

アンカーボルトの引き抜きによるコンクリート 構造体でのひびわれ伝播解析

Analysis of Crack Propagation in Concrete Structure under Pull-out of Anchor Bolt

松永昭吾* 廣瀬壮一** 谷口健男*** 伊藤恭平****

By Shohgo MATSUNAGA, Sohichi HIROSE, Takeo TANIGUCHI and Kyouhei ITOH

This paper investigates a crack propagation problem in the pull out test of an anchor bolt in a concrete structure, which was proposed as a round-robin analysis by the Japan Concrete Institute. The analysis is carried out using a finite element method and is based on linear fracture mechanics. The Delaunay Triangulation Method is used as an automatic mesh generation for more accurate calculation of stress intensity factors and crack propagation. The results are presented for load-displacement curves and crack propagation paths, including crack branching process, and show reasonable agreement with other numerical solutions and experiments.

Key Words : Finite Element Method, Linear Fracture Mechanics,
Automatic Mesh Generation

1 まえがき

近年、コンクリートの高性能化が図られるとともに、コンクリートが橋梁、エネルギー関連施設などの大型構造物に利用されるようになった。それに伴い、コンクリート構造物の安全性、耐久性などの問題を扱う上で、コンクリートの破壊についての高精度な予測手法が必要とされるようになってきた。また、設計式においては実験式の域を脱していないものも少なくなく、実験の遂行が不可能な大規模なコンクリート構造物に対して設計式の適用範囲を明らかにするとともに新たな理論的設計式の構築が必要であろう。このような状況下において、破壊力学理論を取り入れた数値シミュレーションによる解析システムの確立が必要不可欠であると考えられる。

本研究では、数値解析手法として変位法に基づく有限要素法（以後、変位型有限要素法と呼ぶ）を用いる。要素分割には、デローニー法を用いた任意2次元領域のためのひびわれ進展解析用要素自動分割を利用することにより、解析システムの効率化を図り、ひびわれ進展毎の要素の再分割を効率よく行っている。

また、本研究では、コンクリート構造物への破壊力学理論の適用を目的として、耐荷力とひびわれ進展経

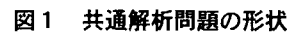
* 岡山大学大学院修士課程学生 土木工学専攻 (〒700 岡山市津島中3-1-1)
 ** 工博 岡山大学助教授 工学部共通講座 (〒700 岡山市津島中3-1-1)
 *** 工博 岡山大学教授 工学部共通講座 (〒700 岡山市津島中3-1-1)
 **** 工修 (株)建設技術研究所 大阪支社技術第4部 (〒540 大阪市中央区大手前1-2-15)

なお、本研究では、(社)日本コンクリート工学協会破壊力学の応用研究委員会の提案する共通問題2「アンカーボルトの引き抜きによる破壊問題」の解析モデルの仕様に基づいた解析モデルを用いる²⁾。

本研究で用いる共通解析問題の形状を図1に、諸元を表1、材料物性の入力値を表2に示す。なお、載荷治具は鋼製。ただし、#2については、実験結果との比較のため破壊エネルギーの値を 90Nm/m^2 とした。

試験体名	d (mm)	a (mm)	b (mm)	l (mm)	K
# 1	150	300	100	900	0
# 2	60	60	80	350	∞

	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν	破壊エネルギー G_F (Nm/m ²)
コンクリート部 (#1)	30.0	0.2	100
コンクリート部 (#2)	29.4	0.2	90*
アンカーボルト	210.0	0.3	—



破壊力学理論 本研究では、既に確立している線形破壊力学理論を採用する。なお、実験結果との比較により、非線形特性を考慮した非線形理論の必要性を検討する。

— 512 —

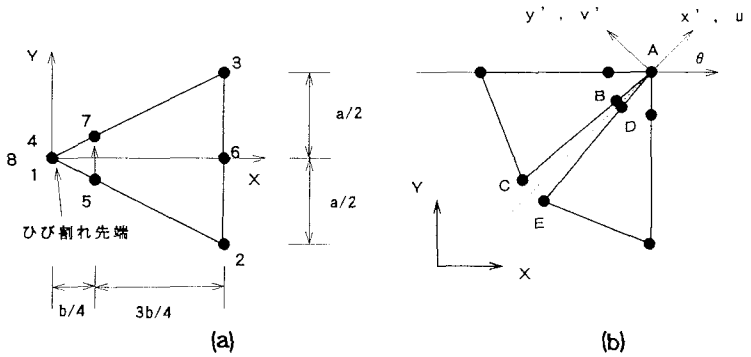


図2 6節点アイソパラメトリック特異要素

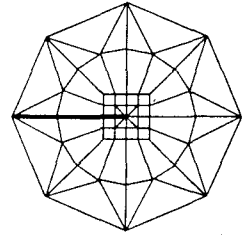


図3 ひびわれ先端用要素配列

先端部での特異な応力分布に対応する変位形状を精度良く表現できない。このため、Ingraffea により提案された特異アイソパラメトリック要素を利用する⁵⁾。この特異要素は図2(a)、(b)に示したように、2次元では通常のアイソパラメトリック要素の中間点をひびわれ先端の方向に1/4移動させる。図2に示すようにひびわれ先端部を要素分割したとき、応力拡大係数 K_I 、 K_{II} はそれぞれ(1)式で求めることができる。なお、 G はせん断弾性係数、 L はひびわれ先端要素長(図6におけるAC間の距離)。

$$\begin{aligned} K_I &= \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{G}{\kappa+1} [4(v_B' - v_D') + v_E' - v_C'] \\ K_{II} &= \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{G}{\kappa+1} [4(u_B' - u_D') + u_E' - u_C'] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$\kappa = 3-4\nu \quad (\text{平面ひずみ問題}), \quad (3-\nu)/(1+\nu) \quad (\text{平面応力問題})$$

式(1)からも明かなように特異要素を利用することによってひびわれ先端部での変位形状は先端からの距離の平方根として表現できている。

破壊基準について 応力拡大係数 K_I が、破壊靱性値 $K_{IC} = \sqrt{E G_F}$ (E : ヤング率, G_F : 破壊エネルギー) にいったときひびわれは進展するものとし⁶⁾、初期ひびわれは解析者が設定するものとする。

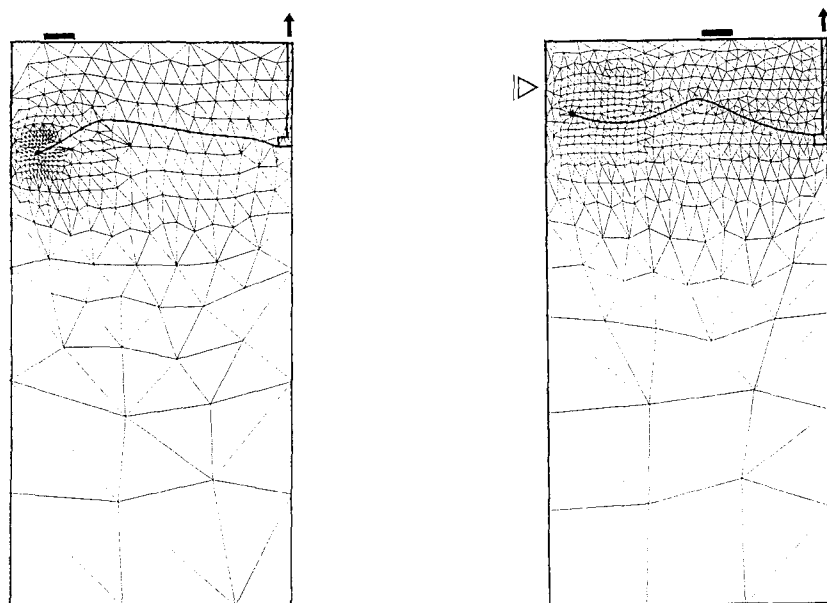
ひびわれ進展方向について ひびわれの進展解析を行う場合、ひびわれが進展する度に、その進展量と進展方向を決定するものとする。進展量については、ひびわれ進展の経路が滑らかとなるように解析者が十分に小さな値を与えるものとし、進展方向については、現時点でのひびわれ位置において次の進展方向を決定できる方法として、Maximum Stress Criterion ($\sigma_{\theta \max}$ 理論)⁷⁾を採用する。

有限要素分割 有限要素法を利用する場合、ひびわれ進展の度に新しいひびわれ線が生成され、それに伴い新しく有限要素モデルを作り直す必要がある。また、ひびわれ先端部での解の精度を確保することもモデル設定時において重要な課題となる。すでに述べたように、ひびわれ先端部分では特異アイソパラメトリック要素を導入する。また、精度の確保のためにはその周辺においても十分小さな要素を設定する必要がある。以上の要求より、ひびわれ先端部には図3に示す要素群を常に配置することとし、その寸法はこの要素群の

外周円の半径を適切に与えることにより決定する。なお、この図の最内側に位置する8個の三角形要素が6節点アイソパラメトリック特異要素、その他の要素はアイソパラメトリック要素である⁸⁾。

ひびわれ線を含む先端部以外の有限要素は、筆者の一人が既に提案しているDelaunay三角分割法を用いて自動分割を行う⁹⁾。ひびわれ進展の度に要素の再分割が必要となるが、新規入力新しく生成されたひびわれ線上の点のみであり、このような節点増加、節点座標変更に対して対応が容易であるということで、本研究ではDelaunay三角分割法を採用している。この要素自動分割法の導入により、解析効率を支配する要素分割において、高速かつ簡便に任意の要素分割を行えるようになった。先に述べたひびわれ先端用要素配列部以外は、すべてアイソパラメトリック要素を用いている。なお、ひびわれ線上の節点は2重化（同じ座標値をもつ節点を2個生成）している。

図4(a)、(b)に、2節で示したモデルの有限要素モデルを示す。なお、2次元解析を行う上で平面ひずみ仮定を行い、左右対称であることから左側半分を用いて2次元モデル化を行った。



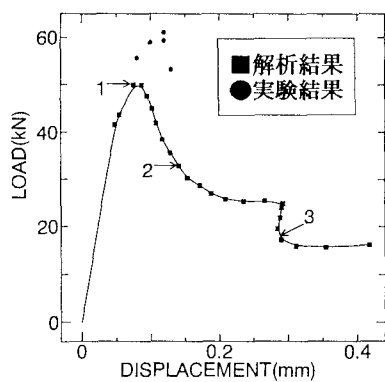
(a)試験体 # 1

(b)試験体 # 2

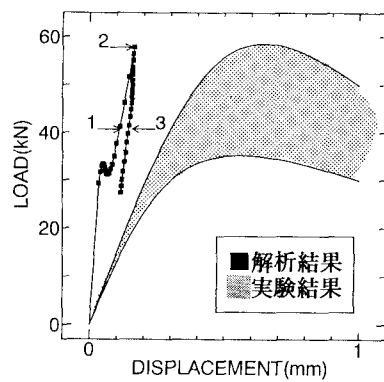
図4 要素分割図（太線：ひびわれ進展経路）

4 解析結果

図5(a)、(b)に、試験体#1、#2の荷重－変位曲線を示す。なお、変位は、図1のA点（アンカーボルトの下端）における変位を示す。#1については、内田らの実験結果¹⁰⁾との比較により最大荷重時の変位は、ほぼ一致したものの、最大荷重はやや低めの値となった。ただし、内田らの実験では破壊エネルギーは算定されていないので、共通解析により提示された値を用いた。#2については、中島らの実験結果¹⁰⁾との比較により、最大荷重時の変位に大きなずれを生じた。これらのずれは、コンクリート構造物におけるひびわれ進展の際生じるマイクロクラックなどによる材料のダメージを評価できていないこと、弾性係数など材料物性の入力値が実験での値と相違していることなどが、要因にあげられると考えられる。

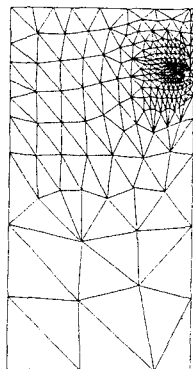


(a) # 1

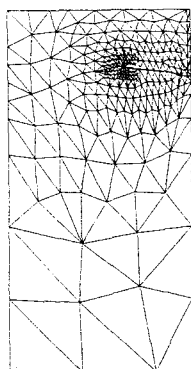


(b) # 2

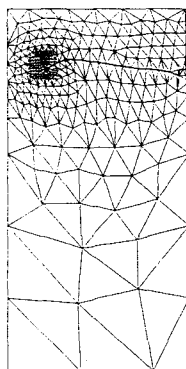
図5 荷重-変位 (Point A) 曲線



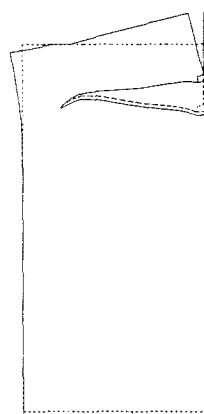
1. $P_{max} = 49.97 \text{ (kN)}$



2. $P = 32.93 \text{ (kN)}$

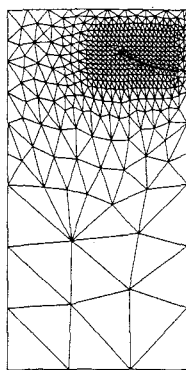


3. $P = 17.30 \text{ (kN)}$

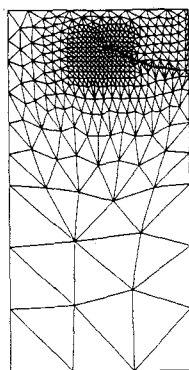


3. $P = 17.30 \text{ (kN)}$

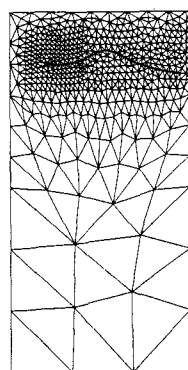
図6 ひびわれ進展状況 (# 1)



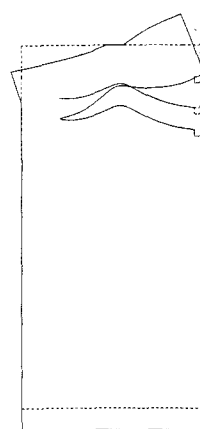
1. $P = 37.78 \text{ (kN)}$



2. $P_{max} = 57.85 \text{ (kN)}$



3. $P = 37.96 \text{ (kN)}$



3. $P = 37.96 \text{ (kN)}$

図7 ひびわれ進展状況 (# 2)

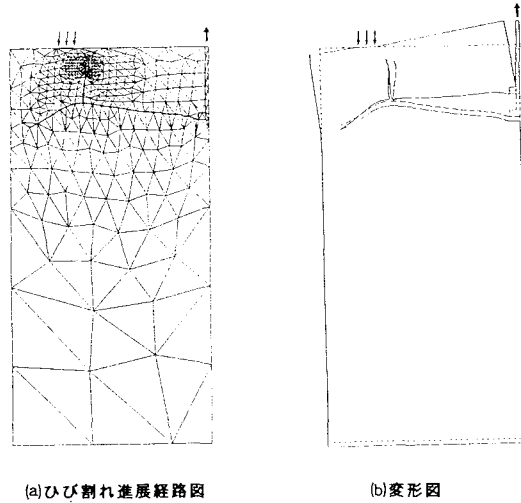


図8 ひびわれ進展状況（#1，分岐ひびわれ）

図6、図7には、図5中に示した1，2，3の時点におけるひびわれ進展の様子と3の時点での変形図を示す。

試験体#1において、载荷治具の下方をこえてひびわれが進展すると、押さえ点下方のひびわれ線に沿った要素に強い引張応力を生じるものができる。これは、ひびわれ線上からの分岐ひびわれの発生の可能性を示すものである。そこで、以下に示す手順で分岐ひびわれ進展解析を行った。

1. 主ひびわれについてひびわれ進展解析を行う。
2. 主ひびわれの破面に隣接する要素の主応力より、分岐ひびわれ発生の可能性を検討し、最大引張応力を示す要素から分岐の初期ひびわれを設定する。
3. 以下、分岐ひびわれについてひびわれ進展解析を行う。

図8にそのひびわれ進展経路を示す。この分岐ひびわれの進展解析により、実験結果にみられるようなひびわれの分岐経路が得られた。

5 おわりに

本研究では、線形破壊力学理論を採用し、有限要素解析を行った。実験結果との照合により、ひびわれ進展経路については、おおむね良い結果が得られた。実験結果にみられるようなひびわれの分岐についてもほぼ同様な進展経路が得られた。しかし、ひびわれの分岐については、今回、1本のひびわれ進展が大幅に進展した後発生する、と仮定して解析を行ったが、マイクロクラックが集積している破面からの、新たなひびわれの発生条件については今後検討していく必要があるであろう。分岐した2本が同時に進行する場合も含め、お互いの影響を考慮する上で今後の重要な課題であると考えられる。また、耐荷力については、実験結果に比べ解析結果のほうが2割強高めの結果となり、ひびわれ進展に伴うマイクロクラックの発生など、進展に伴う破面近傍のダメージを評価できていないことが、主な原因であると考えられる。したがって、今後はひずみ軟化などの非線形性の解析システムへの導入が重要な課題であると考えられる。

なお、ひびわれ進展解析への要素自動分割の導入に際し、再分割の効率化は図られたが、要素寸法、及び、進展毎のひびわれ進展長の決定については、今後の課題として検討していく予定である。

参考文献

- 1) Hillerborg, A. : A Model for Fracture Analysis, Report TVBM-3005, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978
- 2) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の破壊に関する共通解析および実験—参加募集—, コンクリート工学, Vol. 30, No. 6, 1992
- 3) K. J. Bathe & E. L. Wilson : 有限要素法の数値計算, 科学技術出版社 (菊地文雄訳), 1979
- 4) N. E. Gibbs, W. G. Poole & P. K. Stochmeyer : An algorithm for reducing the bandwidth and profile of sparse matrix, SIAM J. Numer. Anal., Vol. 13, 236-263, 1976
- 5) A. R. Ingraffea : Numerical modelling of fracture propagation, Rock Fracture Mech. (ed. H. P. Rothmaith), Springer, Berlin, 151-208, 1983
- 6) J. Wang, P. Navi & C. Huet : Round-Robin analysis of anchor bolts, RILEM TC-90 FMA, Fracture Mechanics of Concrete-Applications, Preliminary Report, 1991
- 7) F. Erdogan & G. C. Sih : On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, Trans. ASME, December, 519-527, 1963
- 8) T. Taniguchi, K. Sanada, H. Matsumoto & S. Moriwaki : Some Remarks on Finite Element Modeling on Crack-tip Area, Memoirs of School of Eng., Okayama Univ., Vol. 21. 2., 31-46, 1987
- 9) 谷口, 太田:直線辺で構成される任意2次元領域へのデラウニー三角分割の適用, 土木学会論文報告集 432/1-16, 69-78, 1991
- 10) 日本コンクリート工学協会:破壊力学の応用研究委員会報告書, 1993

(1993年9月16日受付)