

⑥1) アンカー耐荷力を支配する境界面の力学特性

中部電力株式会社	中央送変電建設所	渡辺 篤
同	電力技術研究所	正会員 河村 精一
名古屋大学	工学部 地盤工学教室	正会員 Ömer AYDAN
株式会社奥村組	筑波研究所	正会員 ○ 蛭子 清二

Mechanical Properties on Interfaces Governing the Bearing Capacity of Rock Anchor

Atsushi WATANABE , Chubu Electric Power Co.
Seiichi KOMURA , Chubu Electric Power Co.
Omer AYDAN , Nagoya University
Seiji EBISU , Okumura Corporation

Abstract

Mechanical properties on interfaces are of great concern regarding the bearing capacity of rock anchors. The present paper describes an experimental study, which is concerned with the direct shear tests on the interfaces with given surface configurations as well as on the host materials of interface walls. Test results are presented and the behaviour and the strength of the interfaces are compared with each other in relation to the those of the host materials.

1. まえがき

ロックアンカーとは、テンドン材に加わる引拔力をグラウト材を介して岩盤に伝達する構造を持ったもので、テンドン材とグラウト材で形成される地中部のアンカー体は、テンドン材とアンカー頭部を通じて構造物と力学的に連結される¹⁾。代表的な適用例として、ダム等岩盤上の構造物の転倒防止、鉄塔等重力式構造物の重力代替、岩盤斜面や大規模地下空洞におけるすべり防止などがあげられ、いずれも岩盤内に形成されるアンカー体に引拔力に対抗する反力機構を期待するものである。アンカーが定着される岩盤について見れば、引拔力に対する反力を負担することになり、ロックアンカーの施工によって定着部周辺岩盤の力学的な安定性を向上させることはできない。したがって、トンネルや地下空洞で空洞周辺岩盤の一体化を目的に適用されるロックボルトとは、定着部の構造が同じでも岩盤の安定性という観点からは、岩盤に対して両者で全く異なった影響を及ぼすことが考えられる。

このようなロックアンカーの耐荷力を支配する重要な要因として、テンドン/グラウト、グラウト/岩盤間の境界面における力学特性があげられる。また、最近では、テンドン材の腐食を防ぎ永久構造物としての信頼性を増すための波形形状の防食シースの設置が一般的となりつつあり、シース/グラウト間の力学特性も同様に重要な要因として位置付ける必要がある。テンドン材、グラウト材、岩盤の力学特性はそれぞれ材料試験や岩盤試験から評価することができよう。しかし、境界面の力学特性については、たとえば、通常のアンカー引抜試験や付着試験から得られる情報は主にテンドンで計測されたもので、これにはテンドン/グラウト境界面から外側部分すべての構造特性や相互効果が含まれており、境界面のみ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や境界面に関連し

たインプットデータの設定が十分に精度良く行われていないのが実情であろう。そこで、本研究では、このようなアンカー境界面に着目し、最も単純で評価の容易な一面せん断試験を実施してその力学特性について考察した。なお、ここで議論する境界は、その面の凹凸形状に関連したある厚みを持ったものとして考える。

2. 一面せん断試験

一般にロックアンカーの構造は、図1のテンドン軸を通る鉛直縦断面に示すような軸対称形であり、テンドン/グラウト、シース/グラウト、グラウト/岩盤の3種類の円筒形をなす境界面が形成される。ここでは、人工材料で形成され再現性の容易なテンドン/グラウト、シース/グラウト（以後TGおよびSGと称す）境界面について垂直応力 σ_n を一定に保った一面せん断試験を実施した。また、グラウト材の1軸および3軸圧縮試験、圧裂試験、一面せん断試験もあわせて実施した。

(1) 供試体

TG、SGともに円筒形をなす境界面を同質の材料で平面形に展開した模型プレートを作成した。前者は26mm径の異型PC鋼棒のリップ形状を、後者は内径40mmのポリエチレンシースの波形形状を平面上に再現し、これにグラウトを打設してせん断面積15cm×15cm、グラウト

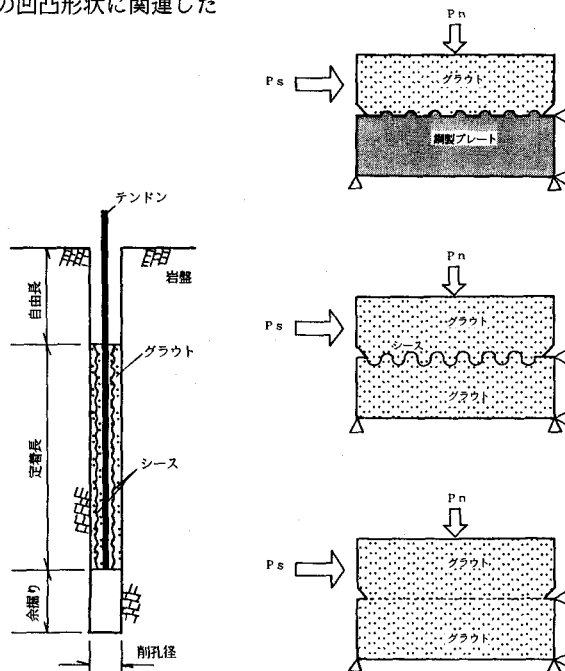


図1 アンカーの構造

図2 供試体断面の模式

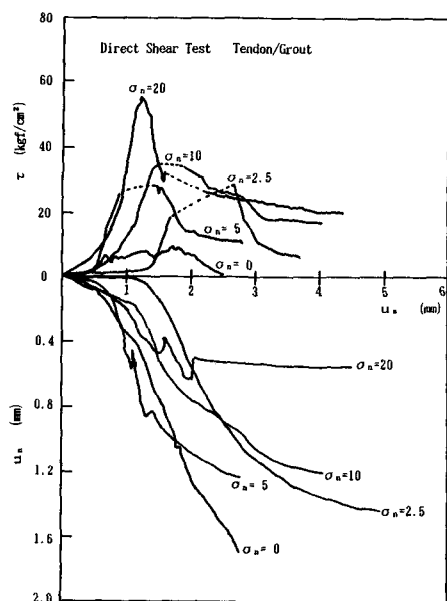


図3 TG供試体の荷重～変位曲線

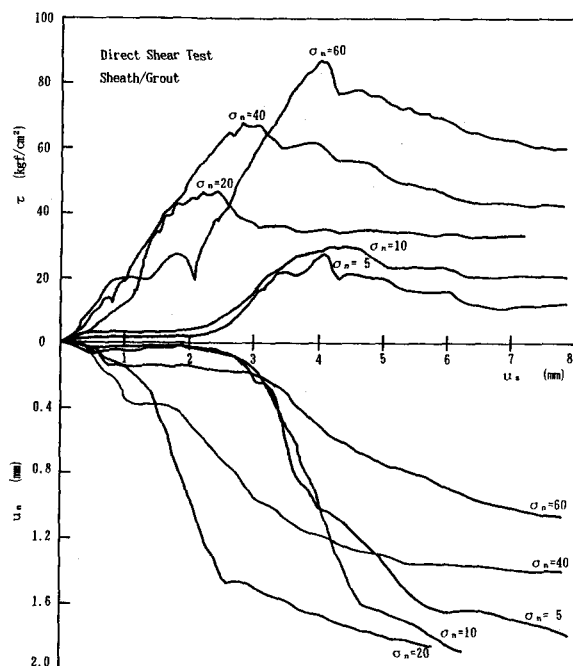


図4 SG供試体の荷重～変位曲線

厚さ5cm の供試体とした。図2に供試体の断面を示す。

(2) 試験結果

TG、SGおよび無垢のグラウト供試体（以後 Gと称す）の3種類について、せん断応力（ τ ）～せん断変位（ u_s ）～垂直変位（ u_n ）の関係を図3～図5に示す。ここで、 $\tau = P_s/A$ （ P_s ：せん断荷重、 A ：せん断面積）であり、 u_n は上方への膨張変位を正にとっている。

3. 試験結果の考察

(1) 強度・変形特性

ピークせん断強度 τ_p と垂直応力 σ_n （ $\sigma_n = P_n/A$ 、 P_n ：垂直荷重）との関係を図6に示す。同図には、グラウト材の1軸および3軸圧縮試験、圧裂試験の結果にクーロン式をあてはめて内部摩擦角を推定し、これから求めたグラウト材の τ_p と σ_n の関係も併記した。

TGやSG境界面の強度はグラウト材の1軸および3軸試験から求めた強度に比較して小さな値を示している。両境界面のグラウトはテンドリブやシースを鑄型とした凹凸形状をなし、この部分の形状が支配的な役割を演じて境界面の強度をグラウト材のそれよりも小さなものにしていてと考えられる。したがって、テンドリブとグラウトのように強度に差のある材料で境界が構成される場合、その面の凹凸形状の影響を考慮せずに境界を構成する弱い方の材料強度を採用すると、境界面の強度を過大評価する恐れがあることになる。

3種類の一面せん断試験（TG、SG、G）について見れば、粘着力 C は $G > SG > TG$ の順に大きい、TGとSGとは大差はない。一方、内部摩擦角 ϕ は $TG > SG > G$ の順に大きい。SG境界面の強度は、シースのような柔らかい材料を挟在しているにもかかわらず予想外に大きく発現している。シース材のヤング率は 2400 kgf/cm^2 程度でグラウト材の約 10^7 kgf/cm^2 に比較してはるかに小さいが、その降伏引張強度が 240 kgf/cm^2 （伸長ひずみ10%）とグラウト材よりも大きくて引張応力に対して強い材料であることが原因として考えられる。

$\sigma_n = 10 \text{ kgf/cm}^2$ のとき、3種類の供試体の $\tau \sim u_s$ 、 $\tau \sim u_n$ 曲線を比較すると図7のようである。ピーク強度まではSG供試体のせん断剛性がTGやG 供試体に比較して小さくせん断変位 u_s が発生しやすいこと、同時に垂直変位 u_n も発生しやすいことがわかる。一方、ピーク強度以降の挙動についてもSG供試体の $\tau \sim u_s$ 曲線ではピーク以降の強度劣化がTG供試体に比較して

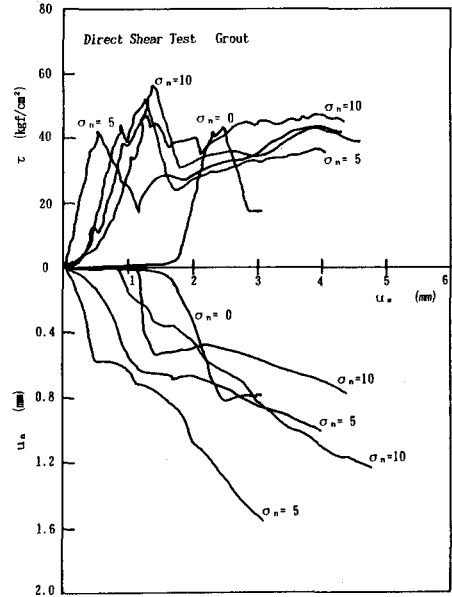


図5 G 供試体の荷重～変位曲線

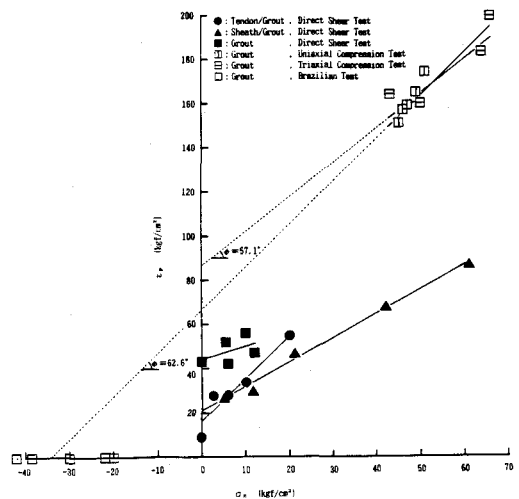


図6 強度の比較

小さく、残留状態の耐荷力が大きくて長く続くことがわかる。

(2) ダイレイタンスー

図3～図5に示したせん断変位 u_s と垂直方向の膨張変位 u_n との関係を見ると、 u_n はピーク強度 τ_p までほぼ一様な勾配で増加し、 τ_p を越えるとその勾配が緩くなり膨張変位の増加割合が小さくなる傾向が認められる。 $u_n \sim u_s$ 曲線について、 τ_p からその前後で引いた接線勾配 u_n/u_s と σ_n との関係は図8のようである。ピーク以前には、 σ_n が小さな場合の勾配 ($\tan^{-1} u_n/u_s$) が 45° 程度で、 σ_n が増加すると勾配 u_n/u_s は 45° よりも小さくなり、膨張変位の発生が少なくなることがわかる。ピーク以降では、勾配 u_n/u_s が全般に小さくなる。また、SG供試体では σ_n が大きくなってもピーク以降の u_n/u_s はほとんど変化しない。

ここで観察されたダイレイタンスー挙動には次の2種類が考えられる。1つは tendonリブやシースのような境界面の凹凸をグラウトが乗り越えることによって発生する幾何学的なダイレイタンスーである。この場合、tendon材（鋼棒）あるいはシース材（ポリエチレン）そのものの付着強度が非常に小さいため、グラウトは境界面の凹凸形がせん断方向となす角度 θ の方向に沿って移動し、 $\tan \theta = u_n/u_s$ に対応する膨張変位の発生が予想される。他の1つはグラウトが境界面の凹凸を乗り越えようとするときにその動きが垂直応力 σ_n によって拘束され、グラウト材が境界面の近傍で塑性化することによって発生する材料的なダイレイタンスーである。TG、SG供試体では、 σ_n が 20 kgf/cm^2 程度までは幾何学的なダイレイタンスーが発現し、これよりも大きな σ_n の場合あるいはピーク強度以降には、グラウト材の塑性化に起因したダイレイタンスーが発生したと予想される。一方、弱面のない G供試体では、グラウト材の塑性化に起因したダイレイタンスーが支配的であり、わずかな σ_n の載荷で膨張変位 u_n が押さえられている。このことは材料の塑性化によって、 $u_s \sim u_n$ 曲線の勾配 $\tan^{-1} u_n/u_s$ の方向にせん断面でクラックが発生してその面ですべりが生じるものと考えれば、ピーク強度付近でグラウトに発生する局部的なすべり面の方向が σ_n の大小によって変化することを示唆している。

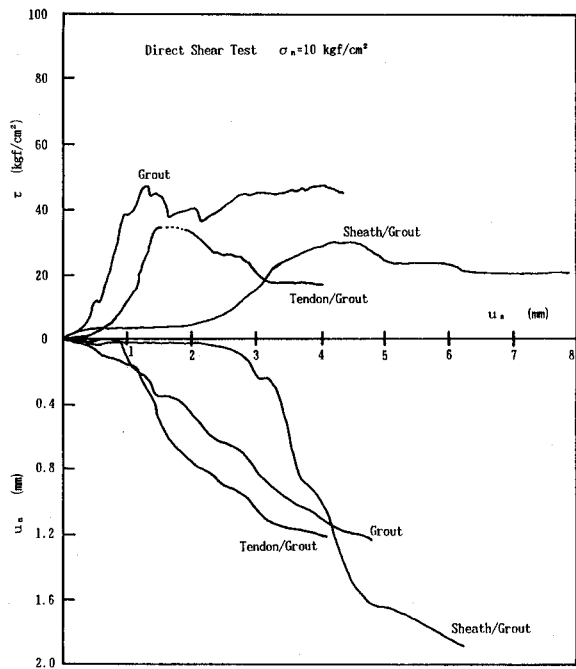


図7 荷重～変位曲線の比較 ($\sigma_n = 10 \text{ kgf/cm}^2$)

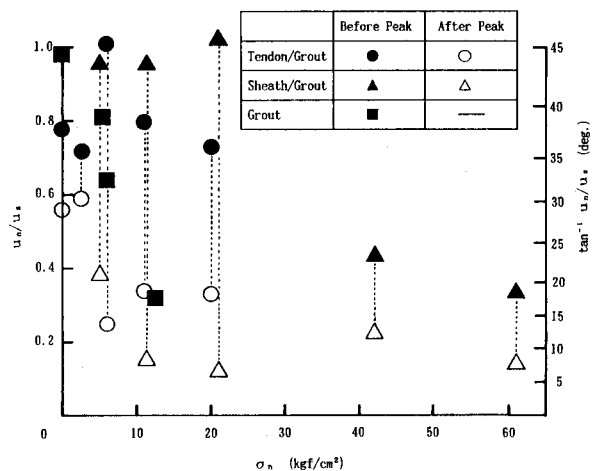


図8 u_n/u_s と σ_n との関係

(3) 供試体せん断面の破壊状況

a. テンドン／グラウト (TG) 供試体

TG供試体の破壊状況を図9の模式に示す。破壊面には次の3種類のクラックが認められた²⁾。

①高角度の引張型クラック

テンドンリブの頂点からせん断方向に対して高角度に発生したクラックで引張型と考えられる。

②低角度の混合型クラック

テンドンリブの頂点間をグラウト側に凸に結ぶように発生したクラックで、最初、同図右側のリブ頂点からせん断方向に対して低角度で発生した引張型クラックが途中でせん断型に変化し反対側のリブ頂点に進展したと推定される。ロックアンカーがテンドン周面で破壊して抜け出すとき、このタイプのクラックが破壊を支配していることが考えられる。

③せん断型クラック

テンドンリブの頂点から反対側リブの谷部に向かって進展したせん断型のクラックで、 σ_n の小さな場合に認められる。

σ_n が大きくなると②のタイプのクラックが支配的となる。破壊面の長さすなわち有効なせん断面積も③のタイプに比べて大きくなり、耐荷力が増すという見方も出来る。②と③のクラックでは、せん断方向とクラックのなす角度が前者で小さい。このことは、図8に示したピーク強度以降の膨張変位の発生が、 σ_n が大きくなると少なくなるという傾向と対応している。

b. シース／グラウト (SG) 供試体

SG供試体の破壊状況を図10の模式に示す。破壊面では前述の②タイプ混合型クラックのみ認められる。シースの内側に相当する面は外側に比較して角のとれたなめらかな形状であるがその巾は狭く先細りとなっている。グラウトは必ずこの内側相当面の山と山を結んだ面で破壊し、外側のグラウトは全く損傷を受けていない。このような傾向は σ_n の大小にかかわらずに発現している。シース材の変形係数がグラウト材のそれよりも約2オーダー小さいこと、シース内側グラウトの形状が外側よりも滑らかなために、外側グラウトに比較して、内側グラウトがせん断方向に変形しやすい状況となり、内側グラウトの谷部分で最初に引張型のクラックが発生したものと予想される。

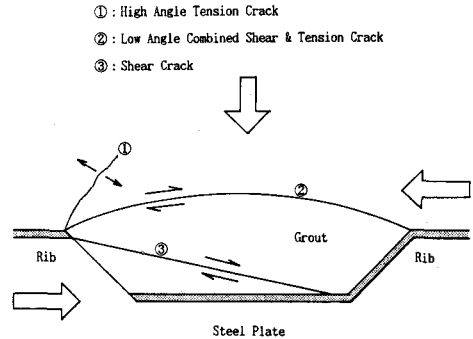


図9 TG境界面のクラック

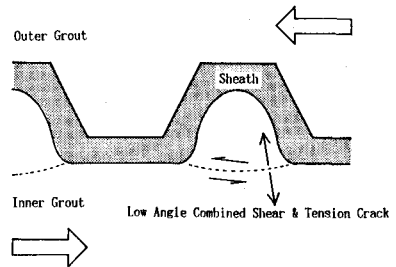


図10 SG境界面のクラック

4. あとがき

アンカー構造に特有なテンドン／グラウト、シース／グラウト境界面の形状を正確に表現した一面せん断試験を実施した。試験結果から、境界面とグラウト材との強度関係、シースの影響、境界面におけるダイレイタンスの発生や破壊のメカニズムを定性的にではあるが明らかにした。今後は、原位置引抜き試験や理論／数値解析の結果を加味して、ロックアンカーのメカニズム解明に発展させたい。

<参考文献>

- 1) 山門明雄, 「グラウトアンカーの発展」, フレストコンクリート, Vol. 31, No. 4, Jul, 1989, pp. 10~12
- 2) Ömer AYDAN, 「THE STABILISATION OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES BY ROCKBOLTS」, Oct, 1989, pp. 54~70