

# アンカー体摩擦応力に対するグラウト加圧注入の効果

## Effects of pressure grout injection for the anchor body friction stress

片山直樹<sup>a) b) \*</sup>

Naoki KATAYAMA

### Abstract

About the effects that pressure grout injection performed by ground anchor give to the function of the anchor and the increase mechanism of the anchor body surface friction stress with it, there are many points that are not yet clear. This is because it is hard to perform constant evaluation for the effects of the pressure grout injection to be affected by the inhomogeneous nature greatly on the natural ground. Therefore, in this study, I made two types of specimens which cast grout by presence of the presurization for the homogeneous model ground which removed inhomogeneity and measured the friction stress between ground materials and grout by direct shear test. As a result, a good relationship was recognized between increase of the friction stress by the pressure grout injection and the dehydration phenomenon of the grout, and recognized the strength increase of the dehydrated grout. From these results, the increase mechanism of the anchor body surface friction stress in the homogeneous ground by the pressure grout injection estimated it to be a thing by the increase of the cohesive power by the strength increase with the dehydration of the grout.

**Key words :** Ground Anchor, Grout, Pressure Grout Injection, Friction Stress

### 和文要旨

グラウンドアンカーで行われる加圧注入が、アンカーの機能に及ぼす効果や、それに伴うアンカー体周面摩擦応力の増加メカニズムについては、いまだ明らかでない点が多い。この一因として、自然地盤ではその不均質性に大きく影響を受けるため、加圧注入の効果に対する一定の評価が得られにくいことが挙げられる。そこで本研究では、不均質性を排除した均質なモデル地盤に対し、加圧の有無によりグラウトを打設した2種類の供試体を作製し、一面せん断試験により地盤材とグラウト間の摩擦応力を測定した。その結果、加圧注入による摩擦応力の増加とグラウトの脱水現象には良好な関係性が認められ、脱水したグラウトの強度増加も確認された。これらの結果から、均質地盤における加圧注入によるアンカー体周面摩擦応力の増加メカニズムは、加圧脱水に伴うグラウトの高強度化に起因する付着力の増加によるものと推定した。

**キーワード :** グラウンドアンカー, グラウト, 加圧注入, 摩擦応力

## 1. はじめに

グラウンドアンカー（以下、アンカーとする）のアンカー体注入では、一般に加圧注入が行われている。加圧注入は、削孔の影響などによる孔壁の緩みを防止するとともに、アンカー体グラウトと周面地盤との接触面における摩擦応力（以下、 $\tau$ とする）を増加させる目的で行われる<sup>1)</sup>。また、礫質土や砂質土などの間隙が多い地盤では、加圧注入によりグラウトを地盤中に浸透させ、アンカー体径の肥大効果による $\tau$ の増加も期待されている<sup>2)</sup>。

しかしながら、グラウトの浸透など注入形態の不確かさなどから、加圧注入の効果について疑問視される場合もあるように<sup>3)</sup>、加圧注入によるグラウトの注入形態や、それに伴う $\tau$ の変化については、いまだ不明確な部分が多く残されている。

薬液注入の分野では、加圧注入による薬液の注入形態として、大別すると浸透注入と割裂注入の2つの概念がある。アンカーのグラウトとして一般的に使用される水セメント比 $W/C = 50\%$ 前後のセメントミルクでは、粘土層などの間隙比が小さな地盤への浸透注入は不可能とされ、主に割裂注入の形態をとるとされている<sup>4)</sup>。ただ

し、一般的なアンカーでは、加圧力を高め地盤に割裂を生じさせ、その亀裂にグラウトを注入することは一般に行われていない<sup>5)~7)</sup>。

セメントミルクなどの懸濁液型注入材料の浸透性を評価する指標の一つであるグラウタビリティ比（土粒子の10%粒径 $D_{10}$ /注入材の95%粒径 $G_{95}$ ）からの判断では、普通セメントを使った場合、浸透注入が可能となる $D_{10}$ は0.56mm以上となることから<sup>4)</sup>、細粒分を多く含む均質かつ密な状態の自然地盤に対しては加圧注入によるグラウトの浸透は起こり難いといえる。

また、グラウトの注入挙動に関する研究<sup>8),9)</sup>によると、均質地盤においては $W/C = 350\%$ 以下のセメントミルクでは、間隙閉塞の理論モデル<sup>10)</sup>における表面層モデル（濁質粒子が間隙内に浸入できず表面に蓄積されるモデル）の状態となり、グラウトの浸透は非常に困難であることが示されている。

以上のように、アンカーの加圧注入によるグラウトの浸透は困難であるといえ、これに伴うアンカー体径の変化に起因した $\tau$ の増加は生じ難いといえる。

一方で、グラウトの加圧力および加圧時間と $\tau$ の関係に関する研究結果<sup>11)</sup>では、加圧注入による $\tau$ の増加は、加圧によりアンカー体周面地盤が改良される影響であると結論づけており、加圧注入の効果および $\tau$ への影響については議論の余地が残されているように思われる。

\* 連絡著者 / corresponding author

a) 株式会社日本海技術コンサルタンツ

Nihonkai Technical Consultants CO., Ltd

〒699-0403 鳥根県松江市宍道町西来待2570-1

2570-1 Nishikimachi, Shinji-cho, Matsue-City, Shimane Prefecture, 699-0403, Japan

b) 山口大学大学院

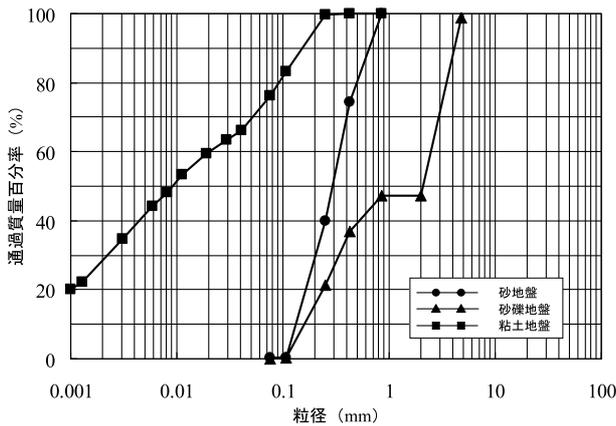


図-1 地盤材の粒度特性  
Fig. 1 Grading curves of ground materials

自然地盤における加圧注入の効果は、地盤の不均質性に左右される要素を多く含むために、アンカー打設現場の地質・土質条件や削孔条件の影響を強く受ける。このため、加圧注入と $\tau$ の関係性について明らかにすることは容易ではない。

これまでの自然地盤におけるアンカーに関する既往研究および調査は、現場条件の違いや地盤の不均質性の影響を受けているといえ、まだ加圧注入の有効性および $\tau$ への影響について普遍的な関係性を見出すには至っていない。

そこで、本研究では不均質性を排除した均質なモデル地盤について、グラウトの打設条件を変えた供試体を作製し、地盤材とグラウト接触面の $\tau$ を一面せん断試験により測定した。その試験結果をもとに、加圧注入がグラウトやその注入過程に及ぼす効果ならびに $\tau$ の増加メカニズムについて考察した。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験概要

実際のアンカー引抜き時には、多様なせん断破壊面が生じるため、アンカー体周面に発現する $\tau$ に対する一定の評価を行い難い。よって本研究では、この様なせん断破壊面の影響を極力抑えるために、任意の面におけるせん断が可能である一面せん断試験によりグラウトと地盤材間のせん断強さを測定した。なお、既往研究<sup>(12), (13)</sup>では一面せん断試験により砂や粘性土などの地盤材料と、鋼材やコンクリートなどの構造物材料間のせん断強さを測定し、材料間の摩擦係数として評価したものもみられる。したがって、本研究では測定されたせん断強さを、グラウトと地盤材間で発現する摩擦応力として評価する。

また、既往研究により模型アンカーの3次元円筒形モデルと2次元平面モデルでは、引抜き量と引抜き抵抗力の関係に同様の傾向が認められている<sup>(14)</sup>。したがって、本研究では3次元的なアンカー体と周面地盤間のせん断問題を、簡便な平面的せん断問題に近似できるものとし

た。

試験は、直径6 cm、高さ6 cmの円筒状のモデル地盤の上に、セメントミルクによるグラウトを打設した供試体を作製し、モデル地盤とグラウトの接触面に対して一面せん断試験を実施し、せん断強さを求めた。

試験に用いた地盤材は、砂地盤、砂礫地盤、粘土地盤を想定した3種類の均質材料とした。各地盤材の粒度特性および物理特性をそれぞれ図-1、表-1に示す。

また、グラウトの打設方法は、加圧する場合としない場合の2種類とし、それぞれの試験結果を比較することで加圧注入が $\tau$ に及ぼす影響を評価した。

### 2.2 試験供試体の作製

内径6 cmの円筒状である専用型枠下側の底部に、排水性・排気性を確保するために厚さ1 cmのポーラスストーンを敷き、その上に地盤材を密に詰めて作製した。

砂地盤は、鳥取砂丘砂（平均粒径 $D_{50}=0.288\text{mm}$ ）を水洗いしたものを専用型枠に入れ、水を加えながら締め固め、均質な密地盤を作製した。

砂礫地盤は、砂地盤で使用した鳥取砂丘砂に粒径 $\phi 2\sim 4.75\text{mm}$ に調整した花崗岩の細礫を質量比で1:1の割合でよく混ぜて均質化し（ $D_{50}=2.335\text{mm}$ ）、砂地盤同様に水締めして密な状態とした。

粘土地盤は、鳥根県産来待砂岩の粉体に加水して作った粘土（ $D_{50}=0.009\text{mm}$ ）を用いた。粘土を型枠に木製ランマー（直径1 cm）で突き固めながら充填し、十分密な状態となるようにして地盤を作製した。

モデル地盤を作製した後、専用型枠上側を取り付け、上端部開口部からグラウト（早強セメント $W/C=50\%$ 、Pロートによるフロー値 $15\pm 3$ 秒）を流し込み、加圧する場合としない場合で2種類作製した。

グラウトを加圧する場合は、グラウトを流し込んだ後に、電動エアポンプを上端部開口部に接続し、空気圧を加えることによりグラウトの加圧注入を再現した。加圧力は地盤の種類によらず $200\text{kN/m}^2$ とし、圧力保持時間については1分間とした。グラウトは、打設後完全に硬化する前に、専用型枠上側を外し、厚さ1 cmとなるように上部をカットして整形した（図-2）。

### 2.3 一面せん断試験

試験供試体のグラウトを3日間養生した後、一面せん断試験（JGS0561）を行った。

表-1 地盤材の物理特性  
Table 1 Physical characteristic of ground materials

	砂地盤	砂礫地盤	粘土地盤
工学的分類 (JGS0051)	S	GS	CLS
土粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.689	2.645	2.599
湿潤密度 $\rho_r$ ( $\text{g/cm}^3$ )	1.70	1.73	1.88
含水比 (%)	15.7	12.7	23.0
間隙比	0.83	0.72	0.70
透水係数 ( $\text{cm/s}$ )	$5.1 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-6}$

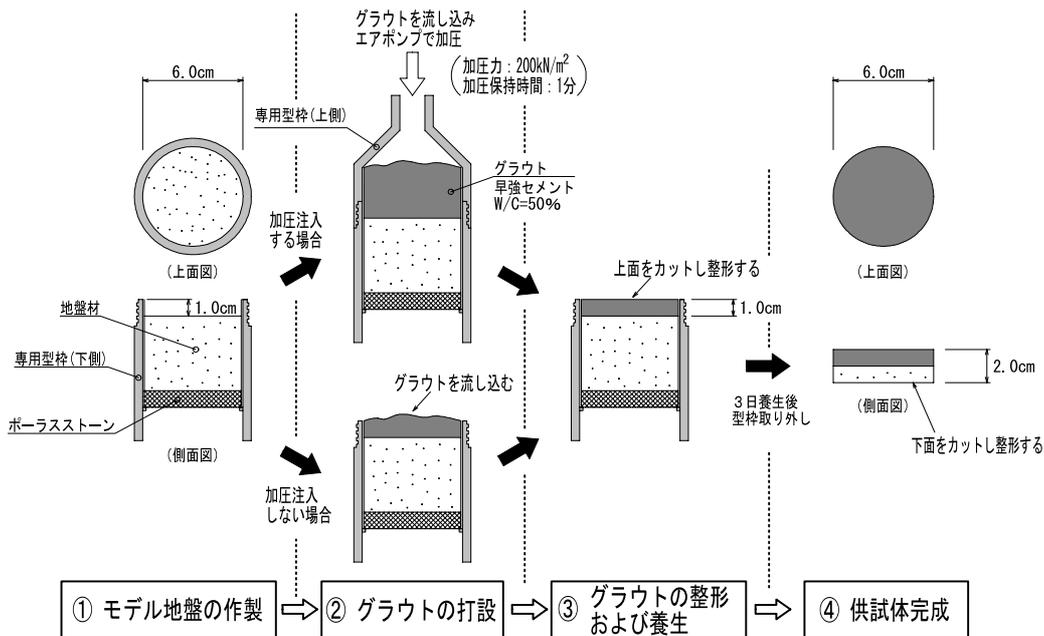


図-2 供試体作製方法  
Fig. 2 Specimens manufacture method

専用型枠から取り出した供試体は、一面せん断試験機にセットするために、モデル地盤側を1cmの厚さにカットし、供試体全体の厚さを2cmに整形した。

一面せん断試験は全ての地盤材において定圧試験によるものとし、垂直応力 $\sigma_v$ を50~400kN/m<sup>2</sup>間で変化させて試験を行った。圧密過程で変位量が十分落ち着いた後、せん断変位速度を0.2mm/minでせん断を行い、定圧せん断強さ（以下、 $\tau_f$ とする）を測定した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 地盤材のせん断強度特性

モデル地盤自体のせん断強度特性を把握するために、それぞれの地盤材についても一面せん断試験を行った。得られた $\tau_f$ とそれらに対する近似直線を図-3に示す。なお、砂地盤については粘着力が認められた結果となったが、これは供試体の含水比が16%程度の含水状態であったため、見かけの粘着力が発現した影響と考えられる。

#### 3.2 試験結果

##### 3.2.1 砂地盤の場合

砂地盤の供試体における一面せん断試験の結果を図-4にまとめる。

得られた $\tau_f$ にはばらつきが認められたが、全体的にはグラウトを加圧した場合の方が大きい $\tau_f$ が発現する結果となった。特にその傾向は $\sigma_v$ が低圧時ほど顕著に現れており、 $\sigma_v = 50\text{kN/m}^2$ 時における $\tau_f$ の平均値は、加圧供試体が無加圧供試体の1.49倍であった。 $\tau_f$ のばらつきの程度は、加圧供試体の方が大きい傾向が認められ、最もばらつきが大きかった $\sigma_v = 100\text{kN/m}^2$ 時の標準偏差は54.6であった。

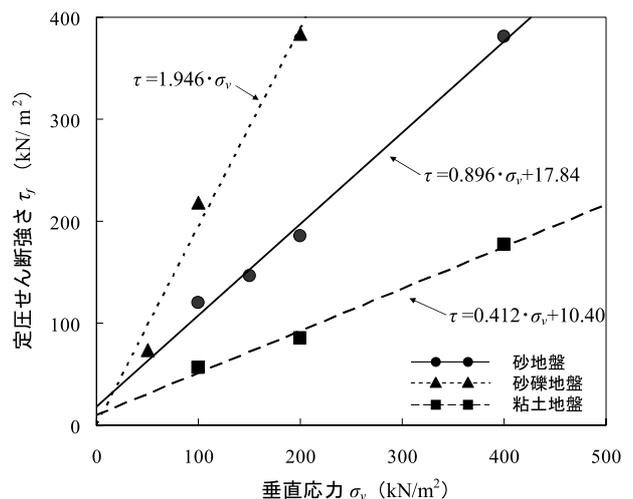


図-3 地盤材のせん断強度特性  
Fig. 3 Shear strength characteristic of ground materials

また、一部の加圧供試体（図-4の▲）において、他のデータと比べ高い $\tau_f$ が発現した。これらの供試体については、試験後のせん断面がやや下に凸になっていたことが確認された（写真-1）。これはグラウトと地盤材間の付着性が向上したため、せん断破壊面が地盤材内に形成され、正のダイレイタンスが生じて高い $\tau_f$ が発現したものと推測される。

このようにせん断面が地盤材内に形成されたものについては、正確にはグラウトと地盤材間の摩擦応力を示さないが、少なくとも得られた $\tau_f$ よりも高い摩擦応力がグラウトと地盤材間で発現しているものと予測される。したがって、本研究においてはこれら地盤材内にせん断面が生じた試験結果についても加圧供試体の $\tau_f$ として評価した。

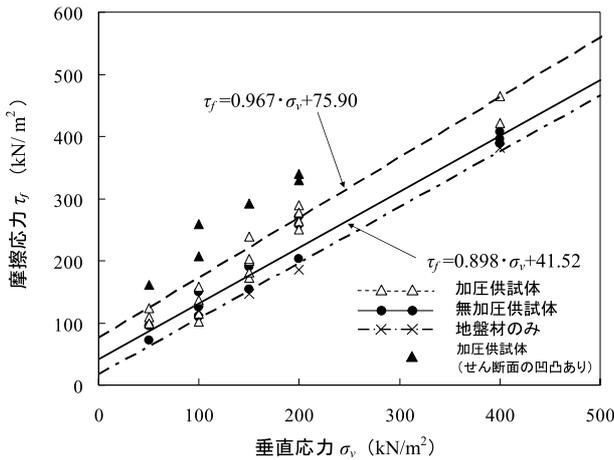


図-4 砂地盤における摩擦応力と垂直応力の関係

Fig. 4 Relationship between friction stress and vertical stress in specimens of sand material

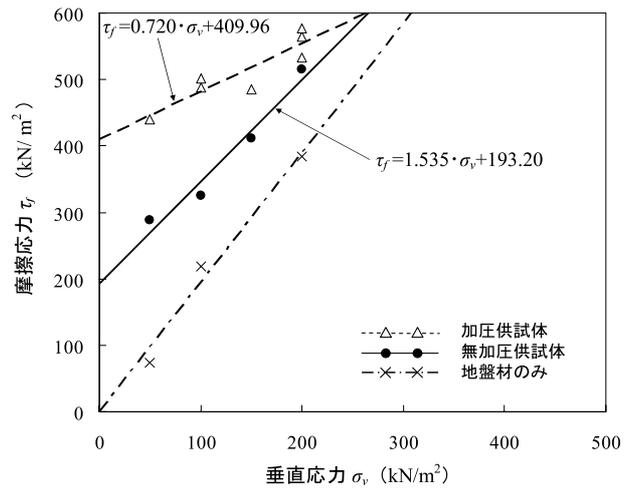


図-5 砂礫地盤における摩擦応力と垂直応力の関係

Fig. 5 Relationship between friction stress and vertical stress in specimens of gravel material

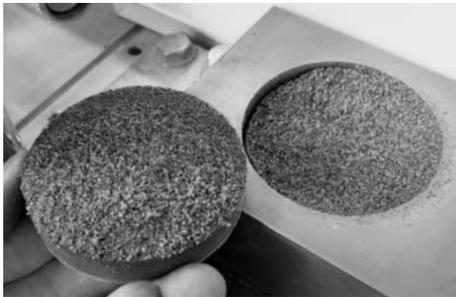


写真-1 試験後のせん断面 (砂地盤  $\sigma_v = 100\text{kN/m}^2$ )  
Photo 1 Shearing plane after test (sand material,  $\sigma_v = 100\text{kN/m}^2$ )

なお、せん断面が地盤材内に形成されたものを除けば  $\tau_f$  のばらつきは小さいといえることから、データのばらつきは地盤材内に形成されるせん断面の不確実性に起因するものと推測される。

試験後、供試体の地盤材部分にフェノールフタレイン溶液を吹付け、グラウトの浸透状況を確認したが、加圧の有無にかかわらずグラウトの浸透は認められなかった。しかし、加圧を行った供試体については、加圧後のグラウトはかなり粘性の高い状態を呈しており、加圧による脱水現象が認められた。

### 3.2.2 砂礫地盤の場合

砂礫地盤における一面せん断試験の  $\tau_f$  を図-5にまとめる。なお、砂礫地盤では、いずれの供試体においても高い  $\tau_f$  が発現したため、使用した一面せん断試験機の荷重計の許容量の関係から、 $\sigma_v = 200\text{kN/m}^2$  より大きい垂直応力での試験は実施できなかった。

砂礫地盤における試験結果では、グラウトの加圧と無加圧による  $\tau_f$  の差異が明瞭に表れ、全ての  $\sigma_v$  条件下において、加圧した場合の  $\tau_f$  の方が高い結果が示された。砂地盤の結果と同様に、 $\sigma_v$  が低圧時ほどその傾向が顕著に表れ、 $\sigma_v = 50\text{kN/m}^2$  時においては加圧供試体の  $\tau_f$  が無加圧供試体の1.53倍であった。また、加圧後のグラウトは

著しく脱水された状態にあり、グラウトのみで自立が可能な半固体状を示した(写真-2)。

フェノールフタレイン溶液により加圧注入によるグラウトの浸透状況を調べたところ、グラウトとの接触部から2 cm程度内部までが赤く染まり、アルカリ分が浸透した状況であることが示された(写真-3)。しかし、試験後に加圧注入を行った供試体を崩し、地盤材内部のグラウト浸透状況を確認したところ、硬質な状態のグラウトは接触面から2 mm程度内部までの範囲の、礫による表面的な凹凸を充填する程度であった。それより内部の地盤材に認められたフェノールフタレイン溶液の反応は、微量のセメント粒子が浸透した影響と考えられ、 $\tau_f$  に与えた影響は低いものと推察される。

なお、無加圧注入による供試体においても、地盤材の表面的な凹凸はグラウトにより充填されており、目視レベルでは加圧供試体と同様であることを確認した。

### 3.2.3 粘土地盤の場合

粘土地盤における一面せん断試験の  $\tau_f$  を図-6にまとめる。全体的には砂地盤に比べ  $\tau_f$  のばらつきの程度は小さいが、グラウトの加圧と無加圧による  $\tau_f$  の差異が不明瞭な結果といえる。今回の試験結果では、 $\sigma_v$  が  $200\text{kN/m}^2$  よりも低い場合には加圧による  $\tau_f$  の増加傾向がわずかに認められたものの、それ以上の  $\sigma_v$  条件下となると加圧条件に関わらず  $\tau_f$  のばらつきが大きくなり一意の傾向が認められない結果となった。このような高い  $\sigma_v$  条件下における  $\tau_f$  のばらつきは、圧密過程において供試体の粘土に塑性変形が生じ、グラウトと粘土の付着性が損なわれた影響である可能性が考えられる。

一面せん断試験後の供試体地盤材部分にフェノールフタレイン溶液を吹付けたが、アルカリ分の浸透は認められなかった。また、加圧供試体の加圧後のグラウトは、他の地盤材ほどではないが若干の脱水が確認できた。

### 3.3 グラウトの一軸圧縮強さの違い



写真-2 加圧後のグラウト脱水 (砂礫地盤)  
Photo 2 Grout dehydration after pressurization (gravel material)

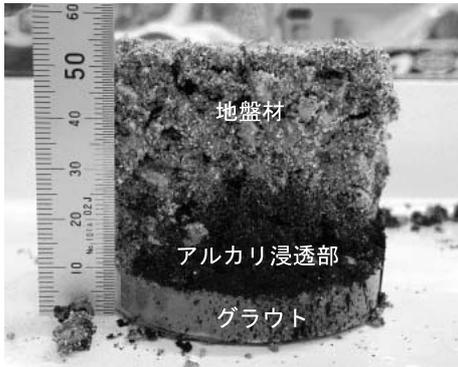


写真-3 加圧後のアルカリ浸透 (砂礫地盤)  
Photo 3 Alkali penetration after pressurization (gravel material)

加圧注入の供試体においてグラウトの脱水が認められ、特に砂地盤、砂礫地盤での脱水が著しくみられた。この脱水作用がグラウトの強度に及ぼす影響をみるために、供試体を作製し一軸圧縮試験 (JIS A1216) を行った。

供試体は、グラウト (早強セメント  $W/C = 50\%$ , Pポートによるフロー値18秒) を、砂の地盤材を詰めた専用型枠に加圧注入し脱水させたものと、脱水させないものをプラスチックモールド (直径5 cm, 高さ10cm) に入れ、それぞれ4個ずつ供試体を作製し、2日養生後に一軸圧縮試験を行った。試験結果を図-7に示す。

一軸圧縮試験の結果、無加圧グラウトの一軸圧縮強さ  $q_u$  は平均  $q_u = 18.57 \text{ MN/m}^2$  に対し、加圧グラウトは平均  $q_u = 31.99 \text{ MN/m}^2$  と1.72倍強度が高い結果となった。また、加圧し脱水させたグラウトの方が  $q_u$  の個体差が小さいことが認められた。

試験供試体の湿潤密度  $\rho_r$  および含水比  $w$  の平均値は、無加圧グラウトが  $\rho_r = 1.778 \text{ g/cm}^3$ ,  $w = 28.2\%$  に対し、加圧グラウトは  $\rho_r = 1.929 \text{ g/cm}^3$ ,  $w = 19.7\%$  であり、加圧グラウトの方が密実な状態であることが示された。

これらのことから、加圧注入により脱水したグラウトは密実化し、それに伴う強度の増加および発現強度の安定が図れるものと判断される。

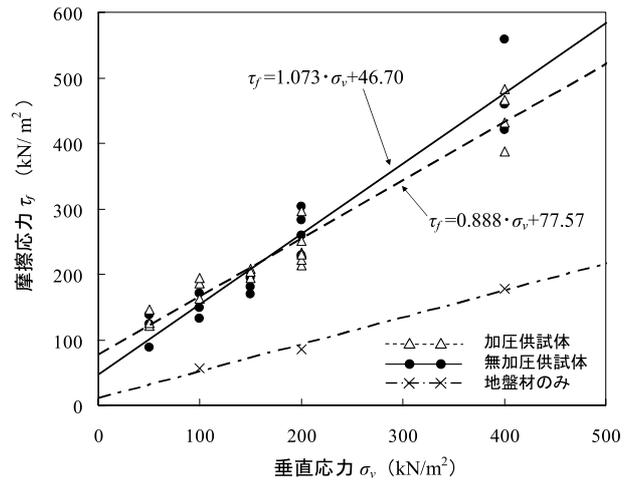


図-6 粘土地盤における摩擦応力と垂直応力の関係  
Fig. 6 Relationship between friction stress and vertical stress in specimens of clay material

#### 4. 考察

##### 4.1 加圧注入によるグラウトの注入過程

均質地盤に対するセメントベースのグラウトの注入過程は、セメント粒子の輸送過程、地盤間隙へのセメント粒子の充填過程および充填されたグラウト材の硬化過程から成り立っているとされる<sup>15)</sup>。なお、本文ではセメント粒子の輸送過程をグラウトの浸透過程と同義として扱うものとする。

上記の過程のうち浸透過程については、セメントミルクなどの懸濁液型注入材料は、前述のとおり均質な地盤内に浸透するためには  $W/C = 350\%$  以上でなければ浸透は困難であることから、一般的なアンカーにおける  $W/C = 50\%$  前後のグラウトでは浸透は生じ難いと考えられる。

今回の試験結果では、砂地盤および粘土地盤による加圧供試体については、グラウトの浸透は全く認められなかった。これはグラウトが  $W/C = 50\%$  であったため、表面層状態となりグラウトの浸透が生じなかったものと判断される。一方、砂礫地盤による加圧供試体についてはフェノールフタレイン溶液の反応から、わずかにセメントのアルカリ分の浸透が認められたが、固化体を形成するほどのセメント量は浸透しておらず、グラウトが浸透したとは言い難い。

これらの結果から、加圧注入によるグラウトの注入過程を考えると、アンカー定着層とされるような密実な自然地盤であり、かつ、均質な状態の地盤においては、グラウトの浸透過程は発生しないものと推定される。すなわち、アンカー工におけるグラウトの加圧注入では、グラウトの浸透によるアンカー体径の肥大効果や、それに伴った  $\tau$  の増加は期待できないものと判断される。

既往研究におけるアンカー体の掘り出し結果<sup>16)~18)</sup>においても、比較的密な土丹層や砂層では加圧注入によるアンカー体径が削孔径と同等もしくは1.1倍程度であった

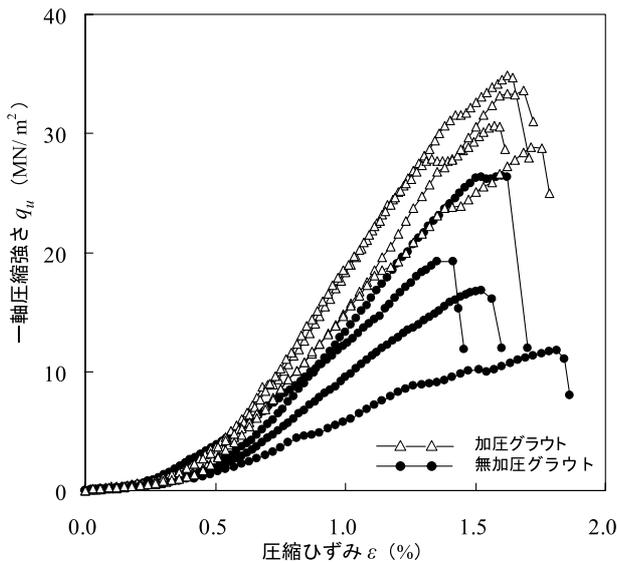


図-7 グラウトの一軸圧縮試験結果  
Fig. 7 Uniaxial compression test results of grout

報告もあり、今回の試験結果と調和的であることから、上記の解釈が自然地盤の均質部においては当てはまるものといえよう。

一方、砂礫地盤についてはアンカー体径の肥大効果が著しい報告が多くみられる。掘り出し後のアンカー体の状態<sup>19)</sup>から判断すると、加圧注入によるグラウトの浸透によるアンカー体径の肥大ではなく、削孔の影響などにより生じた孔壁の凹凸にグラウトが充填された結果と考えられる。

これらのことから、自然地盤におけるグラウトの加圧による注入過程としては、浸透過程はなく、孔壁から連続する亀裂や間隙などへの充填過程がそのほとんどであると推定される。

#### 4.2 加圧注入によるグラウトの品質向上

加圧注入し脱水が生じたグラウトについて、2日養生後の一軸圧縮強さを測定したところ、無加圧状態で打設したグラウトと比して平均値で約1.7倍高い値を示した。これは、コンクリートの加圧養生と同じく、グラウトに含まれる余分な水分を加圧注入により強制的に搾り出すことでグラウトの密度を高め、高強度化したためと考えられる。

このことから、グラウトの加圧注入は、注入過程の最後である硬化過程に対しても良好な影響を及ぼすことが確認された。すなわち、加圧注入を行うことで、より密実なアンカー体造成に寄与できるものと考えられ、これにより水密性や耐ブリージング性の向上を図ることができ、養生後のアンカー体周囲の付着力低下を抑制する効果をもつものと考えられる。

また、脱水させたグラウトの一軸圧縮強さの方が値のばらつきが少ない傾向が認められたことから、加圧注入を行うことでアンカー体のグラウトの品質を安定させる効果もあるものと思われる。

ただし、これらの効果は加圧注入によりグラウトの脱水が行われる場合のみ期待できるため、透水性の低い粘土や岩盤に対しては効果的ではないといえよう。

#### 4.3 加圧注入による $\tau$ 増加メカニズムの仮説

アンカー体周囲に発現する $\tau$ は、グラウトと地盤の付着力、地盤自体の強度、接触面の面積およびその形状に大きく影響を受けると考えられる。

今回の試験結果では、加圧によるグラウトの浸透が認められなかったことから、加圧の有無によるグラウトと地盤材間の接触面積およびその形状に差はなかったものと判断できる。また、地盤材の作製方法も同一であったことから地盤材の強度差もない。したがって、今回の試験で認められた $\tau_f$ の差は、グラウトと地盤の付着力の差である可能性が示唆される。

砂および砂礫の地盤材を用いた試験結果には、加圧の有無により $\tau_f$ に有意な差異が認められ、特に低 $\sigma_v$ 時の差が顕著であった。また、図-4~6に示す $\tau_f - \sigma_v$ 関係から、 $\tau_f$ をクーロン式により粘着力 $c$ とせん断抵抗角 $\phi$ に分解した結果、全ての地盤材において加圧供試体の $c$ 値が1.5倍以上大きい値となることが確認された(表-2)。

垂直応力の大小に依存しない強度定数である $c$ 値は、グラウトと地盤材の付着力の大きさをそのまま反映していると判断される。このことから、加圧注入の影響によりグラウトと地盤の付着力が強化され、その結果 $\tau_f$ が増加したものと推定される。

このように、加圧供試体の付着力が増加した要因としては、試験結果に有意な差異が認められた砂地盤および砂礫地盤において、顕著にみられたグラウトの脱水現象が考えられる。砂地盤におけるグラウトの加圧・脱水に伴う含水比の変化とグラウトの $q_u$ および $\rho_t$ 、せん断面の $\tau_f$  ( $\sigma_v = 50 \text{ kN/m}^2$ 時の平均値) および $c$ の関係を図-8にまとめる。

図-8より、加圧による脱水が行われたグラウトは、その密度が増加し、それに伴い一軸圧縮強さも増していることが読み取れる。また、グラウトと地盤間の付着力と評価される $c$ 値も脱水に伴う強度増加が認められ、同様な傾向であることが示されている。これらの傾向から、脱水により高密度化および高強度化したグラウトは地盤との付着力が増加し、その結果 $\tau_f$ も増加したものと判断される。したがって、グラウトの脱水現象と $\tau_f$ の増加には良好な関係性が認められた結果といえる。

以上のことから、均質地盤におけるグラウトの加圧注入による $\tau$ の増加メカニズムは、グラウトの浸透による効果はなく、グラウトの脱水現象に起因する強度増加に伴った付着力増加による部分が大きいと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では砂・砂礫・粘土の3種類のモデル地盤に対し、グラウトを加圧もしくは無加圧の状態で作製した供試体を作製し、それらについて一面せん断試験を行い、

表-2 せん断強度 $\tau_f$ からの $c$ 値  
Table 2 Cohesion from share strength

地盤材	加圧状況	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )
砂	加圧	75.9
	無加圧	41.5
砂礫	加圧	410.0
	無加圧	193.2
粘土	加圧	77.6
	無加圧	46.7

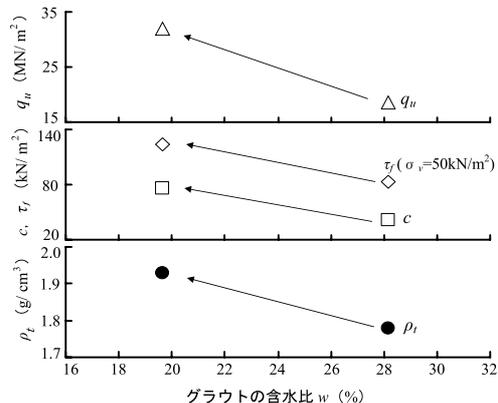


図-8 グラウトの含水比と $q_u$ ,  $c$ ,  $\tau_f$ ,  $\rho_t$ の関係(砂地盤)  
Fig. 8 Relationship of  $q_u$ ,  $c$  and  $\tau_f$ ,  $\rho_t$  versus water content of grout (sand material)

発現する摩擦応力の違いなどから加圧注入の効果および $\tau$ 増加メカニズムについて考察した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 今回の試験における地盤材全てにおいて、グラウトの加圧による浸透注入が認められなかったことから、自然地盤の均質部における加圧注入ではグラウトの浸透過程は生じ得ず、亀裂など地盤間隙の充填過程が大半を占めるものと考えられる。
- (2) 加圧注入によるグラウトの浸透過程は認められなかったものの、砂地盤と砂礫地盤の低い垂直応力時( $\sigma_v = 50\text{kN/m}^2$ )において、加圧供試体の方が約1.5倍高い $\tau_f$ の差が認められたことなどから、加圧注入によりグラウトと地盤材接触面における付着力が増加したことが示された。
- (3) また、加圧注入により $\tau_f$ に有意な差異が認められた砂地盤と砂礫地盤については、加圧に伴うグラウトの脱水現象が顕著にみられ、砂地盤については脱水による密実化の影響で、グラウトの強度が約1.7倍増加したことが確認された。
- (4) 加圧注入によりグラウトの脱水が効果的であれば、密実なアンカー体が造成され、水密性や耐ブリーディング性の向上が図れ、養生後のアンカー体周囲の付着力低下を抑制する効果があるものと判断される。
- (5) 上記(1)~(4)より、均質地盤における加圧注入による $\tau$ 増加のメカニズムは、グラウトの脱水現象に伴う密実化および強度増加に起因する付着力の増加が主要因であるものと考えられる。

今後は、地盤材の密度や加圧条件の異なる供試体についても試験を行い、加圧注入の有効性の変化を調べ、より詳細な $\tau$ 増加のメカニズムを明らかにしたい。

謝辞

本稿をまとめるにあたって、山口大学大学院理工学研究科の金折祐司教授ならびに山本哲朗教授には有益な助言をいただきました。心から感謝いたします。

引用文献

- 1) (社)日本アンカー協会 (2003)：グラウンドアンカー施工のための手引書, 22p, 150p.
- 2) (社)地盤工学会 (2000)：グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説 (JGS4101-2000), 116p.
- 3) (社)地盤工学会 (1997)：グラウンドアンカー工法の調査・設計から施工まで, 9p.
- 4) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会 (1997)：最新地盤注入工法技術総覧, 産業技術サービスセンター, pp. 40-43, pp. 104-107.
- 5) (社)土質工学会 (1976)：アース・アンカー工法-付・土質工学会アースアンカー設計・施工基準-, 210p.
- 6) 建設産業調査会 (1987)：土木・建築技術者のための最新建築基礎・地盤設計施工便覧, 1003p.
- 7) グラウンドアンカー技術協会編 (1996)：グラウンドアンカー工法設計施工指針, 森北出版, 33p.
- 8) 古賀誠・島田英樹・松井紀久男 (2001)：均質地盤に対するグラウト材の一次元注入解析-グラウチングにおけるグラウト材の浸透挙動に関する研究(第1報)-, 資源と素材, Vol. 117, pp. 209-214.
- 9) 古賀誠・島田英樹・松井紀久男 (2002)：グラウト材の模擬地盤への注入実験とろ過理論を導入した注入解析の適用性-グラウチングにおけるグラウト材の浸透挙動に関する研究(第2報)-, 資源と素材, Vol. 118, pp. 29-35.
- 10) 伊藤次郎 (1976)：数学モデル, 丸善出版, pp. 15-17.
- 11) 筒井通剛・山崎淳一・富山哲次・原郁正・稲村利男 (1992)：永久地盤アンカー工法の研究(その16. グラウト加圧力・加圧時間とアンカー耐力の関係), 日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集, pp. 1343-1344.
- 12) Potyondy, J. G. (1961)：Skin Friction between Various Soils and Construction Materials, Geotechnique, Vol. 11, No. 4, pp. 339-353.
- 13) 新城俊也・小宮康明・永吉功治・国吉真文 (2004)：砂と鋼材の摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の影響, 琉球大学農学部学術報告, 第51号, pp. 101-106.
- 14) 林鍾鉄・龍岡文夫・宮崎啓一 (1990)：砂地盤内の剛な鉛直アンカーの引抜き抵抗メカニズム, 土と基礎, Vol. 38, No. 5, pp. 33-38.
- 15) 古賀誠・笹岡孝司・島田英樹・久保田士郎・松井紀久男 (2000)：破碎性岩盤へのグラウト注入に関する基礎的研究, 第21回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp. 161-166.
- 16) 有山峰夫・平野栄・根本恒 (1990)：圧縮型本設地盤アンカー工法に関する研究(その1)-アンカーの構造概要および掘り出し結果-, 第25回土質工学会研究発表講演集, pp. 1541-1542.
- 17) 小林勝巳・西村憲義・森本敏幸 (1990)：圧縮型本設地盤アンカー工法に関する研究(その2)-引抜き試験-, 第25回土質工学会研究発表講演集, pp. 1543-1546.
- 18) 栗原和夫・斉藤顕次・小林康之・田村昌仁 (1992)：グラウト圧によるアンカー体周囲地盤の加圧状況, 土学会論文集, No. 453, pp. 145-154.
- 19) 大屋準三 (1990)：PTC本設地盤アンカー工法, 土と基礎, Vol. 38, No. 5, pp. 9-14 (口絵写真-1).

(原稿受付2008年1月7日, 原稿受理2008年6月5日)