

アンカー自由長部周面摩擦が締付け力に及ぼす影響

Effect of surface friction around the free anchor length on clamping force

片山直樹^{a) b) *}

Naoki KATAYAMA

Abstract

In ground anchors employed to prevent landslides, grout injected into and filling the free anchor length result in the peripheral surface also adhering to the ground. On this account, a structure is realized whereby the frictional resistance of the peripheral surface is expressed along the entire length of the anchor. The frictional resistance of the peripheral surface in the free anchor length is not considered in the process of anchor design, but research has shown that the proportion borne by this frictional resistance is relatively large. For this reason, when the anchor is under tension, it is thought that upward stress is transmitted to the ground via frictional resistance in the peripheral surface of the free anchor length. This interferes with the downward stress of the reaction plate - in other words the clamping force - and it has been pointed out that there is a possibility that the clamping effect, which is one of the effects that the anchor suppresses landslides, is thereby diminished. This research used full-scale anchor experiments, experiments with models, and numerical experiments to compare the in-ground stress accompanying tension in two anchor types (one with frictional resistance along the peripheral surface of the free anchor length and one without). The findings for the anchor with frictional resistance along the peripheral surface of the free anchor length indicated that the clamping force was reduced and transmitted relatively deeper. From this fact, frictional resistance along the peripheral surface of the free anchor length is presumed to be a factor that hinders transmission of the clamping force.

Key words : ground anchor, free anchor length, surface friction resistance, in-ground stress, clamping force

和文要旨

地すべり対策として用いられるグラウンドアンカーでは、自由長部になされるグラウトの充填注入により、その周面も地盤と付着するため、アンカー全長にわたり周面摩擦抵抗が発現する構造となる。アンカー設計上は、自由長部の周面摩擦抵抗は考慮していないが、その摩擦抵抗が負担する割合は比較的大きいことがこれまでの研究で示されている。このため、アンカー緊張時には自由長部の周面摩擦抵抗を介し、上向きの応力が地盤に伝達されるものと思われ、これが受圧板による下向きの応力、すなわち締付け力と干渉することで、アンカーの地すべり抑止効果の一つである締付け効果が低減される可能性が指摘される。そこで本研究では、アンカーの実大実験、模型実験および数値実験により、自由長部の周面摩擦抵抗の有無による2種類のアンカーについて、緊張に伴う地盤内応力を比較した。その結果、自由長部の周面摩擦抵抗が存在するアンカーは、相対的に締付け力が低減され深部に伝達することが示された。このことから自由長部の周面摩擦抵抗は、締付け力の伝達を阻害する要因となるものと推定した。

キーワード : グラウンドアンカー, アンカー自由長, 周面摩擦抵抗, 地盤内応力, 締付け力

1. はじめに

地すべり対策工としてのグラウンドアンカー（以下、アンカーとする）は、大別してアンカー頭部、引っ張り部（自由長部）、アンカー体部の3つの基本要素に分けられる。このうち自由長部には、防食機能の増加と孔壁周辺地盤の緩み防止を主な目的としたグラウトの充填注入が行われる¹⁾。これにより、アンカー体部と自由長部には一連のグラウトによる柱体が形成され、アンカー全長にわたり周面が地盤と付着することになる。

一般的な施工では、アンカー体部でのグラウトの加圧注入と自由長部での充填注入は連続的に行われるため、アンカー頭部の緊張時にはアンカー体のみならず自由長部においても周面摩擦抵抗が発現することは明らかである。

一方、アンカー体の周面摩擦抵抗（以下、 τ_A とする）を最終的に決定する際に引抜き試験を行うが、この場合、自由長部のグラウトの充填注入は実施しない¹⁾。このた

め、アンカー設計時には、引抜き試験結果による τ_A から必要なアンカー体長・径が決定され、自由長部に発現する周面摩擦抵抗（以下、 τ_F とする）は設計上考慮されていないのが現状である。

しかしながら、実際的には τ_F がアンカー緊張力に対し抵抗力として働いていることは十分に考えられることから、 τ_F はアンカー引抜きに対する安全率的な役割を担っており、引抜き事故が予防されている可能性もある。

自由長部周面に発現する τ_F は、周辺地盤の状態にもよるが、決して小さくはないことがこれまでの研究によって報告されている。アンカー打設地盤の周辺を掘削し、アンカーへの影響を調査した研究²⁾によると、アンカー体部を完全に露出させた場合でも、完全な引抜けには至らず、緊張力の約半分（384.2kN）を τ_F が負担していることが示されている。また、アンカーの引張材であるテンドンからグラウトへの応力伝達機構に関する研究³⁾では、自由長部グラウト内に大きな圧縮ひずみが発生していることから、自由長部周面にも比較的高い周面摩擦抵抗が発現していることが示されている。

一方、アンカー引抜き時の周面摩擦抵抗に関する模型実験⁴⁾においても、自由長部でもアンカー体部と同じよ

* 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

うに周面摩擦抵抗が作用していることが確認されている。

これらのアンカーの実大実験および模型実験により、自由長部にも周面摩擦抵抗が発現することや、その負担割合が比較的大きいことが明らかにされている。

ここで、受圧板に比較的近い自由長部においても周面摩擦抵抗が発現することによる、アンカー機能上の問題点が指摘される。アンカー緊張時の地盤内部には、周面摩擦抵抗により周辺地盤に伝達される上向きの応力と、受圧板から伝達される下向きの応力が発生する。このとき、受圧板に近い位置、すなわち自由長部において τ_F による上向きの応力伝達が周辺地盤になされた場合、受圧板からの締付け力が地盤深部へ伝達されるのを阻害される恐れがある。また、 τ_F の存在により、受圧板の締付け力を期待する上で必要な、周辺地盤の適正な変位が生じ難くなる可能性も考えられる。つまり、受圧板の締付けに伴う地盤の変位が τ_F により妨げられ、締付け力はアンカーグラウトを下に押し込む作用に変換される可能性が示唆される。これは、基礎杭の周辺地盤沈下に伴うネガティブフリクションと同じメカニズムの問題と考えられる。

しかしながら、このような τ_F がアンカーの効果に及ぼす影響についてはほとんど注目されておらず、現状ではアンカーの設計にも考慮されていない。

現行のアンカー設計では、アンカー力の100%がすべり面に作用する前提に立ち、「締付け効果」と「引止め効果」の2つの概念が考慮されている。このうち「締付け効果」はすべり面に対する垂直力を増大させ、せん断抵抗力を増加させる概念であるため、設計アンカー力を左右する要因となり、その評価についてはよりの確性が求められる。しかし、受圧板から伝達されるアンカー力が地盤内部で分散し、すべり面へ伝わる応力度が減少することは明らかであり、設計思想と実際現象の乖離が指摘されている⁵⁾。このため、最近では模型実験や有限要素法（以下、FEMとする）などを利用した数値実験による研究^{6)~8)}がなされているが、これらにおいても τ_F の影響を考慮したものは認められない。

そこで本研究では、 τ_F が締付け力に及ぼす影響を評価することを目的とし、実地盤に打設した実大アンカーと、2種類のモデル地盤を対象とした模型アンカーについて、自由長部に周面摩擦抵抗がある場合と無い場合の2種類のアンカーを緊張した際の地盤内部のひずみ分布を測定し、応力伝達状況を比較した。さらに、FEMによる数値実験も行い、これらの実験結果から、 τ_F がアンカーの地すべり抑止効果の一つである締付け効果へ及ぼす影響を考察した。なお、本論文では応力の圧縮側を正としている。

2. アンカー実大実験

2.1 実験概要

アンカー実大実験では、自由長部にグラウトの充填注

入を行ったものと、充填注入を行わないものの2種類の実大アンカーを地盤に打設し、アンカー緊張時のテンドン拘束具、グラウト、地盤内部のひずみ測定を行った。図-1に実験概要を示す。

実験地は、新第三系の泥岩が分布する地区であり、同質岩による盛土(N=4~10程度)が上位を5m程度覆っている箇所である。また、泥岩層は上位5m程度までは風化帯(N=20~40程度)が分布する。泥岩は全体的に塊状無層質な状態であり、概ね均質な地盤状態である。なお、地表面からGL-10m付近より現れる泥岩新鮮部(N \geq 50)においてアンカー引抜き試験を行った結果、 $\tau_A = 0.50\text{MN/m}^2$ の結果を得た。

2.2 実験方法

2.2.1 アンカーの打設

アンカーの打設方向は鉛直下向きとし、充填注入の有無により2種類のアンカーを打設した。以下、充填注入を行わないアンカーをCase-1、充填注入を行うアンカーをCase-2とする。

実験に供するアンカーは摩擦圧縮型アンカーを用い、アンカー自由長10.0m、アンカー体長3.0mとした。

削孔はロータリーパーカッション式削孔機を使用し、削孔径 $\phi 115\text{mm}$ とした。削孔後、入念な孔内洗浄を行い、テンドン挿入およびグラウト（普通セメントW/C=50%）の注入を行った。

アンカー体部にはケーシング加圧による加圧注入を行った。より確実なアンカー体造成のために、アンカー

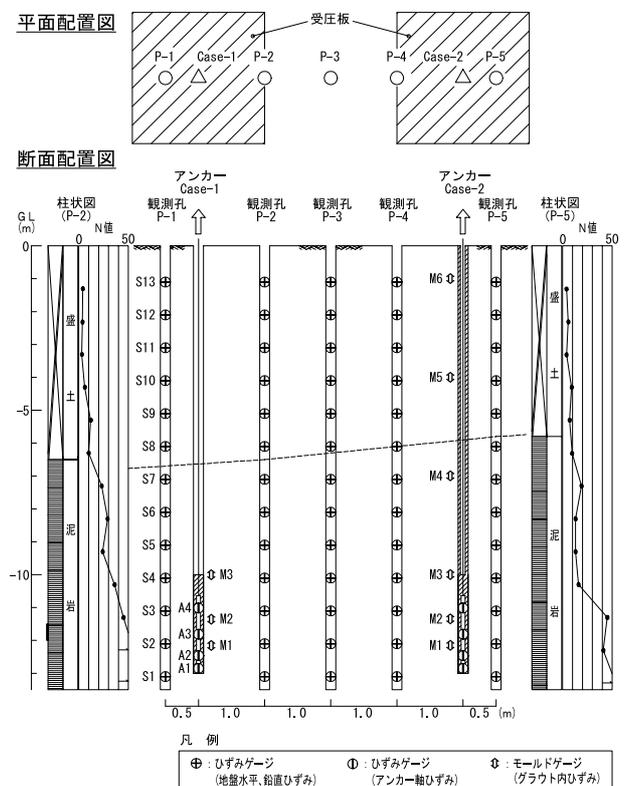


図-1 アンカー実大実験概要図
Fig.1 Experiment summary by the full-scale anchor

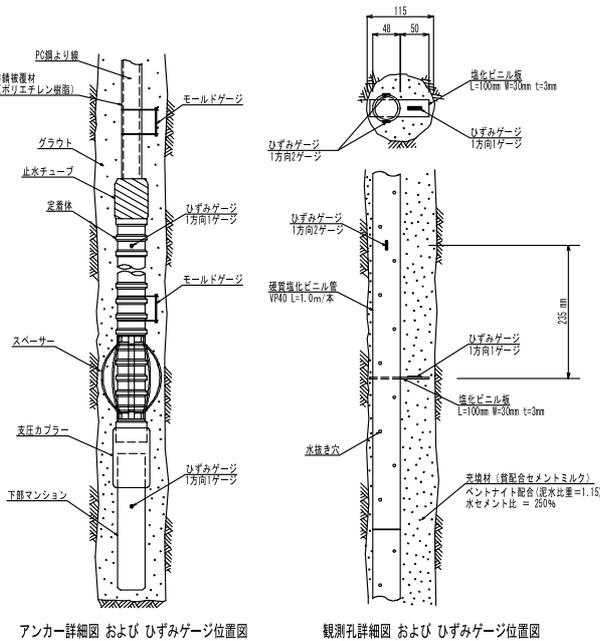


図-2 ひずみゲージ設置箇所詳細図
Fig. 2 Detail of the setting points of strain gauges

体長3.0mに対し、1.5m毎に2回に分けて加圧注入を行っている。その後、充填注入を行い、Case-1のアンカーについては自由長部のグラウトを排出し、自由長部周面に摩擦抵抗が生じない構造とした。

なお、このアンカーの極限引抜き力 (T_{lg}) は541.7kN、テンドンの降伏点荷重 (T_{ys}) は608kNである。

2.2.2 ひずみゲージの設置

地盤内部のひずみ測定は、地すべり調査で一般的に用いられるパイプ式ひずみ計を用い、アンカーの緊張に伴う地盤の水平方向へのひずみを測定した。また、ひずみゲージを貼付した塩化ビニル板 (長さ100mm、幅30mm、厚さ3mm) をパイプ式ひずみ計に取り付け、地盤の鉛直方向のひずみも測定できる構造とした。

観測孔の周囲はベントナイトを配合した貧配合のセメントミルク (一軸圧縮強さ $q_u \approx 1 \text{ MN/m}^2$) で充填し、周囲の地盤との力学的強度の連続性をもたせるように努めた。

アンカーには、テンドン拘束具に4箇所ひずみゲージを貼付し、拘束具の軸ひずみを測定した。また、アンカー体および自由長部のグラウト充填部分にはモールドゲージを配置し、グラウト内に発生するひずみを測定した。

各ひずみゲージの設置位置については前出図-1に示し、設置箇所の詳細を図-2に示す。

2.2.3 実験方法

打設した2種類のアンカーについて多サイクル確認試験を行い、各荷重段階におけるアンカーおよび周辺地盤に設置したひずみゲージのひずみを測定した。

多サイクル確認試験は初期荷重を50kNとし、計画最大荷重である500kNまでを6サイクルとした。各サイクルでの新規荷重は100kN、160kN、230kN、310kN、400

kN、500kNである。また、荷重保持時間は新規荷重段階で10分間、履歴荷重段階で2分間を標準とした。

ひずみの測定は、各荷重段階における荷重保持時間の開始と終わりで測定した。ただし、結果比較に用いるひずみは、各サイクルにおける新規荷重10分保持後の値を用いている。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 地盤内部のひずみ分布

各載荷段階における地盤内部のひずみ分布状況を図-3および図-4に示す。図-3はパイプ式ひずみ計に貼付したひずみゲージから測定した地盤応力の水平成分によるひずみ (以下、 ϵ_x とする) を示し、図-4は塩化ビニル板に貼付したひずみゲージから測定した地盤応力の鉛直成分によるひずみ (以下、 ϵ_z とする) を示したものである。

なお、 ϵ_x はアンカーを基準軸とし、外側へ向かう方向を圧縮方向、内側へ向かう方向を引張方向とした。

(1) ひずみの水平成分 ϵ_x

Case-1では全体的に地表面付近で荷重増加に伴うひずみの累積増加が認められた。観測孔P-1、P-2において、ひずみゲージS13が圧縮方向に最も大きく、その下位のS12がそれに次いで大きい値を示しており、受圧板の締付けによる地盤内部応力の側方向への伝達が伺える性状を示している。

また、P-1ではアンカー体直近のS2~S4において、S4をピークとした引張方向へのひずみの累積が認められる。これはアンカー体の引抜き抵抗が τ_{ca} を介して周辺地盤に生じ、発生した引張応力による弾性的な地盤挙動を捉えたものと考えられ、既往研究⁹⁾による摩擦圧縮型アンカーのアンカー体周辺地盤の応力状態と調和的な結果である。

Case-2でも、地表面付近での圧縮方向へのひずみの累積が顕著であり、Case-1と同様な応力状況下にあることが伺える。なお、P-5のS13では500kN載荷時にひずみ方向が反転している現象がみられるが、地盤もしくは観測孔充填材の局所的な破壊に伴う応力開放の影響と考えられる。

地盤の不均質性を考慮すると単純には比較できないが、ひずみ量としてはCase-1の方が全体的に大きく、比較的低い荷重段階で深部までひずみが到達していることから判断すると、Case-1の方が高い締付け力を発揮していると考えられる。

(2) ひずみの鉛直成分 ϵ_z

Case-1では、アンカー直近の観測孔P-1において、全体にわたって顕著なひずみの変化が認められた。低荷重段階においては、S12~S13に下向きの応力状態を示すひずみの累積が認められるが、荷重段階が230kNを越えた辺りから、ひずみの累積方向が反転する現象がみられる。一方で、その下位のS9~S10では一貫して下向きの応力状態を示すひずみの累積を示している。

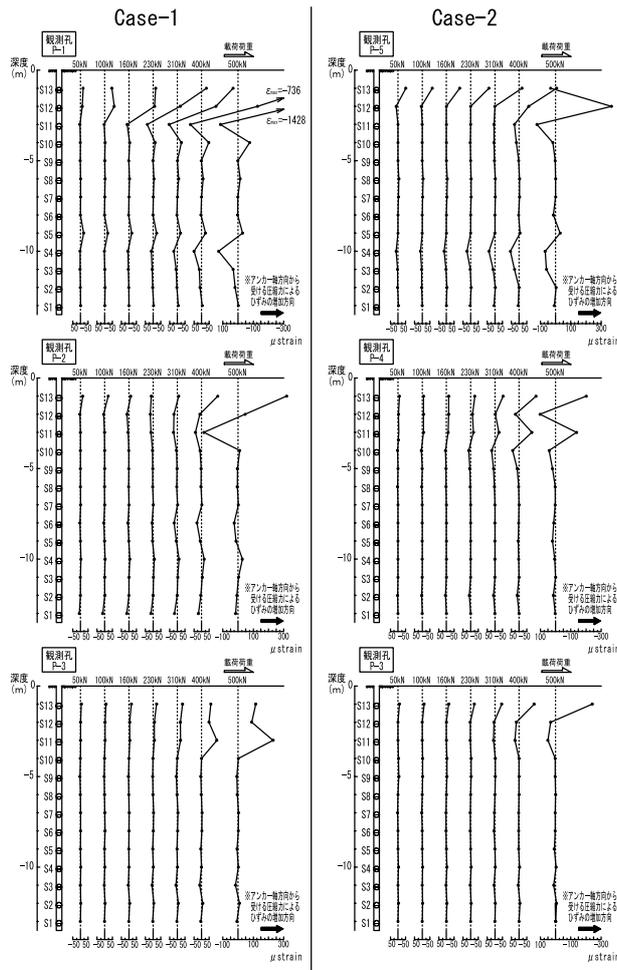


図-3 地盤の水平ひずみ分布
Fig. 3 Horizontal strain distribution of the ground

前述した ϵ_x のひずみ分布を考慮すると、S12~S13にみられたひずみ方向の反転は、受圧板による締付け力の増加に伴い地表付近でパイプが水平方向に大きく変形し、その影響でパイプに設置した塩化ビニル板も追従して変形したことが要因と推察される。なお、P-1のS11については荷重段階に関わらずひずみが測定されず、ゲージに不具合があったものと考えられる。

また、アンカー体周辺地盤のひずみゲージでは、P-1のS2とS5で上向き、S3とS4で下向きの応力状態を示すひずみが測定された。地盤が弾性状態である場合、アンカー体の上方への変位に伴い、周辺地盤には τ_A を介して上向きの応力が発生する。このことを考慮すると、S3とS4のひずみは別の要因が影響した可能性が考えられる。

前述の ϵ_x のひずみ分布から、S2~S4においては荷重に伴う引張ひずみが測定されており、地盤とともにひずみ計がアンカー側に引張られた状況にあることが考えられた。このため、S3~S4においても地表付近同様、水平方向の変位に影響を受けた可能性が考えられる。

ただし、S5についてはアンカー体上端部よりも上に

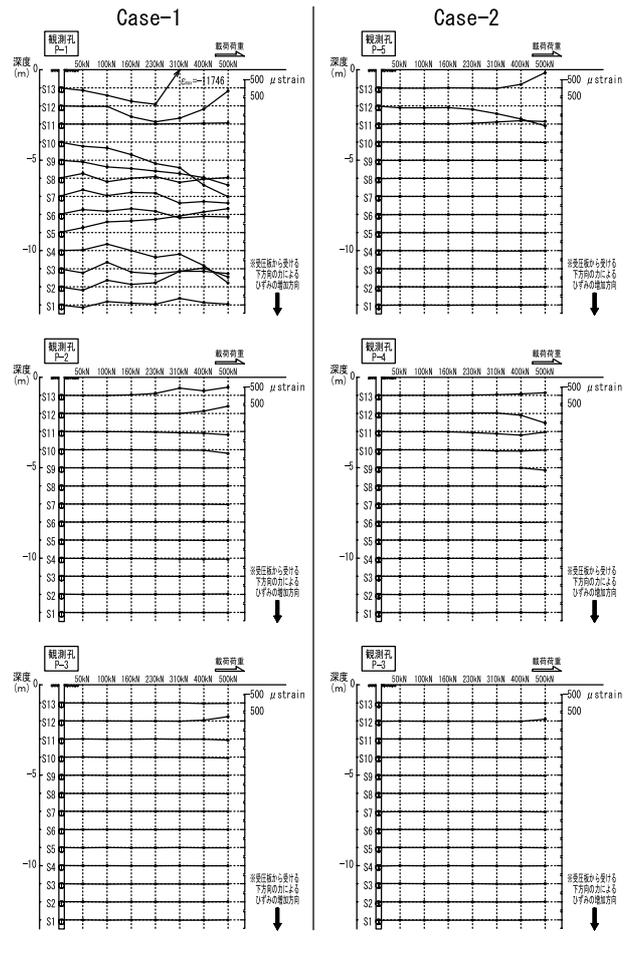


図-4 地盤の鉛直ひずみ分布
Fig. 4 Vertical strain distribution of the ground

位置しているため、アンカー体からの上向きの応力による地盤のひずみを捉えたものと考えられる。

一方Case-2では、全体的にあまりひずみが認められない結果となった。最もひずみが表れたP-5においては、地表面下2 mまでの範囲に顕著なひずみが認められたが、Case-1とは異なりアンカー体周辺においてはひずみが認められない。なお、P-5のS13のひずみ累積方向が上向きとなっていることについては、Case-1と同じく、地表付近のパイプの変形が影響している可能性が考えられる。

以上の結果から、Case-1では地表面下5 m付近まで受圧板から下向きの圧縮応力が伝達され、加えてアンカー体周辺では τ_A を介した引張応力が作用していると判断される。また、アンカー体上端部よりやや上部の周辺地盤については、アンカー体から伝達された上向きの圧縮応力が作用していると判断される。

一方、Case-2では地表面下3 m付近まで受圧板から下向きの圧縮応力が伝達されているが、その大きさはCase-1よりも小さいと考えられる。また、それ以深の地盤に大きなひずみが分布しないことから、アンカー

周面から地盤へ伝達される応力は小さいことが示された。

2.3.2 テンドン拘束具軸力分布

テンドン拘束具のひずみから換算した軸力分布を図-5に示す。

いずれのケースも先端部で大きな圧縮力が発生しており、摩擦圧縮型アンカーの性状を表している。ケースによる軸力分布の差は極めて少なく、アンカー緊張時における拘束具からアンカー体への応力伝達状況は同等であったことを示している。

2.3.3 グラウト内の圧縮力分布

アンカー体および自由長部におけるグラウトに設置したモールドゲージからは全てにおいて圧縮側のひずみが測定された。ひずみから換算した圧縮力の分布を図-6に示す。

アンカー体におけるグラウト内の圧縮力は、載荷荷重400kNまではCase-1の方が相対的に高いものの、荷重増加に伴う圧縮力の増加割合においてはCase-2の方が大きい傾向にあり、最大荷重である500kN載荷時ではCase-2の方が高い圧縮力を示す結果となった。

また、Case-2の自由長部中央のモールドゲージM5に着目すると、アンカー体とは対照的に、低い荷重段階から比較的大きな圧縮力が発生しており、160kN載荷時にはアンカー体グラウトと同等の圧縮力が発生しているが、そこで圧縮力の増加は頭打ちとなっている。

これらのことから、Case-2の周面摩擦抵抗は、低い荷重段階では τ_F が負担する摩擦抵抗が大きい傾向にあり、載荷荷重の増加に伴い摩擦抵抗の負担割合が深部ほど大きくなった状況を示すものと考えられる。すなわち、荷重段階が上がるに従い、周面摩擦抵抗の主要な発現位置が浅部から深部へと遷移する性状であったといえる。

なお、低い荷重段階からM5で大きな圧縮力が働いた要因としては、この深度付近が盛土層と泥岩との層境界付近であることを考慮すると、ルーズな盛土からの側圧を強く受け摩擦抵抗が大きくなった影響が考えられる。

3. アンカー模型実験

3.1 実験概要

アンカー模型実験は、アンカーを無限大の直径をもつものとした2次元平面ひずみ問題と考え、高さ600mm、幅550mm、奥行き100mmの鋼製の実験土槽を用いて行った。なお既往研究により、模型アンカーの3次元円筒形モデルと2次元平面ひずみモデルでは、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¹⁰⁾。したがって、本研究では3次元的なアンカーが周辺地盤に及ぼす影響を、簡便な平面的ひずみ問題として近似的に評価できるものとした。

模型実験は、島根県産来待砂岩粉体を主体とした人工地盤に打設したアンカーを引張り、その時のアンカーおよび地盤内部のひずみを測定することで実験を行った。地盤内部のひずみ測定は、地盤材打設時に埋設した3本

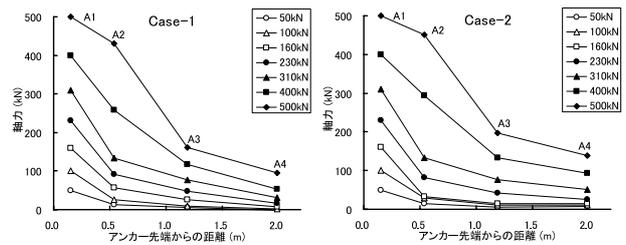


図-5 テンドン拘束具軸力分布
Fig. 5 Axial force distribution of the anchor restraint

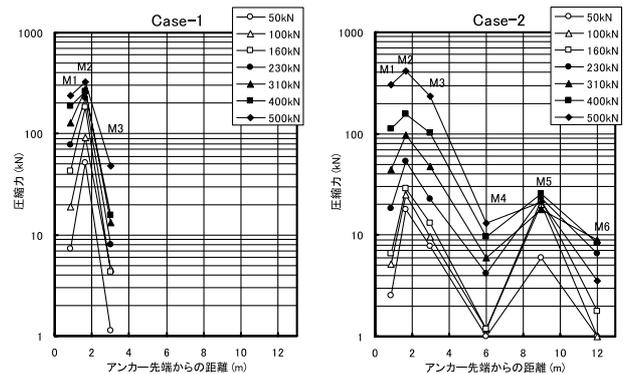


図-6 グラウト圧縮力分布
Fig. 6 Compression force distribution of the grout

のひずみ計にて行った。図-7にアンカー模型実験の概要を示す。

実験に供した地盤材は、全体的に均質な1層モデルと、アンカー体設置地盤の強度が高い2層モデルの2種類とし、それぞれのモデル地盤で τ_F がある場合とない場合で2種類、計4種類の実験を行っている。実験ケースの一覧を表-1に示す。

3.2 実験方法

3.2.1 ひずみ計の作製

ひずみ計は、長さ620mmの塩化ビニル製角パイプ（断面寸法40×30mm）の内部に三軸ひずみゲージを貼付したものをを用いた。

ひずみゲージは、深度方向に75mm間隔で貼付し、1本あたり8箇所のひずみゲージを貼り付けた。ひずみ計は、ゲージコードをパイプ内に通した内管型とし、充填する地盤材に疎密が生じ難い構造とした。

ひずみ計内部にはシリコン材を充填し、角パイプのねじれに対する剛性を高め、全体的に均一な挙動をするようにした。また、ひずみ計の表面には、#80のサンドペーパーで十分な粗面加工を施し、地盤材との付着性・連続性を高めるように努めた。

3.2.2 模型地盤の作製

実験土槽の内面には、シリコングリスを塗布し、その上に厚さ0.1mmのフィルムをかぶせ、地盤材と土槽内面との摩擦を極力低くする構造とした。これにより、アンカーの緊張力や受圧板の締付け力などと比べ、土槽内面との境界で発生する摩擦力は十分小さいものと考えら

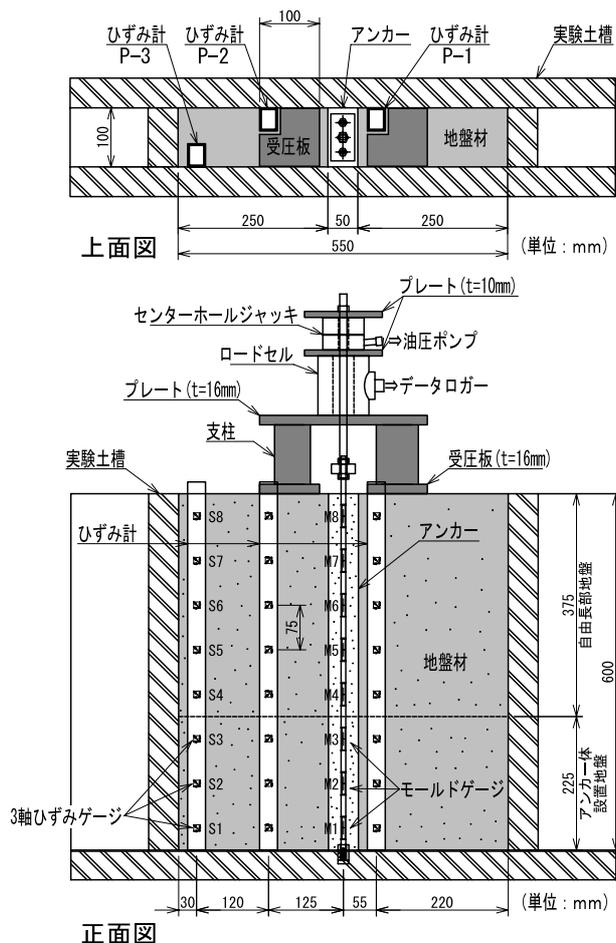


図-7 アンカー模型実験概要

Fig. 7 Experiment summary by the model anchor

れる。このため、本研究では土槽内面の摩擦は考慮していない。

土槽内部にひずみ計を3箇所に設置し、また、アンカー打設箇所にはボイド管として角パイプ（長さ620mm，幅50mm，奥行き100mm）を設置し、地盤材を打設した。

地盤材は、鳥根県産来待砂岩粉体と普通セメントおよび水を質量比3：2：2で配合した貧配合ソイルセメントを用いた。ただし、2層モデルのアンカー体設置地盤については、普通セメントに代わり早強セメントを用い、強度が高い地盤条件を想定したモデルとしている。また、養生後の体積収縮を抑え、ひずみ計と地盤材との密着性を保つために膨張材を添加している。

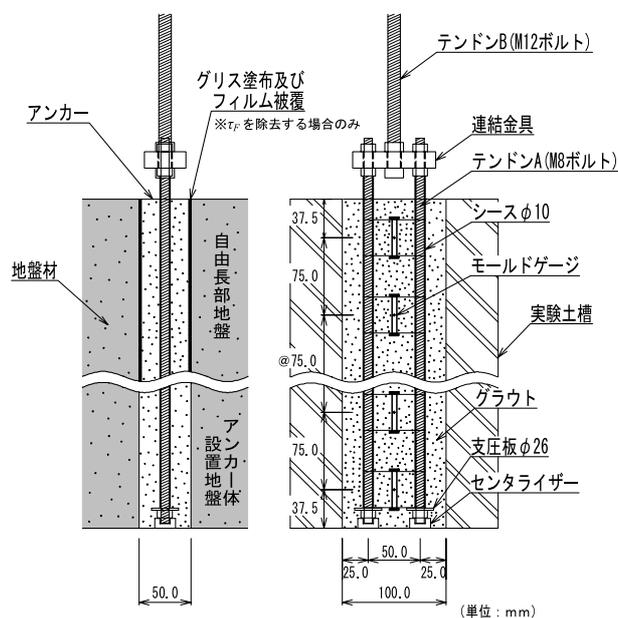
なお、地盤材に来待砂岩粉体を混合させることで、軟岩に近い強度をもち、均質かつ等方的な性質の人工軟岩が、少ない単位水量で作製できることから、ブリージングの発生を大幅に抑えることができ、良好な人工地盤を作製することができる。

地盤材打設1日後に、アンカー打設箇所のボイド管を抜き、アンカーを打設し3日間養生した。このため、地盤材の養生日数は4日としている。

テストピースによる要素試験より、1層モデルの地盤材は一軸圧縮強さ $q_u = 6 \text{ MN/m}^2$ ，弾性係数 $E_{50} = 500 \text{ MN}$

表-1 実験ケース一覧表
Table. 1 Experiment cases list

ケース名	自由長部 周面摩擦	地盤材 層構成	荷重ステップ (kN)	極限引抜き力 (kN)
Case-11	なし	1層	0.98	18.64
Case-12			0.49	12.75
Case-13			0.49	15.21
Case-14	なし	2層	0.49	22.07
Case-21	あり	1層	0.98	29.43
Case-22			0.49	25.51
Case-23			0.49	29.92
Case-24			2層	0.49



正面図

側面図

図-8 模型アンカーの構造

Fig. 8 Structure of the model anchor

/ m^2 程度であり、2層モデルのアンカー体設置地盤については $q_u = 10 \text{ MN/m}^2$ ， $E_{50} = 600 \text{ MN/m}^2$ 程度であった。

3.2.3 アンカーの打設

図-8に実験に供用した模型アンカーの詳細な構造を示す。アンカーテンドンとして、 $\phi 8 \text{ mm}$ のステンレス製ネジ材を2本用いた。テンドンの先端には $\phi 26 \text{ mm}$ の支圧板およびM8ナットを取り付けており、摩擦圧縮型アンカーと同様な構造とした。また、支圧板より上部のテンドンにはポリプロピレン製のシース材を被せグラウトとの付着を防ぎ、アンカー頭部での緊張力がテンドン先端部まで直接届く構造としている。

2本のテンドンの間には、モールドゲージを深度方向に75mm間隔で計8箇所を設置し、アンカー緊張時におけるグラウト内のひずみ測定も行った。

グラウトは一般的なアンカーと同じく普通セメントを

用い、水セメント比は50%とした。また付着性向上のため、地盤材と同様に膨張材を添加した。ただし、通常のアンカーではアンカー体部にグラウトの加圧注入を行うが、本模型実験では加圧注入は行っていない。

自由長部周面摩擦を除去する場合については、自由長部地盤のアンカー側内壁にシリコングリスを塗布し、さらに厚さ0.1mmのフィルムをかぶせた上でグラウトの打設を行った。

3.2.4 実験方法

模型実験は、1サイクルの引抜き試験とした。荷重段階は、1段階につき0.49kNもしくは0.98kNとし、アンカーの引抜きが確認できるまで単調荷重を行った。また、各荷重段階における荷重保持時間は2分間を標準とし、ひずみの測定は、各荷重保持時間経過後に測定した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 地盤内応力分布

(1) 1層モデル

1層モデルの模型実験は、 τ_F の有無により各3回ずつ、計6回の実験を行った。表-1に示した実験ケースのうち、代表としてCase-13とCase-23について、地盤内部の最大主応力分布を図-9に示す。なお、ひずみ計P-1については、地盤内部の応力分布に対称性があるものと考え、アンカーを中心軸とし位置の反転を行っている。

地盤内応力は、設置した各ひずみゲージから導かれた最大主ひずみに、地盤材の弾性係数 E_{50} を乗じ応力としたものであり、測定点間は平均により補完している。なお、応力算出にあたり、ひずみ計は地盤材に対し十分軟らかい強度であるため、埋設したひずみ計は周囲の地盤と同じ挙動をするものと考え、地盤材の E_{50} を用いた。

図-9より、各ケースの地盤内応力分布を比較すると、地盤内の応力分布は、初期の荷重段階から、各ケースで地盤内に発生する応力状況に大きな差異が認められる結果となった。Case-13については、低荷重段階から比較的大きな圧縮応力がアンカー周辺に作用している状況が認められ、荷重段階が上がるに従い、その特徴が顕著にみられるようになった。圧縮応力の作用範囲が受圧板直下からアンカー体上端付近までのアンカー周辺であることと、その主応力方向から判断すると、受圧板の締付けによる下向きの応力と、アンカー体の引抜き抵抗に伴う上向きの応力により、その間の地盤が圧縮された状態を表しているものと考えられる。

一方、アンカー体設置地盤においては、主に引張応力が働いていることが認められる。このことは、アンカー体周面は地盤と十分に付着しており、アンカーへの導入力が地盤に伝達され、その抵抗力としての引張応力が地盤に作用している状況を示している。

アンカーから最も離れたひずみ計P-3の中段部（ひずみゲージS4～S6）には圧縮応力が集中しており、その上下には引張応力が分布する特徴が認められた。こ

れらの応力の境界線は、受圧板およびアンカー体それぞれに起因する応力の伝播範囲を示すものと考えられ、概ね45度の広がりであることがわかる。この圧縮と引張の応力状態の境界部は、地盤破壊の危険性が高いせん断帯が形成されつつある部分と考えられる。ただし、今回の模型実験においては、いずれのケースでも地盤破壊は認められず、アンカーと地盤との摩擦切れにより実験を終えている。

対照的にCase-23は、低荷重段階における地盤内の応力変化が小さく、15kN程度の荷重から地盤内の応力変化が明瞭に認められた。載荷荷重14.7kN時の応力分布は、受圧板直下付近とアンカー体付近にやや高い圧縮応力が作用しているが、その大きさはCase-13よりもかなり小さいことがわかる。

アンカー引抜き直前の29.4kN載荷時には、アンカー体下端付近に高い圧縮応力が認められたが、その主応力方向が水平に近いことから、局所的な地盤破壊に伴った応力方向の変化が現れたものと考えられる。

なお、ひずみ計P-2などで受圧板直下よりもその下位の応力が高くなっている場合が認められたが、これはひずみ計上端部は地盤材との付着長が短いため付着性が悪く、地盤のひずみがひずみ計に伝達され難かったことによるものと考えられる。

以上のように、1層モデルでのアンカー模型実験の結果から、 τ_F が無いアンカーについては、アンカー緊張に伴う地盤内応力の状態から、受圧板による下向きの圧縮応力に加え、アンカー体から伝達される上向きの圧縮応力が作用し、その間の地盤が圧縮される状態となることが示された。

これに対し、 τ_F があるアンカーについては、アンカー緊張に伴う地盤内応力の変化が比較的少ない特徴がみられ、受圧板からの締付け力が地盤深部まで効果的に伝達されていない状況が示された。

(2) 2層モデル

アンカー体設置地盤と自由長部地盤との間に強度差がある場合の地盤内応力分布を調べるために、2層モデルによるアンカー模型実験を行った。図-10に、Case-14とCase-24における地盤内部の最大主応力分布を示す。なお、極限引抜き力 T_{ug} については、Case-14では $T_{ug} = 22.1\text{kN}$ と1層モデルの1.2～1.7倍、Case-24では $T_{ug} = 31.9\text{kN}$ と1層モデルの1.1～1.3倍であり、 τ_F が無いケースの方が T_{ug} の増大が著しかった。

Case-14の地盤内応力分布からは、1層モデル同様、低荷重段階からアンカー周辺に圧縮応力が作用している状況が観察され、載荷荷重の増加に伴い、その強さおよび作用範囲が広がる傾向が認められた。また、1層モデルと同様に、圧縮応力の作用範囲の外側には引張応力が作用しており、周辺地盤がアンカー体の引上げに抵抗している応力状況であることが伺える。ただし、Case-13と比較すると、引張応力の大きさが小さく、作用範囲も

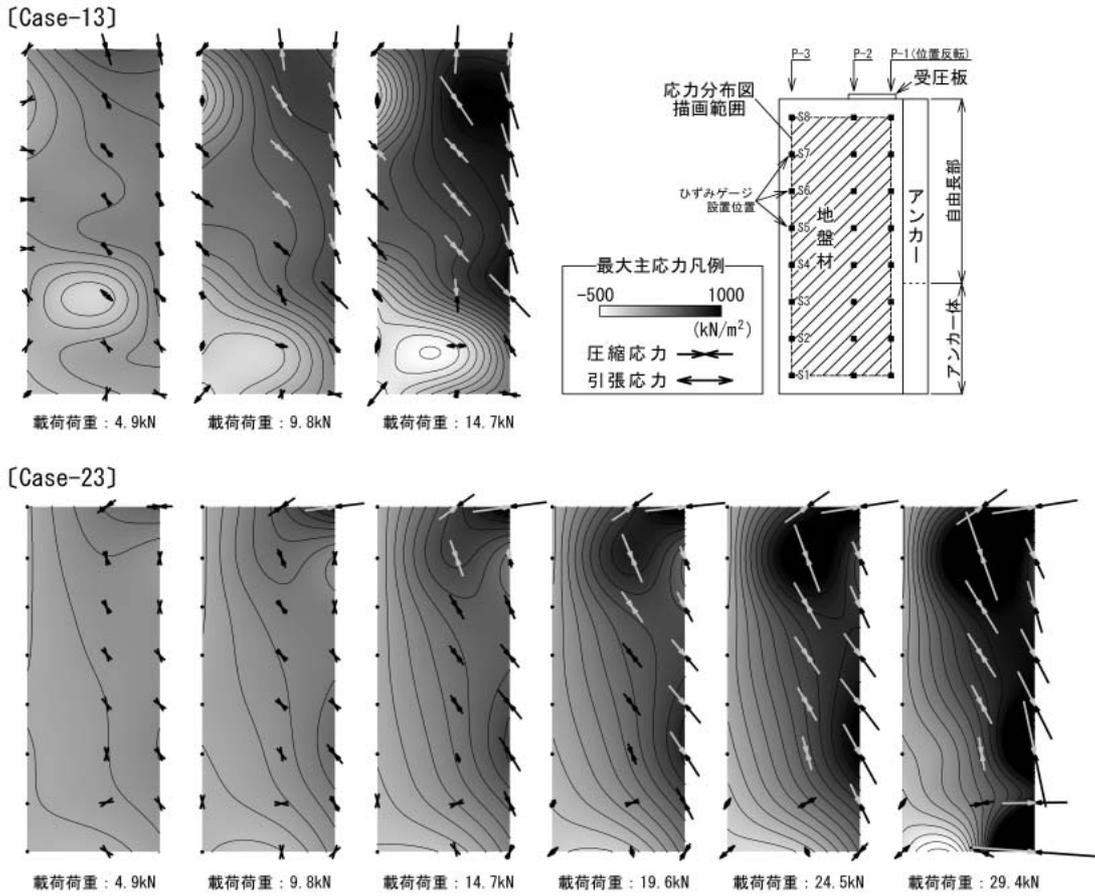


図-9 地盤内部の最大主応力分布 (1層モデル)

Fig. 9 Maximum principal stress distribution of the ground (One-layer model)

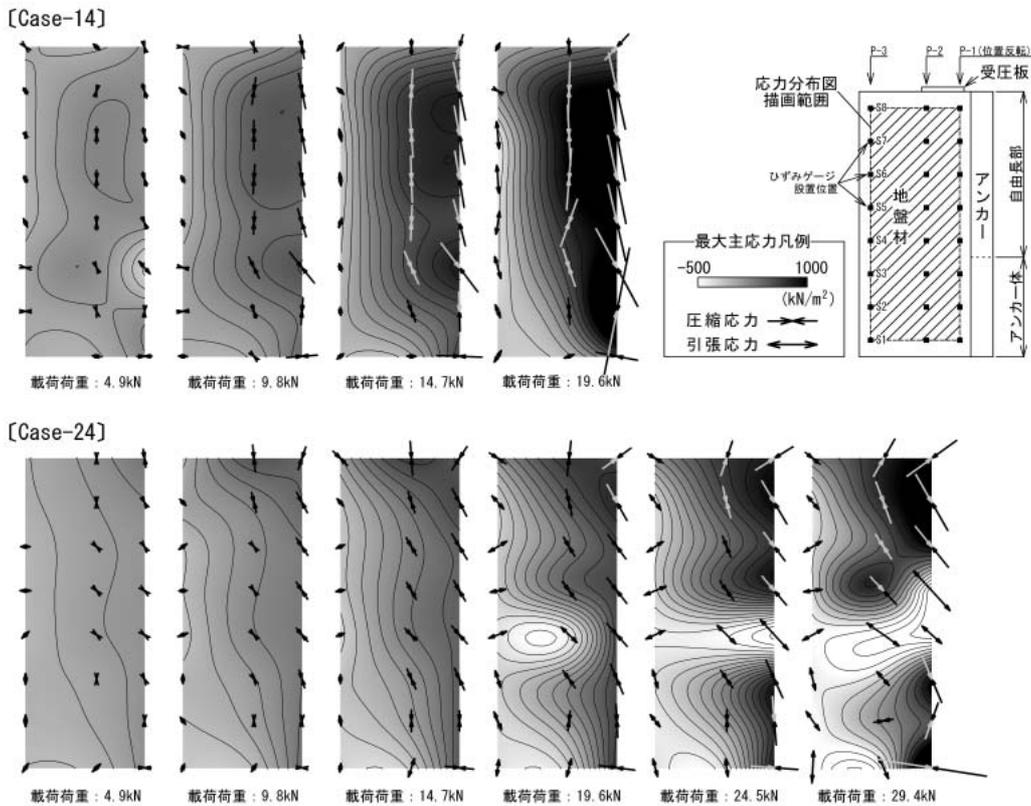


図-10 地盤内部の最大主応力分布 (2層モデル)

Fig. 10 Maximum principal stress distribution of the ground (Two-layer model)

狭い特徴がみられることから、アンカー体設置地盤の強度が上がったことによる影響を表していると考えられる。

したがって、アンカー体から伝達される上向きの応力が、Case-13よりも低減されているものと考えられる。このため、自由長部地盤には受圧板からの締付け力が優勢に作用し、その結果、ひずみ計P-2の最大主応力方向が全体的に鉛直方向となったものと考えられる。また、このことから、Case-13において自由長部地盤で発生した圧縮応力は、アンカー体から伝達された上向きの応力の影響を強く受けていたものと判断できる。

Case-24については、載荷荷重15kN程度までは、地盤内の応力変化が小さく、1層モデルと同様の傾向が認められた。しかし、載荷荷重19kNあたりから2層の地盤材の層境界付近における引張応力の発生が認められ、地盤材が層境界で分断されつつある状況を示している。これは、 τ_F の影響により、自由長部地盤が引上げられている状況であると考えられ、受圧板から下向きに伝達される応力が、層境界（地すべりの場合はすべり面）に対し、締付け力として有効に作用していないことを表している。

このことから、地盤内に地層境界やすべり面などの力学的不連続面が存在する場合、 τ_F の影響により、アンカーの緊張力が不連続面で地盤を分断する力として作用し、効果的な締付け力の伝達がなされない可能性が示唆される。

3.3.2 グラウト内の応力分布

図-11に、1層モデル、2層モデルの各代表ケースにおける、荷重段階ごとのグラウト内部の応力分布を示す。なお、図の応力は、モールドゲージにより得られたひずみに、グラウトの弾性係数 E_{50} を乗じ応力としたものであり、圧縮側を正とする。

全体的に、アンカー体下端部の圧縮応力が高く、摩擦圧縮型アンカーの特徴が認められた。Case-13およびCase-14は、自由長部の圧縮応力がほぼゼロであることから τ_F が発現しておらず、一方、自由長部にも圧縮応力が作用するCase-23およびCase-24では τ_F が発現していることがわかる。なお、今回の模型実験で行った全てのケースにおいて、載荷荷重の増加に伴った各深度での応力増加割合はほぼ一定であり、荷重段階による周面摩擦抵抗の負担割合の深度遷移は認められなかった。

本模型実験におけるアンカー表面積は深度によらず一定であることから、グラウト内に発生する圧縮応力と周面摩擦抵抗は比例関係にあると考えることができる。このため、 τ_F があるケースについて、アンカー全体の周面摩擦抵抗に対する τ_F の摩擦負担割合（以下、 R_F とする）を、グラウト内の応力状態から間接的に求めることができる。

ここで、自由長部におけるグラウト内応力を σ_F 、アンカー体部のものを σ_A とすると、摩擦負担割合 R_F は式(1)によって導かれる。

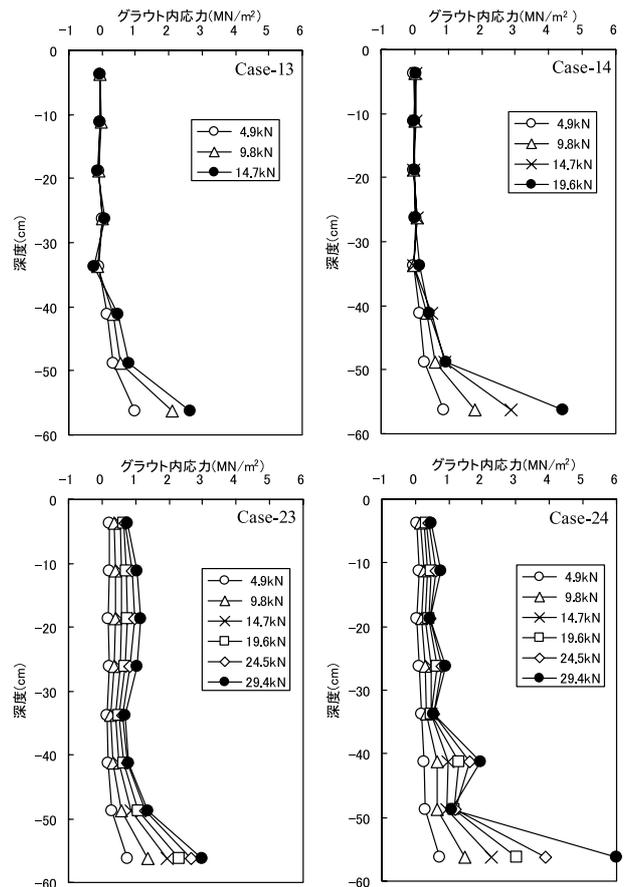


図-11 グラウト内部の応力分布
Fig. 11 Stress distribution of the grout

$$R_F = \frac{\sum \sigma_F}{\sum \sigma_F + \sum \sigma_A} \dots \dots \dots (1)$$

1層モデルであるCase-23は、 σ_A に対して σ_F が比較的大きいことから、 τ_F の摩擦負担割合は $R_F = 0.48$ と高く、アンカー体とほぼ同じ割合となることがわかる。一方、2層モデルであるCase-24は、 $R_F = 0.26$ と大幅に低下する。これは、図-11に示すとおりCase-23とCase-24で σ_F に大きな差異が認められず τ_F も同等であったと考えられることから、アンカー体設置地盤の高強度化に伴った τ_A の増大が大きく影響した結果といえる。

これらの比較により、アンカー体設置地盤と自由長部地盤の強度差が R_F に大きな影響を及ぼすことが示された。したがって岩盤斜面のように、地盤の強度差があまり無い地盤条件に打設されたアンカーにおいては、 R_F が大きくなることが予想され、 τ_F を考慮したアンカーの設計を行う必要があると考えられる。

ただし、本模型実験ではアンカー体への加圧注入を行っていない。一般的に、加圧注入により τ_A が増大することがわかっており、モデル地盤を用いた加圧注入の影響を評価した研究¹¹⁾では、均質な地盤においては加圧注入によるグラウトの高強度化により、 τ_A が概ね1.5倍となることが示されている。

このことを考慮し、今回の模型実験結果における σ_A を1.5倍として R_F を再計算すると、Case-23では $R_F=0.38$ 、Case-24では $R_F=0.19$ となり、その割合は減るものの、厳密に T_{ug} を決定する上では決して無視できない割合であると考えられる。特に自由長部が長いアンカーの場合は、その影響を大きく受けることが予想され、より正確な T_{ug} の算出および経済的なアンカーの設計においては、 τ_F を考慮する必要があると考えられる。

4. アンカー数値実験

4.1 実験概要

アンカー模型実験結果から、 τ_F が無いケースの方が自由長部地盤に高い圧縮応力が作用することが明らかとなった。ただし、この圧縮応力は受圧板からの締付け力に加え、アンカー体から伝達される上向きの応力が作用した結果、自由長部地盤が上下からの圧縮を受けた影響である可能性が考えられる。

一方、 τ_F があるケースについては、周辺地盤の応力変化が小さく、受圧板からの締付け力も地盤深部まで伝達されていない状況が確認された。

各ケースにおける地盤内応力伝達機構の違いを検討するために、FEMによる数値実験を行った。

数値実験として、まず1層モデルでの模型実験について再現解析を行い、モデルの妥当性を検討した後、受圧板中央直下における地盤の鉛直応力分布に加え、アンカー周面要素のせん断応力分布から、アンカー緊張時の地盤内応力状況の比較を行った。また、地すべりのように自由長部地盤がより軟質な場合を想定したモデルについてもFEM解析を行い、 τ_F の影響を考察した。

4.2 再現解析

4.2.1 解析モデル

模型実験はアンカーを中心に左右対称で、奥行き方向へも対称性をもつことから、解析モデルはアンカーを中心とした模型実験の半分の領域とし、奥行き方向へは1/10のモデル化を行った。有限要素メッシュを図-12に示す。

解析は、3次元弾完全塑性有限要素解析とし、有限要素は20節点6面体アイソパラメトリック要素を用い、積分点(Gauss点)が8点の減退積分要素とした。また、構成則は、降伏規準をMohr-Coulomb式、塑性ポテンシャルをDrucker-Prager式としたMC-DPモデルとした。

地盤材、アンカー、受圧板を構成する各要素は、全てソリッド要素としている。地盤とアンカー間には摩擦切れが生じるため、本来はジョイント要素を用いることが望ましいが、今回は簡単のため、周面要素として通常のソリッド要素を薄く配置することで摩擦切れを表現した¹²⁾。ただし本数値実験では、アンカーが摩擦切れを生じた時点までの地盤内応力分布を調べることに主眼を置いているため、要素タイプの違いによる影響はほとんどないものと考えられる。

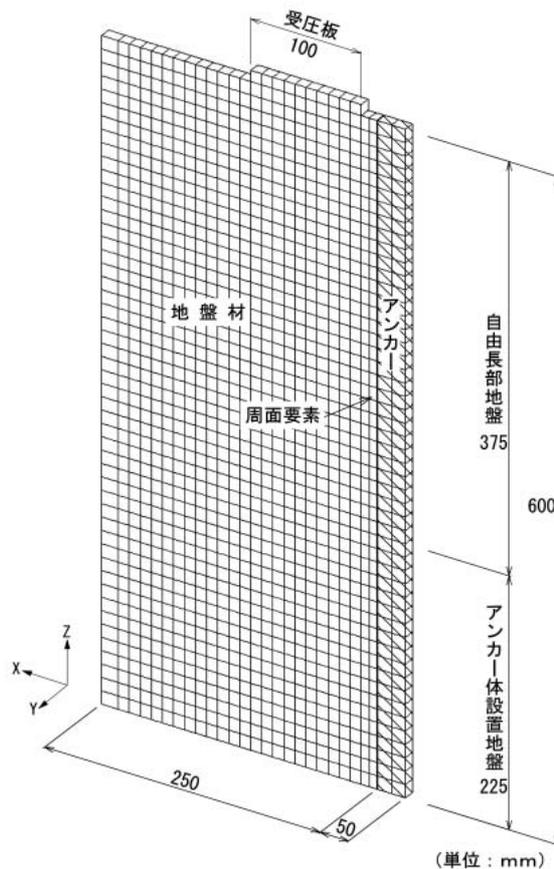


図-12 有限要素メッシュ
Fig. 12 Finite element mesh

境界条件は、側面については各側面と直交する方向への変位を拘束し、底面については鉛直上方への変位のみを許す条件とした。載荷荷重は、アンカー下端に上向きの荷重として与え、その反力を受圧板表面に等分布荷重として与えた。1ステップ当りの載荷荷重は、0.6kNとした。

解析ケースは模型実験と同じく τ_F の有無により2パターンとし、 τ_F が無い場合をCase-1A、 τ_F がある場合をCase-2Aとする。

4.2.2 材料定数の決定

各要素の材料定数を表-2に示す。地盤材の弾性係数 E および粘着力 c 、単位体積重量 γ については、模型実験時に測定した要素試験の値を参考に決定した。また、ポアソン比 ν は0.3とし、静止土圧係数 K_0 については式(2)より求めた¹³⁾。

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \dots\dots\dots (2)$$

アンカーおよび受圧板の破壊は考えず、 E および c は十分高い値とした。また、自由長部およびアンカー体周面要素については、模型実験におけるグラウトの一軸圧縮強さ q_u に加え、測定したグラウト内の応力分布を参考に、数種の E および c を与え、要素毎に最も再現性の高い値を採用した。Case-1Aにおける自由長部周面要素については、 E および c を極めて小さい値としている。

表-2 材料定数一覧
Table 2 List of material constants

材料名	E (MN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	K_0
地盤	500	0.3	3000	18.0	0.43
周面要素 (自由長部)	10~20*1	0.3	200~400*1	18.0	0.43
周面要素 (アンカー体)	15~100*1	0.3	300~2000*1	18.0	0.43
アンカー	Large	0.2	Large	23.0	0.25
受圧板	Large	0.2	Large	79.0	0.25

※1：要素試験結果および模型実験におけるグラウト内の応力分布を参考に、要素毎に最も再現性の高い値を採用した。

なお、本研究におけるFEM解析では、内部摩擦角およびダイレイタンシー角は考慮していない。

4.2.3 解析結果

再現解析の結果、Case-1 Aの極限引抜き力は $T_{ug} = 22.2\text{kN}$ 、Case-2 Aは $T_{ug} = 33.5\text{kN}$ となり、概ね模型実験結果に近い T_{ug} を示す結果が得られた。

図-13に、FEM解析による15.6kN載荷時における地盤内部の最大主応力分布を示す。最大主応力の分布には、既出図-9に示した模型実験結果と同様な傾向が認められ、全体的な再現性は良好と考えられる。

局所的な再現性を検討するために、受圧板下部地盤における鉛直応力の比較を行った。図-14および図-15に、模型実験でのひずみ計P-1の各ひずみゲージ位置における、載荷荷重に伴う鉛直応力 σ_z の応力経路を示す。

τ_F の有無に関わらず、全体的には高い再現性が認められる結果といえる。ただし、 τ_F があるケースのS8に関しては模型実験結果から大きく乖離しており、S7についてもやや再現性が低い結果となった。これらの部分にみられた結果の乖離については、前述のように模型実験において、ひずみ計上端部の地盤材との付着長の短さが影響し、地盤のひずみが過小に計測された可能性が考えられ、Case-1 Aでの再現性の高さを考慮すると、模型実験においても解析結果と同等の応力が発生していたものと判断される。

以上より、全体的には良好な再現性であるといえるため、本モデルを用い、 τ_F が地盤に伝達される締付け力に及ぼす影響を考察する。なお、 τ_F がある場合の模型実験結果において、受圧板直下付近の応力がうまく捉えられなかった要因としては、ひずみ計上端部の付着長が短いことに加え、 τ_F を介した上向きの応力が加わり、上下からの強い圧縮を受けた影響で、ひずみ計上端部が地盤材との付着切れを生じた可能性が高いと考えられる。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 締付け力伝達状況の比較

図-16に、載荷荷重15.6kN時における、各ケースでの受圧板中央直下の鉛直応力 σ_z と、アンカー周面要素のせん断応力 τ_{xz} の深度分布を示す。また、鉛直応力の基準値として、アンカー体への荷重は行わず、受圧板の締付けのみを考慮した場合の解析値も示す。基準値の解析は、アンカーおよび周面要素を地盤材に置換えて解析を

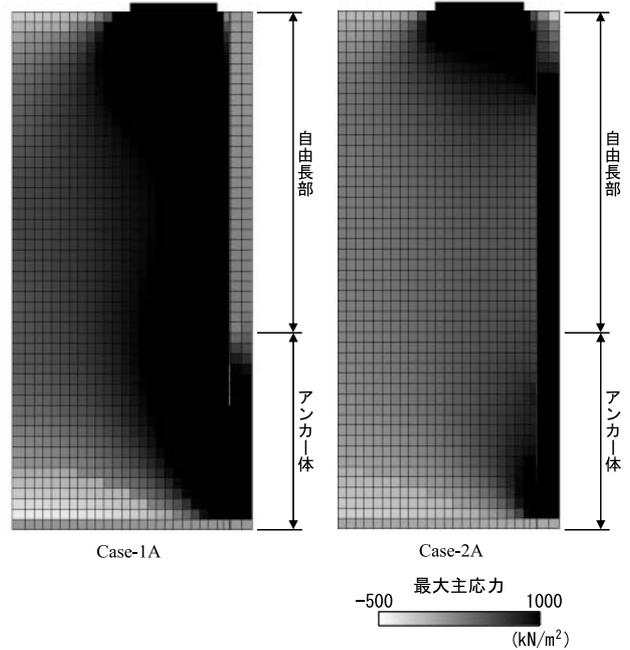


図-13 地盤内部の最大主応力分布 (荷重: 15.6kN)
Fig.13 Maximum principal stress distribution of the ground (Load: 15.6kN)

行ったものである。

解析結果より、 σ_z が地盤内に伝達される大きさは、基準値よりもCase-1 Aで高くCase-2 Aで低い傾向が示された。

Case-1 Aでは、地盤材表面からGL-22.2cmまでは σ_z が基準値より6~19%程度高い値で分布するが、それ以深では徐々に応力値が高くなり、GL-37.8cmでは基準値より45%高い値となるピークが認められた。

アンカー周面要素の τ_{xz} の分布より、GL-45.0cm以深にせん断応力が高く発現していることから、主としてGL-45.0cm以浅における周辺地盤には、アンカー体から上向きの圧縮応力が伝達されたものと考えられ、この応力の影響でGL-37.8cmをピークとした σ_z の増加が生じたものと考えられる。

この σ_z のピークよりも深部については、深度に伴う急激な応力低下が認められた。一方、この部分はアンカー周面要素の τ_{xz} が高く発現している深度でもあることから、アンカー体の引上げに対する反力としての引張応力が、 τ_A を介して周辺地盤に伝達されている部分と考えられる。したがって、この σ_z の低下は、地盤に発生した引張応力と干渉したことによる応力の相殺が生じた影響と考えられる。

Case-2 Aについては、地盤材表面から深部に向かう σ_z の低下量がCase-1 Aよりも大きく、GL-30.6cmでは基準値より約38%の低下が認められた。それ以深は、基準値と同じ傾向の応力の深度分布を示すが、GL-45.0cmから再び急激な応力低下を示す傾向がみられた。

地盤材表面付近における σ_z の低下は、GL-8~10cm付近に高い τ_{xz} が発現していることから、その周辺地盤

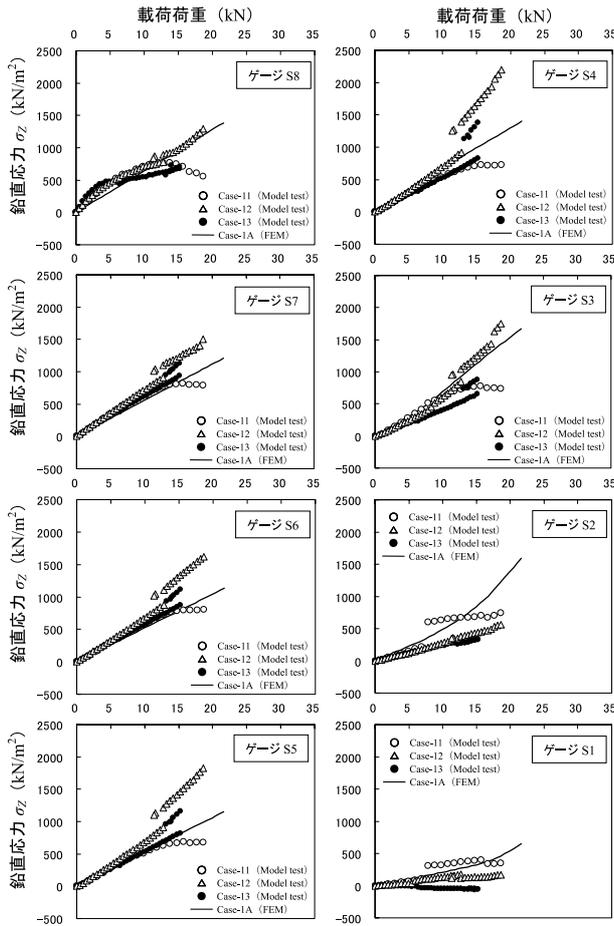


図-14 地盤内鉛直応力経路 (τ_F が無い場合)

Fig. 14 Vertical stress path of the ground (τ_F is ineffective)

にはアンカー緊張に伴い、 τ_F を介した引張応力が作用していたものと推察され、応力の干渉が生じた影響によりCase-1Aよりも大きく σ_z の低下が生じたものと考えられる。

また、GL-45.0cm以深での σ_z の低下は、Case-1Aと同様、 τ_A を介し周辺地盤に発生した引張応力と干渉した影響と考えられる。

以上の解析結果から、受圧板から地盤に伝達される鉛直応力は、アンカーの周面摩擦抵抗を介して発生した地盤の引張応力領域では、応力の干渉により低下する傾向にあることが示された。すなわち、 τ_F や τ_A により周辺地盤に引張応力が発生している地盤領域においては、受圧板からの σ_z は効果的に伝達され難いことを意味する。

したがって、自由長部周面摩擦が発現するアンカーについては、すべり面などの地盤深部における締付け効果が低減されるものと考えられる。

4.3.2 自由長部地盤の強度の影響

アンカーを対策工として用いる地すべり等の斜面では、不安定層である自由長部地盤の方が、アンカー体設置地盤と比較して軟質な場合がほとんどである。このため、自由長部地盤の弾性係数 E および粘着力 c を低減させたケースについても数値実験を行い、自由長部地盤の強度

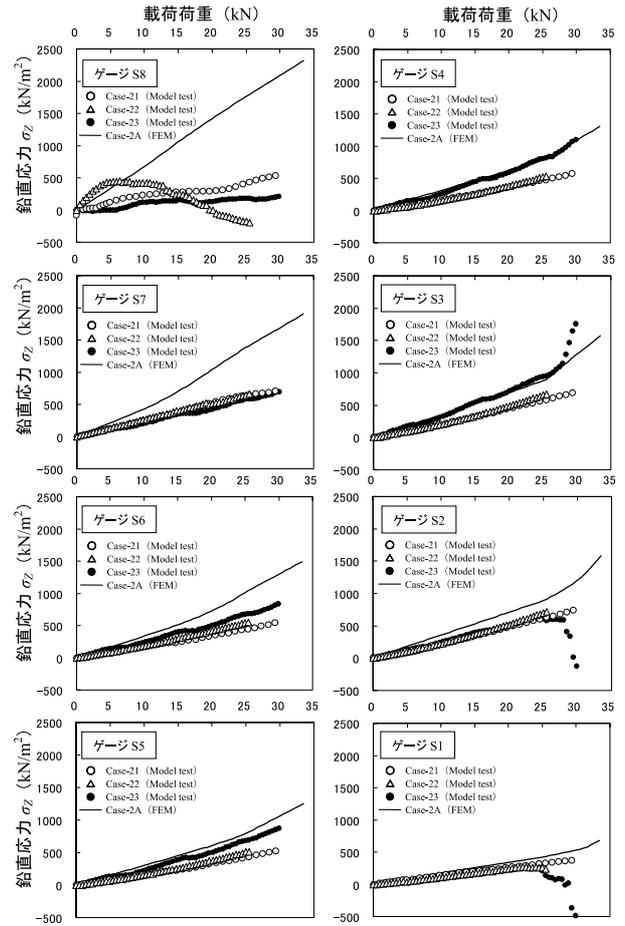


図-15 地盤内鉛直応力経路 (τ_F がある有効)

Fig. 15 Vertical stress path of the ground (τ_F is effective)

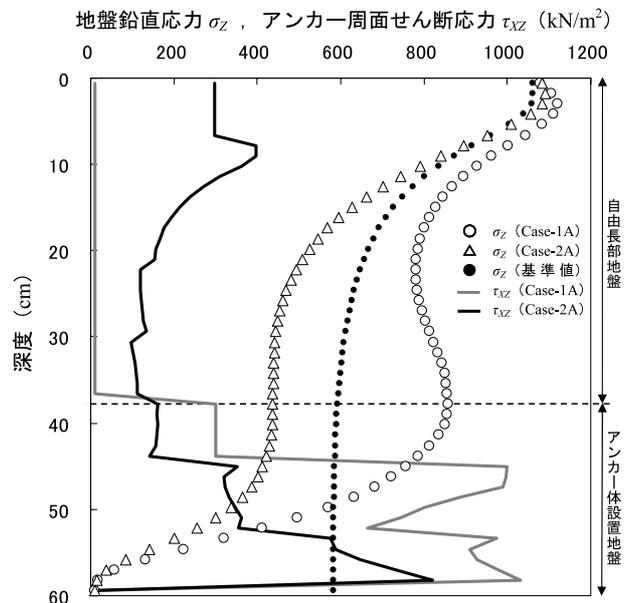


図-16 鉛直応力とせん断応力の深度分布 (荷重: 15.6kN)
Fig. 16 Depth distribution of vertical stress and shear stress (Load: 15.6kN)

が与える影響について調べた。

解析モデルは、再現解析を行ったモデルを基本とし、自由長部地盤の E を0.2倍および0.5倍に低減させたケー

スについて、 τ_F がある場合と無い場合、それぞれについてFEM解析を行った。

なお、弾性領域であれば E と c は比例関係にあると考えられることから、ここでは E に比例させて c の低減を行っている。その他の材料定数および諸条件については、再現解析モデルと同じとした。また、結果の比較は、載荷荷重15.6kN時とした。

図-17に、解析結果による受圧板中央直下の σ_z の深度分布を示す。また、アンカー体への載荷は行わず、受圧板の締付けのみを考慮した場合の鉛直応力を基準値とし、基準値に対する σ_z の増減割合の深度分布を図-18に示す。

図-17に示す σ_z の分布から、 τ_F の有無に関わらず、自由長部地盤の強度が高いケースほど、深部への応力伝達度が高い傾向がみられた。

また、図-18に示す σ_z の増減割合からは、 τ_F が無い場合は、GL-20cm付近でいずれのケースについても一旦基準値の約20%増の値となった後、深部に向かい応力値が増大する傾向が認められた。深部での σ_z の増大は、アンカー体から τ_A を介し伝達される上向きの応力の影響と考えられることから、地盤内部で下向きに作用する締付け力としては、いずれのケースでも基準値より20%程度高いものと推察される。

一方、 τ_F がある場合は、深部に向かい σ_z の低下量が大きい傾向が認められた。特に、地盤強度が低い場合ほどその傾向が著しいことがわかる。

σ_z の増減割合からも、地盤強度が低いケースほど応力の低下割合が著しく、 E を0.2倍としたケースの地盤境界部では、 σ_z が基準値から53%低下していることがわかる。

これらの数値実験の結果から、 τ_F が無い場合については、自由長部地盤の強度に関わらず、地盤深部への締付け力の伝達状況には大きな差が無いことが示された。

一方 τ_F がある場合、自由長部地盤の強度が低いほど、締付け力の低下量が深部ほど大きい傾向にあることが示された。

なお、これらの影響は、アンカーを平面ひずみ問題として扱ったため、周面摩擦の有無の影響が大きく表れた可能性が高く、今後3次元モデルを用いた解析結果との比較検討が必要と考える。

5. まとめ

本研究では、アンカーの実大実験、模型実験および数値実験を行い、受圧板からの締付け力に対する、自由長部周面摩擦抵抗 τ_F の影響を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- ①. 実大実験および模型実験における地盤内のひずみおよび応力分布より、 τ_F が無い場合のアンカーの方が、受圧板から地盤へ伝達される締付け力が相対的に高いことが示された。
- ②. また、模型実験におけるグラウトの圧縮応力の分布状況から、 τ_F がある場合、アンカー全体の周面

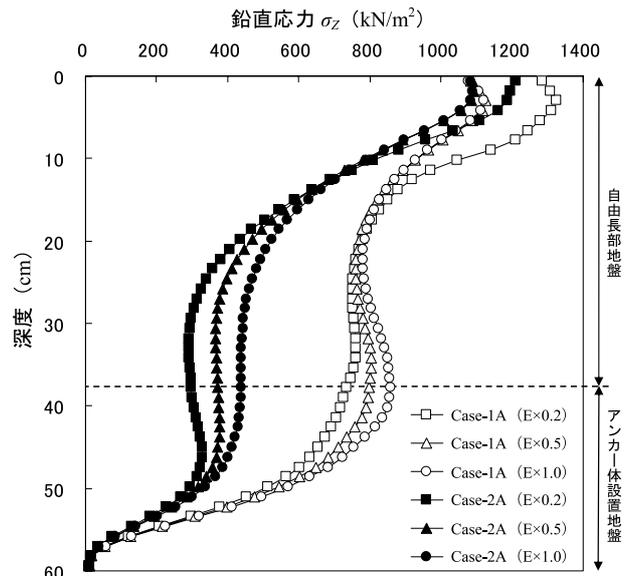


図-17 鉛直応力の深度分布 (荷重: 15.6kN)

Fig. 17 Depth distribution of vertical stress (Load: 15.6 kN)

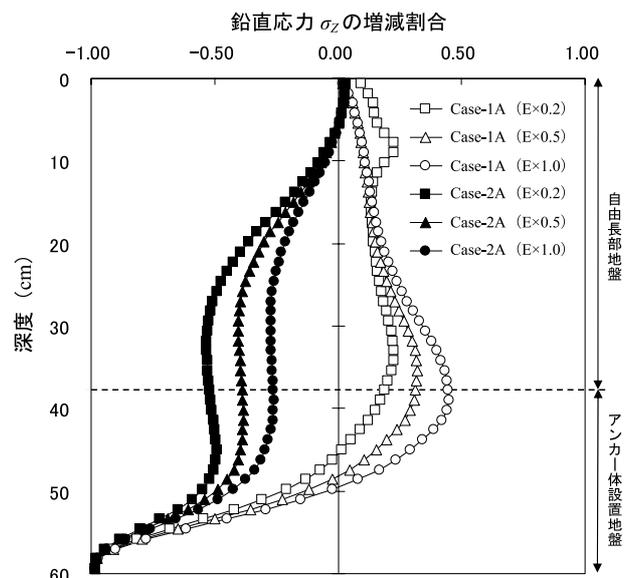


図-18 鉛直応力増減割合の深度分布 (荷重: 15.6kN)

Fig. 18 Depth distribution of vertical stress increase and decrease ratio (Load: 15.6 kN)

摩擦抵抗に対する τ_F の負担割合が比較的高いことがわかった。今回行った模型実験結果においては、 τ_F の摩擦負担割合は約3割～5割と高く、決して無視できない大きさであることが示された。

- ③. FEMによる数値実験結果において、地盤内鉛直応力およびアンカー周面要素のせん断応力の深度分布傾向から、アンカーの周面摩擦抵抗を介して地盤内に発生する引張応力が、受圧板からの締付け力を低減させる可能性が示された。
- ④. また、 τ_F がある場合、自由長部地盤の強度が低いほど、深部への締付け力の伝達割合が低くなる傾

向が示された。

- ⑤. 上記①～④の結果から、 τ_F の存在が受圧板からの締付け力の伝達を阻害する要因となる可能性が示された。特に、地すべりなどの比較的軟質な地盤におけるアンカーにおいては、締付け力の伝達割合が大きく低減されるものと思われる。

以上のことから、 τ_F が作用することにより、従来考えられていたよりもアンカーの締付け効果が低く見込まれるものと考えられる。今後は、さらに実地盤実験や、3次元モデルを用いた模型実験および数値実験などを重ねることで、自由長部の長さやその地盤条件に応じた締付け力の低減量を定量化する手法を検討し、アンカーの設計に反映させる必要があると考える。また、これに加え、 τ_F が発生しないよう、アンカー自由長部の構造を見直す必要性もあるものとする。

引用文献

- 1) 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)，pp.143-144, 154-155.
- 2) 土井茂樹・黒坂誠・筒井道剛・吉田直弘 (1992)：永久地盤アンカー工法の研究 (その20. アンカー定着部付近の掘削とアンカー耐力との関係)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.1351-1352.
- 3) 佐藤守・宮崎祐助・境野典夫・滝口健一・吉田直弘・長谷川昌弘 (1992)：永久地盤アンカー工法の研究 (その21. 応力伝達機構)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.1353-1354.
- 4) 桑島正樹・西川純一・日下部祐基 (1995)：アンカー引抜き時の周面摩擦抵抗に関する模型実験，開発土木研究所月報，No.501，pp.2-10.
- 5) 山上拓男・山川治 (1990)：斜面安定工におけるアンカー力の新しい算定法，土と基礎，Vol.38，No.5，pp.51-56.
- 6) 蔡飛・鶴飼恵三 (2003)：アンカー工による斜面の補強効果－極限平衡法と弾塑性FEMとの比較，日本地すべり学会誌，Vol.40，No.4，pp.8-14.
- 7) 田中尚・石井靖雄・藤澤和範・森下淳 (2006)：模型実験の再現によるアンカー工弾塑性3次元FEM解析モデルの検討，土木技術資料，Vol.48，No.4，pp.64-69.
- 8) 石田孝司・藤澤和範・田中尚・倉岡千郎・太田敬一 (2008)：遠心載荷模型実験のFEM再現解析によるグラウンドアンカー工の締付け効果の検討，第47回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.233-236.
- 9) 瀬崎茂・小瀧辰人・峯谷正・浜野浩幹 (2005)：アンカー形式による支持機構と支持力の違い，第44回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.271-274.
- 10) 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.
- 11) 片山直樹 (2009)：アンカー体摩擦応力に対するグラウト加圧注入の効果，日本地すべり学会誌，Vol.45，No.5，pp.26-32.
- 12) 若井明彦・鶴飼恵三 (1995)：単杭の水平載荷挙動に関する模型実験と解析，土木学会論文集，No.517，Ⅲ-31，pp.159-168.
- 13) 社地盤工学会 (2003)：弾塑性有限要素法をつかう，51p.
(原稿受付2009年12月7日，原稿受理2010年6月7日)