

杭式アンカーの海中落下挙動と海底地盤への貫入に関する実験及び解析

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF PILE ANCHOR DURING FALLING IN WATER AND PENETRATING INTO SEABED

関田欣治¹・吉成岳彦²・大村優太³・矢後清和⁴

Kinji SEKITA, Takehiko YOSINARI, Yuta OHMURA, Kiyokazu YAGO

¹正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科(〒424-8610 静岡市清水区折戸3-20-1)

²正会員(株)緑星社竜ヶ崎工場(〒301-0005 龍ヶ崎市川原代町2422-2)

³東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

⁴正会員 工博 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域(〒181-0004 東京都三鷹市新川9-38-1)

In order to moor a floating offshore wind farm with a generator as large as 5000 kW, the cost of construction will be higher by using conventional anchors because of its small holding capacity. Therefore, a free fall tubular pile anchor has been developed which can be easily penetrated into clayey sea bed by dropping from a height above seabed. We conducted model test to evaluate the dynamic characteristics in water and soil by using the anchors with or without four sheets of fin to stabilize and increase the pullout capacity. This paper describes the comparison of analysis and measurement for the dynamic characteristics, along with the obtained friction and resistance factors in water and soil.

Key Words: *Free fall torpedo anchor, falling and penetration characteristics, clay, holding power, floating offshore wind farm*

1. はじめに

現在, 社会は石油資源の枯渇やCO₂問題による地球温暖化に対応するため, 従来の化石燃料依存から新エネルギー利用に志向する機運にある. 新エネルギーのうち有望な風車の北海沿岸国での建設は陸上から海洋へと軸足を移している. 我々も, (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の支援を受け5,000 kWもの出力を持つ大型風車を設置した浮体上を係留し, それから得られた電気から水素に, さらにメタンに改質し代替エネルギーを得ようとする共同研究を進めてきた. このような施設にあってもその事業性は重要であり, 浮体の場合係留技術が改善要素のひとつである. そこで, 有望とされる高把駐力アンカーと合成繊維索を組合せたトート係留(係留ラインが海底で20°程度で立上る強い係留)を念頭に, 鉛直方向の引抜きに対する把駐性能と設置精度に優れ, 安価に製造できる杭アンカーを開発している.

2. 実験目的

ここでは, アンカーが安定的に自由落下し目標点に到達するかどうか, さらに必要な深さまで貫入し把駐力を発揮するかどうかを確認するため, 水中での落下実験と気中での貫入実験を実施した.

特に, (1) 水中落下におけるアンカーに取り付けるフィンの有効性(2) 長さ直径比の落下挙動に及ぼす影響(3) 初期傾斜の落下挙動に及ぼす影響(4) 土中貫入量の評価(5) 貫入抵抗及び引抜き抵抗の算定等の設計・施工に関わる課題を明らかにする.

3. 実験方法と条件

(1) 実験模型と土質条件

製作したアンカー模型及び, 付加的に長さ直径比L/Dの異なる鋼製パイプ模型を用いた実験を行なった(図-1及び図-2参照). 想定した海底土質は昨年調査した結果から¹⁾, 粘性土や砂泥混合土が大半であるので貫入し易い粘性土を対象とし, 実験には木節粘土を用いた.

模型の諸元を表-1に示すように、アンカー模型は重心が先端から約40%位置にあり、値が小さいほど落下時水平方向の運動が発生し易いとされる L/D は3.4である。パイプ模型は L/D が14であり、先端に重しが詰められ重心は先端から35%にある。

表-1 模型諸元

項目	フィン有り	フィン無し	パイプ
アンカーの直径D m	0.10	0.10	0.05
円錐部長さL2 m	0.11	0.11	0.00
円柱部長さL1 m	0.18	0.18	0.66
アンカー質量m kg	8.00	6.80	2.50
重心(先端から) Lg m	0.12	0.10	0.23
慣性モーメントJ N・m ²	0.86	0.35	0.88
フィンの幅、長さ、厚さ	B=5cm, L=18cm, t=1cm		

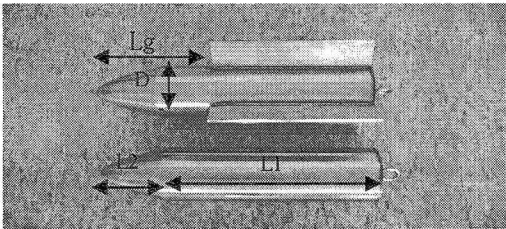


図-1 アンカー模型

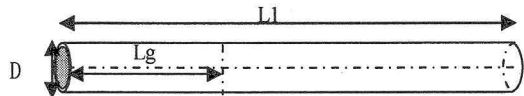


図-2 パイプ模型

(2) 水中落下実験

アンカーの落下挙動を計測するため、海上技術安全研究所の深さ30m、直径6mの深海水槽において落下実験を実施した。実験は、フィンの有無、先端部形状(直径20mm及び40mmの円断面)2種類、落下高さ3, 5, 7, 10mの16ケースであり、パイプ模型では落下高さ5, 7, 10mの3ケースである。落下速度はアンカー後端に取り付けられた落下ラインが落下時滑車を回転させる際のエンコーダー出力を高速レコーダーに記録した。実験では施設の制約上、珪砂7号を用いた。

(3) 気中貫入実験

東海大臨海実験場にて、アンカーの貫入実験と貫入後引抜き実験を行なった。円筒状土槽には木節粘土を満たした。実験条件は、フィンの有無、先端部形状2種類、乾湿の粘土2種類であり、乾燥状態での落下高さ50, 100, 150cm、湿潤状態では10, 30, 50cmとし合計24ケースである。土のせん断強度はベーン試験器(幅20mm×長さ40mm)、引き抜き力は荷重計、貫入量は金尺を用いて測定した。

4. 落下挙動と貫入解析

(1) 水中挙動

アンカーの重心(L_g : アンカー先端からの距離)に関し、水平方向(x)、落下方向(y)、回転(θ)に関する運動方程式を式(1)～(3)に示す。アンカーに作用する力は、 x

軸方向にモリソン式の抗力項により算定する流れによる力 $F_x(t)$ 、 y 軸方向に落下速度とその絶対値の積に比例する抗力と加速度による流体慣性力 $F_y(t)$ 、及びそれらの回転モーメント $M(t)$ を作用させ、これらについて円錐部と円柱部を15の要素に分割し総和して求めた。ただし、今回は、流れは与えない。質量 m と慣性モーメント J には付加質量係数1に相当する付加質量を考慮している。

$$m\ddot{x} + F_x(t) = 0 \tag{1a}$$

$$m\ddot{y} - mg + B + F_y(t) + F_L(t) = 0 \tag{1b}$$

$$J\ddot{\theta} + B L_B \theta + M(t) = 0 \tag{1c}$$

ここに、 mg : 重量、 B : 浮力である。 L_B : 重心からの浮心距離である。 $F_L(t)$ は、落下装置や滑車と落下ラインとの摩擦などによる抵抗である。別途実施した理論解がある空気中での同条件での落下実験から、式(2)にあるように速度、加速度に比例した抵抗力を設定しそれぞれの係数 $A_1 \sim A_3$ を決め、水中実験解析に適用した。

$$F_L(t) = A_1 \cdot \ddot{y} + A_2 \cdot \dot{y} + A_3 \tag{2}$$

(2) 土中の挙動

土中では、水中部分にある要素には抗力などの流体抵抗が作用し、土中部分にある要素には式(2)の $F_L(t)$ に式(3a) と(3b)、即ち貫入量 z に対応した円柱部分の周面摩擦抵抗力貫入抵抗 $R_A(z)$ 及び先端貫入部深さ z における円錐部の貫入抵抗 $R_B(z)$ をそれぞれ加える。

$$R_A(z) = \frac{S_e \cdot A_s(z) \cdot f}{S_t} \tag{3a}$$

$$R_B(z) = S_e \cdot S_U(z) \cdot N_c \cdot A_P(z) \tag{3b}$$

ここで、 S_e は歪速度係数(2.0)、 f は摩擦力(N/m²)、 S_t は鋭敏比で湿潤土は2.0、乾燥土は1.0とする。また、 $S_U(z)$ はせん断強度(N/m²)、 N_c は先端支持力係数で9.0とし、 $A_P(z)$ は鉛直方向のアンカー貫入量に応じた投影面積(m²)である。

5. 実験結果

(1) 水中落下実験

落下時のエンコーダーの回転速度からワイヤーの落下速度に変換し、これをアンカーの落下速度と見なした。また、横方向挙動は水中カメラより観測した。

a) 落下実験

先端形状による影響は顕著でなかったため、以下尖った形状(先端が20mm円断面)のアンカーについてのみ述べる。測定された落下速度の時刻歴のうち、フィンの有無の影響を比較した結果を図-3に、また図-4にはフィン有りアンカーについての落下高さの及ぼす影響を示す。フィン有りの質量はフィンの無い場合よりも1kg程度大きいがフィンの流体抵抗のため速度はフィン無しよりも若干遅い。初期の0.7sまでは速度が変動し、落下高さが

変っても類似の速度履歴をとり、落下高さが10mではアンカーに作用する抗力のためほぼ定速度になる。

b) 解析結果との比較

アンカーの落下解析と実験値の比較を行なうため、Newmarkの β 法を用いて図-5に示す落下速度より落下変位を算定した。

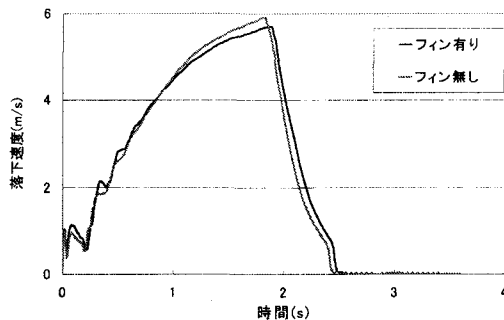


図-3 フィン比較(7m)

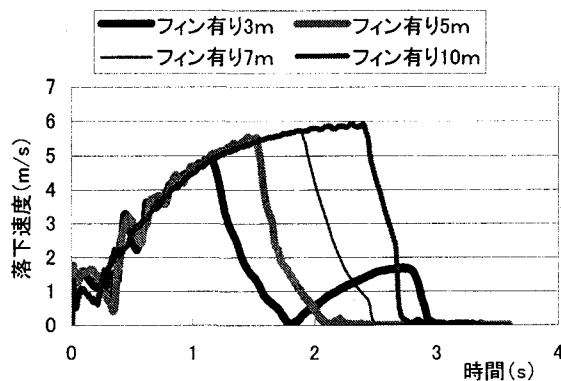


図-4 落下高さ比較(フィン有り)

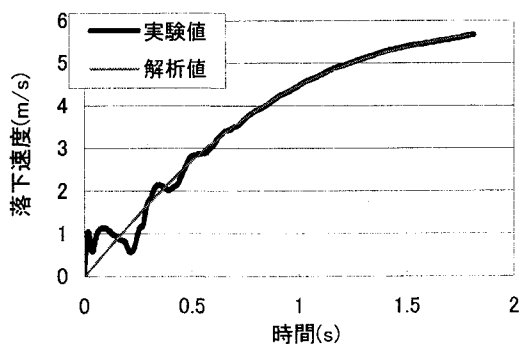


図-5 落下速度の実験との比較(フィン有, 7m)

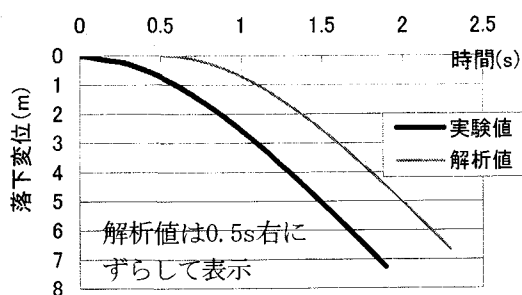


図-6 落下変位比較実験との比較(フィン有, 7m)

落下解析において、円錐部抗力係数0.29、円柱部摩擦係数0.0025とするとフィン有りアンカーは実験結果とよく一致した。また、フィン無しでは円柱部摩擦係数を同一にして円錐部抵抗係数を0.18とするとよく一致する。フィン有りアンカーの周辺面積は円柱周長に4枚のフィンの周長を加えて算定している。なお、落下変位について時間積分により初期の変動が消え、軌跡が全く一致するため図-6は、0.5 s 時間軸を遅らせて表記したものである。Newmarkの数値積分にあたっては、係数 β は安定した解が得られる1.0に設定した。

c) 着地点

落下高さが大きくなるにつれ目標点からずれ着底するので、アンカー着底点の分布図を作成した(図-7参照)。なお、落下高さ10mの実験においては、フィン無しアンカーが土槽壁近傍に落下したので2回の実験で取り止めた。この点を考慮するとフィン有りの方が幾分中心に落下し易いのかと思われる。

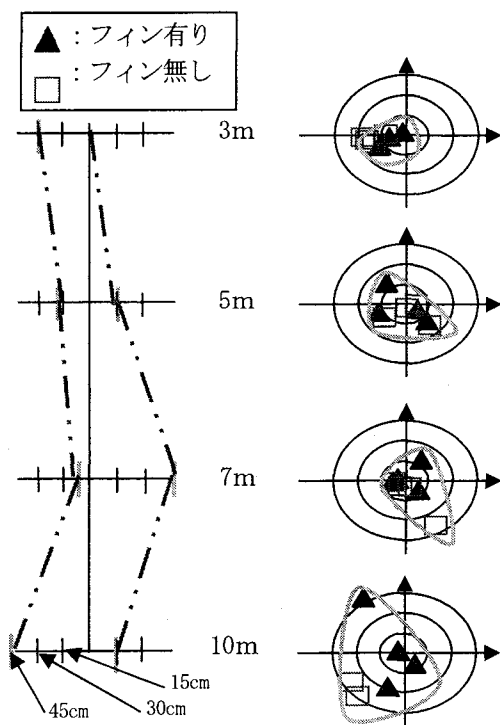


図-7 着底分布図

実験では、はじめアンカー後端面が水面と一致した位置から落下させていたため境界影響による非対称渦が関与し、実施した3~5m落下実験では図-3等にしたような初期振動が落下速度記録に現れたものと考えている。振動がかなりおさまった7m以上の落下高さの実験では、落下ラインと結ぶアンカー後端面の取り付けリングの位置まで沈めてから実験を行なっている。これ以外考えられる着底誤差要因として以下が挙げられる。

- ①アンカーの揺れがおさまらないうち、初期傾斜を持った状態で落下させた場合
- ②重心軸がアンカーの中心軸と一致しない場合

d) 振動周期

図-3等には初期の約0.7sまでの間、落下速度が0.05～0.3s程度の周期での変動が見られるが、この原因を調べるために、運動に関わる固有周期等を検討してみた。運動方程式(1c)から、落下ラインによる復元力がないとするとアンカーの回転に相当する固有周期が得られ、それはフィン有りで5.95 s、フィン無しで3.59 sとなり測定した振動周期から外れる。一方、静水中を落下するアンカー後流域に発生するカルマン渦の平衡条件から得られ渦長さは0.356mと算定される。その結果、落下速度が0.5～3m/sの範囲ではこの周期が0.11～0.7 sとなることから、振動の原因はアンカー後端部に生じる渦の影響ではないかと推察される。

e) 長さ直径比の影響

長さ直径比L/Dによる抗力係数との関係を調べるためO'Loughlin et alによる³⁾ (4), (5)式を、さらに到達速度に関する簡易式(5)を用いて評価した。

$$Cd = 0.039 + 0.0109L/D \quad (4a)$$

$$Cd = 0.030 + 0.085L/D \quad (4b)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2W_b}{C_d A_p \rho_w}} \quad (5)$$

ただし、 C_d は抗力係数、 W_b はアンカー水中重量、 A_p は投影面積、 ρ は水の密度である。

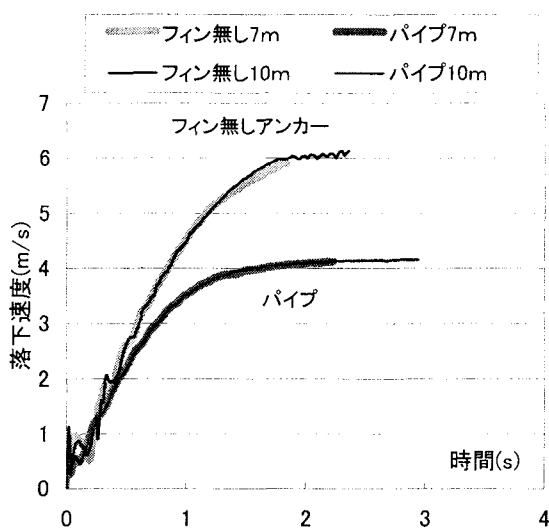


図-8 落下速度比較

簡易計算の検討結果は図-8～10に示したが、図-8にはフィン無しアンカーとパイプ模型に対し、それぞれ太線で7m、細線で10m落下実験の結果を示した。このうちの最大速度に関しては、式(4b)により得られる最大の速度の方と比較的よく一致する。図-9に、定常状態になった10m落下解析から得られた抗力係数とL/Dの関係に実験結果をプロットしたが、Oyeの実験結果⁴⁾と同様、簡易式の範囲にあることがわかる。しかし、図-10にあるよう

にフィン有りは、簡易式から外れるので、例えば式(4b)の両係数を70%程度に小さくすれば簡易式で評価できると考えられる。

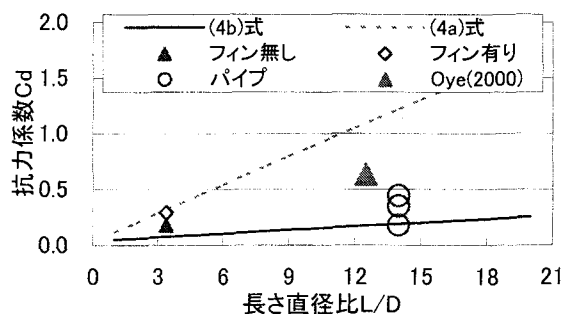


図-9 長さ直径比L/Dと抗力係数の関係

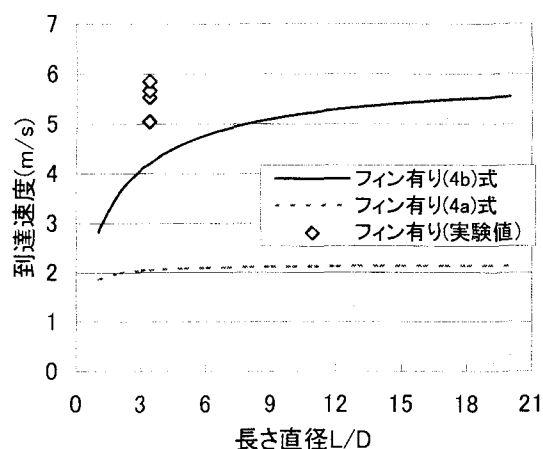


図-10 到達速度と長さ直径比L/Dの関係

(2) 気中貫入実験

所定の高さからアンカーを落下しその貫入量から、また貫入後の引抜き力から、先端抵抗や周辺摩擦力の推定を行なった。表-2に湿潤状態の木節粘土の特性を示す。実験では、乾燥状態及び含水比は39.4%である湿潤状態の土を用いたが、実験開始時と終了時に原位置でベーン試験を行い、深さ2cm、10cm、21cmでのせん断強度を計測した。

湿潤状態でのせん断強度は深さ10cmで平均2,390N/m²、深さ21cmで平均3,100N/m²と深くなるにつれ増大する。また、一回の実験に約20分程度要したが、実験前後でのせん断強度は約10%増加する程度であった。

表-2 木節粘土(湿潤状態)の特性

密度及び単位	g/cm ³	1.83
体積重量	N/m ³	17,934
含水比(%)		39.41

a) 貫入実験の結果

引抜き力を荷重計より測定する際に、アンカーが動き出す時点の荷重よりもアンカーが抜ける時の荷重の方が全般に大きい。前者を初期引抜き力とし、後者のアンカーが抜ける時の荷重計の最大値を限界引抜き力と呼ぶことにする。ここでは、安全をみて初期引抜き力を中心

にまとめる。図-11は、落下解析結果の一例であり、アンカー先端位置を高さ50cmに設定した場合の貫入軌跡である。破線が空中で実線が土中であり、約0.2sで約35cm貫入したところで停止する。さらに、後で述べるが、解析した貫入量と実験結果が一致するよう決定した条件で得られた落下速度を用いて整理した貫入量の関係を図-12に示した。到達速度は、抗力係数を0.0とした空中の落下解析から得た。図中の全貫入0.28mと記した水平線はアンカーが全て貫入する場合の貫入量であり、この線より上にある結果は半貫入状態に相当する。当然、到達速度が大きいほどアンカーは深く貫入し完全にもぐる。フィンの有無に関しては、フィン部の表面積も加わるフィン有りが摩擦抵抗力を多く受けるため貫入は浅くなる。

一方、図-13には初期引抜き力と貫入量の関係を示した。貫入量の大きい方が概ね引抜き力大きい。同程度の貫入量では、フィンの表面積がある分フィン付きの方が全表面積は大きいので、その結果大きい引抜き力が得られた。また、フィンのないアンカーの初期引抜き力は貫入量に関係なく一定である。

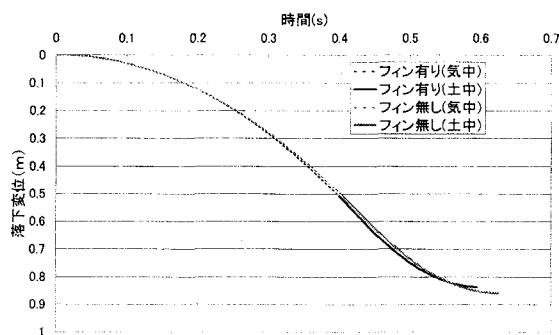


図-11 落下変位の時系列

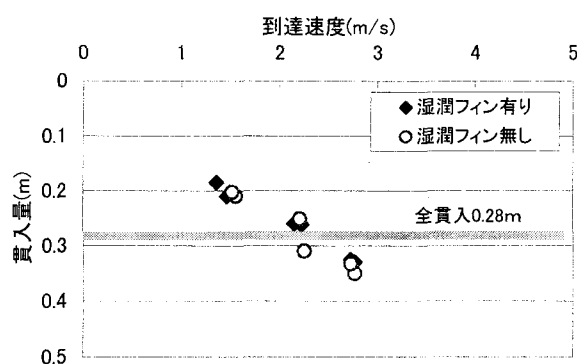


図-12 到達速度と貫入量の関係

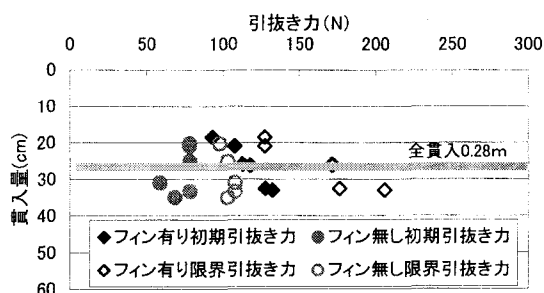


図-13 引抜き力と貫入量の関係

b) 貫入抵抗と引抜き力の算定結果

貫入抵抗は、円錐部の先端抵抗と円柱部の摩擦抵抗からなる。一方、引抜き抵抗は円柱部の摩擦抵抗のみであるので、これにより式(6)に示す無次元摩擦力係数 α が求まることになる。実際には時間が十分経過すると、アンカーは周りの土に塞がれ土中に埋没してしまう結果、アンカー後端及びフィン上端部の抵抗が生じ、押し込み抵抗に近い引抜き力が期待できる。しかし、ここでは落下後セットアップが生じる前に測定を行ったので、引抜き時は摩擦抵抗のみ考慮した。さて、貫入量推定のための貫入抵抗と引抜き力算定は、(3a)式の円柱部の抵抗 R_A 、(3b)式の円錐部貫入抵抗 R_B を考慮した運動方程式(1b)を解く落下解析方法と無次元摩擦力係数 α をベースとする(6)～(8)式を用いたAPI法で行なった⁵⁾。

$$f = \alpha S_U(Z_P) \quad (6)$$

$$\phi = \frac{S_U(Z_P)}{\sigma_v(Z_P)} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \phi^{-0.25} \quad \phi > 1.0 \quad (8)$$

ここで、 ϕ は貫入深さ Z_P におけるせん断強度($S_U(Z_P)$)と平均有効上載圧($\sigma_v(Z_P)$)との比である。

図-14に無次元摩擦力係数と土のせん断強度の関係を示した。図中の α (引抜き力)とは、実験から得られた引抜き力に対し、式(6)により直接 α を求めたものである。一方、 α (解析値0.25)と示してあるものは、(7)と(8)を用いて土質条件から求めたAPI法による算定値である。本条件では、API法により得られた α は、せん断強度の増加とともに0.35から0.5と若干増加する。しかしながら、実験結果から得られた α は、低せん断力の場合実験値は大きめにばらつく傾向にあり、2500N/m²あたりからAPI法に一致してくる。本来、十分時間が経ったセットアップ後の α は0.9であるが、貫入後すぐに引き抜いたため、 α は0.4と半分程である。

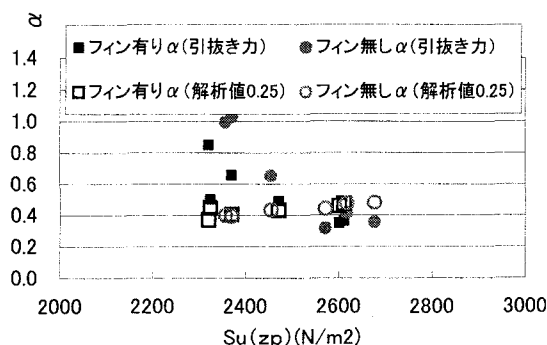


図-14 無次元摩擦力係数 α

c) 貫入量抵抗予測結果

貫入時の抵抗力は直接測定できないので、4.で述べた落下貫入解析方法を用いて先端の抵抗を算定した。この

際、式(3b)に述べた先端でのせん断歪速度係数 Se をBeaの結果⁶⁾から2.0に、支持力係数 N_c を9.0に固定し、貫入量が実験結果と一致するまで繰り返し解析し円柱部の最適な Se を決めた。得られた結果について図-15に示すが、乾燥土ではせん断強度が大きくなるにつれ歪速度係数 Se は小さくなる逆比例の関係にあり、0.4~2.5と広く分布する。一方、湿潤土ではフィンの有無にかかわらず同様の関係にあるもが、 Se が0.4~0.75と狭い範囲に分布する。

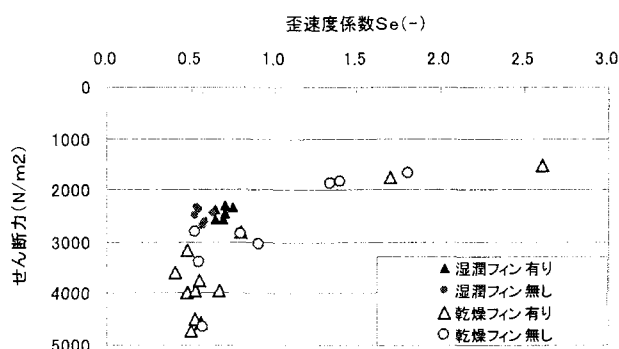


図-15 円柱部の歪速度係数

ついで、円柱部の最適な Se を繰り返し解析によって得る際に決定されたフィン有りアンカーの貫入抵抗と貫入量の関係を図-16に示した。貫入抵抗の解析結果は円柱部(○印で示す)及び先端抵抗を含めた全抵抗(●印)に分けて示した。両者から、貫入時のアンカーの抵抗は殆どが先端の円錐部の抵抗であると言える。さらに、円柱部の動的な貫入抵抗と、静的な引抜き抵抗を比較するため、初期引抜き抵抗の実験結果(△印)も図示してみた。その結果、円柱部分の静的な抵抗である引抜き摩擦は2.5~5倍貫入時の抵抗より大きい。これは、貫入時の湿潤土ではアンカーが貫入する過程で周囲の土が液状化のような現象を生じ抵抗が減少するものと考えられる。

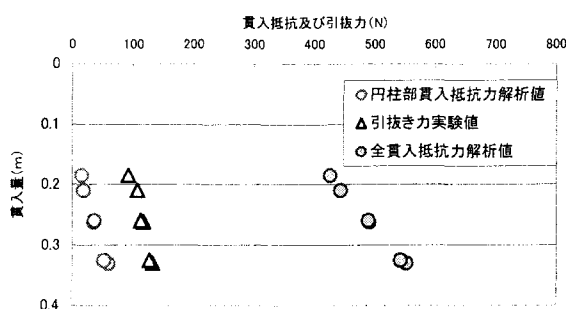


図-16 フィン有り引抜き又は貫入抵抗

6. 結論

(1) 水中落下実験と解析の比較

水中落下時のアンカー挙動は、フィンの有無に関わら

ず適切な円錐部抗力係数と周辺摩擦力係数を用いることで推定できる。この実験結果からは、摩擦抗力係数は0.0025とし、円錐部の抗力係数フィン有りの場合0.29、フィン無しの場合0.18が最適とされる。

(2) 落下時の貫入予測

貫入量に応じたアンカー円錐部の先端抵抗と円柱部の周辺の摩擦力を考慮することで、落下時の貫入予測が可能である。そのためには、土のせん断歪速度係数を考慮する必要がある。湿潤粘性土で先端円錐部は2.0、円柱部は0.4~0.75であった。

(3) 落下時貫入抵抗と引抜き抵抗

API法に基づき、粘性土中の杭の解析として無次元摩擦力係数 α により簡便に算定できる。実験では、おおよそAPIで示される貫入後十分時間が経過したセットアップ後の0.9の半分程度であった。

今後の課題として、この種の模型実験の縮尺影響が明確でないので、実際の大きさのアンカーに対して、ここで述べた検討を行い本解析法が妥当かどうか調べていく必要がある。

謝辞：本研究は平成15年度「浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究（新形式アンカーの研究）」として、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の支援を受けて実施したものである。また、本実験は(独)海上技術安全研究所の深海水槽を使用し実施したが、実験装置使用上の指導や助言をして頂いた久松勝久研究員と前田克弥研究員に深く感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) 関田欣治, 鈴木英之: 合成繊維ロープおよび新形式アンカーによるトート係留, 日本造船学会論文集, 第4号, pp1-6, 2004.
- 2) 関田欣治, 吉成岳彦, 鈴木英之, 大川豊: 浮体式風力発電施設の係留のための平板型アンカーに関する貫入模型実験とその解析, 土木学会, 海洋開発論文集, VOL. 20, pp1205-1210, 2004.
- 3) O'Loughlin, C.D, Randolph, M.F, Richardson, M: Experimental and Theoretical Studies of Deep Penetrating Anchors, Offshore Technology Conference OTC16841, 2004.
- 4) Oye, I: Simulation of trajectories for a deep penetrating anchor, CFD Norway, report no.250:2000.
- 5) API: Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, Report RP2A-LRFD, American Petroleum Institute, Washington, D.C. 1993
- 6) Bea, R.G, Audibert, J.M.E, and Dover, A.R.: Dynamic Response of Laterally and Axially Loaded Piles, Proc. of Offshore Technology Conference, Vol. 2, 1980.