

## 論文 三次元的破壊領域を考慮した RC 部材のせん断強度解析の検証

大橋 一仁<sup>\*1</sup>・岡野 忠司<sup>\*1</sup>・市之瀬敏勝<sup>\*2</sup>・脇田 直弥<sup>\*3</sup>

**要旨：**最近，部材内部で形成される破壊領域が二次元的ではなく，三次元的に形成されていることが明らかになっている。本論文では三次元的破壊領域とコンクリートの応力-ひずみ関係を考慮して解析を行うことにより，RC 部材のせん断力をもとめるものである。また，部材断面内のコンクリートの応力状態についても検証した。その結果，New RC 式の応力-ひずみ関係と野口らの低減式を組み合わせることで解析でもとめた荷重-変形関係は実験値とよく対応した結果になった。また，横補強筋角のコンクリートのせん断応力負担分が一番大きかった。

**キーワード：**せん断解析，破壊領域，中子筋，New RC 式，Compression Field Theory

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材（以下 RC 部材と略す）の強度の研究は世界中で行われている。特に地震国日本では，膨大な実験的研究や様々な強度式（実験式）の提案などが行われている。その後，せん断性状はトラス機構などの部材モデルによる応力の釣り合いを考慮にいたった二次元的なせん断設計が行われるようになった。また，Compression Field Theory<sup>1)</sup>では，せん断応力によるコンクリートの圧縮応力の劣化を考慮している。

昨年の実験<sup>2)</sup>，また衣笠らの実験<sup>3)</sup>により RC 部材がせん断破壊を起こす時，部材内部で形成される破壊領域が二次元的ではなく，三次元的に形成されていることが明らかになっている。同時に三次元的破壊領域を考慮した塑性理論の上界定理の解析<sup>4)</sup>が提案された。この解析によって求められた解析結果と実験結果がほぼ一致する内容のものになった。しかし，この解析<sup>4)</sup>は横補強筋が降伏しないことを前提としたものであり，コンクリートの圧壊により生じるせん断破壊のみを取り上げてきた。また，極限解析であるので，終局強度のみが検討された。

本論文では，横補強筋は完全弾塑性，コンクリートは，既往の応力-ひずみ関係を使用し，増分解析により，せん断力-せん断変形関係を導き出す。また，部材断面内のコンクリートの応力度分布についても検討する。

## 2 解析仮定

## 2.1 鉄筋に関する仮定

横補強筋は完全弾塑性と仮定する。また，主筋は十分強くひずみが生じないものとする。すなわち，軸方向の変形は 0 とする。ただし，主筋のダボ作用は無視できるものとする。

## 2.2 コンクリートに関する仮定

コンクリートの引張強度は無視する。また，圧縮側については既往の応力-ひずみ関係<sup>1)6)7)</sup>を使用する。

## 2.3 有効範囲に関する仮定

図-1(a)の  $j_e$ ,  $b_e$  で囲まれた範囲，すなわち横補強筋で囲まれた部分を有効範囲とし，有効範囲のみでせん断応力を負担することにする。つまり，図中の色付けされていない，横補強筋の外側のかぶり部分はせん断強度に寄与しないものと仮定する<sup>4)</sup>。ただし，隅角部の横補強筋は，

\*1. 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻（正会員）

\*2. 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント学科 工博（正会員）

\*3. 名古屋工業大学 工学部 社会開発工学科（会員外）

直角になっているものとする。また、図-1(b)のように中子筋が2本ある場合は $j_e$ と $1/3b_e$ で囲まれた範囲が3つあると考える。

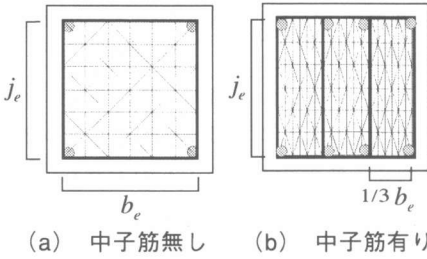


図-1 有効範囲

2.4 破壊領域に関する仮定

図-2に示すように、部材を変形する部分と剛体の部分に分け、剛体ではない部分を破壊領域とする。図-3は破壊領域を斜め方向から見たものである。かぶり部分は省略した。図中に示すように、破壊領域の幅は $j_e$ とする。昨年の実験<sup>2)</sup>で破壊領域の幅が有効せいであることが報告されているためである。また、曲げ変形は無視する。

図-1のように破壊領域を微小な三角柱に分割する。三角柱の各頂点のy座標(yは軸方向)は、厚み $j_e$ を保ったまま、任意の値をとり得るものとする。

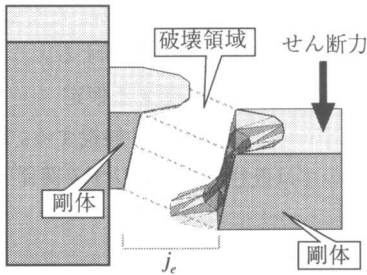


図-2 破壊領域(片持ち梁)

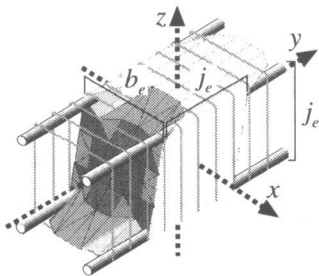


図-3 破壊領域のみの図

2.5 破壊領域内のひび割れに関する仮定

図-4に示すようにひび割れは横補強筋を対角線で結ぶように形成されるとする。ひび割れが横断する横補強筋の組数を基準にして、破壊次数を $n=0, 1, 2, 3, \dots$ と定める。破壊次数は、ひび割れの入り方、図-3のせい方向の横補強筋位置の破壊領域の傾きを決定するものである。図-5は破壊次数が $n=0$ の場合と $n=1$ の場合のひび割れの入り方を示す。ただし、ひび割れで挟まれた部分は剛体とし、部材のひび割れで挟まれた色の濃い幅 $j_e$ の部分を破壊領域とする。また、横補強筋は、せん断変形が増加するにつれて、一様にのびることとする。

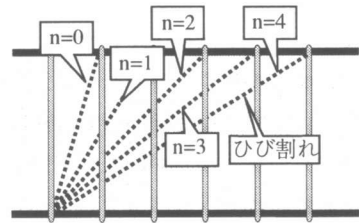
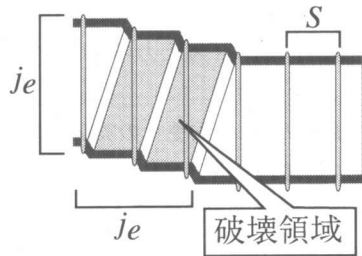
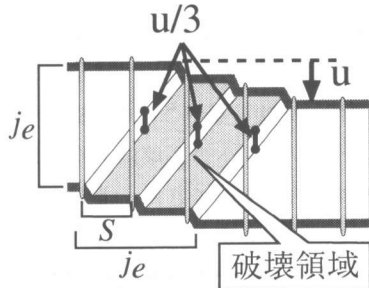


図-4 破壊次数の定義図



(a)  $n=0$ の場合



(b)  $n=1$ の場合

図-5 ひび割れの入り方

## 2.6 コンクリートの応力に関する仮定

2.5節で横補強筋のひずみ度を算定する際には離散的なひび割れを考えたが、そのままではコンクリートの応力を算定することが困難であるので、ひび割れに伴う三次元ひずみを平均的に考える。ここから、各三角柱の主ひずみを算出すると、軸方向のひずみがゼロであるため、 $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 = 0$ ,  $\epsilon_3 < 0$ となる。 $\epsilon_3$ を既往のコンクリートの応力-ひずみ曲線<sup>1)6)7)</sup>により、各三角柱の仕事増分をもとめる。

## 3 解析対象の試験体

解析対象の試験体を表-1に示す。(詳しくは文献<sup>2)</sup>参照) 試験体は、軸力が0の片持ち梁形式で、正負交番の繰り返し水平力を受けるものである。試験体は両方とも曲げ降伏前にせん断破壊した。

表-1 解析対象の試験体

試験体名	中子筋	横補強筋間隔	横補強筋比pw
P22N	無	40mm	1.30%
P22S	有	80mm	1.30%

## 4 解析方法

主筋はひずみが生じないため、せん断力のする仕事増分は以下の式で表せる。

$$\Delta W_e = \Delta W_c + \Delta W_s$$

$\Delta W_e$ : せん断力による外部仕事増分

$\Delta W_c$ : コンクリートによる内部仕事増分

$\Delta W_s$ : 横補強筋による内部仕事増分

### 4.1 コンクリートによる内部仕事 $W_c$

破壊領域のコンクリートは微小な三角柱で分割されている。そのため、それぞれの三角柱のした仕事を合わせたものが、コンクリートの仕事になる。上界の定理よりコンクリートの仕事が増小になるように破壊領域のy座標が決定される。その時の圧縮ひずみを用いて応力-ひずみ関係を使用し、各変形に対するコンクリートの仕事を求める。また、変形増分 $\Delta u$ とひずみ増分 $\Delta \epsilon_i$ の関係は通常の場合条件式により求める。

(詳しくは文献<sup>4)</sup>参照)

$$\Delta W_c = Q_c \cdot \Delta u = \sum \sigma_i \cdot \Delta \epsilon_i \cdot V_i$$

$Q_c$ : コンクリートのせん断力寄与分

$\Delta u$ : 部材変形の増分

$\sigma_i$ : 各三角柱の応力度

$\Delta \epsilon_i$ : 各三角柱の圧縮ひずみ増分

$V_i$ : 各三角柱の体積

### 4.2 横補強筋による内部仕事 $W_s$

破壊次数が $n=0$ のときは、図-5(a)のように横補強筋は仕事をしない。次に図-5(b)のように破壊次数が $n=1$ 以上のときの横補強筋はひび割れの幅だけのびて仕事が生じる。例えば、図-5(b)のように $u$ 変形すると、幅 $u/3$ のひび割れが3本入ることになる。横補強筋は $u/3$ だけのびることになる。このように、ひび割れを横切る各横補強筋の仕事をもとめ、内部仕事とする。

$$\Delta W_s = Q_s \cdot \Delta u = \sum E_s \cdot \Delta u_s \cdot S$$

$Q_s$ : 横補強筋のせん断力寄与分

$E_s$ : 横補強筋のヤング率

$\Delta u_s$ : 横補強筋ののび増分

$S$ : 一組の横補強筋の断面積

### 4.3 せん断力の決定方法

図-6は部材のせん断力のコンクリートと横補強筋の各寄与分を示したものである。コンクリートと横補強筋の仕事を変形で除することにより、それぞれのせん断力寄与分をもとめることができ、その合計が部材のせん断力になる。

$$Q = Q_c + Q_s$$

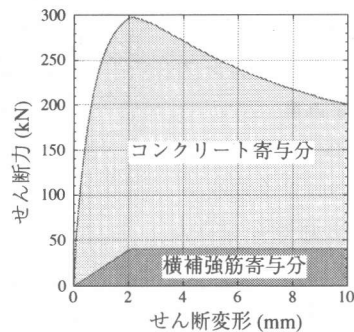


図-6 せん断強度の成分 (P22N  $n=1$  の場合)

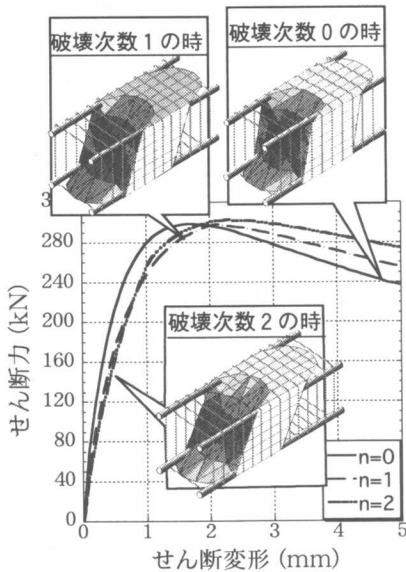


図-7 最小せん断力の選び方

Q: 部材のせん断力

部材のせん断力は各変形レベルで最小のせん断力の値とする。例えば、図-7に示すようにせん断変形が大きくなるにつれて、最小のせん断強度で破壊が進むわけであるから、破壊次数は2, 1, 0と変化することになる。すなわち、せん断変形が進むにつれて、破壊領域は変化することになる。ただし、破壊領域が移り変わった時、破壊領域でなくなった部分に生じたひずみは、無視する。

## 5 解析結果

### 5.1 各三角柱のコンクリートのひずみ度

図-8(a)は中子筋無し試験体P22Nのコンクリートの各三角柱の圧縮ひずみ、図-8(b)は引張ひずみを示す。破壊次数は0の状態である。グラフ中の図は試験

体の1/4断面を表しており、a~dの記号はそれぞれの三角柱の場所を表している。三角柱aは圧縮ひずみが小さく、引張ひずみが大きいことがわかる。また、せい方向の横補強筋の周りの三角柱c, dは、圧縮ひずみが大きく、引張ひずみが小さい結果となった。

### 5.2 各三角柱のコンクリートの応力度

図-9(a)はコンクリートの各三角柱の圧縮応力度を示す。コンクリートの応力度はNew RC式<sup>6)</sup>の応力-ひずみ関係を使用してもとめている。New RC式<sup>6)</sup>を使用した理由は、横補強筋でコンクリートが拘束されると考えたからである。図-8(a)の傾向からもわかるように、せい方向の横補強筋の拘束力を受けやすい三角柱c, dから順に圧縮応力度が最大になる結果となった。図-9(b)は引張ひずみを考慮した野口式<sup>7)</sup>で強度を低減したものである。図-8(b)での引張ひずみが一番大きかった三角柱aが圧縮応力度の負担分が一番低い結果となった。

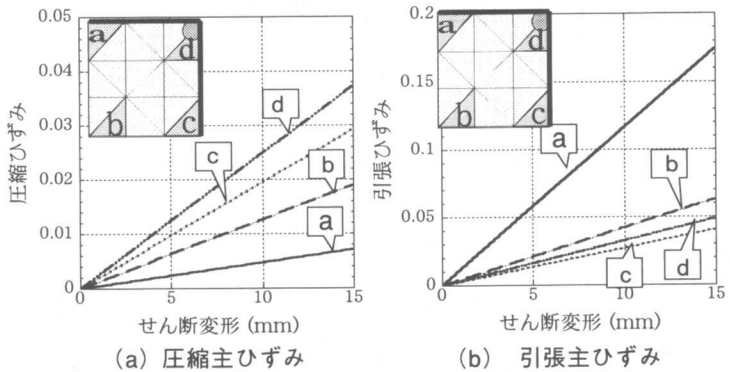


図-8 コンクリートの各三角柱の圧縮引張主ひずみ(P22N n=0)

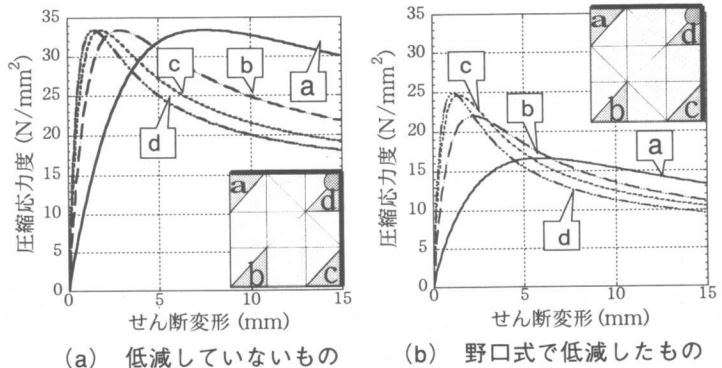
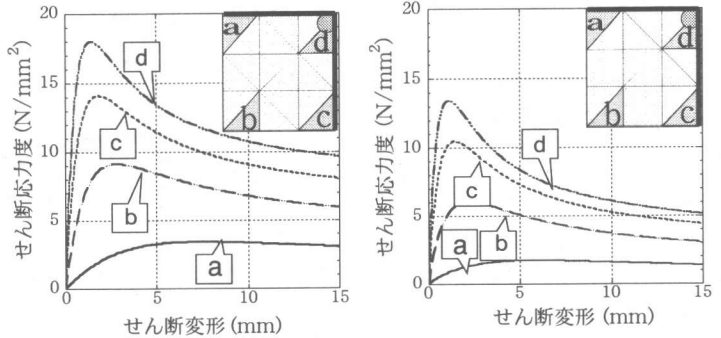


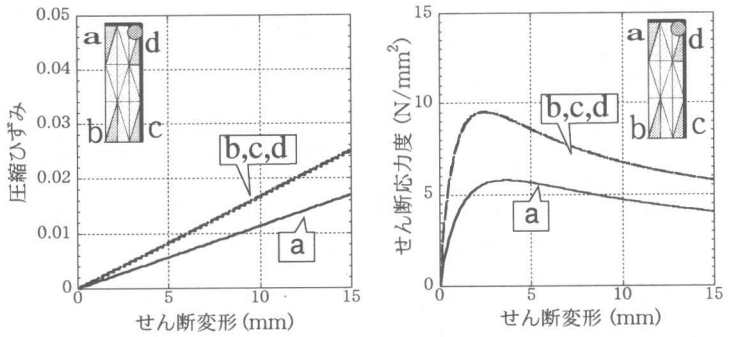
図-9 コンクリートの各三角柱の圧縮主応力度(P22N n=0)

図-10(a)(b)はコンクリートの各三角柱のせん断応力度を示す。図-9の断面方向の圧縮応力度をせん断応力度に変換したものである。三角柱aのせん断応力度は、圧縮応力度に比べてさらに負担分が小さい結果となった。また、せい方向の横補強筋周りの三角柱c, dはせん断応力度負担分が大きかった。



(a) 低減していないもの (b) 野口式で低減したものの  
図-10 コンクリートの各三角柱のせん断主応力度(P22N n=0)

図-11は中子筋有り試験体P22Sのコンクリートの各三角柱の圧縮ひずみ、せん断応力度を示す。せん断応力度はNew RC式<sup>6)</sup>と野口<sup>7)</sup>の式を用いた値である。グラフ中の図は中子筋で分けられた幅 $1/3b_c$ の $1/4$ 断面を表している。三角柱b, c, dは、破壊面がほぼ二次元的になっており圧縮ひずみが一樣なため、せん断応力負担分が等しくなった。また、三角柱aは他の部分に比べて、圧縮ひずみがやや小さいため、せん断応力負担分がやや小さい結果になった。



(a) 圧縮ひずみ (b) せん断応力度  
図-11 コンクリートの各三角柱の圧縮主ひずみ、せん断主応力度 (P22S n=0)

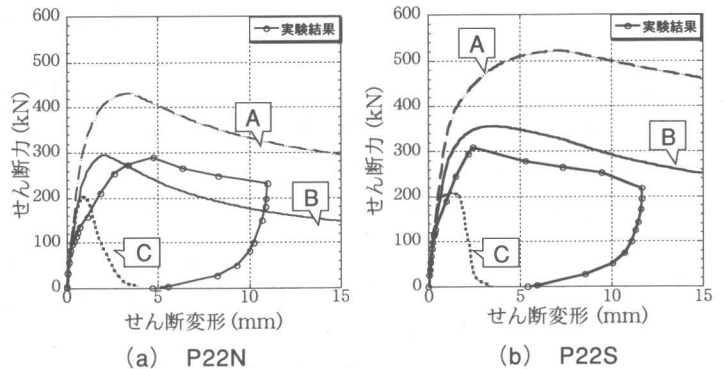
### 5.3 解析値と実験値の比較

図-12は解析値と実験結果のせん断力-せん断変形を示す。比較の参考としてCompression Field Theory<sup>1)</sup>の応力-ひずみ関係と低減式によりもとめた値も示す。表-2に3種類のコンクリートのモデルを示す。また、実験のせん断変形は全体変形から曲げ変形をひいてもとめたものである。

方法Aは、コンクリートの横ひずみによる低減を考慮してい

表-2 応力-ひずみ関係と低減式

方法	応力-ひずみ関係	低減式
A	New RC式 <sup>6)</sup>	なし
B	New RC式 <sup>6)</sup>	野口 <sup>7)</sup>
C	Compression Field Theory <sup>1)</sup>	



(a) P22N (b) P22S  
図-12 解析値と実験値の比較

ないため、実験値より大きくなった。一方、方法Cは、せん断力が急激に減少した。方法Bが、実験値に近い値をとった。

図-13はコンクリートの横方向ひずみ-せん断変形関係について、解析値と実験値を比較したものである。横方向ひずみの実験値とは、図中の点線で示す位置でピアノ線と変位計を用いて計測したのび量を有効せい $j_e$ で除した値である。解析での横方向ひずみの求め方は文献<sup>7)</sup>を参照されたい。図-13(a)の中子筋無し試験体と図-13(b)の中子筋有り試験体の解析値は両方ともよく実験値に対応した結果になった。

図-14は横補強筋の応力度-せん断変形関係を示す。A~Cの解析値は実験値より変形の早い段階で降伏に達した結果となった。これは、変形の小さい段階では破壊領域の幅が $j_e$ より実際には大きかったためであると思われる。また、このことは、図-12に示す解析による部材のせん断力の剛性が実験結果より大きいという原因でもある。今後の研究課題としたい。

## 6 結論

1. New RC式<sup>6)</sup>の応力-ひずみ関係と野口ら<sup>7)</sup>の低減式を用いることにより、実験結果とよく対応する荷重-変形関係をもとめることができた。
2. コンクリートの横方向ひずみは実験結果とよく対応した。
3. 横補強筋の角のコンクリートは、せん断応力負担分が一番大きい結果となった。

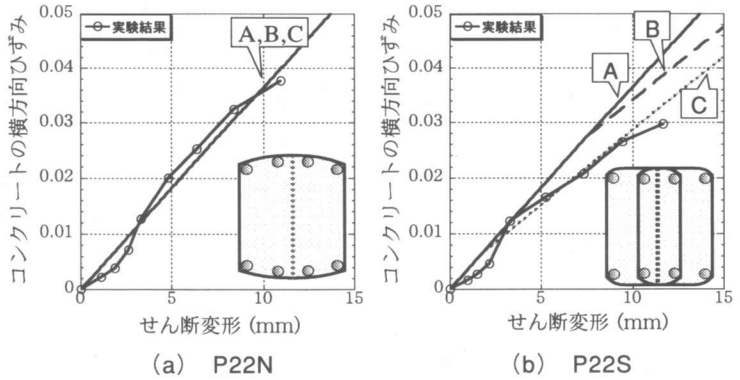


図-13 コンクリートの横方向ひずみ-せん断変形関係

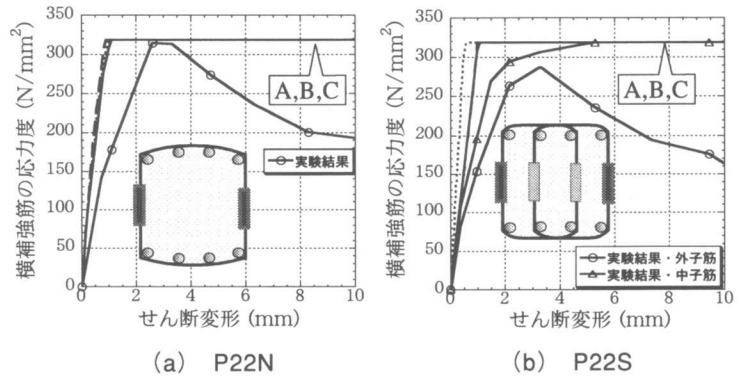


図-14 横補強筋応力度-せん断変形関係

## 参考文献

- 1) Michael P. Collins, Denis Mitchell. Prestressed Concrete Structures, Prentice-Hall, 1991
- 2) 岡野 忠司, 今井 正洋, 市之瀬 敏勝, 大橋 一仁: 繰り返し荷重を受けるRC部材の3次元のせん断破壊, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, pp.571-576, 2000
- 3) 田中 敬人, 衣笠 秀行: 繰り返し荷重下におけるRC梁部材横補強筋の拘束効果劣化性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, pp.229-234, 1999
- 4) 伊藤 朋, 市之瀬 敏勝: 横補強筋が十分に強いRC梁のせん断強度と立体破壊面, 日本建築学会構造系論文集, Vol.526, pp.133-139, 1999
- 5) 安福 弘基, 市之瀬 敏勝: 三次元的な破壊領域を考慮したRC部材のせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, pp.565-570, 2000
- 6) (財)国土開発技術研究センター: 平成4年度高強度鉄筋分科会報告書, pp.4-132-4-151, 1993.5.
- 7) 濱田 聡, 大久保 雅章, 野口 博: ひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.919-920, 1989