

横補強筋を有するひびわれたコンクリートの
圧縮特性に関する研究*1
正会員 ○池田 浩一郎
同 北山 和宏*2

1. 実験の目的 梁崩壊型の鉄筋コンクリート(RC)骨組では、梁降伏によって内柱・梁接合部に入力されるせん断力が一定となった後、さらに繰り返し載荷すると接合部がせん断破壊することがある。このような骨組では、地震時の繰り返し載荷によって接合部内梁主筋の付着劣化が生じ、接合部内のせん断力は主対角に沿って形成される斜め圧縮ストラットによって伝達される。梁降伏後の接合部せん断破壊の原因は、この斜め圧縮ストラットの圧縮強度がストラットに平行なひびわれによって低下したためと考える。そこで本研究では、引張り載荷によりひびわれの生じた直方体コンクリートの圧縮強度の低下を実験により確認し、その強度低減率を定量化する。また、ひびわれたコンクリートの圧縮強度・剛性の低下要因として主にひびわれの導入による抵抗断面の欠損と鉄筋近傍の局所的な内部損傷があると過去に指摘^{1) 2)}されている。本研究ではこれらの要因の低減率への影響を定量化する。また、横補強筋で拘束されたひびわれを含むコンクリートの圧縮特性についても検討する。

2. 実験方法 1) 試験体 試験体は30×20×17 (cm)の直方体コンクリート28体で初期引張りひずみを発生させるための鉄筋(12-D10)を貫通させた。試験体概略図を図1に示す。試験体は、コンクリートの引張り載荷用鉄筋のみ配筋されたものと、ひびわれの屈曲の影響を調べるためコンクリート内にひびわれ誘発網を配したものと、拘束筋を0.4%および0.8%配筋したものを各7体ずつ製作した。ひびわれ誘発網は市販の亀甲網で網の穴の形状が六角形、穴の最大幅が1cmである。コンクリート・ペーストは網を通過するため、引張り載荷時に引張り応力はコンクリート内を伝達する。ひびわれ発生時には網の存在で多少断面欠損しているのに網に沿ってひびわれが生じ、そのひびわれ形状は、ほぼ直線的なものとなる。試験体諸元を表1に示す。試験体の形状は、平板と直方体の形の違いを比較するため、千葉大学の野口ら³⁾によって行なわれたRC平板試験体の幅を3.4倍に増大したものである。ひびわれ本数は、引張り載荷用鉄筋の配筋量から約3本生じるように設計した。材料特性を表2に示す。コンクリート強度 f_c' および最大強度時軸ひずみ ϵ_s はシリンダー試験により求めたが、本実験中、材齢により強度および最大強度時軸ひずみが上昇したため、表中の式によって定めた。

2) 加力方法 加力装置図を図2に示す。加力方法は、所定の初期引張りひずみ(0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5および2.0%)まで引張り載荷の後、引張り力を除荷して試験体が圧壊するまで圧縮載荷した。

3) 測定方法 測定方法略図を図3に示す。コンクリート軸ひずみはPAIゲージとコンクリート表面に貼付した紙ゲージによって、横方向のコンクリートの伸びを変位計によって測定した。初期引張りひずみは危険断面からの抜けだしとコンクリートのひずみを加えて試験体長300mmで除したものである。コンクリート危険断面をひびわれ面と考えると鉄筋の抜け出しもコンクリートに損傷を与えることから初期引張りひずみの一部とした。引張り鉄筋のひずみと拘束筋のひずみも測定した。

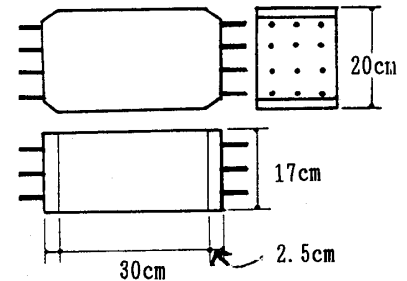


図1 試験体概略図

表1 試験体諸元

シリーズ名	引張り鉄筋比	拘束筋比%	特徴
C	SD35	0	標準の試験体
CN		0	ひびわれ直線
CK4	12-D10	0.4	拘束筋有り
CK8		0.8	

表2 材料特性

(a) 鉄筋

	降伏応力度 (kgf/cm ²)	降伏時歪 ×10 ⁻⁶	最大応力度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D10	3527	1816	5122	1.94×10 ⁵
D6	3523	1671	4740	2.12×10 ⁵
φ6	3554	1649	4667	2.16×10 ⁵

(b) コンクリート

コンクリート強度 $F_c = 0.72((\text{材齢}) - 61) + 298$
最大強度時軸ひずみ $\epsilon_s = 2067 + 2.3(\text{材齢})$

注) コンクリート強度および最大強度時軸ひずみは本実験中、材齢により値が上昇したため、上式によって定めた。

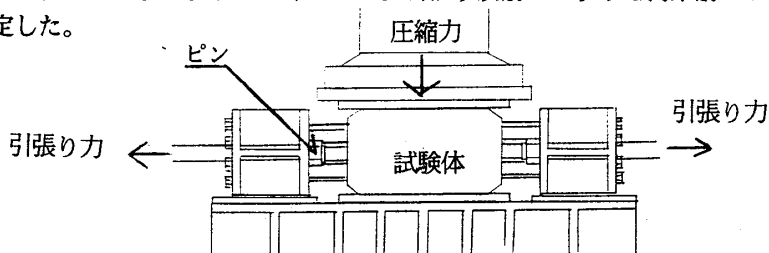


図2 加力装置図

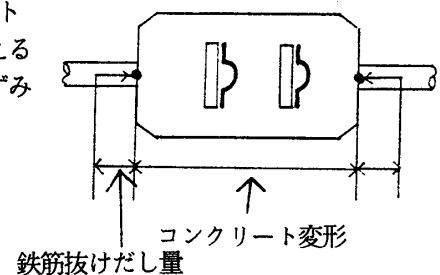


図3 測定方法略図

3. 実験結果 1) ひびわれ発生状況 各シリーズの引張り载荷終了時のひび割れ発生状況を図4に示す。Cシリーズは3本の屈曲したひびわれが発生した。CNシリーズはあらかじめ配したノッチに沿ってひびわれが生じた。拘束筋を配したCK4・CK8シリーズはひびわれが試験体表面に分散して発生した。

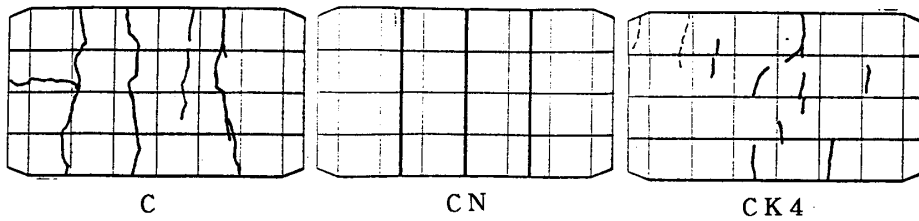


図4 ひびわれ発生状況

2) 圧縮応力-ひずみ関係 図5にC・CK4シリーズの圧縮応力 σ/f_c' -ひずみ ϵ/ϵ_0 関係を示す。各図中の太線は初期ひずみを与えていない試験体である。C・CNシリーズの剛性はシリンダーとほぼ同程度であったが強度は8割程度であった。CKシリーズはC・CNに対し剛性が低下したが、靱性は大きく向上した。

3) 引張り・圧縮力-拘束筋ひずみ関係 図6に引張り力-拘束筋ひずみ関係(CK4-7)を示す。引張り力に平行方向の拘束筋は引張り载荷とともにひずみが増大している。初期の剛性が高いところはひびわれ発生までコンクリートが引張り力を負担しているからである。また、引張り力と直交方向の拘束筋もわずかではあるがひずみが増大している。これは引張り鉄筋の節がコンクリートを押し広げこれを抑えようとしたためひずみが増加したと思われる。

図7には圧縮力-拘束筋ひずみ関係(CK4-1,4)を示す。ひびわれを導入していないCK4-1ではどの方向の拘束筋ひずみもほぼ同様の履歴を示すが、ひびわれを導入したCK4-4ではひびわれを含まない方向(短手)の拘束筋ひずみに対し、含む方向(長手)ひずみの増加が大きくなっている。これは引張り力によりコンクリート内に微細なひびわれが生じコンクリートのポアソン比が増大したためと考える。

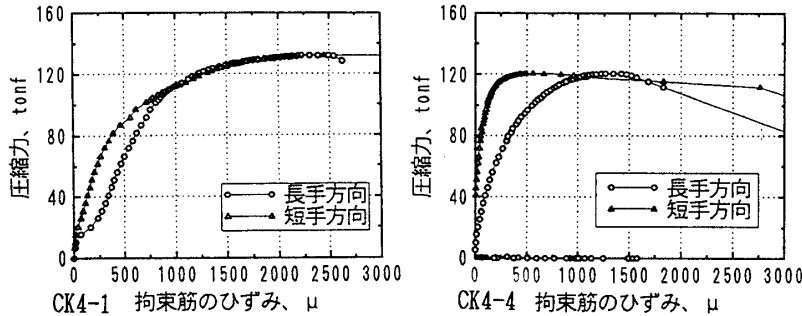


図7 圧縮力-拘束筋ひずみ関係

4. 実験結果の考察 1) 圧縮強度低減率 図8に初期引張りひずみ-圧縮強度低減率関係を示す。圧縮強度低減率は各シリーズの初期引張りひずみを与えた試験体の強度を初期引張りひずみ0.0%の試験体の強度で除して求めた。各シリーズとも初期引張りひずみが増大するに伴い、圧縮強度が低減する傾向を示した。図中の曲線は各シリーズの実験結果より最小二乗法を用いて定式化した初期引張りひずみ ϵ_t -圧縮強度低減率 λ 関係である。CシリーズとCNシリーズの低減率の差が大きくひびわれ屈曲の影響の大きさがわかる。また拘束筋を配したCK4シリーズの低減率も初期引張りひずみ2.0%においても圧縮強度低減率は8割程度であり、Cシリーズに比べると穏やかになった。CK8シリーズは4体の実験結果から得られた低減率式がCK4シリーズとほぼ同じであったので、CK4シリーズの低減率式に代表する。

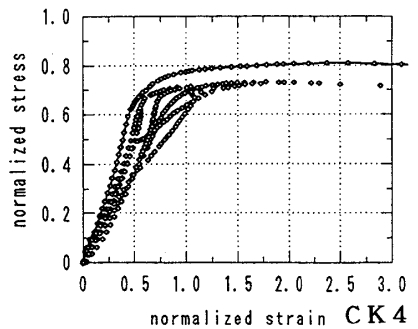
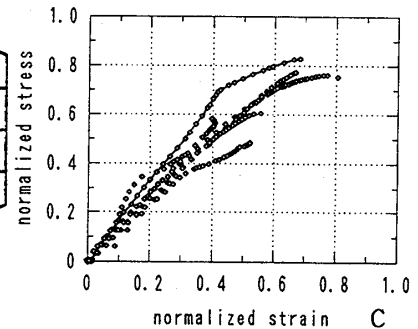


図5 圧縮応力-ひずみ関係

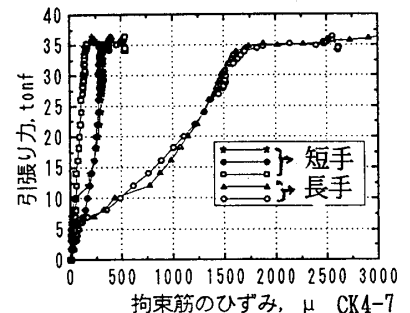
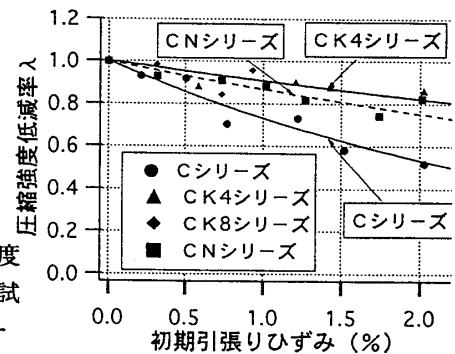


図6 引張り力-拘束筋ひずみ関係



$$\begin{aligned} \lambda_C &= e^{-0.3134\epsilon_t} \\ \lambda_{CN} &= e^{-0.1403\epsilon_t} \\ \lambda_{CK4} &= e^{-0.0989\epsilon_t} \\ \lambda_{CK8} &= 1.086 e^{-0.0989\epsilon_t} \end{aligned}$$

図8 初期引張りひずみ-圧縮強度低減率関係

図9にCシリーズと千葉大学の野口らによって行なわれたRC平板実験によって求められた低減率曲線³⁾を併記する。初期引張りひずみ0~1.0%における低減率に差がある。これはひびわれ発生時に直方体コンクリートが板状の形状の束になるのに対し、RC平板では棒状となり面外座屈の影響が出やすくなるためと考える。

図10に圧縮強度-拘束筋比関係を示す。また修正Kent-Park Model⁴⁾にもとづく圧縮強度上昇率も同時に示した。圧縮強度は初期引張りひずみ0.0%の各シリーズ試験体をC-1の圧縮強度で除して基準化した。CK4-1は拘束筋を配したにもかかわらずC-1と同程度であった。CK8シリーズでは初期引張りひずみ0.0%の圧縮強度が得られなかったが初期引張りひずみ0.3%の試験体で基準化すると圧縮強度比1.067まで上昇しているの0.0%においてほぼ修正Kent-Park Modelと同程度まで上昇したと考える。

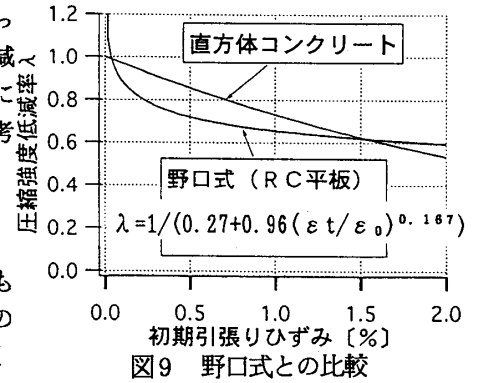


図9 野口式との比較

修正Kent-Park Model 強度上昇率 $K = 1 + \rho_s f_{yh} / f_c'$
 ρ_s = 拘束筋比
 f_{yh} = 拘束筋の降伏応力度
 f_c' = シリンダー強度

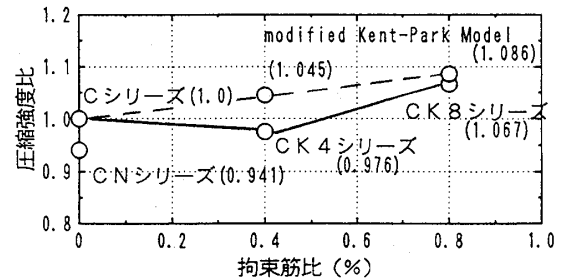


図10 圧縮強度-拘束筋比関係

本実験結果では、図11に示すように拘束筋を0.4%配した場合、拘束筋のないものに対して圧縮強度の低減は小さくなり、さらに配筋を0.8%に増加すると低減率曲線が全体に上昇する、という結果になった。

2) ひびわれの屈曲による抵抗断面の欠損と圧縮強度低減の関係 CNシリーズはコンクリートに生じるひびわれの屈曲を取り除き、抵抗断面の欠損による圧縮強度低減の要因を除去した。これで引張り荷重用鉄筋の付着作用によるコンクリート内部損傷の圧縮強度低減率への影響のみを定量化することができた。ひびわれの屈曲の影響も伴うCシリーズに比して、CNシリーズの低減率は緩やかになっている。また、CNシリーズの低減率曲線と実験データの規準化誤差は3.8%でCシリーズの規準化誤差6.0%に比べるとCNシリーズはばらつきが少ない。CNシリーズで、低減率曲線と実験データの誤差が小さくなるのは鉄筋近傍の内部損傷の程度が引張りひずみの増大に比例して大きくなるためと考える。これに対し、ひびわれの屈曲の影響も受けるCシリーズでは、ひびわれの形状は確率的に決定する。これがCシリーズのデータのばらつきに影響を及ぼしていると考えられる。

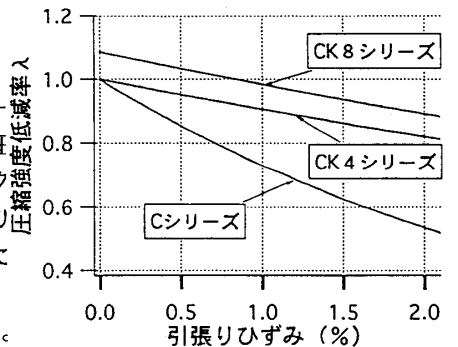


図11 初期引張りひずみ-圧縮強度低減率関係

図12にひびわれの屈曲のみによる初期引張りひずみ-圧縮強度低減率関係を示す。図中の曲線は図8において求めたCシリーズの実験結果からCNシリーズの圧縮強度低減率を引いたもので、ひびわれの屈曲のみの影響による圧縮強度低減率を表わす。また図中にプロットしたデータはCシリーズの実験結果よりCNシリーズの低減率曲線の値を引いて求めたものである。実験結果をみるとC-3(初期引張りひずみ0.5%)まではCNシリーズとの差が少なくC-4(初期引張りひずみ0.76%)以降、圧縮強度の低減が急激に進行しているように見える。

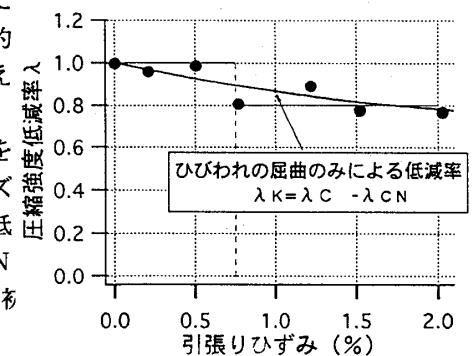


図12 ひびわれの屈曲による初期引張りひずみ-圧縮強度低減率関係

表3にCシリーズ各試験体の圧壊直前のコンクリートの伸び、試験体を貫通したひびわれ本数、ひびわれ幅等を示す。ひびわれ幅は圧壊直前のコンクリートの伸びをひびわれ本数で除して求めた。C-2はひびわれ幅が0.1mm、C-3はひびわれ幅は0.3mm以上あるが圧縮強度に影響を及ぼすと思われるひびわれは1本である。このことがC-2,3の低減率が小さいことの原因と思われる。前川ら¹⁾の実験においてもひびわれ幅が0.3mm以上開いた時に圧縮強度が低減する、ということ報告しており同様の結果となった。

表3 ひびわれ幅・ひびわれ本数

試験体名	コンクリート伸び量 mm	貫通したひびわれ本数	ひびわれ幅 mm
C-1	0.256	0	0.00
C-2	0.265	3	0.11
C-3	0.667	1	0.37
C-4	1.142	3	0.38
C-5	1.705	3	0.57
C-6	2.741	3	0.91
C-7	3.264	3	0.94

3) 拘束筋の拘束効果 図13に初期引張りひずみ-コンクリート横ひずみ関係を示す。CKシリーズは拘束筋のため引張り载荷してもコンクリート横ひずみが増加しにくく、C・CNシリーズと比べても同程度の初期引張りひずみにおいてコンクリート横ひずみは約半分程度である。これはひびわれ幅の増大を抑えることにもなり、圧縮強度の低下を防ぐ。

図14に圧縮応力度-コンクリート横ひずみ関係を示す。図中のプロットは初期引張りひずみを与えたCシリーズとCK4シリーズの実験結果をプロットしたものである。拘束筋を有していないCシリーズに対し、拘束筋を有するCK4シリーズは応力が増大してもコンクリートの横ひずみが抑えられる傾向がある。ひびわれたコンクリートにおいても圧縮载荷によってポアソン効果で横ひずみを生じるが、拘束筋の存在によってポアソン効果による変形がひびわれを閉じる方向に働き、コンクリート全体の変形が生じにくくなったためと考える。応力が170kgf/cm²を超えたあたりからCK4シリーズの横ひずみが増大している。これは圧縮载荷によりひびわれが閉じたため横ひずみが増大したためである。

図15にCK4シリーズの圧縮応力度-拘束力関係を示す。拘束力はひびわれを含む方向(長手)の拘束筋のひずみに鉄筋の引張り試験より得られた剛性を乗じてもとめた。引張りひずみの増大は拘束筋の拘束効果を低下させた。これはひびわれ幅が大きくなることで、圧縮载荷によるコンクリートの横ひずみがひびわれに吸収され、拘束力が増大しにくくなるため、前述の現象とも一致している。最大耐力付近では各試験体とも急激に拘束力が増大し、3tonf以上(全拘束筋降伏による拘束力は4.5tonf)になった。前述の現象と同様、各試験体とも圧縮载荷が進行するに伴いコンクリートの横ひずみが増加し、ひびわれの空隙も減少したため、拘束力が生じたと考える。すなわち、拘束筋はひびわれ幅が増大しても、最大耐力付近では十分な拘束力を発揮し、ひびわれたコンクリートの圧縮強度の低下を防ぐ効果をもつ。

5. まとめ ひびわれた直方体コンクリートの圧縮特性を調べるための実験を行なった。各シリーズとも初期引張りひずみの増大に伴い、圧縮強度が低減した。また、剛性の低下はひびわれの屈曲の影響が大きいことがわかった。

圧縮強度低減率は、Cシリーズは初期引張りひずみ2.0%で約6割まで低減した。CK4シリーズは初期引張りひずみ0.0%での圧縮強度の上昇はなかったが、低減率はCシリーズより小さくなり、初期引張りひずみ2.0%に至っても約8割程度であった。CK8シリーズは圧縮強度低減率はCK4シリーズと同等だが、全体に強度が上昇した。CNシリーズはひびわれの屈曲による圧縮強度低減の影響を除去したため、低減率はCシリーズよりもゆるやかになった。ひびわれの屈曲による圧縮強度低減率は初期引張りひずみ2.0%で約8割程度であることがわかった。

拘束筋がひびわれを含むコンクリートの圧縮強度低下に与える影響を調べた。拘束筋は引張り载荷時、ひびわれを分散して発生させ、コンクリート横ひずみの増大を抑え、ひびわれ幅の増大を抑えた。また、圧縮载荷時には、初期引張りひずみが増大することでひびわれ幅が大きくなって最大圧縮強度付近では拘束筋が十分な拘束力を発揮し、圧縮強度の低下を防止した。

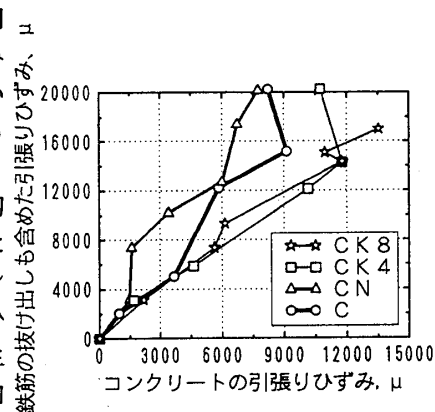


図13 初期引張りひずみ-コンクリート横ひずみ関係

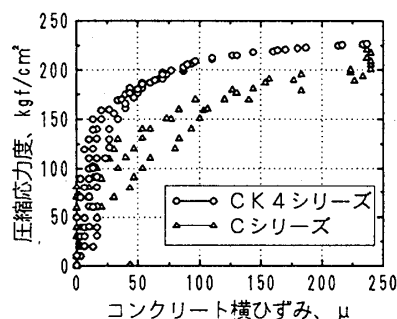


図14 圧縮応力-コンクリート横ひずみ関係

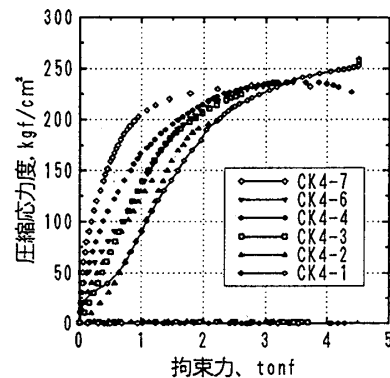


図15 圧縮応力-拘束力関係

謝辞：本研究は文部省科研費（総合研究A、代表者：野口博千葉大学教授）により行ない、日本スパンクリート協会の援助を得た。また、試験体製作には東急建設技術研究所の協力を得た。

参考文献：(1)前川宏一、宋 崇民、入江正明：3軸拘束からひびわれを考慮したコンクリートの圧縮特性の一般化、JCIコロキウム RC構造のせん断設計法に関する解析的研究 論文集、日本コンクリート工学協会'89年10月 pp. 31-38 (2)長沼一洋、山口恒夫：ひびわれたコンクリートの圧縮特性に関する研究、JCIコロキウム RC構造のせん断設計法に関する解析的研究 論文集、日本コンクリート工学協会'89年10月 pp. 39-44 (3)大久保雅章、濱田隆、野口博：ひびわれコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験、コンクリート工学年次論文集 Vol. 11-2、1989、pp. 323-326 (4) Kent, D. C., and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST7, Proc. paper 8243, July, 1971, pp. 1969-1990.

*1 東京都立大学大学院、*2 東京都立大学・助教授・工博