

# 岩盤を対象とした摩擦型アンカー一体の支持機構と設計上の留意点

瀬崎 茂<sup>1</sup>・浜野 浩幹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(株)日西テクノプラン (〒690-0011 島根県松江市東津田町1329-1)

E-mail: sesaki@ntp-ct.co.jp

<sup>2</sup>正会員 松江高専名誉教授 (〒690-0862 島根県松江市比津が丘 1-8-24)

E-mail:hamanohrk@hotmail.com

グラウンドアンカー工が我が国に導入されてから 50 年近くが経過した。その永久アンカーとしての施工実績は既に年間 10 万本程度まで増加している。しかし、近年その損傷事例がしばしば報告されるようになってきた。設計上に問題点があるとすれば、特に岩盤における支持機構が十分解明されていないことにひとつの要因が考えられる。本研究では、岩盤を対象としたアンカー一体の挙動を詳しく調べることで支持機構の解明を図り、設計上の留意点について提案する。

**Key Words :** anchorage, permanent structure, bonded length, design standard, wedge

## 1. はじめに

永久アンカー工のピーク時施工延長は年間 1,600km<sup>1)</sup> (約 10 万本) 程度に達しているが、近年その損傷事例が専門誌等で取り上げられ、筆者らの周辺でもそのような事例に遭遇する機会が多くなった。

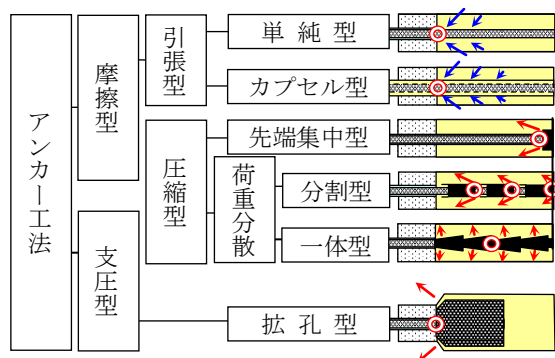
仮にアンカー一体の設計上に問題があるとすれば、アンカー一体長と極限引抜き力は必ずしも比例しないこと<sup>2)</sup>、あるいは図-1のように摩擦型アンカーにおいて、引張型と圧縮型では支持機構が異なる<sup>3)</sup>にもかかわらず同一基準で設計されていること等に原因が考えられる。

一方、アンカー工の指針となっている「グラウンドアンカー設計・施工基準：地盤工学会」(以下、基準書と呼ぶ)は1988年に制定され、それまでの仮設を主体とした「アースアンカー設計・施工基準」(1977年)に永久

用を加えたものとなっている。

地盤工学ハンドブック<sup>4)</sup>によれば、永久アンカーの定着地盤は“強固な地盤、土木では岩盤が多い”などとしているが、基準書に示す研究資料は主に未固結地盤を対象とし、岩盤に関するものはほとんどない。しかも“基準書に示すアンカー一体の極限周面摩擦抵抗は1975年以前の試験データに基づくもので、施工技術の進歩した現在では必ずしも適切でない”といった指摘<sup>5)</sup>もなされている。

このような背景から、本研究では主にセメントミルクを用いた疑似岩盤でのアンカー一体の挙動等を精査し、摩擦型アンカー一体の支持機構の解明を試みたほか、特に地すべり等の斜面对策における設計上の留意点について新たな提案を行う。



◎ 初期荷重作用点  
図-1 アンカー一体の荷重作用点の違いによる区分

## 2. 設計上の問題点

諸外国でグラウンドアンカーの施工が本格化するのは1950年代であり、仮設用基準が作成されたのは1970年代である。我が国もこれに追随するが、すでに“1970年代半ばからアンカー工の機能低下に関する報告があった”<sup>6)</sup>とされ、我が国での各種アンカー工法の開発もこの時期に集中している(図-2)。

一方、既設アンカーの残存引張り力に関して、たとえば表-1のような報告<sup>7)</sup>がある。これは道路路面16地区(55本、施工後約10年以上経過)のアンカーについ

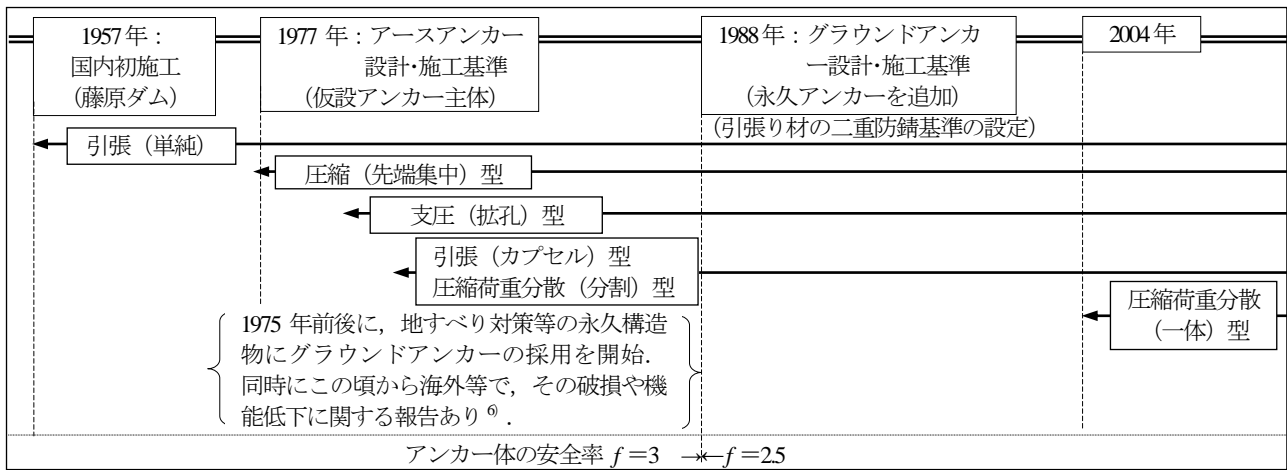
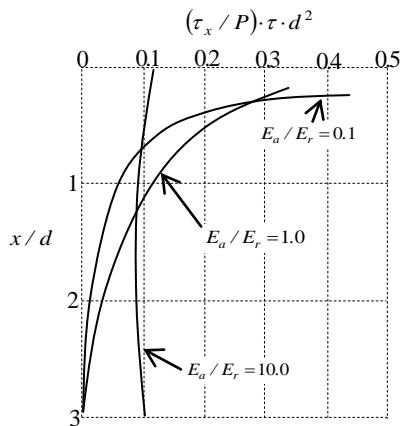


図-2 我が国アンカー工の工法開発と技術変遷の概要



ただし、 $x$ はアンカー体荷重端からの深度、 $\tau$ は $x$ における付着力、 $d$ はアンカー体径、 $P$ は作用荷重。…地すべり防止技術研修テキスト、上巻、昭和59年度版、p.272 図2-15を転記。

図-3 アンカー体に沿った岩盤/グラウト境界面でのせん断応力分布 (Coates and Yu, 1970)

て調査したものであるが、現状荷重が初期緊張荷重 $P$ の50%以下に低下したものが20本(36.3%)に達している。これらがアンカー体の引抜けによるものとすれば、設計上においては特に以下のものとの関連性が考えられる。

1. 岩盤におけるアンカー体の支持機構と有効区間
  2. アンカー体の長期的変位
  3. 極限引抜き荷重の判定基準
- 以下、各々について詳述する。

(1) 岩盤におけるアンカー体の支持機構と有効区間

基準書<sup>8)</sup>によれば“アンカー体とはグラウトの注入により造成され、引張り部からの引張り力を地盤との摩擦抵抗もしくは支圧抵抗によって地盤に伝達するために設置する抵抗部分をいう”とされている。その標準アンカー体長を3~10m<sup>2)</sup>としているが、これは未固結地盤での事例を基にしたものであり、岩盤を対象とした資料等による根拠は示されていない。

表-1 既設アンカー工の残存引張り力の測定例<sup>7)</sup>

定着時緊張力 $P$ に対する残存引張り力の割合区分 (設計アンカー力 $T_d$ . $T_d > P$ )	数量	
	箇所	%
$T_d$ 以上	8	14.5
$T_d$ 以下、かつ $P$ 以上	3	5.5
$P \sim 0.8P$	10	18.2
$0.8P \sim 0.5P$	14	25.5
$0.5P \sim 0.2P$	13	23.6
$0.2P \sim 0$	7	12.7
計	55	

(文献7に加筆)

一方、定着地盤とアンカー体グラウトとの極限周面摩擦抵抗は式(1)より求められる。

$$\tau = \frac{T_{ug}}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1)$$

ここに、 $\tau$ は極限周面摩擦抵抗、 $T_{ug}$ は極限引抜き荷重、 $d$ はアンカー体径、 $l$ はアンカー体長である。

中村<sup>9)</sup>は式(1)の前提条件として以下のように紹介している。

「アンカー体の破壊は地盤とグラウトの境界面での滑りによるか(滑らかなボーリング孔の場合)あるいは地盤が弱くボーリング孔壁が粗い場合は地盤とグラウト境界面でのせん断によって起こる: Littlejon et al, 1977」

さらに岩盤を対象としたアンカー体の周面摩擦抵抗を付着力とみなした上で、図-3の円筒形アンカー周辺での応力分布を有限要素法を用いて理論的に検討した研究結果を基に、以下のように結論づけている。

「アンカー材の弾性係数 $E_a$ と地盤の弾性係数 $E_r$ との関係において、“ $E_a/E_r > 10$ ”といった軟らかい岩盤の場合は、付着力はアンカー体に沿って均一に分布するが、多くの場合“ $E_a/E_r = 0.1 \sim 1$ ”の岩盤中に設置されているため、付着力の分布は不均一と考えるべきである」

これに対して基準書<sup>10)</sup>では“アンカーの極限引抜き力とは、地盤とアンカー体との間に生じている付着、摩擦もしくは支圧に終局限界状態の破壊が生ずる力”とし、

“場合によってはこれらが複合的に作用する”といった表現にとどまっている。

このように岩盤を対象としたアンカー体の支持機構や引抜き抵抗を確実に発揮する有効区間は必ずしも明確になっていない。しかも岩盤での付着力が不均一との指摘があるにも関わらず、現状では均一なものとして取り扱うなど曖昧な部分も見られる。

このような点を解明するため、本実験では主にセメントミルクを用いた疑似岩盤でのアンカー体の引抜き抵抗や応力状態を基に、その支持機構と有効区間の確認を行った。なお有効区間とは“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”とする。

### (2) アンカー体の長期的変位

アンカー工の耐久性については、現在世界的に問題となっており<sup>11)</sup>、日本でもその被災事例が報告されている<sup>12)</sup>。しかし、現状では引張り材の腐食に関する議論が主体でアンカー体の機能に関するものは少ない。特にアンカー体の設計はその支持機構や変位特性を踏まえる必要があり、ここでは各種アンカー体について約3年間におよぶ変位観測（室内吊り下げ試験）を行い、これらを検証した。

### (3) 極限引抜き荷重の判定基準

式(1)に示したアンカー体の極限引抜き荷重の判定は、例えば図-4のような荷重-変位量曲線を用いて行われる。同図は荷重段階における引張り材の全変位量（伸び）と塑性変位量を示しており、一般に引張り材の塑性変位は許容荷重以内では生じないことから、図に示す塑性変位は主にアンカー体の引抜き変位を反映するものといえる。

一方、基準書<sup>13)</sup>における極限引抜き荷重の判定基準は“塑性変位量曲線の勾配が急激に下向きとなった時点”などとするで行われているが、引抜けに至るまでの塑性変位の取扱について具体的なものは示されていない。永久構造物として設計する場合その性状確認が不可欠であり、ここではアンカー体やその周辺地盤の応力状態を測定することでこれを検証した。

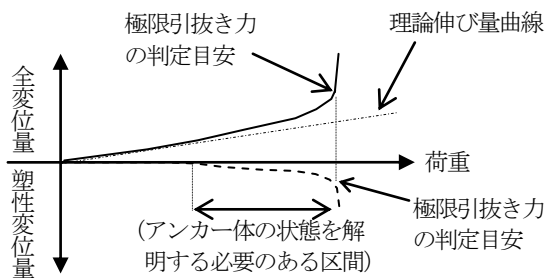


図-4 荷重-変位量曲線（引抜き試験）による極限引抜き力の判定基準概念図

## 3. 岩盤を対象としたアンカー体の支持機構と有効区間

図-1に示したアンカー形式のうち、引張-単純型（以下、引張型と呼ぶ）、圧縮-先端集中型（以下、圧縮型と呼ぶ）、圧縮-荷重分散-一体型<sup>14)</sup>（以下、圧縮-分散型と呼ぶ）について、アンカー体の支持機構や有効区間を確認するための実験をおこなった。実験項目はアンカー体の解体観察、引抜き試験、応力測定である。

### (1) アンカー体の解体観察による支持機構と有効区間の判定

アンカー体の引抜け破壊形態からその支持機構や有効区間を直接確認するための模型実験を行った。

#### a) 実験仕様

実験仕様を表-2に示す。引張り材は図-5のように、引張型および圧縮型ではφ6mm総ネジ鉄筋を使用した。

圧縮型の拘束具（アンカー力を被定着材に伝達させる部材）はナット2ヶ（φ8mmの円形に加工）を使用し、それ以外の引張り材はビニールテープでシースした。

圧縮-分散型の拘束具はφ8mmの丸鋼を図-5のように削りだした。さらにアンカー体拘束具がくさび機能を発揮（可動状態）するよう引張り材全体を塗料でシースした。

引張型および圧縮型のアンカー体長は試験孔径1cmに対して60cm、圧縮-分散型では12.6cmとした。圧縮-分散型を短くしたのは、アンカー体拘束具設置区間と有効区間が等しくなることがすでに確認されていること<sup>15)</sup>、および引抜き破壊を容易にし、被定着材の変形を観察しやすくするためである。

アンカー体を拘束する被定着材（疑似岩盤）はセメントミルクで構築し、その強度は地すべり地での仕様を前提に $q_u=2\sim 16\text{MPa}$ とした。被定着材の強度差は水セメント比（40~190%）およびベントナイトの配合（セメント：ベントナイト=40kgf：15kgf）で調整した。

試験体枠は図-6のように引張り試験時に変形しないよう、鋼製枠（引張り側を除き全面拘束）を用いた。

表-2 アンカー体解体観察用引抜き試験仕様

アンカー形式	引張型	圧縮型	圧縮-分散型
実験数量	3本	3本	1本
アンカー体径	10mm（アンカー体グラウト強度 $q_u=32.3\text{MPa}$ ：セメントミルク）		
引張り材仕様	φ6mm総ネジ鉄筋（ss400） 引張り強さ11.3kN/本		丸鋼φ6.4-8mm（ss400） 引張り強さ12.9kN/本
アンカー体長	60cm		12.6cm
被定着材（セメントミルク）の強度	$q_u=2.9, 13.7, 16.0$	$q_u=2.0, 2.7, 3.5, 13.7, 16.0$	$q_u=2.0$
試験体枠	鋼製枠：幅40~60cm、長さ60cm、高さ7cm、板厚3mm		鋼製枠：幅20cm、長さ20cm、高さ1.5cm、板厚5mm

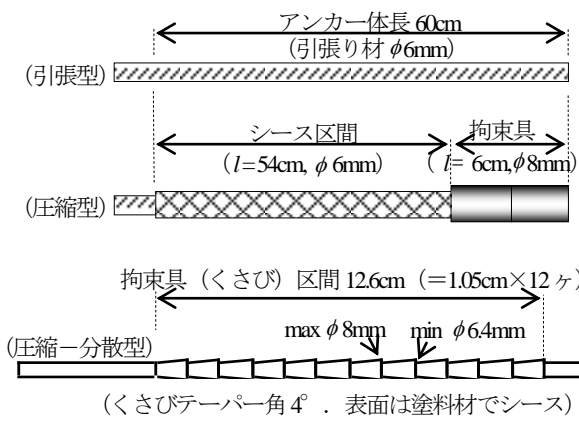


図-5 アンカー体観察のための引抜き試験用引張り材仕様

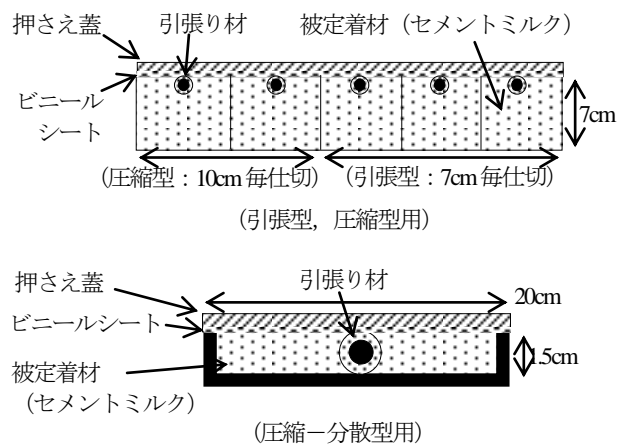


図-6 アンカー体解体観察用試験体枠断面図

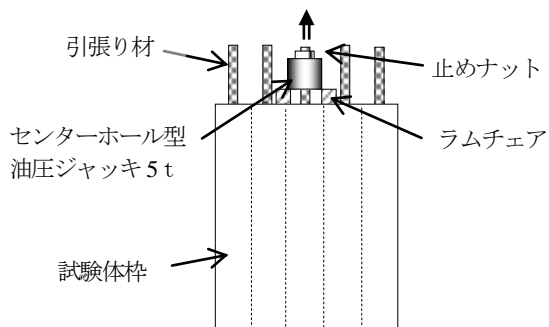


図-7 アンカー体解体観察用引抜き試験装置

引張型および圧縮型では被定着材の拘束力を高め、かつ隣接する試験体との緩衝を避けるため、試験体毎に仕切り板(3mm厚の鉄板)で縁切りした。その仕切り間隔は後述するアンカー体から伝わる主応力の影響範囲(第3章3節 図-29A, B. アンカー体径の4.3倍)を基に、引張型で7cm(アンカー体径の7倍)とした。圧縮型は引張型より影響範囲が大きいものと考え、10cm(アンカー体半径の10倍)とした。

その他、鋼製枠内部には突起(鉄筋φ8mm, 7.5cm間隔)を設け、被定着材の拘束力を一層高めるようにした。押さえ蓋はボルト止めとし、蓋裏全面にビニールシートを貼り付けることで、試験体(アンカー体および被定着材)の乱れを防ぐようにした。

圧縮-分散型の試験体枠は図-6のように20cm×20cm(厚さ1.5cm)のトレー型(アンカー孔以外全面拘束)とし、主にアンカー体側方への力の伝搬状況を確認できる構造とした。アンカー体にはくさび力が働くため、試験体枠の幅を広く、板厚も5mmと幾分厚くした。押さえ蓋の裏には他のものと同様に、ビニールシートを貼り付けた。

アンカー体および被定着材のグラウトはブリージングによる試料の不均一化を避けるため、アンカー引張り側を天端にした状態(試験体は鉛直状態)で行なった。

各アンカー孔の構築は、あらかじめ試験体枠内にφ10mmのスモール管を設置しておき、被定着材を充填、養生後これを引抜く方法とした。アンカー体グラウトの

強度は $q_u=32.3\text{MPa}$ とし、孔底より充填しながらオーバーフローを確認後引張り材をセットした。

引抜き試験は図-7のように各アンカー体の引張り方向での変位を拘束しないよう、ラムチェアとセンターホール型ジャッキを用いた。引張り荷重を徐々に上げながら荷重落ち(引抜け)を確認した段階で解体し、アンカー体および被定着材の破損状況を観察した。

## b) 実験結果

### ○引張型

図-8は引張型の実験結果であり、アンカー力がアンカー体に最初に伝達する位置(以下、初期荷重作用点とし、○で示す)よりメッシュ(××)で示す領域で相対的にクラック等による損傷が大きく、かつ連続的に分布している。被定着材の強度差( $q_u=2.9\sim 16\text{MPa}$ )に関わらず同様の傾向がみられることから、これらはアンカー力が伝達分散され、所用の引抜き抵抗を発揮した痕跡と考えられる。当領域を前述した“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”と仮定し、以下引張り軸方向の上記損傷領域を有効区間、これに直交する半径方向の損傷領域を有効幅と呼ぶ。

クラックの形態は被定着材の強度 $q_u$ により異なり、図-8Aの $q_u=2.9\text{MPa}$ (写真-1)では被定着材内に八の字状の模様が形成され、これの中央付近で破断しているものと考えられる。図-8Bの $q_u=13.7\text{MPa}$ (写真-2)では初期荷重作用点より10cm付近までは断続的な漏斗状の引抜き形態を示すが、これより先端側では主にアンカー体グラウト内で断片的に破断している。さらに図-8Cの $q_u=16\text{MPa}$ (写真-3)では主にアンカー体グラウト内で破断し、被定着材にはほとんど損傷がない。

これらのことから引張型アンカー体の有効区間および支持機構は図-9のように考えられる。図-9Aに示すようにアンカー体が被定着材と付着した状態で引張り方向に細ブロック化すれば、アンカー力の分散により所要の引抜き抵抗を得ることができる。しかし、引張り側から遠い位置ではアンカー体や被定着材の拘束力が相対的に高まり、クラック形成によるアンカー力の分散といった現象は生じにくい。

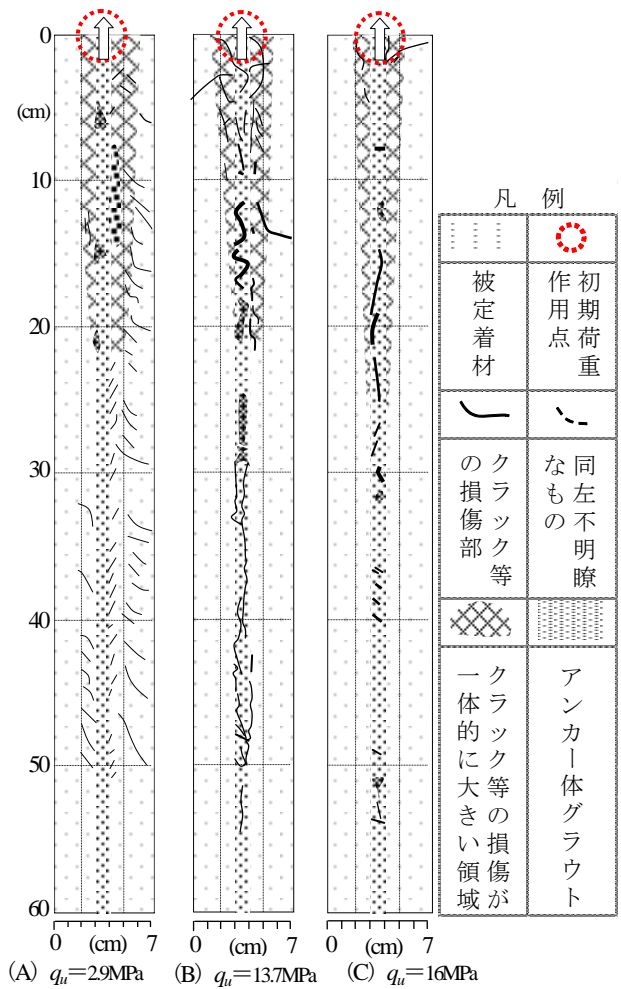


図-8 引張型アンカー体引抜き断面 (クラック図)

分散できない場合はアンカー力が引張り材の1点に集中する. この場合, 引張り材とグラウト材の付着面積はグラウト材と被定着材のそれより小さくなるため (本実験では約 40%減), 引張り材は単独で引き抜けやすくなる. 以上のような支持機構において, 引張型は亀裂の多い地盤や軟質地盤など変形しやすい地盤に比較的適応しやすいことが考えられる.

一方, 被定着材の強度  $q_u$  と引抜き抵抗に関しては以下のように考えられる. アンカー体の有効幅は図-8A の  $q_u=2.9\text{MPa}$  の場合で最大 2.5cm (アンカー体半径 0.5cm の 5 倍), 図-8C の  $q_u=13.7\text{MPa}$  の場合で 1.5cm (アンカー体半径の 3 倍) と, 強度が低いほど有効幅が大きい. したがって軟質な場合はアンカー体と被定着材との付着強度は小さいが, 有効幅が大きいため相応の引抜き抵抗が得られる.

逆に被定着材が硬質な場合は有効幅は小さいが, 被定着材の拘束力が大きく付着強度も高くなるため相応の引抜き抵抗が得られる. 実際の工事では節理等の不連続面による複雑な破壊形態が予想され, 上記のような支持機構においては引抜き抵抗のばらつきが大きくなることが考えられる.

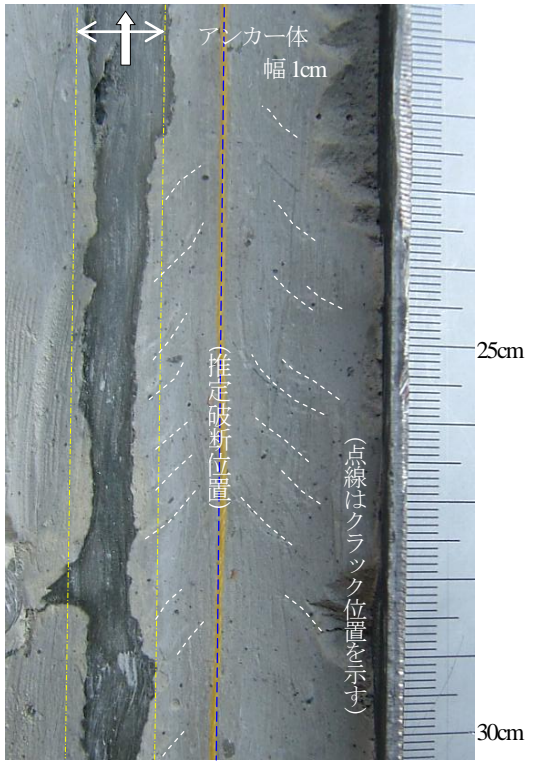


写真-1 引張型アンカー体沿いの被定着材内の破断状況 (荷重作用点より 25cm 付近. 図-8 A 参照)

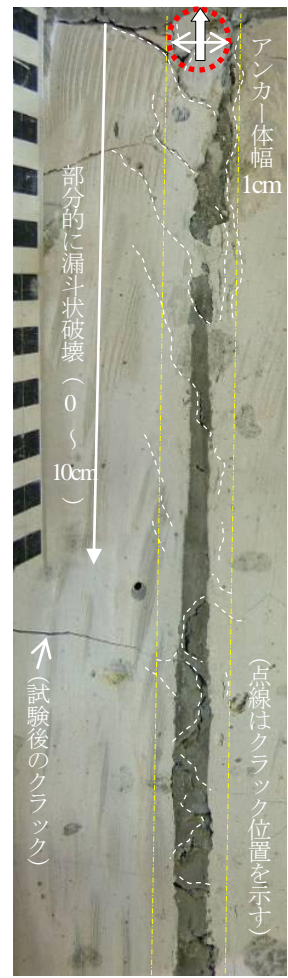


写真-2 引張型アンカー体 (有効区間の破断状況. 荷重作用点より 0~20cm 区間. 図-8 B 参照)

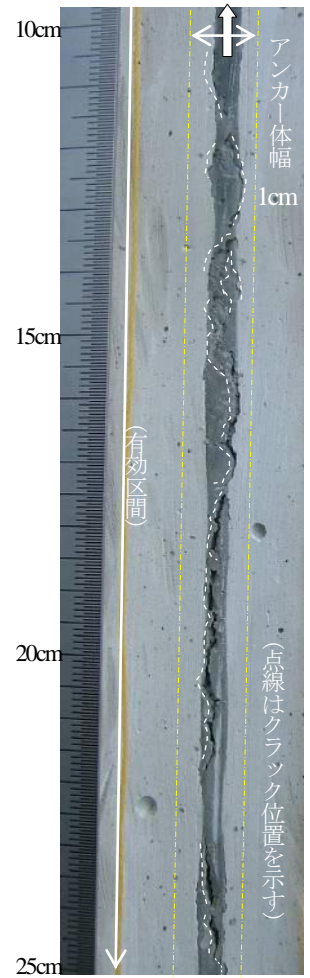


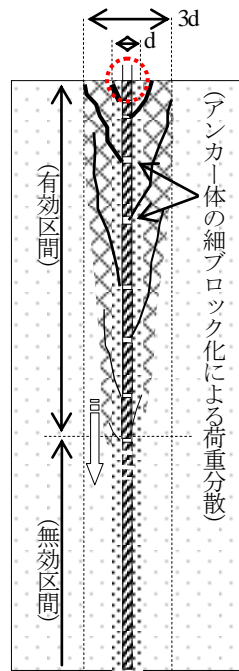
写真-3 引張型アンカー体 (グラウト内での破断状況. 荷重作用点より 10~25cm 区間. 図-8 C 参照)

凡 例

	初期荷重作用点
	引張り材とグラウトの付着部
	アンカー体グラウト材
	クラック
	被定着材
	被定着材の一体的損傷領域

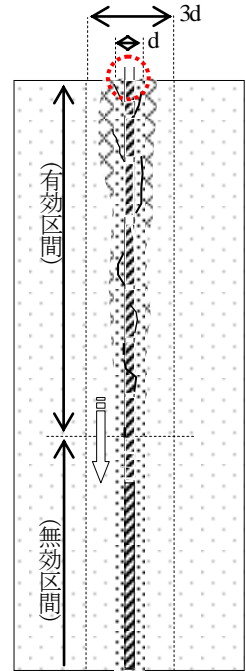
アンカー体および被定着材にクラックが発生することでアンカー力が分散され、所要の引抜き抵抗を發揮するが、極限引抜き力に達した段階でこれらの損傷領域が一体となって剥離する。

有効区間より被定着材の拘束度が高く、アンカー体周辺へのクラック形成によるアンカー力分散が困難となる。そのためアンカー力は引張り材周辺に集中し一気に先端部まで引抜ける。



被定着材が軟らかい場合よりアンカー体の拘束度が高いため、アンカー力分散もアンカー体を中心とした範囲にとどまり、極限引抜き力に達した段階でこれらの損傷領域が一体となって引抜ける。

被定着材の拘束度は有効区間よりさらに高まり、アンカー力分散は一層困難となる。そのためアンカー力はアンカー材周辺に集中し、一気に先端部まで引抜ける。



(A) 被定着材が軟らかい場合

(B) 被定着材が硬い場合

図-9 引張型アンカー体の支持機構と有効区間

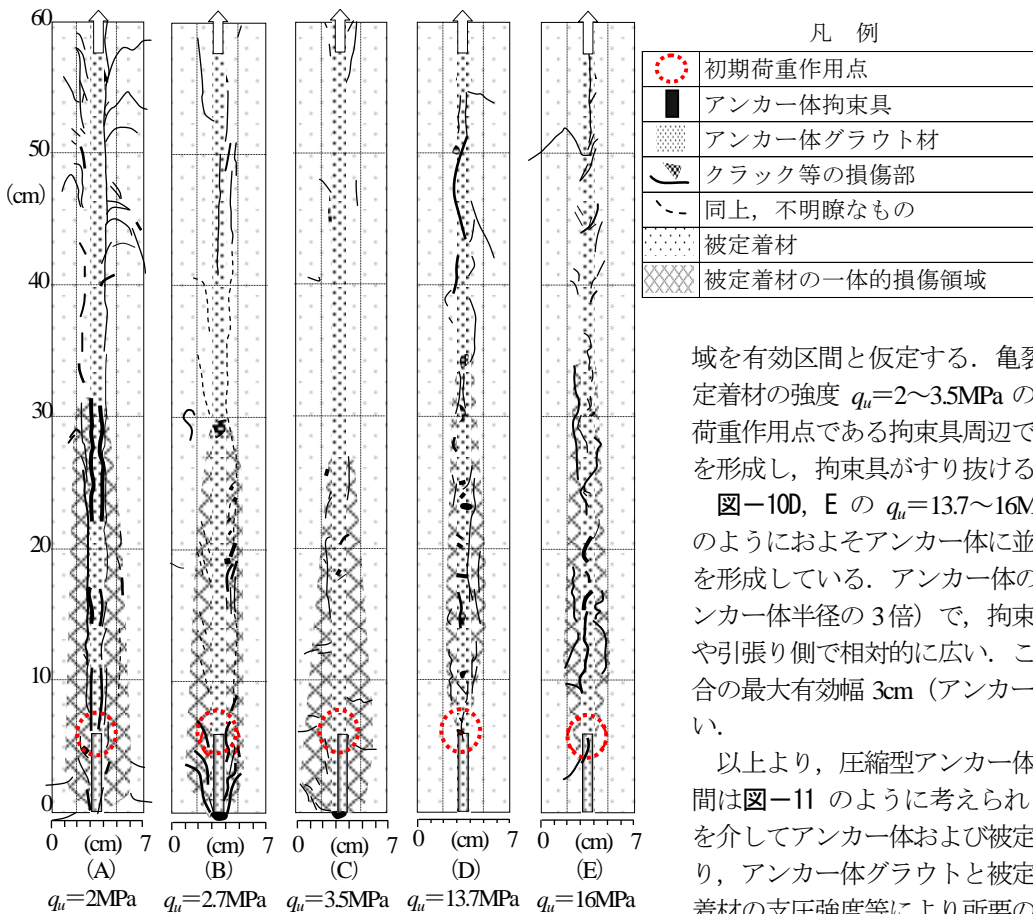


図-10 圧縮型アンカー体の引抜き断面 (クラック図)

○圧縮型

図-10は圧縮型の実験結果であり、初期荷重作用点(拘束具位置)より、メッシュ(××)で示す領域でアンカー体および被定着材の損傷が連続的に大きく、当領

域を有効区間と仮定する。亀裂形態は図-10A~Cの被定着材の強度  $q_u=2\sim 3.5\text{MPa}$  の場合、写真-4のように荷重作用点である拘束具周辺で押し抜きせん断状の亀裂を形成し、拘束具がすり抜けるように変位している。

図-10D, Eの  $q_u=13.7\sim 16\text{MPa}$  の場合では、写真-5のようにおよそアンカー体に並行する断続的なクラックを形成している。アンカー体の有効幅は最大1.5cm(アンカー体半径の3倍)で、拘束具位置およびこれよりやや引張り側で相対的に広い。これは  $q_u=2\sim 3.5\text{MPa}$  の場合の最大有効幅3cm(アンカー体半径の6倍)より小さい。

以上より、圧縮型アンカー体の支持機構および有効区間は図-11のように考えられる。アンカー力は拘束具を介してアンカー体および被定着材に圧縮力として伝わり、アンカー体グラウトと被定着材との付着強度や被定着材の支圧強度等により所要の引抜き抵抗を發揮する。極限引抜き力に達した段階で、拘束具は押し抜きせん断状に引き抜けようとするが、被定着材の拘束力が高いため、最終的に拘束具周辺のグラウト材や被定着材が破壊し、これにくい込むように引き抜ける。

このような支持機構からは、脆弱部を不規則に介在する地盤などにおいて、特に拘束具の設置位置に注意が必

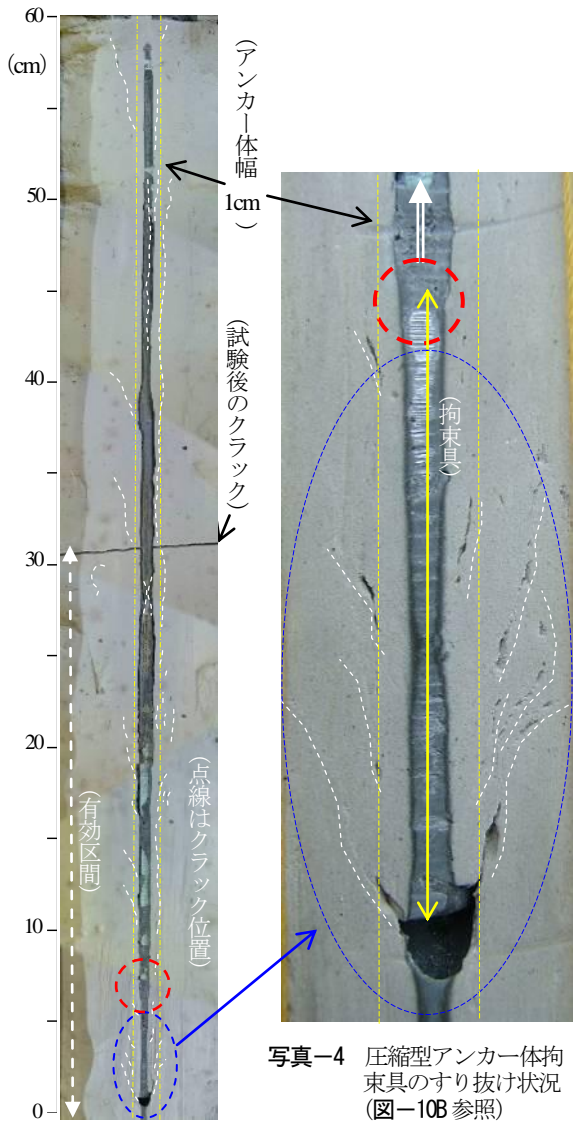


写真-4 圧縮型アンカー体拘束具のすり抜け状況 (図-10B 参照)

要といえる。また引張型と同様に有効区間が限られており、アンカー体を長くするよりアンカー体径および拘束具径を大きくする方が支圧抵抗が大きくなり、引抜き抵抗に対して有利といえる。

なお、現場試験ではアンカー体の引き抜け後、拘束具をさらに抜いた段階で再度引抜き抵抗が得られることがあり、引張型ほど被定着材全体の損傷度は大きくないものと考えられる。さらにアンカー体の引き抜け時に爆発的破壊音を発することが多く、拘束具周辺のグラウト材や被定着材が一気に局部破壊するものと考えられる。

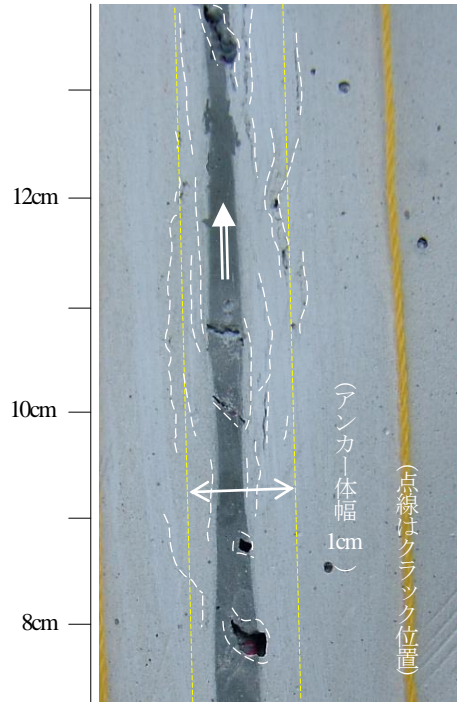
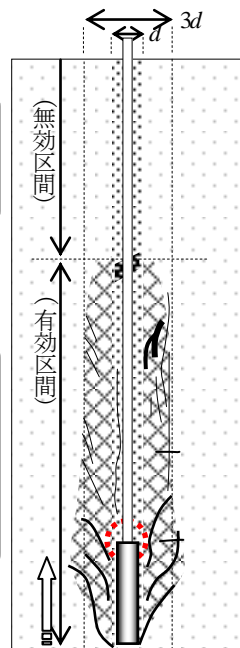


写真-5 圧縮型アンカー体に並行する破断面 (荷重作用点より 10cm 付近. 図-10 D 参照)

有効区間に比べ先端部での引抜きによるダメージが少ないため、再度のアンカー力に対して、ある程度の引抜き抵抗を發揮する場合がある。

アンカー体と被定着材との付着力や被定着材の支圧強度等により所要の引抜き抵抗を發揮する。極限引抜き力に達した段階で、アンカー体は被定着材に対して押し抜きせん断状に食い込むが、被定着材の拘束度が高く、最終的に拘束具が段階的にすり抜ける。



(A) 被定着材が軟らかい場合

被定着材が軟らかい場合と同じ

引抜きメカニズムは被定着材が軟らかい場合と同様であるが、被定着材による拘束度が高いため、これに対する損傷領域の幅は小さく、有効区間は長い。



(B) 被定着材が硬い場合

図-11 圧縮型アンカー体の支持機構と有効区間

### ○圧縮一分散型

圧縮一分散型は次節の図-21 に示すように拘束具がくさび機能を有するため、引抜き変位とともにアンカー体グラウトおよび被定着材にくさび力（圧縮力）が働き、それらに高い摩擦抵抗が発生する仕組みとなっている。この摩擦抵抗はくさび力に比例し、くさび力に応じた地盤反力が確保されれば、摩擦抵抗が不足することによるアンカー体の引抜けは生じない<sup>14)</sup>。実験では図-12 および写真-6 のように被定着材にくさび力による変形がほぼ均等に発生しており、拘束具設置区間全体が有効区間となりうることを示している。

アンカー体の有効幅は被定着材の強度が  $q_u=2\text{MPa}$  の場合、最大 2cm 程度（アンカー体半径の 4 倍）であり、同一強度での引張型や圧縮型の場合の最大 2.5cm より小さい。実験条件が異なるため単純に比較はできないが、後述する本章第 3 節（図-30）でもアンカー体周辺地盤に負荷する応力は圧縮一分散型が最も小さいことが確認されている。これは上記に示した拘束具等が変位することによる荷重分散効果と考えられる。

さらに拘束具が均等に変位することで被定着材の平均的地盤反力を利用することができることから、不均一な地盤条件において適応しやすいものといえる。以上、解体観察により確認された各アンカー体の有効区間と有効

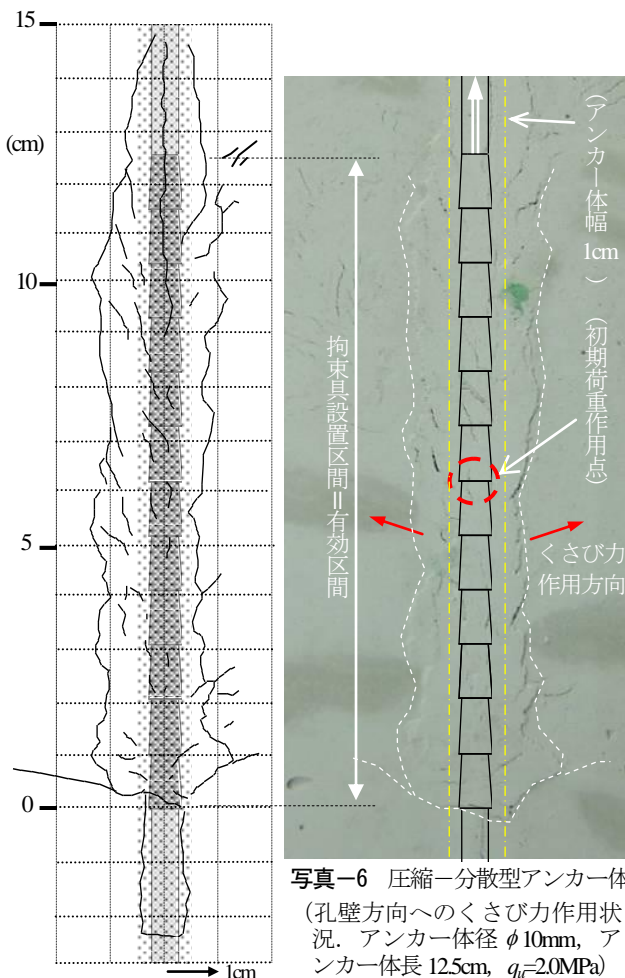


図-12 圧縮一分散型アンカー体引抜き断面（クラック図）

写真-6 圧縮一分散型アンカー体（孔壁方向へのくさび力作用状況。アンカー体径  $\phi 10\text{mm}$ 、アンカー体長 12.5cm、 $q_u=2\text{MPa}$ ）

幅を表-3 にまとめて示す。

### (2) 引抜き試験によるアンカー体の有効区間

前節に示したように、アンカー体の解体観察において圧縮一分散型の有効区間は拘束具設置区間であることが明瞭である。これに対して引張型および圧縮型ではアンカー体および周辺の被定着材の損傷が大きい領域と判断されるが、必ずしもその境界が明瞭でない。そのため、これらの有効区間をアンカー体長と引抜き抵抗の関係から検証する。

#### a) 実験仕様

実験仕様を表-4 に示す。アンカー体（ $\phi 13\text{mm}$ 、グラウト強度  $q_u=32.3\text{MPa}$ ）は図-13 のようにスパイラル

表-3 解体観察によるアンカー体（ $\phi 1\text{cm}$ ）の有効区間（cm）と最大有効幅（cm）

被定着材の強度 MPa	アンカー形式		
	引張型	圧縮型	圧縮一分散型
2.0	有効区間	—	31.0
	有効幅	—	2.5
2.7~2.9	有効区間	21.0	30.0
	有効幅	2.5	2.5
3.5	有効区間	—	27.0
	有効幅	—	3.0
13.7	有効区間	21.0	35.0
	有効幅	2.0	1.5
16.0	有効区間	25.0	34.5
	有効幅	1.5	1.5

表-4 アンカー体の引抜き抵抗測定仕様

項目	規格、数量
実験数量	引張型45本、圧縮型45本
アンカー体径	$\phi 13\text{mm}$
引張り材仕様	$\phi 8\text{mm}$ 総ネジ鉄筋（ss 400、引張り強さ 14.8kN/本）
アンカー体長	10~150cm（10cmピッチ）
被定着材の強度	$q_u=2.0, 2.7, 3.5\text{MPa}$ （セメントミルク）
試験体枠	スパイラルダクト管（ $\phi 50\text{cm}$ 、板厚 8mm）

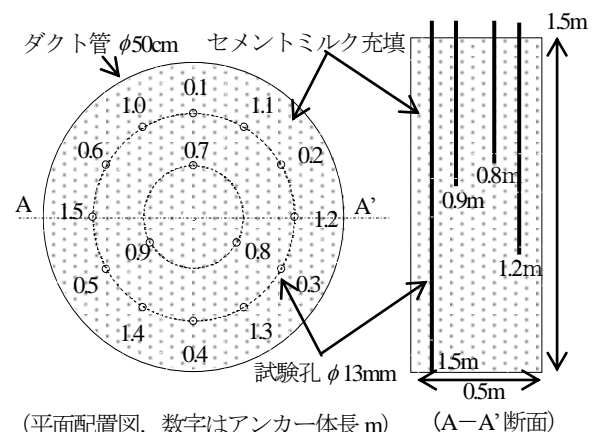


図-13 スパイラルダクト管内の引抜き試験孔配置図



ダクト管内 ( $\phi 50\text{cm}$ , 高さ  $1.5\text{m}$ ) に造成した。

被定着材の強度は 3 種類 ( $q_u=2.0, 2.7, 3.5\text{MPa}$ ) とし、各 15 本ずつ引抜き試験を行った。試験孔間隔は前節の実験と同様に、隣接孔の影響を避けるため  $75\text{cm}$  以上 (アンカー体半径の 10 倍以上) とし、深さ方向でも深度別に 1 つ置きに配置した。

引張り材は図-14 のように  $\phi 8\text{mm}$  の総ネジ鉄筋を用い、先端部から  $0.5\text{m}$  ピッチにスペーサ (針金で調整) を取り付けた。圧縮型は拘束具をナット ( $\phi 10\text{mm}$ , 対角線方向  $11.5\text{mm}$ ) で構築し、拘束具以外の引張り材はビニールテープでシースした。

被定着材およびアンカー体のグラウトはアンカー体が鉛直 (引張り側が天端) となる状態で行い、天端のブリージングに対しては同質のグラウト材で整形した。

アンカー孔は被定着材をグラウトする前に  $\phi 13\text{mm}$  の丸鋼を所定の位置にセットしておき、グラウト 1 日後にこれを引き抜くことで構築した。アンカー体のグラウトはスモール管を用いて孔底よりおこない、グラウト材のオーバーフローを確認後、引張り材を挿入する方法とした。

試験はアンカー体の短いものから順次実施した。アンカー体引張り側の引抜きを拘束しないよう、図-15 のようにラムチェアとセンターホール型ジャッキを用いた。試験荷重は引き抜けるまで  $14\text{kN}$  刻みで増加させ、引抜き量はダイヤルゲージ ( $1/100$  読み) で測定した。

#### b) 実験結果

図-16 は引張型の実測例である。試験時の荷重は引張り材の引張り強さ以下であり、したがって図に示す変位量は荷重段階毎の引張り材の弾性変位とアンカー体の

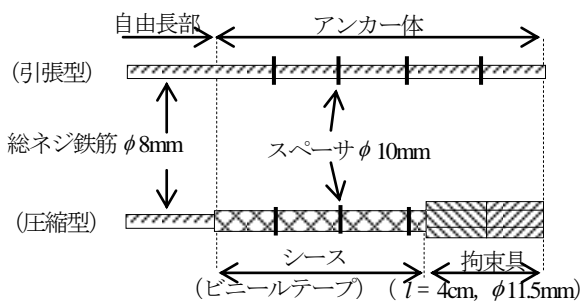


図-14 引張り試験用引張り材構造図

引抜き変位 (塑性変位) を反映するものである。

なお、図に示す理論伸び量は引張り材の自由長に弾性係数を乗じて求めたものであり、塑性変位量は全変位量から上記理論伸び量を控除し求めた。アンカー体の降伏荷重と剥離荷重は以下の基準に従った。

降伏荷重：アンカー体がクリープ状態となる時の荷重であり、図-16 のように塑性変位量曲線が直線 (点線) 状態から漸増し始める位置とする。

剥離荷重：アンカー体が塑性変位を生ずる時の荷重とする。

#### ○引張型

実験結果は表-5, 6 のようであるが、データのばらつきが大きく、材料強度による顕著な差も認められない。そのため、全体的な傾向を把握できるようなこれらの平均値を図-17, 18 に示す。

図-17 より、引張型ではアンカー体の剥離はアンカー体長に関係なく荷重初期段階より生じており、前節の図-9 に示したアンカー体の荷重分散が引張り側から順次開始されることと整合する。降伏荷重は図-18 のようであり、アンカー体長  $20\text{cm}$  以降ではほとんど増大せず、有効区間は  $20\text{cm}$  程度と判断される。

なお、写真-7 はアンカー孔口の変状であり、アンカー体長  $10\text{cm}$  の場合は被定着材を含む引抜きとなっている。これに対して、これより定着長が長いものは引張り材を主体とした引抜きとなっている。これはアンカー体長が長くなると引抜き抵抗が大きくなり、引張り材が細長く変形することで被定着材との剥離が進行していることを示すものと考えられる。

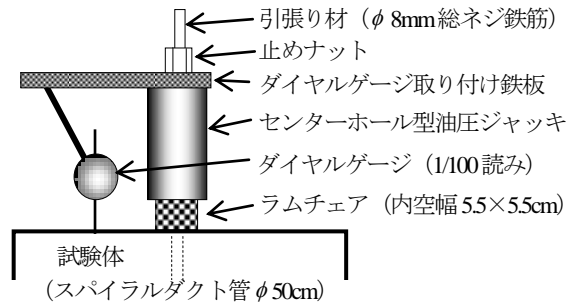


図-15 引張り試験装置組み立て図

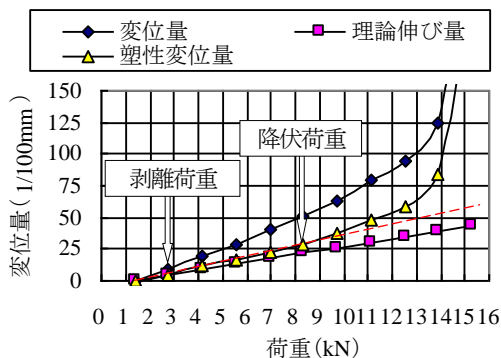


図-16 引抜き試験の剥離荷重と降伏荷重の説明図

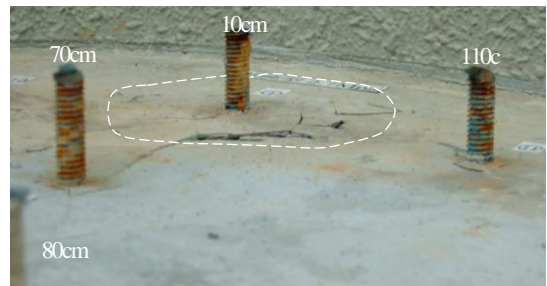


写真-7 引張型アンカー体引抜き試験孔口付近の変状 (被定着材の強度  $q_u=2.7\text{MPa}$ 。数字はアンカー体長を示す)

表-5 引張型アンカー体の剥離荷重 (kN)

アンカー 体長cm	被定着材の強度MPa			平均
	2.0	2.7	3.5	
10	1.4	2.8	5.6	3.27
20	2.8	2.8	1.4	2.33
30	1.4	1.4	1.4	1.40
40	1.4	2.8	2.8	2.33
50	2.8	1.4	2.8	2.33
60	7.0	4.2	1.4	4.20
70	2.8	7.0	1.4	3.73
80	1.4	1.4	2.8	1.87
90	1.4	4.2	1.4	2.33
100	1.4	1.4	2.8	1.87
110	1.4	11.1	1.4	4.63
120	4.2	1.4	1.4	2.33
130	1.4	4.2	1.4	2.33
140	1.4	1.4	1.4	1.40
150	4.2	1.4	1.4	2.33

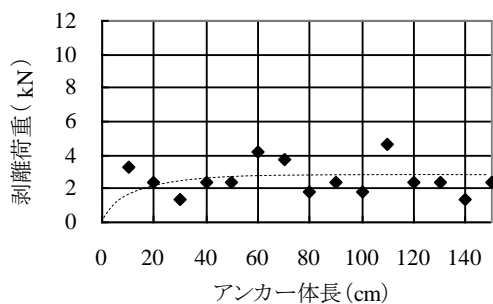


図-17 引張型アンカー体長と剥離荷重

表-6 引張型アンカー体の降伏荷重 (kN)

アンカー 体長cm	被定着材の強度MPa			平均
	2.0	2.7	3.5	
10	8.3	9.7	7.1	8.37
20	8.3	11.1	11.1	10.17
30	7.0	11.1	11.1	9.73
40	9.7	11.1	11.1	10.63
50	9.7	12.5	9.7	10.63
60	9.7	12.5	7.0	9.73
70	9.7	9.7	12.5	10.63
80	11.1	8.3	8.3	9.23
90	11.1	11.1	11.1	11.10
100	9.7	11.1	12.5	11.10
110	9.7	11.1	12.5	11.10
120	9.7	9.7	12.5	10.63
130	11.1	12.5	11.1	11.57
140	9.7	12.5	11.1	11.10
150	11.1	11.1	12.5	11.57

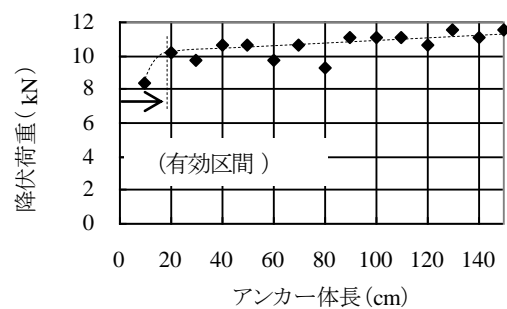


図-18 引張型アンカー体長と降伏荷重

表-7 圧縮型アンカー体の剥離荷重 (kN)

アンカー 体長cm	被定着材の強度MPa			平均
	2.0	2.7	3.5	
10	1.4	1.4	1.4	1.40
20	2.8	1.4	1.4	1.87
30	1.4	1.4	1.4	1.40
40	1.4	1.4	1.4	1.40
50	2.0	1.4	4.2	2.53
60	1.4	1.4	1.4	1.40
70	1.4	1.4	1.4	1.40
80	5.6	1.4	1.4	2.80
90	4.2	2.8	7.0	4.67
100	1.4	5.6	1.4	2.80
110	1.4	1.4	2.8	1.87
120	8.3	7.0	2.8	6.03
130	1.4	7.0	1.4	3.27
140	1.4	7.0	7.0	5.13
150	1.4	5.6	2.8	3.27

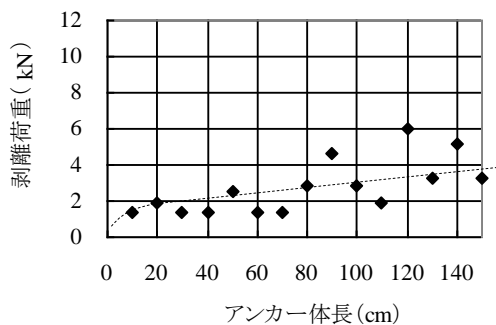


図-19 圧縮型アンカー体長と剥離荷重

表-8 圧縮型アンカー体の降伏荷重 (kN)

アンカー 体長cm	被定着材の強度MPa			平均
	2.0	2.7	3.5	
10	7.0	9.7	7.0	7.90
20	4.2	9.7	4.2	6.03
30	8.3	7.0	7.0	7.43
40	4.2	8.3	8.3	6.93
50	5.6	8.3	7.0	6.97
60	5.6	7.0	8.3	6.97
70	8.3	7.0	9.7	8.33
80	5.6	7.0	5.6	6.07
90	4.2	7.0	8.3	6.50
100	7.0	6.0	7.0	6.67
110	4.2	4.2	5.6	4.67
120	8.3	7.0	5.6	6.97
130	7.0	7.0	5.6	6.53
140	7.0	7.0	7.0	7.00
150	5.6	5.6	7.0	6.07

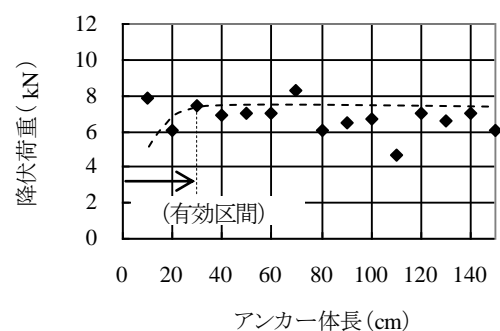


図-20 圧縮型アンカー体長と降伏荷重

○圧縮型

表-7, 8 より圧縮型も引張型と同様にデータのばらつきが大きいことから平均値を図-19, 20 に示す。

図-19 よりアンカー体の剥離は荷重初期段階より生じているが、アンカー体長が長くなるほど、剥離開始荷重が大きくなっている。これはアンカー体長が長い（深層部）ほどアンカー体拘束具周辺の被定着材の拘束力が高まり、その変位が抑制されることを示すものと考えられる。

降伏荷重は図-20 より、アンカー体長 10cm のデータは無視すれば、アンカー体長 30cm までは増大しており、有効区間は 30cm 程度と判断される。このことは前節の図-11（圧縮型アンカー体の支持機構と有効区間）に示したように、拘束具から引張り方向にかけての限られた範囲しか引抜き抵抗を発揮できないことと一致する。

写真-8 でもアンカー体長 10cm のもの以外は、アンカー体拘束具による破断面が幅広く表面に達したような変状はみられず、被定着材内で引抜き破壊していることが分かる。

なおアンカー体長 10cm の引抜き荷重が大きい値を示したのは、写真-8 に示すように供試体表面の引抜き範囲 8cm に対して、図-15 に示した測定時のラムチェアの内空断面（5.5×5.5cm）が小さすぎたことによるものと考えられる。

○引張型および圧縮型と圧縮一分散型との違い

引張型および圧縮型の有効区間の特徴を明確にするため、圧縮一分散型との比較を以下に示す。図-21 は圧縮一分散型アンカー体の力関係を示すものである。拘束

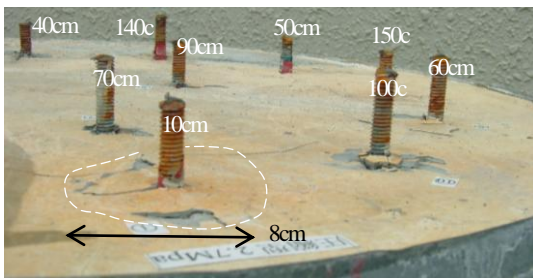


写真-8 圧縮型アンカー体引抜き試験孔口付近の変状（被定着材の強度  $q_u=2.7\text{MPa}$ 、数字はアンカー体長を示す）

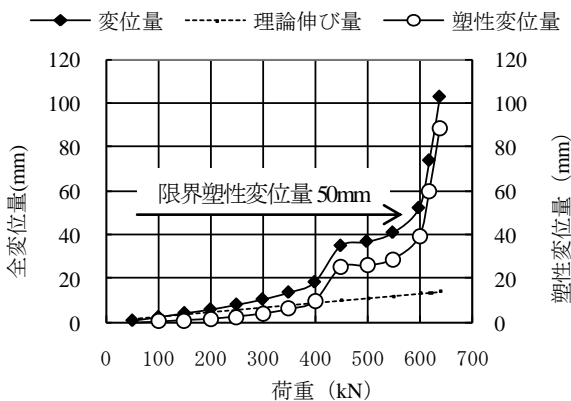


図-22 荷重一分散型アンカー体の引抜き形態<sup>3)</sup>（風化凝灰岩  $q_u=3.8\text{MPa}$ 、アンカー体長 1m）

具（くさび）全体が可動状態にあり、これの引抜け（等変位）とともにくさび力  $W$  に応じた地盤反力が働き、アンカー体と孔壁との間に高い摩擦抵抗が得られる。しかし引抜けと同時に拘束具の無効区間（ $\Delta L$ ）が増えるため、最大引抜き抵抗は拘束具ユニット  $L$  の 1/2（50mm）が引き抜けた時に発揮する<sup>14)</sup>。

図-22 はその引抜き試験事例であり、拘束具の引抜けにともない地盤反力の増大と有効支圧区間（ $L_1$ ）の減少に応じた引抜き抵抗（荷重）を示し、最終的に塑性変位量（引抜き量）が 50mm に達した段階で引き抜けている。このように拘束具が可動状態にあり、その設置区間全体が有効区間となる。さらに限界変位量（50mm）が一定であり、引抜けに至るまでの許容変位量を確実に管理できることが引張型および圧縮型アンカー体と大きく異なる点である。

(3) アンカー体の支持機構と有効区間の現場確認試験

各アンカー体の支持機構と有効区間について現場試験による検証を行う。

a) 実験仕様

実験はアンカー体周辺地盤の応力状態を測定する上で、亀裂等による影響（異方性）が少ないと思われる風化凝灰岩層の露頭で実施した。調査仕様を表-9、試験孔および観測孔の配置図を図-23 に示す。

引張り材は図-24 のように PC 異形棒鋼  $\phi 36$  を使用し、スペーサを 1m ピッチで取り付けた。アンカー体拘束具は、圧縮型の場合図-25 のようにナット 2 個の間に鋼製プレートを含み構造とした。圧縮一分散型では図-26

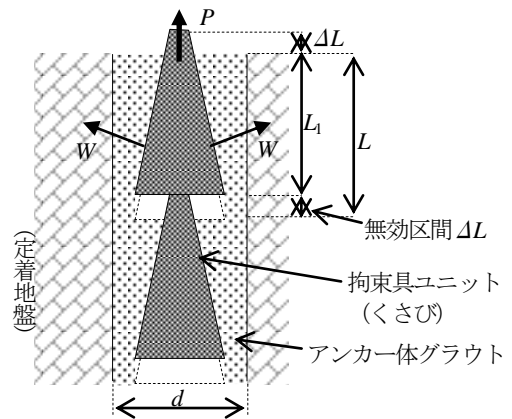


図-21 圧縮一分散型アンカー体の力関係（ $P$ : 引張り力、 $W$ : くさび力、 $L$ : 拘束具ユニット長、 $L_1$ : 有効支圧区間、 $\Delta L$ : 拘束具引抜け長、 $d$ : アンカー体径）

表-9 アンカー体周辺地盤の応力状態測定仕様

アンカー形式	引張型	圧縮型	圧縮一分散型
アンカー体径	$\phi 115\text{mm}$		
テンドン仕様	PC 異径棒鋼 $\phi 36\text{mm}$ (引張り強さ 1120kN/本)		
アンカー体長	5.0m	5.0m	1.0m
歪ゲージ深度	GL-0.75~5.75m (0.5mピッチ)		

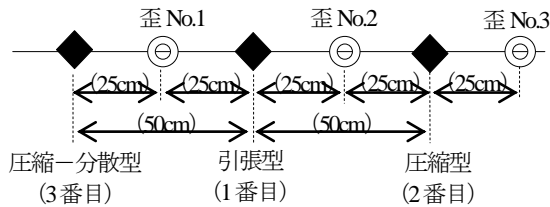


図-23 試験孔および歪観測孔の配置と測定順位

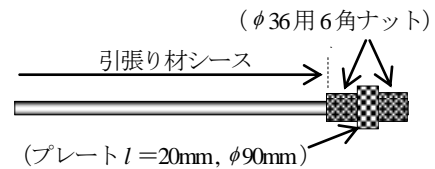


図-25 圧縮型用拘束具構造図

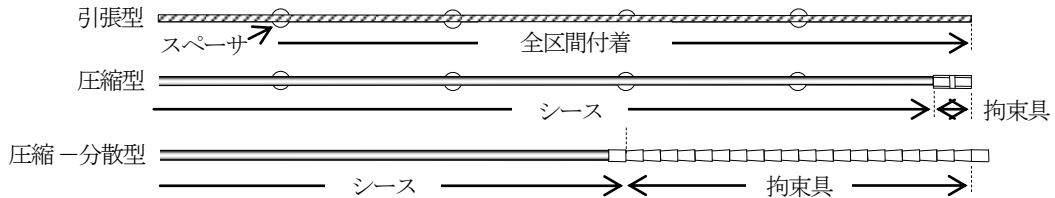


図-24 アンカー体周辺地盤の応力状態測定用引張り材構造図

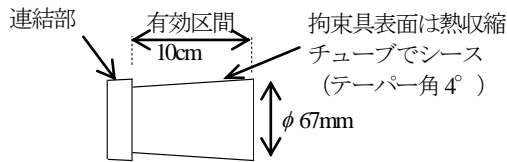


図-26 圧縮一分散型拘束具 (ユニット) 構造図

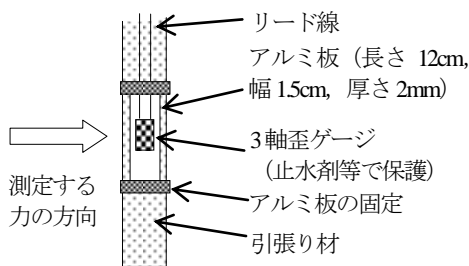


図-28 引張り材への歪ゲージ取り付け図

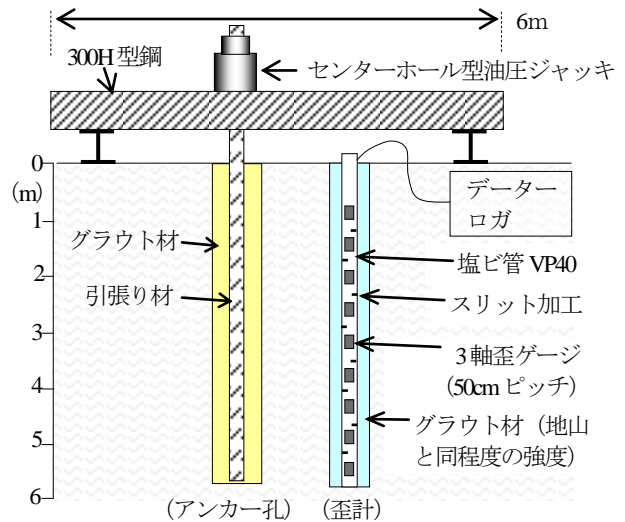


図-27 アンカー体周辺地盤の応力状態測定図

のような円筒形くさびを連結したものをを用い、さらに拘束具によるくさび機能がスムーズに発揮できるよう全体を熱収縮チューブでシースした。

試験孔は鉛直方向に設定し、アンカー体から定着地盤に作用する主応力は歪観測孔 (No.1~3) と各試験体 (引張り材) に取り付けた 3 軸歪ゲージにより測定した。

歪観測孔では塩ビ管 (VP-40) を利用し、深度 0.75 m 地点から 50cm ピッチに 10 点取り付けた。さらに塩ビ管に起因するノイズ (応力伝搬) を抑制するため、図-27 のように各ゲージ間にはスリットを施した。

引張り材に取り付ける歪ゲージは図-28 のように、アルミ板をベースにその方向性等を確保すると共に、歪ゲージ間を独立させることで相互緩衝を抑制するようにした。

アンカー体のグラウト ( $q_u=32.3\text{kN}$ ) は引張り材を挿入後、あらかじめこれに取り付けておいたホースで孔底より行ない、完了後ホースは引き抜いた。観測孔では塩ビ管の内外に定着地盤と同程度の強度のセメントミルク

( $q_u=3.0\text{MPa}$ ) をグラウトホースで孔底より充填し、地山と一体化するようにした (セメントミルクの強度はベントナイトと水セメント比で調整)。

試験孔の地質は GL-3.5m までは “N 値=10~40” の強風化帯、これ以深は硬い岩芯を残す弱風化帯 ( $q_u=3.8\text{MPa}$ ) であり、圧縮型と圧縮一分散型の拘束具は弱風化帯内に設置した。

試験は引張型、圧縮型、圧縮一分散型の順で行い、引張り荷重は引き抜けるまで 50kN ずつ増加する方法とした。

#### b) 実験結果

実験結果は図-29 のようであり、いずれも引き抜き前の荷重 600kN における応力状態を示す。なお主応力は 3 軸歪ゲージで測定された最大主歪から求めた<sup>16)</sup>。この時のポアソン比は 0.3 とし、弾性係数  $E_s$  は定着地盤の一軸圧縮強度 “ $q_u=3.8\text{MPa}$ ” から次式<sup>17)</sup>により求めた。

$$E_s = 354 \cdot q_u^{1.322} \quad (2)$$

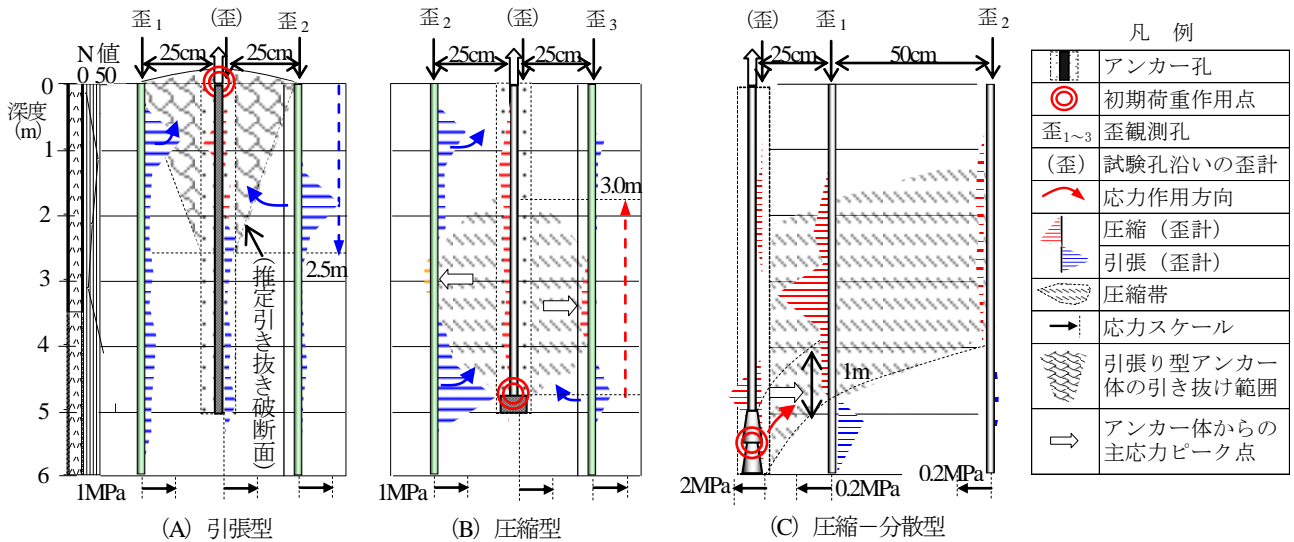


図-29 アンカー体周辺地盤の応力状態 (荷重 600kN 時)



写真-9 引張型アンカー体引抜けともなう地表の盛り上がり状況 (図-29A)

### ○引張型

本試験孔は荷重 820kN で引き抜けた。図-29A のように荷重 600kN 時には GL-2.5m 付近まで、アンカー体より 25cm 離れた地盤内に不規則な形で大きな引張力が働いている。アンカー体沿いには初期荷重作用点から GL-2.0m 付近まで断続的に圧縮力が働き、引抜きと同時に写真-9 のように地表が盛り上がった (約  $\phi 0.5\text{m}$  の範囲)。したがって GL-2.5m 付近までが有効区間をなし、図-29A に示すような形でアンカー体および定着地盤が引き抜けたものと考えられる。これは本章 1 節の図-8 (引張型アンカー体の引抜き断面) で確認された被定着材の漏斗状の抜け上がり現象と一致する。

GL-2.5m 以深ではアンカー体沿いに小さな引張力が確認されるのみであり、これも本章 1 節の図-9 に示した無効区間での“引張り材を中心とした狭い領域の引抜き”を裏付けるものといえる。

### ○圧縮型

本試験孔は荷重 720kN で引き抜けた。図-29B のように荷重 600kN 時には初期荷重作用点より引張り方向に約 3m、アンカー体幅方向に片側約 25cm の範囲 (アンカー体半径の 4.3 倍) で圧縮力が働いている。これも本章 1 節の図-10 に示した紡錘状の損傷領域と類似しており、有効区間は 3m と判断される。

さらにアンカー体先端部 (GL-4.75m 付近) に最大の引張力が働き、引抜き時には爆発的破壊音を生じたが

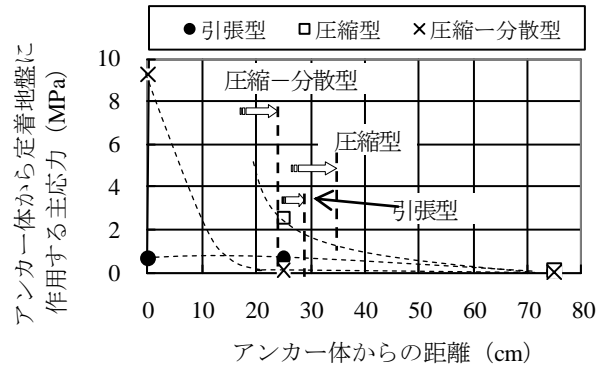


図-30 アンカー体側方地盤への応力伝搬範囲とアンカー体解体観察で確認された被定着材損傷範囲の対比

●	引張型：図-29A，GL-0.75m 付近の引張り力
□	圧縮型：図-29B，GL-4.75m 付近の引張り力
×	圧縮一分散型：図-29C，GL-4.75m 付近の圧縮力
⇨	アンカー体解体観察で確認された有効幅を投影

地表には引張型のような変状は認められなかった。本章 1 節のアンカー体の解体観察や前節の写真-8 に示した引張り試験時の供試体表面の状況などからも、圧縮型アンカー体の引抜けは主に拘束具付近を中心とした局部的破壊によるものといえる。

### ○圧縮一分散型

本試験孔は 640kN で引き抜けた。荷重 600kN 時には図-29C のように、アンカー体より 25cm 離れた地点の観測孔歪 1 において引張り方向に幅広く圧縮力が確認されている。しかし、アンカー体沿いでは荷重作用点から引張り側に 1m 程度の範囲で圧縮帯が形成され、本アンカー体の実質的有效区間と判断される。また、アンカー体先端部の圧縮帯と引張り帯の境界が放物線状となる現象は、第 3 章 1 節 (図-12, 写真-6) に示した解体観察の状況と一致する。なお、アンカー体より 25cm 離れた地盤内 (観測孔歪 1) で、GL-2~4m に比較的大きな圧縮力を観測しているが、その要因は不明である。

### ○アンカー一体側方地盤への主応力伝搬範囲

図-30は図-29で測定されたアンカー一体から定着地盤に作用する主応力(3軸歪ゲージで測定)が最大となる深度での、側方地盤への応力伝搬状況を示すものである。また同図に示す縦の破線は、本章1節の図-8、10に示した模型実験によるアンカー一体の有効幅(一連のアンカー一体および被定着材の損傷範囲)がアンカー孔径に比例するものとして、その範囲を示したものである。その有効幅とアンカー孔径の比は、被定着材の強度 $q_u=2\sim 3.5\text{MPa}$ において、引張型で最大5倍、圧縮型で最大6倍、圧縮一分散型で4倍程度である。これを本試験孔(半径5.8cm)に当てはめればそれぞれアンカー一体より29cm、35cm、23cmとなる。

図-30より、圧縮一分散型アンカー一体の応力伝搬はアンカー一体より25cm地点でほぼ消滅しており、上記に示した模型実験による推定有効幅23cmとほぼ一致する。

圧縮型ではアンカー一体沿いのスケールオーバー(測定不能)状態から25cm地点で応力が大幅に減少し、模型実験での推定有効幅はこれより広い35cmとなっている。

引張型もアンカー一体から25cm付近までは1MPa程度の小さな応力が伝搬されその後消滅するが、推定有効幅もこれに近い29cmとなっている。

以上のように、アンカー一体の有効幅(被定着材の損傷範囲)と実際の地盤で確認されたアンカー一体からの応力伝搬範囲はおよそ一致しており、本章1節に示したアンカー一体の有効幅に対する判定は妥当といえる。

#### (4) アンカー体内の動的応力伝搬状況に基づく精査

アンカー力が初期荷重作用点に集中する引張型および圧縮型について、その引抜き形態を明確にするため、アンカー体内における荷重の伝搬状況を検証する。

##### a) 実験仕様

実験仕様を表-10に示す。試験体は図-31のようにスパイラルダクト管( $\phi 115\text{mm}$ 、長さ60cm)にアンカー一体( $\phi 10\text{mm}$ 、引張材の構造は図-5と同様)および

表-10 アンカー一体の応力伝搬状況測定仕様

アンカー形式	引張型	圧縮型
実験数量	2本	1本
アンカー径	$\phi 10\text{mm}$	
引張材仕様	$\phi 6\text{mm}$ (ss 400)総ネジ鉄筋 (引張り強さ11.4kN/本)	
アンカー体長	60cm	
被定着材の強度 $q_u$	0.7, 7.3MPa	10.6MPa
試験体枠	$\phi 150\text{mm}$ スパイラルダクト管 (板厚0.8mm)	



図-32 歪ゲージ取り付け板の加工図

歪計を3cm間隔(中心間)に設置したものを用いた。

歪ゲージ(1軸方向)は図-32のように、ゲージ間の干渉を抑制するためのスリットを施したアルミ板(幅10mm、厚さ2mm)に貼り付けた。アンカー一体グラウト材の強度 $q_u$ は32.3MPaである。引張り荷重は図-33のようにアンカー一体を大型せん断試験機で一定速度で引張る方法で与えた。歪曲線(図-35, 37, 39)は(+)が引張り、(-)が圧縮を示す。

##### b) 実験結果

##### ○引張型(被定着材の強度 $q_u=0.7\text{MPa}$ )

図-34, 35より、引張り荷重は測定5分過ぎにピークに達し、最大荷重は10kNであるが、荷重5kN付近(A点)で荷重曲線の勾配が低下している。各深度の歪曲線もこの付近で歪累積速度が低下することから、当荷重がアンカー一体の剥離開始点と判断される。

さらに荷重9.5kN付近(B点)で各歪曲線がほぼピークに達しており、アンカー一体引抜き抵抗の降伏を示すものと判断される。

歪ゲージはアンカー一体が引き抜けるまで初期荷重作用点より26.5cmまでのものしか反応しないことから、当深度までが有効区間と判断される。

一方、有効区間内の歪曲線は図-35のA, B点のように荷重曲線の変化に応じてほぼ同時に変化しており、後述する $q_u=7.3\text{MPa}$ の場合よりアンカー一体の荷重分散が容易といえる。したがって未固結地盤などの軟らかい地盤では、ある程度の塑性変位をとまなうものの、アンカー一体を長くすればそれなりの引抜き抵抗を得ることができるものと考えられる。

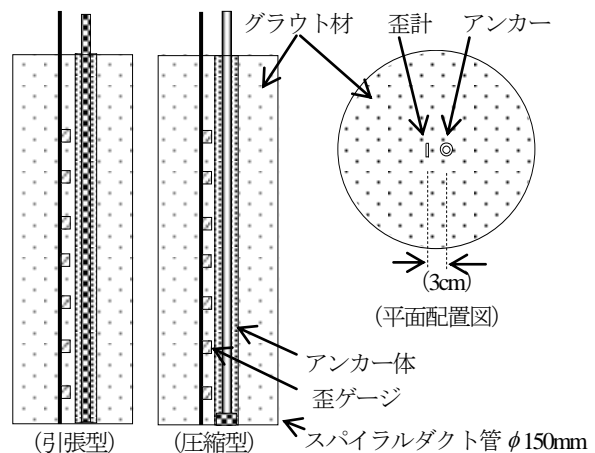


図-31 アンカー一体の応力伝搬状況測定図

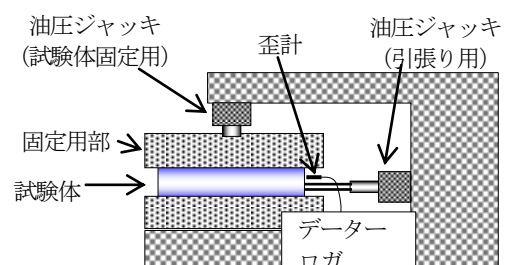


図-33 大型せん断試験機による引張り試験測定図

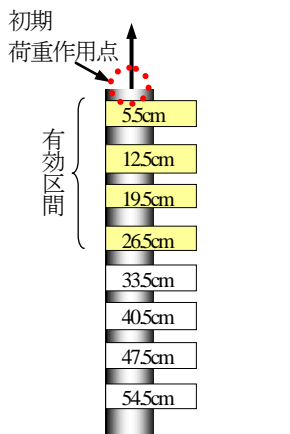


図-34 荷重作用点と歪ゲージ反応位置

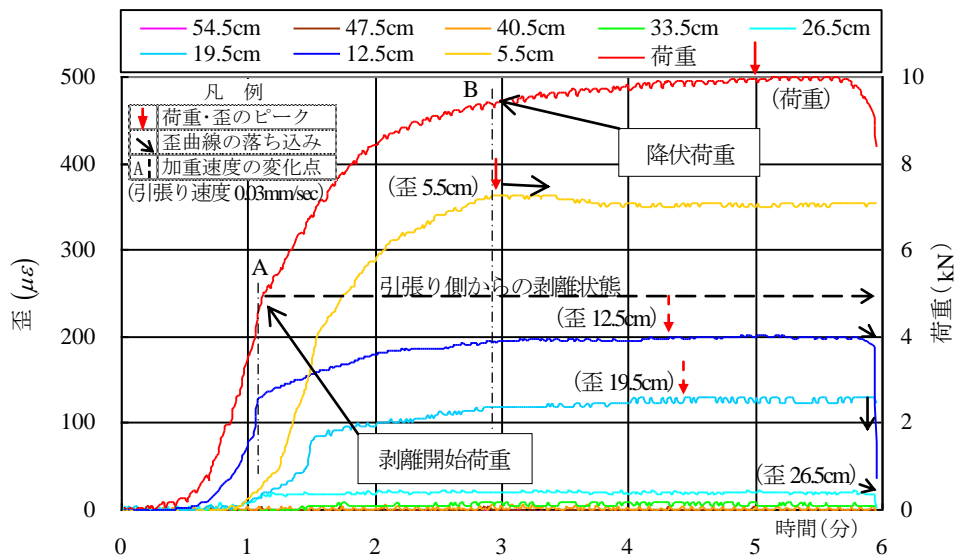


図-35 引張型アンカー体沿いの被定着材内 ( $q_u=0.7\text{MPa}$ ) 歪伝搬状況

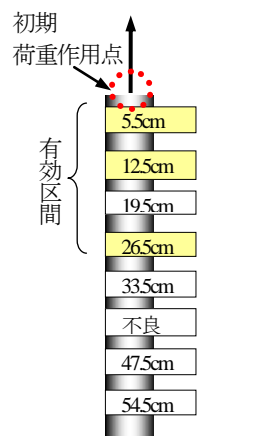


図-36 荷重作用点と歪ゲージ反応位置

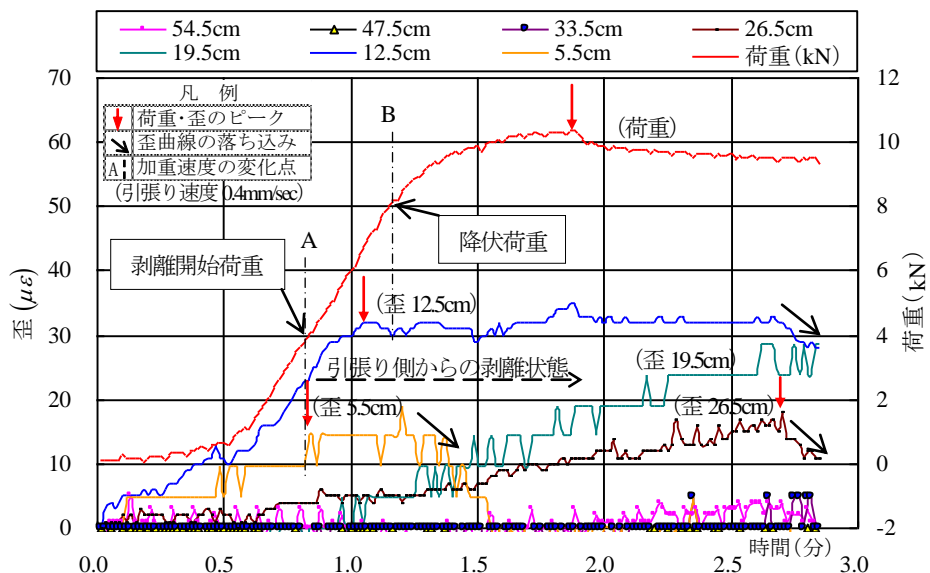


図-37 引張型アンカー体沿いの被定着材内 ( $q_u=7.3\text{MPa}$ ) 歪伝搬状況

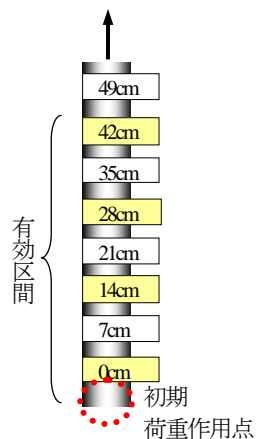


図-38 荷重作用点と歪ゲージ反応位置

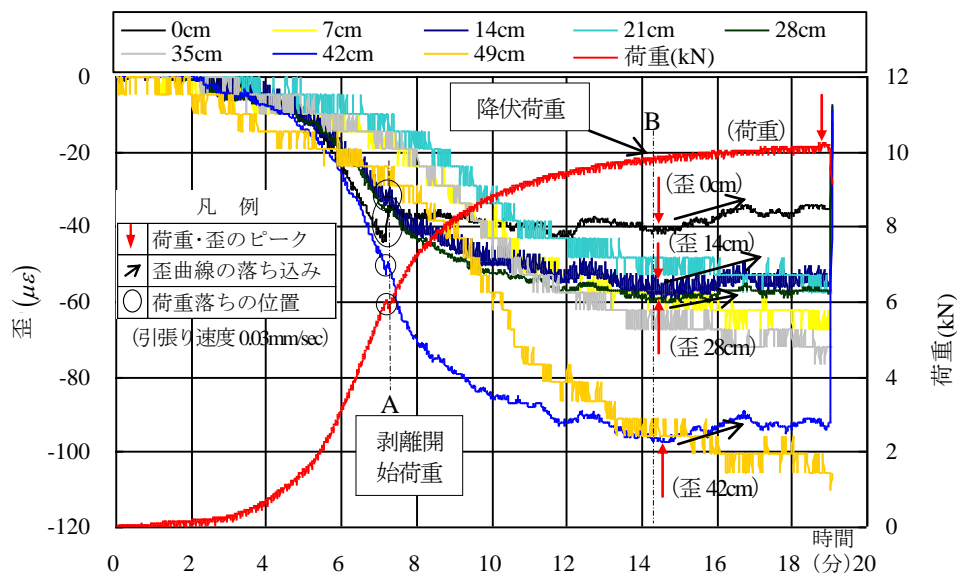


図-39 圧縮型アンカー体沿いの被定着材内 ( $q_u=10.6\text{MPa}$ ) 歪伝搬状況

さらに、アンカー体の引抜け（荷重落ち）と同時に有効区間内の歪ゲージ（12.5cm, 19.5cm, 26.5cm）が同時に降伏しているのに対し、無効区間の歪ゲージはほとんど反応していない。これは前節の現場試験（図-29A）で確認された有効区間のアンカー体と被定着材の一体となった引抜け、および無効区間における引張り材を中心とした限られた範囲での瞬時の引抜けという現象と一致する。

○引張型（被定着材の強度  $q_u=7.3\text{MPa}$ ）

図-36, 37 より、試験最大荷重は約 10kN であるが、荷重 4kN 付近（A 点）より引張側の歪ゲージから順次ピークに達しており、アンカー体の剥離開始点と判断される。さらに荷重 8kN 付近（B 点）で荷重曲線の勾配が減少している。歪曲線もこの付近で 5cm, 12.5cm, 19.5cm のものがほぼピークに達することから、当荷重がアンカー体の降伏点と判断される。

有効区間は歪ゲージが降伏荷重までに反応した深度 26.5cm 付近までと判断される。

上記に示した引張り側の歪ゲージから順次降伏する現象は、本章 1 節（図-9）に示した引張り側からの被定着材の剥離にともなう荷重分散状況を説明するものである。また降伏荷重以降、無効区間では 33.5cm と 54.5cm の歪ゲージがわずかに反応するのみであり、本試験でも無効区間での引き抜けは引張り材を中心とした限られた領域で生じているといえる。

全体的に歪量は 30 マイクロストレーン程度以下であり、被定着材の強度が  $q_u=0.7\text{MPa}$  の場合（100~400 マイクロストレーン）のおよそ 1/10 程度と小さい。このことも本章 1 節（図-9）で示した“低強度の被定着材ほどクラック等の損傷範囲が大きい”ことと一致する。

○圧縮型（被定着材の強度  $q_u=10.6\text{MPa}$ ）

図-38, 39 より圧縮型では荷重 6kN（A 点）で一時的な荷重落ちとともに初期荷重作用点より 0, 7, 14, 28, 42cm 地点の歪ゲージが同時に反応しており、アンカー体の剥離開始点と判断される。さらに荷重 10kN 付近

（B 点）で歪が同時にピークに達しており、アンカー体の降伏とともに、アンカー体全体が同時に変位することを示している。

有効区間は 42cm 程度と判断され、深度 7, 21, 35cm 地点で反応が見られないのは、本章 1 節のアンカー体の解体観察の項（写真-5）に示したように、アンカー体および周辺の被定着材がブロック状に変位し、歪ゲージとの位置関係により反応しなかったことが考えられる。

一方、伝達する応力（圧縮）は引張型とは逆に、初期荷重作用点から離れたものほど大きく、荷重作用点位置より 1.5~2m 程度引張り側に圧縮帯のピークが形成されている。

この要因として、拘束具の“すり抜け”現象が考えられる。すなわち、歪（1 軸ゲージ）は引張方向の力を対象に測定しており、拘束具から伝わる圧縮力はこれに近い位置で最大となる。しかし、本章 1 節の写真-4 のように、拘束具がグラウト材等から剥離すれば、その引抜き量に応じたほど周辺地盤の歪（引張方向）は増大せず、むしろさらに引張り側に応力のピークが移ることが考えられる。その結果、引き抜き直前において上記のような応力状態を形成するものと考えられる。

(5) 有効区間のまとめ

模型実験等により、アンカー体を拘束する被定着材にはアンカー力に応じて引張り力や圧縮力が働くことが確認された。これは、引張型では引張り力によりアンカー体幅が縮むためであり、また圧縮型ではアンカー体先端に取り付けた拘束具からの圧縮力によりアンカー体幅が拡大することによるものである。

表-11 は前述までの実験で確認されたアンカー体の有効区間  $L$  とアンカー孔径  $d$  の比を有効区間比  $n$  として示したものである。同表より、有効区間比はおよそ 20~40 の範囲にあり、しかもアンカー体径の異なる現場と室内実験でおおよそ類似した値を示している。

これらとアンカー体を拘束する被定着材の強度との関

表-11 室内および現場実験に基づく有効区間比

実験内容		被定着材	強度 $q_u$ (MPa)	有効区間 $l$ (cm)	アンカー孔径 $d$ (cm)	有効区間比 $n$ ( $l/d$ )	
現場 実験	アンカー体の 応力分布測定	圧縮型	風化凝灰岩	3.8	300	11.5	26
		引張型	風化凝灰岩	3.8	250		22
			泥 岩	1.1	250		22
室内 実験	引抜き試験	引張型	セメントミルク	2.0~3.5	20(平均)	1.3	15
		圧縮型	セメントミルク	2.0~3.5	30(平均)	1.3	23
	アンカー体 解体観察	引張型	セメントミルク	2.9	22	1.0	22
				13.7	21		21
				16.0	26		26
		圧縮型	セメントミルク	2.0	31	1.0	31
				2.7	31		31
				3.5	28		28
				13.7	34		34
	16.0	34	34				
	アンカー体の 応力分布測定	引張型	セメントミルク	0.7	26.5	1.0	27
				7.3	28.5		29
		圧縮型	セメントミルク	10.6	42	1.0	42



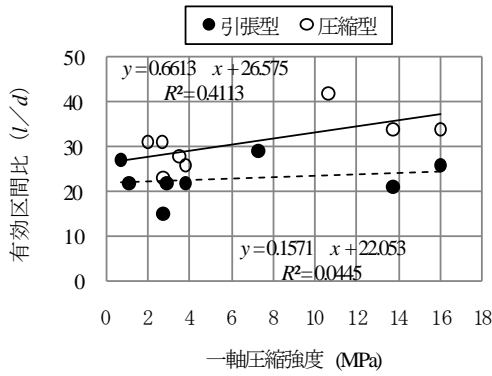


図-40 被定着材の一軸圧縮強度と有効区間比

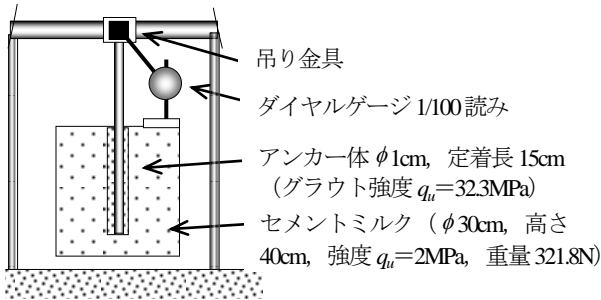


図-41 アンカー体の長期安定性試験測定図

係は図-40のように示され、圧縮型では被定着材の強度に応じて有効区間比が増大する傾向を示す。

前節の図-39で示したように圧縮型アンカー体の有効区間は周辺地盤と一体的に変位することが確認されている。したがってアンカー体を拘束する被定着材の強度が大きいほどその変位量が規制され、有効区間比も大きくなることが考えられる。逆に被定着材の強度が弱ければ本章3節の写真-4に示したように拘束具付近での局部破壊を生じやすく、有効区間比は小さくなる。

引張型では被定着材の強度に関係なく有効区間比は概ね一定しており、その要因は以下のように考えられる。引張型アンカー体の変位を規制するのは主に被定着材の強度（拘束力）やグラウト材と被定着材との付着強度である。付着強度の小さい軟質な地盤では定着地盤が引張り材の伸び変位に追従しやすい。そのため有効幅が広くある程度有効区間が得られる。これに対して固い地盤では付着強度は大きい、引張り材の変位に追従し難いため有効幅が小さく、有効区間も限られた範囲となる。そのため、結果的に引張型の有効区間比は地盤強度にかかわらずおよそ一定となる。

以上、上記実験結果は妥当なものと考えられ、実際の工事における有効区間を試算すれば表-12のようになる。なお、試算条件として、一般に地すべり地の基盤岩は軟質であるか、あるいは脆弱化している場合が多いため地盤強度を $q_u=6\text{MPa}$ とした。有効区間比は図-40に示した相関式より引張型23.0、圧縮型30.5とした。有効区間 $L$ は次式による。

$$L = d \cdot n \quad (3)$$

ここに、 $d$ はアンカー孔径、 $n$ は有効区間比である。

表-12 アンカー径と有効区間の関係 ( $q_u=6\text{MPa}$ の場合)

アンカー孔径	90mm	115mm	135mm	145mm
引張型の有効区間 (m) (有効区間比23.0として)	2.1	2.6	3.1	3.3
圧縮型の有効区間 (m) (有効区間比30.5として)	2.7	3.5	4.1	4.4

(※本表は図-40に基づく)

表-13 アンカー体の長期引張り試験用引張り材仕様

アンカー形式	引張り材	拘束具寸法
引張型	φ6mm 総ネジ鉄筋 (ss 400, 引張り強さ11.3kN/本)	—
圧縮型	φ6mm 総ネジ鉄筋 (ss 400, 引張り強さ11.3kN/本) 拘束具以外シース	$l=5\text{cm}$ φ8mm
圧縮分散型	φ64-8mm 丸鋼削りだし (ss 400, 引張り強さ12.9kN/本) 全区間シース	$l=15\text{cm}$ max φ8mm

同表よりアンカー体の有効区間は概ね2~4mとなり、基準書<sup>2)</sup>が示す標準アンカー体長3~10mに比べはるかに短い。また孔径が小さくなるほど有効区間が短くなる。

これに関して、文献 18, 19) ではφ90mm仕様でのトラブル例が報告されており、最小孔径をφ115mmとすることを提案している。具体的資料を示していないが、有効区間比に関連する可能性が考えられる。森林土木ハンドブック<sup>20)</sup>では設計上の有効区間を4~7mとすることを提案しており、当面はこのように有効区間をあまり長く設定しないことと、特にアンカー体径が小さいほど有効区間が短くなることに留意する必要がある。

#### 4. アンカー体の支持機構と長期的変位の関係

各アンカー体の支持機構と長期的変位の関係を検証するための長期荷重載荷試験を行った。

##### (1) 実験仕様

実験仕様を表-13に示す。測定は一定の重さの試料をアンカー体で常時吊り下げる方法とした。試料は円形紙型枠(φ30cm, 高さ40cm)にセメントミルクを充填し、重量321.8Nとした。試料の強度は地すべり地に分布する泥岩等の軟質地盤を想定し“ $q_u=2\text{MPa}$ ”とした。引張り材やアンカー体径の仕様は第3章1節の図-5と同一とした。アンカー体長は前章5節の有効区間比内に収まるよう、アンカー体径1cmに対して15cmとした。アンカー体グラウト材の強度は“ $q_u=32.3\text{MPa}$ ”である。

##### (2) 実験結果

観測開始より2年11ヶ月が経過した段階の引抜け変位量は図-42のようであり、引張型の引抜け量1.6mm

に対し、圧縮型および圧縮分散型では 0.3~0.35mm と引張型の 1/5 程度に収まっている。

これは、前章に示した各アンカー体の支持機構と整合する。すなわち引張型では初期荷重作用点側から一定区間が順次剥離することでアンカー体の荷重分散を図り、荷重相応の引抜き抵抗を發揮するタイプである。図-42 では 1 年 4 ヶ月が経過するまでに 1.4mm の引抜け（全引抜き量の 88%）を生じ、その後吊り下げ荷重とアンカー体の引抜き抵抗がおおよそバランスする傾向にある。

これに対して圧縮型は拘束具から伝わる紡錘状の支圧区間がアンカー体と一体となって引抜き抵抗を發揮するタイプであり、引張型のような変位はしにくい。しかし全体に微小な累積変位を持続しており、主に前章で示した拘束具周辺の“すり抜け”変位と考えられる。

圧縮分散型はアンカー力がくさび力として拘束具側

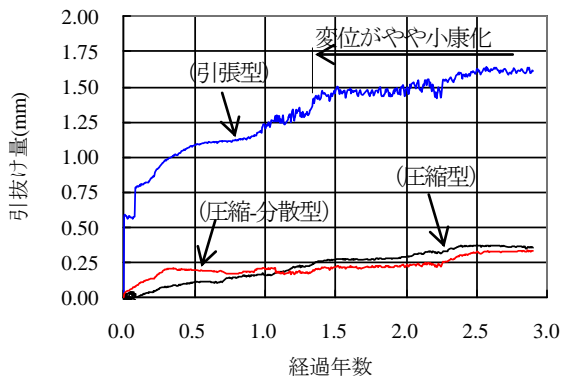


図-42 アンカー体の長期安定性試験（2年11ヶ月経過）

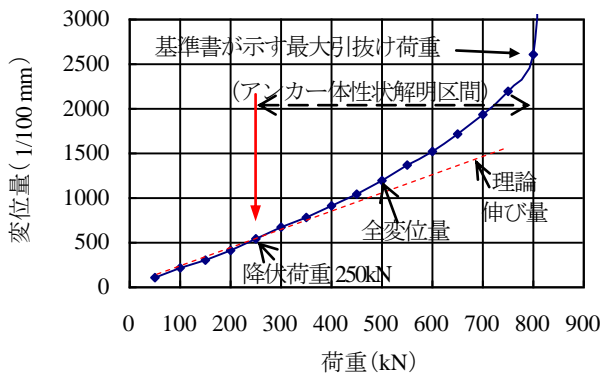


図-43 引張型アンカー体の荷重-変位量曲線（引抜き荷重 820kN）

方地盤に伝わり、これと地盤反力がバランスした段階で変位が抑制されるタイプであり、3ヶ月後に累積変位がほぼ収束している。ただし、2年4ヶ月後に再び大きな変位を示すなど、圧縮型と同様に未だ安定化していない。

なお、地すべり対策において、アンカーの締め付け機能を考慮した設計が行われる場合がある。本実験のように、アンカー体が安定化するのに数ヶ月から一年以上を要するものとするれば、その間の荷重管理について十分留意する必要がある。

## 5. アンカータイプ別にみた極限引抜き荷重の判定に関する提案

引張型および圧縮型アンカー体の極限引抜き荷重の判定基準<sup>13)</sup>として、例えば図-43、44に示す荷重-変位量曲線が急激に上向きになる位置とすることが行われている。しかし同図に示す降伏荷重から最大荷重に至るまでの変位がアンカー体の引抜き抵抗の性能とどのような関係にあるかを明確に示す文献等は見あたらない。ここではアンカー体からもたらされる主応力の方向角の変化からこれを検証する。

分析資料は第3章3節で実施した風化凝灰岩層内での実験結果（引張型：図-29A、圧縮型：図-29B）を用いる。その荷重-変位量曲線は図-43、44のようであり、変位量は引張り材の弾性変位量とアンカー体の塑性変位量（引抜け量）を含むものである。理論伸び量曲線は引

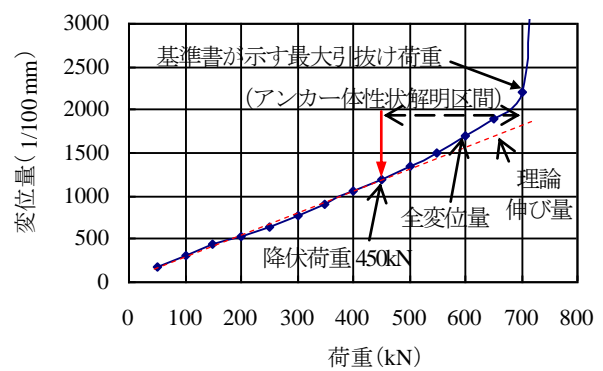


図-44 圧縮型アンカー体の荷重-変位量曲線（引抜き荷重 720kN）

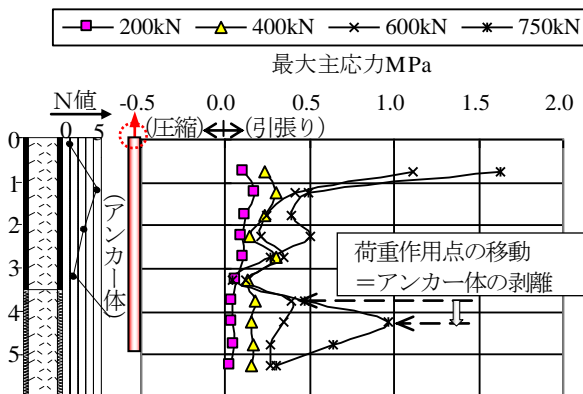


図-45 引張型アンカー体の荷重と側方地盤内の応力図

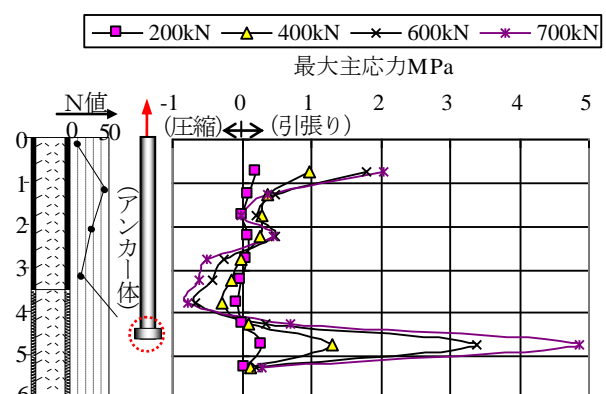


図-46 圧縮型アンカー体の荷重と側方地盤内の応力図

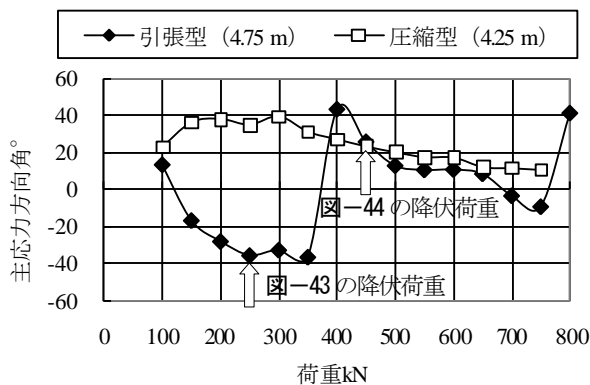


図-47 アンカー体先端付近の主応力方向角変動図

表-14 アンカー体の有効区間長に基づく摩擦強度

区分	引張型	圧縮型
アンカー体の有効区間長	250cm	300cm
最大荷重とこれに基づく摩擦強度 (A)	800kN 0.89MPa	700kN 0.65MPa
降伏荷重とこれに基づく摩擦強度 (B)	250kN 0.28MPa	450kN 0.41MPa
B/A (%)	31%	63%

張り材の自由長に弾性係数を乗じて求めた。降伏荷重は荷重-変位量曲線が理論伸び量曲線から乖離する時の荷重であり、この段階で塑性変位が漸増することを示す。またこの時のアンカー体から 25cm 離れた地盤内の応力状態は図-45、46 のようである。

図-43 より、引張型の降伏荷重は 250kN である。図-45 では荷重増と共に荷重ピーク点が引張り側からアンカー体先端方向へ移動しており、前章 4 節の室内実験 (図-35, 37) で確認されたアンカー体の剥離状況と一致する。

圧縮型の降伏荷重は図-44 より 450kN であり、引き抜けるまで図-46 のように荷重作用点は不動である。これは前章 4 節の室内実験 (図-39) で確認されたアンカー体が一体として引き抜ける状況と一致する。

一方、図-47 は図-45、46 に示した主応力において、アンカー体先端付近の主応力方向角 (図-48) を荷重段階毎に示したものである。これによれば、引張型では降伏荷重 (250kN) の段階で主応力方向角の増加が反転し、以後大きく乱れている。よって、この段階でアンカー体の剥離が先端部まで達したものと判断される。

圧縮型も降伏荷重 (450kN) の段階で主応力方向角の一層の変化がみられ、拘束具周辺地盤の変形が徐々に進行している状況と判断される。

前述したように引張り材はその許容荷重の範囲内では塑性変位はない。したがって上記の測定結果より、図-43、44 に示す理論伸び量を上回る変位量はアンカー体 (もしくは拘束具) のクリープ状態と判断される。

なお、第 2 章の式 (1) から求められる摩擦強度は、極限引抜き荷重を上記の最大引抜き荷重と降伏荷重のいずれを採用するかで表-14 のような大きな違いを生ずる。最大引抜き荷重を採用した場合の摩擦強度は引張型の方が大きい、降伏荷重の場合は圧縮型の方が大きい。

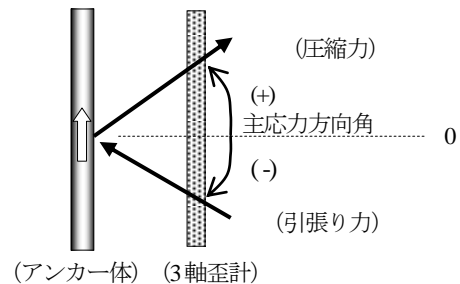


図-48 3軸歪ゲージ測定による主応力方向角の説明図

あるいは最大引抜き荷重を基準にすれば、降伏荷重に基づく摩擦強度は引張型でこれの 31%、圧縮型で 63%程度となる。以上より永久構造物を対象とするアンカーの摩擦強度算出は、安全側として降伏荷重を用いることが望まれる他、現地での基本調査試験は採用するアンカー形式と同一仕様で実施する必要がある。

## 6. まとめ

引張型、圧縮型、圧縮-分散型の各アンカー体について、アンカー体の支持機構や有効区間を解明するためのアンカー体の解体観察、引抜き試験および応力測定を行った。実験は地すべり地を想定した軟らかい岩盤 (セメントミルクによる疑似岩盤および現場試験。  $q_n=0.7\sim 16\text{MPa}$ ) を対象とし、これに基づく結論と設計上の留意点を以下に示す。

1) アンカー体の支持機構について、引張型は引張り側からアンカー体のグラウトや被定着材に順次クラックが発生し、連続的な損傷領域を形成する。アンカー体の有効区間は当領域内に形成され、適度な荷重分散による所要の引抜き抵抗を発揮する。荷重分散 (損傷領域) 範囲は強度の低い地盤の方がアンカー体幅方向での範囲が大きく、伝搬速度も早い。そのため、軟質地盤ほど他のアンカー形式より引抜き抵抗を得られやすいものと考えられる。

アンカー体の無効区間では被定着材等の拘束力が相対的に高まり荷重分散がしにくいため、有効区間が引き抜けた段階でアンカー力が引張り材に集中し、一気に先端部まで引き抜ける。

2) 圧縮型は拘束具位置から引張り側にかけて、アンカー軸を中心とした紡錘状の圧縮帯が形成され、当領域内に有効区間が形成される。極限状態に達した段階で拘束具周辺地盤を中心に局部破壊 (拘束具のすり抜け) をきたし引き抜ける。そのため、軟質地盤や脆弱部が不規則に介在する地盤では設計荷重の設定等に注意が必要である。

3) 圧縮-分散型はアンカー体拘束具 (くさび) によりアンカー体と被定着材との接触面に圧縮力がもたらされ、その時の地盤反力 (摩擦抵抗) によって引抜き抵抗が得られる。拘束具設置区間全体が有効区間となるほか、

拘束具設置地盤の平均的な強度を利用できるため、強度変化の激しい地盤などに適応しやすい。

4) 室内および現場実験から求められたアンカー体の有効区間比  $n$  (有効区間÷アンカー体径) は、被定着材の強度が“ $q_u=6\text{MPa}$ ”において、引張型で 23、圧縮型で 30.5 であった。これを実際の工事 (削孔径 90~145mm) にあてはめれば、アンカー体の有効区間は概略 2~4m と極めて短い。

5) 各アンカー体の長期安定性状について、2年 11ヶ月におよぶ引張り試験 (模型実験) によれば、依然として微少な引抜け変位を継続している。これは地すべり対策でアンカー工の締め付け機能を評価する場合、このような長期間に渡る荷重管理が必要であることを示すものであり、設計はこのことを考慮する必要がある。

6) アンカー体の極限周面摩擦抵抗の求め方について、永久アンカーは降伏荷重を用いて摩擦強度を算出すべきである。これは定着地盤内でのアンカー体から伝わる主応力方向角の乱れ (現場試験) より、荷重-変位量曲線が理論伸び量曲線から乖離する段階 (降伏荷重) でアンカー体全体がすでに変位していると判断されることによる。さらに、各アンカー体の支持機構が異なることから、摩擦強度を求める基本調査試験は本工事に採用される仕様で実施する必要がある。

今後、有効区間と被定着材の強度との関係等、さらに多くのデータ収集が必要である他、既設アンカーのリフトオフ試験結果等を収集することで、有効区間やアンカー体の耐久性に関する実態を一層明確にする必要がある。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本アンカー協会 HP, グラウンドアンカー工の施工実績より引用。
- 2) (社) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, p.102, 2000.
- 3) 瀬崎茂, 小瀧辰人, 峯谷正, 浜野浩幹: アンカー形式による支持機構と支持力の違い, 地すべり学会講演集, 2005.

- 4) (社) 地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, p.721, 1999.
- 5) (社) 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き書, p.110, 2004.
- 6) (独) 土木研究所, (社) 日本アンカー協会: グラウンドアンカー維持管理マニュアル p.119, 鹿島出版会, 2008.
- 7) 朝日和雄, 吉村雅宏, 田山聡: グラウンドアンカー工の長期耐久性に関する現地調査, pp.888~889, 土質工学年次学術講演会, 1990.
- 8) (社) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, p.35, 2000.
- 9) 中村浩之: 地すべり防止技術研修テキスト (上巻), pp.269~273, 昭和 59 年度版, 社団法人地すべり対策技術協会, 財団法人全国建設研修センター.
- 10) (社) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, p.51, 2000.
- 11) (独) 土木研究所, (社) 日本アンカー協会: グラウンドアンカー維持管理マニュアル, まえがきおよび pp.119~123, 鹿島出版会, 2008.
- 12) (社) 建設コンサルタンツ協会近畿支部: 斜面安定評価における劣化概念の導入, pp.13~16, pp.32~33, 2006.
- 13) (社) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, p.159, 2000.
- 14) 瀬崎茂, 浜野浩幹, 平島健一: 新しい支圧型アンカーの提案とその支持機構, 地盤工学会論文報告集, 2005.
- 15) 瀬崎茂, 池田靖彦, 浜野浩幹: 摩擦型アンカーの問題点-引抜形態と有効定着長に関する実験-, 2008 年度地すべり学会講演集, 2008.
- 16) 浜野浩幹, 瀬崎茂: くさび型アンカー工法, p.14, 2006.
- 17) 申 植潤: 地すべり工学-理論と実践-, p.390, 1988.
- 18) (社) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工例, p.207 工法編の扉, 2005.
- 19) (社) 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き書, p.103, 2004.
- 20) (財) 林業土木コンサルタンツ技術研究所: 森林土木ハンドブック, p.1111, 1997.

( 受付)

## PROBLEMS ABOUT THE DESIGN STANDARD OF THE EXTERNAL FRICTION TYPE ANCHOR AND THE IMPROVEMENT PLAN

Sigeru SESAKI and Hiroki HAMANO

It has been about 50 years since ground anchorages were introduced to Japan. The number of permanent anchors constructed has already reached about 100,000 a year. However, an increasing number of corrupted anchors have been reported recently. If there is a problem in the design of anchorages, one of its possible causes is the yet-to-be-clarified mechanism of the anchors' adhesion to the bedrock, in particular.

In this study, we conducted a detailed examination on the behavior of the anchor body in relation to the pseudo bedrock and examined support mechanism of anchorages. Based on its results, we suggest improvements for the designing standard of the anchorages.