

論文 鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリート表面のひびわれ開口の破壊力学的解析

橘高義典^{*1}

要 旨：コンクリート構造物の耐久性に関する研究として、腐食鉄筋の膨張によるコンクリートかぶり部の破壊性状を破壊力学的手法により解析した。特に、コンクリート表面にひびわれが発生した後のひびわれ幅の変化を結合力モデルにより解析し、内部鉄筋の膨張力とひびわれ幅の関係を種々の条件について検討した。

キーワード：鉄筋膨張、耐久性、破壊力学、結合力モデル、非線形解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の耐久性は、「鉄筋の腐食あるいは骨材の反応等により、コンクリート部が膨張・引張作用を受け、ひびわれの誘発・鉄筋発錆の助長作用等により、かぶり部を含めた構造耐力上重要なコンクリート部分ならびに鉄筋の強度が低下し、部材の構造耐力が低下すること」と定義できる。すなわち、ひびわれを誘発する膨張力・引張力等に対して健全なコンクリートであることがコンクリートの耐久性能で重要となる。そして、中性化、塩害等の種々の劣化外力は、鉄筋の存在を前提に、コンクリート部への膨張力・引張力（劣化内力）を生じる一因子と位置づけられる。このような劣化内力を受けたコンクリート部がどのように破壊するかを解明すること、あるいはどのように防止するかがコンクリートの耐久性研究の基本といえる。

鉄筋の腐食等に伴うかぶりコンクリートのひびわれ発生に関する主な研究には以下がある。前田[1]、魚本ほか[2]らは、かぶりコンクリート内部のひびわれ発生条件について弾性解析を行った。特にコンクリートの内部膨張破壊に関して原田[3]は詳細な検討を行っている。森川・関・奥村ら[4]は、ひびわれの発生条件に関する基礎的な実験を行った。さらに、角本・梶川・川村ら[5]はFEMによる弾塑性解析によりひびわれ発生状況の詳細な予測法を示した。これらの成果に加え、より詳細な解析を行うためには以下の検討が必要と考えられる。1) コンクリート表面にひびわれが生じる以前に、鉄筋周りには微細な破壊領域が広範囲に形成されている可能性があり非弾性解析が必要である、2) コンクリート表面にひびわれが生じた後の破壊領域の進展ならびにひびわれ幅の変化の解析法が十分でない。このような非線形領域を含んだひびわれ進展解析には、コンクリートの軟化特性を組込んだ破壊力学的な解析が有効である。

本研究は、鉄筋膨張によるコンクリートの破壊性状を破壊力学的手法により把握することを目的とする。本報では、コンクリート表面に既にひびわれが発生した場合を想定し、その後の破壊進展について、内部鉄筋の膨張力とひびわれ開口量との関係を結合力モデル解析により考察する。

2. 解析方法

既往の弾性解[2]によると、かぶり厚 T が浅い場合には内部膨張によりコンクリート表面が引張応力が最大になり鉄筋に沿ったひびわれが生じ、深い場合には鉄筋表面が引張応力が最大となり

* 1 東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

内部にひびわれが生じるとなる。本解析では、鉄筋に沿った表面にひびわれがすでに発生している場合を解析する。すなわち、耐久性の観点で、すでにひびわれが生じた末期的な状態を想定する。表面ひびわれ開口後のひびわれ拡張を、仮定のひびわれ面に直行する応力を作用させモデル化する（図-1）。したがってモードI（引張型変形）のみの解析となる。

節点応力は、コンクリートの非弾性変形を考慮し引張軟化特性をモデル化した結合力 σ と鉄筋の膨張力に等価な拡張力 P とする。そして各節点の応力により生じる仮想ひびわれ先端での応力拡大係数の和、ならびに応力拡大係数から算出される各節点の開口変位が釣り合うように重ね理論により定式化する（式(1), 式(2)）。

すなわちひびわれ先端での応力場を記述する応力拡大係数を用いることにより、引張応力等の釣り合いによる従来の有限要素解析よりもより厳密なひびわれ解析結果が得られる。また、単純な形状の試験体の場合、応力拡大係数はハンドブック[6]等から簡便に引用できるという利点もある。

$$K(a) = K_p(a) + K_r(a) = 0 \quad (1)$$

$$\delta(a, x) = \delta_p(a, x) + \delta_r(a, x) \quad (2)$$

ここに、 $K(a)$, $K_p(a)$, $K_r(a)$ ：それぞれ、仮想ひびわれ a の時の仮想ひびわれ先端の応力拡大係数、等価鉄筋膨張力、結合力による仮想ひびわれ先端の応力拡大係数、 $\delta(a, x)$ ： x での開口変位、 $\delta_p(a, x)$, $\delta_r(a, x)$ ：それぞれ x での等価鉄筋膨張力、結合力、による開口変位、である。

等価鉄筋膨張力 $P_0(a, x)$ は、鉄筋表面での膨張を一定 $P_0(a)$ と仮定し、ひびわれ開口方向の拡張成分のみ抽出し式(3)のようにモデル化した。 $I(a)$ は成分関数である。

$$P(a, x) = P_0(a)I(x) \quad (T \leq x \leq T+D) \quad (3)$$

$$I(x) = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2(x-T)}{D}\right)^2}$$

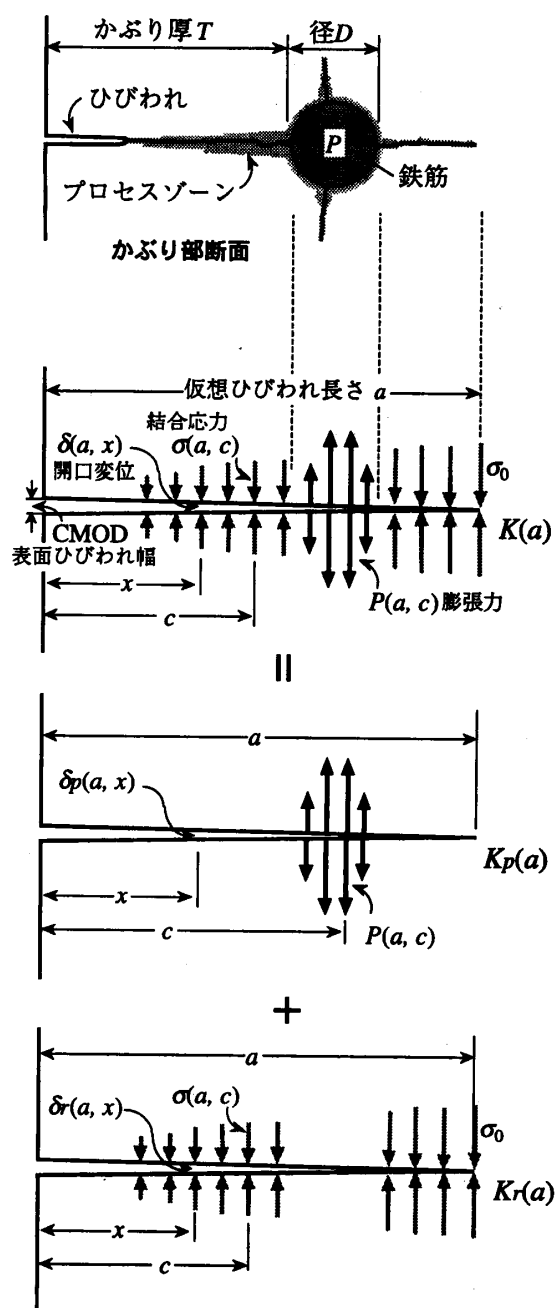


図-1 鉄筋膨張によるひびわれ進展のモデル化

結合応力（負の値）は多直線型の引張軟化曲線で表わし、傾きおよび切片は、開口変位および節点位置の関数となる（多層結合力モデル）。鉄筋位置の結合力は0とする。図-2は本解析で使用した引張軟化曲線のモデルである。通常のコンクリートにはバイリニア型、繊維補強コンクリートにはポリリニア型を適用した。

$$\sigma(a, x) = m(\delta, x) \cdot \delta + n(\delta, x), \quad \delta = \delta(a, x) \quad (4)$$

モード I 型の拡張力を受けた場合の応力拡大係数は、節点力 f 、ひびわれ長さ a 、形状関数 G (Appendix参照) より一般式(5)で表される。

$$K_I = \frac{2f}{\sqrt{\pi a}} G(a, c, d) \quad (5)$$

したがって、式(1)の各応力拡大係数は、

$$\left. \begin{aligned} K_p(a) &= P(a) \int_0^a I(c) g_1(a, c) dc \\ K_r(a) &= \int_0^a \sigma(a, c) g_1(a, c) dc \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、 $g_1(a, c) = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} G(a, c, d)$ である。

ひびわれ部の変位は、Castigliano's の定理により、応力拡大係数の積分式で表せる[6]。

$$d\delta = \delta_0 + \frac{2}{E} \int_x^a K(z) \left[\frac{\partial K_F(z)}{\partial F} \right]_{F=0} dz \quad (7)$$

ここに、 $d\delta$ ：変位、 δ_0 ：ひび割れがない場合での弾性変位、 E ：ヤング率、 $K_F(z)$ ：作用力による応力大係数、 $K_F(z)$ ：変位を求める部分で仮想力 F による応力拡大係数、である。すなわち、各条件での応力拡大係数を求めておけば、ひびわれ部の変位を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_p(a, x) &= \frac{P(a)}{E} \int_0^a I(c) g_2(a, x, c) dc \\ \delta_r(a, x) &= \frac{1}{E} \int_0^a \sigma(a, c) g_2(a, x, c) dc \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし、 $g_2(a, x, c) = \frac{8}{\pi} \int_x^a \frac{1}{z} G(z, x, d) G(z, c, d) dz$ である。

式(6)、(8)を、式(1)、(2)に代入し、 $P(a)$ を消去し整理すると、ひびわれ面の作用力と開口変位に関する積分方程式(9)式を得る。 $H^*(a, x, c)$ は形状関数であり作用力に依存しない。

$$\delta(a, x) = \frac{1}{E} \int_0^a \sigma(a, c) H^*(a, x, c) dc \quad (9)$$

$$H^*(a, x, c) = g_2(a, x, c) - g_1(a, c) \left[\int_0^a I(c) g_2(a, x, c) dc \right] / \left[\int_0^a I(c) g_1(a, c) dc \right] \quad (10)$$

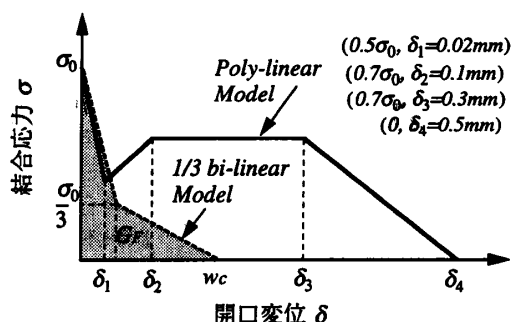


図-2 引張軟化曲線のモデル

構成式(3)(4)を(9)式に代入し離散化し得られる非線形連立方程式を解くことにより、任意仮想ひびわれ長 a での、開口変位の分布が求められ、さらに結合応力分布、膨張力等が求められる。非線形連立方程式の解法では、各節点の構成関数の傾きが一致するまで連立方程式を繰返し解き最適解を求める(多直線構成関数一致法)。

3. 解析結果および考察

図-3に解析結果から求めた鉄筋表面の膨張圧とコンクリート表面のひびわれ幅(CMOD)との関係を示す。膨張圧が大きいということは、開口に対して抵抗がありひびわれ幅が大きくなりにくいことを意味する。図中a)より鉄筋径が大きいほどひびわれ抵抗性は小さい。これは鉄筋径が大なるほど膨張圧を生じる面積が大となるためである。図b)より、かぶり厚が小さいほどひびわれ抵抗性は小となる。図c)、d)は、引張軟化曲線より定まるコンクリートの破壊特性値との関係を示したものであり、引張軟化曲線の初期結合が大きいほど、また、破壊エネルギー

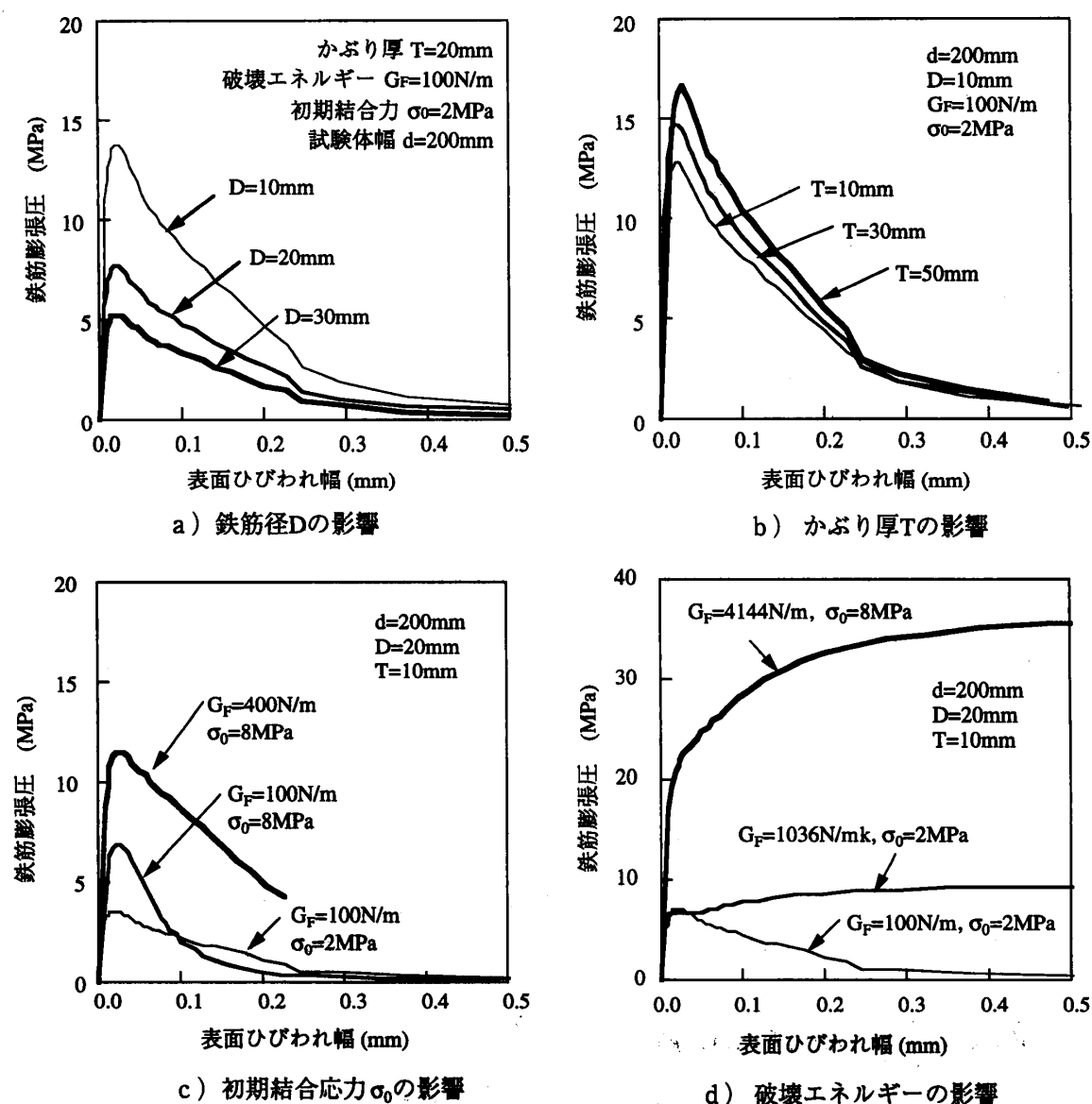


図-3 鉄筋表面の膨張圧とコンクリート表面ひびわれ幅との関係

が大きいほど、ひびわれ抵抗性は大となる傾向がある。特に破壊エネルギーの大きい場合には開口変位が増大しても抵抗力は大きい。これらの特性を有するものは、前者は高強度コンクリートに、後者は高靱性のコンクリートに対応する。特に、繊維コンクリート型のポリリニア引張軟化曲線（図-2）を有するものは、開口変位の増大に大きな圧力を要する。したがって、耐久性の向上の観点から繊維補強コンクリート等の利用は有効と考えられる。

図-4は、解析より算出される鉄筋位置の平均開口変位（鉄筋膨張による変位の推定値）から、膨張圧がない場合での腐食層の膨張厚さを求め、表面ひびわれ幅との関係をみたものである。この場合の膨張厚さは、鉄筋位置の開口変位と膨張圧 P から、腐食部分の弾性係数（文献[5]より 250N/mm^2 とした）により求めた。

本図より腐食層の膨張厚と表面ひびわれ幅との両者には直線関係がある。したがって、表面のひびわれ幅は鉄筋腐食量に比例するものと考えられる。この傾きが大きいほど、腐食量に対する

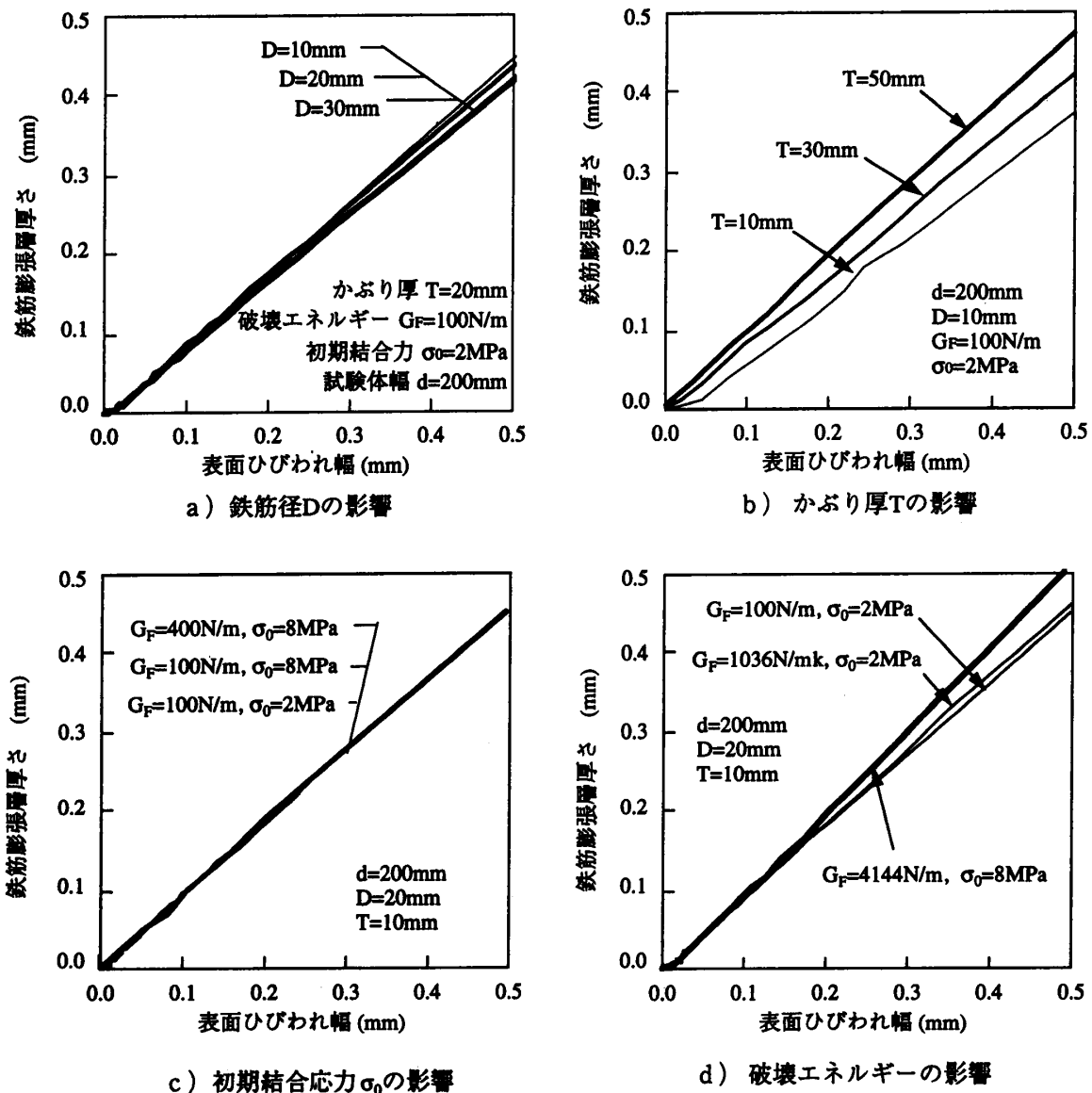


図-4 鉄筋表面の膨張層厚さとコンクリート表面のひびわれ幅との関係

ひびわれ開口が小さいことになる。この傾きは、かぶり厚が大きいほど、破壊エネルギーが大きいほど大となる傾向にあるが、特に顕著ではなく、各条件ともほぼ同じような傾きを示す。この傾きを腐食ひびわれ係数とすると、この値より、コンクリート表面のひびわれ幅から、鉄筋の腐食量のおおよその推定が可能となる。

4. まとめ

1) 結合力モデルを用いた破壊力学的手法により鉄筋腐食膨張によるかぶり部コンクリート表面のひびわれ開口の解析方法を確立した。

2) 本解析結果より、鉄筋径が小さいほど、また、かぶり厚が大きいほど、ひびわれ開口の抵抗性は大となった。また、コンクリートの引張軟化特性において初期結合が大きいほど、また、破壊エネルギーが大きいほど、ひびわれ開口の抵抗性は大となり、これらの特性を有する高強度繊維補強コンクリートは鉄筋コンクリートの耐久性の向上に有効であることが考察された。

3) 本解析結果より、腐食層の膨張厚と表面ひびわれ幅との間には直線関係が認められ、その傾きは材料・鉄筋径等の条件にかかわらずほぼ一定となった。この傾き（腐食ひびわれ係数）より、コンクリート表面のひびわれ幅から、鉄筋の腐食量のおおよその推定が可能となった。

謝辞 本研究は、科学研究費総合研究A（友澤東大教授代表）の一部として行ったものである。

Appendix

ひび割れ面に作用力が働く場合（右図）での形状関数は以下のとおりである[6]。

$$G(a, c, d) = \frac{G'(a, c, d)}{(1-A)^{3/2} \sqrt{1-B^2}} \quad (A = a/d, \quad B = c/a)$$

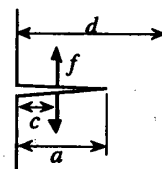
$$G'(a, c, d) = g_1(A) + g_2(A) \cdot B + g_3(A) \cdot B^2 + g_4(A) \cdot B^3$$

$$g_1(A) = 0.46 + 3.06A + 0.84(1-A)^3 + 0.66A^2(1-A)^2$$

$$g_2(A) = -3.52A^2$$

$$g_3(A) = 6.17 - 28.22A + 34.54A^2 - 14.39A^3 - (1-A)^{1.5} - 5.88(1-A)^5 - 2.64A^2(1-A)^2$$

$$g_4(A) = -6.63 + 25.16A - 31.04A^2 + 14.41A^3 + 2(1-A)^{1.5} + 5.04(1-A)^5 + 1.98A^2(1-A)^2$$



参考文献

- [1] 前田孝一：かぶりコンクリートのひび割れに必要な鉄筋の腐食量に関する研究，日本建築学会大会梗概集，pp.147-148, 1983.
- [2] 魚本健人，西村次男，アナンダ・ヘラト：アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張機構に関する一考察，セメント技術年報，42，pp.339-342, 1988.
- [3] 原田哲夫：静的破砕材を用いたコンクリート構造物の解体に関する基礎的研究，学位論文，昭和62年
- [4] 森川雅行，関 博，奥村 隆：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎研究，土木学会論文集，第387号，p.97-105, 1987.
- [5] 角本 周，梶川康男，川村満紀：コンクリート中の鉄筋腐食による膨張機構の弾塑性解析ととその適用性，土木学会論文集，第402号，p.151-159, 1989.
- [6] Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R. : The Stress Analysis of Crack Handbook, Second Edition, Paris Productions Incorporated, 1985.