

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

LABORATORY TEST AND ANALYSIS ON PENETRATION OF DRAGGED EMBEDMENT PLATE ANCHOR FOR FLOATING OFFSHORE WIND UNITS

関田欣治¹・吉成岳彦²・鈴木英之³・大川豊⁴

Kinji SEKITA, Takehiko YOSHINARI, Nobuyuki SUZUKI and Yutaka OHKAWA

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

²学生会員 東海大学 大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

³ 東京大学 大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴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)

To broaden utilization of wind energy, floating offshore wind farms are said to be valid because of deep, high slope of sea floor off Japan. However, a cost-effective construct is a critical matter and so necessitate the development of high capacity and easily deployable anchors, which tend to be used on trials for tout mooring of floating units in deep sea environments in Brazil. Measurements were done for dragging distance, penetration depth, inclination and pulling tension of rectangle plates in homogeneous dry sand and clay in a tank. This paper describes the analytical model taking mechanism producing holding capacity into considerations along with bearing capacity factors obtained by solving the equilibrium of forces such as gravitational force, friction, resistance force and pulling force acting on the plate fluke.

Key Words: Dragged embedment anchor, dry sand and clay, holding power, penetration, floating offshore wind farm

1. はじめに

循環型エネルギー社会の実現をめざして、浮体上に設置した風力発電から得られる電力を用いた海水電気分解により水素を製造し、これと陸で回収したCO₂と反応させメタンに改質し代替エネルギーを創出するシステムの構築を我々は図ろうとしている。その一環で、当該システムを搭載する施設が水深200m程度の大陸棚に建設されると想定し、その係留に適用するための新型アンカーに関わる研究を実施した。

2. 研究目的

2010年までに累積で300万kWの風力発電設備の設置という国が掲げた目標を達成するためには、陸域での適地難から洋上立地は不可欠であろう。このような中、本邦初の施設が北海道瀬棚町の防波堤背後水域に建設され、今後は港湾域から沖合へと洋上風力発電施設の展開が期待される。しかしながら、固定式基礎が適用できる浅水深で、風況に優れ、陸上の系統に接続しやすい適地は必ずしも多くない。そのため、大陸棚周辺での浮体式発電施設も一つの選択肢になると思われる。しかしながら、

浮体式の洋上風力発電施設は事業採算性が厳しく、建設費縮減が最も重要と言われる。この結果、浮体の係留に関しても、高把駐力、容易な施工性、かつ経済性が要求される。今まで、打設やサクション等により設置される杭や埋込み平板アンカーが開発されてきたが、大掛かりの施工機器使用のため施工費が高くなる。そこで、シャंकとフルークで構成される従来のアンカーと異なり、高把駐力でしかも安価な施工が期待できる引摺型平板アンカーの適用性を検討することとなった。そのため、平板アンカーの貫入抵抗や把駐力発生の機構解明などの基礎的な実験的研究を行った。

3. 海底土質調査

研究実施にあたり、わが国周辺の大陸棚の海底土質を把握するため資料調査を行った。海上保安庁発行の日本近海底質分布図を用いて¹⁾、国内の海域における大陸棚周辺の200m等水深線に沿う海底土質を4分類に集約し整理した。図-1は東北地方日本海側海域における土質集計の一例である。また、それぞれの土質を有する200m等水深線までの平均離岸距離の割合も整理した。その結果、200m等水深線までの離岸距離は15~35km程度であり、その

海底土質は、軟泥、粘性土や砂質土が約90%以上を占める。引摺型アンカーの適用が困難な礫や岩は、北海道オホーツク側を除けば10%以下と少ないことがわかった。そこで、砂と粘土でなる軟泥の存在も考慮し、粘性土と砂質土を本研究の対象とした。

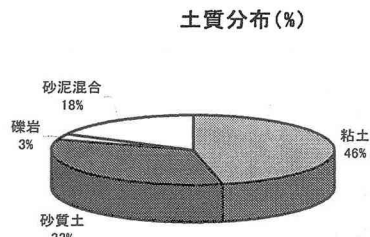


図-1 本州東北地方（日本海側）の土質

4. 把駐力解析法

(1) 土の抵抗

一般的に、アンカーの把駐力の推定は、水中重量を変数とする経験式が広く使われ、その把駐力係数を佐藤²⁾のように海底土のせん断強度から決定しようとするものもある。さらに、Rowe³⁾は砂質及び粘性土中に水平に置かれた平板に関する把駐力解析法を、模型実験と数値解析により提案している。ここでは、Roweに倣い、傾斜状態の平板に関する最大貫入時の抵抗や把駐力から支持力係数を評価することを試みる。

a) 土のせん断強度の仮定

一般に、海底土が粘性土や砂質土であっても、Rowe³⁾によると式(1)のように深さ z 方向のせん断強度分布は線形的に増加すると仮定できる。

$$S_U(z) = S_{u0} + \gamma \tan(\phi_0) F_{\gamma z} \quad (1)$$

S_{u0} は粘性土の場合、非排水せん断強度であり、砂質土の場合はゼロである。 γ は単位重量、砂地盤では F_{γ} は初期の応力状態、ダイレタンシー及び表面粗さに依存する。 ϕ_0 は内部摩擦角である。

b) 平板アンカーの形状及び摩擦力のモデル化

平板アンカーを図-2のように板厚 t 様で、長さ L_f 、貫入前面側幅 F_a 、後方側幅 F_b とする。アンカーはアンカー後端から L_b 離れた二つの◎で示す結束点でワイヤラインにより引摺る。 A_f は平板表裏面の面積、 A_d は両側面の面積である。

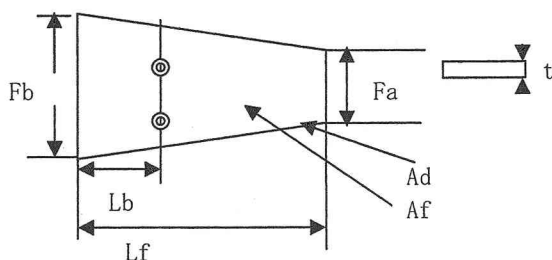


図-2 平板アンカーの形状

平板に作用する抵抗には前面端部の支持抵抗もあるが、前面端部の面積が小さいのでこれを無視すると、摩擦力 F_f は平板重心の貫入深さ z において式(2)で与えられる。

$$F_f = \mu S_U(z)(A_f + A_d) \quad (2)$$

ここで、 μ :摩擦力係数であり、従来アンカーでは0.5~1.0である。

(2) 平板アンカーの釣り合い

アンカー引摺る方向に対する釣り合いは2次元として扱う。作用荷重は、平板上下面接線方向の土との摩擦力、及び平板面法線方向に作用する土圧 $p(x)$ であり、ここではその合力 P_p を用いて定式化する。作用点は結束点から L_p 離れた点である。また、図-3における F_h と F_v は曳きライン張力の水平及び鉛直成分であり、 α はその合成ベクトル方向でライン方向と一致する。また W_f は平板の土中での重さであり、結束点から L_w 離れた位置に重心がある。また水平な海底面に対する平板の角度 ϕ とすると、曳きラインと平板のなす交角 θ は $\theta + \alpha$ である。

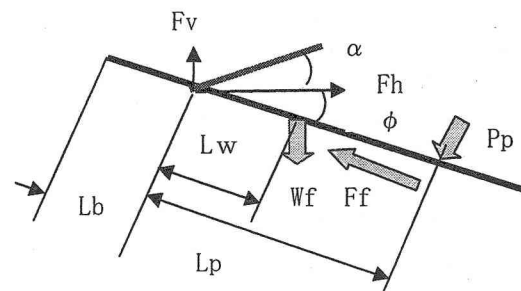


図-3 平板に作用する力の釣り合い

図-3を参照して平板に作用する各荷重の水平及び鉛直方向の釣り合いから、 F_h と F_v はそれぞれ式(3a)と(3b)により表される。

$$F_h = P_p \sin(\phi) + F_f \cos(\phi) \quad (3a)$$

$$F_v = W_f + P_p \cos(\phi) - F_f \sin(\phi) \quad (3b)$$

さらに、両式から法線方向合力 P_p 及び結束点のモーメント M が式(4a)と(4b)で与えられる。

$$P_p = \frac{F_f \sin(\phi) + \tan(\alpha) F_f \cos(\phi) - W_f}{\cos(\phi) - \tan(\alpha) \sin(\phi)} \quad (4a)$$

$$M = P_p L_p = -W_f L_w \cos(\phi) \quad (4b)$$

(3) 破壊の機構

a) 平板の土圧反力分布

観察からアンカーが不安定になるのは、傾斜して貫入する平板が水平に戻りながら抜けてしまうので、平板に作用する土圧が支持土圧を下回る場合に発生すると想定される。したがって、ここでは与条件が合力とモーメントの二つであるので、平板に生じる土圧を未知数2の分布関数で与えられると仮定する。即ち、(a)モデルでは、土圧分布を図-4のように直線近似する。この場合、符号の変化する位置は必ずしも結束点でなくてよい。

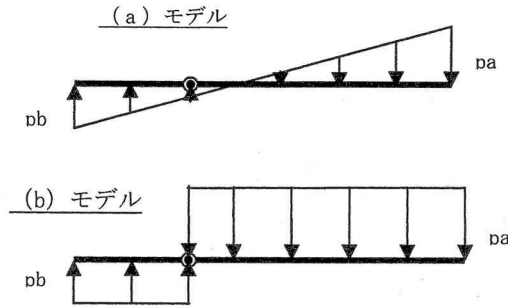


図-4 平板に作用する法線方向土圧分布 $p(x)$

一方、(b)モデルは結束点を境に引摺り側前方上面から p_a 、後方側下面から p_b なる一様分布圧が生じるとした。ここで、 $F(x)$ を図-2に示した長さ x 方向の平板幅とおくと、 p_a 、 p_b を変数とする合力と結束点周りのモーメントが次式から求まる。

$$P(p_a, p_b) = \int_{-L_w}^{L_f - L_w} p(x) F(x) dx \quad (5a)$$

$$M(p_a, p_b) = \int_{-L_w}^{L_f - L_w} p(x) x F(x) dx \quad (5b)$$

以下、土の塑性変形状態の強度を考慮し、(b)モデルを主に用いて解析する。

b) 安定性判定

平板の法線方向の土の支持圧は支持力係数とせん断強度から決定される。したがって、実験により得られた最大の貫入抵抗や把駐力に対応する土圧分布を解析し、求めた p_a 、 p_b のうち大きい方の土圧が限界となる支持力係数 N_c を与える。

$$N_c = \max(|p_a|, |p_b|) / S_u(z) \quad (6)$$

この結果を用いれば、アンカーの貫入が安定に進むかどうか、式(3a)～(5b)の釣合いを解いて得られる支持力を超える場合、即ち、式(7)を満足できなくなる条件が不安定と判断できる。

$$\max(|p_a|, |p_b|) \geq \sigma_a = N_c S_u(z) \quad (7)$$

5. 実験条件及び実験方法

(1) 実験装置及びアンカー模型

使用した木製模型槽は2槽からなり、側面から観察できるよう10cm格子の座標が書き込まれた5mm厚アクリル板が取付けられた(図-5参照)。さらに、上部片側には滑車を設け、平板アンカーを引摺りするための貫入用ライン張力を測定した。表-1及び図-6に実験に使用したアンカー模型の諸元を示す。各アンカーには幅方向間隔60mmで4つの孔があけられており、0.36mm直径のステンレスワイヤーにより制御板と結ばれ、貫入ラインを引くことで図-7にある上の貫入用ラインが効きアンカーは貫入する。貫入及び係留ラインとも直径は1mmである。また、鋼製(単位質量 7.85g/cm^3)及びアルミ製(同 2.70g/cm^3)

平板とも板厚は1mmであり、アンカー後端側中央には回収用ラインが取り付け、回収用ラインは直径1.2mm(有効幅3mm)のアルミ製チェーンを使用した。チェーン長は200cm、単位長さ質量 0.11g/cm である。また、各アンカーとも幅12cm一定とした。

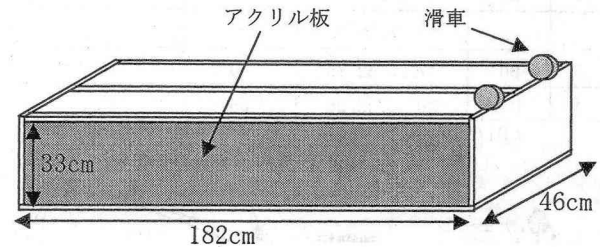


図-5 実験に使用した土槽の概観図

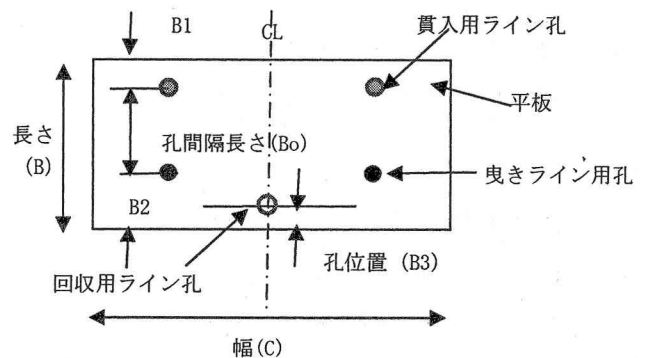


図-6 平板アンカー模型各部名称

(2) 実験方法

東海大学臨海試験場に模型槽を設置し、標準珪砂7号、木節粘土を二つの槽に詰めた。緩係留と異なり、トート係留ではアンカーから係留ラインの立上る角度が $10 \sim 25^\circ$ 程度であり、それを満足するように土の深さを20cmとした。実験に先立ち多数の孔があいた角状スコップで実験土を攪乱し、表面の高さを均す程度の自然状態で詰めた。図-7のように、平板アンカーと4本のワイヤーで結ばれた制御板の上側の貫入ラインを引くことで、アンカーを引摺り貫入させた。最大貫入後に下側の係留ラインを曳き把駐力を測定した。結合点での貫入深さ z_i とアンカー傾斜角 ϕ_i を得るため、水平方向に100mm引摺るごとに平板の前方及び後方深さを計り、ラインの曳き角度 α_i 及び張力 T_i も計測した(図-8参照)。なお、曳き角度は分度器で、張力はロードセルではライン長が変化するためその都度より替えが必要となるので適宜200, 500, 1000, 2000g容量の手秤を用い計測した。本実験では、アンカーの貫入とともにラインの傾斜角は変化するので、貫入開始位置を x_s 、平板とワイヤー結束点での水平移動距離 x_i 、滑車高さ h_c と貫入深さ z_i からラインに作用する摩擦力等を見逃し、幾何学的に算定されるラインの傾斜角も求めてみた。その結果、計測した曳き角と算定した傾斜角は、ラインに作用する抵抗が小さいためかほとんど変わらなかった。

表-1 実験に使用したアンカー模型諸元

型番	長さ (B)	4孔位置 (B1, B2)	孔間隔 長 (Bo)	回収用ライン孔 の位置 (B2)
0	36	6.75, 9.25	20	4.5
1	54	10.25, 18.75	25	6.5
2	72	13.75, 28.25	30	9.5
3	90	17.25, 32.75	40	10.5
4	108	20.75, 32.25	55	12.5

(单位mm)

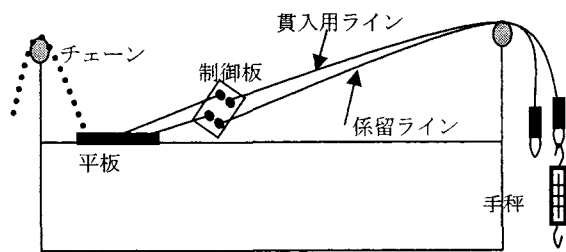


図-7 模型のセットアップ

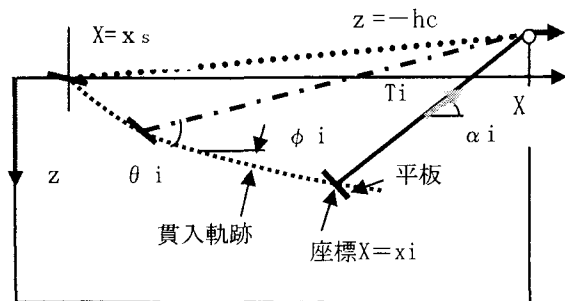


図-8 実験における測定項目

(3) 実験条件及びケース

実験には乾燥状態の標準硅砂（7号）と木節粘土を、また自重の影響を調べるためアルミ及び鋼製平板アンカーを用いた。形状については、水平状態の平板アンカーの把駐力は貫入深さと長さ比 z/B で決定されることから³⁾、表-1のように引摺り方向にあたる模型長 B を5種類変えた。各ケースに対し計20回一連の測定を行い、測定結果を平均値で整理した。また、実際の海底土は飽和状態であるため、型番2, 3番のアンカーに対しては、木製土槽に水を満たし水が抜けた直後の湿潤状態においても実験を行った。

6. 実験結果

(1) 実験に用いた土の特性

実験に用いた土の乾燥状態での特性に関しては、非排水一面せん断試験、密度試験で調べたので主要な結果を表-2に示す。摩擦力係数は、模型全体を平板部前面が実験土の表面から十分埋没させた状態で、模型全体を引抜いた際の抵抗力と、式(2)により結東点深さにおけるせん断応力により決定した。なお、同様に実施したワイヤラインを取外した平板だけの摩擦力係数は材質に関わらず両方とも0.1程度であった。また、実験土を詰めた状態で

の平均単位重量は砂，粘土それぞれ 1.50, 1.44g/cm³であった.

表-2 実験に使用した土の特性

土の種類	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角(φ)	密度 (g/cm ³)	摩擦係数
標準硅砂7号	0.0	35°	2.640	0.870
木節粘土	11.4	15°	2.645	0.798

(2) 主要な結果

a) 貫入状況

平板アンカーの貫入状況については、最大貫入深さに達した時点の貫入ラインの曳き角、平板の貫入角、貫入開始位置から水平方向の曳き距離、及び貫入深さを、全く貫入しなかった型番0の平板を除き、平板長に対し示す(図-9~12参照)。なお、図中の矢印で示す白抜き丸や三角は湿潤状態の実験結果である。

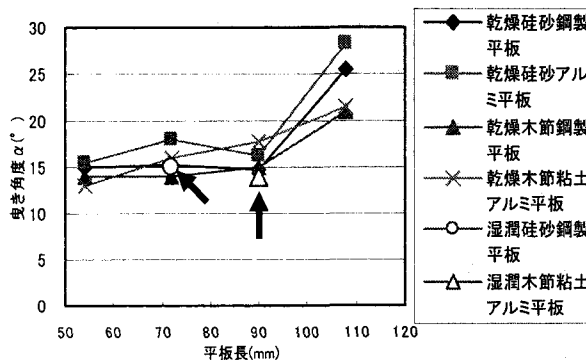


図-9 最大荷重時の曳き角度の比較

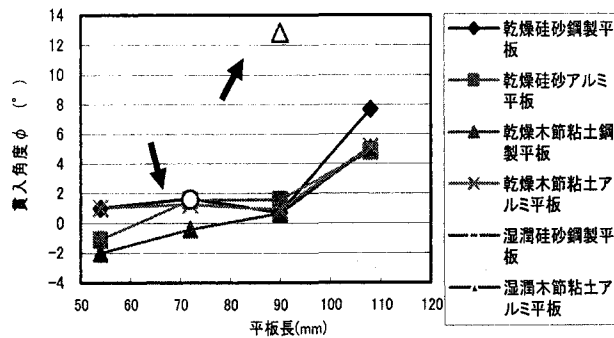


図-10 最大荷重時の貫入角度の比較

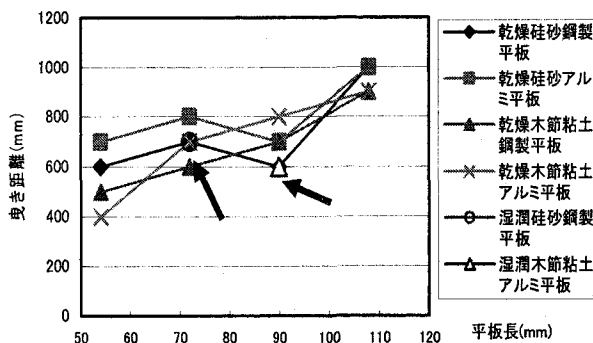


図-11 最大荷重時の曳き距離の比較

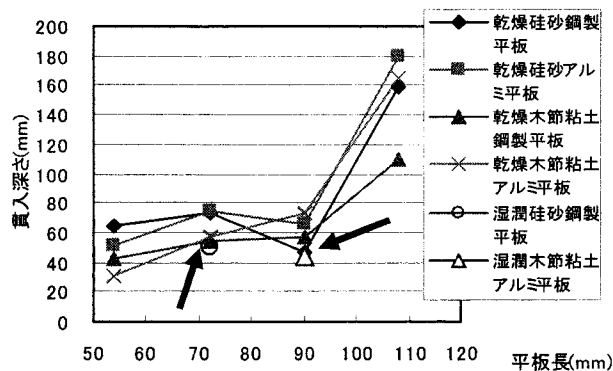


図-12 最大荷重時の深さの比較

以上の結果を次のように要約できる。

- ・長さ36mmの平板アンカーは全く貫入せず、平板長が長くなるにつれて曳き距離、貫入角、貫入深さは増大する。これは、傾斜した平板に上から受ける上載土圧及び摩擦力が大きくなるためである。
- ・曳き荷重、曳き角度、貫入角度は鋼製平板、アルミ平板ともに類似の傾向を示し、質量の大きな鋼製模型の方がいずれもやや大きい。
- ・また、これらの湿潤状態の結果に関しては、珪砂は乾燥状態と余り変わらない。木節粘土の貫入深さや曳き距離もほぼ同様であるが、貫入角度は後で述べるように大きく異なる。

b) 最大貫入抵抗力と把駐力及び貫入角度

最大の張力が貫入用ラインに生じる場合、これを最大貫入抵抗力と定義した。また、最大貫入深さに達した状態で係留ライン側に盛り変えて測定した時のラインの最大荷重を把駐力と見なした。一般に、把駐力と言うと重力式アンカーでは水平方向成分を指すが、ここではトート係留を対象にしているので張力とした。ちなみに、最大貫入状態でラインの傾斜が図-9に示されるように13～27°であるので、水平成分は最大貫入抵抗力の90～97%程度に相当する。さて、最大貫入抵抗時の貫入角(図-10)と把駐力計測時の平板貫入角(図-13)は若干の違いはあるものの同程度の傾きであり、最大貫入抵抗も最大把駐力もほぼ同じ貫入深さ、貫入角で生じると言える。また、図-13の矢印が示す白抜きの記号に表されるように、湿潤状態の珪砂(○)では乾燥土に比較し約2.2倍、湿潤状態の木節粘土(△)では乾燥土の貫入角度は約6.1倍となり、湿潤状態の土では貫入がさらに進みやすいことがわかる。また、図-14に示す把駐力においても、最大貫入抵抗(図示していない)とほぼ同様であるが、粘土では顕著でないが湿潤状態の珪砂の把駐力は乾燥状態に比べ3.3倍と大きい。

(3) 解析結果との比較及び得られる支持力係数

ここでは、式(6)より限界となる N_c 、即ち支持力係数を求めた。なお、最大貫入抵抗力 T_d 及び把駐力 T_c は式(3a)と(3b)から得られる張力水平と鉛直成分の合力として求まる。図-4に示した2モデル

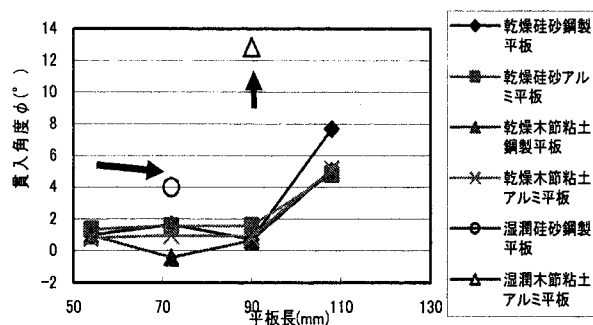


図-13 把駐力計測時の貫入角度

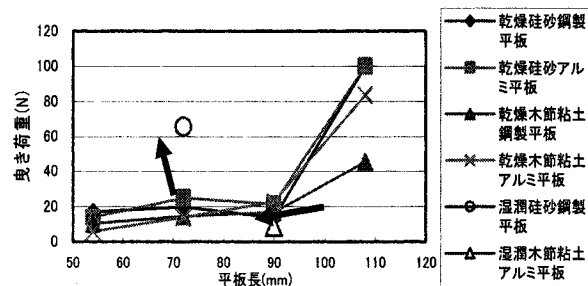


図-14 最大把駐力の比較

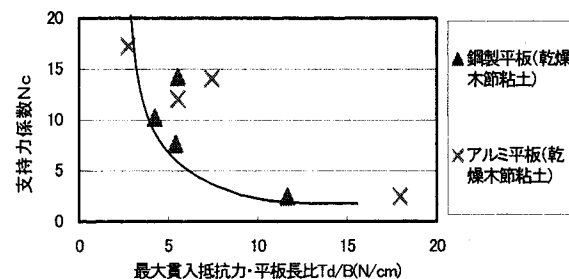


図-15 最大貫入時の支持力係数と T_d/B の関係

ルのうちの(b)モデルで解析を行ったが、(a)モデルの結果も余り変わらなかった。木節粘土の最大把駐力に関する支持力係数を最大貫入抵抗力と平板長比 T_d/B との関係で整理した結果を、近似曲線とともに図-15に示した。さらに、図-16には支持力係数と貫入深さとの関係を、埋設深さ平板長比 z/B の無次元量で整理した。

以上の結果から、次のようなことが判明した。

- ・全般に平板長が大きくなると支持力係数は減少する傾向にあり、アンカー材料による相異は比重の軽いアルミ製がやや大きいようである。貫入抵抗力と平板長比 T_d/B が増加すると支持力係数は双曲線的に減少する。
- ・飽和土中の従来のアンカーにおける支持力係数は z/B に比例して増加しその後一定になり、浅い貫入ではその値が大きくなるといわれる⁴⁾。木節粘土の結果は、同様に z/B が1～1.4の範囲で N_c が25位の値まで増加傾向にある。
- 珪砂を用いた実験についても、同様に解析した結果から以下のことが判明した。
- ・砂質土での支持力係数も z/B が1～1.5の範囲

で増加傾向にある（図-17 参照）。実験における貫入深さが浅くその結果せん断強度が小さいこと及び平板の傾斜が小さいため、Rowe 等³⁾の水平平板での結果とほぼ同程度の値となった。

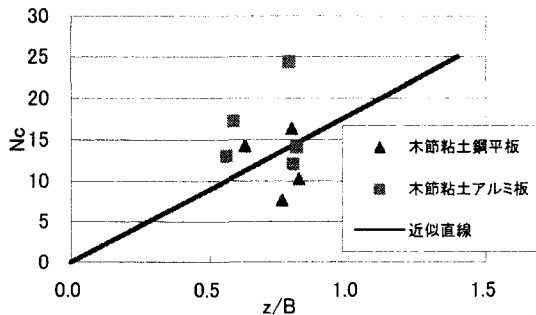


図-16 支持力係数と貫入深さ平板長比

・湿潤土の実験結果はこの傾向よりやや大きめにある。

・ついで、平板の貫入角度との関係で整理してみたところ、ばらつきが少なくなり増加傾向が認められた（図-18 参照）。このことから、材料の違いや乾燥か湿潤かの影響よりも、平板傾斜角の影響が顕著であると言える。

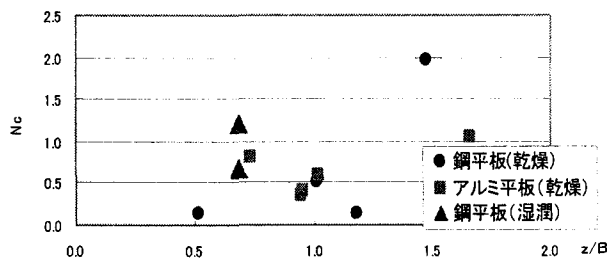


図-17 珪砂支持力係数と貫入深さ平板長比の関係

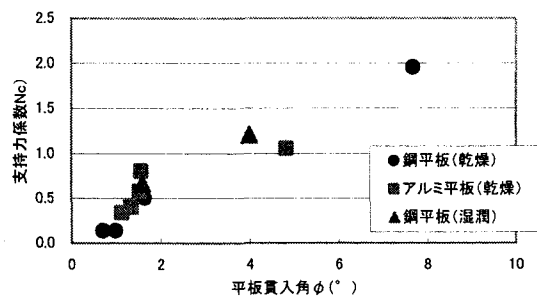


図-18 珪砂の最大支持力係数と平板貫入角

(4) 貫入経過時の抵抗力解析との比較

最大貫入時の解析と実験との比較によって得られた支持力係数（図-16の直線で最大の N_c は25とする）を用いて、貫入経過時にも適用できるか調べるため、貫入軌跡に対応する引摺抵抗力の解析を行った。図-19には、乾燥木節粘土中でのアルミ製アンカー（4型）の貫入軌跡と曳き張力の実験結果と解析結果を示す。解析は各貫入座標とその位置における平板の傾斜角 ϕ_i から、貫入用ラインの張力 T_a を式（3a）と（3b）の両式から合成して求めた。解析から得られた張力は貫入深さが初期の浅い位置では、実験結果 T_m に比べ少し大きめに推定

されるが、深くなるに従い両者は一致してくる。したがって、湿潤状態の土に対しても図-16の様な関係が得られれば、貫入深さに対応した引摺り過程の抵抗力が一般的に推定可能であるといえる。

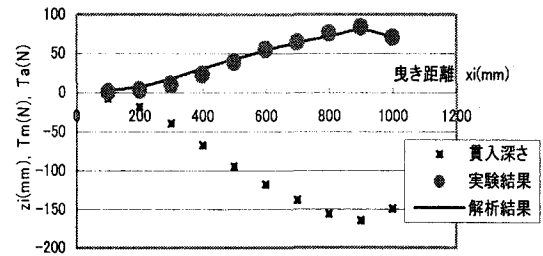


図-19 貫入ライン張力の実験と解析結果（木節粘土）

7. 結論

乾燥土を用いた比較的浅い貫入量に対する実験であるが、以下のような結論が得られた。

- (1) 全般的に、平板長が大きいと貫入深さは深くなり、適用には最適な長さを選定する必要がある。
- (2) 乾燥土と湿潤状態の粘土、砂とも貫入傾向が異なるようであり、飽和土中の実験による確認が不可欠である。
- (3) 平板には鋼とアルミ板を用いたが、摩擦力はほぼ同じでも比重の重い鋼板の方が若干深く入る。
- (4) 支持力係数と貫入深さの関係は従来の結果に類似した傾向を示すが、乾燥砂の値は小さくダイレタンシー効果の考慮が必要である。
- (6) 最大貫入時の結果から得られた支持力係数を用いれば、平板の貫入過程での抵抗力は推定できる。

今後は、支持力が大きい実際の海底に相当する飽和土中での実験等を通して、土圧分布モデルの検証や貫入過程の平板傾斜角決定のアルゴリズムを確立⁵⁾する必要がある。

なお、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（新形式アンカの研究）」として、（財）鉄道・運輸整備支援機構の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 海上保安庁水路部：日本近海底質分布図，第1-4（第7051-7054号），1949。
- 2) 佐藤治夫：船用錨の把駐力に関する研究，東海大学大学院，博士論文，1993。
- 3) Rowe R.K., Davis, E.H.: The Behavior of Anchor Plates in Sand, Geotechnique 32, No.1, pp.25-41, 1982。
- 4) Stanley, M.B. Michael, M.: The Vertical Holding Capacity of Marine Anchor Subjected to Static and Cyclic Loading, OTC, Paper2185, 1975。
- 5) Dahlberg, R.: Design Procedure for Deepwater Anchors in Clay, OTC, Paper8837, 1998。