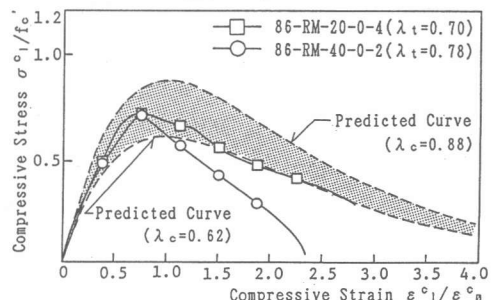
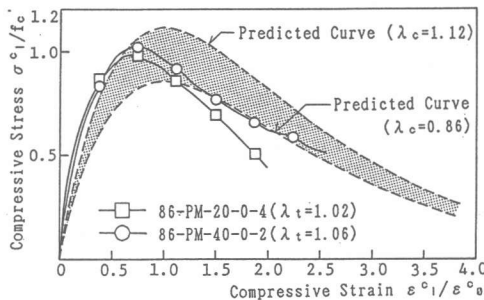


図13 強度低減係数の実験値 λ_t と計算値 λ_c の比較



(a) コンクリート平板

(b) RC平板

図14 $\sigma_c^1 / f_c' - \varepsilon_c^1 / \varepsilon_c^0$ 関係の比較

鉄筋の引張力や付着特性を考慮することにより、強度低下の推定精度は向上したと判断される。しかし、いずれの場合も、標準偏差は 0.13 および 0.16 とバラツキが見られる。これは、比較的小さな寸法の供試体を採用したことにより、全体の応答が局所挙動に敏感になったためと考えられる。最後に、ひび割れコンクリートの圧縮剛性の低下は、強度低下に比例すると仮定し、ひび割れコンクリートに対する圧縮応力-ひずみ関係について検討する。本研究では、ひび割れコンクリートの $\sigma^{\circ}_1 - \varepsilon^{\circ}_1$ 関係は、コンクリートシリンダーの $\sigma^{\circ}_1 - \varepsilon^{\circ}_1$ 関係を近似する梅村の e 関数式 [6] に、本研究で提案した λ を乗じた推定式により表現できるものとする。図 14 は、コンクリート平板および RC 平板に対する $\sigma^{\circ}_1 / f_c' - \varepsilon^{\circ}_1 / \varepsilon^{\circ}_c$ 。曲線の実験値と計算値を比較したものである。なお、 ε°_c はコンクリート・シリンダーの f_c' に対応するひずみである。いずれの場合も、全体としては、実験値と計算値の適合性は比較的良好である。

4、まとめ

以上、ひびわれコンクリートの圧縮特性に関する実験を行い、次のことが明らかになった。

- ①コンクリートの圧縮強度および剛性の低下は、ひびわれ発生、伝播による損傷量およびその累積過程に依存する。なお、ひび割れは、初期欠陥により近似的にモデル化できる。
- ②コンクリートおよび RC 平板の圧縮・引張実験の場合、損傷の尺度としては、ひびわれに直交する方向の平均横ひずみ並びに鉄筋の引張力および付着特性が考えられる。つまり、強度および剛性の低下は、平均横ひずみおよび鉄筋の引張力が増すほど、また、鉄筋の付着特性が良好なほど大きい。
- ③ひび割れコンクリートの圧縮強度の低下は、上記②の損傷尺度を関数とした提案式により、比較的良好に推定できる。
- ④ひび割れコンクリートの圧縮剛性の低下は、大むね、圧縮強度の低下に比例する。従って、ひび割れコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、コンクリートシリンダーの応力-ひずみ関係を表現する既往の近似式に、強度低減係数を乗じることにより推定できる。

<謝辞>

本研究は、文部省科学研究費補助金総合 (A) (代表：京都大学、森口司郎教授) による分担研究である。実験に協力いただいた日本大学大学院生 豊田将文君に感謝いたします。

<参考文献>

- 1) Vecchio, F. and Collins, M. P. : The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stress, Publication No.82-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, March 1982.
- 2) Vecchio, F. and Collins, M. P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proceedings Vol.83, March-April 1986, PP.219-231.
- 3) 宮原長久, 川上泰司, 前川宏一 : 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, 土木学会論文集, No.378, 1987年2月, PP.249-258.
- 4) 角一行, 川股重也 : 面内純せん断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, Vol.26, No.10, 1988年10月, PP.97-110.
- 5) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造設計基準・同解説, 1988年7月, PP.48.
- 6) 梅村魁 : 鉄筋コンクリート梁の塑性変形および終局強度, 日本建築学会論文報告集, 第42号, 1951年2月.