

(70) 引抜き実験におけるロックアンカーの破壊モード

東海大学海洋学部	正	アイダン・オメル
㈱奥村組筑波研究所	正	蛭子 清二
中部電力㈱土木建築部	正	○河村 精一

PULL-OUT TESTS OF ROCK ANCHORS AND THEIR FAILURE MODES

Ö. AYDAN	Tokai University
S. EBISU	Okumura Corporation
S. KOMURA	Chubu Electric Power Co. Inc.

ABSTRACT: For the assessment of the suitability and the design of rock anchors of various lengths as the foundation of transmission towers, laboratory model tests and in-situ pull-out tests were carried out. From the tests, various forms of failure of rock anchors were deduced. The failure modes of rock anchors involve interfaces present in rock anchor systems rather than the embedment medium as observed in earth anchors with enlarged bottoms. The failure modes of rock anchors are as follows: 1) Tendon failure, 2) Interface failure, 3) Combined interface failure.

1. 序論

ダムや送電鉄塔に代表される岩盤構造物の本設基礎として、円筒形のシースで tendon 材の防食措置を施したロックアンカーを利用する場面が増えてきた。しかし、本設のロックアンカーの設計について見ると実験や実績データが少ないこともあって、定着岩盤の評価が定性的な岩盤分類の域を越えていないこと、また最終的な破壊面の位置が十分に解明されていないことなど検討の余地が残されている。このため、ロックアンカーの設計耐荷力が過小評価されている場面も考えられる。そこで、筆者らはロックアンカーの力学挙動を解明するために、数多くの原位置の引抜き実験や室内における模型実験およびこれらをモデル化した理論・数値解析を実施した。ここでは、引抜き実験や数値解析から得られた知見をもとに、ロックアンカーの破壊モードについて統一的な分類とその解釈を示し、ロックアンカーの耐荷力を考える上での一助とする。

2. 室内模型実験

2.1 逆T字型アンカー

2種類の室内引抜き実験を行った。最初の実験は逆T字型アンカーを鋼棒、岩盤を硫酸バリウム、酸化亜鉛およびワセリン油の混合体で模擬した2次元模型でこれを底面摩擦実験装置を用いて載荷した。実験結果の1例をFig.1に示す。

逆T字型アンカーの破壊は掘底部上端の角点から斜め上方に発生する引張りクラックに始まり、最終的には複数のクラックによって

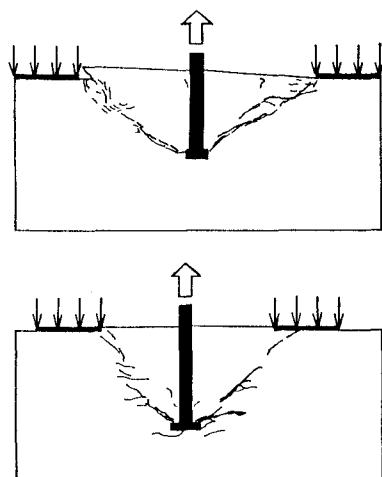


Fig.1 Failure modes of reverse-T type rock anchor in a cohesive medium.

模擬岩盤内にFig. 1 に示したようなコーン状の破壊面が形成される。

2 番目の実験は軸対称形状の逆T字型アンカー模型を砂地盤に埋設して引抜き力を加えたもので、実験結果の1例をFig. 2 に示す。同図から、拡底部の上方移動に伴って発生する円周方向の引張り応力に起因した地盤の半径方向の分離破壊および最初の実験と同様な地盤のコーン状の破壊面が認められる。砂地盤の場合前述の模擬岩盤に比較してより鋭角なコーン状破壊面の形成が特徴である。これは、砂のような粘着力すなわち引張強度の小さな材料ではせん断破壊が最初から支配的に発生したことを示している。このように逆T字型の拡底アンカーでは必ず地盤内に拡底部を頂点とするコーン状の最終破壊面が形成される。

2.2 円柱型アンカー

大谷石の円柱ブロックに鋼棒をモルタルで定着したアンカー模型を特殊な3軸セルの中に入れ、アンカー軸に直角な方向に一定の拘束圧を加えた状態で鋼棒を載荷した。実験要因は拘束圧のほかに鋼棒の表面形状（異形と丸鋼）や鋼棒の径とグラウト径との比などである。

アンカー模型の破壊モードはFig. 3 のようであり、これを分類すると次のようになる。

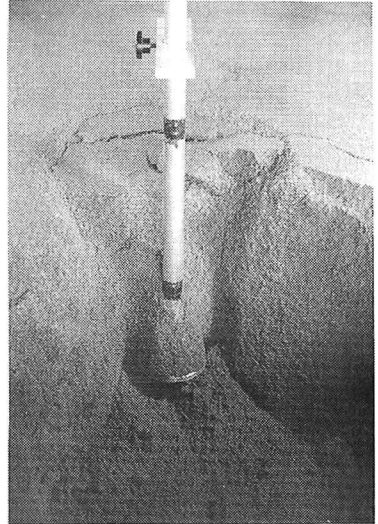
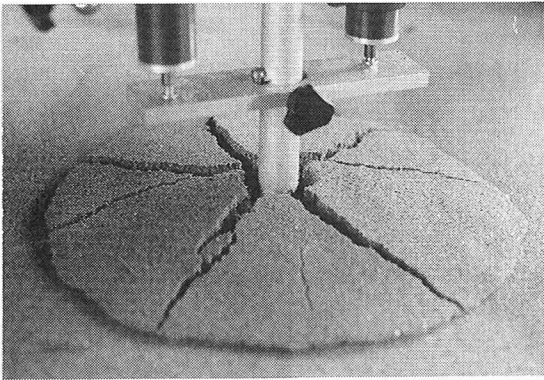
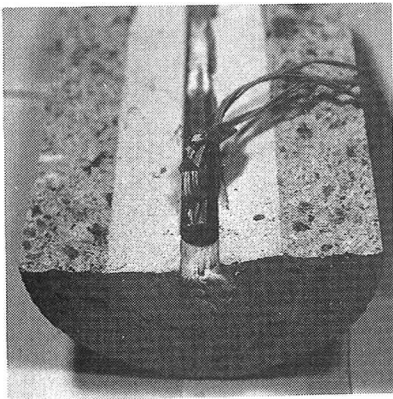
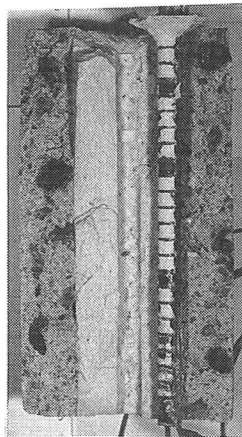


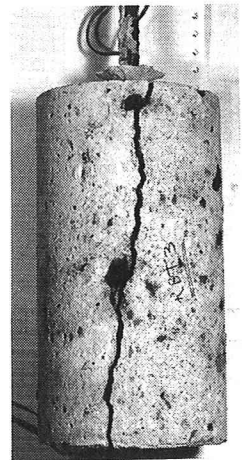
Fig.2 Failure mode of a reverse-T type rock anchors in a granular medium.



smooth bar



deformed bar



(a)tendon-grout interface failure

(b)splitting failure

Fig.3 Failure modes of rock anchors in laboratory pull-out tests.

1) 鋼棒とグラウト間境界面の破壊

丸鋼を使用した模型と異形鋼棒でグラウト径の大きな模型に発生

2) グラウトと岩盤間境界面の破壊

異形鋼棒でグラウト径の小さな模型にのみ発生

3) 模型半径方向の分離破壊

異形鋼棒を使用した模型で拘束圧のない場合に発生

円柱型アンカー模型の支配的な破壊モードは1), 2)に示した境界面の破壊現象であり, 逆T字型アンカー模型で発生した岩盤のコーン状破壊が認められなかったことが特徴である。

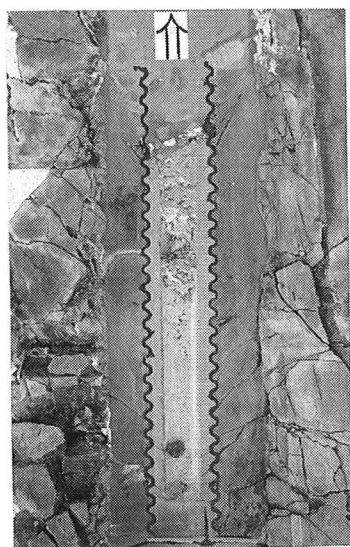
3. 原位置実験

3.1 実験の概要

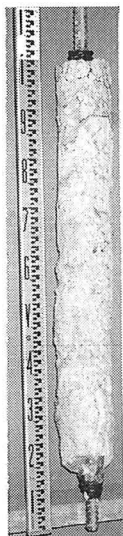
地質状況の異なる3種類の岩盤(サイトA, B, C)で円柱型アンカーの原位置引き抜き実験を行った。サイトAは一部頁岩の貫入した砂岩から構成され節理が良く発達している。ボーリング孔内載荷試験から求めた岩盤の変形係数は74-5300 MPaの範囲にあった。アンカーの定着長は300, 1000, 3000 mmの3種類で試験体の総数は72である。サイトBの岩盤は花崗岩から構成され、岩盤の変形係数は1000-5700 MPaの範囲にあった。アンカーの定着長は3000 mmで試験体数は3である。サイトCの岩盤は粘板岩と砂岩の互層で粘板岩が卓越している。岩盤の変形係数は約1500 MPa、アンカーの定着長は300, 3000 mmの2種類、試験体数は6である。3種類のサイトともにテンドン材には26mmあるいは36 mm径の異形PC鋼棒を使用し、これをそれぞれ直径105, 120 mmのアンカー孔に無収縮材を混和したセメントミルクで定着した。また、異形PC鋼棒の周囲にはポリエチレン製の防食用シースを設置した。

3.2 実験結果の破壊モード

定着長300 mmのアンカーにはテンドン-グラウト間境界面の破壊(TG), グラウト-シース間境界面の破壊



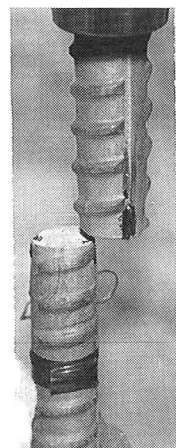
(a) tendon-grout interface failure



(b) grout-rock interface failure



(c) combined interface failure



(d) failure of steel bar

Fig.4 Failure modes of rock anchors in in-situ pull-out tests.

(GS), グラウト-岩盤間境界面の破壊 (GR) の3種類が認められた。一方、定着長1000 mm のアンカーには、Fig. 4(a), (b)に示すようにTGやGRモードの破壊の他に境界面の破壊が複合したモード(C) やテンドン材が破断するモード(T) が認められた。アンカーの中心から破壊面までの半径方向の距離と岩盤の変形係数との関係はFig. 5のようであり、岩盤の変形係数が大きな場合にテンドン材に近い位置のTGやSGモードの破壊が発生することが分かる。

Fig. 4(c)に示すように定着長3000 mm のアンカーの破壊は必ずテンドン材が破断するモードTである。しかし、テンドン材に貼付したひずみゲージの挙動はテンドン材が破断する前に必ずテンドン-グラウト間境界面に局部的な破壊が発生していることを示している。

4. 有限要素解析

逆T字型と円柱型の2種類のアンカーについて軸対称の弾性有限要素解析を実施した。アンカーと岩盤のヤング率の比は $E_a/E_m:10, 100$ の2水準とし、载荷位置はアンカーの上端と下端の2種類である。アンカーと岩盤の境界面をI断面、逆T字型の拡底部を通る鉛直断面をMとし両断面の応力分布を求めた。解析結果はFig. 6, Fig. 7のようになる。

4.1 逆T字型アンカー

荷重がアンカーの上端部に作用するとき、境界面であるI断面の上端部で応力が集中する。しかし、岩盤のヤング率が小さな場合には応力は定着方向に様な分布傾向を示す。このような応力集中によって境界面では上部から拡底部へと付着切れが発生し、引抜き力が拡底部を介して岩盤に伝達されるようになって考えられる。

荷重がアンカーの下端部に作用するとき、M断面の拡底部上端に引張の最小主応力 σ_1 が集中し、これは断面Iのそれよりも大きい。 σ_1 の方向は水平面から約45°で、 σ_3 が岩盤の引張強度を越えるとこの方向に最初の引張りクラックが発生することになり、前述した模型実験の破壊面の状況を良く説明している。拡底部では σ_3 に次いでせん断応力も集中している。したがって、せん

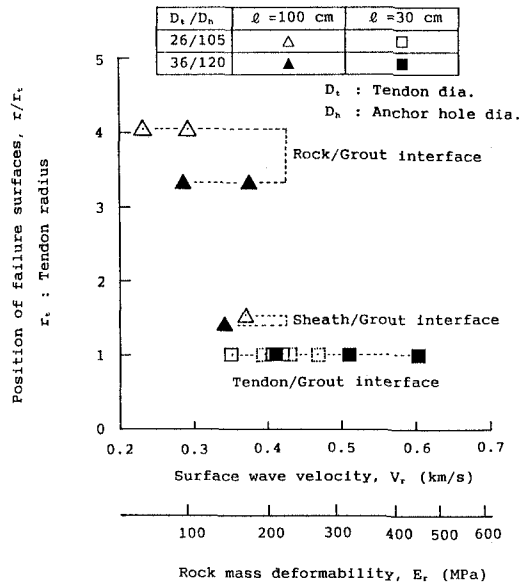
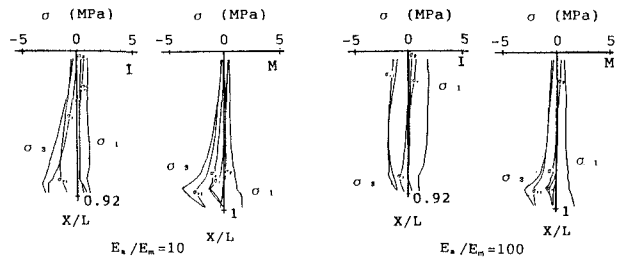
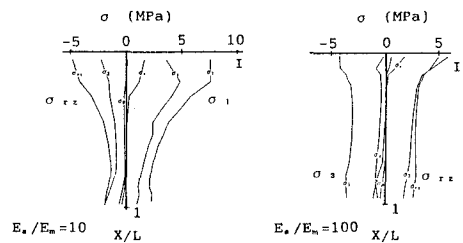


Fig.5 Failure modes of anchors as a function of rock deformability.



Loading at the bottom of the anchor

Fig.6 Stress distributions for reverse-T type anchors



Loading at the top of the anchor

Fig.7 Stress distributions for cylindrical anchors

断クラックが発生するとすればその平均的な方向は岩盤の内部摩擦角を ϕ として $90^\circ - \phi$ と予想される。

4.2 円柱型アンカー

断面 I では必ず断面 M よりも大きな応力が载荷点の近くで発生する。このことは、円柱型アンカーでは必ず境界面の载荷点近くで局所的なせん断破壊が最初に発生することを意味している。このような局部破壊が境界面を進展し模型実験や原位置実験で認められた境界面の全体破壊モードを形成している。

5. 結論

ロックアンカーの破壊モードは、アンカーのタイプ、グラウト材や定着岩盤の強度・変形特性、さらにアンカー構造に形成される境界面の表面形状に強く影響される。模型実験、原位置試験、有限要素解析の結果から、ロックアンカーの破壊は、Fig.8 の模式に分類するように、次の3種類のモードあるいはこれらが組み合わさった複合的なモードで発現する。

1) 岩盤のコーン状破壊

a) せん断破壊

b) 引張破壊

2) 境界面の(せん断)破壊

3) テンドン材の引張破壊

岩盤のコーン状破壊はアンカー下端部が拡底されている場合にのみ発生する。これに対して境界面の破壊は局所的な破壊を含めればすべてのタイプのアンカーで発生する。

参考文献

- 1) 中江新太郎, 清水俊久, 筒井通剛, 堀部秀雄, 拡底杭の引抜耐力に関する実験的研究, ㈱奥村組技術研究年報, 1982, pp. 339-352
- 2) Aydan, Ö., The stabilization of rock engineering structures by rockbolts. Doctorate Thesis, Nagoya University, 1989
- 3) 渡辺篤, 河村精一, Ö. Aydan, 蛭子清二, 原位置引抜き試験で観察されたロックアンカーの破壊モード, 土と基礎, 1990. 5, pp. 27-32
- 4) Ebisu, S., S. Komura, Ö. Aydan and T. Kawamoto, Characterization of rock masses for rock anchor foundations. Proc. of the Int. Symp. Fractured and Jointed Rock masses, ISRM, 1992. 6

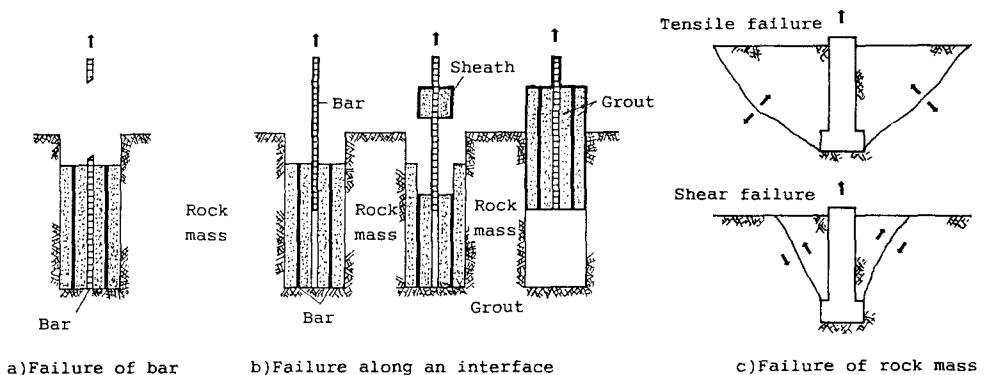


Fig.8 Classification of failure modes of rock anchors