

ロックアンカーに対する岩盤の力学特性評価

蛭子清二*・オメル アイダン**・河村精一***・
川本眺万****

ロックアンカーの設計・施工における定量的な岩盤評価を目的に、原位置引抜き実験を行った岩盤を対象にして詳細な調査・試験を実施し、調査・試験手法による結果の相違、調査・試験結果間相互の関係を考察した。その結果から、ロックアンカーを対象構造物とした場合の岩盤の力学特性推定法として、表面波探査とボーリング孔内載荷試験とを組み合わせる方法を提案し、その具体的な手順、精度および適用性を示した。

Key Words : rock anchor, rock mass investigation and test, in-situ pull-out test, rock mass characterization method

1. 諸 言

ロックアンカーの設計・施工に際して、岩盤の定量的な力学特性の評価が重要な課題である。しかし、ロックアンカーを対象構造物とした場合の岩盤の力学特性評価に関する研究は少ない。おそらく Littlejohn ら^{1),2)}の実績調査に基づく提案が最初と思われる。ここでは、ロックアンカーの破壊がアンカー体³⁾と岩盤との境界面で発生すること、同時にこの面上でせん断抵抗力が一樣に分布すると仮定して、岩種と境界面のせん断強度との関係が示されている。このようなロックアンカーを対象とした岩種区分による岩盤の評価は、土質工学会のグラウンドアンカー設計・施工基準でも解説されている³⁾。しかし、アンカー体と岩盤間境界面のせん断強度は、ロックアンカーの構造、施工法および岩盤の力学特性に依存して変化する見掛けの強度であるため、岩種という定性的な指標のみからこれを推定することには無理がある。このため、ロックアンカーの施工ではアンカー体と岩盤間境界面の強度を確認するための基本引抜き試験³⁾を実施することが原則とされている。一方、ロックアンカー施工時の数少ない岩盤評価として、田野ら⁴⁾はアンカー孔の削孔速度、岩石の強度と乾燥密度、アンカー体と岩盤間境界面のせん断強度および岩級区分間の関連性を調査し、削孔速度から岩盤やアンカー体の耐荷力を推定できる可能性を示唆している。

岩盤の力学特性評価に際しては、原位置の岩盤に直接載荷してその応答を測定する方法が適当と考えられる。ところが、ロックアンカーの施工では一般にその数量が

多く施工位置も分散する場面が多いため、アンカー孔ごとに岩盤の載荷試験を実施することが困難となる。さらに、載荷試験の種類によって結果として得られる岩盤の変形特性が、載荷面積と内在する不連続面との相対的な関係に応じて変化することも報告されている⁵⁾。このため、載荷試験よりも広範囲に岩盤の情報を入手できるボーリング調査や弾性波探査などが相補的に実施されることが多いようである。これらの調査・探査結果には岩盤に内在する不連続面の幾何学特性や弾性波の伝播特性すなわち岩盤の物理特性が主として反映されていると推定される。しかし、同一の岩盤についてその幾何学特性や物理特性と岩盤の力学特性との関連性が、ロックアンカーの大きさのレベルで十分に解明されていないのが実情と考えられる。

本研究では、最初に円柱形式全面接着型ロックアンカーの原位置引抜き実験を行った岩盤の調査・試験結果を相互に比較する。これを用いて調査・試験手法の相違が結果に及ぼす影響と原位置岩盤の幾何学特性、物理特性および力学特性間の相関関係を考察する^{6),7)}。次に、これらの結果と原位置引抜き実験の結果とを比較し、ロックアンカーを対象構造物とした定量的な岩盤評価手法として、岩盤の載荷試験と弾性波探査や不連続面の分布特性に関する調査・試験とを組み合わせる間接的な方法を提案し、その精度と適用性を示す⁶⁾。

2. 岩盤調査・試験の概要

砂岩、花崗岩および粘板岩の3種類の岩盤においてロックアンカーの引抜き実験を実施した。この内の砂岩と花崗岩岩盤(以後、砂岩地区および花崗岩地区と呼ぶ。)で実施した調査・試験項目を表-1に示す。同表の露頭調査の面積に示したように、砂岩地区では約1500 m²の比較的大きな範囲、花崗岩地区では約48 m²のより狭い範囲の岩盤を調査・試験の対象とした。

* 正会員 工修 (株)奥村組技術研究所地盤研究室 主任研究員 (〒300-33 つくば市大砂 387)

** 正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科

*** 正会員 工修 中部電力(株)土木建築部火力原子力開発グループ

**** 正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科

表-1 調整・試験項目一覧

岩盤の幾何学的特性		
	砂岩地区 岐阜県南濃町	花崗岩地区 奈良県郡村
(1) 露頭調査 走向・傾斜 ジョイント・密度	30m×50m 1500m ²	4m×12m 48m ²
(2) ボーリング調査 RQD・最大コア長	27本 延長 191m	3本 延長 18m
(3) ボアホールカメラ 走向・傾斜・RQD 最大コア長・間隔 ジョイント数・開口幅	アンカー孔 63本*	ボーリング孔 3本 延長 15m アンカー孔 4本 延長 16m
(4) キャリパー検層 孔壁の直径変化	アンカー孔 63本 延長 225m	アンカー孔 4本 延長 17m
岩盤の物理特性		
	砂岩地区	花崗岩地区
(1) 屈折法弾性波探査	4測線 延長 140m	
(2) 孔内弾性波探査		5測点×2孔
(3) 孔間弾性波探査		8測点×2箇所
(4) 表面波探査	43 地点	15 地点
(5) 地下水検層	7 孔	
岩盤の力学特性		
	砂岩地区	花崗岩地区
(1) 孔内載荷試験 変形係数・降伏圧	20 箇所 (ボーリング孔)	15 箇所 (ボーリング孔)
(2) ロックアンカーの 原位置引抜き試験	63 試験体	63 試験体
岩石の物理・力学特性 (室内試験)		
	砂岩地区	花崗岩地区
(1) 物理特性		
密度	1.9 供試体	8 供試体
見掛け空隙率	1.9 供試体	8 供試体
超音波伝播速度	2.9 供試体	3 供試体
(2) 力学特性		
1軸圧縮強度	1.9 供試体	8 供試体
ヤング率	1.9 供試体	3 供試体
ポアソン比	1.9 供試体	3 供試体
粘着力	1.0 供試体	
内部摩擦角	1.0 供試体	

* 1 : 定着岩盤の目視による確認にのみ利用した。

3. 岩盤の幾何学特性

(1) 露頭の観察結果

砂岩地区は岐阜県南濃町に位置する。この地区の岩盤は古生代二疊紀～三疊紀にかけて堆積したと考えられ、砂岩が優勢に分布しているが、部分的に粘板岩、チャートとこれらを貫くヒン岩の小岩脈も認められる。不連続面の方向は多様であるが層理面に平行なものが多く、不連続面の表面は風化作用を受けて黄褐色を呈している。この地区の近くには養老断層があり、砂岩地区の岩盤がその影響を受けていることが予想される。

花崗岩地区の岩盤は中生代白亜紀に貫入したと考えられており、調査地域内で花崗岩が一様に分布している。露頭では節理が多数認められるが、節理面は砂岩地区に比較して新鮮で良く密着している。なお、両地区ともに山腹を20m程度切土して整形された平坦地となっている。

(2) 不連続面の分布とRQD

長さ1mのボーリングコアから測定される不連続面の数 n 、RQDおよび最大コア長間の関係を考える。このとき、3種類の測定値は図-1に示す範囲に存在することになる。しかし、不連続面が等間隔の場合には、 n 、RQDおよび最大コア長間の関係は同図の実線で示される。このように、不連続面の間隔が既知の場合に限り、3種類の測定値の間に1対1の対応関係が存在する。

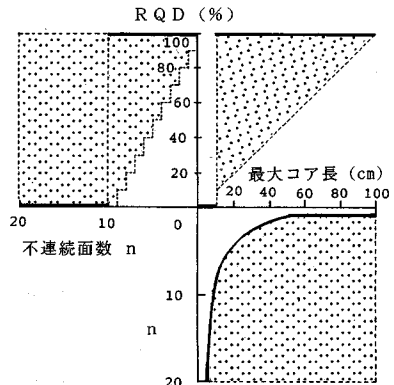
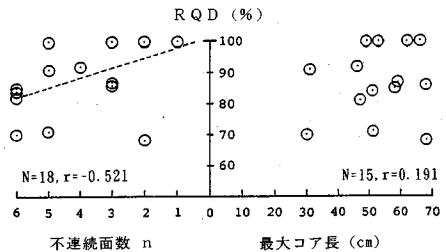


図-1 RQD, 最大コア長, 不連続面の数の関係
実線は不連続面が等間隔の場合



ボアホールカメラ観察

図-2 花崗岩地区のRQD, 最大コア長, 不連続面の数の関係

Priestら⁹⁾の調査によると、イギリスの堆積岩では不連続面の間隔のヒストグラムが負の指数関数で近似され、RQDと n との可逆的な関係が理論的に誘導されている事例がある。

RQDと n との関係について実際の調査データを当てはめて検討して見る。図-2は花崗岩地区のボアホールカメラ観察結果から求めた孔壁のRQD, 最大コア長と同一の1m区間に存在する不連続面の数 n との関係である。ここで、 N はデータ数、 r はデータ間に直線相関を仮定した場合の相関係数である。同図から、 N は少ないがRQDと n との関係に有意な相関(F 分布を仮定した場合に危険率が5%であり、以後の図中に相関式を破線で示す)が認められ、RQDから n を推定できる可能性が示唆される。これは風化花崗岩ではRQDと n との間に相関は認められないとした土質工学会の調査結果⁹⁾とは異なった傾向を示している。一方、回転打撃式の削岩機で削孔された直径120mmのアンカー孔のデータも含めて、孔壁1m区間の不連続面の数 n と不連続面の間隔の平均値およびRQDとの関係は図-3のようになる。同図から、 n と不連続面の間隔の平均値との間に有意な相関が認められること、RQDと不連続面の間隔の平均値との間には高度に有意な相関(F 分布を仮定した場合に危険率が1%であり、以後の図中に相関式

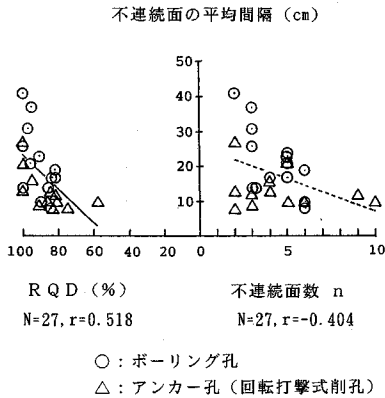


図-3 花崗岩地区のRQD、不連続面の数、不連続面の平均間隔の関係

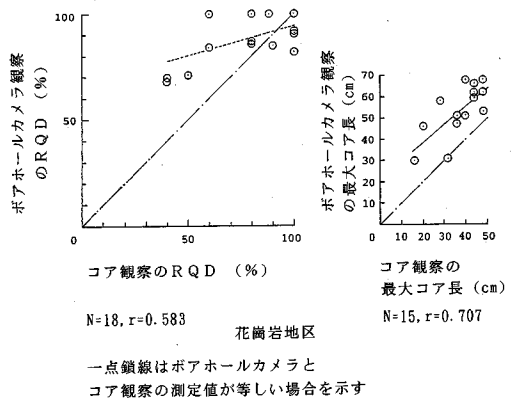


図-4 コア観察とボアホールカメラ観察の比較

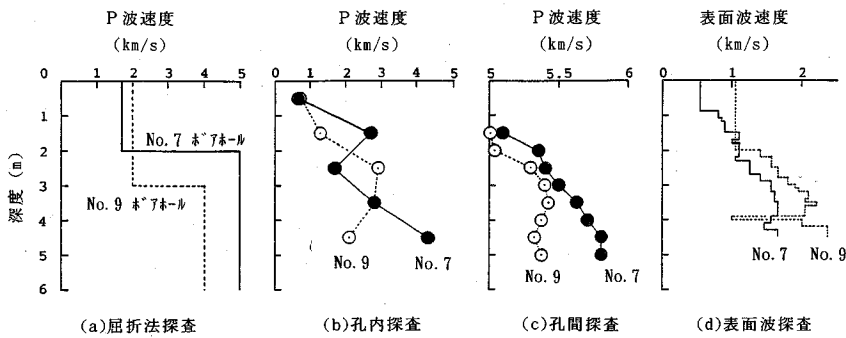


図-5 弾性波探査間の比較

を実線で示す)が認められることが分かる。ここでは、不連続面の平均間隔とRQD、 n との関係に直線を仮定した。しかし、不連続面の平均間隔とRQDとの間には、原点に向かって平均間隔が低減する非線形な関係、また平均間隔と n との間には、平均間隔が原点で最大で n が大きくなると0に収束する非線形な関係が示唆される。このように、RQDには、その定義から見ても、不連続面の平均的な間隔が反映されていることが示唆される。また、回転打撃式の削岩機で削孔されたアンカー孔壁も不連続面分布の把握に利用可能なことが分かる。

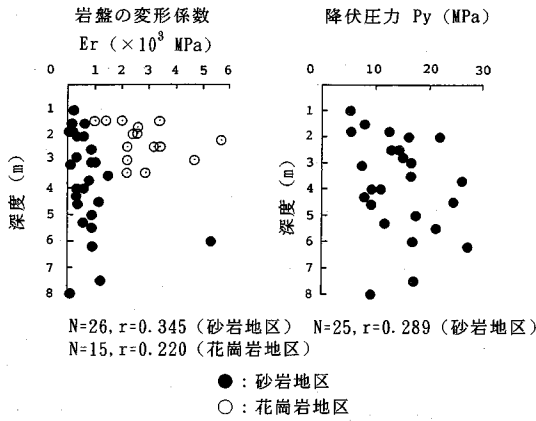
花崗岩地区のRQDと最大コア長の関係について、ボアホールカメラとボーリングコアの観察結果を比較すると図-4のようになる。同図から、Cameron-Clarkeら¹⁰⁾や船山ら¹¹⁾の調査結果と同様に、RQD、最大コア長ともにボアホールカメラの観察結果がボーリングコアのそれよりも大きく、調査手法が異なるとその結果も違ってくる事が分かる。ボアホールカメラの観察では、孔壁で隣接する開口不連続面の間隔をコア長とした。したがって、孔壁観察とコア観察結果との相違は、コア部分で最初に密着していた不連続面が削孔途中で新たに分離したことが原因として考えられる。

4. 岩盤の弾性波伝播特性

花崗岩地区では、4m×12mの比較的狭いサイトで屈折法探査、孔内探査、孔間探査および表面波探査^{12),13)}の4種類の手法を用いて、岩盤の弾性波伝播速度を測定した。

4種類の探査手法を用いて地表から深度6m付近まで測定した弾性波速度の深度方向分布は図-5のようになり、いずれの手法においても深い位置で伝播速度が大きくなる事が分かる。各手法の深度方向の分布形を比較すると、屈折法では2層の速度構造のみが測定されており、他の手法に比較して深度方向の感度が悪い事が分かる。

ボーリング孔を利用した孔内探査と孔間探査を比較すると、発受信点数を多くした後者の場合に速度構造の変化が詳細に示されており、発受信の測定点数を増やせばそれに応じた速度分布の変化も捕らえ得ることが分かる。また、両手法による速度値は後者が全般に大きくなっている。前者では地表をハンマーで打撃する発振方法、後者ではボーリング孔壁を圧縮空気を利用して打撃する方法が採用され、これら打撃方法や同一の発振源を同時に測定しているか否かといった測定方法の相違が測定値



図—6 ボーリング孔内载荷試験の結果

の差となって発現したと考えられる。

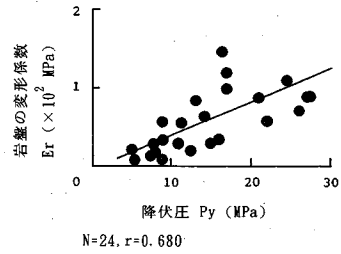
表面波探査では、発受信点数が3点と他の手法に比較して少ないにもかかわらず、1ヶ所の探査で速度分布の変化が最も詳細に測定されており、深度方向に感度の良い手法と見なせる。また、この手法にはボーリング孔を必要としないこと、測定が簡便で探査時間が短い等の利点がある。しかし、探査深度が数10mに限られること、水平方向の探査が困難である等の欠点もある。

ロックアンカーを定着する岩盤の調査に限定すると、アンカー孔を削孔する前にその位置の岩盤の深度方向の特性変化を把握して定着位置を決定する必要がある。そのために、一般に施工位置が分散する個々のアンカー孔でボーリング調査や载荷試験を実施することは、調査・試験数量が多くなり、コスト面から適当ではない。花崗岩地区1ヶ所の比較結果ではあるが、このような経済性の観点も含めて、4種類の探査手法の中ではボーリング孔を必要とせず深度方向に一定精度の速度分布が得られる表面波探査の適用が妥当と考えられる。

5. 岩盤、岩石の力学特性

(1) ボーリング孔内横方向载荷試験

岩盤の力学特性を直接的に測定する試験として、等変位方式のボーリング孔内横方向载荷試験を採用した。測定結果の岩盤の変形係数 E_r 、降伏圧 P_y と深度との関係は図—6 のようである。同図から、測定位置の深度が地表から8m以内の浅い位置で水平方向に载荷したこともあって、斉藤ら¹⁴⁾の報告とは異なり E_r や P_y が深度に依存しないことが分かる。また、同一の深度で比較すると花崗岩地区の E_r が砂岩地区のそれよりも大きくなっている。両地区の地形はともに山腹を20m程度切土して整形された平坦地であり、初期地圧場に大きな差はないと考えられる。さらに、両地区の岩石についても後述するように、岩種が異なってもその強度・変形特性に大きな差がないことが認められている。しかし、両地区の



図—7 砂岩地区の変形係数と降伏圧との関係

岩盤で測定した RQD と最大コア長は砂岩地区のそれらが花崗岩地区よりも小さく、差異が現れている⁹⁾。すなわち、砂岩地区と花崗岩地区とでは、前者において不連続面が相対的に密に分布している。したがって、両地区における岩盤の変形係数 E_r の差は岩盤に内在する不連続面の分布特性に起因して発現していることが考えられる。

砂岩地区における E_r と P_y との関係は図—7 のようであり、降伏圧と変形係数との間に高度に有意な相関が認められ、 P_y を数倍したものが E_r の値となっている。このような E_r と P_y の強い相関関係は武内ら¹⁵⁾によって数種の岩石で指摘されている。しかし、三木¹⁶⁾によると、岩種をある程度限定しても E_r と P_y との関係には明確な相関性を見出すことができず、その原因として载荷方向に対する不連続面の方向の相違をあげている。さらに、不連続面の発達認められない軟岩では、 $E_r = 10 \sim 20 P_y$ の直線付近に試験結果が集中するとしている。これらのことから、砂岩地区では不連続面がランダムな方向性で密に分布しているため、岩盤の変形特性が等方性を示していることが予想される。

(2) 岩石試験

岩石試験から求めたP波、S波速度、見掛け空隙率および密度とコア採取深度との関係は図—8 のようになる。同様に、一軸圧縮強度、ヤング率およびポアソン比と深度との関係は図—9 のようになる。これらの図から、砂岩、花崗岩ともに試験結果が深度に依存しないこと、さらに砂岩と花崗岩とでその試験結果に大きな差がないことが分かる。なお、花崗岩の見掛け空隙率は土木分野で対象とする一般的な花崗岩に比較して大きな値となっている^{17), 18)}。その原因として、アンカーを定着するときの地表から数m程度の浅い岩盤を対象としているため、この位置の岩石が通常よりも強い風化作用を受けたことが考えられる。これに関連して一軸圧縮強度やヤング率も花崗岩の一般的な値よりも小さなものとなっている¹⁹⁾。

(3) ロックアンカーの引抜き実験

原位置引抜き実験を行ったロックアンカーの構造は、図—10の断面に示すような円柱形式全面接着型であり、

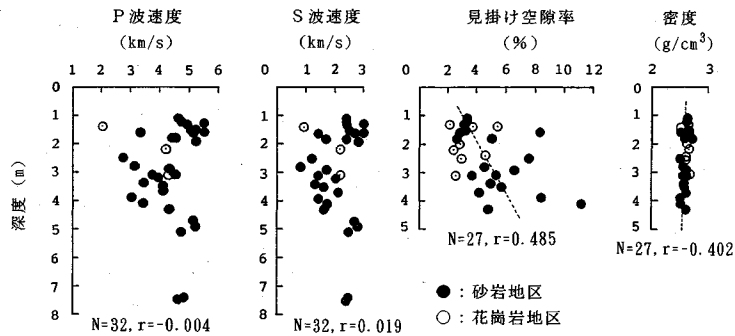


図-8 岩石の物理特性

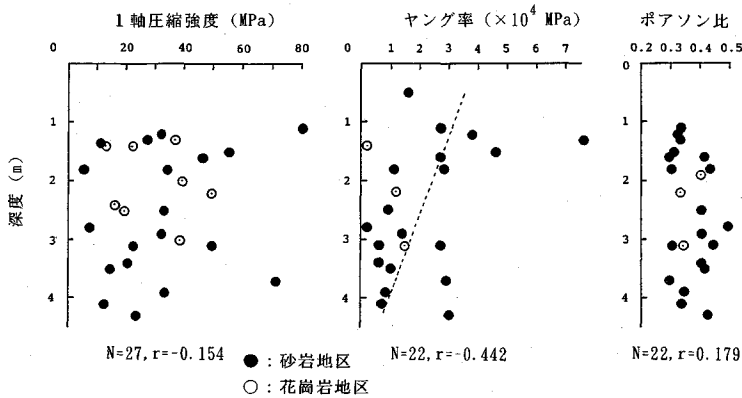


図-9 岩石の力学特性

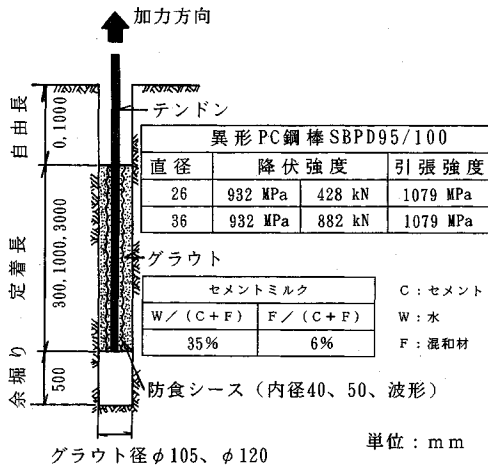
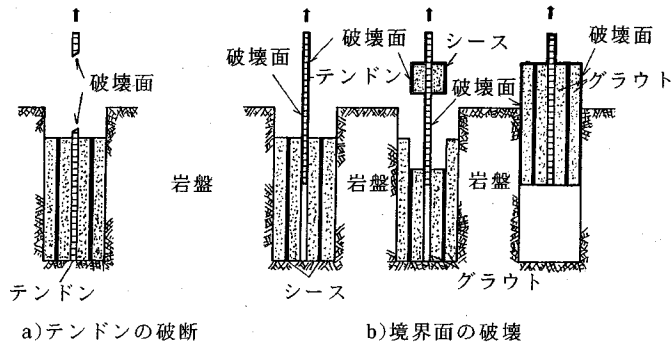


図-10 アンカーの構造と使用材料

テンドンに異形 PC 鋼棒, グラウトには無収縮剤を混和したセメントミルクを使用した。また, テンドンの腐食を防ぐために円筒で波型形状をなすポリエチレン製のシースがテンドンの周囲に挿入されている。筆者らは原位置実験あるいはアンカー模型の引抜き実験から, 円柱形式ロックアンカーの破壊モードが図-11のように分類され, 定着部ではアンカー体内部に形成される境界面

が破壊面となることを示した²⁰⁾⁻²²⁾。また, このような境界面においては, 境界面のせん断に伴いその面の幾何形状に起因したダイレイタンスすなわち見掛けの内圧効果が発生し, 岩盤がこれを拘束することによってアンカーの引抜き抵抗力が発揮されることを示した²³⁾⁻²⁶⁾。したがって, ロックアンカーを対象構造物とした岩盤の調査・試験においては, 周辺岩盤がアンカー体を拘束する能力として, 深度方向に岩盤の変形特性を推定する必要がある。そのためには, ロックアンカー構造の規模との整合性が良く, 原位置岩盤の応答を直接的に知ることが可能な孔内載荷試験が適していると考えられる。ところが, アンカー孔で直接に載荷試験を行うと孔壁の岩盤を傷める危険性がある。また, 数量が多く分散施工される全てのアンカー孔で深度方向に連続的な載荷試験を行うことは経済性からも困難である。このため, アンカー体周辺岩盤については直接的な載荷試験にのみ頼るのではなく, 他の調査・試験手法と組み合わせた間接的な方法でその変形特性を合理的に推定することが必要となる。

ロックアンカーの引抜き実験結果には, テンドンに引抜き荷重が作用するときの周辺岩盤の応答が反映されていることが考えられる。そこで, アンカー孔を削孔する前にその位置で測定した表面波速度 V_p と定着長 300 cm



円柱形式ロックアンカー

図-11 ロックアンカーの破壊モード一覧

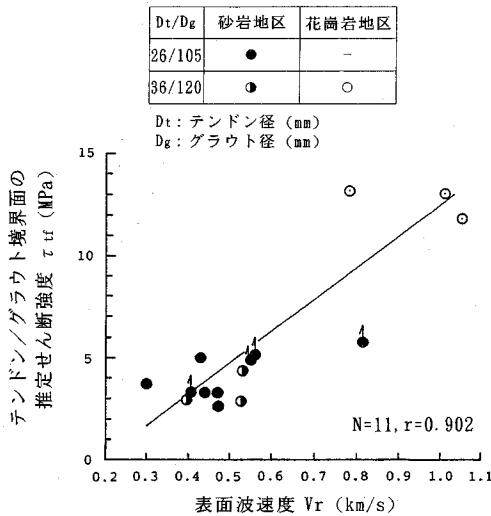


図-12 テンドン/グラウト境界面の推定せん断強度と表面速度との関係

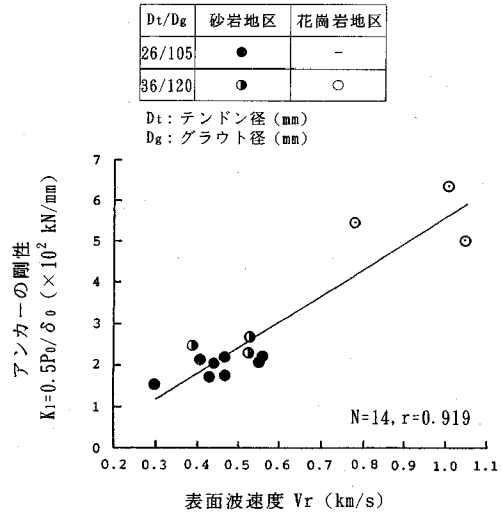


図-13 アンカーの剛性と表面波速度との関係

のアンカーの原位置引抜き実験結果を比較すると、図-12、図-13のようになる。ここで、 τ_{tf} はテンドンに貼付したひずみゲージから推定した定着最上部におけるテンドン周面の見掛けのせん断強度、 K_1 は τ_{tf} を与える引抜き荷重 P_{0f} の 50% 時点における定着最上部のテンドンの変位勾配 ($K_1 = 0.5 P_{0f} / \delta_0$ 、 δ_0 は定着最上部のテンドン変位) でロックアンカーの剛性を示している。両図から、表面波の伝播速度 V_r とテンドン周面の推定せん断強度 τ_{tf} やロックアンカーの剛性 K_1 との間には高度に有意な相関が認められる。したがって、今回引抜き実験を行ったロックアンカーの構造・材料と砂岩および花崗岩の 2 種類の岩盤においては、岩盤の弾性波伝播速度からロックアンカーの力学挙動を推定できることが分かる。このことは、ロックアンカーを対象構造物とした岩盤の力学特性評価方法として、孔内載荷試験と表面波探査とを組み合わせた間接的な方法の可能性を示唆している。

6. 岩盤の調査・試験結果間の比較

ボーリングコアから測定した RQD 、最大コア長と同一の位置で測定した表面波速度 V_r との関係を図-14 に示す。同様に RQD 、最大コア長とボーリング孔内載荷試験から求めた岩盤の変形係数 E_r との関係を図-15 に示す。両図から、 RQD 、最大コア長と V_r 、さらに RQD 、最大コア長と E_r との間にデータのバラツキが認められるものの高度に有意な相関関係が認められることが分かる。三木²⁷⁾ はこのような RQD と E_r の相関関係が種々の岩盤で認められることを示している。これらのことは、砂岩地区および花崗岩地区において、岩盤の幾何学特性である RQD からその物理特性である V_r や力学特性である E_r を間接的にはあるが推定できることを示している。また、図-16 に示すように、岩盤の変形係数 E_r と表面波速度 V_r との間にも RQD と E_r や最大コア長と E_r との関係と同様な相関関係が認められ、砂岩地区お

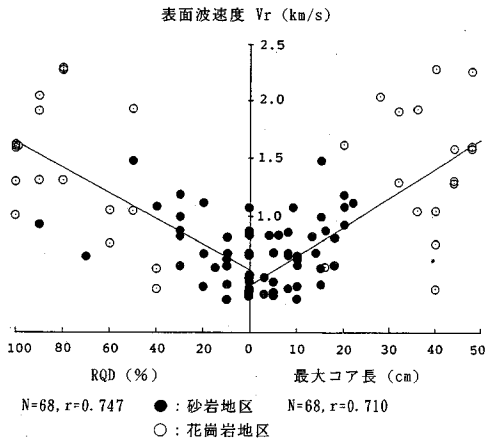


図-14 表面波速度と RQD, 最大コア長との関係

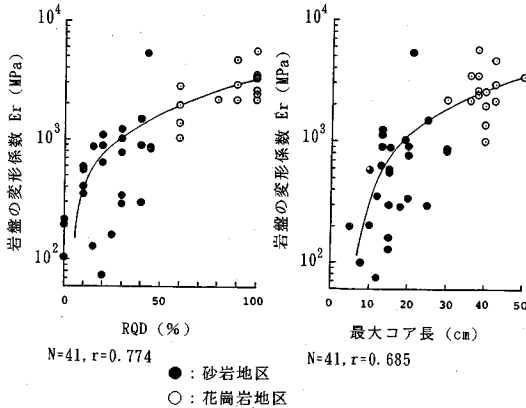


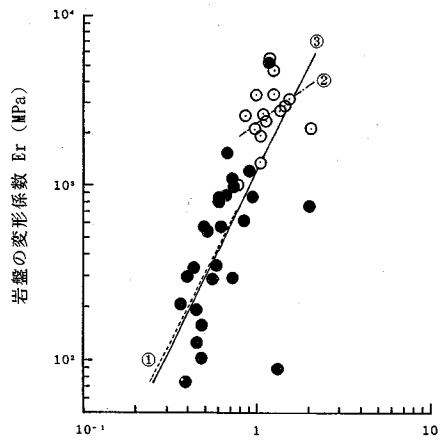
図-15 岩盤の変形係数と RQD, 最大コア長との関係

よび花崗岩地区において、岩盤の物理特性である V_r からその力学特性である E_r を間接的に推定可能であることが分かる。

7. 岩盤の変形係数推定法の提案とその精度

(1) 岩盤の変形係数の推定とその精度

ロックアンカーを対象構造物とした場合、前述したようにボーリング孔内荷重試験を多数実施し、アンカー孔ごとに岩盤の変形係数の深度方向分布を推定することは困難である。したがって、仮に図-15や図-16に示したような RQD と岩盤の変形係数 E_r あるいは表面波伝播速度 V_r と E_r との間に認められた有意な相関関係が過去の調査実績として蓄積されているなら、より簡便なボーリング調査や表面波探査の測定データから、岩盤の変形係数を間接的にではあるがより広範囲に連続的に推定することが可能となる。有意な相関関係を示す調査実績が無い場合でも、ボーリング調査や表面波探査、さらにそれらの測定結果を利用して調査位置と数量を絞り込んだ孔内荷重試験とを組み合わせることで、より合理的に岩盤の力学特性を推定することが可能と考えられる。



- 表面波速度 V_r (km/s)
- ① 砂岩地区 $E_r = 1277 \times V_r^{1.996}$, $N=26$, $r=0.74$
 - ② 花崗岩地区 $E_r = 2340 \times V_r^{0.615}$, $N=15$, $r=0.36$
 - ③ 両地区 $E_r = 1273 \times V_r^{2.030}$, $N=41$, $r=0.82$

図-16 岩盤の変形係数と表面波速度との関係

	砂岩地区	花崗岩地区
表面波速度からの推定	●	○
RQDからの推定	▲	△

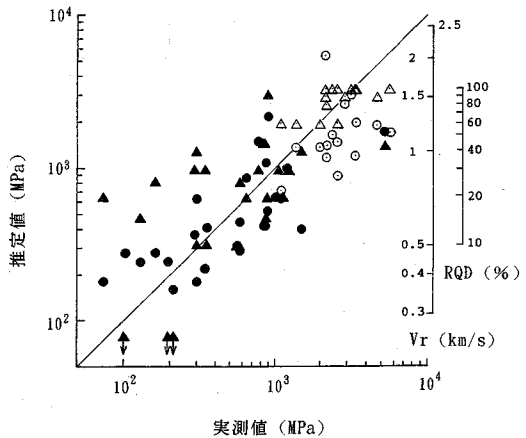


図-17 岩盤の変形係数推定精度

的に岩盤の力学特性を推定することが可能と考えられる。

このような間接的な岩盤の変形係数の評価手法について、今回の調査結果を利用してその推定の精度を調べて見る。RQD と E_r および V_r と E_r との間に認められた相関関係を用いて、RQD や表面波速度 V_r から推定した岩盤の変形係数と実際の孔内荷重試験結果の変形係数との関係は図-17のようになる。同図から、ある程度の誤差は認められるが、 V_r や RQD を利用して岩盤の

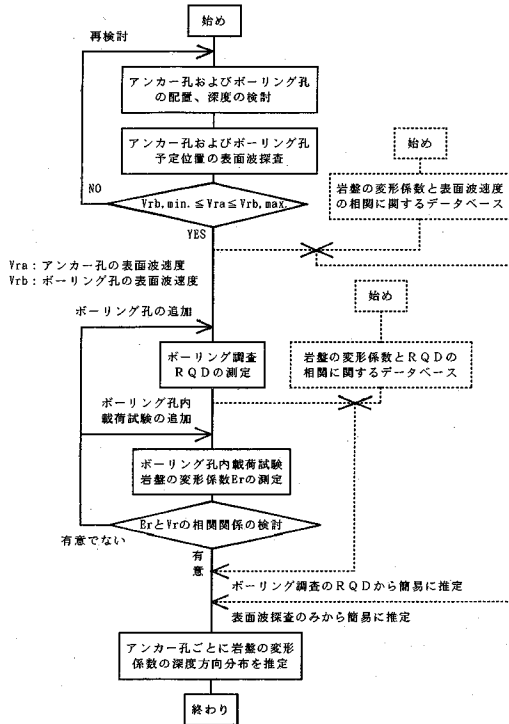


図-18 ロックアンカーに対する岩盤の評価手順

変形係数を推定可能なことが分かる。また、RQD から推定した岩盤の変形係数の精度が Vr から推定したそれよりも劣ること、特に RQD が小さな場合にその推定の精度が悪くなることが分かる。図-1 に示したように、RQD から不連続面の分布状況が一意的に決まらずに複数の不連続面分布の存在が可能であるという RQD の指標としての特性が推定精度の悪さとなって現れたことが考えられる。

(2) 岩盤の変形係数の推定手順

(1) に述べた間接的な岩盤の変形係数の推定方法について、その具体的な手順をまとめると次のようであり、これをフローで示すと図-18 のようになる。

- ① アンカー孔およびボーリング孔計画位置の岩盤で表面波探査を実施し、深度方向の表面波速度分布を求める。
- ② ボーリング孔予定位置の表面波速度の上下限値内にアンカー孔予定位置の表面波速度値が含まれることを確認する。
- ③ ②が満足されない場合には、異なった位置あるいは深度で表面波探査を追加し、②の条件を満足するように、新たなボーリング調査の位置と深度を決める。
- ④ ボーリング調査および孔内載荷試験を実施し、その位置の岩盤の RQD と変形係数を測定する。
- ⑤ ボーリング孔で測定した表面波速度と岩盤の変形

Dt/Dg	砂岩地区	花崗岩地区
26/105	●	-
36/120	●	○

Dt: テンドン径 (mm)
Dg: グラウト径 (mm)

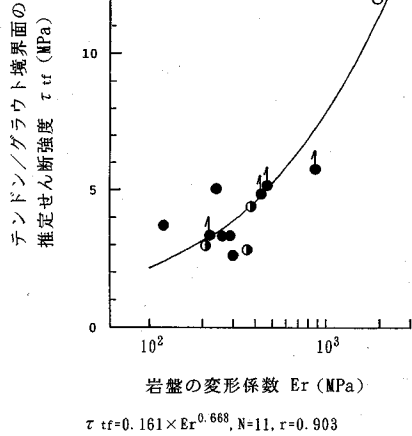


図-19 テンドン/グラウト境界面の推定せん断強度と岩盤の変形係数との関係

Dt/Dg	砂岩地区	花崗岩地区
26/105	●	-
36/120	●	○

Dt: テンドン径 (mm)
Dg: グラウト径 (mm)

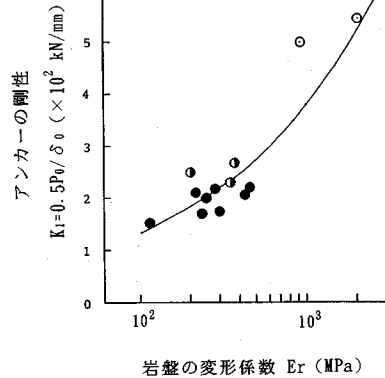


図-20 アンカーの剛性と岩盤の変形係数との関係

係数との間に有意な相関関係が認められることを確認する。

- ⑥ 有意な相関関係が認められない場合には、異なった位置あるいは深度で孔内載荷試験を実施し、測定データを追加して⑤の条件を満足させるようにする。
- ⑦ 表面波速度と岩盤の変形係数との間の相関関係か

ら、アンカー孔位置の岩盤の変形係数を推定する。

図-16に示した岩盤の変形係数 E_r と表面波速度 V_r との関係を上掲の評価手順にあてはめ、ロックアンカーの引抜き実験を実施した個々のアンカー孔位置の岩盤の変形係数を推定した。このようにして推定した岩盤の変形係数とロックアンカーの引抜き実験から得られた tendon 周面の推定せん断強度 τ_{if} やアンカーの剛性 K_1 との関係は図-19、図-20 のようになる。両図から、tendon 周面の推定せん断強度やアンカーの剛性すなわちロックアンカーの力学挙動が定量的な指標である岩盤の変形係数 E_r によって表わされていることが分かる。これらのことは、ロックアンカーの力学挙動に及ぼす岩盤の影響について、岩盤の変形係数に着目してアンカーの挙動を予測すべきであるという考え方が妥当であること、さらに従来の岩種区分による定性的な岩盤の評価について、調査・試験結果を組み合わせた手法から定量的な評価が可能になったことを示している。

8. 結 言

ロックアンカーの設計・施工における定量的な岩盤評価を目的に、円柱形式全面接着型ロックアンカーの原位引抜き実験を行った砂岩および花崗岩岩盤で詳細な調査・試験を実施した。その結果を用いて岩盤調査・試験手法による結果の相違、調査・試験結果間相互の関係を考察した。得られた知見は次のようである。

- ① 花崗岩岩盤で実施したボーリング調査結果から、 RQD と不連続面の数や平均間隔との比較を行い、 RQD には不連続面の平均的な間隔が反映されていることを推定した。
- ② 屈折法探査、ボーリング孔内探査、ボーリング孔間探査および表面波探査の4種類の弾性波探査手法を同一の花崗岩岩盤に適用した結果から、ロックアンカーを対象構造物とした場合の岩盤探査手法として、経済性の評価も含めて、表面波探査の適用が相対的に妥当であることを示した。
- ③ ロックアンカーの引抜き実験結果と表面波探査結果とを比較し、今回対象とした砂岩および花崗岩岩盤においては、表面波の伝播速度からロックアンカーの強度や剛性を推定可能であることを示した。
- ④ ボーリングコア観察、表面波探査およびボーリング孔内載荷試験の結果を相互に比較し、今回対象とした砂岩および花崗岩岩盤においては、 RQD から岩盤の表面波速度および岩盤の変形係数の推定、また岩盤の表面波速度からその変形係数の推定が可能であることを示した。
- ⑤ ロックアンカーを対象構造物とした場合の岩盤の変形係数推定法として、表面波探査とそれらの結果を用いて調査位置と数量を絞り込んだボーリング孔内

載荷試験とを組み合わせた方法を提案し、その具体的な手順、精度および適用性を示した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重なご助言を頂いた中部電力株式会社 奥美濃水力建設所 東側豊二所長、奥田宏明副所長に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Littlejohn, G.S. and Bruce, D.A. : Rock anchors-Design and quality control, Design methods in rock mechanics, Proc. of 16th U.S. Symp. on Rock Mech., pp.77~88, 1977.
- 2) Littlejohn, G.S. : Overview of Rock Anchorages, COMPREHENSIVE ROCK ENGINEERING Vol.4 Excavation, Support and Monitoring, ed. by J.A. Hudson, pp.413~450, 1993.
- 3) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，1990.
- 4) 田野襄一郎・徳留幸春・江藤芳武：結晶片岩切取斜面のアンカーの引抜き耐力，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.131~135，1985.
- 5) 日比野敏・林正夫・本島睦：異方性岩盤（花崗岩類）における大規模空洞掘削時の岩盤挙動に関する考察，電力中央研究所報告，No. 379028，1980.
- 6) Ebisu, S., Komura, S., Aydan, Ö. and Kawamoto, T. : CHARACTERIZATION OF JOINTED ROCK MASSES FOR ROCK ANCHORS, Preprints of Int. Conf. on FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, Lake Tahoe, Calif., pp.150~157, 1992.
- 7) Ebisu, S., Aydan, Ö., Komura, S. and Kawamoto, T. : Comparative study on various rock mass characterization methods for surface structures, Proc. of Int. ISRM symp. on ROCK CHARACTERIZATION, EUROCK '92, Chester, UK, pp.203~208, 1992.
- 8) Priest, S.D. and Hudson, L. : Discontinuity spacings in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135~148, 1976.
- 9) 風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用編集委員会：風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用，土質工学会，土質基礎工学ライブラリー16，pp.87~139，1979.
- 10) Cameron-Clarke and Budavari, S. : Correlation of rock mass classification parameters obtained from borehole and in-situ observation, Engineering Geology, Vol.17, pp.16~53, 1981.
- 11) 船山満也・中道育夫・西垣好彦：孔壁 RQD の実測例，第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.201~205，1989.
- 12) (株)ビィック：表面波探査法地盤調査の現況—レーリ波速度と工学的結量の関係—，ビィック技術ニュース，1989.
- 13) 地団研地学事典編集委員会編：地学事典，平凡社，p.920，p.1183，1970.
- 14) 斉藤和雄・楠健一郎・木方建造・高木博・飯沼孟久夫：花崗岩岩盤における孔内変形試験結果と岩盤諸性質との

- 関係, 第13回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.1~5, 1980.
- 15) 武内俊昭・鈴木楯夫・田中荘一: 孔内載荷試験法による岩盤測定結果の検討, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会他, pp.217~221, 1977.
- 16) 三木幸蔵: 岩盤力学入門, 鹿島出版会, p.232, 1986.
- 17) 川本眺万・吉中龍之進・日比野敏著, 土木学会編: 新体系土木工学 20 岩盤力学, 技報堂出版, p.75, 1985.
- 18) 鈴木光: 岩盤力学と計測, 内田老鶴園新社, p.44, 1973.
- 19) 日本鉱業会岩石試験データシート作成・利用研究委員会: 岩石試験データシート作成・利用研究の現況, 日本鉱業会誌, Vol.98, No.1128, pp.149~179, 1986.
- 20) 渡辺篤・河村精一・Ömer 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, Vol.38, No.5, pp.27~32, 1990.
- 21) アイダン オメル・蛭子清二・河村精一: 引抜き実験におけるロックアンカーの破壊モード, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.331~335, 1993.
- 22) Aydan, Ö., Ebisu, S. and Komura, S.: Pull-out tests of rock anchors and their failure modes, Proc. of ISRM Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul TURKEY, pp.285~293, 1993.
- 23) 渡辺篤・河村精一・Ömer Aydan・蛭子清二: アンカー耐荷力を支配する境界面の力学特性, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.291~295, 1990.
- 24) Aydan, Ö., Ichikawa, Y., Ebisu, S., Komura, S. and Watanabe, A.: Studies on interfaces and discontinuities and an incremental elasto-plastic constitutive law, Proc. of ISRM Regional Symp. on Rock Joints, Loen NORWAY, pp.595~602, 1990.
- 25) 新貫佳郎・河村精一・Ömer Aydan・蛭子清二: ロックアンカーの力学挙動に関する研究, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会他, pp.37~42, 1990.
- 26) Ebisu, S., Aydan, Ö. and Komura, S.: Mechanism of interface failure of rock anchors, Proc. of ISRM Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul TURKEY, pp.677~685, 1993.
- 27) 三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会, pp.284~286, 1978.

(1994. 4. 20 受付)

CHARACTERIZATION OF JOINTED ROCK MASSES FOR ROCK ANCHORS

Seiji EBISU, Ömer AYDAN, Seiichi KOMURA and Toshikazu KAWAMOTO

Since the uplift capacity of rock anchors depends upon the overall deformability and the strength of rock mass, the characterization of overall mechanical properties is very important. The authors have made in-situ pull-out tests of rock anchors and the characterization of rock masses at two geologically different sites. Rock types at the respective sites were sandstone and granite. In this article, the authors will first present the results obtained from various investigations for the characterization of rock mass. Then, they will present correlations among geometrical, geophysical and mechanical investigations and discuss their suitability for the characterization of rock masses for rock anchor foundations.