

ロックアンカーの境界面における長期的せん断挙動に関する基礎的研究

名古屋大学大学院 ○ 永田 友一
 名古屋大学大学院 学生会員 清木 隆文
 名古屋大学工学部 正会員 市川 康明

1. はじめに ロックアンカーは、図-1のような構造を持ったもので、主に大型送電鉄塔の基礎やダム等岩盤上の構造物の転倒防止等に用いられ、引抜力に対抗する反力機構を期待するものである。通常アンカー引き抜き試験や付着試験から得られる情報は、テンドンから外側部分全ての構造特性や相互効果が含まれており、境界面だけの力学特性を分離して評価することは困難である。このため、アンカー挙動を予測するための力学モデルの構築などが十分に精度良く行われていない。また、ロックアンカーの長期的挙動の実験的なデータは少なく、研究がほとんど行われてはいない。本研究では、このようなロックアンカーのテンドン/グラウト(T-G)、グラウト/岩盤(G-R)、グラウト/シース(G-S-G)の各境界面の力学特性を調べるために、円筒形をなす境界面を長方形断面上に再現し、その供試体に一面せん断試験、クリープせん断試験および繰返しせん断試験を行った。またその結果より、線形粘弾性理論、弾塑性理論に基づいてアンカーをモデル化し、その妥当性に対して検討した。

2. アンカーの破壊様式 アンカーの破壊様式は岩の種類、荷重状態、境界面の形状等と密接な関係があり、一般的に図-2に示した破壊モデルの一種類もしくは多種類の合成により破壊に至ると考えられる。しかし実際に原位置引き抜き試験では a) の岩盤のコーン状破壊は認められなかった。また c) タイプはおもに定着長の長いアンカー(300mm以上)でのみ見られた破壊であり、支配的に発現した破壊モードは b) タイプのテンドン周囲面破壊である。このときの岩盤の変形係数は数 1000 kgf/cm^2 と土砂地盤に近いものであったが、このような変形係数が小さな岩盤でも岩盤そのものの破壊は発生せずに境界面の破壊が支配的に発生している。このことから、ロックアンカーの強度は境界面に依存しているという事がわかる。

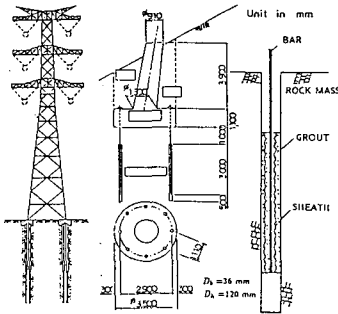
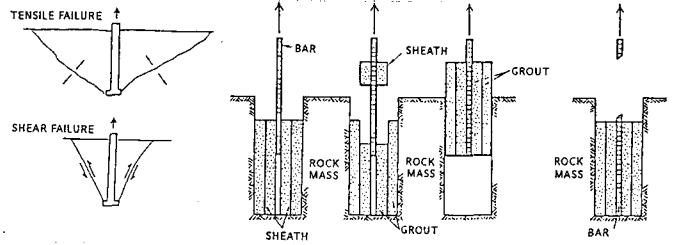


図-1 ロックアンカー



a) 岩盤のコーン状破壊 b) 境界面の破壊 c) テンドンの破断

図-2 アンカーの破壊様式

3. アンカーのモデル化 ここではロックアンカーの境界面の挙動を表現するために提案されている塑性軟化域、流動域を含んだ既往のアンカー作用理論について述べ、それを基にモデル化を行い、その理論解を用いて実際の実験結果と比較検討を行った。

a) 構成則

1-) **テンドンの挙動** ~ テンドンは弾性挙動を仮定し、次のように表せる。

$$\sigma_b = E_b \epsilon_b \quad E_b: \text{テンドンの弾性係数}$$

2-) **境界面の挙動** ~ 境界面は、線形弾性-完全塑性-塑性流れを仮定する(図3)。

$$\text{弾性領域: } \tau = G\gamma, \quad \tau \leq \tau_p \quad \text{完全塑性領域: } \tau = \tau_p \quad \text{塑性流れ領域: } \tau = \tau_r$$

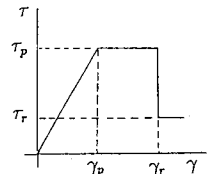


図-3 境界面

ここで G はグラウトの弾性係数、 τ_p は境界面のピークせん断強度、 τ_r は残留せん断強度、 γ_p はピーク時のせん断ひずみ、 γ_r は残留せん断強度さでのせん断ひずみである。

b) 支配方程式 テンドンに引張力が働くと、テンドンに伸びが生じ、これが境界面を通じてグラウトおよび岩に伝達されボルトグラウトおよびグラウト岩盤境界面ではせん断応力が生じる。アンカーを図-4 のようにモデル化すると、微小区間 $z \sim z + \Delta z$ における軸方向と半径方向のつり合い式は次式で表される。

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2}{r_b} \tau_b = 0 \quad (\text{軸方向}) \quad \frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (\text{半径方向})$$

ここで r_b はテンダンの半径、 τ_b はTG 境界面のせん断応力、 σ_z はテンダンの軸応力、 τ_{rz} はせん断応力、 r は半径方向変位である。これらの構成則と支配方程式から微分方程式を解くと、アンカーの限界変位と限界軸応力は境界面の状態により表-5 のように求める事ができる。

表-5 アンカーの限界変位と限界軸応力

境界面の状態	アンカー上端変位 u_0	アンカー上端軸応力 σ_0
弾性限界	$\frac{\tau_p}{K_g}$	$\frac{\tau_p E_{10}}{K_g} \tanh(\alpha L)$
完全塑性限界	$\frac{\tau_p}{K_g} [L_p \alpha \tanh(\alpha(L-L_p)) + 1] + \frac{\tau_p L_p^2}{2E_{10}}$	$\frac{\tau_p}{K_g} [L_p \alpha \tanh(\alpha(L-L_p)) + \frac{3K_g L_p}{\tau_p}]$
塑性流れ限界	$(\xi-1) \frac{\tau_p}{K_g} \frac{L_p}{L_p-L_r} + \frac{\tau_p}{E_{10} \tau_p} (L_p-L_r) L_r + \frac{\tau_p L_p^2}{2E_{10} \tau_p} + \xi \frac{\tau_p}{K_g}$	$(\xi-1) \frac{\tau_p}{K_g} \frac{E_{10}}{L_p-L_r} + \frac{\tau_p}{\tau_p} (L_p-L_r) + \frac{2\tau_p L_p}{\tau_p}$

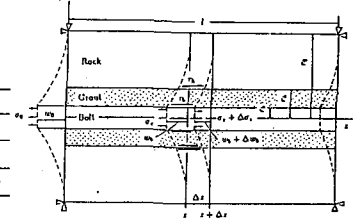
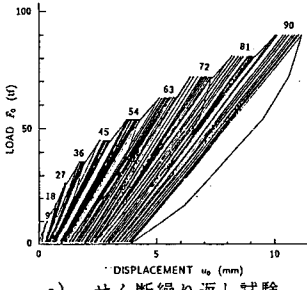
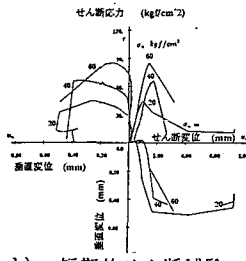


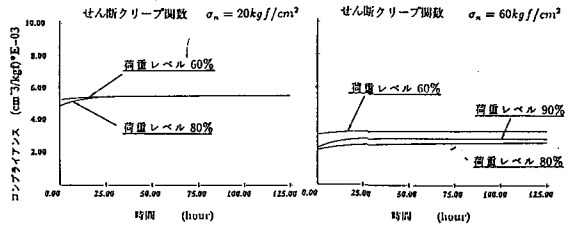
図-4 アンカーのモデル化



a) せん断繰返し試験



b) 短期的せん断試験



c) せん断クリープ試験

図-6 実験結果

4. 考察 図-6 に示した実験結果から、同一拘束圧下では最大せん断強度は GR 境界が最も小さく、TG、GSG ではほぼ同じような値であることがわかる。また、同一境界面では拘束圧が大きいほど最大せん断強度が大きく、同一せん断応力下では GSG 境界面でもせん断変位が大きく観察された。クリープ試験においては、せん断変位、垂直変位ともに大きな変化は見られなかったが、直交多項式近似し遅延スペクトルを求めた結果、拘束応力が高いほどコンプライアンスの切片値が小さく、瞬間剛性が高いという事が証明できた。また、グラフの曲がり具合を見ると、せん断荷重が小さいほど遅延時間が長くなっている事がわかる。繰返し試験では、同一繰返し回数ならば、せん断荷重が大きいほどせん断変位の変化の割合は大きく、同一せん断応力で繰返し载荷する場合には、破壊に至る繰返し回数 N は载荷周期 T に大きく依存し、 T が大きくなると N は大きく低下する。また、ピークせん断強度を基準として同一最大応力比で繰返し载荷すると、破壊に至る繰返し回数は周期によらず一定値となる。モデル化したアンカーから得た理論値は、原位置試験から得た値および実験値とよく一致した。これは本研究で導入した力学モデルが妥当である事を示している。

参考文献

- 1) Aydan Ö : The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts, Nagoya University, pp.54-70.
- 2) 新實佳朗、Aydan Ö、河村精一、蛭子清二 : ロックアンカーの力学挙動に関する研究、第八回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (1990)、pp.37-42
- 3) S.Komura、S.Ebisu : Design methodology for rock anchor foundations, International symposium on Rock support(1992),Canada.
- 4) Aydan Ö, Ichikawa Y., Kawamoto T. : The strength of interfaces and discontinuities with asperities, J Geotechnical Eng., ASCE, 1992.