

論文

[2027] 分布ひびわれモデルによるアンカーボルトの引抜き破壊挙動の解析

内田裕市*1・六郷恵哲*2・小柳 洽*3

1. はじめに

日本コンクリート工学協会の「破壊力学の応用研究委員会」では、コンクリート構造物の耐力やひびわれ進展に関する各種の解析手法やモデルの有効性と問題点を明かにするために、共通解析および実験を募集した[1]。ここでは、そのうちのアンカーボルトの引抜き破壊の問題に対して、分布ひびわれモデルを用いた有限要素法による解析を行った結果を報告するとともに、その解析法の問題点を示す。

本研究で対象とした問題は、図-1に示すようなコンクリート板中に埋込まれた頭付きアンカーボルトの引抜き破壊挙動である。この問題では、アンカーボルトの埋込み深さに対して反力位置が比較的遠く、しかも横拘束もないため、供試体の破壊挙動に対してはコンクリートの引張破壊が支配的になるものと予測される。また、一般に引張破壊が支配的なコンクリート部材の破壊強度は顕著な寸法依存性を示し、このような破壊現象を解析する場合、コンクリートの引張軟化を考慮することが重要であることが知られている。そこで、ここでは、分布ひびわれモデルに引張軟化を組込んだモデルを用いて、有限要素法による解析を行い、解析結果の要素分割依存性ならびに材料定数および供試体寸法の影響について検討した。

2. 解析の概要

2.1 材料モデル

ひびわれ発生前は、コンクリートは線形弾性体とし、塑性挙動はまったく無視した。主応力が引張強度を越えたとき主応力方向に直交する方向にひびわれが発生するものとした。ひびわれ後は、直交異方性体を仮定し、ひびわれ直交方向は引張軟化を生じ、ひびわれ平行方向は弾性体のままとした。本解析では分布ひびわれモデルを用い、ひびわれ直交方向の応力-ひずみ関係に対しては、 $D_{a1}h1blom$ 等[2]が提案したモデルを採用した。このモデルは、要素内に1本の仮想ひびわれを仮定し、仮想ひびわれ部に生じるひびわれ幅を要素の等価長さ（ひびわれ平行方向への要素の投影長）で除すことで、ひびわれひずみに換算し、これと要素の弾性領域の弾性ひずみとを足し合わせたものを、ひびわれ直交方向のひずみとするものである（図-2, 図-3）。すなわち、このモデルは、引張軟化域の応力-ひずみ関係を要素寸法に依存させたモデルであり、クラックバンドモデル[3]に類似したモデルである。

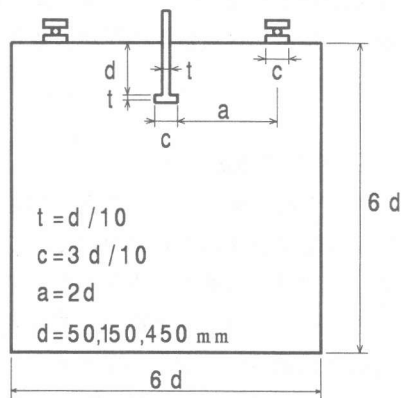


図-1 供試体の形状・寸法

*1 岐阜大学助手 工学部土木工学科, 工修 (正会員)
 *2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)
 *3 岐阜大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

仮想ひびわれの特性として入力する引張軟化曲線としては、図-4に示す1/4モデル[4]を用いた。また、本解析は単調荷荷のみを対象としているが、軟化を考慮しているため、外力は増加するにもかかわらず、供試体内では局部的に除荷を生じることがある。そのため、軟化域における除荷・再荷荷のモデルとして、図-3に示したように単純な原点指向型のモデルを用いた。

ひびわれ要素のせん断特性を表すモデルとして、ここでは回転ひびわれモデルを用いた。このモデルは、ひびわれ発生後、主ひずみ方向が変化した場合、ひびわれ方向を常に最大主ひずみ方向と直交するように回転させることで、主軸が常に一致するようにしたものである。したがって、このモデルでは、ひびわれ面にはせん断ひずみ、せん断応力ともにまったく発生しないので、通常、せん断低減係数で表されるような、いわゆるせん断モデルは必要としない。ただし、増分形の材料剛性マトリックス（いわゆるDマトリックス）中のせん断項には、主軸を一致させるため、次式を用いる[5]。

$$G_{12} = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{2(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{11} , ϵ_{22} : 主ひずみ
 σ_{11} , σ_{22} : 主応力

アンカーボルトの引抜き強度に対する材料定数の影響を検討するため、表-1に示すように、引張強度 f_t 、破壊エネルギー G_F 、および弾性係数 E を変化させ解析を行った。

2.2 有限要素モデル

図-5に解析で用いた要素分割を示す。使用した要素はすべて定ひずみ三角形要素である。供試体の対称性から、右半分のみをモデル化した。アンカーボルトとコンクリートは、ボルトの突起部（以下、ボルトヘッドと呼ぶ）上面のみで付着していると仮定したので、ボルトはモデル化しなかった。反力板は供試体の一部としてモデル化し、反力板上面中央で鉛直方向を点支持した。要素分割は全部で4種類用いた。まず、要素分割のパターンの影響を検討するために、放射状に分割したMesh(a)、直交方向に分割したMesh(b)、および直交方向に並べた正方形をさらに×印状に分割したMesh(c)の3種類を用いた。また、要素寸法の影響をみるため、Mesh(a)について1つの要素をさらに4分割することで、分割のパターンを変化させずに、寸法のみを小さくしたMesh(d)を用いた。なお、供試体寸法を変化させた解析では、同じ要素分割で、要素寸法のみを定数倍したものをを用いた。

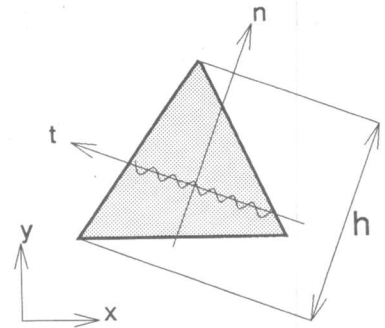


図-2 要素の等価長さ

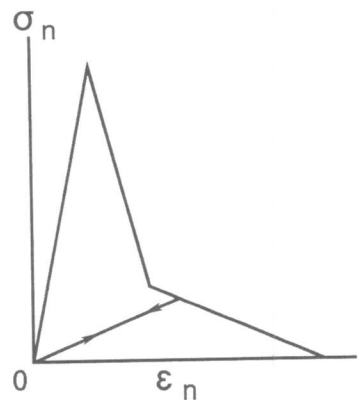


図-3 引張応力-ひずみ関係

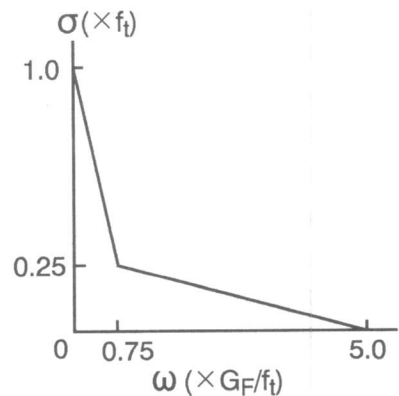


図-4 引張軟化曲線

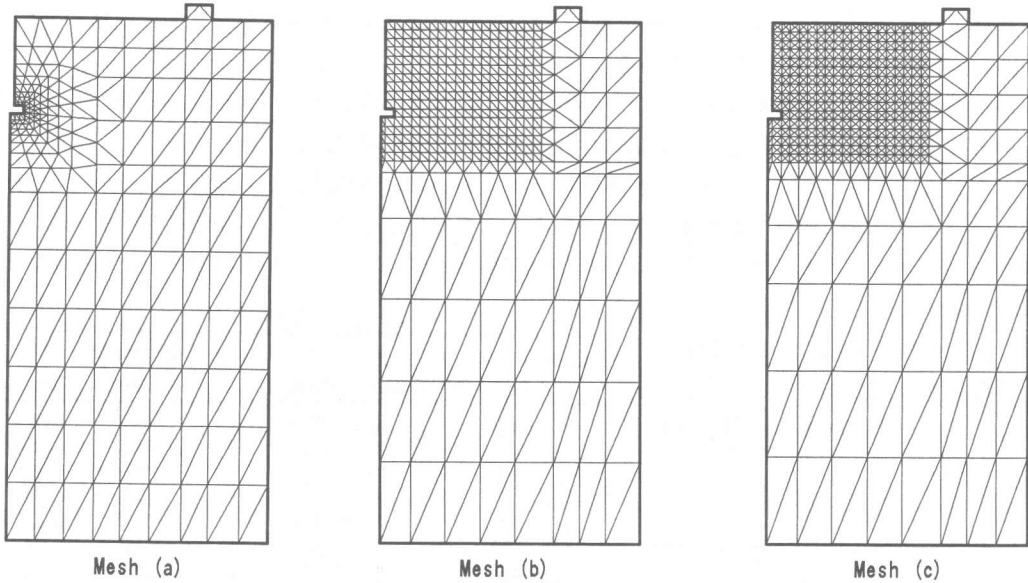


図-5 要素分割

載荷は、ボルトヘッド上面の節点に鉛直方向に強制変位を与えることで行った。なお、ボルトヘッド上面部では、鉛直方向に大きな圧縮応力が作用するため、ボルトヘッド上面でコンクリートとボルトが水平方向にずれることはなく、逆に、ボルトヘッド上面部のコンクリートは、ボルトによって水平方向の変形が拘束されると考えられる。そこで、解析ではボルトヘッド上面の節点では、水平方向の変位を拘束した。

非線形方程式の求解法には、増分繰返し法を用い、各増分ステップにおいて、外力ベクトルのノルムに対する不平衡等価節点力ベクトルのノルムの比が、 10^{-3} 以下になるまで繰返し計算を行った。

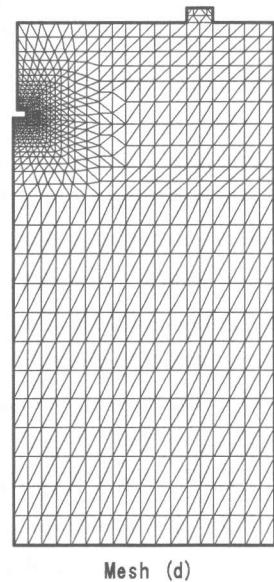
3. 解析結果

3.1 要素分割依存性

表-1に解析で得られた最大荷重とその時の変位を示す。荷重は、供試体の単位厚さ当たりの値で示してある。変位は、反力点に対するボルトヘッド上面の変位である。

図-6に要素寸法を変えた場合(図-5中、Mesh(a)とMesh(d))の荷重-変位曲線を示す。また、図-7には最大荷重点でのひびわれ状況を示す。要素寸法を小さくすると、荷重がわずかに低くなる傾向が見られる。また、ひびわれは、Mesh(a)の場合には、ボルトヘッドから反力点の方向に向かって、水平方向のひびわれが分散して見られるのに対して、要素寸法を小さくしたMesh(d)の場合には、ひびわれは比較的狭い幅に局所化して反力点の方向に向かっている。

図-8には要素分割のパターンを変えた場合(図-5中、Mesh(a)、Mesh(b)、およびMesh(c))の荷重変位曲線を示す。図-9にひびわれパターンを示す。Mesh(a)とMesh(b)では最大荷重が30



%程度差が生じ、また、ひびわれもMesh(b)とMesh(c)ではボルトヘッドから水平に進展しており、Mesh(a)の場合とは著しく異なっている。

以上のことより、本解析で用いたひびわれモデルは要素分割、特にパターンの影響が非常に大きいといえる。また、要素寸法の影響は、分割パターンの影響に比較すれば小さいといえる。なお、Rotsも、クラックバンドモデルを用いた解析において、解析結果が要素分割に依存し、ひびわれは要素分割線に沿って進展する傾向のあることを報告している[6]。本解析で用いたモデルを含めクラックバンドタイプのモデルは、既存のFEMコードに組込むことが比較的容易であるため、現在でもよく用いられているようであるが、使用にあたっては解析結果が要素分割に依存することに十分に注意しておく必要があると考えられる。

3.2 材料定数と供試体寸法の影響

前節において、本解析で用いたひびわれモデルは、要素分割に依存するという解析モデルとしては致命的とも言える欠陥を有していることを示した。しかし、ここでは、本解析モデルはあくまでも第1近似的なモデルであると認識した上で、アンカーボルトの引抜き破壊強度に対してコンクリートの材料定数および供試体寸法がどの程度影響するかについてケーススタディーを行った。

図-10は埋込み深さ(供試体寸法)と引抜き破壊強度の関係を示したものである。横軸は埋込み深さ d をコンクリートの特性長さ l_{ch} ($=E G_f / f_t^2$) で除すことで、供試体寸法を材料定数の影響を考慮した形で無次

表-1 解析結果

Case	d (mm)	f_t (MPa)	E (GPa)	G_f (N/m)	Mesh	最大荷重 (N/mm)	変位 (mm)
A	150	3	30	100	(a)	447	0.098
B	↑	4	↑	↑	↑	486	0.098
C	↑	3	40	↑	↑	480	0.138
D	↑	↑	30	150	↑	501	0.192
E	↑	↑	↑	200	↑	538	0.222
F	50	↑	↑	100	↑	192	0.047
G	450	↑	↑	↑	↑	886	0.198
H	150	↑	↑	↑	(d)	422	0.100
I	↑	↑	↑	↑	(b)	349	0.084
J	50	↑	↑	↑	↑	170	0.041
K	450	↑	↑	↑	↑	717	0.152
L	150	↑	↑	↑	(c)	388	0.090

(↑: 同上)

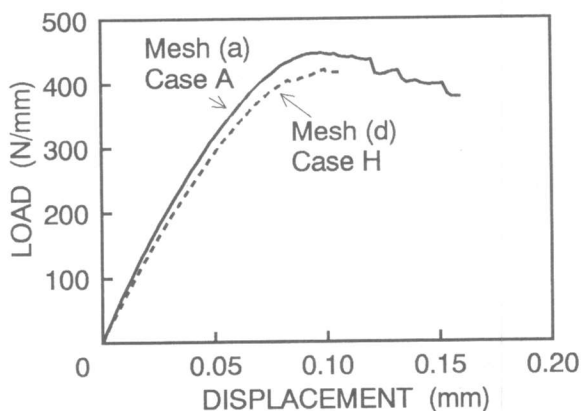


図-6 要素寸法が異なる場合の荷重-変位曲線

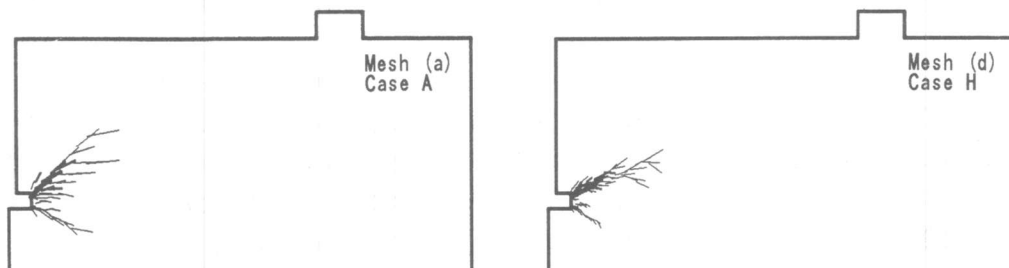


図-7 要素寸法が異なる場合のひびわれ

元化してある。また、縦軸は最大荷重を $b d f_t$ (b : 供試体厚) で除す、すなわち、破壊荷重を強度の次元に換算し、さらにコンクリートの引張強度で除すことで無次元化してある。同図より、同じ要素分割であれば、材料定数および供試体寸法が変化した場合の解析結果は1本の直線上に載っていることがわかる。その直線の傾きは、Mesh(b)の方がMesh(a)より急ではあるが、いずれの場合も-1/3程度である。したがって、直線の傾きを-1/3とすれば、引抜き破壊荷重は次式で表される。

$$F_{max} \propto b (E_G f_t d^2)^{1/3} \quad (2)$$

上式より、本解析では引抜き破壊荷重には $d^{2/3}$ に比例するという寸法依存性があり、また材料定数の影響については、破壊荷重が $(E_G f_t)^{1/3}$ に比例するという結果が得られたことになる。

図-11はMesh(b)で、供試体寸法を変化させた場合の荷重-変位曲線である。この図の場合も変位 δ は埋込み深さ d で、また荷重 F は $b d f_t$ で除すことで両軸とも無次元化してある。同図より、最大荷重点以降の荷重-変位曲線の傾きが $d=50, 150\text{mm}$ の場合に比べて急になっており、寸法の増加にともな

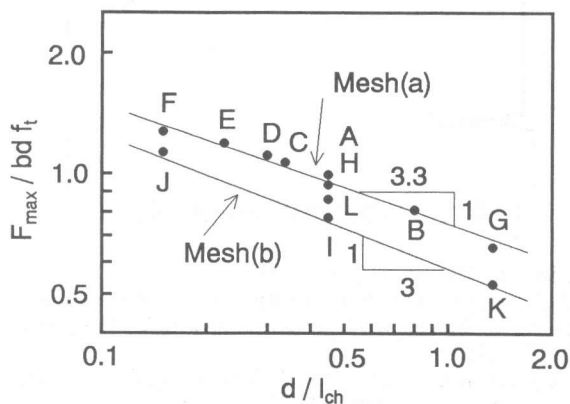


図-10 供試体の寸法と破壊強度

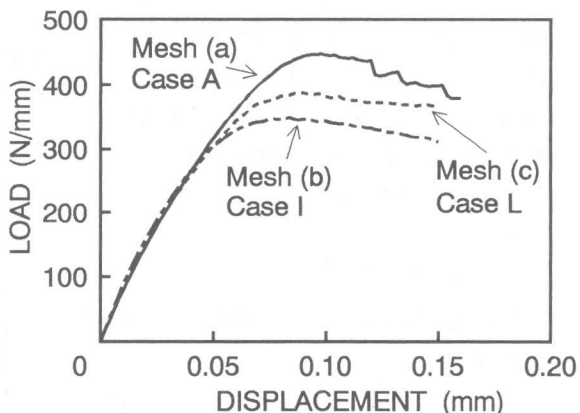


図-8 要素分割が異なる場合の荷重-変位曲線

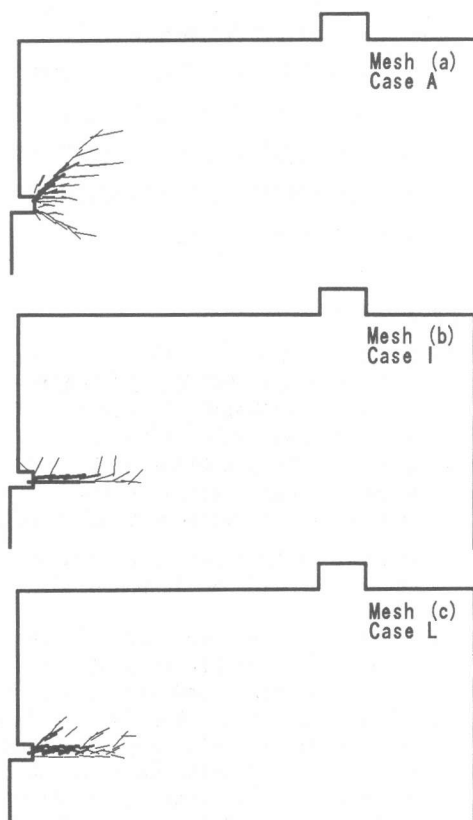


図-9 要素分割が異なる場合のひびわれ

って破壊がより脆性的になることを表していると考えられる。

図-12は Mesh(b)で、供試体寸法を変化させた場合の最大荷重点におけるひびわれ状況である。同図より、最大荷重点までのひびわれ進展長さは、供試体寸法が大きくなるにつれて相対的に短くなっていることがわかる。すなわち、供試体寸法が小さいほど破壊挙動に対して引張軟化の影響が大きいことを表していると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下の2点である。

- (1) 本研究で用いたひびわれモデルには、要素分割依存性があり、特に分割パターンの影響が大きい。
- (2) 要素分割依存性の問題を除けば、引張軟化を考慮することにより、アンカーボルトの引抜き破壊強度および破壊性状の寸法依存性、ならびに破壊強度に対する材料特性の影響を解析的に表現できることが示された。

【参考文献】

- 1) 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. 6.
- 2) Dahlblom, O. and Ottosen, N.S. : Smearred Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 55-76, 1990.
- 3) Bazant, Z.P. and Oh, B.H. : Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, Vol. 16, No. 13, pp. 155-177, 1983.
- 4) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W. : Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy, Balkema, pp. 153-163, 1989.
- 5) Bazant, Z.P. : Comment on Orthotropic Models for Concrete and Geomaterials, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 849-865, 1983.
- 6) Rots, J.G. : Computational Modeling of Concrete Fracture, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1988.

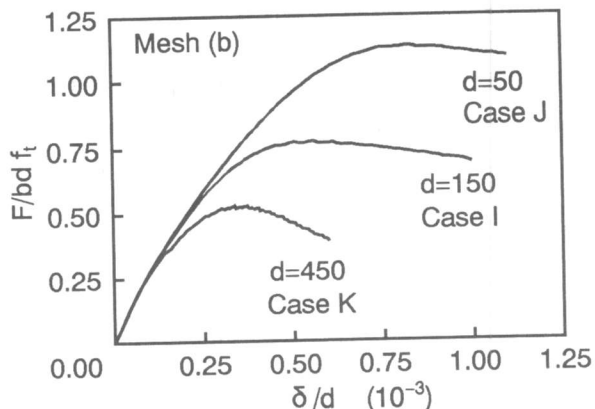


図-11 供試体寸法が異なる場合の荷重-変位曲線

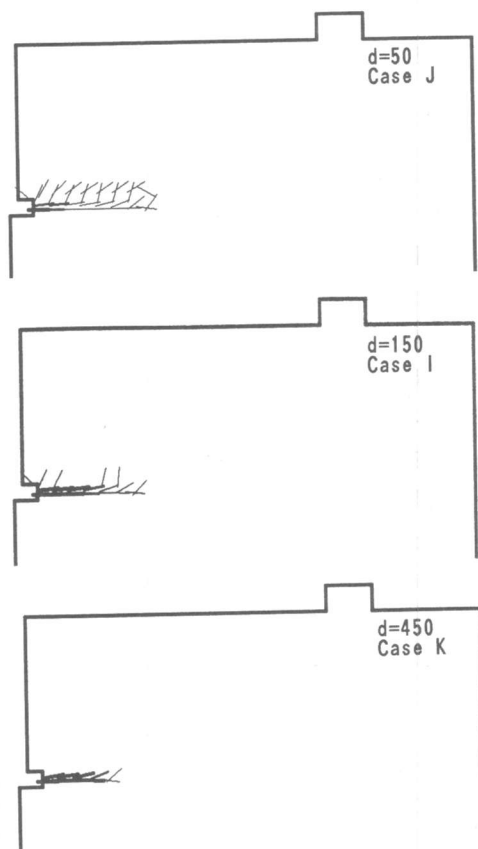


図-12 供試体寸法が異なる場合のひびわれ