

FRPを用いたグラウンドアンカーテンドンの セメントグラウトとの付着性状に関する研究

INVESTIGATION ON THE BOND BEHAVIOR BETWEEN GROUND ANCHOR TENDONS USED WITH FRP AND CEMENT GROUT

青柳計太郎*・山崎裕一**・丸山久一***

Keitaro AOYAGI, Yuuichi YAMASAKI AND Kyuichi MARUYAMA

* 工修 株式会社 銭高組 土木本部 (〒102 東京都千代田区一番町31)
 ** 株式会社 銭高組 技術研究所 (〒63-10 東京都新宿区西新宿3-7-1)
 *** 工修 Ph. D. 長岡技術科学大学教授 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

Permanent ground anchors currently used have to meet stringent corrosion protection requirements because of prestressing steel corrosion experience. CFRP strands have such material properties as high durability, high strength and lightweight. Ground anchors are the most feasible application field for CFRP strands. This investigation was carried out to develop permanent ground anchors with the use of CFRP strands. This research focuses on the bond behavior between CFRP strands and cement grout. Both laboratory and field test results are summarized in this paper. It is proved that CFRP strands can be applied as ground anchor tendons.

Key Words : FRP, CFRP Strands, Ground Anchor Tendons, Bond Strength

1. はじめに

近年、新しい建設素材のひとつとして繊維強化プラスチック、いわゆるFRPの土木建設分野での利用に関する研究が精力的に行われている。^{1) 2) 3)} FRPは軽量、高強度でかつ耐食性に優れた特性を持ち、21世紀に向けての注目される建設素材である。筆者らは、FRPの優れた特性を活かせる用途として法面安定用のグラウンドアンカー（以下、アンカーと呼ぶ）への適用について研究を進めてきた。

アンカー工法が我が国に導入されて既に30年以上が経過している。この間の実績と研究により、我が国においては、ほぼ確立された技術として定着している。しかし、アンカーのテンドン、定着具の腐食による損傷事例が数多く報告されており、⁴⁾ アンカーの耐久性の問題が重要な技術課題となっている。

従来から広く用いられているアンカーのテンドン、定着具は主として鋼材が使用されている。従って、適切な防食がなされなければ永久アンカーとしては使用できない。このため、現在のところは耐久性に優れた材料により、二重の防食バリアを設ける、いわゆる二重防食が一般に採用されている。⁵⁾

筆者らは、アンカーの腐食に対する抜本的な解決策として腐食しない材料、すなわちFRPをテンドンとして適

用することを提案するものである。FRPは高耐食性であることに加えて、軽量であるという優れた特長を持つ。これは法面アンカー工のように、急傾斜地での高所作業、作業スペースの狭い施工条件の場合には、施工性、並びに安全性の向上に大きなプラスとなる。

ここでは、FRPとしてCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) スtrandを使用することにした。この素材はプレストレストコンクリート (PC) 構造物の緊張材として既に実用化されており、塩害地域や海洋構造物など、厳しい腐食環境下でのコンクリート構造物の補強材として使用されている。⁶⁾ しかしながら、PC緊張材のシステムをそのままアンカーテンドンとして適用するには、実用性から見て解決すべき問題点も多く、ここに新たな技術開発が必要とされる。

本論文はCFRP Strandをアンカーテンドンの引張り材として使用するにあたって、CFRP Strandとセメントグラウトとの付着性状に関する研究をとりまとめたものである。ここでは、まずCFRP Strandを用いたアンカーテンドンの概要について述べ、続いて、CFRP Strandとセメントグラウトとの付着性状に関する室内実験の結果と試験施工での付着応力度についての計測結果について報告する。

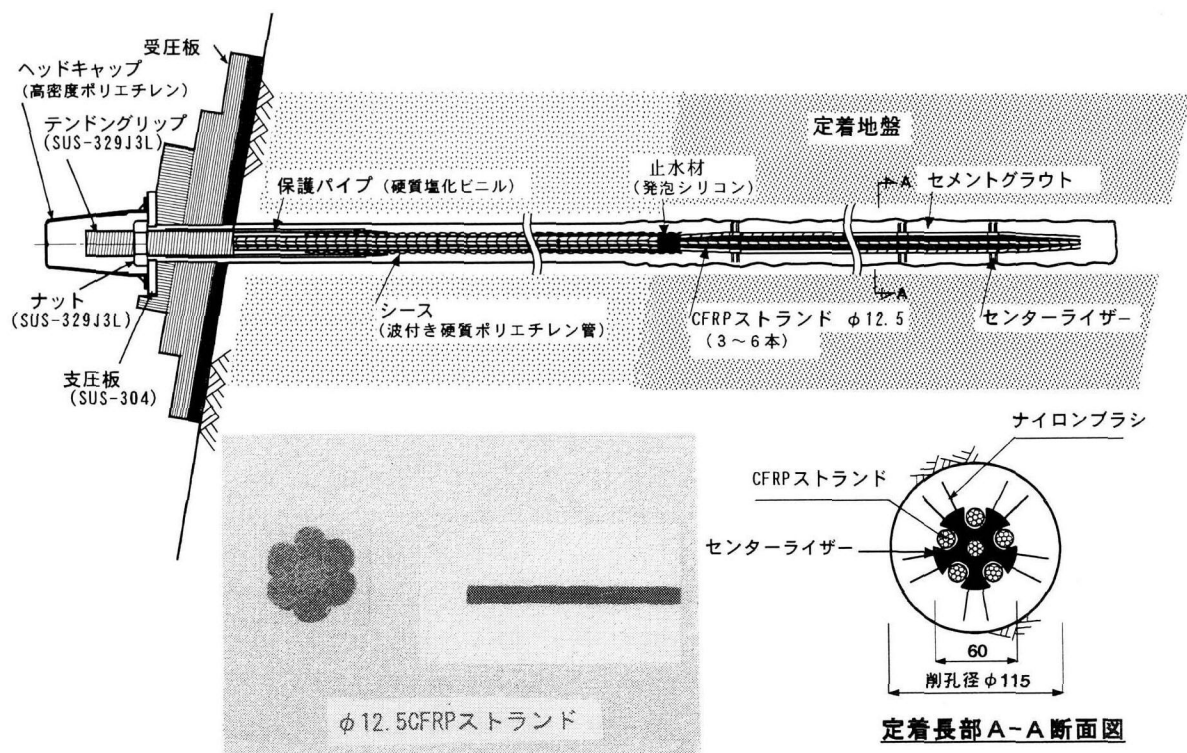


図-1 CFRPストランドを用いたグラウンドアンカー

2. FRPを適用したアンカーテンドン

2.1 テンドンの概要

テンドンとは引張り力を定着地盤に伝達するための部材である。通常はPC鋼材が用いられている。ここに、テンドンという用語は土質工学会基準「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」（平成2年）で定義されているように、引張り材を使用目的ごとに加工したものをいい、引張り材そのものと区別して用いる。

筆者らの提案するアンカーテendonは図-1に示されるようにCFRPテendonとテンドングリップにより構成されたものである。テンドングリップとは、ここではCFRPストランドを緊張定着する部分をいう。テンドングリップには高強度、高耐食性の二相系ステンレス鋼管（SUS 329J3L）を使用し、この鋼管の中に定着用膨張材を充填して、CFRPストランドと一体化する。このように本テendonにはFRP以外にも新しい材料を取り入れていることも特徴としてあげられる。テンドングリップの外表面はネジ切り加工し、二相系ステンレス鋼ナットにより定着する。

引張り材は同図に示されるφ12.5CFRPストランドを3～6本用いるマルチストランドとしている。CFRPストランドはクリープ、レラクセーション率が小さく、引張り材としての適用性が高い。また、φ12.5のタイプは現在、生産量が最も多く、経済的に有利なものである。

テendonの引張り力はセメントグラウトを介して定着地盤に伝達される、いわゆる引張り型アンカーである。

施工に関しては、本テendonを用いても従来の施工法、

施工手順が変わることはない。

2.2 FRPを適用することによる効果

図-1に示されるように、本テendonは防錆対策が一切不要になることから、アンカーの構造が非常にシンプルになる。この結果、次のような効果が得られる。

- ①標準削孔径はφ115mmと小さくてよく、削孔費が低減される。
- ②定着長部でのグラウトの充填性が良くなり、グラウトに対する信頼性が向上する。
- ③テendonの組立加工の手間が少なくなり、またFRPの軽量性により作業効率が向上する。
- ④定着具に防錆対策がないため、再緊張、応力緩和等の処理、及び維持管理が容易になる。

3 CFRPストランドとセメントグラウトとの付着特性に関する研究

3.1 研究の目的

本アンカーはCFRPストランドを引張り材とした引張り型アンカーである。このため力の伝達機構上CFRPストランドとセメントグラウトとの付着特性の解明が重要となる。一般に、アンカーにおけるグラウト工は目視確認ができないため、付着性状に優れた引張材が望まれる。

CFRPストランドは、弾性係数がPC鋼材の2/3と低いことや、ストランド表面がビニル繊維によりラッピング処理されていることなどから、従来から用いられているPCストランドとは異なった付着性状を示すものと考えられる。

表-1 グラウトの配合

目標強度 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)	単位水量 W (kgf/m ³)	単位セメント量 C (kgf/m ³)	混和剤 (kgf/m ³)	試験時 圧縮強度 (kgf/cm ²)
300	55	621.6	1130.2	22.6	398
500	40	544.3	1360.8	27.2	570

表-2 CFRPストランドの規格値

公称径 (cm)	断面積 (cm ²)	周長 (cm)	規格引張 荷重 (kgf)	平均破断 荷重 (kgf)	弾性係数 (kgf/cm ²)	破断時伸び (%)
1.25	0.76	3.93	14,500	16,400	1.4×10^6	1.6

表-3 PCストランドの品質

呼び名	断面積 (mm ²)	引張荷重 (kgf)	降伏荷重 (kgf)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び (%)	レラクセ ション (%)
7本より 12.7mm	98.71	18700 以上	15900 以上	2.1×10^6	3.5 以上	3.0 以上

既往の研究によれば、CFRPストランドとコンクリートとの付着についての報告は見られるが、⁷⁾ アンカーへの適用を目的とし、セメントグラウトとの付着特性についての研究はみられない。

そこで、本試験ではCFRPストランドとセメントグラウトとの付着特性に関して、①PCストランドとCFRPストランドの付着性状の差異 ②セメントグラウトの圧縮強度がCFRPストランドの付着強度の与える影響 ③マルチCFRPストランドの付着性状を明らかにすることを目的とした。

3.2 試験方法

(1) 試験体

PCストランドとCFRPストランドの付着性状の差異を検討するために、それぞれのストランド1本について引抜き試験を行った。引抜き試験法は日本コンクリート工学協会引抜き試験法(案)に準拠した。試験体はセメントグラウトにより、図-2に示すように一辺の長さH=130mmと150mmとした立方体である。この時のセメントグラウトの配合を表-1に示す。付着長LはL=50, 100, 150mmの場合について試験を行った。表-4にそれぞれの付着長についての試験体数を示す。なお、表中の()の数値はグラウトの水・セメント比W/C=40%とした試験体数である。PCストランドはアンカー引張り材として一般に用いられている7本より線φ12.7を使用した。CFRPストランドは7本より線φ12.5である。それぞれの品質を表-2、表-3に示す。試験体はセメントグラウトの割裂による影響を小さくするためにスパイラル筋により補強した。

6本マルチCFRPストランドの引抜き試験体を図-3に示す。1辺1000mmの立方体をセメントグラウトにより製作した。この試験体は中央部150mmの部分のみを付着し、その他の部分はアンボンドとした。6本のCFRPストランドはナイロン製のスペーサーにより、ストランド相互は11mmのあきが確保されている。この試験体数は2体である。さらに、同じ形状・寸法でアンボンド部分をなくし、1000mm全長を付着とした試験体を1体製作した。この試験体により、6本マルチストランドテンドンがグラウトに定着された時

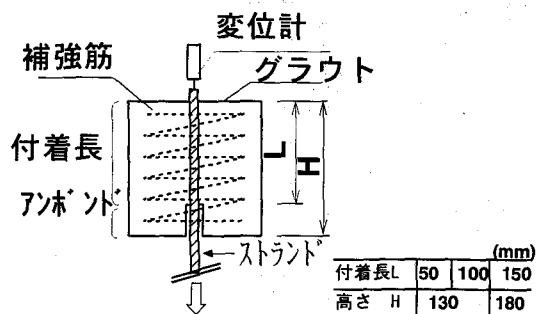


図-2 ストランド1本についての引抜き試験体

表-4 付着長と試験体数

種類	CFRPストランド			PCストランド		
付着長(mm)	50	100	150	50	100	150
試験体数	3	6 (6)	3	3	6	3

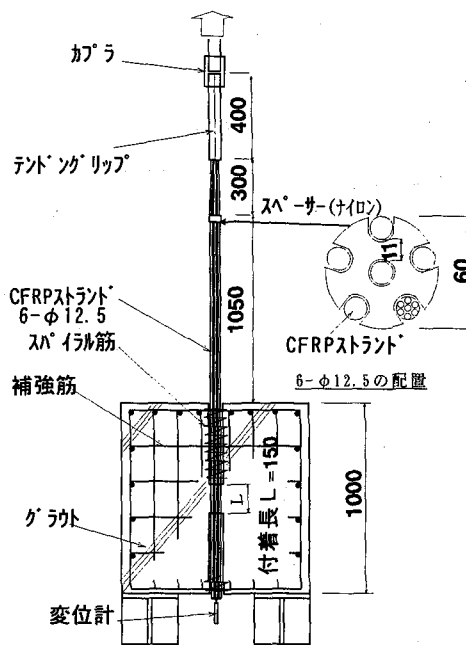


図-3 6本マルチの引抜き試験体の形状・寸法の破断強度と付着応力度の性状について検討した。6本マルチの試験体3体のグラウトの配合は水・セメント比W/C=55%である。なお、これらの試験体には外観上大きなひび割れは見られなかった。

(2) 引抜き試験法

ストランド1本についての引抜き試験装置を図-4に示す。鋼製フレームを組み、上部ビームに試験体をセットし、下部ビームのセンターホールジャッキにより加力した。荷重は単調に増加させストランドが引抜けるまで載荷した。その時の上端の変位を変位計により測定した。変位計のストロークは11mmである。

6本マルチストランドの引抜き試験装置を図-5に示す。鋼製反力フレームに試験体をセットし、上部の200トンセンターホールジャッキにより加力した。この時の下部自

図-4 スtrand 1本の引抜き試験装置

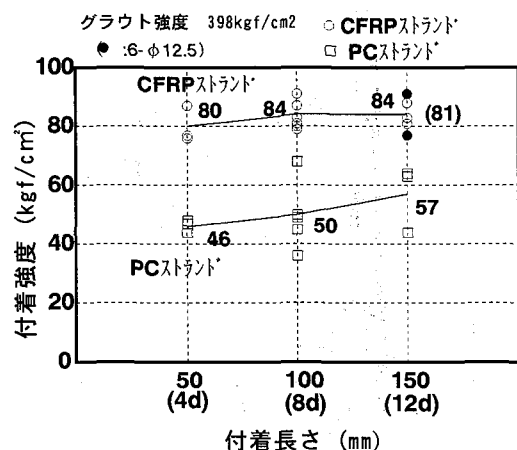


図-6 付着強度と付着長の関係

由端の変位を変位計により測定した。計測したストランドは中央とその他2本のストランドのすべり量を測定した。また、1000mm全長を付着とした試験体の引抜き試験もこれと同じ装置により載荷した。この時の測定項目は自由端の変位と付着部分でのCFRPストランドのひずみである。ひずみ計の貼付位置は図-5に示すように深さ方向に4等分した位置である。

3.3 試験結果と考察

CFRPストランドとPCストランドのそれぞれ1本についての引抜き試験結果を図-6に示す。ここに、付着強度とは引抜き荷重の最大値を付着面積で除した値である。なお、CFRPストランドとPCストランドの周長 L は、それぞれ $L=1.25 \times \pi$ (cm)、 $L=1.27 \times \pi$ (cm)として算定した。同図に記された数値は付着長さごとの付着強度の平均値を示している。この平均値で両者を比較するとCFRPストランドの付着強度はPCストランドに比べて、1.4倍以上の強度を

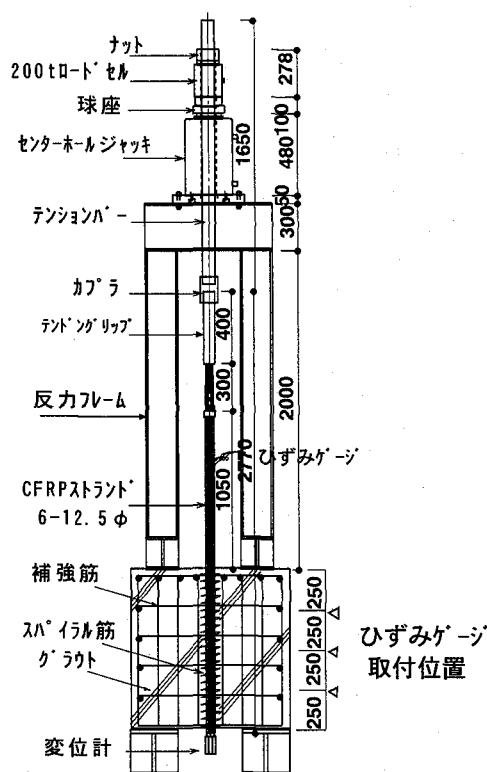


図-5 マルチストランドの引抜き試験装置

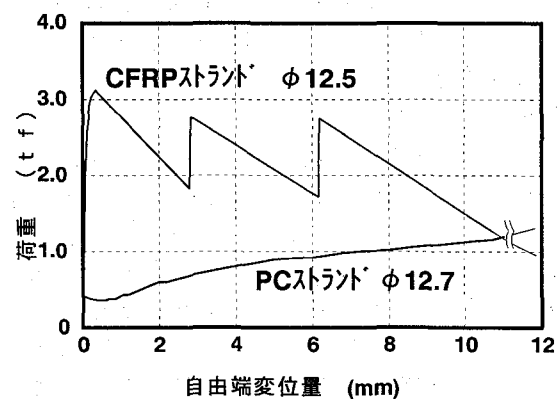


図-7 荷重と自由端変位量の関係

示している。また、CFRPストランドは本試験での付着長の範囲では 80kgf/cm^2 程度のほぼ一定した強度を示した

図-7に付着長150mmとした試験体のCFRPストランドとPCストランドの荷重と自由端の変位の関係を示す。PCストランドは付着強度のばらつきが大きく、付着長が大きくなると強度が大きくなる傾向が見られる。これはPCストランドのすべりが大きく、最大荷重に達したときの付着長のばらつきが大きいことによるものと考えられる。

付着長を150mmとした6本マルチの試験結果も同図にプロットした。この実験値は付着面積を1本の時の6倍として求めたものである。同図の()の値81kgf/cm²は2体の平均値を示しており、ストランド1本の時とほぼ同じ値を示している。この結果から、試験に用いたスパーサーによって、グラウトとの付着長として6本すべてのストランドの周長が有効であると考えることができる。

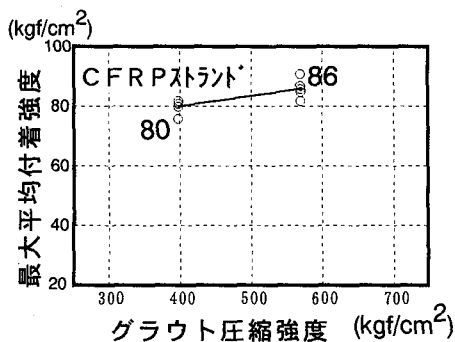


図-8 付着強度とグラウト強度の関係

自由端変位量は変位計の最大ストロークである11mmまでを示している。同図に示されるように、CFRPストランドは0.2~0.4mmで最大値を示し、最大値に達した後は鋸の歯のような形状を示した。これはCFRPストランドの表面の摩擦が大きく、表面の凹凸の影響によるものと考えられる。一方、PCストランドはセメントグラウトとの接着が切れた後はストランドが回転しながら引抜けていき、変位計の最大ストロークの11mmを越えてピーク値に達し、大きな変位を生じている。この試験結果からCFRPストランドとPCストランドの付着性状の差が顕著に表れている。

図-8にグラウト強度と付着強度の関係を示す。試験時のグラウト強度は398kgf/cm²と570kgf/cm²である。この結果からCFRPストランドの付着強度はグラウト強度の増大とともに高くなっていることが示されている。

図-9にグラウトに定着した場合の荷重と自由端の変位量の関係を示す。図-10にCFRPストランドの自由長部の応力とひずみの関係を示す。6本マルチCFRPストランドは最大引張荷重 $P_u=93.9\text{tf}$ で破断した。CFRPストランドの品質規格によれば、CFRPストランド1本の破断荷重の平均値は16.4tfである。6本マルチの場合には破断荷重 $P_u=98.4\text{tf}$ 程度と推定される。試験荷重はこの値の95%に達しており、CFRPストランドがほぼ均等に近い荷重を負担すること示している。グラウト定着になればCFRPストランドのそれぞれの抜け出しがあり、荷重の負担が均等化するものと考えられる。自由端変位量はストランド1本とした小さな試験体の結果とほぼ同様の性状を示している。ここに、マルチタイプ試験体の試験時でのグラウト強度はいずれも324kgf/cm²であった。

図-11に定着長部のひずみと局部付着応力度を示すここに、局部付着応力度は(3.1)式から算定した値である。

この結果からCFRPストランドとセメントグラウトとの付着応力度の分布は引張り荷重が40tf程度までは弾性的な挙動を示し、付着応力度の分布性状は一般の鋼材の場合と同様の傾向を示している。50tfを越えると部分的に塑性域が発生し、最大付着応力度の発生位置が深部へ移って行くことが示されている。

$$\tau = \frac{AE(\epsilon_i - \epsilon_{i-1})}{\phi \Delta l} \quad (3.1)$$

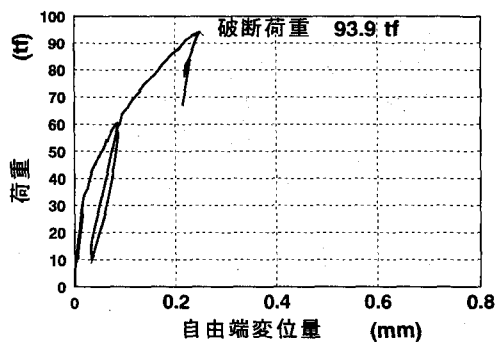


図-9 荷重と自由端変位の関係

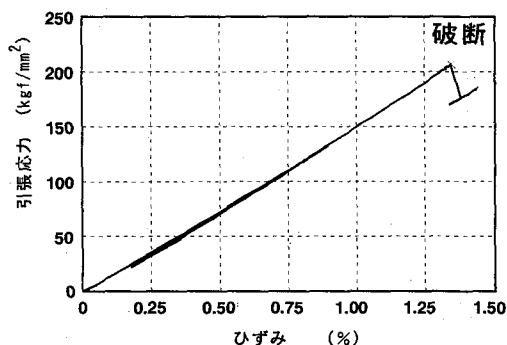


図-10 自由長部の応力とひずみの関係

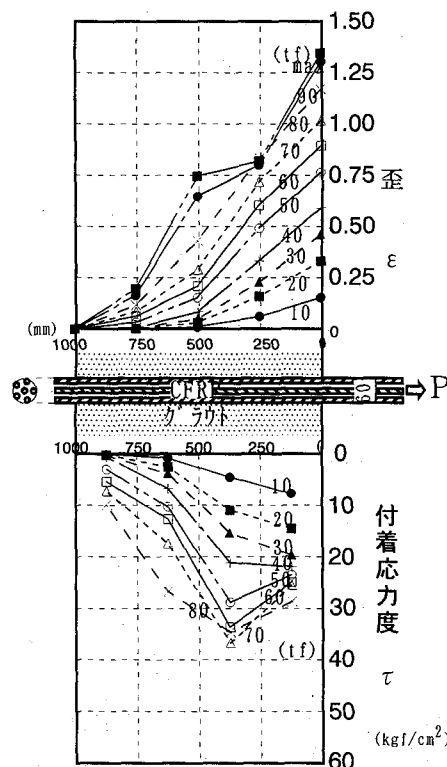


図-11 定着部のひずみ測定値と付着応力度の分布

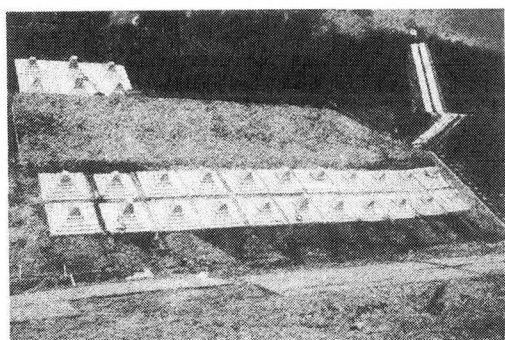


図-12 試験施工法面

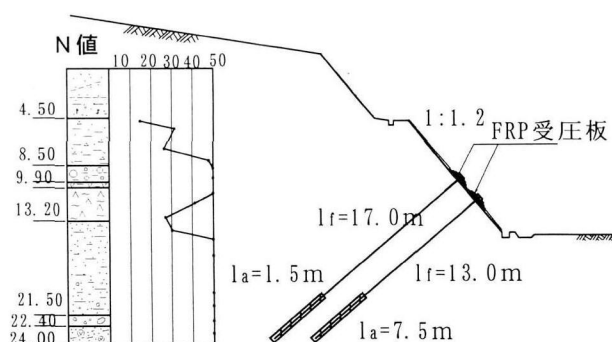


図-14 アンカーの寸法

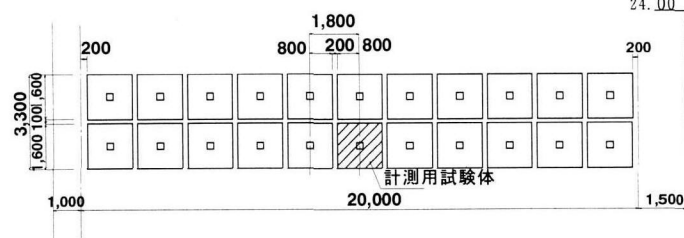


図-13 試験アンカーの配置

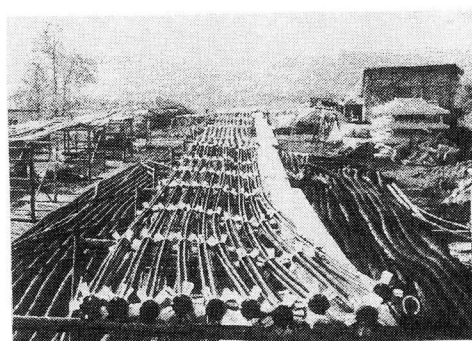


図-15 アンカーテンドン

(2) グラウンドアンカーの施工

本アンカーの施工手順は従来のアンカー工法に準じるものである。テンダンの緊張定着体は工場で作成し、直径2mのコイル巻きにして現場に搬入した。現場でシース、センターライザー、スパーサーなどの補助材料を取り付けた。図-15に組立の完了したテンダンを示す。

本アンカーの施工上の特徴はシース内に泥水を注入することである。これはCFRPストランドを用いることによりテンダンの重量が軽くなり、グラウトの充填された削孔に挿入する時に浮力抵抗を受ける。このためテンダンの重量を泥水で付加することにより挿入を容易にしている。図-16に泥水の注入状況を示す。図-17にテンダンの挿入状況を示す。

4.3 載荷試験

本グラウンドアンカーの性能を確認するために載荷試験を実施した。載荷試験アンカーを図-13に斜線で示す。載荷は図-19に示すように荷重を保持しながら段階的に増大させた。最大荷重は設計荷重 $T_d=50tf$ の1.2倍とした。最大荷重に達した後は一度荷重を除荷し、 $40tf$ で定着した。

計測項目はアンカー頭部の変位とCFRPストランドのひずみである。図-18にひずみ計の貼付位置を示す。図-19にアンカー頭部での載荷方法と変位計の位置を示す。

この試験体は緊張定着後、ロードセルにより緊張力の長

ここに

- τ : 局部付着応力度 (kgf/cm²)
- ε_i : i点におけるひずみの測定値
- A : CFRPストランドの断面積 (cm²)
- E : " 弾性係数 (1.3×10^6 kgf/cm²)
- ϕ : " 周長 (cm)
- Δl : ひずみゲージ間隔 (25cm)

4. 試験施工

4.1 はじめに

CFRPストランドを用いたアンカーテンドンの施工性と構造性能を確認するために、実際の法面アンカー工において試験施工が行われた。ここではCFRPストランドの付着性状に関する試験結果について報告する。

4.2 試験アンカーの概要と施工

(1) 試験アンカーの概要

施工場所は北海道の洞爺湖に近く、地盤は火山噴出物が堆積した地盤である。試験施工の法面を図-12に示す。この法面の地すべり対策工としてグラウンドアンカーが採用された。図-13に示すように試験アンカーは上、下段にそれぞれ11本ずつ打設した。

図-14にグラウンドアンカーの寸法を示す。アンカーの削孔径は $\phi 115$ mm、アンカーの定着長 $l_a=7.5$ m、自由長は上段アンカーが $l_f=17.0$ m 下段アンカーは $l_f=13.0$ mである。アンカーテendonは6本マルチタイプである。アンカー頭部の定着はナット方式で定着用の支圧板は $250 \times 250 \times 25$ のステンレス鋼を用いた。設計アンカー力は $50tf$ 、初期定着力は設計アンカー力の80%である。グラウトは普通セメントを用い、水セメント比 $W/C=55\%$ 、目標強度は 300kgf/cm^2 である。アンカー力を地盤に伝達するための受圧板はFRP受圧板を用いた

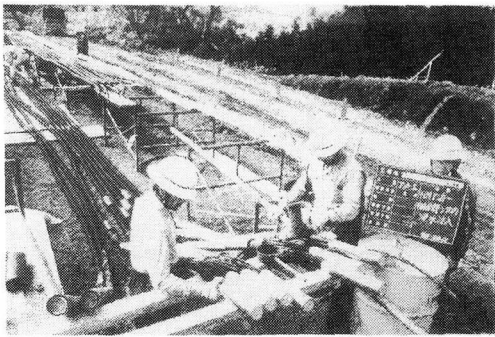


図-16 泥水注入状況

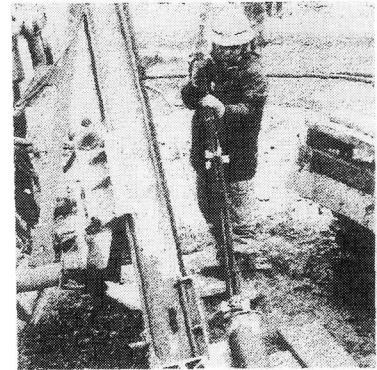


図-17 テンドンの挿入

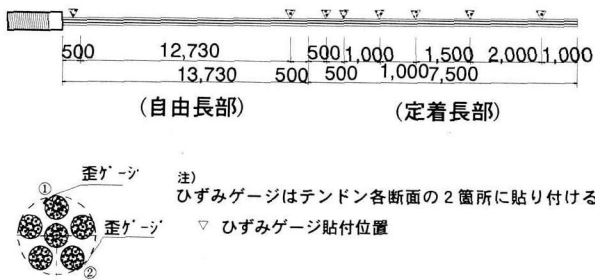


図-18 ひずみゲージ貼付位置

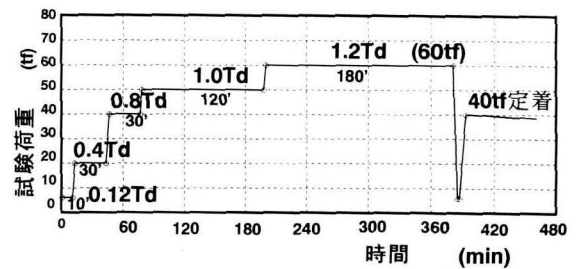


図-19 載荷パターン

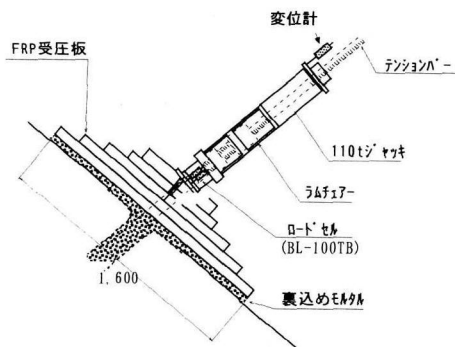


図-20 アンカー頭部

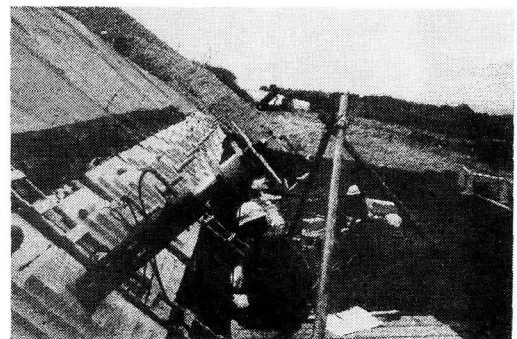


図-21 試験状況

期観測を行った。

4.4 試験結果と考察

図-22に荷重とアンカー頭部における変位の関係を示す。同図に点線で示される直線はアンカー頭部の変位をCFRPストランドの自由長の弾性伸び量として計算したものである。計算値と測定値は良く一致している。

荷重を保持した時のクリープ変位量は増分荷重20tfとした時の20tf、40tfのレベルで約1mm、増分荷重10tfとして50tf、60tfで約5mmであった。さらに初期荷重まで除荷した時の残留変位量は約12mmであった。このクリープ変位は表層地盤の沈下、グラウトと定着地盤との界面でのクリープ、グラウト自体のクリープ等によるものであると考えられる。

CFRPストランドの各荷重ごとのひずみ分布を図-23に示す。試験荷重40tfを越えると一部のひずみゲージが損傷

したため、一部データが得られなかった。また、この時のひずみ差分より求めた定着長部の付着応力度分布を図-24に示す。

図-23より自由長部上部と下部のひずみに大きな差は認められず自由長部のシース内での摩擦損失も、注入した泥水の影響もほとんどないことが確認された。

定着長部のひずみ分布の形状は室内試験での結果と同様の傾向を示している。しかし、緊張力の伝達長は約3mで室内試験に比べて3倍以上増大している。施工上、CFRPストランド界面への付着物や地盤の拘束等の影響により伝達長が長くなると考えられる。

荷重を保持した状態でのひずみは全く変化なく、CFRPストランドとグラウト界面でのクリープは見られなかった。

図-25に緊張定着後、540日間のアンカー力の経時変化を

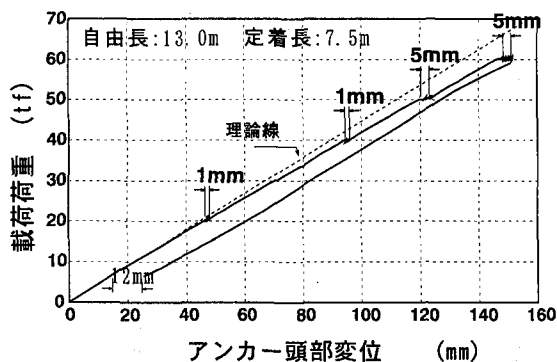


図-22 荷重とアンカー頭部変位の関係

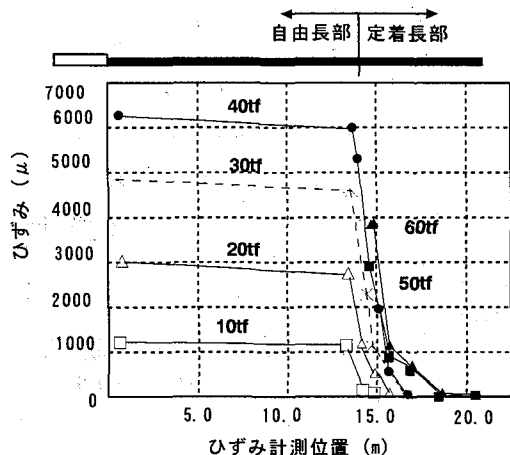


図-23 CFRPストランドのひずみの測定値

示す。施工場所が寒冷地であることから、冬季に地盤の凍上によりアンカー力が大きくなることが示されている。計測された期間においてはクリープによるアンカー力の減少は見られず、安定した値を保持している。

5. おわりに

CFRPストランドを用いたグラウンドアンカーテンドンのセメントグラウトとの付着性状に関する試験結果について報告した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- ①CFRPストランドはPCストランドより付着強度は大きい。
- ②CFRPストランドのすべり剛性はPCストランドより大きい
- ③グラウト強度が高いほどCFRPストランドの付着強度は高くなる。
- ④CFRPマルチストランドの付着強度は適切なスペーサーを用いることにより、1本ごとの付着強度を発揮することができる。
- ⑤実アンカー定着長部の付着応力の分布形状は室内試験と同様の傾向を示した。
- ⑥CFRPストランドとグラウトとの付着伝達長は実アンカーでは3mであった。

FRPを用いたグラウンドアンカーはFRPの優れた特性、

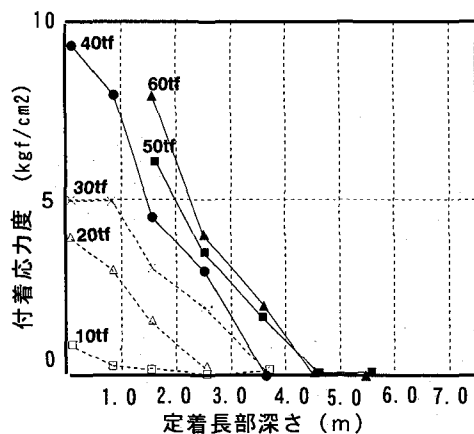


図-24 定着長部での付着応力度

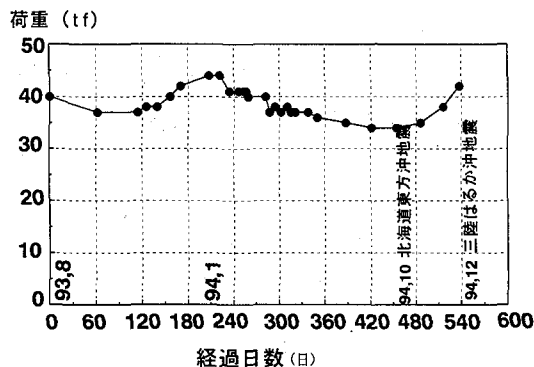


図-25 緊張力の経時変化

すなわち高強度、高耐食性、軽量性を活かせる分野として着実にその実績を伸ばしている。今後、この分野における新たな技術課題としては、火山地、温泉地等の強酸性土壌への適用がある。その際にはグラウト材は従来のセメント系に替わる新たなグラウト材、例えば樹脂系グラウトなどの新しいグラウト材の開発が必要とされる。このグラウト材の開発によりグラウンドアンカーにおいて新たな展開が期待できる。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、平成4年4月
- 2) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリ-72
- 3) EL-Badry編：ADVANCED COMPOSITE MATERIALS IN BRIDGES AND STRUCTURES、1996、8
- 4) F I P：CORROSION AND PROTECTION OF PRESTRESSED GROUND ANCHORAGES、1986、8
- 5) 土質工学会：グラウンドアンカー設計施工基準、同解説、平成2年
- 6) 土木学会：連続繊維を用いたコンクリート構造物の設計施工指針（案）、コンクリートライブラリ-88、平成8年9月
- 7) 本間、丸山、榎本、島：CFCCの付着応力一すべりに関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1991

(1997年 9月26日受付)