

長大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 本田 昌之
指導教官 海野 隆哉

1. はじめに

現在、ケーソン工法において、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。大規模なケーソンは、圧入する際に大きな反力が必要となり、工事を節減する目的として少ない本数のアンカーで大きな反力を得るために、アンカー体長 25~30m の長いアンカーが用いられている。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」¹⁾)によると、アンカー体の長さは 3~10m が標準となっており、アンカー体に引抜き力を与えた場合、変位がある限界を超えて増加していくと周面摩擦抵抗が減少し始め、10m より長くしても極限引抜き力はほとんど増加しないとされている。しかしながら、ケーソン基礎沈設時に利用される反力アンカーのような大深度領域に造成されるアンカーに関する研究事例は少なく、力学的性状は不明確である。

本研究では、室内試験において深部相当土被り荷重を与えた地盤に設置した模擬アンカー体が大変位領域にわたって引抜くことにより、長大アンカー体の引抜き時の力学的挙動を求め、周面摩擦抵抗分布を推定することを目的とする。

2. 引抜き試験

(1) 試験条件

表-1に試験ケース、表-2に模擬地盤の物理的性質、表-3に模擬地盤材料物理データを示す。表-1に示すように、模擬地盤と上載圧力の条件を変化させて引抜き試験を行った。なお、Case4については、想定する深度を30mとして表中に示す上載圧力を模擬地盤に与えた。また、表-2に示すように全ての試験ケースにおいて、目標相対密度が70~80%となるように模擬地盤を作製し、その後、早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比約53%のセメントペーストによるアンカー体の打設を行った。学会基準では、アンカー体の強度を仮設アンカーで18N/mm²以上と定義しており、圧縮強度試験結果から、材齢7日後に約25N/mm²の強度発現が確認できたことから引抜き試験を実施した。なお、作製したアンカー体の寸法は、アンカー体長1m、アンカー体径140mmの円柱型である。

表-1 試験ケース

| Case | 地盤条件 | 上載圧力 ν (kN/m ²) | 備考 |
|------|-------|------------------------------------|---------|
| 1 | 砂 礫 | 0 | 比較試験 |
| 2 | 礫まじり砂 | 0 | 比較試験 |
| 3 | 細 砂 | 0 | 比較試験 |
| 4 | 砂 礫 | 360 | 深部相当土被り |

表-2 模擬地盤の物理的性質

| | Case1 砂礫 | Case2 礫まじり砂 | Case3 細砂 | Case4 砂礫 |
|---|-------------|----------------|-------------|-------------|
| 乾燥密度 ρ_d (g/cm ³) | 2.037 | 1.692 | 1.480 | 2.028 |
| 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 2.095 | 1.769 | 1.658 | 2.109 |
| 最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³) | 2.096 | 1.772 | 1.598 | 2.096 |
| 最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³) | 1.853 | 1.528 | 1.252 | 1.853 |
| 相対密度 D_r (%) | 77.9 | 70.3 | 71.0 | 74.4 |

表-3 模擬地盤材料物理データ

| 材 料 | 砂 礫 | | | 礫まじり砂 | 細 砂 |
|-------------|----------|-----|-----|------------|-----------|
| | 礫まじり砂 | 砕 石 | 玉砂利 | | |
| 粒 径 (mm) | 0.075~25 | | | 0.075~4.75 | 0.075~0.7 |
| 均等係数 U_c | 19.25 | | | 3.29 | 1.86 |
| 曲率係数 U_c' | 1.56 | | | 1.16 | 0.94 |
| 含水比 (%) | 2.84 | | | 4.60 | 8.27 |

(2) 試験方法

図-1 と図-2 に、アンカー体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を示した。図-1 に示す試験では、模擬地盤に上載圧力を与えずに模擬アンカー体の引抜きを行った。図-2 に示す試験では、想定する深度の地盤状態を再現するために、油圧ジャッキを4台用いて模擬地盤上面に設置した上載圧載荷板へ上載圧力を与えて模擬アンカー体の引抜きを行った。試験ではアンカー体の引抜き荷重、テンドン頭部変位、アンカー体頭部変位、テンドンひずみの計測を行った。載荷方法は単調載荷とし、載荷速度 0.05kN/min で引抜きを行った。また、引張り型長大アンカー体の上下面の変位差が最大 20cm 程度あると想定されることから、アンカー体を 20cm 引抜いた段階で試験を終了することとした。なお、本研究の上載圧力載荷型引抜き試験では、載荷する上載圧力に対してアンカー体長が短いことから、テンドンとグラウトとの間の付着応力の低減による付着切れによってテンドンがアンカー体から引抜ける可能性が懸念される。従って、テンドン先端部にアンカー体径の形状に合わせた円盤型の支圧鋼板(拘

束具)を取り付けることとした。また、同一条件で試験を行うため上載圧力無載荷型引抜き試験についても拘束具を用いることとした。

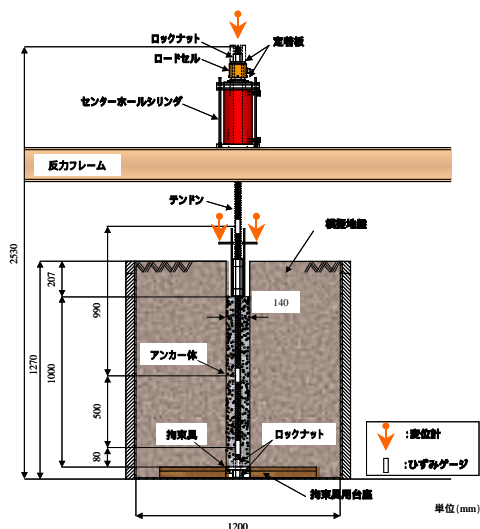


図-1 引抜き試験概要図 (Case1~3)

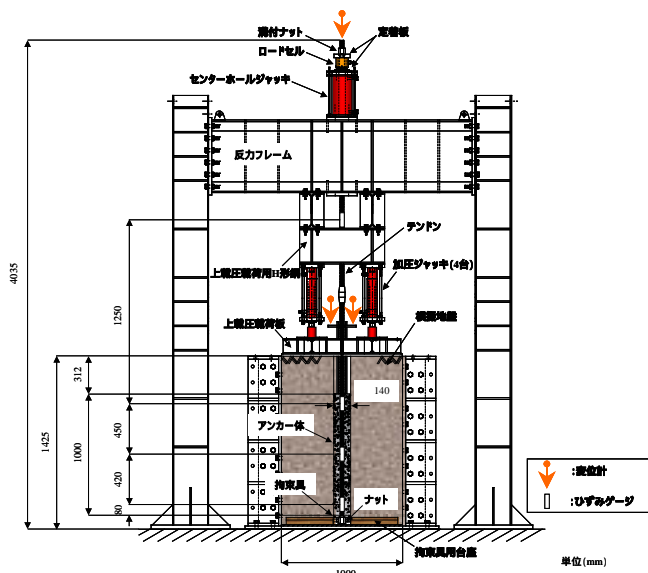


図-2 引抜き試験概要図 (Case4)

(3) 試験結果および考察

図-3 に、模擬地盤条件の違いによるアンカー体頭部変位量と周面摩擦抵抗の関係を示す。Case1 と Case2 は、極限状態に達するまでの周面摩擦抵抗が Case3 に比べて大きな値を示している。その後、残留状態における周面摩擦抵抗は、Case1 では急激に減少するものの、Case2 では Case1 に比べると緩やかに減少しているのが分かる。また、Case3 の周面摩擦抵抗は極限に達した後、他の 2 ケースに比べて急激に減少していないことが分かる。試験終了後に模擬地盤から取り出したアンカー体の直径は、細砂、礫まじり砂、砂礫の順で大きくなっており、粒径の

違いによる間隙部分へのグラウトの充填度の差異により、アンカー体表面の粗度に差が生じて周面摩擦抵抗の挙動に大きな違いを与えたものと考えられる。

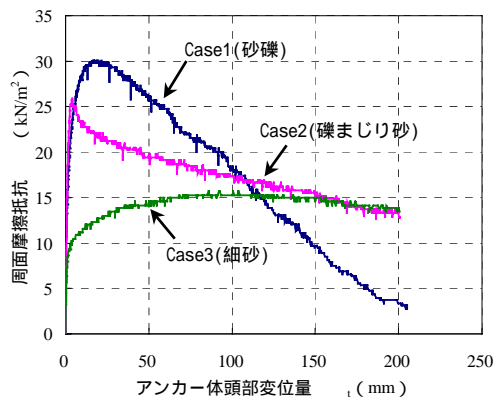


図-3 δ_t - 関係 (模擬地盤条件による違い)

図-4 に、上載圧力の大きさの違いによるアンカー体頭部変位量 - 周面摩擦抵抗関係を示す。深さ30m相当の地盤を想定して $\sigma_v = 360kN/m^2$ の上載圧力を載荷した Case4 と上載圧力を与えない Case1 を比較すると、極限周面摩擦抵抗に大きな差が生じており、Case4 の値は Case1 に対して約 24 倍となった。また、周面摩擦抵抗が最大値を示すアンカー体頭部変位量は、Case4 で 46.16mm, Case1 で 15.87mm となり、その後、周面摩擦抵抗が最大値の半分となった時のアンカー体頭部変位量は、Case4 で 131.59mm, Case1 で 111.75mm となった。よって、周面摩擦抵抗が最大値から半分の値に減少するまでの Case4 と Case1 のアンカー体頭部の変位差は、それぞれ 85.43mm と 95.88mm になっており、上載圧力の有無による周面摩擦抵抗の挙動には明確な差異は見られなかった。

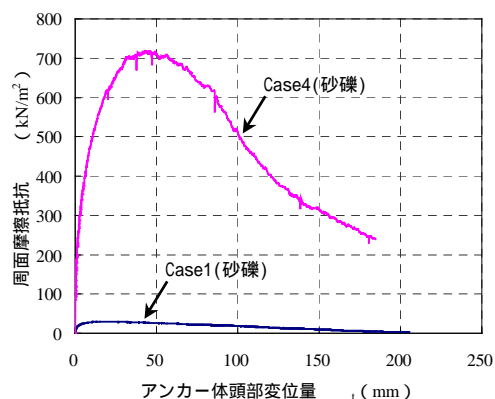


図-4 δ_t - 関係 (上載圧力の大きさによる違い)

式は、Gibbs and Holtz の実験値を用いて導出された上載圧力 σ_v 、相対密度 D_r と N 値との関係式である²⁾。また、表-4 は、アンカーの極限周面摩擦抵抗を地盤の種類に応じて分類した学会基準推奨値である。Case4 に関して、模擬地盤の N 値を式

より算出した結果、N 値は 56 となった。Case4 の試験結果より得られた極限周面摩擦抵抗は、700kN/m² **表-4** に示す N 値 50 の砂礫地盤における摩擦抵抗の範囲内におさまることが分かった。

$$N = \left(\frac{D_r}{25} \right)^{2.33} \cdot \left(\frac{\sigma_v + 70}{98} \right) \dots$$

ここに、N：N 値

D_r ：相対密度 (%)

σ_v ：上載圧力 (kN/m²)

表-4 アンカーの極限周面摩擦抵抗

| 地盤の種類 | | 摩擦抵抗 (kN/m ²) | |
|-------|-------|---------------------------|-----------|
| 岩 盤 | 硬 岩 | 1500 ~ 2500 | |
| | 軟 岩 | 1000 ~ 1500 | |
| | 風 化 岩 | 600 ~ 1000 | |
| | 土 丹 | 600 ~ 1200 | |
| 砂 礫 | N 値 | 10 | 100 ~ 200 |
| | | 20 | 170 ~ 250 |
| | | 30 | 250 ~ 350 |
| | | 40 | 350 ~ 450 |
| | | 50 | 450 ~ 700 |
| 砂 | N 値 | 10 | 100 ~ 140 |
| | | 20 | 180 ~ 220 |
| | | 30 | 230 ~ 270 |
| | | 40 | 290 ~ 350 |
| | | 50 | 300 ~ 400 |
| 粘性土 | | 1.0c (c は粘着力) | |

Case4 に関して、引抜き力が大きいことから、作用する引抜き力に対するテンドンとアンカー体グラウトの間に生じる付着応力度について考察を行う。式 に示す限界状態設計法に用いられる付着強度の特性値 (最大付着強度) を、圧縮強度から算出する³⁾。なお、式 に示されている f_{bok} 、 f_{ck} は重力単位系で表されているため、SI 単位系を換算して計算を行う。Case4 のアンカー体の圧縮強度は 22.51N/mm² であることから、式 より最大付着強度は 22.50kgf/cm² (2.21N/mm²) となる。

$$f_{bok} = 0.6f_{ck}^{2/3} \leq 43 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots$$

ここに、 f_{bok} ：最大付着強度 (kgf/cm²)

f_{ck} ：圧縮強度 (kgf/cm²)

次に、アンカー体内のテンドンに貼り付けたひずみゲージの値から Case4 で使用したテンドンの諸元 (表-5) を用いて、その位置に作用する引抜き力を算出し、ひずみゲージ各区間に生じる極限周面摩擦抵抗時の付着応力度を求めた (表-6)。周面摩擦強度最大時の付着応力度は、上部では 3.78N/mm² が生じ、下部では 4.72N/mm² が生じており、下部の方が大きな付着応力度を發揮している。また、限界状態

設計法に用いられる最大付着強度よりも大きな値を示した。Case4 は、模擬地盤に上載圧を載荷することによってアンカー体に拘束効果が作用し、付着応力度が大きくなった可能性が考えられる。一方、**図-5**⁴⁾に W.H.PRICE が行ったコンクリートと鉄筋の引抜き試験による付着へのコンクリート強度の影響を示す。このグラフから、Case4 のアンカー体の圧縮強度 22.51N/mm² (=22.51MN/m²) では、すべり量 0.25mm 時の付着応力度は約 5.0MN/m² であり、**表-6** に示した付着応力度よりも大きいことから、付着抵抗が切れなかったとも考えられる。

表-5 計算に用いたテンドンの諸元

| 呼び名 (mm) | 母材部断面積 (mm ²) | 弾性係数 (kN/mm ²) |
|----------|---------------------------|----------------------------|
| 26 | 530.9 | 205 |

表-6 極限状態における付着応力度

| アンカー体先端部からの距離 (μ) | ひずみ (μ) | 引張応力 (kN/mm ²) | 引張り力 (kN) | 付着応力度 (N/mm ²) |
|-------------------|---------|----------------------------|-----------|----------------------------|
| 上端 (95cm) | 3207 | 0.657 | 349 | 3.78 |
| 中央 (50cm) | 1930 | 0.396 | 210 | |
| 下端 (8cm) | 444 | 0.091 | 48 | |

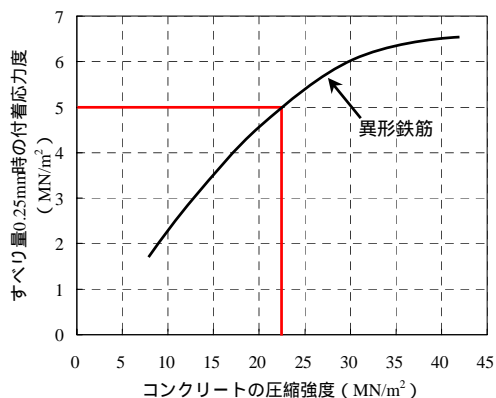


図-5 引抜き試験による付着へのコンクリート強度の影響

3. 長大アンカー体の周面摩擦抵抗分布の推定

(1) 推定条件

図-4に示すCase4の引抜き試験結果をもとに、実施工長大アンカー体の周面摩擦抵抗分布の推定を行う。実工事で造成されたアンカー体の諸元を**表-7**に示す。なお、Case4の試験結果は、N値50相当の砂礫地盤のデータとして推定計算に用いることとする。

表-7 長大アンカーの諸元

| | | |
|----------|----------------------------|--------------------|
| 設計アンカー力 | T_d (kN) | 2940 |
| アンカー自由長 | L_f (m) | 37.5 |
| アンカー体長 | L_a (m) | 30.0 |
| アンカー体径 | d_A (mm) | 135 |
| テンドン断面積 | A_s (mm ²) | 2503.2 |
| テンドン弾性係数 | E_s (N/mm ²) | 1.96×10^5 |

(2) 推定方法

推定方法は以下に示す手順で行った。

表-7に示した，設計アンカー力が作用した時に生じるアンカー体頭部の最大ひずみを求める．アンカー体頭部で生じたひずみは，アンカー体先端部へ向かって一様に減少するものとして仮定する．

ひずみをアンカー体先端から頭部方向に向かって積分し，アンカー体の各位置における変位量の分布を求める．

Case4の引抜き試験結果（図-4）をもとに，アンカー体各位置における変位分布からアンカー体各位置の周面摩擦抵抗を読み取る．

(3) 推定結果および考察

図-6に，想定長大アンカー体の周面摩擦抵抗分布を示す．図より，最大周面摩擦抵抗はアンカー体上面から9m下付近で生じ，その後アンカー体先端部に向かって減少している．また，アンカー体全周面で均一に摩擦抵抗が分布していると仮定して得た平均周面摩擦抵抗値は522kN/m²となり，アンカー体周面積を乗じた引抜き力は6641kNとなった．引抜き試験の設計アンカー力と比較すると約2倍の値となった．これは，アンカー体設置地盤全てがN値 50の砂礫地盤であるとして，長大アンカー体の周面摩擦抵抗をCase4のデータを用いて算定しているが，実地盤とは異なっている．実際の地盤のN値，土質，粘着力は，表-8に示すようになっている．学会が推奨している周面摩擦抵抗値（表-4）を基に，異なる土質（砂質土）やN値に対して補正係数を算出し，周面摩擦抵抗の補正を行う．すなわち，N 50の砂礫層に関してはCase4の引抜き試験結果をそのまま使い，粘性土層は粘着力の値を使用する．砂質土は，Case4の周面摩擦抵抗のデータに補正係数を乗じることにより算出する．図-7に，補正後の周面摩擦抵抗分布を示す．図より，平均周面摩擦抵抗値は328kN/m²となり，アンカー体周面積を乗じた引抜き力は4172kNとなった．最初の計算値と比べると，より近づく結果となった．

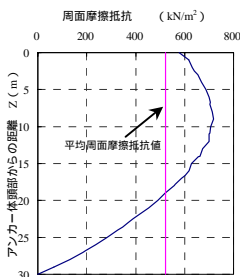


図-6 計算値

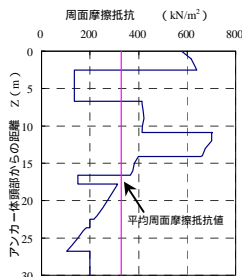


図-7 補正值

表-8 平均N値と粘着力の実測データ

| 定着層 (m) | 土質名 | 層厚 (m) | 平均 N 値 | 粘着力 (kN/m ²) | 補正係数 |
|-----------|-----|--------|--------|--------------------------|-------|
| 0~2.5 | 砂礫 | 2.50 | 50 | 0 | 1 |
| 2.5~6.7 | 粘性土 | 4.20 | 18 | 135 | - |
| 6.7~10.9 | 砂質土 | 4.20 | 46 | 0 | 0.588 |
| 10.9~14.1 | 砂礫 | 3.20 | 50 | 0 | 1 |
| 14.1~16.6 | 砂質土 | 2.50 | 50 | 0 | 0.609 |
| 16.6~17.8 | 粘性土 | 1.20 | 32 | 150 | - |
| 17.8~22.5 | 砂質土 | 4.70 | 40 | 0 | 0.557 |
| 22.5~23.6 | 粘性土 | 1.10 | 23 | 200 | - |
| 23.6~26.8 | 砂質土 | 3.20 | 38 | 0 | 0.532 |
| 26.8~30.0 | 粘性土 | 3.20 | 43 | 200 | - |

4. 本研究から得られた知見

上載圧力無載荷型の引抜き試験に関しては，模擬地盤条件の違いによってアンカー体変位量と周面摩擦抵抗の関係は大きな違いを示し，上載圧力条件の違いによる砂礫地盤の引抜き試験に関しては，極限周面摩擦抵抗や残留摩擦抵抗は大きく異なることが分かった．

上載圧力360kN/m²を砂礫地盤に載荷した場合（N値56相当）の引抜き試験結果より得られた極限周面摩擦抵抗は，学会基準推奨値の極限周面摩擦抵抗（N値50の砂礫地盤）の範囲内におさまることが分かった．

5. 今後の課題

今回は，試験装置作製の遅延から上載圧力載荷型の引抜き試験については一種類のみにとどまった．今後は，さらに地盤条件や上載圧力をパラメーターとした引抜き試験を行い，数値解析を用いて実挙動を考慮した長大アンカー体の周面摩擦抵抗分布を推定する必要がある．

参考文献

- 1) 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，社団法人地盤工学会，2003
- 2) 海野隆哉・青木一二三 砂の内部摩擦角の推定式，第20回土質工学研究発表会議講演集，1985，pp385，386
- 3) 鉄道総合技術研究所編，鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物 - ，丸善株式会社，1992，pp58～61
- 4) ネビルのコンクリートの特性，技報堂出版株式会社，1979，pp234，235