

(26) 接着系あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊メカニズムに関する解析的考察

AN ANALYTICAL STUDY OF DYNAMIC FAILURE MECHANISM OF CHEMICAL ANCHOR BOLT UNDER PULLOUT LOADING

栗木茂幸*, 園田佳巨**, 佐藤紘志***

Shigeyuki KURIKI, Yoshimi SONODA and Hiroshi SATOH

- * 防衛大学校研修生 土木工学科 (〒239-8081 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
 ** 博士(工学) 防衛大学校講師 土木工学科 (〒239-8081 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
 *** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8081 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：接着系あと施工アンカーボルト、動的引抜き破壊、コーン破壊
 (Chemical anchor bolt, Dynamic pullout failure, Corn failure)

1. はじめに

近年、接着系あとアンカーを既存鉄筋コンクリート建造物の耐震補強壁定着部等の動的な荷重が作用する箇所にも使用する機会が増えつつある。あと施工アンカーは、本来の用途が補修や増設工事等により限定されることから、これまであまり重要視されることがなく、その力学特性に関する研究も数少ない。しかし、今後は既設構造物の維持補修が非常に重要になることは明らかであり、その中には動的荷重に対する耐力を要求されるものも少なくないものと考えられる。そこで、著者らはあと施工アンカーの動的引抜き破壊メカニズムについて実験的な検討を行い、引抜き破壊に対する載荷速度の影響について考察してきた¹⁾。本研究では、接着系あと施工アンカーの動的引抜き破壊特性の把握を目的とした研究の基礎的段階として、有限要素法による静的および動的応答解析を行い、載荷速度が引抜き破壊形態に与える影響に関して基礎的な考察を試みた。

2. 解析手法の概要

アンカーボルトの引抜きに関しては、頭付きアンカーの引抜きによるものが「コンクリート構造の破壊に関する共通解析および実験」のベンチマ

ーク問題として選定されたように数多くの研究が存在する。しかし、接着系あと施工アンカーの場合には、アンカー底部に投錨効果が得られないことやボルトの定着が専ら接着剤の力に依存することから、頭付きアンカーとは全く異なる耐力特性を示すものと考えられる。本研究では、接着系アンカーの引抜き破壊メカニズムに関して、コンクリートの引張破壊のみを考慮した数値解析を行い、基礎的な考察を行った。

2.1 静的解析手法

本解析では、コンクリートの破壊として引張破壊のみを対象に検討した。すなわち、コンクリートのひび割れの影響を解析的に考慮するため、ひび割れを生じた要素を直交異方性体としてモデル化した簡易手法^{2), 3)}を用いた。具体的には、著者らが行った実験の試験体を対象に、ボルト中心軸に関する軸対称問題とみなして荷重増分法による解析を行い、各荷重増分ステップでコンクリートの引張強度と要素内の最大主応力の比を求め、Rmin 法によりひびわれ要素を決定した。ひび割れは、図-1に示すように最大主応力に対して直交方向に発生するものと仮定し、ひび割れ直交方向に対して次式で表される応力-ひずみ関係式を適用した。

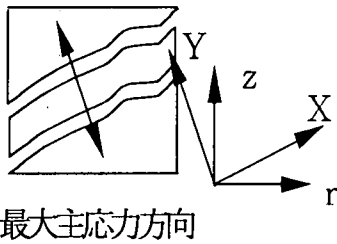


図-1 ひび割れのモデル化

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_r \\ d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \\ d\sigma_n \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu \cdot n & \nu & 0 \\ \nu \cdot n & (1-\nu) \cdot n & \nu & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu) \cdot \beta}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_r \\ d\varepsilon_z \\ d\varepsilon_\theta \\ d\varepsilon_n \end{Bmatrix}$$

(1)

ここに、 n ($=0.001$ とした) : ひび割れ直交方向の弾性係数低減率、 β ($=0.25$ とした) : ひび割れによるせん断剛性低減率。

本解析では、毎回1つずつ要素を破壊させながらひび割れの進展を求めていき、ひび割れによる解放応力に等価な節点荷重に対する収束計算を終えた後に、次の荷重増分に対する解析を行うこととした。

2.1 動的応答解析の概要

アンカーの動的引抜き破壊に対しては、軸対称モデルとして定式化した運動方程式を線形加速度法による時間積分を行うことにより解析した。初期条件は、ボルトの上端に解析対象としたアンカーの動的引抜き実験における引抜き速度と同様の値を与えた。なお、動的解析では時間間隔が非常に小さく、1間隔内で複数の要素が同時に破壊することは考えにくいことから、静的解析で行なったようなR min 法によるひび割れ要素の選択や解放応力に関する収束計算は省略した。すなわち、各要素で最大引張主応力がコンクリートの引張強度に達した時点でひび割れが生じたものとみなした。なお、接着剤の動的な荷重に対する力の伝達機構が明らかでない現時点では、アンカーとコンクリートの間の付着特性は完全接合状態(変位は連続性を有する)を仮定した解析を行った。

3. 数値計算結果および考察

3.1 解析モデル

解析モデルは、図-2に示すようにボルト中心を対称軸とした、幅 250mm×高さ 150mm の試験

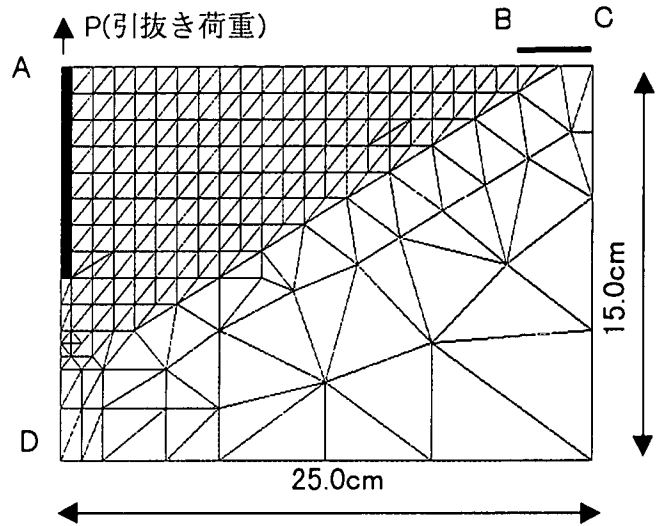
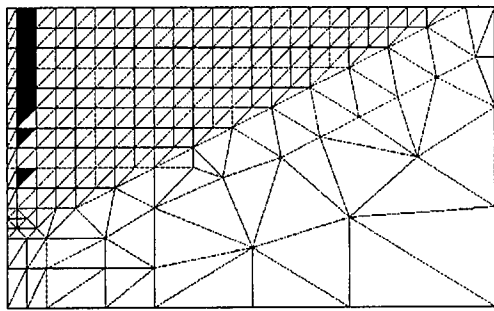


図-2 解析モデル

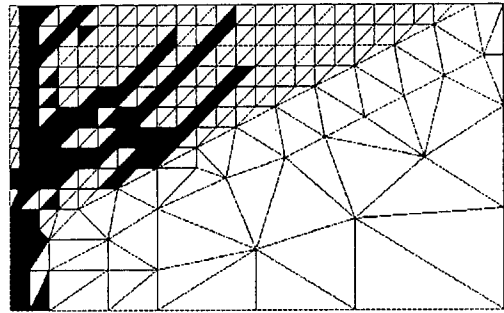
体を三角形1次要素でメッシュ分割したものを用いた。境界条件は、AD面を半径方向に拘束し、BC辺を鉛直方向に拘束したうえで、最上部アンカー要素の上端2節点に荷重(動的解析では初速度)を与えた。コンクリート要素の力学特性は、実験時のテストピースの圧縮試験および割裂試験結果より、弾性係数 $E = 1.5 \times 10^5$ (kgf/cm^2)、引張強度 $\sigma_t = 15$ (kgf/cm^2)、ポアソン比には一般に用いられる $\nu = 0.2$ を使用することとした。なお、動的解析においてもひずみ速度の影響は考慮していない。

3.2 静的引抜き破壊の解析結果および考察

図-3は、静的引抜き荷重に対する破壊状況を、ボルトと試験体とを完全接合と仮定した解析により求めたものである。図中の黒色の部分は引張ひび割れを生じた要素である。ひび割れ進展初期においては、アンカー近傍のコンクリート要素が上端からアンカー底部まで引張破壊を起こし、その後アンカー底部付近から数箇所のひび割れが試験体上面方向へと進展し、最大耐力時の破壊形態は、現実には見られない試験体裏面に至る破壊形態を示した。一方、接着剤の付着特性に関する実験から得られた結果を考慮して決定した節点荷重を用いて、ひび割れについても2次ひび割れの影響を考慮したときの最大耐力時の破壊状況を図-4に示す。この図より、アンカー底部を基点にほぼ45度の角度を維持しながら試験体上面へひび割れが進展する状況が認められた。この種の破壊状況は、実際の静的実験においてもしばしば見られることから、引張破壊のみを考慮した本法におい



(a) 初期の破壊形態



(b) 最大耐力時の破壊形態

図-3 静的引抜き荷重に対する破壊状況 (完全付着の場合)

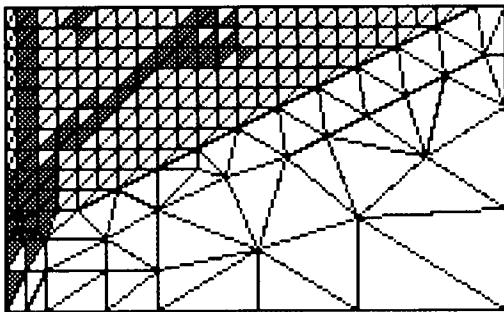


図-4 最大耐力時の破壊形態
(接着剤の付着応力を考慮)

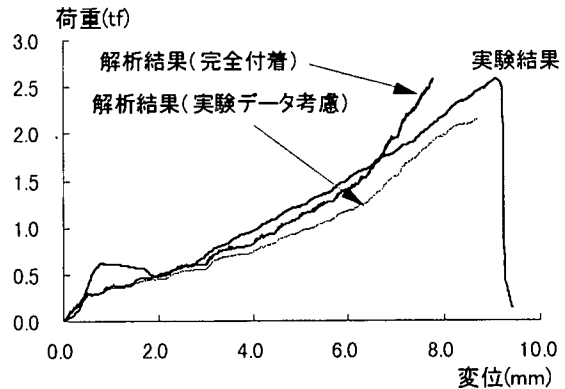
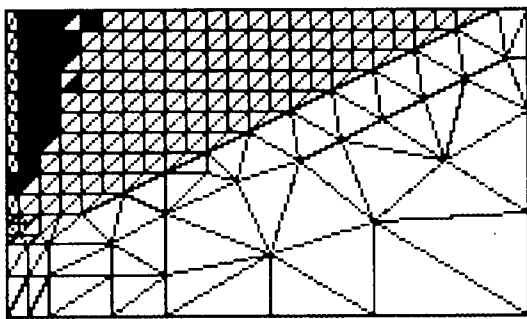
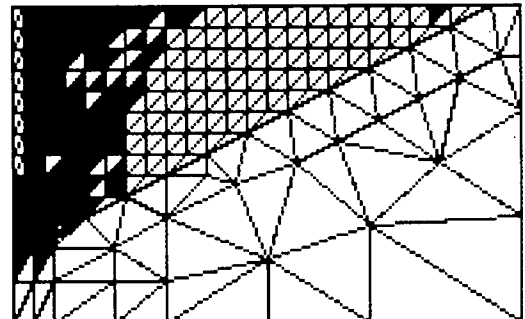


図-5 静的荷重-変位関係の比較



(a) 初期の破壊形態



(b) 最大耐力時の破壊形態

図-6 動的引抜き荷重に対する破壊状況

でも頭付きのアンカーの場合とは異なり、引抜きによるコーン破壊を概ね再現できるものと考えられる。図-5は、静的引抜き荷重-変位関係について、実験結果と2種類の仮定による解析結果を示したもので、この図より荷重-変位関係については2種類の解析ともに大差なく、実験結果を良好に再現していることが認められる。

3.3 動的引抜き破壊の解析結果および考察

3.2 動的応答解析結果および考察

図-6は、アンカーボルトの上端に 1m/s の引抜き速度を与えたときの動的破壊状況を示したも

のである。なお、ここではボルトとコンクリートは完全付着を仮定している。この図より、動的な引抜き荷重を受けたときの破壊の進展状況は、静的荷重が作用するケースと全く異なる結果となり、ボルト定着部上端から下側に向かって破壊領域が拡大しながら引張破壊が進展していく結果が得られた。これは、動的荷重が作用した場合にはごく短時間に応力が伝達され、試験体全体における力のつり合いがえられる以前に載荷位置近傍から破壊が発生、進展するためであると考えられ、本結果は動的荷重が作用するとコーン破壊領域は小さ

くなる可能性があることを示唆しているものと思われる。しかし、一般に接着剤の挙動は粘弾性体としてモデル化されることが多いのに対し、ここではボルトと試験体とを完全接合と仮定しているため、載荷初期にボルト上端近傍に大きな応力集中を招きやすい条件下にあり、必ずしも実際の接着系アンカーの動的引抜き破壊を再現できていないことも考えられる。現実の実験では、接着剤とコンクリートの界面の付着破壊が発生しやすく、今後、接着剤の動的な応力伝達状況や付着強度について実験的に明らかにし、その動的挙動を導入した解析を行う必要があるものと思われる。

4. 結論

本研究では、接着系あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊に関する検討を簡易な数値解析により行った。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1)接着系あと施工アンカーの引抜きによる破壊現象を、コンクリートの引張ひび割れのみを考慮した簡易な解析でも評価することができた。

(2)静的引抜き荷重に対する解析では、アンカー近

傍のコンクリート要素が上端からアンカー底部へと引張破壊を起こした後にアンカー底部から斜め上方にひび割れの進展が見られる結果が得られた。(3)動的引抜き荷重に対する解析では、ボルト定着部上端から下側に向かって破壊領域が拡大しながら引張破壊が進展していく結果が得られた。この結果は、必ずしも実際の接着系アンカーの動的引抜き破壊を再現しているとは考えられず、今後、実験により接着剤の粘弾性体的な力学特性を明らかにし、解析に導入する必要がある。

参考文献

- 1)園田佳巨、佐藤紘志、篠原敬治、小林行雄：
あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊メカニズムに関する実験的考察，構造工学論文集 Vol.43A, pp1347-1354, 1997年3月
- 2)W.F.Chen：コンクリート構造物の塑性解析，pp85-96, 丸善出版
- 3)石黒覚：コンクリートにおける破壊進行の数値解析，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集 第16巻, pp13-18, 平成4年7月