

I - A121 金属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一考察

防衛大学校 土木工学科 正員 ○園田佳巨 正員 佐藤紘志

1. 緒言

あと施工アンカーは土木・建築分野で広く利用されているが、その動的力学特性についてはこれまでほとんど検討がなされていない。そこで、著者らは金属系・接着系2種類のあと施工アンカーに対して引抜き速度をパラメータとした実験を行い、その破壊メカニズムについて検討を行った¹⁾。その結果、通常の施工条件下（埋込み深さ）では、接着系アンカーはボルト破断型が得られるのに対し、金属系アンカーではコーン破壊を示すことが明らかとなった。また、金属系アンカーの動的コーン破壊面積は、引抜き速度の増加とともに増大するが、引抜き耐力自体はほとんど変わらないことも確認された。そこで、本研究では金属系アンカーの動的引抜き破壊挙動に対する解析的考察を試みた。

2. 金属系アンカーの高速引抜き破壊実験

本研究で対象とした金属系アンカーは、図-1に示すような寸法のボルト径8mm用の内部コーン拡張型アンカーと呼ばれるもので、モルタル試験体に30mmの埋め込み深さで設置した。金属系アンカーに対する動的引抜き実験の一例を写真-1に示す。この写真より、引抜き速度が速くなるにつれてコーン破壊面が円形に近くなるとともに、その面積が顕著に増大することがわかる。表-1は、低速引抜き、高速引抜きそれぞれの全実験データの平均値を比較したものである。この表より、低速引抜きと高速引抜きでひずみ速度が 10^2 程度大きくなると、コーン直径で約40%程度の増大が見られるにも関わらず、引抜き耐力はわずかに10%程度しか増加しないことが認められた。

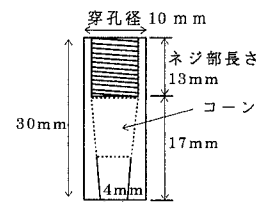
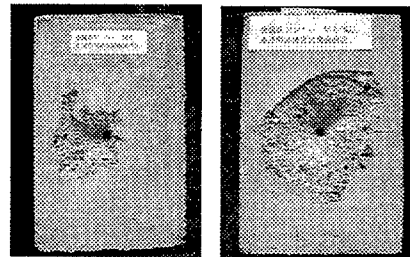


図-1 金属系アンカー



(a)低速引抜き破壊 (b)高速引抜き破壊

写真-1 動的引抜き破壊状況

表-1 金属系アンカーの動的引抜き実験結果

実験ケース	引抜き速度	ひずみ速度	コーン直径	引抜き耐力
低速引抜き	3.27(cm/s)	0.41(1/s)	9.20(cm)	1.08(tf)
高速引抜き	360.7(cm/s)	45.9(1/s)	13.7(cm)	1.19(tf)

3. 金属系アンカーボルトの動的引抜き現象のモデル化

金属系拡張アンカーの動的引抜き現象の解析方法として、以下の過程に分けてモデル化を行い、引抜き速度にともなうコーン破壊面積の拡大現象に対する理論的な検討を試みた。

①金属系アンカーの設置時に作用するプレストレスの計算 金属系アンカー設置のためにボルト頭部を打ち込むと、図-2に示すようにボルトの拡張部が開き、母材周囲にはプレストレスが作用する。このプレストレスを計算するために軸対称モデルを仮定し、拡張部の開き量 $u(z)$ を周囲母材への強制水平変位としたときの作用応力を以下の式により求めた。

$$\sigma_r(z) = \frac{E \cdot v \epsilon_0}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{E \cdot v}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{z}{r} \tan \alpha \quad (1)$$

$$u(z) = \tan \alpha \cdot z$$

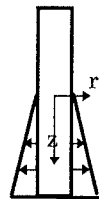


図-2 拡張部プレストレス

ここに、 $u(z) = \tan \alpha \cdot z$ ：強制水平変位量 α ：拡張部の開き角

②金属系アンカーの動的引抜きにともなう表面力分布

ここでは、実験で得られた引抜き耐力より、アンカー拡張部は塑性状態にあるものと考えられるので、塑性解析を用いてコンクリート境界面への作用表面力を計算した。すなわち、図-3のようにボルトの引抜きを

キーワード： 金属系あと施工アンカー、動的引抜き破壊、塑性解析、有限要素法
連絡先（〒239 横須賀市走水 1-10-20 TEL 0468-41-3810(内線 2359) FAX 0468-44-5913)

球対称問題と考えると、半径方向のつり合い方程式は以下のようになる。

$$A \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r + P(1 + \mu \cot \alpha) = 0 \quad (1)$$

ここに、 A ：半径 r の位置の断面積、 σ_r ：半径方向応力、 P ：境界面への法線方向作用表面力

次に、ボルト側に以下の加工硬化を考慮した以下の Mises の降伏条件式を適用する。

$$J_2 = \frac{1}{3}(\sigma_r + P)^2 = \frac{1}{3}\sigma_{eq}^2 \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{eq} = F(\epsilon_{eq})^n$ ：パラメータ F 、 n の値は動的応力—

ひずみパラメータとして表-2 の値を用いた。式(2)と式(1)を連立させて得られる σ_r に関する常微分方程式を、境界条件 $\sigma_r = 0, (r = r_1)$ のもとで解くことにより半径方向応力 σ_r が得られ、最終的に金属系アンカーの引抜きによる試験体への法線方向表面力の値が式(3)により求められる。式(3)から得られる法線方向力と、摩擦係数を掛けて得られる接線方向力を用いて、次に示す FEM 解析を行った。

$$p = \sigma_{eq} + \frac{F(1 + \mu \cot \alpha)}{(\mu \cot \alpha)^2} \cdot n \cdot (1 + \mu \cot \alpha \cdot \ln \frac{A}{A_1}) \quad (3)$$

③引張破壊を考慮した FEM 解析

(1)、(2)の手順で得たプレストレスと境界面表面力（図-4 参照）を用いて、ボルト中心に関する軸対称モデルとして解析を行った。また、ひび割れの進展を簡易に評価するため、各要素の最大引張主応力とコンクリートの引張強度 ($\sigma_t = 20.0 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定した) の比較を行い、引張強度を上回る場合には要素剛性を低減させながら、荷重増分法による弾性繰返し計算を行った。

4. 数値計算結果および考察 図-5 は解析結果を示したもので、図中の黒色の部分は引張りひび割れを生じた要素である。この図より、高速引抜きの場合ひび割れ領域が拡大しており、実験で得られた傾向を再現できることが認められた。今後、ひび割れの進展と耐力の変動を時刻歴に求め、高速引抜きにおいてコーン面積の増大が必ずしも耐力の増加にならない点に関して、理論的検討を行う必要がある。

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，土木学会，1997 年 3 月，pp. 1347-1354.

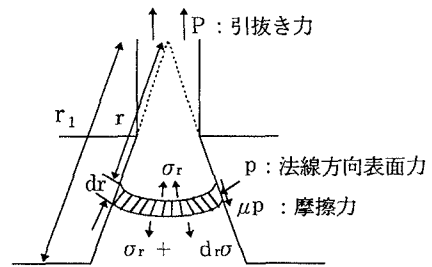
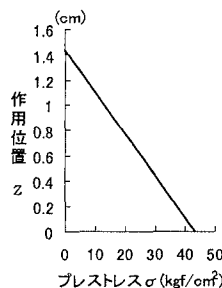


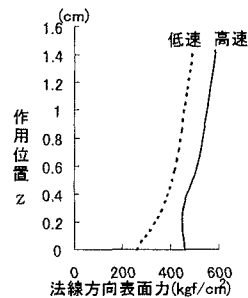
図-3 ボルトの引抜きによる境界面の表用力

表-2 解析に用いた硬化パラメータ

動的硬化 パラメータ	低速引抜き ($\dot{\epsilon} = 0.41$)	高速引抜き ($\dot{\epsilon} = 45.9$)
F	6948.3	8071.5
n	0.22	0.24

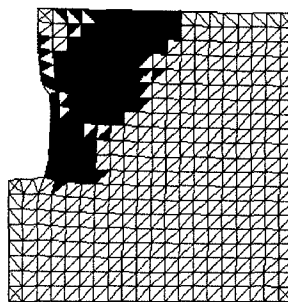


(a)プレストレス分布

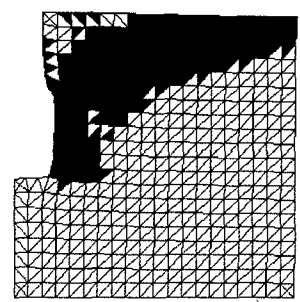


(b)動的表面力分布

図-4 境界面に作用する応力分布



(a)低速引抜き破壊



(b)高速引抜き破壊

図-5 動的引抜き破壊計算結果