

グラウンドアンカーの引抜き耐力に関する 現場実験に基づく検討

Examination on Pull-out Strength of Ground Anchor using Field Experiments

小松晃二 Koji KOMATSU (株)ケーティービー
兵動正幸 Masayuki HYODO (山口大学大学院創成科学研究科)
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)

グラウンドアンカーの設計では、アンカー体の引抜き耐力はアンカー体の長さと同径に正比例することが前提となっている。しかし、アンカー緊張力の反力としてアンカー体に発生している摩擦応力は一様に分布しないため、アンカー体の引抜き耐力は長さと同径に単純に正比例するものではない。筆者らは、現場引抜き実験を砂礫と軟岩の地盤で行い、アンカー体の外径と同径と引抜き耐力の関係について検討した。また、荷重を増減させながら軟岩地盤に設置したアンカー体のひずみの計測を行い、応力分布状態とその変化から岩盤アンカーが引抜けるときのメカニズムを考察した。

キーワード：グラウンドアンカー、引抜き耐力、周面摩擦応力度、塑性変位の増加率、アンカー体の変形 (IGC : A10, G12, H00)

1. まえがき

グラウンドアンカー工法 (以下、「アンカー」という) は、1957年に藤原ダムの副ダムにプレストレストを与えるために採用した岩盤アンカーが国内最初¹⁾といわれているが、アンカーの導入期・拡大期²⁾であった1960年代～1970年代には仮設構造物としての使用が大半を占めた。特に1969年にケーシングドリル式ロータリー削孔機が開発されたことから崩壊性地盤に対するアンカーの採用が容易となり、仮設山留アンカーを土砂地盤に設置する事例が多くなった³⁾。その後、1980年代のアンカー成長期²⁾には、アンカー施工技術の進歩に伴って、図-1⁴⁾に示すように本設構造物に対する使用が増え、アンカー体を岩盤に設置する (以下、「岩盤アンカー」という) 事例が頻繁にみられるようになった。

アンカーの引抜き耐力に関する研究は、アンカー導入期から1980年代までの成長期に多く見られ、その多く

が土砂地盤を対象にしたものであった。1970年代後半に藤田ら⁵⁾が、土砂地盤でのアンカー体引抜き実験によりアンカー体の軸力分布領域がアンカー緊張力 (以下、「荷重」という) の増加に伴って漸次先端部に向って拡大されていくことを説明した。草深ら⁶⁾は、N値40程度の砂および砂礫地盤にアンカー体を設置した複数の設計事例を整理した図-2により、アンカー体の長さが5～7m級以上になると、アンカー体の有効長さを考慮するか、もしくは、周面摩擦応力を低減することにより許容引抜き力を小さく抑えるなど設計での配慮がみられると説明し、過大な荷重をアンカーに負担させることの危険性を指摘した。

Ostermayer⁷⁾はアンカー体の周面摩擦抵抗がロッキング・イン効果の影響を受けると考え、多くの実験データを整理して次のように結論付けている。砂質土の場合は、アンカー体の直径 (以下、「アンカー体径」という) 100mm まではアンカー体径と共に引抜き耐力は増大す

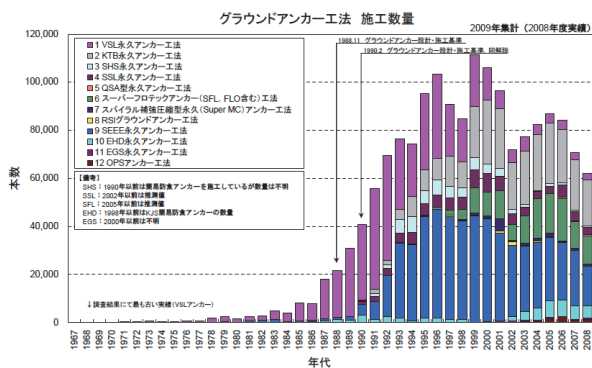


図 11.7 グラウンドアンカー工法 施工数量アンケート調査結果

図-1 本設アンカーの施工数量推移⁴⁾

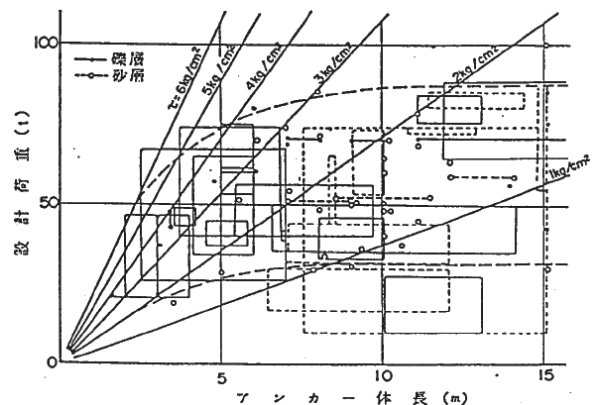


図-2 アンカー体長と設計荷重⁶⁾

るが、100mm～150mm ではばらつきが多い。一方、粘性土の場合は、アンカー体径 90mm～160mm の間では、引抜き耐力はアンカー体径と共に増大する。

ロッキング・イン効果とは、アンカー体を引抜く際に土を押し除かねばならないが、この挙動によりアンカー体周囲の垂直応力が増大することによる効果である。Wernick ら⁷⁾は、ロッキング・イン効果による垂直応力の増大は、土被り厚さの 2～10 倍になると考え、その効果をロックイン率 (=ロッキング・イン効果がある場合の周面摩擦抵抗の測定値/上載圧による計算値) で評価した。このロックイン率は、土の相対密度の増大あるいはアンカー体径の減少と共に大きくなる傾向がみられると説明している。

1980 年代後半から本設アンカーの使用が増えると共に岩盤アンカーも増加したが、1990 年代にアンカーは成熟期²⁾に入り、既にアンカーの設計方法が確立されていたこと、岩盤アンカーは土砂地盤のアンカーに比べて大きな引抜き耐力が得られ、研究結果を参考にしなくてもアンカーの設計および施工計画が比較的容易であったことから、岩盤アンカーの引抜き耐力とその挙動についての研究、実験は土砂地盤に比べると少ない。

その中で、古山ら⁸⁾は軟岩地盤(泥岩)に 3m と 5m のアンカー体を設けて適性試験と繰返し引張り試験を行って図-3 および図-4 を示した。アンカー体のひずみ

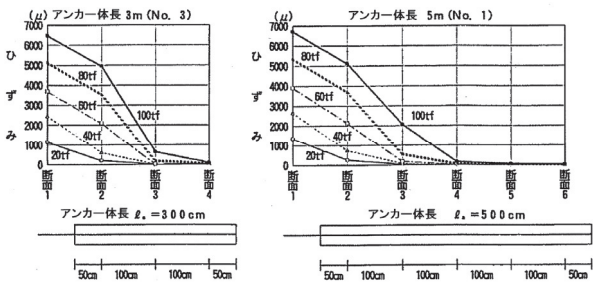


図-3 アンカー体のひずみ分布⁸⁾

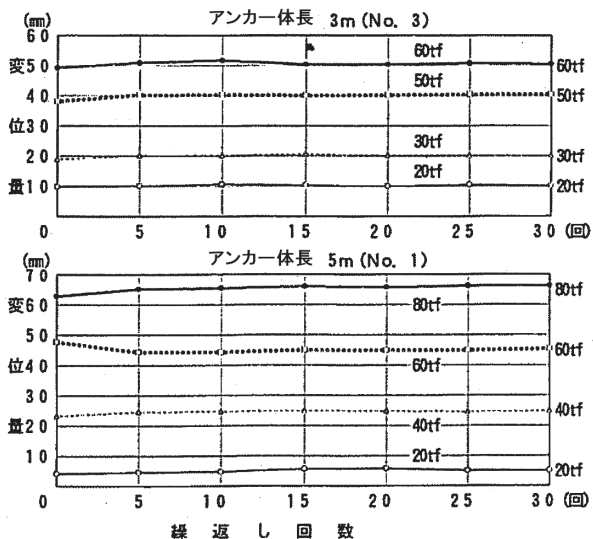


図-4 繰返し回数による変位量の変化⁸⁾

分布を表した図-3 より、アンカー体長が 3m と 5m では、アンカー体と自由長の境界部(以下、「自由長との境界」という)からアンカー体先端部にかけてひずみが急減し、自由長との境界から 2.5m の位置ではほとんどひずみが生じていないことを説明した。また、3m と 5m のアンカー体のひずみ分布形状とその値を比較すると荷重 80tf (785kN) まではほぼ同じ挙動であったことから、アンカー体全長が有効に作用しないことを指摘した。

図-4 には、各荷重段階で 30 回の繰返し載荷を行った結果から載荷回数による変位量の変化を示した。3m と 5m のアンカー体に共通して、繰返し載荷回数 5 回までは多少変化がみられるが、それ以降は安定した挙動を示している。

瀬崎、浜野ら⁹⁾は、アンカー体の長ささと極限引抜き力は必ずしも比例しないとし、模型実験および風化凝灰岩での現場実験を行って、摩擦方式の引張型、圧縮型、圧縮分散型の各アンカーについて、アンカー体の支持機構や有効区間の解明を試み、圧縮分散型アンカーの優位性を説明した。瀬崎は、アンカー体の有効区間を「極限引抜き力に対して持続的に引抜き抵抗を発揮する区間」と定義している。また、摩擦方式引張型アンカーは、荷重の増加に伴ってアンカー体の剥離が生じ、最大荷重作用点が自由長との境界付近からアンカー体先端部へ移動することを図-5 を用いて説明している。

筆者らは、古くから採用され、実績が最も多い摩擦方式引張型アンカーの引抜き実験を実際の現場で実施した。この引抜き実験は、中生代ジュラ紀～三疊紀の砂岩頁岩互層で CL～CM 級相当の軟岩と評価された岩盤にアンカー体を設置して行った。アンカー体の長ささと外径の異なるアンカーの引抜き実験により、荷重増加に伴うアンカー体の応力分布状態の変化を確認、塑性変位の増加率からアンカーの引抜き耐力を求め、アンカー体径が引抜き耐力に及ぼす影響、アンカー体の支持機構について検討した。ここで、塑性変位の増加率とは荷重 1kN の増加に対する塑性変位の増加量 (mm) を示し、アンカーの引抜き耐力とは塑性変位の増加率が急増するときの荷重とする。

また、同一現場内の N 値 14 の沖積砂礫地盤で外径の

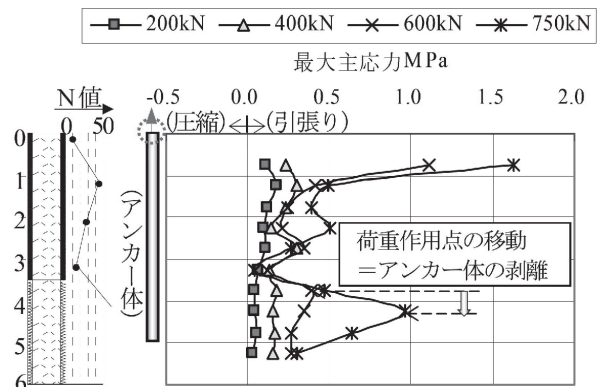


図-5 荷重と側方地盤内の応力分布図⁹⁾

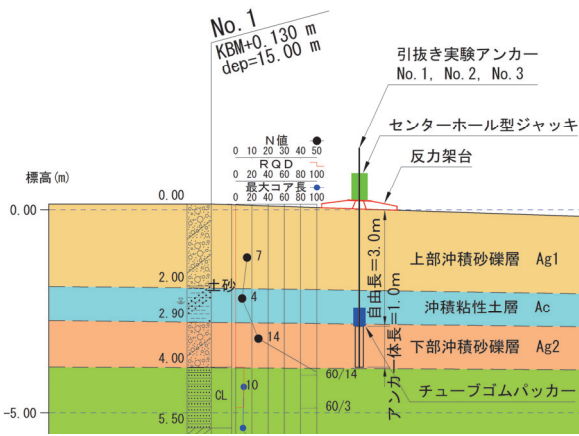


図-6 砂礫地盤の実験アンカー断面図

異なるアンカーを用いて引抜き実験を行い、岩盤アンカーとの比較およびアンカー体径と引抜き耐力の関係を調べた。図-6に砂礫地盤、図-7に軟岩地盤に設置した実験アンカーの断面図を示す。また、アンカー削孔機据付状況を写真-1、アンカー引抜き状況を写真-2に示す。

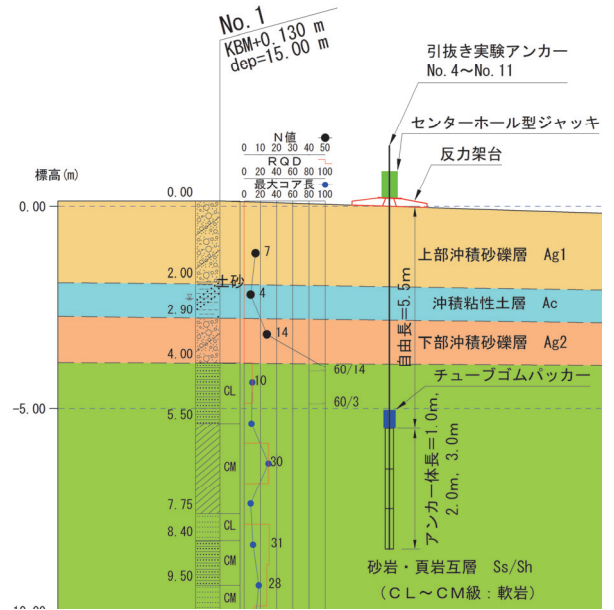


図-7 軟岩地盤の実験アンカー断面図

2. 砂礫地盤に設置したアンカー体の引抜き実験

2.1 砂礫地盤での実験の概要

岩盤アンカーと比較するために、同じ実験地内の砂礫地盤にアンカー体を造成して引抜き実験を行った。

実験アンカーの諸元を表-1に示す。アンカー削孔径は外径 90mm, 115mm, 135mm の3種類とし、アンカー引張り材（以下、「テンドン」という）はPC鋼より線Φ12.7mmを使用し、PC鋼より線の束本数は2, 3, 4本と削孔径の大きさに合わせて変更した。削孔径とアンカー体径は、実際は同じ値にならないが、アンカー設計時も削孔径をアンカー体径としており、本実験でも同じ値として取り扱う。

アンカー体長は砂礫地盤の層厚から1.0mとし、自由長部の削孔長は地盤状況から3.0mとした。削孔はクローラ型ロータリーパーカッション式削孔機により二重管削孔方式で行い、削孔方向は鉛直とした（写真-1）。グラウト（セメントペースト）の配合は水セメント比（W/C）を50%とし、加圧注入に関しては、自由長が短く圧力の保持が難しいことと、注入圧の違いによる引抜き耐力への影響を排除するため、無加圧とした。

アンカー体長部と共に自由長部にもグラウトの充填が必要であると地盤工学会基準「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」¹⁰⁾（以下、「基準書」という）に記載されているが、本実験では自由長部における摩擦抵抗の発生を避け、アンカー体自体の正確なデータを得るため、テンドンの自由長とアンカー体の境界部自由長側にチューブゴムパッカーを取付け、アンカー体部を確実にグラウトするとともに自由長部のグラウトを入念に洗浄した。図-8に実験装置の模式図、図-9に作業手



写真-1 アンカー削孔機据付状況

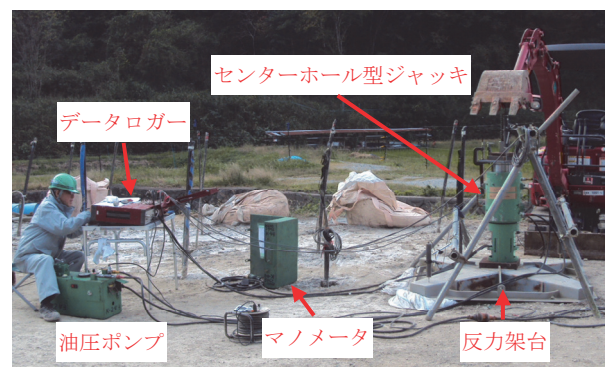


写真-2 アンカー引抜き状況

表-1 砂礫地盤での実験アンカーの諸元

アンカー No.	テンドン 種別・規格	削孔径 (mm)	アンカー体長 (m)
1	Φ12.7mm×2本	90	1.0
2	Φ12.7mm×3本	115	1.0
3	Φ12.7mm×4本	135	1.0

順図を示す。尚、引抜き実験の直前にチューブゴムパッカー内の水を排除して、自由長部の摩擦が影響しないように配慮した。

引抜き実験は、グラウトが所定の圧縮強度 (30N/mm²) 以上になったことを確認後、1000kN 用センターホール型ジャッキを用いて実施した。荷重方法は図-10 に示す多サイクル方式とし、初期荷重および荷重、除荷時の測定間隔はPC鋼より線1本当たり5kNとなるように設定した。荷重保持時間は、各サイクルの最大荷重時は5分間、初期荷重および荷重時の履歴内荷重は2分間とし、除荷時は荷重保持を行わず変位量の計測のみ行った。荷重はアンカー体が引抜けるまで続けた。

変位量の計測は、ジャッキ上部のプレートに2箇所、反力架台上に2箇所、計4箇所にダイヤルゲージを設置し、デジタルひずみ測定器で荷重と変位量の自動計測を行った。変位量の精度は基準書¹¹⁾には1/10mmとされているが、塑性変位等を微視的にとらえるため1/100mmに設定した。

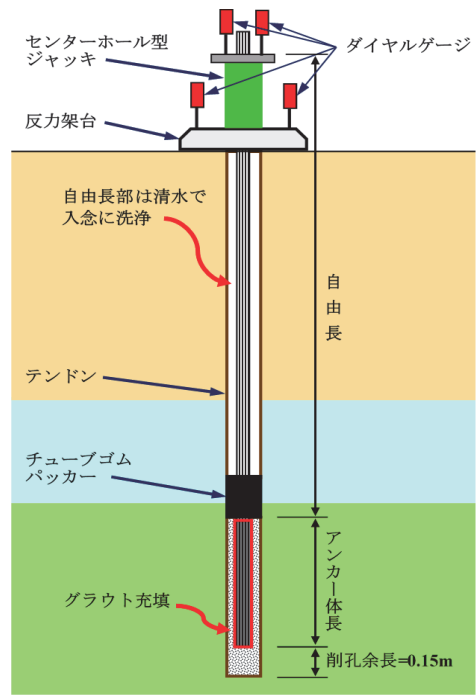


図-8 実験装置の模式図

2.2 砂礫地盤での引抜き実験結果

アンカーの頭部変位量はジャッキ上部のプレートに設置した2つのダイヤルゲージの平均データを採用し、塑性変位量と弾性変位量を求めた。塑性変位量とは、各荷重サイクルにおいて初期荷重に戻したときの残留変位量から求め、アンカー体の引抜き挙動を示す。弾性変位量は計測されたアンカー頭部変位量から塑性変位量を差し引いた値であり、テンドンに使用されているPC鋼材の機械的性質に基づく変位量を示している。

アンカーが引抜けた荷重サイクルを最終サイクルとし、最終サイクルの荷重-変位量曲線を図-11 に示す。また、荷重増加に対する塑性変位の増加率の変化を図-12 に示す。

図-11 より、引抜き耐力に至るまでの荷重-変位量曲線は3本のアンカーに共通して直線的で、テンドンとグラウトの付着が適正に保持されていたといえる。これは、弾性変位量がテンドン自由長の理論伸びに沿った値を示し、基準書の管理基準内であったことからわかる。

図-12 より、塑性変位の急増が生じるまでの塑性変位の増加率は3本のアンカーに共通しており、おおよそ0.10mm/kN以下である。したがって、アンカー体を本現場の砂礫地盤に設置した場合、塑性変位の増加率が0.10mm/kN以下であれば、アンカーは安定状態で引抜きは発生していないと考えられる。

図-11 a) に示すように、アンカーNo.1 が引抜けたときの荷重 (以下、「ピーク荷重」という) は150kNである。図-12 a) より、荷重を140kNから150kNに増加させた際に塑性変位が急増していることから、引抜き耐力は140kNである。引抜き耐力時のアンカー体1m当たりの周面摩擦応力度は、 $140\text{kN} \div (1.0\text{m} \times 0.09\text{m} \times \pi) = 495\text{kN/m}^2$ となる。

同様にして図-11 と図-12 から得られた各アンカーの

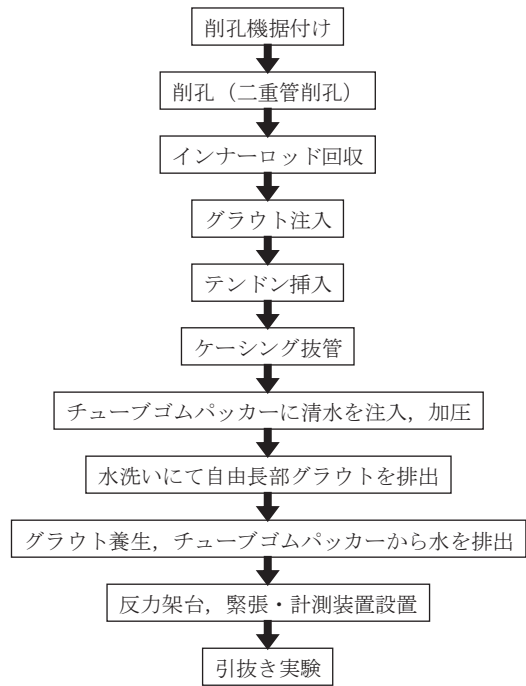


図-9 実験アンカーの作業手順図

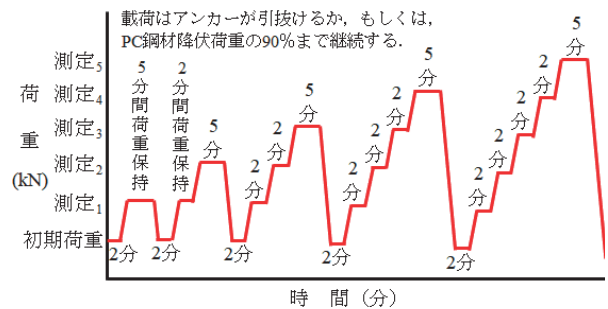
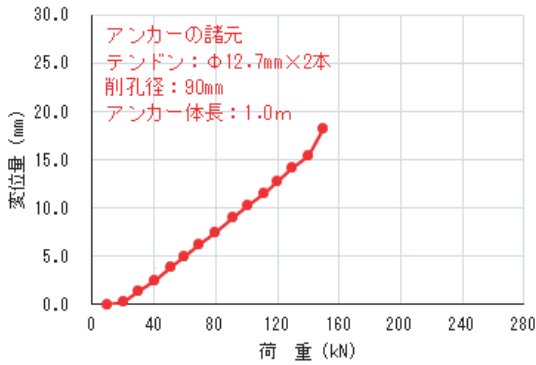
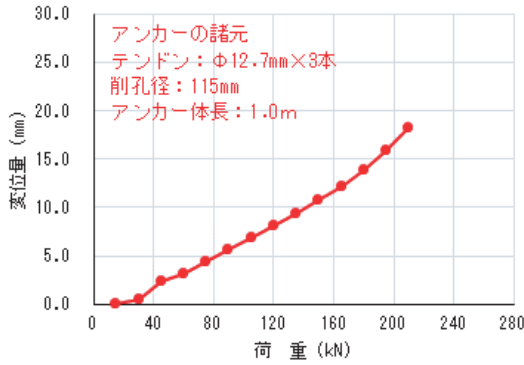


図-10 荷重方法 (例)

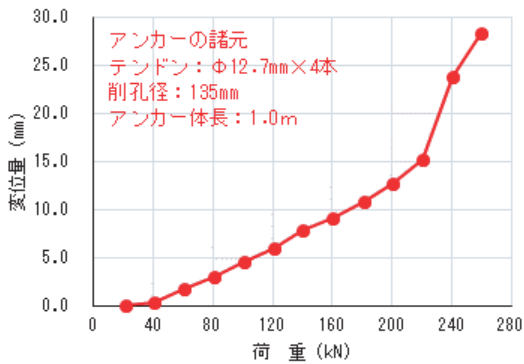
グラウンドアンカーの引抜き耐力に関する現場実験に基づく検討



a) アンカーNo.1

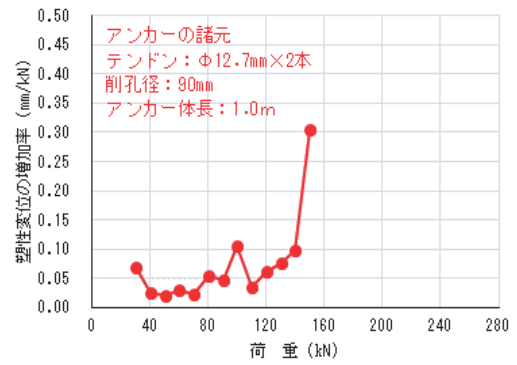


b) アンカーNo.2

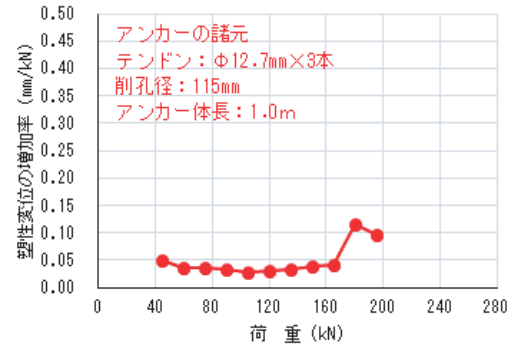


c) アンカーNo.3

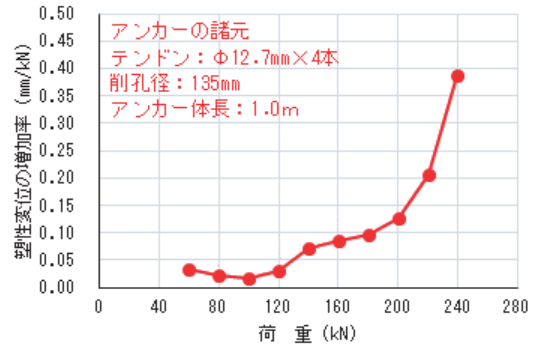
図-11 最終サイクルの荷重-変位量曲線



a) アンカーNo.1



b) アンカーNo.2



c) アンカーNo.3

図-12 荷重と塑性変位の増加率の関係

表-2 砂礫地盤での実験結果

アンカー No.	削孔径 (mm)	ピーク 荷重 (kN)	引抜き 耐力 (kN)	周面摩擦 応力度 (kN/m ²)
1	90	150	140	495
2	115	210	165	457
3	135	260	180	424

実験結果を表-2に示す。また、図-13に削孔径ごとのピーク荷重、引抜き耐力および3本のアンカーの平均周面摩擦応力度に削孔径を乗じた計算値をグラフに示す。図-13によると、削孔径が大きくなるに従ってピーク荷重、引抜き耐力は増大しているが、平均周面摩擦応力度を定数とする比例直線とは若干の差がみられる。これは、測定荷重に間隔を設けていることから引抜けた時点ある

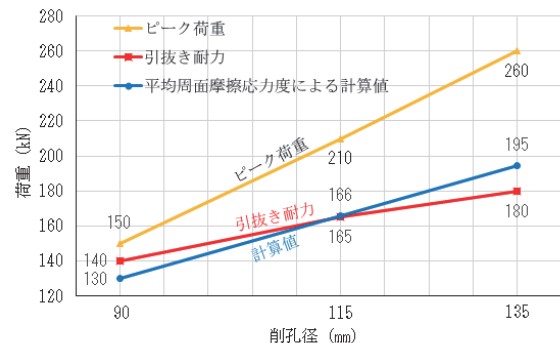


図-13 削孔径とピーク荷重、引抜き耐力の関係

いは塑性変位の急増時点の正確な値が得られず、荷重の範囲しか特定できなかったことが原因とも考えられる。

基準書¹²⁾ではN値20の砂礫地盤の極限周面摩擦応力度は170kN/m²~250kN/m²である。一方、実験で3本

のアンカーが示した引抜き耐力時の周面摩擦応力度は、基準書の値を大幅に超えて424kN/m²~495kN/m²の範囲にあり、90mmの最小削孔径のときに最大周面摩擦応力度を示している。この原因としてロッキング・イン効果が挙げられる。Wernickら⁷⁾のいう通り、ロックイン率がアンカー体径の減少と共に大きくなり、周面摩擦応力度を増加させた可能性も否定できない。

測定誤差およびロッキング・イン効果等の影響も考えられるが、図-13の削孔径と引抜き耐力の関係を示すグラフは右上がりの直線状であり、砂礫地盤の場合には削孔径と引抜き耐力は線形関係にあるといえる。

3. 岩盤に設置したアンカー体の引抜き実験

3.1 軟岩地盤での実験の概要

砂礫地盤よりも周面摩擦抵抗が大きい軟岩地盤で、アンカー体長、削孔径を変化させて引抜き実験を行い、アンカー体の長さ、外径と引抜き耐力の関係調べた。

削孔径は砂礫地盤での実験同様、90mm、115mm、135mmの3種類、アンカー体長は1.0m、2.0m、3.0mとした。テンドンは、Φ12.7mmのPC鋼より線を複数本束ねたものと、砂礫地盤のときには用いなかったPC鋼棒を使用した。PC鋼棒は呼び径36mmを使用し、アンカー体のひずみの計測を目的とした。アンカーは鉛直方向に削孔し、アンカー体を確実に岩盤に設置させるために自由長部の削孔長は5.5mとした。グラウトの加圧注入は、砂礫地盤と同条件にするため無加圧とした。実験アンカーの諸元を表-3に、横断図は図-7に示す。

岩盤アンカーでは、アンカー体における応力分布状態とその変化を調べるため、引抜きが見込める6本のアンカー（アンカーNo.4~8、10）で引抜き実験時にひずみの測定を行った。アンカーNo.9、11については、アンカー体と削孔径から引抜きには至らないと判断し、ひずみの測定は行わず、荷重-変位量曲線と塑性変位の増加率を調べることを目的とした。

実験方法は基本的に砂礫地盤での実験と同様であるが、岩盤アンカーの場合、砂礫地盤よりも大きな荷重が必要になるため、1000kN用と1700kN用のセンターホール型ジャッキを併用した。荷重方法も砂礫地盤での実

験に倣い、図-10に示す多サイクル方式とし、初期荷重および荷重、除荷時の測定間隔はPC鋼より線1本当たり10kNとなるように、PC鋼棒の場合は60kNとした。

荷重はアンカー体の引抜きを目標としたが、安全性を考慮してPC鋼材降伏荷重の90%程度を上限荷重とした。荷重保持時間は、砂礫地盤の実験と同じである。

ひずみゲージの貼付位置を図-14、PC鋼より線のひずみゲージ貼付方法を図-15に示す。PC鋼より線に比べてPC鋼棒のひずみゲージ間隔を小さくしたのは、PC鋼より線では複数束ねた中の1本のひずみしか計測できないのに対して、PC鋼棒は1本で使うことからアンカー体全体のひずみが得られるからである。また、アン

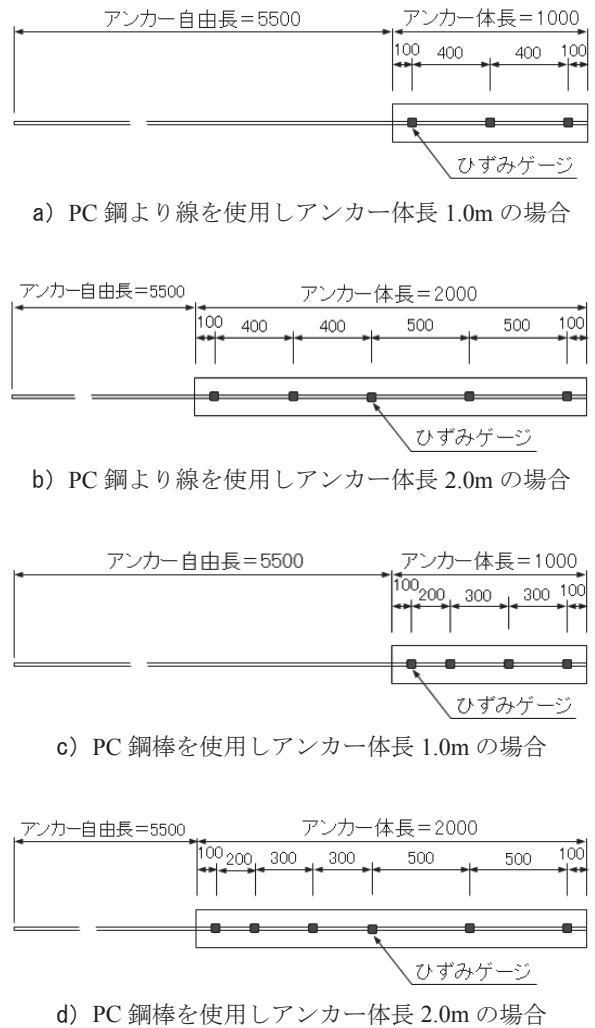


図-14 アンカー体のひずみゲージ貼付位置

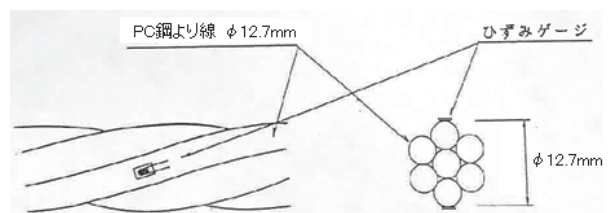


図-15 PC鋼より線のひずみゲージ貼付方法

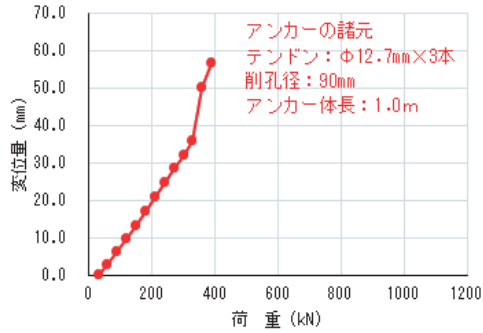
表-3 軟岩地盤での実験アンカーの諸元

アンカー No.	テンドン 種別・規格	削孔径 (mm)	アンカー体長 (m)
4	Φ12.7mm×3本	90	1.0
5	Φ12.7mm×6本	115	1.0
6	Φ12.7mm×6本	135	1.0
7	PC鋼棒 D36	115	1.0
8	Φ12.7mm×7本	115	2.0
9	Φ12.7mm×9本	135	2.0
10	PC鋼棒 D36	115	2.0
11	Φ12.7mm×11本	135	3.0

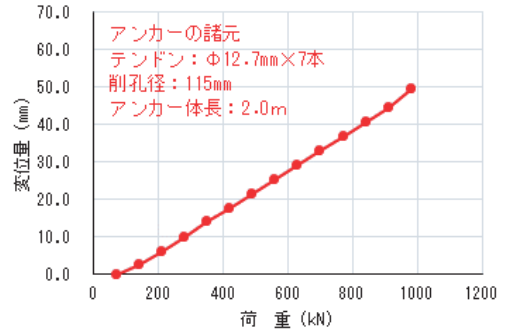
カー体全長のひずみ分布とその変化を調べることを優先して、アンカー体長 1.0m と 2.0m で異なる位置にひずみゲージを貼付することにした。

3.2 軟岩地盤での引抜き実験結果

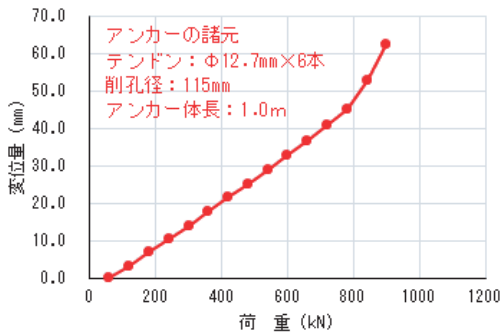
軟岩地盤での実験では、アンカーNo.4~7のアンカー体長 1.0m の場合はアンカー体の引抜き耐力が確認できたが、アンカー体長 2.0m と 3.0m ではPC 鋼材の上限荷重と反力装置の強度により荷重が制限され、引抜き耐力



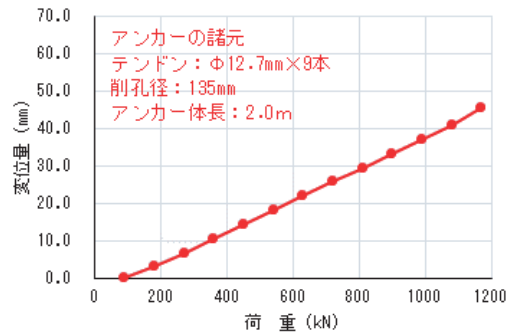
a) アンカーNo.4



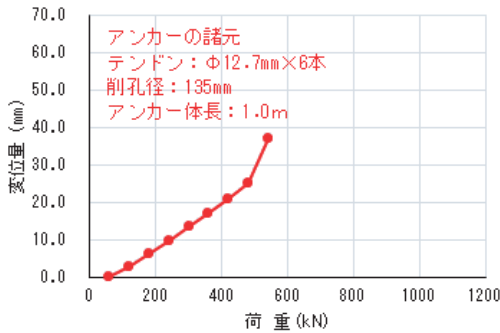
e) アンカーNo.8



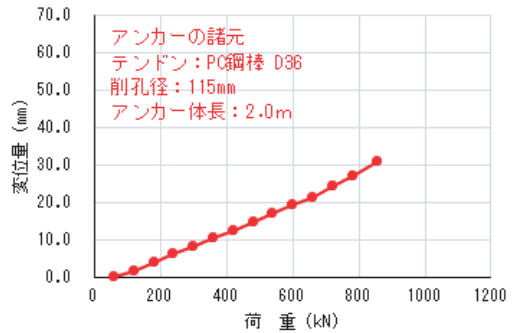
b) アンカーNo.5



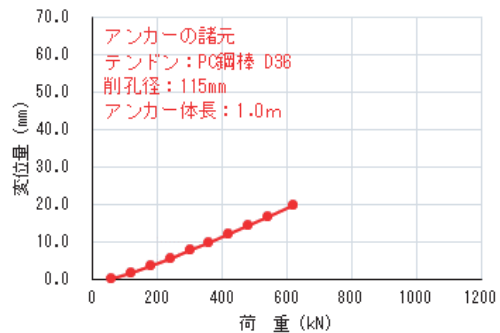
f) アンカーNo.9



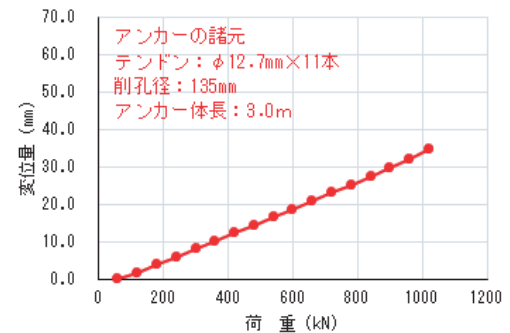
c) アンカーNo.6



g) アンカーNo.10



d) アンカーNo.7



h) アンカーNo.11

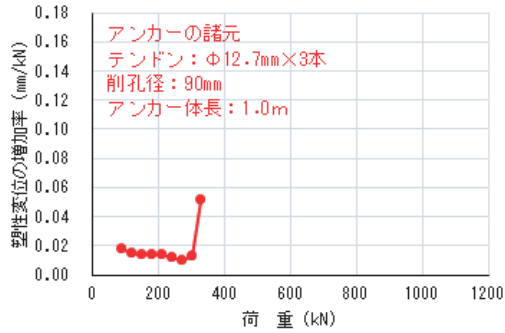
図-16 最終サイクルの荷重-変位量曲線

までの載荷に至らなかった。

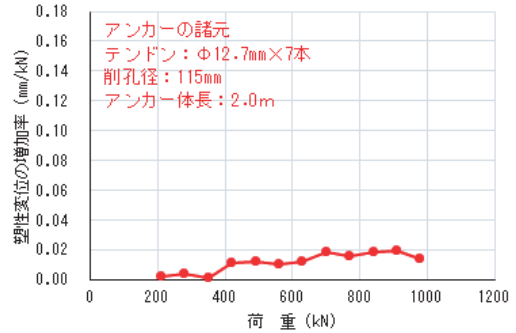
図-16に最終サイクルの荷重-変位量曲線を示す。軟岩地盤での最終サイクルは、アンカーが引抜けたときは引抜け時、引抜けなかったときは最終計測時のサイクルとした。また、荷重増加に対する塑性変位の増加率の変

化を図-17に示す。

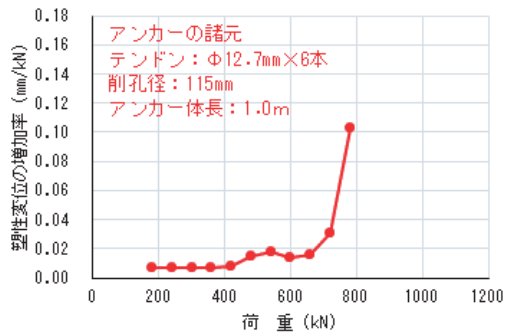
図-16より、アンカーNo.4, 5, 6ではアンカーの引抜き前に変位量の増加がみられるが、アンカーNo.7では確認できない。また、全てのアンカー（アンカーNo.4～11）に共通して、引抜き耐力に至るまで、あるいは最



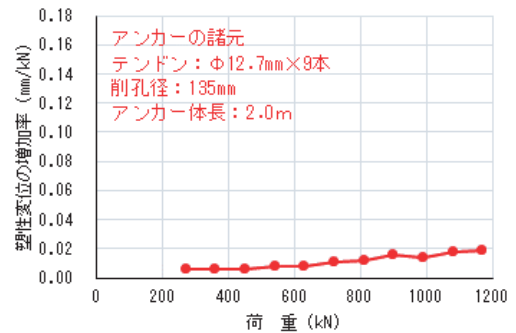
a) アンカーNo.4



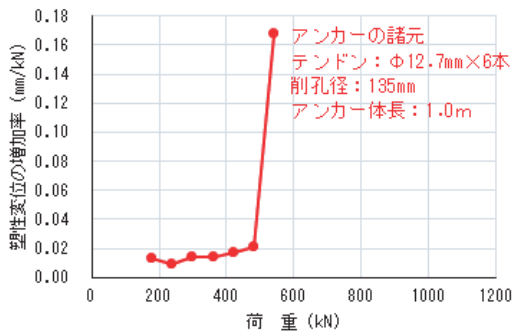
e) アンカーNo.8



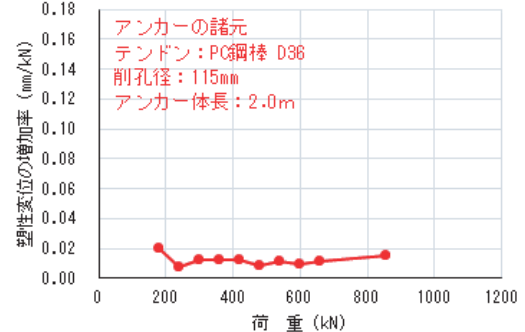
b) アンカーNo.5



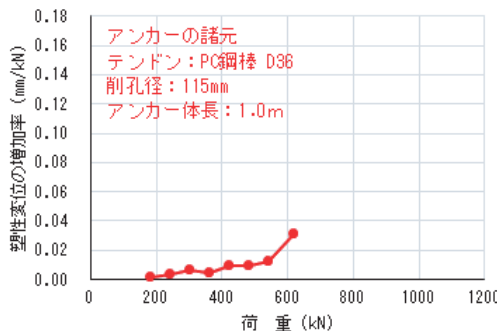
f) アンカーNo.9



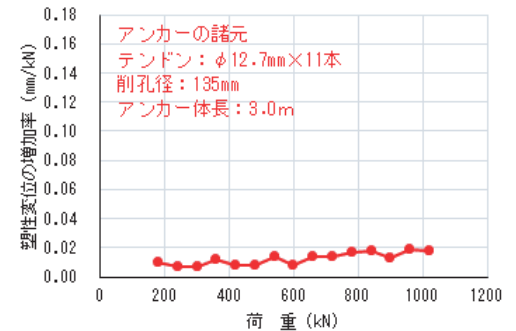
c) アンカーNo.6



g) アンカーNo.10



d) アンカーNo.7



h) アンカーNo.11

図-17 荷重と塑性変位の増加率の関係

最終計測時までの荷重-変位量曲線は直線的で、テンドンとグラウトの付着が適正に保持されていたことが示されている。また、砂礫地盤と同様、弾性変位量はテンドン自由長の理論伸びに沿った値を示し、基準書の管理基準内であった。

引抜き耐力に至るまで、あるいは最終計測時までの塑性変位の増加率は図-17 a) ~h) に示す通り全てのアンカーで、おおよそ 0.02mm/kN 以下である。したがって、アンカー体を本現場の軟岩地盤に設置した場合、塑性変位の増加率が 0.02mm/kN 以下であれば、アンカーは安定状態で引抜きは発生していないと考えられる。この値は、砂礫地盤の実験で得られた 0.10mm/kN の 5 分の 1 になることから、軟岩地盤のせん断変形係数は砂礫地盤の 5 倍程度であると考えられる。

図-16 a) に示すように、アンカーNo.4 のピーク荷重は 390kN である。また、図-17 a) より、荷重を 300kN から 330kN に増加させた際に塑性変位の増加率が急増したため、引抜き耐力は 300kN とする。引抜き耐力時のアンカー体 1m における軟岩地盤の周面摩擦応力度は、 $300\text{kN} \div (1.0\text{m} \times 0.09\text{m} \times \pi) = 1061\text{kN/m}^2$ となる。基準書では軟岩地盤の極限周面摩擦応力度は $1000\text{kN/m}^2 \sim 1500\text{kN/m}^2$ となっており¹²⁾、基準書通りの値である。

同様にして、引抜き耐力が確認できたアンカーNo.4 ~7 のアンカーに関して、図-16 と図-17 から得られた実験結果を表-4 にまとめた。ただし、アンカーNo.5 はテンドン降伏荷重の 90% (842.4kN) を超える 900kN まで載荷しても引抜きに至らなかったため、ピーク荷重は確認できていない。

表-4 の削孔径と引抜き耐力の関係を図-18 のグラフに表した。図-18 には、実験から得た平均周面摩擦応力度による計算値も記載した。図-18 より、軟岩地盤では削孔径 115mm が 135mm よりも大きな引抜き耐力を示すなど、削孔径と引抜き耐力は線形関係にないことがわかる。

アンカーNo.8~11 のアンカー体長 2.0m と 3.0m のアンカーについては、塑性変位の急増がみられず、引抜き耐力を確認することができなかった。

3.3 荷重増加に伴うアンカー体のひずみの変化

荷重増加に伴うアンカー体のひずみを計測した結果を図-19 に示す。図中のひずみ測定位置とひずみの関係を示した曲線を以下「ひずみ曲線」と呼ぶ。図-19 a) ~d) は 1m のアンカー体におけるひずみ分布、e), f) は 2m のアンカー体のひずみ分布である。

摩擦抵抗が無ければひずみはアンカー体全長で同じ値となり、アンカー体の周面摩擦抵抗はひずみの変化を生じさせる。また、ひずみの変化量から周面摩擦応力度を算出することができる。ひずみ曲線の勾配が大きいところでは大きな周面摩擦抵抗が作用しており、ひずみ曲線が直線のときはアンカー体全長に作用している周面摩擦抵抗が同じ大きさであることを示している。

表-4 軟岩地盤での実験アンカーの結果

アンカー No.	削孔径 (mm)	ピーク荷重 (kN)	引抜き耐力 (kN)	周面摩擦応力度 (kN/m ²)
4	90	390	300	1061
5	115	900 以上	660	1827
6	135	540	480	1132
7	115	620	540	1495

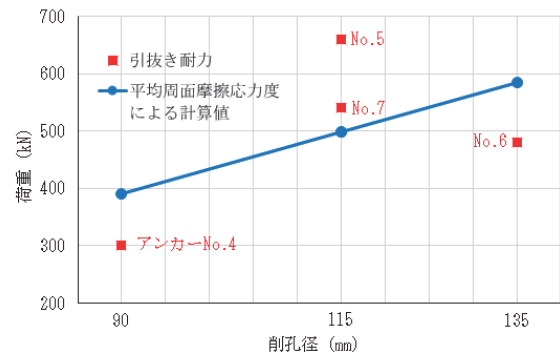


図-18 削孔径と引抜き耐力の関係

図-19 では全てのアンカーに共通して、荷重初期はアンカー体先端部付近においてほとんどひずみが生じておらず、応力の伝達は微小である。荷重の増加に伴って、アンカー体先端部に向って応力が伝達され、図-19 a) のアンカーNo.4 を除いて、ひずみ曲線は直線状になり、その後、アンカー体先端部付近のひずみ曲線の勾配が大きくなっている。

図-19 a) に示すアンカーNo.4 は削孔径 90mm の細径のアンカーで、他のアンカーと異なり、ひずみ曲線が直線状になる前に引抜き耐力に至っている。

また、アンカーNo.7, 10 は PC 鋼棒のアンカーで荷重に対して鋼材断面積が大きいので、図-19 d), f) に示す通り全体的に小さなひずみとなっている。

図-19 に示すひずみの変化量から負担率 br を算出し、この負担率 br を基に、式(1)を使ってアンカー体部位別の周面摩擦応力度を求める。図-20 に荷重増加に伴う周面摩擦応力度の変化を示す。

$$\tau = T \cdot br / (\pi \cdot dA \cdot La) \quad (1)$$

ここに、 τ : 周面摩擦応力度 (kN/m²)

T : 荷重 (kN)

br : 負担率 (%)

dA : 削孔径 (m)

La : 負担するアンカー体の長さ (m)

例えば、図-19 a) に示されているアンカーNo.4 では、荷重が 300kN のとき、自由長との境界から 100mm の位置で 4122×10^{-6} のひずみ、中間部となる自由長との境界から 500mm の位置で 1674×10^{-6} 、先端部に近い自由長との境界から 900mm の位置で 334×10^{-6} のひずみが計測さ

れている。

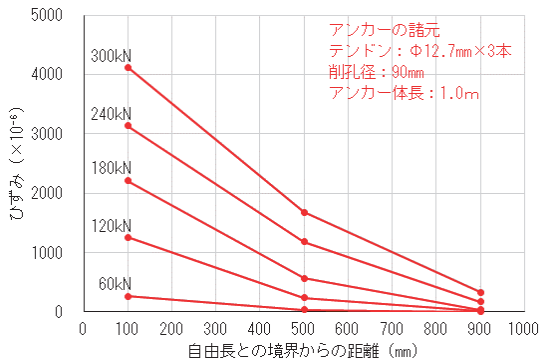
計測データがない自由長との境界と境界から 100mm の間については、境界から 100mm と 500mm の間のひずみ差による勾配でひずみが増加すると仮定し、同様に、境界から 900mm の位置からアンカー体先端までの間は、境界から 500mm と 900mm の間のひずみ差による勾配でひずみが増加するとした。このとき、自由長との境界におけるひずみは、 $(4122 \times 10^{-6} - 1674 \times 10^{-6}) \times \{(1000\text{mm} - 500\text{mm}) / (900\text{mm} - 500\text{mm})\} + 1674 \times 10^{-6} = 4734 \times 10^{-6}$ 、また、アンカー体先端部におけるひずみは、 $1674 \times 10^{-6} - (1674 \times 10^{-6} - 334 \times 10^{-6}) \times (500\text{mm} / 500\text{mm} - 100\text{mm}) = -1 \times 10^{-6} \approx 0$ となる。

アンカー体上部の負担率 br は、 $(4734 \times 10^{-6} - 1674 \times 10^{-6}) / (4734 \times 10^{-6} - 0) \times 100 = 64.6\%$ となり、荷重が 300kN の

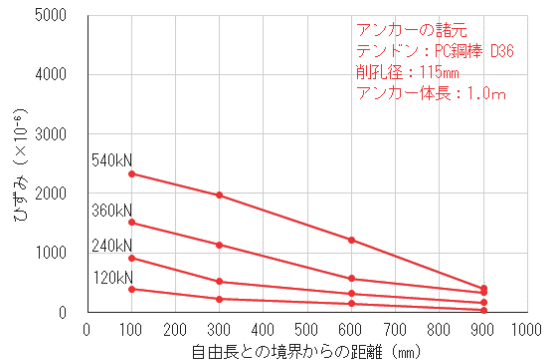
ときにアンカー体上部で $300\text{kN} \times 64.6\% = 193.8\text{kN}$ を負担していることになる。周面摩擦応力度は $193.8\text{kN} / (0.09\text{m} \times 0.50\text{m} \times \pi) = 1371\text{kN/m}^2$ が得られる。

図-20のアンカーNo.4を除いた5本のアンカーに共通しているのは、荷重初期では自由長との境界に近いアンカー体上部での周面摩擦応力度が大きく、荷重が大きくなるにつれてアンカー体上部での周面摩擦応力度が減少し、アンカー体下部で増加してくることである。アンカーNo.5~8では、荷重の増加と共にアンカー体下部の周面摩擦応力度はアンカー体上部よりも大きな値となっている。これは、深さ方向の軟岩の強度変化、もしくは、アンカー体上部のグラウトがアンカー体下部の変形を抑制する効果等が一因と考えられる。

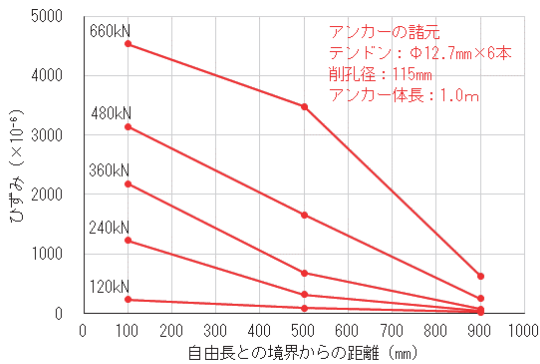
図-20 a) に示すように削孔径 90mm の細径のアンカ



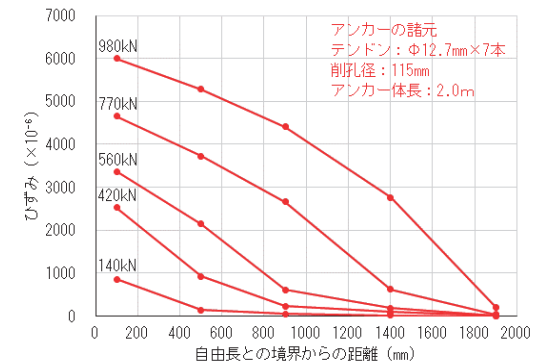
a) アンカーNo.4



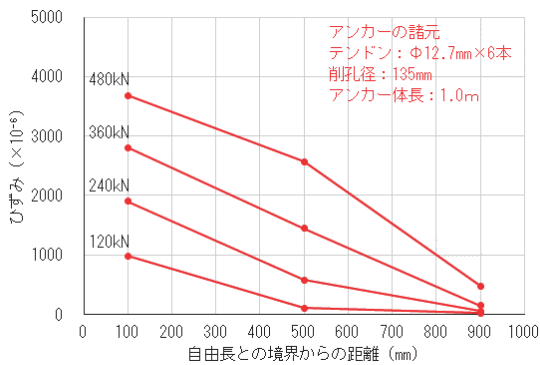
d) アンカーNo.7



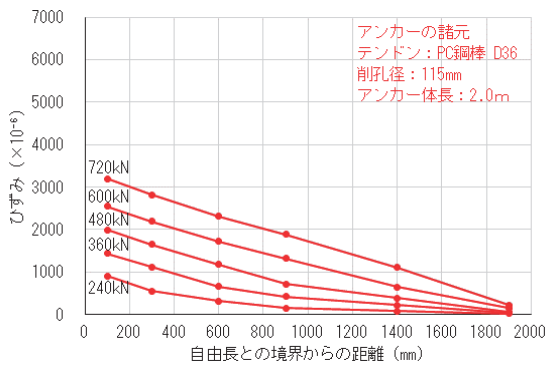
b) アンカーNo.5



e) アンカーNo.8



c) アンカーNo.6



f) アンカーNo.10

図-19 アンカー体 PC 鋼材のひずみ分布図

一No.4 では、アンカー体下部での周面摩擦応力度がアンカー体上部での周面摩擦応力度を超える前に引抜き耐力に至っており、アンカー体上部と下部の曲線は交点をもたない。日本アンカー協会¹³⁾等が、「削孔径を小さくするとテンドンの被りが小さくなって引抜き抵抗が減少する」と指摘しているように、細径のアンカーNo.4が、1mのアンカー体における周面摩擦応力度1061kN/m²の最低値を示した。

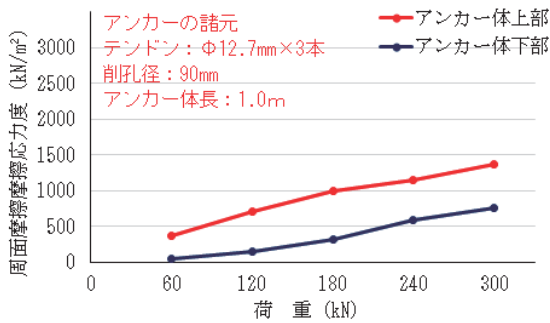
図-20 b) に示すようにアンカーNo.5 では、荷重初期ではアンカー体上部の周面摩擦応力度が下部よりも大きく、480kN のときにアンカー体上部と下部の曲線が交わり、周面摩擦応力度は同じ大きさになっている。このとき、図-19 b) ではひずみ曲線は直線状である。その後、アンカー体上部の周面摩擦応力度は減少し、アンカー体下部では増加して、アンカー体下部の周面摩擦応力度は2718kN/m²の最大値を示している。アンカーNo.5

は、1mのアンカー体における周面摩擦応力度も最大の1827kN/m²であった。

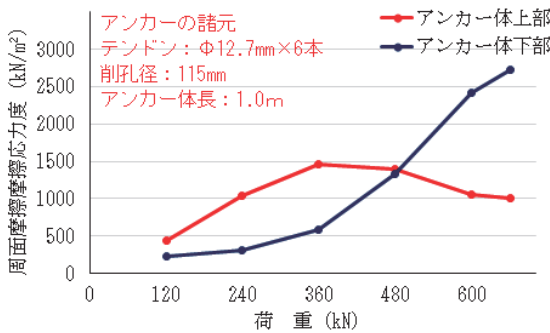
図-20 c), d) に示すアンカーNo.6, 7 は、荷重初期はアンカー体上部の周面摩擦応力度が大きく、荷重に伴ってアンカー体上部は減少し、下部で増加している。アンカーNo.5 と同様、アンカー体下部の周面摩擦応力度が上部より大きくなってから引抜き耐力に至っているが、周面摩擦応力度はアンカーNo.5 に比べると小さい。

アンカーNo.8, 10 はアンカー体長が2mのため引抜き耐力までの荷重ができていないが、図-20 e) に示すアンカーNo.8 は、引抜き耐力が確認できたアンカーNo.5, 6, 7 と同様の挙動を示している。

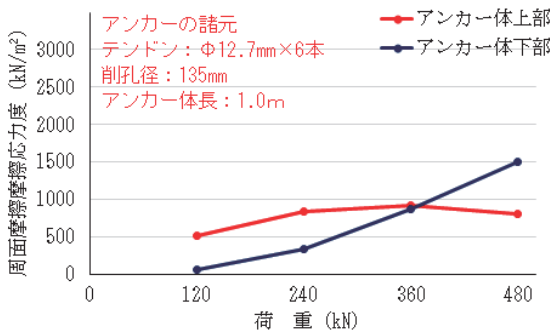
図-20 f) に示すアンカーNo.10 は、荷重初期はアンカー体上部の周面摩擦応力度が大きく、荷重720kNまで変動が少ない。アンカー体中間部の周面摩擦応力度は荷重に伴って増加し、アンカー体下部では増加を示して



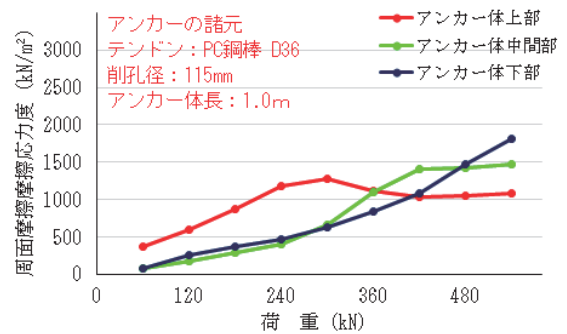
a) アンカーNo.4



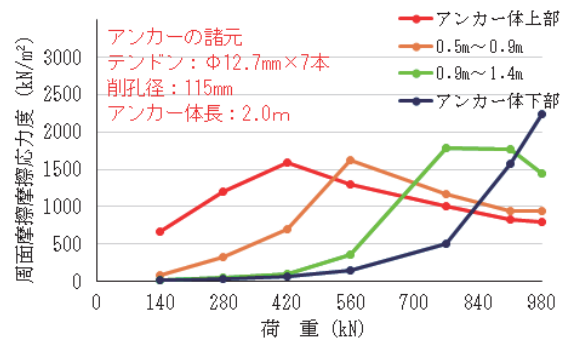
b) アンカーNo.5



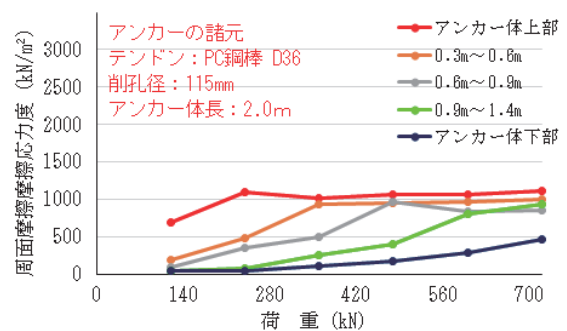
c) アンカーNo.6



d) アンカーNo.7



e) アンカーNo.8



f) アンカーNo.10

図-20 荷重によるアンカー体部別別の周面摩擦応力度の変化

いるものの増加量は少ない。荷重 720kN でひずみゲージに支障が出たため、この後の挙動は確認できていない。

本実験では、アンカー体自体の挙動を確認するために自由長部のグラウトを排除しており、アンカー体上部で得られる周面摩擦応力度が、その地盤の性質に最も近い値を示すと考えられる。これは、摩擦方式引張型アンカーでは自由長との境界から応力が発生してアンカー体先端に向かって伝達されることと、アンカー体上部より上のグラウトが排除されてアンカー体の変形および滑動が阻害されないからである。

表-5 に各アンカーのアンカー体上部の最大周面摩擦応力度を示す。アンカー設計時には地盤固有の値とされる周面摩擦応力度が、削孔径 115mm のアンカーNo.8 で最大値となり、削孔径 135mm のアンカーNo.6 で最小値を示すなど、ばらつきがみられる。

4. 引抜き耐力に関する考察

砂礫地盤の場合には、ロッキング・イン効果の可能性が示唆されたものの、削孔径と引抜き耐力は線形関係にあった。一方、軟岩地盤の場合は、削孔径 115mm が 135mm よりも大きな引抜き耐力を示すなど、削孔径と引抜き耐力の間に線形関係はみられなかった。

軟岩地盤で削孔径と引抜き耐力の間に線形関係がみられない原因として、過大な局部応力の作用によるアンカー体の変形が考えられる。アンカー体は PC 鋼材とセメントペーストで形成され、本実験でのセメントペーストの圧縮強度は 30.5N/mm² が確認されている。

摩擦方式引張型アンカーは、図-21 に示すように荷重の増加に伴ってアンカー軸方向のひずみが大きくなりアンカー体は伸長する。アンカー体が軸方向に伸長すると、ポアソン比に基づいてアンカー体法線方向に変形が起こり、アンカー体は細くなる。このアンカー体の細径

化により地盤との接触面での垂直応力が減少し、摩擦抵抗が小さくなると考えられる。アンカー体の変形量は部分的に異なり、載荷初期には自由長との境界で最大を示す。摩擦抵抗の減少はアンカー体全長に一律ではなく、自由長との境界から始まって荷重の増加に伴って領域は拡大する。一方、砂礫地盤では引抜き耐力が小さく、アンカー体の変形による摩擦抵抗への影響が微小であるため、削孔径と引抜き耐力に線形関係がみられる。

荷重増加によるアンカー体の変形が地盤との接触面での垂直応力を減少させ、摩擦抵抗を小さくするのであれば、アンカー体断面における PC 鋼材外縁から岩盤面までの距離、あるいはグラウト部分の断面積が摩擦抵抗の減少に影響すると考えられる。

図-22 に各アンカーのアンカー体断面図を示す。図-22 には、アンカー体断面における PC 鋼材外縁から岩盤面までの距離が示されている。

図-23 に PC 鋼材外縁から岩盤面までの距離とアンカー体上部の周面摩擦応力度の関係、図-24 にアンカー体のグラウトの断面積とアンカー体上部の周面摩擦応力度の関係をグラフに表した。

PC 鋼材外縁から岩盤面までの距離をグラウトの厚さとする、この厚さが大きいほどひずみによる変形量も大きくなり、アンカー体が細長く変形する。図-23 より、グラウトの厚さがある限界値を超えると、アンカー体上部の周面摩擦応力度が減少傾向に転じることが読み取れる。特にアンカーNo.5 と No.6 は、同じアンカー体長、同じテンドンで削孔径だけが 115mm, 135mm と異なっている。基準書の計算式によれば削孔径 135mm が 115mm の 1.17 倍大きな引抜き耐力となるべきであるが、実験結果は削孔径 115mm が 135mm の 1.38 倍大きな引抜き耐力を示した。このことから、グラウトの厚さが引抜き耐力に影響を及ぼすと推定できる。

また、グラウトの厚さが大きいと PC 鋼材外縁と岩盤面の間の曲げモーメントが大きくなり、グラウト内での破壊が生じると考えられる。瀬崎⁹⁾らのセメントミルクを用いた疑似岩盤による室内実験においても、疑似岩盤の圧縮強度を 16MPa まで上げた場合には、主にグラウト内で破壊がみられ疑似岩盤にはほとんど損傷がなかったとの報告がある。本実験のアンカー体上部の岩盤は CM 級の軟岩であり、グラウト内での破壊が考えられる。

図-24 より、グラウトの断面積とアンカー体上部の周面摩擦応力度に相関関係は確認できないが、断面積が最大 (13722mm²) のアンカーNo.6 でアンカー体上部の周面摩擦応力度が最小 (918kN/m²) になっており、強度

表-5 アンカー体上部の最大周面摩擦応力度

アンカー No.	アンカー諸元	アンカー体上部の最大周面摩擦応力度 (kN/m ²)
4	φ12.7mm×3 本, 削孔径 90mm アンカー体長 1.0m	1371
5	φ12.7mm×6 本, 削孔径 115mm アンカー体長 1.0m	1463
6	φ12.7mm×6 本, 削孔径 135mm アンカー体長 1.0m	918
7	PC 鋼棒 D36, 削孔径 115mm アンカー体長 1.0m	1276
8	φ12.7mm×7 本, 削孔径 115mm アンカー体長 2.0m	1588
10	PC 鋼棒 D36, 削孔径 115mm アンカー体長 2.0m	1103

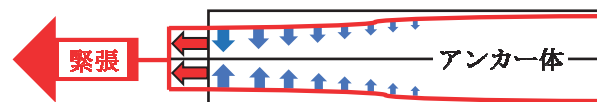


図-21 岩盤に設置したアンカー体の変形模式図 (摩擦方式引張型アンカー)

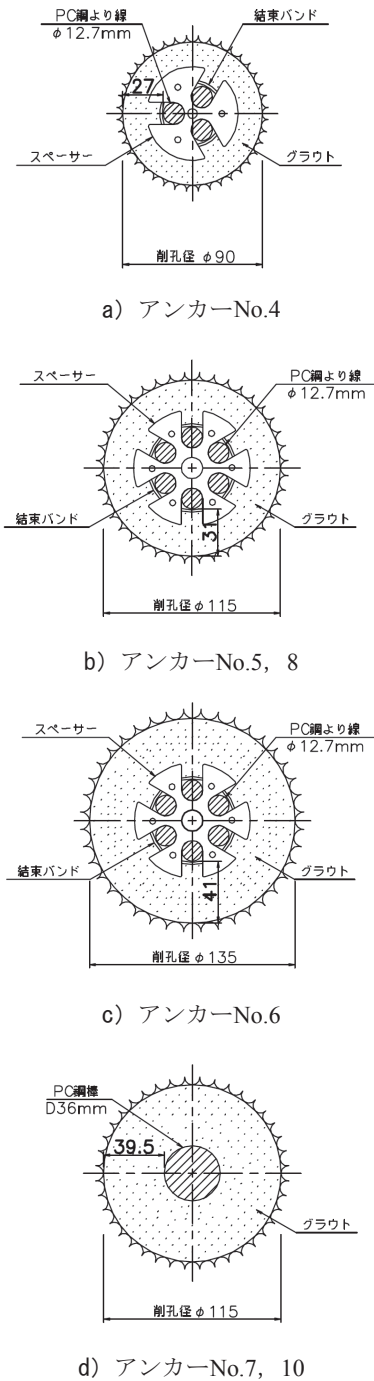


図-22 アンカー体断面図

の大きい地盤においてはアンカー体に占めるグラウトの断面積の大きさが引抜き耐力に影響を及ぼすことも考えられる。

5. まとめ

1995年に、Littlejohnら¹⁴⁾はアンカー体の弾性係数が地盤の弾性係数の10倍より大きい場合、摩擦力はアンカー体に沿って均一に分布するが、10倍以下の場合には摩擦力の分布は不均一であると指摘している。岩盤に

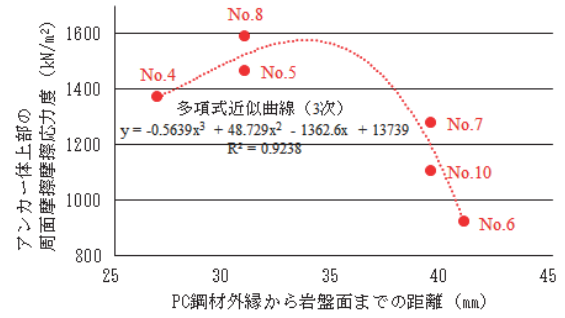


図-23 PC鋼材外縁から岩盤面までの距離と周面摩擦応力度の関係

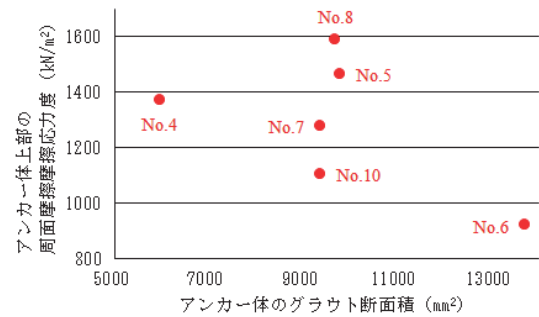


図-24 アンカー体のグラウトの断面積と周面摩擦応力度の関係

おけるアンカーの摩擦力の分布が不均一であることは既に知られているが、その挙動は明らかにされていない。本実験でも、砂礫地盤では基準書の設計方法が適用できる結果が得られたが、軟岩地盤では引抜き耐力、ピーク荷重共に削孔径の大きさと線形関係になく、削孔径115mmが135mmよりも大きな値を示したことから、摩擦力の分布がアンカー体に沿って一様に分布しないことは明らかである。

本実験は、ある限界値を超えた強度の地盤ではアンカー体の引抜けは地盤とアンカー体の周面摩擦だけに依存せず、アンカー体のグラウト内で破壊が生じることを示唆している。この説が正しければ、アンカー体を設置する岩盤の強度がある限界値を超えると、それ以上引抜き耐力が増加しないことになる。この場合、アンカー体のグラウトの強度を上げる、あるいはPC鋼材の断面積および配置、PC鋼材の外縁と岩盤面までの距離の最適化により引抜き耐力の増加が可能と考えられるが、現状において具体的な方法は示されていない。

また、引抜き耐力に至るまでの塑性変位の増加率が、砂礫と軟岩の地盤で固有の値を示した。この値から地盤のせん断変形係数を求め、地質調査報告書等と照査することで、より安全で確実なアンカーを実現する。更に、地盤のせん断変形係数のデータ蓄積に伴い、正確な周面摩擦応力度の把握およびアンカー引張り試験での塑性変位の管理が可能となる。

実際の現場においては、引抜き試験はアンカー体と地盤の極限周面摩擦応力度を確認するため、自由長部のグラウトを排除して行う。一方、供用するアンカーでは、自由長部にも確実なグラウトの充填が義務付けられている。基準書¹⁰⁾では、自由長部のグラウト充填注入の主な目的は、空隙を埋めて防食機能を増加させることと、孔壁周囲のゆるみや風化を抑えることとされている。自由長部のグラウトの有無によりアンカー体の挙動、極限引抜き力は大きく変化するため、引抜き試験で確認した挙動が供用アンカーで再現されるとは限らない。自由長部のグラウトの有無がアンカー体の挙動および引抜き耐力に及ぼす影響を明らかにすることが今後の課題である。

岩盤アンカーの荷重増加に対する挙動、引抜き耐力およびピーク荷重については、グラウトの厚さ、断面積等が影響を及ぼすと考えられるが、本質的な解明には至っていない。今後、過去の引抜き試験データの解析および追加の現場実験を行い、有限要素法による解析も加えて、荷重の増加に伴う岩盤内での応力分布状態、引抜きに至るまでのメカニズムを解明する必要がある。

謝辞

今回の現場実験に関し、黒沢建設株式会社室田学氏、岡田健一氏、株式会社ケーティービー金丸顕丈氏、右田典道氏、株式会社西山建設西山元秀氏には多大なる協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 社団法人土質工学会：アース・アンカー工法一付・土質工学会アースアンカー設計・施工基準一，p.1，1976.
- 2) 山田浩：グラウンドアンカー工法の技術の変遷，土と基礎，Vol.54，No.10，PP.18-20，2006.
- 3) 社団法人土質工学会：アース・アンカー工法一付・土質工学会アースアンカー設計・施工基準一，pp.2-3，1976.
- 4) 独立行政法人土木研究所，他：共同研究報告書 アンカーへの取付け・交換が容易な新型アンカー荷重計の開発，p.336，2010.
- 5) 藤田圭一，上田勝基，草深守人：アースアンカーの荷重-変位量関係の予測方法，間組研究年報，pp.1-5，1977.
- 6) 上田勝基，草深守人，中村陸地：アンカー体の周面摩擦力について，第25回土質工学シンポジウム，pp.31-38，1980.
- 7) 藤田圭一：アースアンカー工法の現況，基礎工，Vol.7，No.6，pp.2-7，1979.
- 8) 古山章一，東耕太郎：軟岩地盤に定着した永久グラウンドアンカーの繰返し載荷試験，第28回土質工学研究発表会，pp.2093-2094，2003.
- 9) 瀬崎茂，浜野浩幹：岩盤を対象とした摩擦型アンカー体の支持機構と設計上の留意点，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.67，No.3，pp.319-338，2011.
- 10) 公益社団法人地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，p.96-97，2012.
- 11) 公益社団法人地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，p.178，2012.
- 12) 公益社団法人地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，p.78，解説表-6.6，2012.
- 13) 社団法人日本アンカー協会：グラウンドアンカー施工のための手引書，p.103，2003.
- 14) Littlejohn, G.S. and Bruce, D.A. : Rock Anchors-Design and Quality Control, *American Society of Civil Engineers*, pp.77-88, 1977.

(2017年6月18日 受付)