

波による繰返し引抜き力を受ける水中トンネル海底基礎杭の挙動

鳥井原 誠 伊藤 政人 崎本 純治
平間 邦興 飯田 康博
(本社 土木技術本部
設計第4部)

Behavior of an Ocean-Floor Foundation Pile Subjected to a Cyclic Pull-out Force due to Waves

Makoto Toriihara Masato Ito Junji Sakimoto
Kunioki Hirama Yasuhiro Iida

Abstract

In a structure such as a submerged floating tunnel, it is important to make clear the behavior of piles which are acted on by the cyclic pull-out force due to waves, in addition to the large static pull-out force due to buoyancy. For that purpose, cyclic pull-out loading tests using model piles ($\phi 30 \text{ mm} \times h 450 \text{ mm}$ and $\phi 100 \text{ mm} \times h 2,500 \text{ mm}$) were conducted in indoor soil containers ($\phi 300 \text{ mm} \times h 400 \text{ mm}$ and $\phi 1,000 \text{ mm} \times h 2,500 \text{ mm}$),

As a result, it was possible to quantitatively evaluate the decrease in the ultimate pull-out force on a pile under cyclic loading. This result is very important for designing actual piles of a submerged floating tunnel.

概 要

水中トンネルのような構造物では、浮力によって常時大きな引抜き力を受けた状態でかつ波による繰返し引抜き力を受ける海底基礎杭の挙動を解明することが非常に重要である。そのため、小型モールド ($\phi 300 \text{ mm} \times h 400 \text{ mm}$) と大型土槽 ($\phi 1,000 \text{ mm} \times h 2,500 \text{ mm}$) を用いて模型杭 ($\phi 30 \text{ mm} \times h 450 \text{ mm}$ および $\phi 100 \text{ mm} \times h 2,500 \text{ mm}$) の室内繰返し引抜き実験を行った。その結果、繰返し時の杭の極限引抜き力は静的な場合に比較して低下することが明らかとなった。この成果は実際の水中トンネル海底基礎杭を設計するうえで非常に重要である。

1. はじめに

水中トンネルとは、写真-1 に示すように陸上で製作したチューブ上の函体を海中においてテンションレグで固定しながら連結することによって道路・鉄道などとして利用する、今までにないタイプのトンネル形式である。このような形式を採用すると、従来の沈埋トンネルでは困難であった大水深にも容易に適用できることから現在各方面から注目を浴びている。

テンションレグの固定方式は図-1¹⁾に示すようなさまざまなタイプが考えられるが、いずれのタイプでも函体に働く大きな浮力に十分耐えられるだけのアンカー体を海底地盤に構築しなければならない。しかも、海中に設置された函体は浮力以外にも、波浪や潮流といった複雑な力を受けるため固定部の設計には今までにないさまざまな検討が必要である。

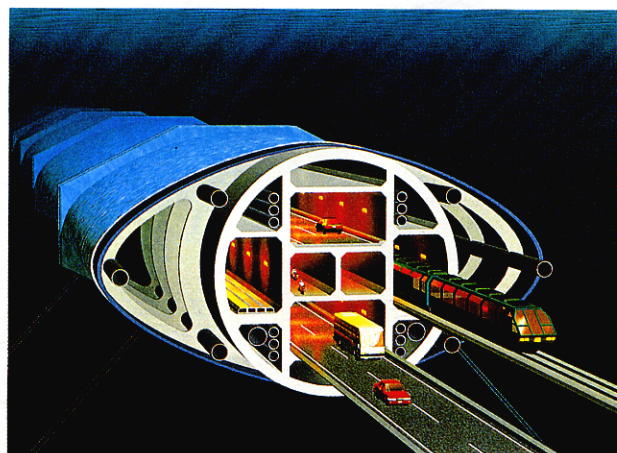


写真-1 水中トンネルの概念図

現在、筆者らが想定している水中トンネルを係留するためのテンションレグ張力は常時で20MN/本という大きいものであり、しかも波浪による変動張力±20MN/本を考慮すると最大40MN/本、最小0MN/本といういまだかつてない大きな繰返し引抜き荷重が発生することが予想されている。このような繰返し引抜き荷重に抵抗する基礎構造としてアンカー式および杭式基礎の検討を進めてきたが、海底地盤が沖積あるいは洪積層の場合には杭式基礎が最適であるとの結論が得られている。しかし、常時大きな引抜き荷重を受けた状態でかつ繰返し引抜き荷重を受ける杭の挙動に関しては、この種の荷重を受ける構造物の建設例がないことから研究事例も少なく不明な点が多い(ただし、粘性土については、最近、稲、岸田²⁾によって精力的な研究がなされている)。

そこで、今回、小型円形モールド(φ300mm×h400mm)および大型円形土槽(φ1,000mm×h2,000mm)と模型杭(φ30mmおよびφ100mm)を用いた繰返し引抜き実験を実施した。

2. 噴火湾におけるケーススタディ

2.1 噴火湾の地盤モデル

現在、水中トンネル研究会では図-2¹⁾に示す北海道の噴火湾を対象として水中トンネルの適用性を検討している。図-3¹⁾に噴火湾の推定土層断面図を示す。最大水深は80~90m、延長は約30kmであり、全長にわたって

火山灰や粘土からなる層厚2~3mの表層土が堆積している。函館側約10kmの範囲は表層土の下に軟質凝灰岩が堆積しており、中央部約10kmの範囲は沖積層が厚さ約30m、室蘭側約10kmは洪積砂レキ層が厚さ約50m堆積している。以上のことから、今回は噴火湾の地盤を図-4¹⁾に示すタイプA、B、Cの3種類に分類した。

2.2 基礎構造物の基本設計

水中トンネルの基礎形式を大きく分類すると図-5¹⁾に示すように①重力式基礎、②杭式基礎、③グラウンドアンカー式基礎の3種類が考えられる。上記研究会で想定している水中トンネルでは、トンネル外径がφ=23.0m

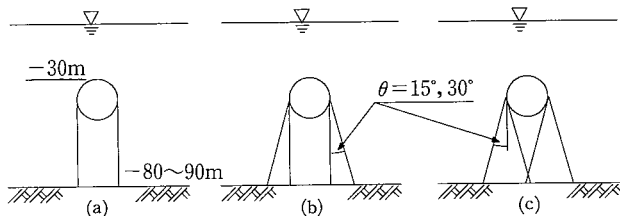


図-1 水中トンネルの固定方式

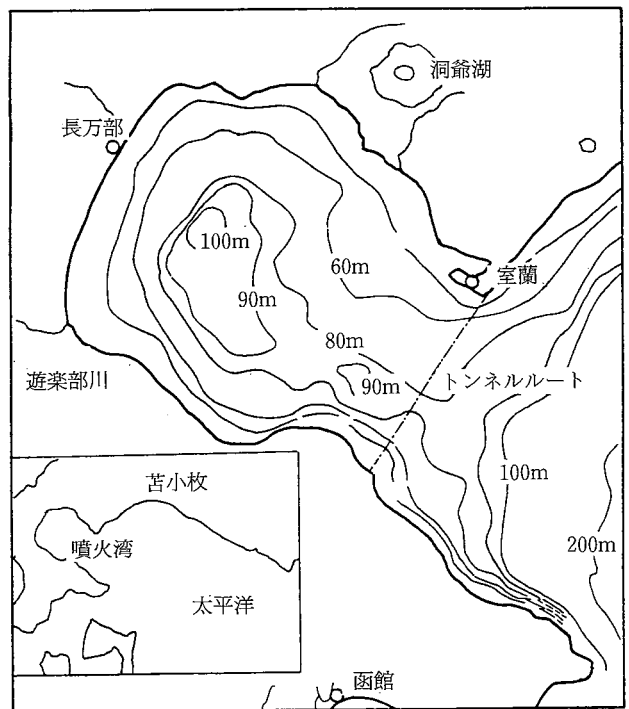


図-2 噴火湾の海底地形図

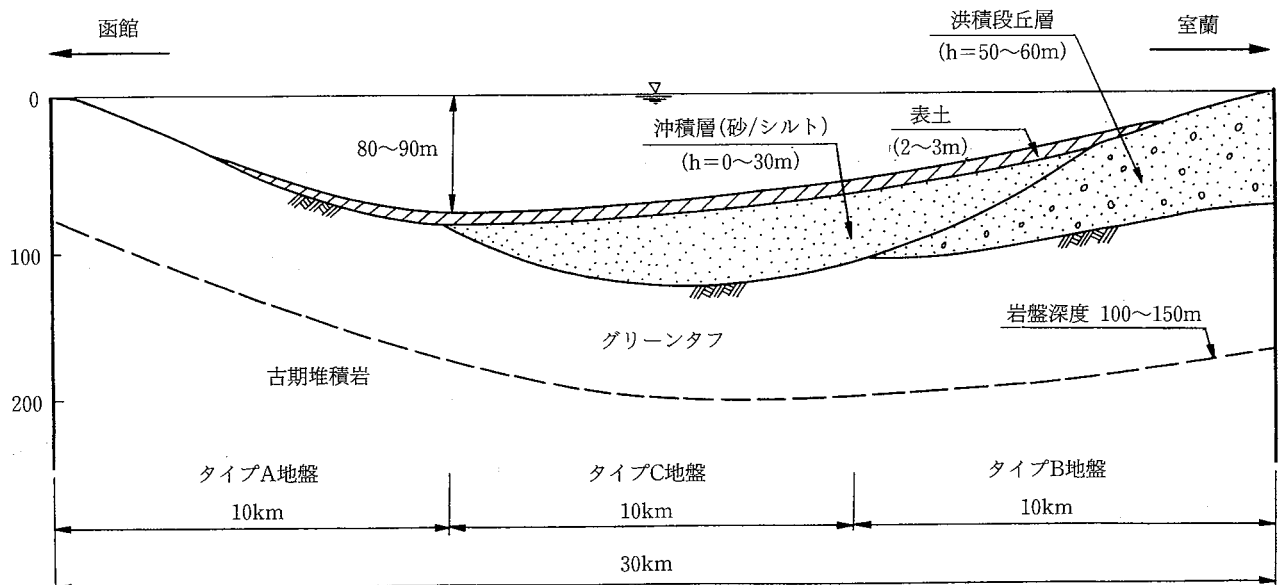


図-3 噴火湾の海底地盤断面図

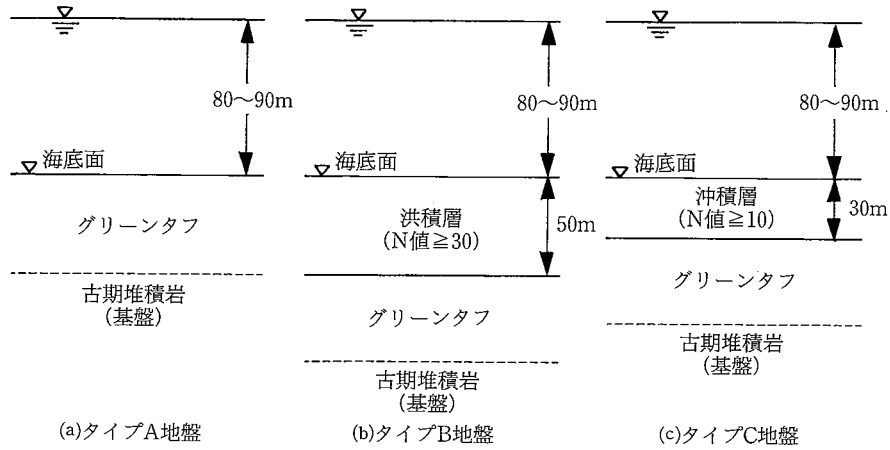


図-4 噴火湾の地盤タイプ

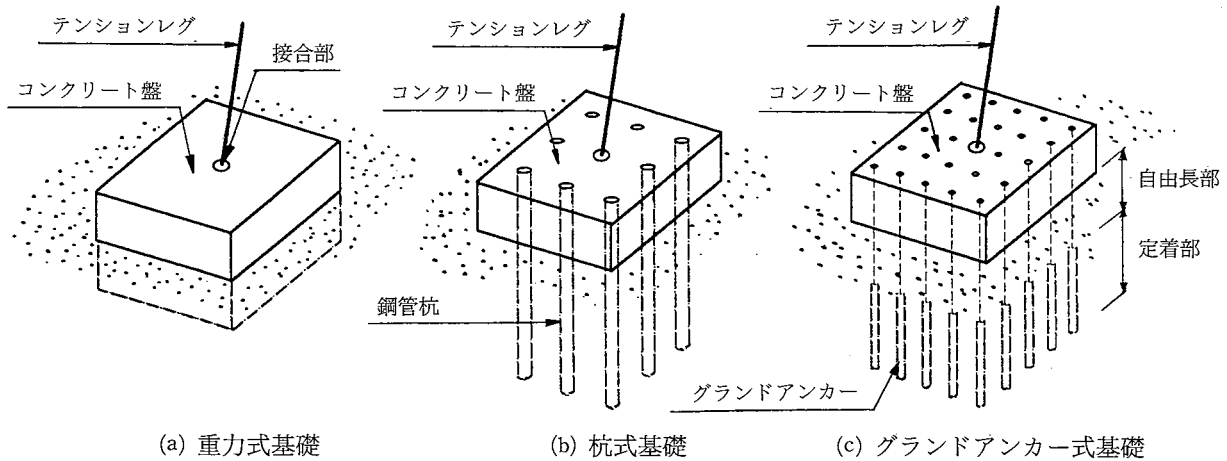


図-5 基礎形式の分類

の場合にテンションレグ張力の最大値(波浪時)は約40 MN/本、 $\phi=11.4$ mの場合には約10MN/本となると予想されるが、基礎形式の選択の際にはこのような設計外力のほかに、経済性や施工性も十分考慮しなければならない。

以上の検討結果を踏まえて各地盤タイプごとに適した基礎形式を整理すると次のようになる。

(1) タイプA地盤(軟質凝灰岩) グラウンドアンカー式基礎を主体とした基礎形式とすべきである。ただし、当サイトの凝灰岩が軟質であることを考慮すると、アンカーによるプレストレスのみで安定性を確保することは難しいため、実際には「重力式+グラウンドアンカー式基礎」とすることが望ましい。

(2) タイプB地盤(洪積砂レキ層) 杭式基礎を主体とした基礎形式とすべきである。グラウンドアンカー式基礎では洪積砂レキ層の定着力不足や、繰返し荷重、クリープ変形などによるプレストレスの低下が予想されるため不適である。ただし、トンネル断面が小さい場合には重力式基礎でもよい。

(3) タイプC地盤(沖積層) 「重力式+杭式基礎」

を主体とすべきである。ただし、トンネル断面が小さい場合には杭式基礎単独でも適用可能である。重力式基礎単独では地震時の滑動に対する安定性が確保できない。

以上述べてきたように洪積砂レキ層(タイプB)、沖積層(タイプC)では杭式基礎の設計が非常に重要である。水中トンネルにおける杭は常時大きな引抜き力を受けており、しかも、波による繰返し力を受けるという、従来の杭では考えられない外力を考慮しなければならない。その外力に抵抗するのは杭と周辺地盤の摩擦力のみである。今回このような設計上の問題点を解明するために模型杭を用いた繰返し引抜き実験を行った。

3. 模型杭の繰返し引抜き実験

3.1 小型モールド実験

3.1.1 実験方法

(1) 実験装置 実験装置の概要を図-6に示す。内径 $\phi=300$ mmの亚克力モールド内に砂を詰め、その中心に設置した模型杭($\phi=30$ mm)を引抜く機構になっている。制御は油圧サーボシステムを採用しており、荷重および変位制御が可能である。また、この装置では繰

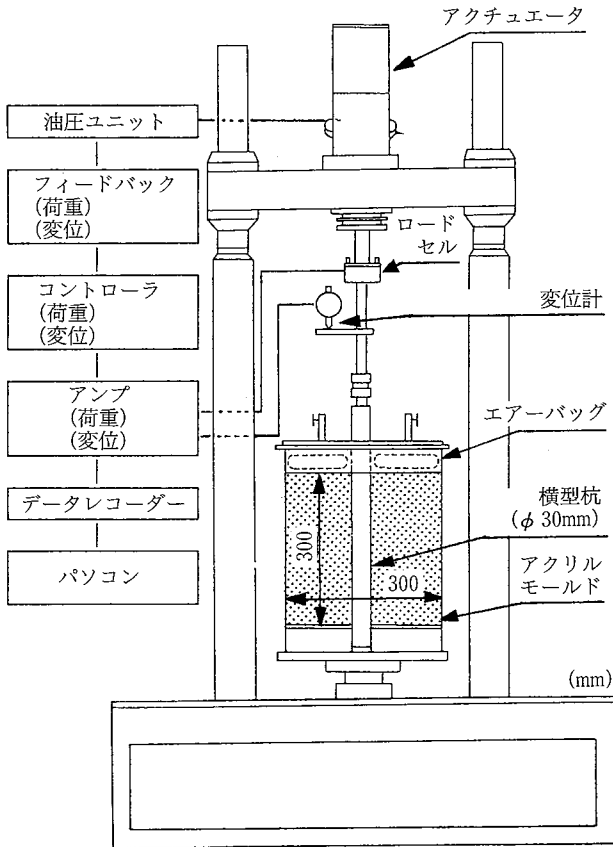


図-6 小型モールド繰返し引抜き実験装置

返し実験のほかに静的実験も可能である。模型杭はモールド下部に貫通させる機構となっており、模型杭が引抜けても周辺の砂との接触面積は変化せず一定である。また、模型杭の表面には実験に使うものと同じ砂を接着剤で貼付けている。

モールド上部にはエアバッグを設置しており、任意の上載荷重をかけることができる。

(2) 実験地盤 実験材料は図-7の粒径加積曲線をもつ山砂である。乾燥した砂を空中落下法でモールド内に投入して所定の密度の地盤を作成した。作成後モールド下部から水を入れ、地盤全体を水で飽和させた。今回の実験では相対密度は $Dr=80\%$ (乾燥密度、 $\gamma_d=1.54\text{ t/m}^3$)である。

(3) 実験ケース 実験は静的実験と繰返し実験の2ケースである。まず、静的実験を行い最大引抜き力を求めた後、図-8に示すようにその力の50~90%の振幅で繰返し実験を行った。繰返し実験での波形は正弦波、周期は8秒である。噴火湾の波の観測結果によれば周期 $T_{1/3}=13.0$ 秒となっているが、継続時間の長い波を考慮して周期を短く設定した³⁾。上載荷重は $\sigma_v=30\text{ kN/m}^2$ である。

3.1.2 実験結果 上載荷重 $\sigma_v=30\text{ kN/m}^2$ の時の静的引抜き実験結果を図-9に示す。変位速度一定(2.0 mm/min)で引抜き量が約8 mmになるまで模型杭を引抜いた後、1時間ほど放置して再度引抜き実験を行った

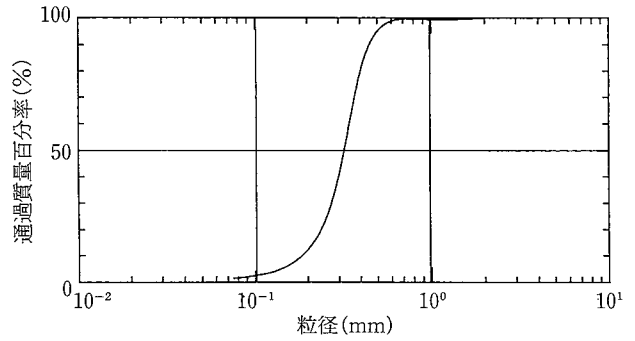


図-7 粒度分布

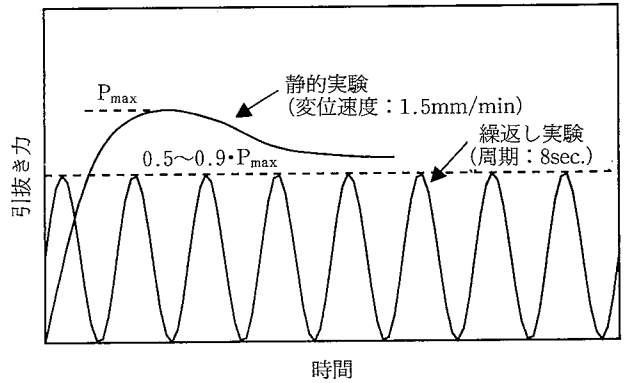


図-8 実験パターン

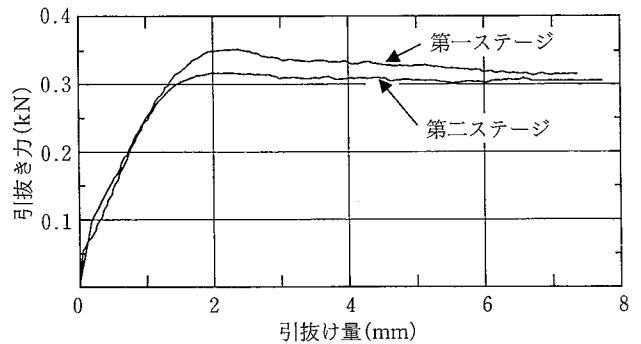


図-9 静的引抜き実験結果

ケースである。

1ステージ目の結果をみると、当初は引抜き力が急激に増加するが、引抜き量2 mm付近でピークとなりその後低下してほぼ一定値となっている。この傾向は密な砂の排水三軸試験でピーク強度と残留強度が現われるのによく似ている。1ステージ終了後1時間放置して行った2ステージ目の結果を見るとピークが消失し、引抜き力が最大になった後ほぼ一定値を示していることが明らかである。しかも、この値は1ステージ目の残留強度とほぼ等しくなっている。

図-10は静的実験で得られた模型杭の極限引抜き力より小さな力を正弦波形で繰返し与えた時の実験結果の一例である。これらは繰返し時の最大引抜き力が0.56 kNと0.48 kNの時の引抜き力および引抜き量と時間との関係を示したものである。実験開始後しばらくは引抜き量はほとんど増加しないが、ある波数を過ぎると引抜け

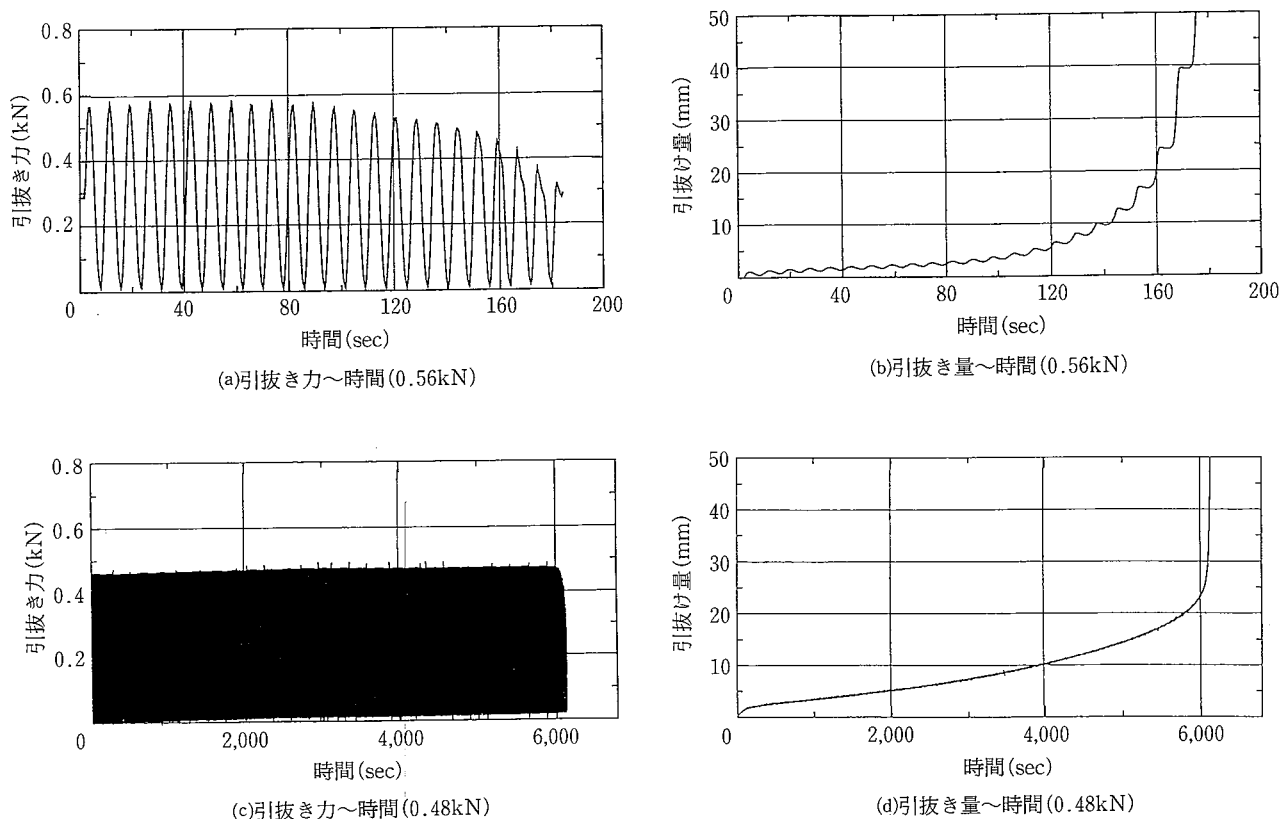


図-10 小型モールド繰返し引抜き実験結果

量が急激に増加する傾向が明らかである。図-10の実験結果でいえば、引抜き力0.56kNの場合で23波目である。模型杭が引抜け始めるとともに繰返し引抜き力の振幅が低下しているのは、あまりにも急激な変位であるため油圧サーボシステムの追従性が低下するからである。

このような結果は他の実験ケースでも同様に現われており、引抜き力の振幅が小さくなるほど引抜けるまでの波数が多くなっている（図-10(c)は時間軸を圧縮しているため黒くなっているが実際には正弦波である）。この傾向は砂の液状化試験結果とよく似ている。ただし、液状化試験の場合は完全に非排水条件であるため繰返し時に変形が大きくなるのは過剰間隙水圧の上昇による有効応力の低下がその原因であるが、今回の実験は排水条件であるため引抜け量の増加を過剰間隙水圧の上昇で説明することはできない。では、なぜ静的な極限引抜き力よりかなり小さな力の繰返しで杭は引抜けたのであろうか。筆者らは次のように考える。

引抜き力の振幅が小さくても杭近傍の地盤には確実にひずみが発生する。繰返し初期にはそのひずみは小さいけれども、繰返し回数が増すにつれてそのひずみは累積していく。そして、あるところで杭周辺の地盤の破壊が生じて杭と地盤との摩擦抵抗が失われてしまうのである。このような破壊は杭周辺のきわめて局所的な範囲に限定されているであろう。

図-11は繰返し実験中の引抜き力の振幅と引抜けたときの波数の関係を示している。いずれの上載荷重にお

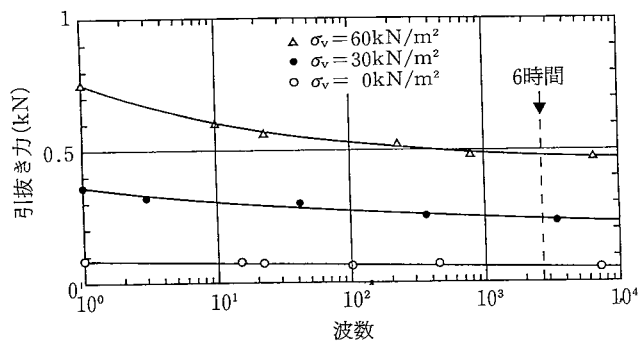


図-11 引抜き力～波数

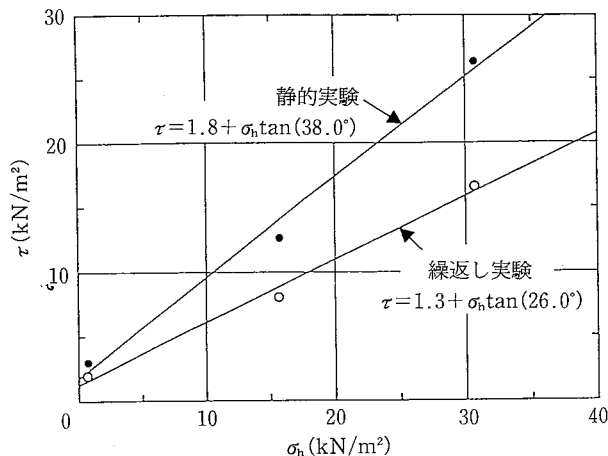


図-12 せん断力 τ ～直応力 σ_n

る実験でも引抜き力の振幅が小さくなるほど引抜けるまでの波数が大きくなること、波数がいくら増加しても引抜けない限界引抜き力の振幅が存在することが明らかである。図中に経過時間6時間に相当する波数(2,700波)を示すが、これは台風など大きな波が継続する時間の代表的な例である⁴⁾。すなわち、継続時間6時間の台風では図中の引抜き力～波数曲線上の2,700波に相当する引抜き力の繰返しで杭は引抜けてしまうのである。水中トンネルにおける杭の設計ではこの点に十分注意しなければならない。

図-12は杭の引抜き時に杭表面に発生するせん断応力 τ と直応力 σ_h の関係を示したものである。

$$\tau = P/A$$

$$\sigma_h = K_0 \cdot (\gamma \cdot h + \sigma_v)$$

ここで、P：引抜き力、A：杭の表面積

K_0 ：静止土圧係数(0.5と仮定)

γ ：砂の密度、h：深さ

σ_v ：上載荷重

図中の実線は今回の実験結果を直線近似したものであるが、繰返し時には杭と周辺地盤との摩擦力をかなり低減させた設計をすべきことが明らかである。

3.2 大型土槽実験

3.2.1 実験方法

(1) 実験装置 図-13に試験装置全体図を、図-14に計測器配置図を示す。内径1.0m、高さ2.5mの土槽の中心に杭を設置した後、2.0mの厚さの地盤を作成し引抜き実験を行った。土槽は地盤作成および計器設置の関係から4段に分割されており、ボルトによってそれぞれを結合した。

模型杭は外径10cm、長さ2.5m、厚さ3mmのアルミ管を用いており、その表面には実験地盤と同じ砂を接着剤で貼付けた。杭の下端は小型モールド実験同様、引抜き実験中の杭と地盤の接触面積が変化しないように地盤を貫通させた。また、杭表面には25cmピッチにひずみゲージを、50cmピッチに間隙水圧計を取付けた。

荷重の制御は小型モールド実験同様、油圧サーボシステムを用いており、荷重および変位制御が可能である。模型地盤上面からは鋼製の載荷板(径95cm、厚さ2.5cm)を介して油圧ジャッキ4本によって任意の上載荷重をかけられるようになっている。

(2) 実験地盤 実験には小型モールド実験で用いた砂と同じものを用いた。地盤は含水比を一定に調整した後、タンピングにより所定の密度になるよう10cmづつ作成し、その後土槽下部から水を注入して地盤全体を水で飽和させた。

(3) 実験ケース 最初に静的実験を行い、最大引抜き力 P_{max1} を確定した後、放置期間を1日として引抜き力振幅を段階的に増加させるステップ荷方式で繰返し実験を行った。繰返し実験における周期は小型モールド実験同様8秒であり、継続時間は6時間である。上載荷重は $\sigma_v = 73 \text{ kN/m}^2$ (土被り圧8m相当)とし、試験地

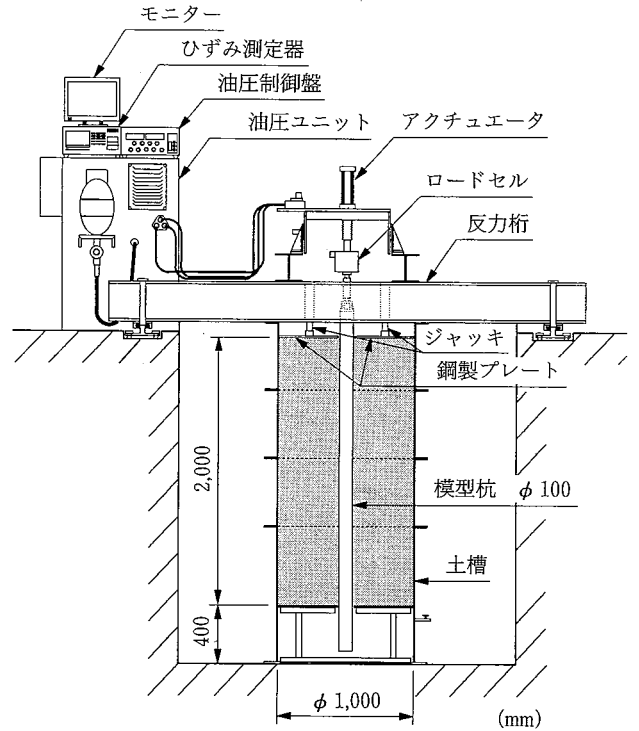


図-13 大型土槽実験装置

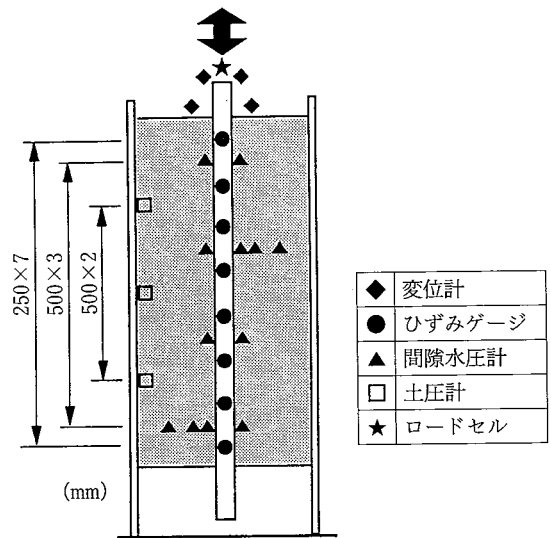


図-14 計器配置図

盤の相対密度を $Dr = 80\%$ (乾燥密度 1.54 t/m^3)としたケース(以下密詰め)と $Dr = 50\%$ (乾燥密度 1.46 t/m^3)としたケース(以下ゆる詰め)を行った。なお、密詰めは、静的実験、繰返し実験とも同一地盤条件で2回行った。

3.2.2 実験結果および考察

(1) 静的実験 図-15に変位速度一定(1.5 mm/min)の静的実験における引抜き力～変位曲線を示す。静的実験によって得られた P_{max1} は密詰めで 20.6 kN と 23.5 kN 、ゆる詰めで 9.8 kN であった。密詰めの場合で P_{max1} に若干の違いが生じたのは地盤作成の再現性に起因するものと考えられる。

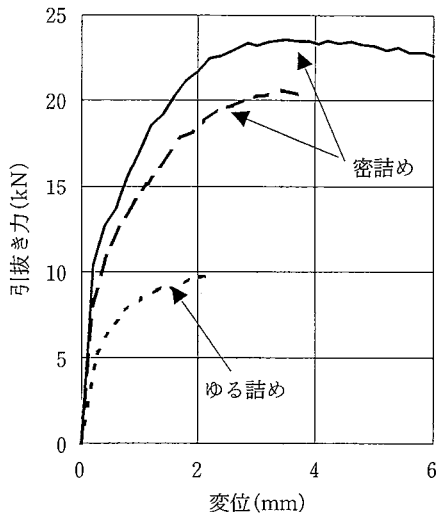


図-15 大型土槽静的引抜き実験結果

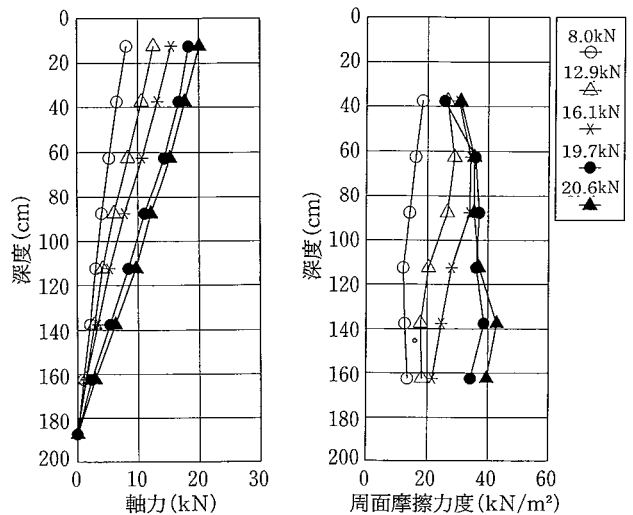


図-16 杭体軸力と周面摩擦力度分布 (静的実験)

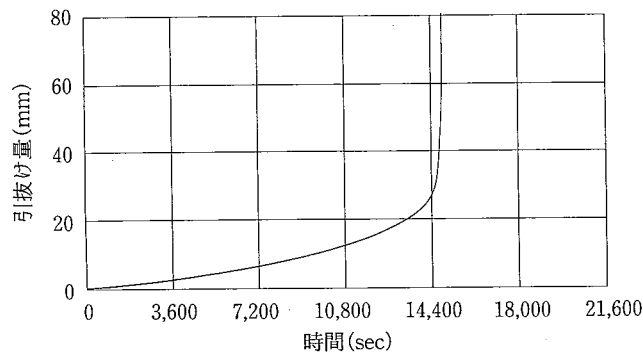
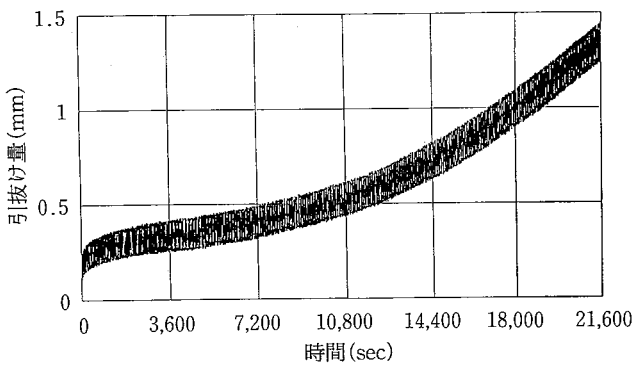


図-17 大型土槽繰返し実験結果

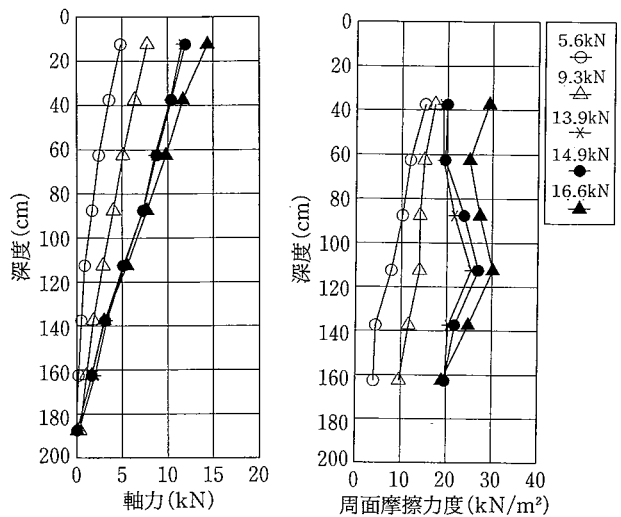


図-18 杭体軸力と周面摩擦力度分布 (繰返し実験)

表-1 大型土槽実験結果一覧

	静的載荷実験 Pmax 1	繰返し載荷実験 Pmax 2	$\frac{Pmax 2}{Pmax 1}$
密詰め	22.1 kN	18.6 kN	0.84
		13.6 kN	0.62
ゆる詰め	9.8 kN	6.4 kN	0.65

図-16に密詰めにおける杭体の軸力分布と周面摩擦力度の分布を示す。引抜き力が小さい段階においては周面摩擦力度も全体的に小さいが、引抜き力が大きくなると杭上部がまずフルモビライズし、さらに大きくなると下部までフルモビライズして全体がほぼ一様な分布になるのがわかる。

(2) 繰返し実験 図-17に密詰めの場合の引抜き力振幅18.6 kNで引抜けたケースにおける時間～引抜き量関係の一例を示す。引抜き力振幅13.9 kNのときは、実験開始2時間経過後から引抜き量は増加傾向にあり1振幅あ

たりの変位量も徐々に増加しているが、最終的な引抜きには至っていない。引抜き力振幅を18.6 kNにした場合は、実験開始後しばらくは引抜き量の増加は少ないものの、ある時間を経過すると引抜き量が急激に増加して最終的には引抜けた。この傾向はゆる詰めの場合にも認められ、前述の小型モールド実験と同様の結果であった。

繰返し実験の引抜き力振幅Pmax 2と静的実験のPmax 1、および両者の比を表-1に示す。なお密詰めの場合、Pmax 1は2回の結果を平均して22.1 kNとした。密詰め、ゆる詰めどちらの場合も繰返し時の最大引抜き力は

静的実験の値よりも小さい結果が得られた。このように、6時間というある一定時間繰返し引抜き力を受けた場合、静的引抜き力よりも小さい引抜き力で抜けてしまうことが大型土槽実験においても明らかになった。

図-18に密詰めの各荷重ステップにおける載荷開始後4時間目の軸力分布と周面摩擦力度分布を示す。周面摩擦力度分布に着目すると、静的実験と同様に引抜き力が大きくなるにつれ杭上部から周面摩擦力がフルモビライズし、引抜き力が最大値に近くなると杭下部もフルモビライズして全体がほぼ一様な分布となるのがわかる。

4. 結論

今回の研究から以下に示すことが明らかになった。

- ① 噴火湾の水中トンネルの基礎形式は地盤によって3タイプに分けられるが、洪積層および沖積層では杭式基礎が必要である。
- ② 波による繰返し力によって杭の極限引抜き力は低下する。
- ③ 振幅の異なる繰返し引抜き実験を行うことによって、任意の繰返し経過時間に対応した極限引抜き力を求めることができる。
- ④ 静的条件、繰返し条件に係わらず、杭周面の摩擦

抵抗は杭表面の直応力に比例する。

5. あとがき

この研究は北海道大学、室蘭工業大学、北海道開発局、大林組、東洋建設、熊谷組、鴻池組、竹中土木、地崎工業、日本国土開発、北海道開発コンサルタントの共同研究の一部である。記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) (社)水中トンネル研究調査会：水中トンネルの実用化に関するシンポジウム，p.32, 54, 71, 72, (1992)
- 2) たとえば，稲，岸田：繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の破壊機構と限界荷重，第28回土質工学研究発表会，p.1635～1638, (1993)
- 3) Lee, K.L. & Focht, Jr.J.A. : Liquefaction potential at Ekofisk tank in North Sea, Journal of the Geotechnical Engineering Division, A.S.C.E. Vol.101, No.GT1, p.1～18, (1975)
- 4) Rahman, M.S. Seed, H.B. & Booker, J.R. : Liquefaction analysis for offshore oil tanks, University of California, Geotechnical Engineering Report No.TE76-2, (1976)