

## マンドレル打込み式砂杭施工法の海上施工への応用

APPLICATIONS OF INSTALLATION METHODS OF SAND PILES  
WITH DRIVEN MANDREL TO MARINE CONSTRUCTION

榎 明 潔\*

By Meiketsu ENOKI

## 1. ま え が き

サンドドレーンやサンドコンパクションパイルなどの砂杭を用いた軟弱地盤改良工法は広く普及しており、最近では、大水深・大深度の海底軟弱地盤改良の計画も多い。

ところで、砂杭工法で改良効果をあげるには、砂杭の品質、特に砂杭径が設計を満たすことが、まず必要である。このためには、施工のメカニズムを調べ、それに合った施工管理を行わねばならない。

著者は、砂杭施工に最も多く用いられているマンドレル打込み式（排除型）<sup>1)</sup>の施工法を対象に、陸上施工にみられるようなドライ砂（採取したのち陸上に野積みしたような、飽和含水比にはほど遠い比較的乾いた砂）を用いた場合の、粘性土地盤における砂排出メカニズムについて研究してきた<sup>2)</sup>。その結果は、次のとおりである。

(1) マンドレルの引抜きによって生じた地盤内の空洞を維持するには、全応力で計算した Rankine 主動土圧程度の圧力が必要である。

(2) マンドレル内に詰まったドライ砂による鉛直土圧は、サイロの理論の Janssen 式とほぼ合致し、マンドレル底部には、ほとんど作用しない。

(3) マンドレル引抜きの際に併用する圧気が、砂中を、Darcy 則に従って透気して底部に達し、(1)のための圧力となる。

(4) こうして維持した空洞に、マンドレルから砂が流下、排出される。

そして、このメカニズムによれば、普通の圧気設備（最高で 10 kgf/cm<sup>2</sup> (980 kPa)）のみでは、施工深度が 60~70 m 程度に限られると推定される。

さて、本研究は、従来のドライ砂に対する施工メカニズムを発展させて、大水深・大深度の海上施工にも適用

可能とすることを目的としているが、適用上の問題点は、次のとおりである。

(1) 通常のマンドレルでは、水深分の海水がマンドレル内に存在した状態から施工が始まるため、マンドレル内の砂がドライ状態ではなく、ウェット（飽和）状態となり、前述のドライ砂の場合のメカニズムを、そのまま適用することができない。

(2) 一方、ウェット砂を用いた施工は、海上サンドドレーン施工において、経験的に砂排出が良好なことから、従来より用いられているが、施工のメカニズムが不明である。

(3) 大水深・大深度のため、マンドレル下端で地盤から受ける土圧が非常に大きな値となり、前述した通常のドライ施工における施工限界を超えることがある。

したがって、ここではまず海水の存在、すなわちウェット砂の存在が、施工にどのように影響するか調べる。次に、第一の方向として、海上でも陸上と同様のドライ施工を行うことを考え、海水の排除法、すなわちマンドレルのドライ化法を考える。また第二の方向として、ウェット砂の特性を調べたのち、それを利用した施工法、すなわちウェット施工法とその原理を明らかにする。

なお、本研究で用いた現場実験データは、ほとんどが再打込み工程のあるサンドコンパクションパイル施工に関するものである。これは、マンドレル内の砂の挙動は、砂に上下両方向から力を加えた方が調べやすいためである。

## 2. 海上砂杭施工の概要

## (1) 施工機械

海上用のマンドレル打込み式の砂杭施工機械の一例を Fig. 1 に示す。マンドレルの打込みは、図のように起振機のみで行うほか、ウィンチによる引込み圧入も行わ

\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科

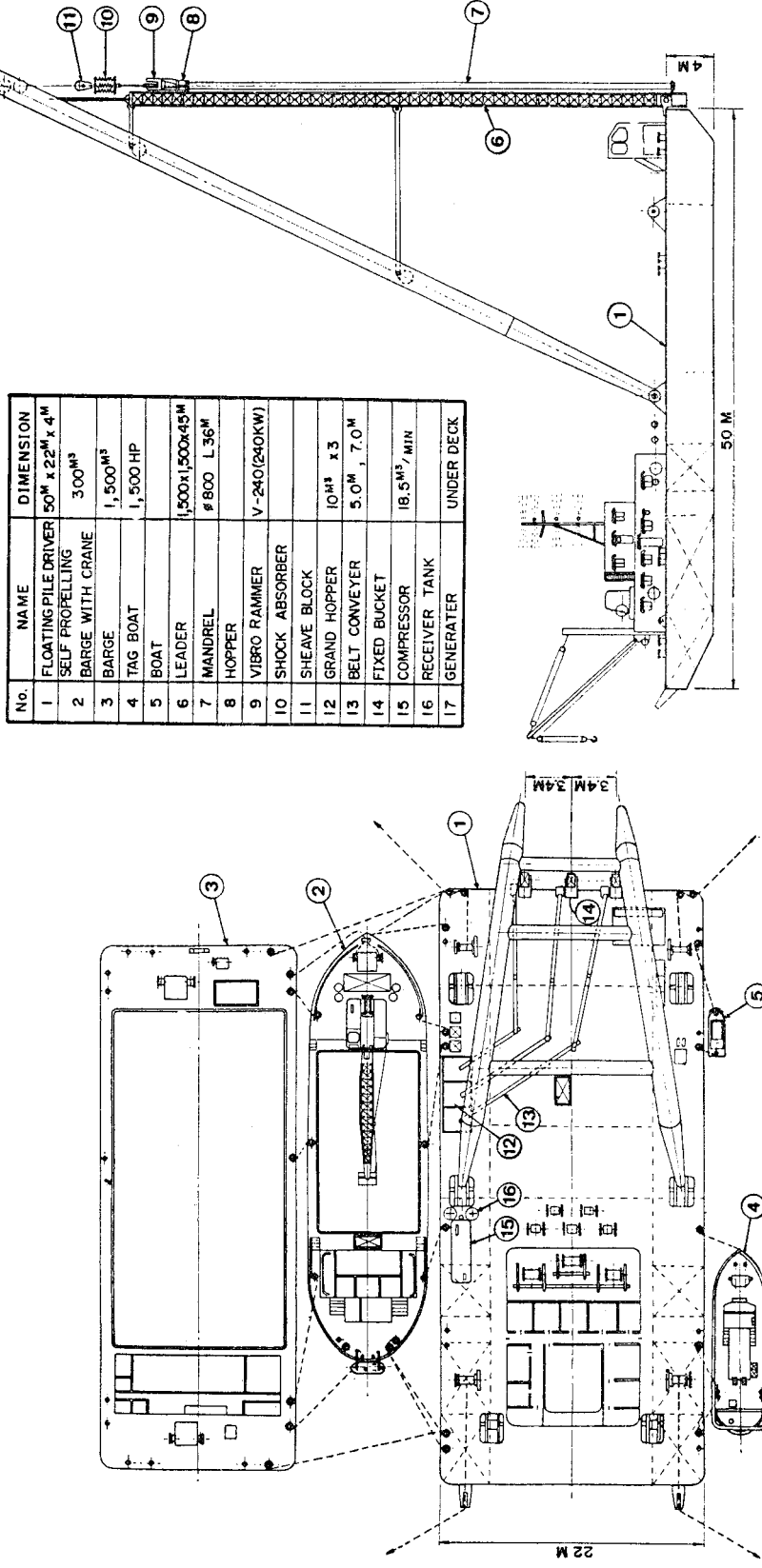


Fig. 1 Sand pile installation equipment on sea.

れる。マンドレル上部には砂供給用のホッパーが設けられる。ホッパーへの砂入れは、施工中に何度も砂を供給するサンドコンパクションパイルの場合には昇降するバケットが、施工初期に一度砂を供給すればよいサンドドレーンの場合には定置したコンベアとシュートが、それぞれ用いられる。後述するウェット施工の場合には、砂供給経路に加水装置を設ける。

マンドレル下端には開閉蓋をつけることもあるが、ドライ施工の場合には、あらかじめ少量のドライ砂を入れておくことで杭の閉塞と同じ効果をあげ、蓋の代用することもある。マンドレル内には圧気を行うので、ホッパー下部には密閉できる弁が付属している。マンドレルの直径は陸上より太く、50~100 cm、長さは水深と砂杭長の和以上必要で、最大 70 m 程度である。

(2) 施工手順

本研究以前には、海上砂杭施工法の合理的な手順は確立されておらず、陸上施工法と同じ手順を用いることが多かった。参考に陸上のドライ施工法の手順を

Fig. 2 に、その手順による施工記録(マンドレル下端の深度、マンドレル内の砂面の高さ、マンドレル内に加えた圧気圧などの経過時間に対する記録)の例を Fig. 3 に示す。両図の(a)~(d)の各工程は対応している。(a)で施工地点にマンドレルを据え、ドライ砂を入れる。(b)でマンドレルを打込むが、あらかじめ入れた砂が杭の閉塞と同じ効果をあげ、地盤土はマンドレル内に逆流せず、砂面は一定に保たれる。ついで、(c)でマンドレル内を圧気するとともにマンドレルを引抜くと、砂がマンドレルから地盤中へ排出され砂柱ができるとともに、

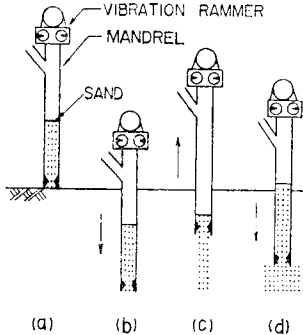


Fig. 2 Procedure to form a sand pile.

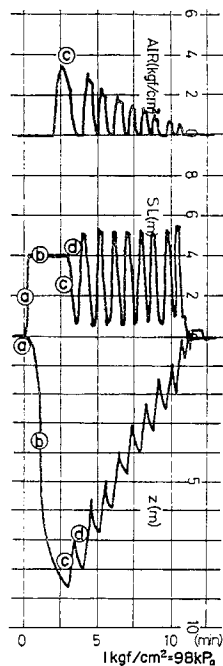


Fig. 3 Records of installing a sand pile on land.

砂面が低下する。サンドドレーンの施工はこの工程までだが、マンドレル断面積の 2~3 倍の締固めた砂杭を造るサンドコンパクションパイルの施工では、(c)でマンドレルを 2~3 m 引抜いたのち、(d)でマンドレル内に砂を補給し、マンドレルを再び 1~2 m 打込むことによってさきに排出した砂柱を圧縮して直径・密度上昇を行い、以後(c)と(d)の工程を繰返して砂杭を造ることもある。この際、(d)で再打込み中は、(a)と同様の先端閉塞が生じ、砂面は変化しない。

海上施工の場合には(a)以前の段階でマンドレル中に水深分の海水が存在するため、Fig. 2の手順によると、後述する施工上の問題が生じると考えられる。

なお、前述のサンドドレーンの経験的なウェット施工法においては、マンドレル下端に開閉蓋(水密性は十分でない)を設けて砂を入れずに打込み、所定深度に達したときに、マンドレル内に加水しつつ砂を入れ、その場合は Fig. 2と同様に砂を排出する。この場合の問題点は、加水量によっては、当初の水深分の海水の存在のため過剰加水となる可能性があることと、ウェット砂の挙動が不明のため、砂排出の制御方法が明確でないことである。

(3) 砂杭施工に関する測定

砂杭の施工状態を調べるための測定器としては、Fig. 4に示すような、ループにしたワイヤーとプーリーを用いてマンドレル下端深度を測る深度検出器、マンドレル内の砂面の下端からの高さを測るサーボ電極型の砂面検出器、マンドレル上部の圧気圧を測る圧力計などを用いている。

なお、この型の砂面検出器は、原理上、導電体の上面に追従するため、マンドレル内に水面があれば、その水面を検出する。

3. 海水の存在の施工状態への影響

ここでは、海水の存在が施工状態にどのように影響するかについて、陸上ドライ施工とまったく同じ施工手順による海上実験施工の施工記録を、陸上ド

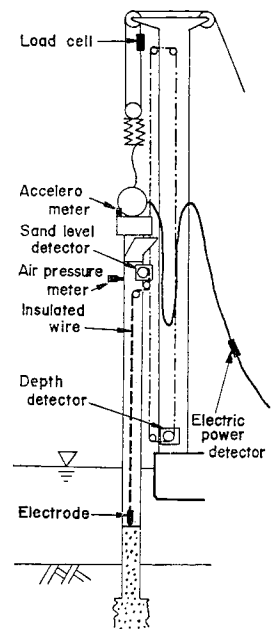


Fig. 4 Measurements on installation of sand piles.

ライ施工記録 Fig. 3 と比較することによって考察する。この実験施工は、Fig. 5 に示す地盤で、直径 50 cm、長さ 35.6 m（下端部 90 cm のみ直径 60 cm）のマンドレルによって、忠の海産の粗砂 ( $D_{10}=0.57$ ,  $D_{60}=1.6$  mm,  $w_n \approx 5\%$ ) を用いて行われた。Fig. 6 は、Fig. 2 (a)~(d) に示した陸上ドライ施工とまったく同じ施工手順による場合の、施工記録である。なお、Fig. 6 には砂面変化と供給した砂量から推定したマンドレル内の状態を、海水、ウェット砂、ドライ砂、逆流した地盤の粘性土の 4 成分で示した。

この推定では、マンドレル上部から砂を補給しない場合の砂面計の検出面の上昇はマンドレル下端からの逆流土によるとし、また施工開始時の砂面計の検出面はマンドレル内の水量に相当し、その後はドライ砂を補給するたびに、補給した砂の空気間隙部分に相当した吸水が行われるとしている。

なお、Fig. 6 中の矢印はバケツから  $1\text{ m}^3$  の砂をマンドレル内に投入したことを示している。ただし、この

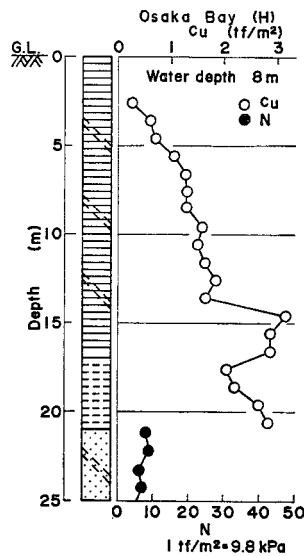


Fig. 5 Profile of seabed subsoil.

砂はマンドレル内では、振動による体積変化により  $0.8\text{ m}^3$  に相当する。また、図中の砂面記録には } 記号で、マンドレル内への地盤土あるいは既排出物の逆流を示した。

Fig. 6 を、陸上ドライ施工記録である Fig. 3 と比較することによって、陸上と同形式の施工機械による同一手順の砂杭施工を海上で行った場合には、次の諸現象が明らかに認められる。

a) マンドレル打込み中の逆流

陸上施工では、打込み前にマンドレルに入れた少量のドライ砂が、いわゆる杭の閉塞効果を生じ、打込み中に地盤土の逆流はない (Fig. 3 (b))。ところが海上施工では、打込み前に入れた砂は、海水のためウェット砂となり、閉塞効果は生じず、打込みとともに地盤土の逆流がみられる (Fig. 6 (a))。

b) ウェット砂、逆流地盤土の排出挙動

マンドレル内に、下から逆流地盤土、ウェット砂、海水の三者が存在する場合 (Fig. 6 (b)) には、全体として非常に流体的な様相を呈し、マンドレル内を圧気すると急速かつ大量に排出されるが、排気するとマンドレル内に逆流する。また、再打込み工程でも、やはり閉塞効果は生じず、逆流がみられる。

c) ドライ砂の排出挙動

はじめにマンドレル内に存在した海水の約 3 倍の体積の砂までは、供給された砂はウェット状態となるが、それ以上の砂はドライ状態のままとなる。そしてウェット砂がすべて排出されてマンドレル内がドライ砂のみとなった施工後半の状態 (Fig. 6 (d)) では、排出挙動は陸上施工の場合と完全に一致する。

d) ウェット砂とドライ砂が併存する過渡状態の排出挙動

マンドレル内に両者が併存する過渡状態 (Fig. 6 (c)) では、排出が困難で、高圧の圧気を行っても微速でしか排出されない。排気後の逆流はほとんどない。この挙動については、ウェット砂が流体的であることと、前述したドライ施工の排出メカニズムから、次のような推定が可能である。まず、排気後に逆流のないことについては、上部のドライ砂の閉塞効果によるものであろう。排出の困難性については、上部からの圧気が直接ウェット砂に与えられたのなら簡単に押抜くことができるがドライ砂がその上に存在し、かつドライ砂を圧気で押抜くことは無理なので、結局、ドライ砂を透気した圧気がウェット砂を押抜くことになる。ところが透気する空気量があまり多くないため結果的に微速でしかウェット砂を押抜くことができないのであろう。この際、ドライ砂とウェット砂の境界が、実際には図示のように明瞭ではなく、中間に飽和度が漸増する遷移領域の砂があると考えられ、この砂の透気係数の小ささが、より透気を遅らす

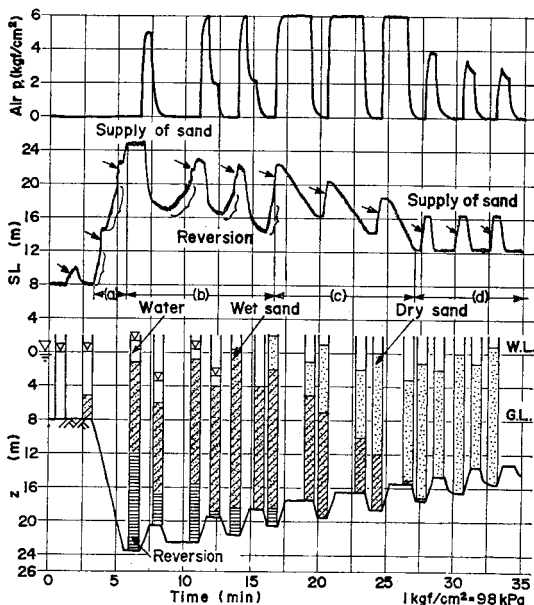


Fig. 6 Records of installing a sand pile on sea.

ことも想像できる。

なお、Fig. 6では、前述したa)~d)の全挙動が観察されたが、水深が大きくてマンドレル内に初期に存在する水量が多い場合には、マンドレル内に終始ウェット砂のみが存在することになり、後半のウェット砂とドライ砂の併存状態や、ドライ砂のみとなった状態が存在しないこともあり得るのは当然である。

ところで、Fig. 6のような施工は、次のような問題があると考えられる。

(a) 逆流物の存在により、砂杭の連続性に疑問がある。

(b) 各領域の排出性が大きく異なるため、施工管理が難しい。

(c) 完成した砂杭は、上部はドライ砂で、下部はウェット砂で施工されており、砂杭の強度（間隔比 $e$ で評価される）や透水性という観点から、砂杭の一様性の点で問題を生じる。

これらのうち(b),(c)の問題点に対する解決策は、砂杭全体をドライ施工またはウェット施工で行うことである。このためには、ドライ施工の場合には、マンドレル内に侵入する水深分の海水の阻止排除法（マンドレルのドライ化法）の開発が必要である。一方、ウェット施工の場合には、水深分の海水による他律的な砂のウェット化だけでなく、施工の後半の海水が不足した場合を含む積極的な加水によるウェット化と、ウェット砂の挙動を調べて施工メカニズムを明確化することが必要であり、これによって(a)の逆流対策も得られるであろう。

#### 4. ドライ施工について

海上砂杭施工においてドライ施工を行ううえで必要な基本的事項を、実例とともに紹介する。

##### (1) ドライ化法

マンドレル内のドライ化の目的は、マンドレル内に海水の侵入を許さないか、あるいは一時的に侵入しても砂を供給するまでに海水を排出することにより、施工開始時点からマンドレル内の砂にドライ状態を保たせることである。

Fig. 7, 8は、著者が用いた、マンドレル下端部に開閉蓋などの機械装置を設けないドライ化法の実験施工の記録例である。

Fig. 7の圧気打込みドライ化とよぶ方法は、マンドレル下端を海底面につけた状態でマンドレル内を圧気することによって海水を排除し(a)、マンドレル打込みとともに圧気圧を上げて地盤土の逆流を防ぐ(b)。マンド

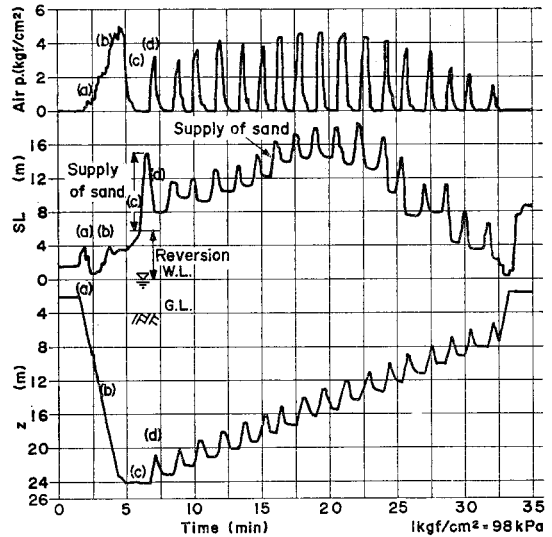


Fig. 7 Records of dry installing method with compressed air.

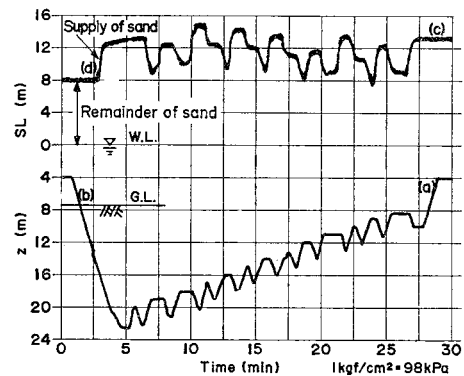


Fig. 8 Records of dry installing method with remainder of sand.

レルが所定深度に達したら排気と同時に砂を入れ(c)、地盤土の逆流をできるだけ防ぐ。そして、マンドレルを引抜く砂排出工程のはじめに、逆流物を排出する(d)。この時点でマンドレル内はドライ砂のみとなり、これ以後は陸上施工と同じドライ施工が可能である。

Fig. 8の砂残りドライ化とよぶ方法は、たとえばFig. 7の方法や本方法でドライ化して砂杭を1本ドライ施工したのち、マンドレル内に若干のドライ砂を残したままマンドレル内を排気し、マンドレル下端を静かに海底面から上げる(a)。そして、次の砂杭打設位置へ水平移動して、海底面下にマンドレルを降下したのち打ち込む(b)。この水平移動は普通5分以内の短時間で行われるため、マンドレル下部の砂には海水はほとんど浸透せずドライ状態のまま保たれ、かつ自重と周面摩擦と底面からの水圧のつり合いによってこの砂はマンドレル下

部に保持されたまま (c)、次の砂杭施工に移ることができる。そして、次の打込み工程では、この砂の閉塞効果により、逆流が生じない (d) ののは当然である。

これら以外にも、マンドレル内をドライ化する方法は、装置上あるいは施工操作上各種考えられるであろう。

## (2) 海上ドライ施工の特徴

### a) 圧気圧の制御

ドライ施工において、マンドレル下端で必要な圧気圧が、全応力で求めた Rankine 主動・受働土圧の中間値であることは、すでに明らかにしたとおりである<sup>2)</sup>。そして圧気圧が過小だと砂杭が小径化する一方、過大だとマンドレル外周と地盤の間から地表へ向けてエアブローを生じることが、施工中に観察される。海上施工の場合では、海底面の土質によっては、このエアブローが海底土を巻上げて、海水汚濁の原因となることも観察される。したがって、圧気圧の適正な制御は、砂杭の品質のみならず建設公害という意味でも非常に重要である。

### b) マンドレル内の砂量

マンドレル内に詰まった砂柱は、サイロ理論で表わされる挙動をするとともに、マンドレル上部空間に与えられた圧気の、下端への伝達経路ともなっている。このため、砂柱高が過大だと圧気の伝達が遅れるし、逆に過小だとサイロ効果が発揮されず、打込み中の逆流などの原因となる可能性がある。圧気供給からマンドレル引抜きまでの通常の施工時間（数分以内）に圧気圧が下端まで伝達するような砂柱高の上限を透気理論<sup>2)</sup>で、打込み中の地盤土の抵抗によって砂柱が上方へ押抜かれないような砂柱高の下限をサイロ理論<sup>2)</sup>で求めると、前者は透気係数の大きな粗砂でも 10~20 m、後者はマンドレル径の 2~3 倍となる。したがって、砂杭施工中は、砂柱高がこの中間値をとるよう砂の補給を制御することが必要である。

### c) ドライ施工に適した砂質

Fig. 9 に、サンドドレーンで使用される砂の粒度範囲の例<sup>3),4)</sup>、Fig. 10 に通常の取扱い（飽和や乾燥のための処理をせず野積みしておいたような）をしたドライ砂の自然含水比  $w_n$  と  $D_{10}$  の関係を示す。

ドライ施工のメカニズムおよび透気係数と粒度や空気間隙比の関係<sup>2)</sup>、さらに各種の砂を用いた施工実績から考えて、透気時間を施工上のネックとしない意味で、普通のドライ施工に適した砂は、 $D_{60} > 0.2 \text{ mm}$  程度で、かつ飽和度が 50% 程度以下 ( $w_n < 15\%$ ) で、それより細かい砂では、マンドレル下端付近に直接圧気を与える内ジェット<sup>2)</sup>で圧気伝達経路を短縮するなどの工夫を施す必要がある。また飽和度がそれ以上に高い場合に

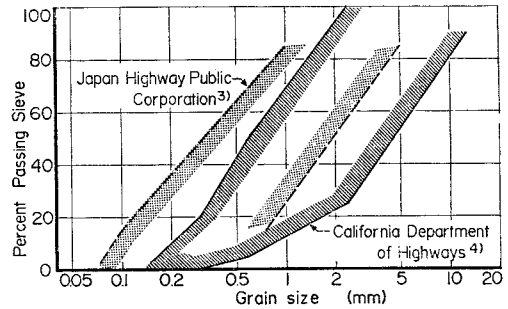


Fig. 9 Grading ranges of sand for sand piles.

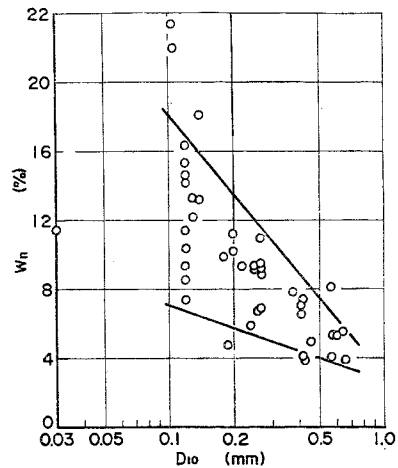


Fig. 10 Relation between  $w_n$  and  $D_{10}$ .

は、のちに Fig. 17 で示すようにサイロ効果が十分に生じない。

現在は、ドライ施工に適さない砂しか得られない場合は少ないが、今後の骨材需要の逼迫によっては、上記条件が施工方法を定めるような場合も予想される。そのような場合には、砂の透気試験などによって施工方法を選択することも必要となろう。

### d) ドライ施工の限界深度

既述したように、通常の圧気設備（最高吐出圧で 10  $\text{kgf/cm}^2$  (980 kPa) のみによるドライ施工は、正規圧密状態の通常の粘性土地盤に対して、陸上では 60~70 m が限界と推定されるが、たとえば水深 50 m の海底では 30 m 程度が限界と推定され、しかも、この限界に達するには、圧気の効率をほぼ 100% にあげる工夫が必要である。そしてこの限界を超えるには、さらに高圧の圧気設備を用いるか、あるいは、マンドレル引抜きによって生じた地盤中の空洞の維持を何等かの別の方法、たとえば機械的な方法などで行うような工夫が必要であろう。

このように、ドライ施工には種々の制約条件が生じるが、砂杭の品質が安定しており、過去の陸上工事で多く

の実績を積んだ施工法であるため、今後も多用されるべき施工法であろう。

5. ウェット施工について

砂杭の施工に飽和した砂を用いるウェット施工法は、海上サンドドレーン施工において、経験的に砂排出が良好となることから以前より使われている。また、3. で述べた現場実験の施工記録 Fig. 6 からも、ウェット砂は流体的な挙動を示すと考えられる。しかし、これは、水深分の海水の存在という他律的な条件や、加水量の定量化も行われていない条件で得られた推論に過ぎず、ウェット砂の挙動を調べるには、条件の明確な現場実験を行う必要がある。

ここでは、そのような主旨で行った現場実験結果を中心に、ウェット施工法について述べる。

(1) 現場実験とウェット砂の挙動

現場実験は、Fig. 11 に示すような、下端に油圧シリンダーで開閉する水密性のある蓋、上端に加水用のノズルのついたマンダレルを用い、Fig. 12 に示す海底地盤で行った。使用した砂は、館山産の山砂 ( $D_{10}=0.105$ ,  $D_{60}=0.63$  mm,  $w_n \approx 20\%$ ) である。マンダレル外部のバケツ上にある砂  $1\text{ m}^3$  がマンダレルに入った状態で飽和されるのに必要な加水量  $\Delta V_w$  は、砂がマンダレル内で振動などにより体積変化し、体積変化率を  $R_v'$  とす

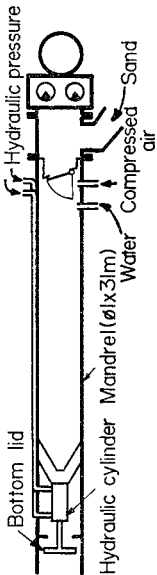


Fig. 11 The mandrel for wet installing method with bottom lid and water nozzle.

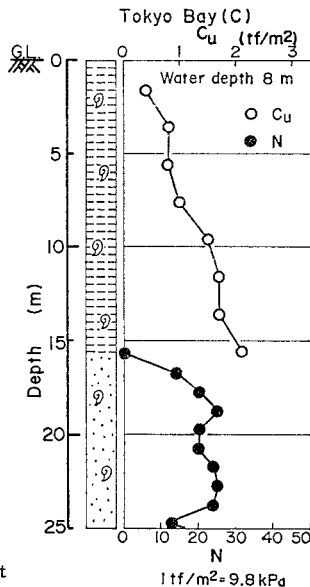


Fig. 12 Profile of seabed subsoil.

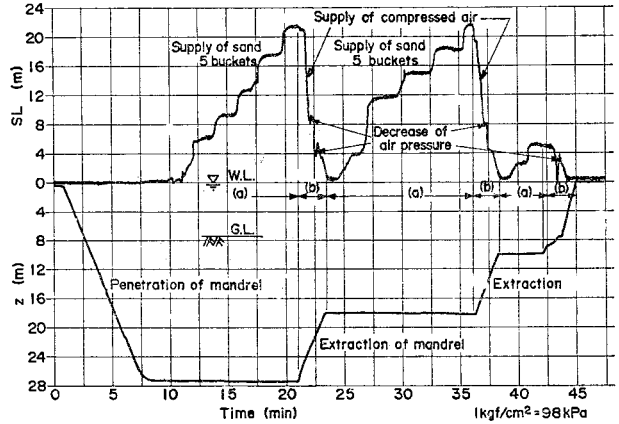


Fig. 13 Records of wet installing method of a sand pile with compressed air and bottom lid.

るとマンダレル内では  $1/R_v' \text{ m}^3$  となることを考慮して、マンダレル外部での単位体積重量を  $\tau_s$ 、砂粒子の比重を  $G_s$  として、次式で求められる。

$$\Delta V_w = \frac{1}{R_v'} \frac{1 + w_n G_s}{(1 + w_n) G_s \frac{\tau_w}{\tau_s}} \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) より、本実験では  $\Delta V_w = 0.2 \text{ m}^3$  としたが、実際にマンダレル内でこの加水量の加水を行った砂を、水面上でマンダレルから排出して調べた結果、適正な加水量であった。そして、マンダレル内の砂は  $e \approx 1$  程度で、ほぼ水で飽和されていると推定される。

実験施工は、Fig. 13, 14 に施工記録を示す2通りの方法で行った。

Fig. 13 は、蓋・内圧制御ウェット施工法とよぶ方法で、マンダレルを空にして先端蓋を閉じて所定深度まで打込んでウェット砂を入れた (a) のち、先端蓋を開き、マンダレルを引抜きつつ圧気をかけてウェット砂を押抜く (b) という施工法である。圧気によって高速で排出されるが、(b) 中の圧力低下時の砂面の上昇から、圧気圧が低下すると逆流するというウェット砂の流体的な挙動が明らかである。このため、砂の排出速度の制御は圧気圧のみでなく、先端蓋の開度によっても行っている。

Fig. 14 は、砂面制御ウェット施工法とよぶ方法で、マンダレルを所定深度まで打込んでウェット砂を多量に入れ先端蓋を開く (a) と、マンダレル底面でのウェット砂の自重による圧力が地盤の土圧より大きい間はウェット砂が排出され、やがてマンダレル内の砂量が減って圧力が釣り合うと排出が止まる (b)。この間にマンダレルを排出速度にあわせて少し引抜いて (c) 砂杭を造るという方法である。この場合、ウェット砂は自重による圧力のみで排出され

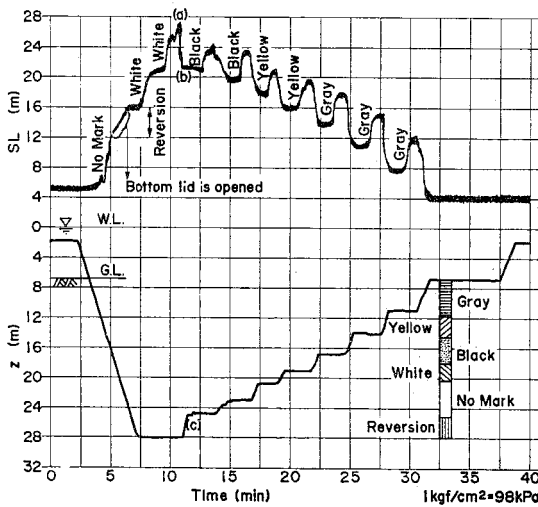


Fig. 14 Records of wet installing method of a sand pile by controlling sand level.

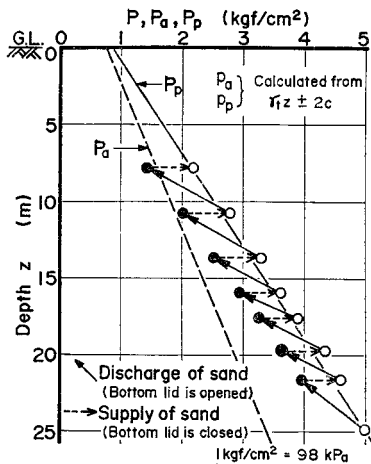


Fig. 15 Inner pressure of sand and outer earth pressure.

るため、マンドレル内の圧気は行っていない。また、Fig. 14では、打込み中に先端蓋を開いたときの地盤土の逆流が示されており、12mの砂柱でもウェット砂の場合には閉塞効果が生じていない。

このようなウェット砂の流体的挙動を確認するため、Fig. 14から各深度における排出前後のウェット砂の自重によるマンドレル底面圧力をマンドレル内周で摩擦が生じないと仮定して求め、Fig. 15に示した。

同図にあわせて示した地盤の受働・主動土圧と比較し、さらにドライ施工においてはほぼRankine主動土圧以上の圧力がないと砂が排出できなかったことを考慮に入れると、摩擦が生じていないという仮定は事実であると考えられる。

なお、Fig. 14の施工では、図中に示したように、投

入する砂にトレーサーとして粗い色砂（左官材料として用いる大理石や黒大理石などの有色岩の破砕製品）を混ぜ、砂杭の深度別色付けを図った。そして、できあがった砂杭で標準貫入試験を行い、サンプル中のトレーサーの色を調べた。この結果をFig. 16に示す。推定パターンと実測パターンは

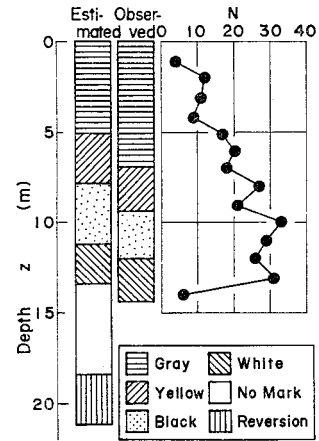


Fig. 16 Estimated and observed pattern of tracers in the sand pile.

かなりよく一致し、マンドレル内のウェット砂が、投入順序どおりに層状をしたまま地盤内へ排出されたことが明らかである。なお、深度15mでボーリング孔が砂杭から外れたため、そこで調査は打ち切っている。

(2) ウェット砂が流体的挙動を示す理由

マンドレル内のウェット砂がこのように流体的な挙動を示すことについては、次に述べる2つの理由が推定され、それぞれ実験的にも一応証明される。

a) 浮力による壁面摩擦の減少

含水比  $w$  の増加に伴い、土粒子に作用する浮力によって有効応力が減り、結果的に管壁での摩擦抵抗が減る。この現象は、たとえば水の代わりに比重が土粒子と同じ液体で飽和させたことを考えると、容易に理解できる。この場合、砂の高さ  $x$  に対する底面での鉛直圧力  $p_x$  は、管径を  $D$ 、砂の静止土圧係数を  $k$ 、砂と管壁との摩擦係数を  $u$ 、砂の飽和単位体積重量を  $\gamma_t$ 、水の単位体積重量を  $\gamma_w$  として、Janssenの式と同様に、次式で表わされる。

$$p_x = (\gamma_t - \gamma_w) \frac{D}{4uk} \left( 1 - e^{-\frac{4uk}{D}x} \right) + \gamma_w x \dots (2)$$

Fig. 17は、この現象を室内実験で調べたもので、アクリルパイプ（直径101mm）中に含水比  $w$  の異なる豊浦標準砂を入れ、パイプの底板にかかる圧力をロードセルで測定した。図は縦軸に  $p_x$  を  $\gamma_t$  で除した換算高さをとり、横軸に実際の砂の高さ  $x$  をとっており、図中には、 $uk=0.15$  の場合の、ドライおよびウェット砂に対する理論値も示した。実測値と理論値に差はあるものの、含水比増加とともに底面圧力が増加する傾向は明らかである。



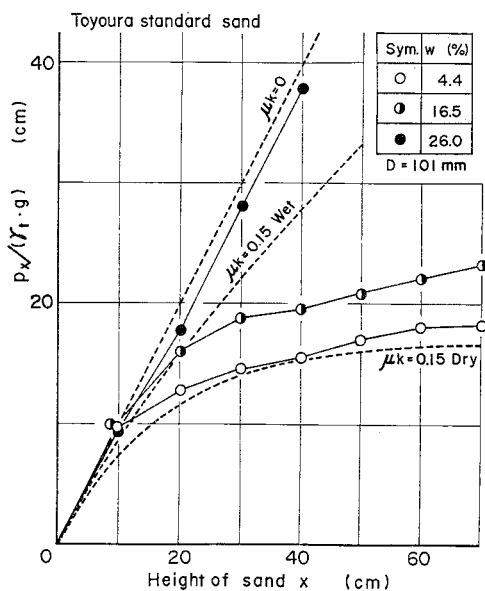


Fig. 17 Pressure  $p_x$  at the bottom of mandrel vs. height of sand.

b) 振動による飽和砂の液状化

マンドレル上部に取付けた打込み用のパイプロランマーの振動（重力加速度よりかなり大きな鉛直振動）が、マンドレル内の飽和砂を液状化状態に保っていると考えられる。

実際、5.(1)で述べた現場実験中に、マンドレル内に20 mの高さまで飽和砂を入れた状態で、重錘（質量約5 kg、底面積約20 cm<sup>2</sup>の円柱形）でマンドレル内の測深をすると、振動停止直後にはまったく抵抗なしにマンドレル底まで重錘が沈み、約15分静止後も（表面から1.6 m沈下後若干の抵抗はあるものの）12.8 mまで沈んではじめて止まった。このような支持力の低下は、明らかに振動による液状化を示していると考えられる。

(3) ウェット施工の特徴

a) 加水

現場に搬入される砂は、普通、飽和されていないので、マンドレル内に供給される時点で加水が必要である。加水量が不足すると不飽和となり Fig. 17 から流体的な挙動を十分に示さないと考えられるが、過多であると、浮き水を生じたり、非常にゆるい砂となったりして砂杭の品質に悪影響を及ぼすことも考えられる。このため、ウェット砂を流体的に挙動させる要因を研究する必要があるが、現場的には、各施工機械、使用砂に応じた最低限の加水量を施工前に調べるとともに、施工中は加水量の正確な管理が必要である。

b) マンドレル底面圧力の制御

ウェット施工もドライ施工と同様にマンドレル底部に

おける地盤の土圧とマンドレル内の圧力のバランスを利用して砂を排出していると考えられる。したがって、マンドレル底面圧力の制御の良否が、直接、砂杭の品質を左右することになる。底面圧力は、前に紹介したように、ウェット砂の自重と圧気圧の両方で与えることができる。しかし、圧気圧は制御が困難なので、砂の自重を主として用いる方が施工が容易であろう。

c) ウェット施工に適した砂質

ウェット砂が流体的挙動を示す理由から、ウェット施工に適した砂は、均等係数の小さな細砂と考えられる。実際、施工経験から、粗砂を用いると、補助的に圧気圧を必要とする場合が多い。

d) ウェット施工の限界深度

ウェット施工においては、マンドレル内のウェット砂の自重を有効に利用できると考えられる。したがって、施工深度の増加に伴ってマンドレル内の砂量を増せば、地盤の土圧の増加とウェット砂の自重による圧力の増加が打消し合うため、理論的にはドライ施工のような限界深度は存在しないと考えられる。

このように、ウェット施工は、ウェット砂の流体的挙動をたくみに利用した施工法であるが、ドライ施工以上に細心の施工管理と工夫を必要とするのは当然である。また、過去の実績も十分整理されていないため、造成された砂杭の品質にも未知の点が多い。今後の研究と実用化が期待される施工法である。

6. まとめ

海上砂杭施工には、海水の存在という陸上とは異なった施工条件がある。海上で、陸上施工とまったく同一の手順で実験施工を行うと、はじめにマンドレル内に侵入した海水により、施工前半は飽和した砂によるウェット施工、後半は陸上と同じドライ施工となる。そして、ウェット施工においては、ウェット砂は流体的な挙動を示す。

ところで、現在の砂杭施工技術から考えて、砂杭の品質と管理の面から、1本の砂杭は、どちらか一方の施工法で終始する方が好ましい。

そこで、海上でドライ施工を行うことを考え、施工初期にマンドレル内に海水を侵入させないか、あるいは侵入した海水を排除するという、マンドレルのドライ化を行えば、海上施工でも陸上施工と同じドライ施工が可能であることを示した。

一方、ウェット施工については、実例から飽和砂の流体的な挙動と、「マンドレル底面における内部からの圧力（圧気圧と飽和砂の自重による圧力の和）が外部地盤

からの圧力より大きいと砂を排出する」というウェット施工の原理を紹介した。また、飽和砂の流体的挙動の理由を、有効応力表示した Janssen のサイロ理論式と、振動による飽和砂の液化化によって説明した。

大深度施工という点からは、通常の圧気設備のみを用いたドライ施工は 60~70 m が限界であるのに対し、ウェット施工は理論上限界が存在しないので有利であるが、まだ未解明の点も多く、今後の研究が待たれる。

ここでは、ドライ施工のためのマンドレルのドライ化法と、ウェット施工法の原理を示したが、実際の方法としては、ここにあげたもの以外にも多くの方法が考えられるだろう。この面で、現場技術者の創意・工夫が待たれる。

また、施工のメカニズムが明らかになっても、実際の施工管理が不十分では意味がないので、熟練した現場技術者の養成とともに、自動制御の方向も検討する必要があると考える。

本研究は著者が不動建設（株）中央研究所在職中に行ったものである。研究の機会と発表の便宜を与えて下さった庄野 勝社長をはじめとする同社諸氏ならびに各実験におけるよき協力者であった伊藤勝久氏（現（株）東洋情報システム）に謝意を表す。また、研究をまとめるにあたってご教示を得た京都大学の柴田 徹教授、愛媛大学の室 達朗教授に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) Singh, G. and T.N. Hattab : A Laboratory Study of Efficiency of Sand Drains in Relation to Method of Installation and Spacing, *Géotechnique*, Vol. 29, No. 4, pp. 396~397, 1979.
- 2) 榎 明潔 : 軟弱粘性土地盤中の砂杭造成について, 土木学会論文報告集, No. 317, pp. 111~122, 1982.1.
- 3) 日本道路公団 : 設計要領第 I 集, p. 149.
- 4) Stanton, F.E. : Vertical Sand Drains as a Means of Foundation Consolidation on Accelerating Settlement of Embankment over Marsh Land, *Proc. of 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 5, pp. 273~278, 1948.

(1981.3.16・受付)