

# 深部地盤におけるアンカー体の周面摩擦抵抗に関する研究

防災設計工学研究室 飯島 正泰  
指導教官 海野 隆哉

## 1. はじめに

近年、ケーソン基礎工法において、沈設精度の向上および沈下促進などを目的として反力アンカーを用いた圧入システムが導入されている。このシステムでは大きな引抜き抵抗を得るために定着長の長いアンカーが採用されており、アンカー体長が20～30mに及ぶ長大アンカーが用いられた実工事が報告されている。一方、地盤工学会「グラウンドアンカー設計・施工基準」（以下、「学会基準」）によると、アンカー体長は3～10mが標準とされており<sup>1)</sup>、これを上回るアンカーは通常用いられない。このため長大アンカー体の研究事例は少なく、長大アンカー体の力学的性状は不明確である。

本研究では、深部地盤における地盤とアンカー体の周面摩擦抵抗の関係を明らかにすることを目的とし、模擬アンカー体を作成し土被り荷重を載荷できる実験土槽を用いた室内引抜き試験を行なう。

## 2. 引抜き試験

### (1) 試験ケース

表-1に本研究で行なった試験ケースについて示す。地盤条件は砂礫・礫まじり砂・細砂の3種類のいずれかとし、それぞれ大小2種類の上載圧を載荷する試験とした。なお、本試験では全ケースを通じて防食処理を必要としない仮設アンカーを対象とした。

表-1 試験ケース

Case	地盤条件	上載圧	備考
1-1	細砂	180kPa	深度15m相当
1-2	細砂	180kPa	深度15m相当
1-3	細砂	360kPa	深度30m相当
1-4	細砂	360kPa	深度30m相当
2-1	礫まじり砂	180kPa	深度15m相当
2-2	礫まじり砂	360kPa	深度30m相当
3-1	砂礫	360kPa	深度30m相当
3-2	砂礫	180kPa	深度15m相当

### (2) 試験材料および試験準備

模擬地盤には、砂礫・礫まじり砂・細砂を用いた(表-2)。模擬地盤は、ひずみゲージを接着したテンドン及びアンカー体作製用シースを土槽中央部に設置し、含水比調整を行なった試料を投入し、層厚約10cm毎に鋼製の皿(φ24cm)と落下高さ45cm、質量4.5kgのランマーを用いて相対密度70～80%を目標とする締固めを行い、模擬地盤を作製した。アンカー

体は、模擬地盤完成後に、アンカー体作製用シースの引き抜きを行ってできる円柱状の孔に、早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比50～55%のセメントペーストの打設を行って作製した。学会基準でアンカー体の圧縮強度を仮設アンカーで18N/mm<sup>2</sup>以上と定義しているため、アンカー体打設時に作製した圧縮強度試験用供試体(φ50×100mm)の圧縮強度試験を行なってアンカー体の強度発現を確認した上で、引抜き試験を実施した。

表-2 模擬地盤のデータ

	細砂	礫まじり砂	砂礫
平均粒径 $D_{50}$ (mm)	0.21	0.57	8.5
調整含水比 (%)	5.5	5.5	2.5
均等係数 $U_c$	1.86	3.29	19.25
曲率係数 $U_c'$	0.94	1.16	1.56

### (3) 試験方法

図-1に、アンカーの引抜き試験の概要と試験時における各種計測器の配置状況を示した。また、表-3にアンカーおよび模擬地盤諸元を示した。なお、昨年度からの改良点として、上載圧載荷用電動油圧ポンプ及びリリーフ弁を導入し、引抜き試験中、上載圧の上昇を回避し一定に保持できる制御を行った。

試験ではアンカー体の引抜き荷重、アンカー頭部変位、アンカー体変位、テンドンひずみ(4ヶ所)ならびに土圧(2ヶ所)の計測を行なった。載荷方法は単調載荷とし、載荷速度0.05kN/minで引き抜きを行なった。また、センターホールジャッキのストロークが最大20cmであることから、アンカー体を20cm引き抜いた段階で試験を終了することとした。

### (4) 試験結果および考察

試験結果を表-4に、試験により得られたアンカー体の変位 $\delta$ と周面摩擦抵抗値 $\tau$ の関係を図-2に示す。なお、縦軸の周面摩擦抵抗 $\tau$ は、試験終了後に模擬地盤内から取り出したアンカー体のアンカー体長とアンカー体周長を測定し、引抜き荷重をアンカー体周面積で除して導き出した値である。地盤とアンカー体との間の摩擦に終局限界状態の破壊が生じる状態、つまり周面摩擦抵抗 $\tau$ がピークとなる値を極限周面摩擦抵抗 $\tau_u$ とする。また、昨年度本田らが行なった上載圧 $\sigma_v=0$  kPaの試験結果を参考データとして表示した。

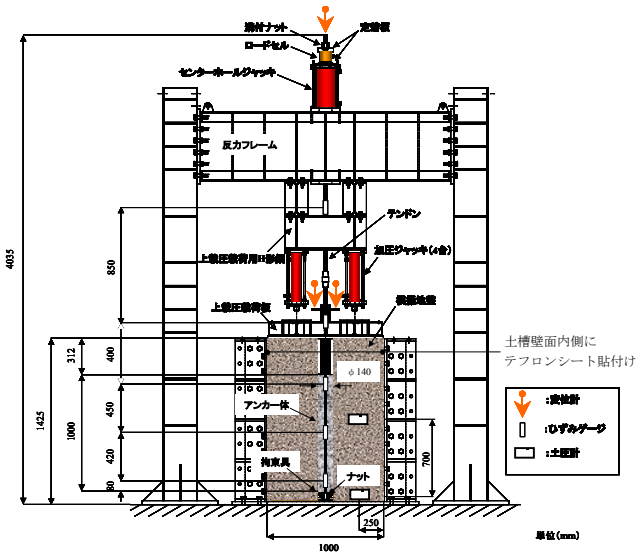


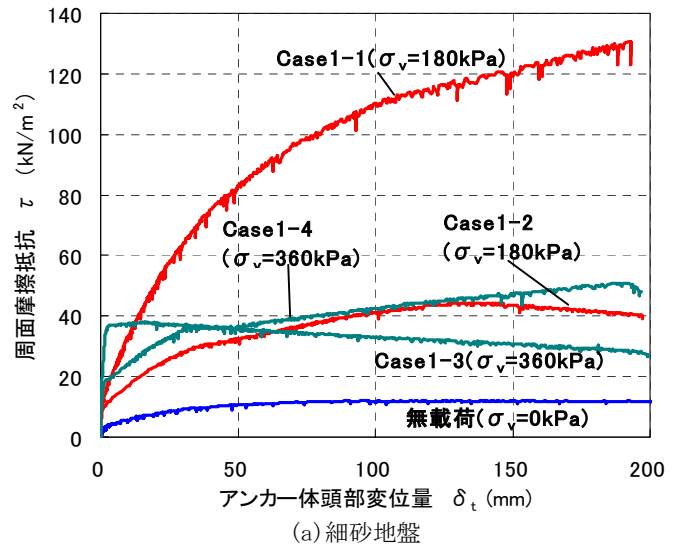
図-1 引抜き試験装置概要図

地盤材料に細砂を用いた Case1 シリーズの中で、図-2(a)に示す Case1-1 の周面摩擦抵抗が他ケースに比べて突出して大きくなった。試験後にアンカー体を掘り出して目視確認を行なった結果、アンカー体の出来形がアンカー先端に向かって太くなる形状となっており、クサビ効果が働いたことにより引抜き抵抗が増加したためと考えられる。また、Case1-3 はアンカー体変位が小さい時点で周面摩擦抵抗がピークを迎え、以降は周面摩擦抵抗が漸減傾向となったが、他のケースでは無載荷も含めて周面摩擦抵抗にピークが認められず、アンカー体変位が増加するにつれ周面摩擦抵抗も漸増している。

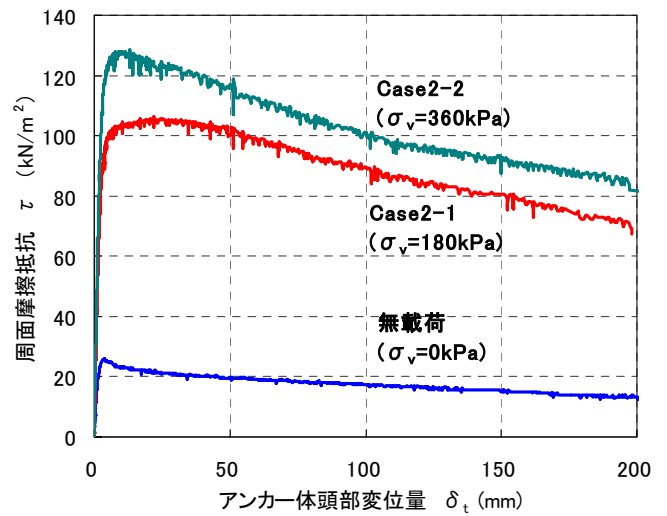
地盤材料に礫まじり砂を用いた Case2 シリーズの結果を、図-2(b)に示す。無載荷も含め、いずれのケースでもアンカー体変位が小さい時点で周面摩擦抵抗がピークを迎え、以降は漸減傾向にある。極限周面摩擦抵抗に関しては、上載圧の大きさに応じて大きくなり、同一アンカー体長・同一地盤条件でも深部に設置されたアンカーの方がより大きな摩擦抵抗が期待できることを示している。

表-3 アンカーおよび模擬地盤諸元

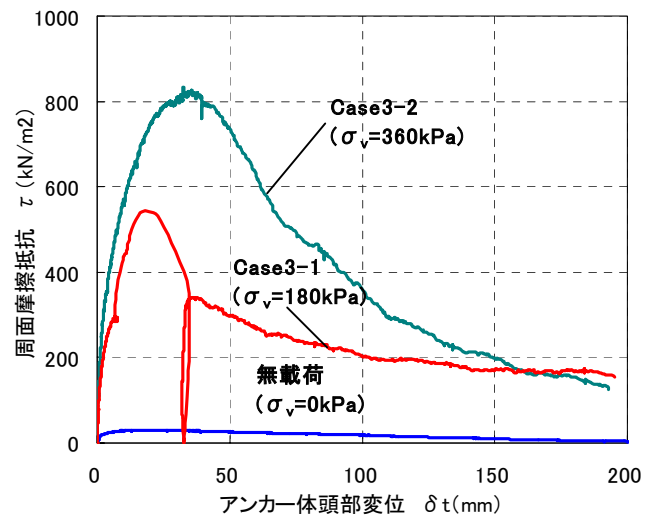
アンカー体		テンドン		模擬地盤	
アンカー体長 $l_a$ (m)	1.0	テンドン長 $l_s$ (m)	4.0	高さ (m)	1.4
アンカー自由長 $l_f$ (m)	1.3	公称直径 $\phi$ (mm)	D29	幅 (m)	1.0
削孔径 $d_B$ (m)	0.14	降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	345	奥行き (m)	1.0



(a) 細砂地盤



(b) 礫まじり砂地盤



(c) 砂礫地盤

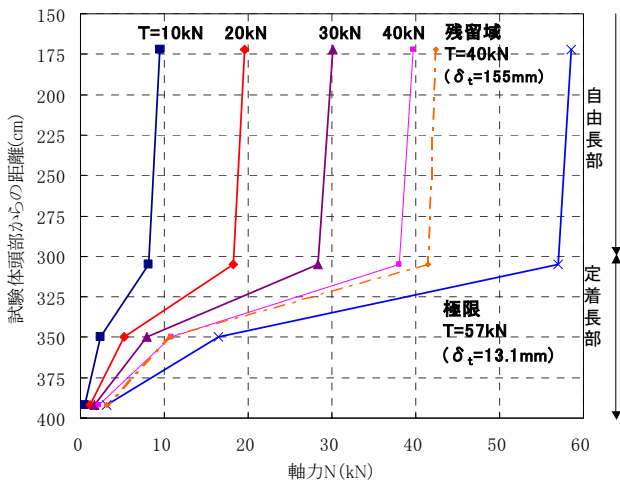
図-2 アンカー体頭部変位-周面摩擦抵抗の関係

表-4 各ケースの試験結果

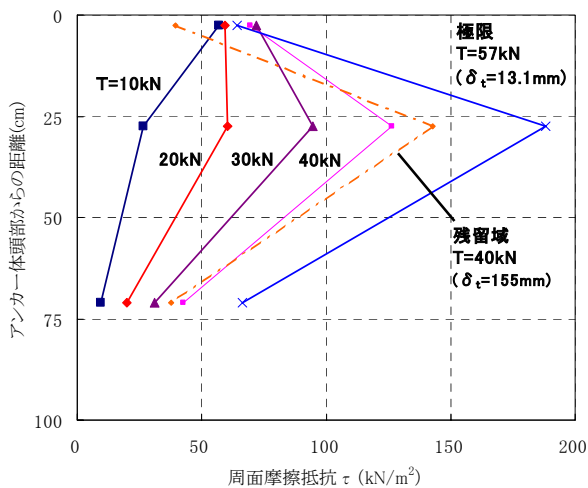
	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4	Case2-1	Case2-2	Case3-1	Case3-2
模擬地盤試料	細砂	細砂	細砂	細砂	礫まじり砂	礫まじり砂	砂礫	砂礫
上載圧 (kPa)	180	180	360	360	180	360	180	360
平均アンカー体長 (cm)	101.8	99.1	104.3	98.4	101.1	101.3	103.2	102.5
平均アンカー体周長 (cm)	47.1	46.0	44.1	45.6	44.1	43.9	44.7	45.5
極限周面摩擦抵抗 $\tau_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	130.8	44.3	38.0	50.8	106.2	128.4	542.6	834.1

地盤材料に砂礫を用いた Case3 シリーズの結果を、**図-2(c)**に示す。無載荷も含め、いずれのケースでもアンカー体変位が小さい時点で周面摩擦抵抗がピークを迎え、以降は漸減傾向にある。極限周面摩擦抵抗に関しては、細砂、礫まじり砂のケースに比べて非常に大きくなった。試験後にアンカー体を掘り出して目視確認を行なった結果、アンカー体表面に礫が付着していたり、アンカー体表面に礫が擦りつけられたような長さ方向の傷が多数存在することが確認された。これは細砂、礫まじり砂地盤のケースでは見られなかった現象であり、地盤中の礫とアンカー体に付着した礫との噛み合わせや、地盤中の礫による強い拘束力があつたことが考えられる。

次に、引抜き時における軸力と周面摩擦抵抗の分布について説明する。テンドンに貼り付けたひずみゲージから軸力を求め、各引抜き荷重の時点でアンカー体に生じる軸力の分布を**図-3**に示す。また、各区間における軸力の減少分を、その区間でのアンカー体の周面積で除した値をその区間における周面摩擦抵抗であると考え、アンカー体の長さ方向における周面摩擦抵抗の分布を**図-4**に示す。



**図-3** アンカー引抜き時における軸力分布 (Case2-2)



**図-4** アンカー引抜き時における周面摩擦抵抗分布 (Case2-2)

**図-3**によると、自由長部では引抜き力とほぼ同じ軸力が作用しているが、アンカー体内部においてはアンカー体の周面摩擦抵抗の影響で軸力が減少し、その減少割合も様々ではないことが分かる。また、**図-4**によると、引抜き荷重 $T=10\text{kN}$ の時点ではアンカー体頭部で周面摩擦抵抗が最も大きくなり先端に向かって小さくなる傾向となっているが、引抜き荷重が大きくなるとアンカー体頭部ではあまり周面摩擦抵抗が増加しないものの、アンカー体中央部付近で大きく増加していることが分かる。さらに、極限引抜き荷重に達した以降ではアンカー体頭部での周面摩擦抵抗は小さくなり始め、残留状態においてはアンカー体頭部と先端部の周面摩擦抵抗が同程度という結果となった。つまり、アンカー体の引抜き荷重が増加して変位が大きくなるにつれ、アンカー体表面に発生している摩擦の抵抗領域がアンカー体頭部から先端部へ遷移していく傾向が明らかとなった。なお、**図-3**、**図-4**ではCase2-2の結果を代表例として示しているが、いずれのケースでもほぼ同様の結果となっている。

### (5) 数値解析および考察

アンカーの引抜き試験の結果を解析によって再現できるかどうかを確認するため、FEM (有限要素法) による数値解析を行なった。

本解析では、PLAXISと呼ばれる既成のFEM解析ソフトを用い、以下の条件によって解析を行なうこととした。

数値解析の各種条件

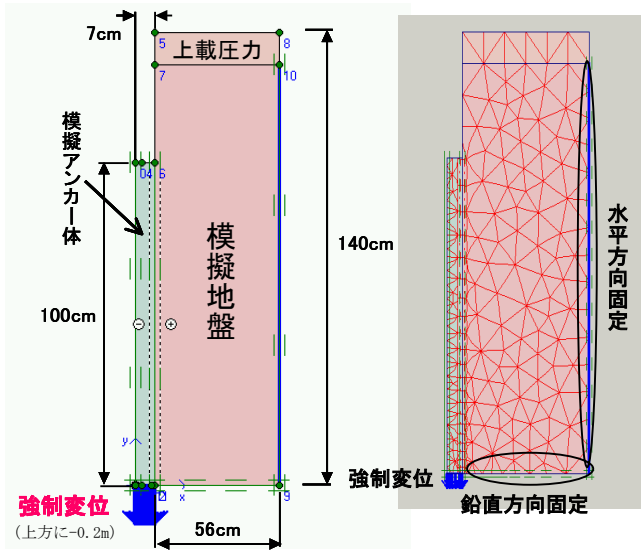
- ・解析モデル：軸対象モデル
- ・材料モデル：地盤—Mohr-Coulomb

アンカー体—Linear elastic

- ・有限要素メッシュ：6接点三角形要素
- ・入力パラメータ：単位体積重量 $\gamma$ 、変形係数 $E_{ref}$ 、ポアソン比 $\nu$ 、粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ 、ダイレイタンス角 $\psi$ 、インターフェイス強度 $R_{inter}$

このうち、変形係数については模擬地盤において平板載荷試験を行なった結果から求め、 $\nu=0.3$ 、 $c=20\text{kPa}$ 、 $\phi=35\sim 40^\circ$ 、 $\psi=0^\circ$ 、 $R_{inter}=0.8\sim 1.0$ を与えた。解析に用いる構造モデルおよび有限要素メッシュを**図-5**に示す。このモデルは土槽深さ、アンカー体寸法は引抜き試験と同一とし、土槽半径については引抜き試験で用いた土槽と等価な断面積をもつ円形土槽を考えている。

地盤条件を礫まじり砂および砂礫としたケースについて、所定の上載圧を載荷した状態でアンカー体を20cm引き抜いた場合の解析を行い、引き抜き試験の結果と比較を行なった。礫まじり砂地盤における両者を比較したものを**図-6**に示す。



(a) 構造モデル (b) 有限要素メッシュ

図-5 構造モデルと有限要素メッシュ

き時の挙動を再現することは困難であった。地盤条件を砂礫とした場合の引抜き試験結果と解析結果の比較を図-7に示す。

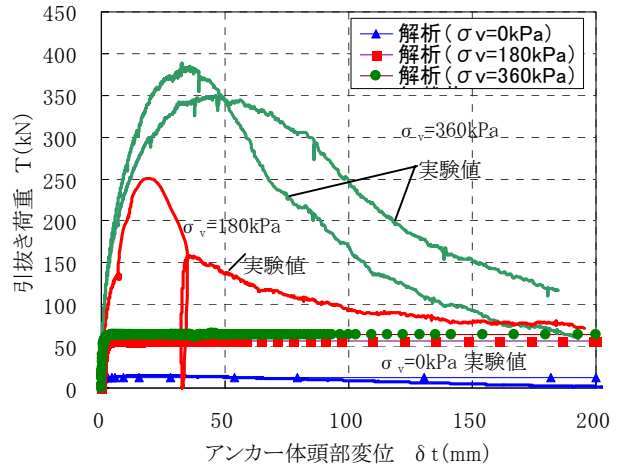
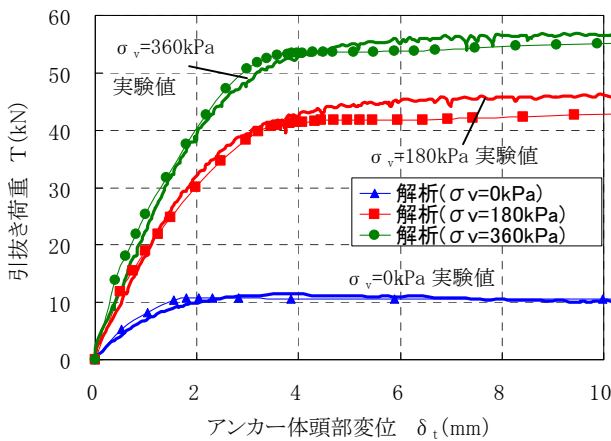
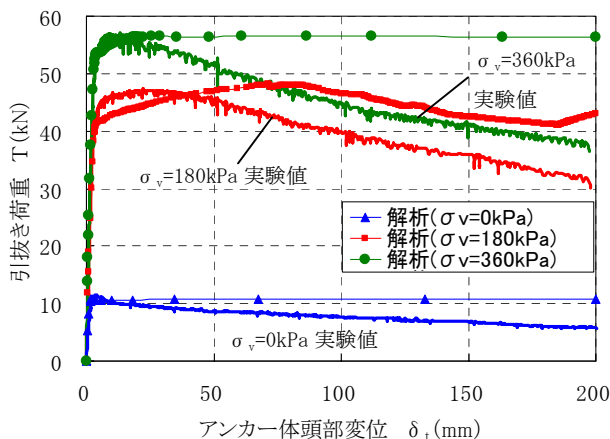


図-7 引抜き試験結果と解析結果の比較 (砂礫地盤)



(a) アンカー体頭部変位量 0~10mm の範囲



(b) アンカー体頭部変位量 0~200mm の範囲

図-6 引抜き試験結果と解析結果の比較 (礫まじり砂地盤)

アンカー体変位が0~10mmまでの範囲では解析結果を引抜き試験結果にほぼ一致させることができた。しかし、極限引抜き荷重以降ではアンカー体表面と周辺地盤との境界面に破壊が生じ、境界面にすべりが生じるなど物理的現象が複雑化しているため本解析で用いた解析ソフトでは大変位領域における引抜

$\sigma_v=0\text{kPa}$  のケースでは引抜き試験結果と解析結果をほぼ一致させることができたが、 $\sigma_v=180\text{kPa}$  及び  $\sigma_v=360\text{kPa}$  のケースではいずれも解析結果が引抜き試験結果に比べて極めて小さい値となった。これは、前述の通り砂礫地盤の場合はアンカー体と周辺地盤との間生じている礫同士の噛み合わせの影響が大きいため、通常の土質定数のみによる解析モデルでは再現が困難と考えられる。

### (5) 結論および今後の課題

本研究により次の結論を得た。

- ① 地盤条件、上載圧力、アンカー体の形状によって、極限周面摩擦抵抗とその後の荷重-変位関係は大きな違いを示す。
- ② アンカー体の変位が大きくなるにつれ、アンカー体表面の摩擦抵抗領域がアンカー体先端へ向かって遷移する。
- ③ 今回行った FEM 解析ではアンカー体と地盤との間のすべりが再現できず、大変位領域における引抜き挙動の解析は困難である。

今後は解析モデルの見直しを行い、アンカー体と地盤との間のすべりや、アンカー体の変位による地盤のダイレイタンスの影響なども考慮し、解析精度の向上を図る必要がある。解析によって引抜き試験結果の再現が可能となれば、解析モデルを拡張することによって、深部地盤における長大アンカー体の引抜き時の挙動を明らかにしてもらいたい。

### 参考文献

- <sup>1)</sup> 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 (JGS4101-2000), 社団法人地盤工学会, 2003