

15. 軟弱地盤中の砂杭造成について

愛媛大学 榎 明 潔
 不動建設 田 村 徹

1. まえがき

砂杭を用いるサンドドレーン工法（以下SD工法と略す）やサンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法と略す）は、軟弱地盤改良工法として多用されている。この背景として、Barronのサンドドレーン理論に代表される理論的あるいは実験室的な各種の研究の集積があることは忘れることができない。しかし、これら砂杭工法の現場的・実用的な意味での効果の有無については、未だに多くの議論¹⁾が見受けられる。これらの議論は、内容的にいくつかの要素に関するものに分類できるが、その中で特に研究の遅れているのが、施工の信頼性（砂杭の径、連続性、配置等が設計通り施工されたか）であると考えられる。このような立場から、筆者らは、施工中に砂杭造成の良否を判定できるような指標を考えるとともに、この指標値を他の施工状況と同時に測定することによって砂杭の良否に影響する因子あるいは砂杭施工のメカニズムを調べ、信頼性のある効率的な施工法を見出そうとするものである。本報告は、その第一報として、沖積粘性土地盤における、マンドレル打込み方式の施工の、マンドレル下端から地盤内への砂の排出について述べる。

2. 砂杭造成の良否を判定する指標とその測定法

現在用いられている設計法から考えると、砂杭に要求される品質としては、SD工法ではまず鉛直方向の連続性、次に砂杭配置、杭径となり、SCP工法ではそれらに砂杭強度に関する品質（ ρ 等）が追加される。なお、最近よく用いられる強制置換工法（大径の砂杭を密挿して造成し、軟弱地盤の砂による強制置換を行なう工法）では、杭径（砂量）が最重要視される。したがって、以上の砂杭工法では、共通して杭径に対する要求が強く、鉛直方向の連続性も杭径がゼロでない事だと考えれば、とりあえず杭径を指標に砂杭造成の良否を考えていこう。ところで、マンドレル引抜き工程にて

できる砂杭の径（断面積）は、次に示すように、マンドレル内の砂の表面の位置（マンドレル下端からの高さ） SL と、マンドレル下端の地表面からの深さを常時測定することによって推定できる。すなわち、図-1に示すように微小時間 dt 中のマンドレル引抜き長さ dz 、砂面降下高 dSL 、その間に造成された砂杭断面積 A_s の向には、 $dSL \cdot A_m \cdot r_i = dz \cdot A_s \cdot r_s$ から

$$A_s = \frac{r_i}{r_s} \cdot \frac{dSL}{dz} \cdot A_m \quad \text{----- (1)}$$

が成立する。 $\frac{r_i}{r_s} = 1$ の簡単な場合には、 $\frac{dSL}{dz} = 1$ ならばマンドレルと同じ断面積の砂杭ができ、 $\frac{dSL}{dz} = 0$ ($dSL = 0$)ならば砂杭は切れる。通常、SD工法では砂杭径と同径のマンドレルを用いるため、施工中、常に $\frac{dSL}{dz} \geq 1$ を維持することが必要である。 $\frac{dSL}{dz}$ は砂杭の良否を表わす指標と与えられる。

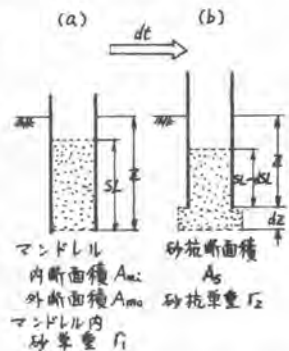


図-1. 砂杭断面積の推定

ところで、 $\frac{dSL}{dt}$ を考える場合、それぞれ有限の ASL, AZ による $\frac{dSL}{dt}$ を用い、この有限増分内では現象が一様であると仮定して検討を加えるのが実用的である。ふつう AZ としては $1 \sim 3m$ がとられるが、押戻し工程をともなう SCP 工法では、1回の引抜き工程の AZ ($2 \sim 3m$) をとると便利である。また、補助的には、マンドレル引抜き速度 $v_L = \frac{dZ}{dt}$ 、砂面降下速度 $v_{SL} = \frac{dSL}{dt}$ を用いることもできる。

マンドレル下端深度 Z の測定は、図-2 (a) のワイヤーをループにする方法あるいは (b) のワイヤーの一端におもりをつける方法のいずれかで深度検出器のプーリーを回転させることで行なわれる。

マンドレル内砂面高さ SL は、図-3 (a), (b) のいずれかの方法で測定される。(a)の方法は最近開発されたもので、砂(自然含水状態)の導電性を利用し、電極錘と砂面の接触状態を電流の断続に変換し、これによって電極錘を吊っている絶縁ワイヤーの巻取り・巻出しを行なうサーボ機構を用いており、砂供給の際にも電極錘の埋没がなため、施工中に何度も砂を供給する SCP 工法で使われる。(b)の方法はかなり古くから SD 工法で用いられてきたもので、ワイヤーの一端に重錘、他端に少し軽いカウンターウェイトをつけることにより常にワイヤーに張力を与え、砂面の降下による重錘の降下を砂面検出器のプーリーの回転に変えている。この場合、重錘は重力により砂面に追従しているだけなので、砂を供給する時に重錘を上昇させる巻上げ装置が砂面検出装置に付加される。(b)の方法では、図-1 の $Z-SL$ を測定していることは、言うまでもない。

図-4 に、押戻し工程をともなう SCP 工法における図-2 (a), 図-3 (a) 方式の測定による記録例を示す。図-4 上段は、マンドレル内に与えた圧気圧、中段は砂面高さ、

下段はマンドレル下端深度である。①はマンドレルを地上にセットしての砂供給工程、②はマンドレルの打込み工程、③はマンドレル内に圧気してマンドレルを引抜く工程で、同時に砂の排出が見られる。④はこの SCP 工法特有の押戻し工程で、同時にマンドレル内を減圧し、砂が供給される。以後は③、④両工程を繰返して、地表まで砂杭が造成される。

一般の SD 工法では、④の工程がないうが、砂の供給が②の打込み工程終了時に全量行なわれ、造成途中では行なわれない。また、圧気も、マンドレル引抜き開始から砂杭造成終了まで連続して行なわれる。

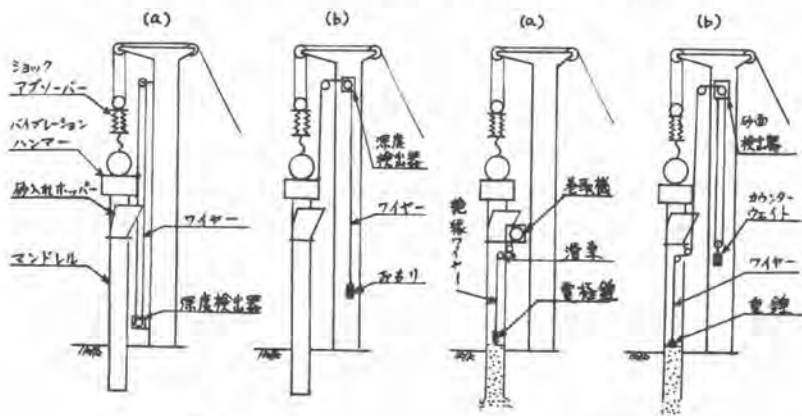


図-2. 深度の測定法

図-3. 砂面の測定法

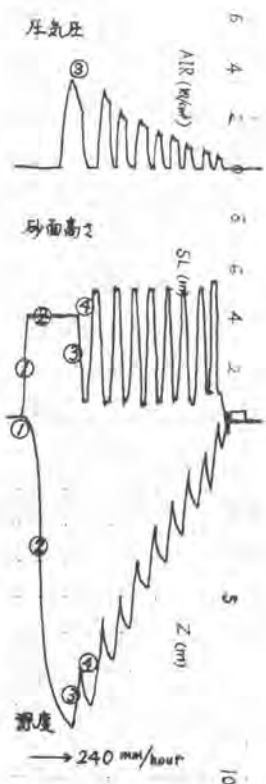


図-4. オシロ例(コンポジット工法)

3. その他の施工状況の測定

通常、砂杭施工においては施工管理のために、前述の SL を測定・記録するが、これ以外に実験的な意味で、図-5に示す項目について測定・記録を行なうと施工状況がより明確になる。

①はマンダレル内の圧気圧の測定で、次節で述べるように、砂の排出に強く関係し、図-4に示すような挙動を示す。②はバイブレーションハンマーによるマンダレルの振動(加速度)測定で、③のバイブレーションハンマーの消費電力測定とともにマンダレルの振動貫入性状を示し、地盤の貫入抵抗と関連する²⁾。またマンダレル内の砂の挙動を推定するのに役立つ。④はマンダレルを吊っているワイヤーの張力測定で、マンダレル自重からこの張力を引いたものが貫入抵抗であると考えられる³⁾。

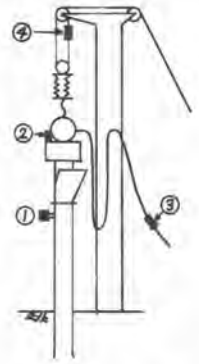
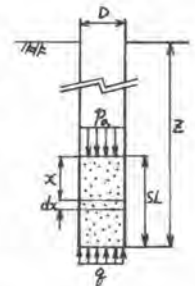


図-5. その他の測定

4. 圧気的作用

砂杭の施工に際して、マンダレル引抜き時に砂の排出を補助するため、マンダレル内に圧気することが行なわれるが、従来、この効果は圧気が砂をマンダレルから押抜くためと考えられている。しかし、この説明には、サイロの理論から考えて無理がある。すなわち、図-6に示す管からの砂の押抜き問題を考えると、⁴⁾ 微小厚さ dx 部分のつりあひから次式が得られる。



$$P_a = \frac{D\gamma}{4\mu R} - \frac{D}{4\mu R} \left(\gamma - \frac{4\mu R}{D} g \right) e^{\frac{4\mu R}{D} x} \quad \text{----- (2)}$$

ここで γ は砂の単重、 μ は砂と管壁のまさつ係数、 R は砂の土圧係数、⁴⁾ 図-6. 砂を押抜く圧力 (2)式は γ が小さい時 $P_a = \gamma e^{\frac{4\mu R}{D} x}$ となる。これに実験的な数値 $D=0.4m$ 、 $x \geq 3m$ 、 $\mu R = 0.2 \sim 0.3$ 、かつ $\gamma = 20 \sim 30 \text{ t/m}^3$ (N.C.地盤の $\gamma = 10m$ での支持力) を入れると、 $P_a \geq 40 \text{ t/cm}^2$ となり、現場で実際に用いられているコンプレッサーの能力(通常 7 t/cm^2)をはるかに超えてしまうからである。

そこで、圧気の効果を実際の施工データから調べてみよう。施工に必要な圧気圧か深度とともに増加するのは、図-4に示される通りである。この関係をさらに定量化するための、実験的に個々の工程を分離した緩速な施工を行ない、圧気についてもマンダレル引抜きより早くから与え、引抜き中に圧気圧が低下したら補充して一定圧とした場合の、海底正規圧密地盤における測定結果を、 $\frac{\Delta SL}{\Delta Z}$ をパラメータとして図-7に示す。また、同様の実験施工で、深度 Z をパラメータとして $\frac{\Delta SL}{\Delta Z}$ と圧気圧 P_a の関係を調べたものを、図-8に示す。

一定深度から圧気圧の大きいほど、一定圧気圧から深度の小さいほど、砂がよく排出されることかわかる。

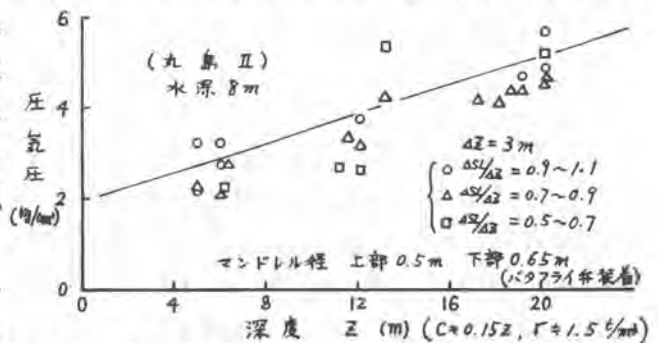


図-7. $\frac{\Delta SL}{\Delta Z}$ をパラメータとした圧気圧と深度の関係

次に、マンダレル内を圧気し、一定圧になつてからマンダレルを引抜くまでの放置時間 t の影響を調べたものが、図-9である。圧力が大きい場合、マンダレル内空間が一定圧になるのに少し時間がかかるため、砂に圧気が作用した正味時間は図中の t より少し長いと考えるべきであるが、とにかく、圧気放置時間が長いほど砂の排出が良くなることは明らかである。

なお、図-7~図-9の実験施工では、 $D_{50} = 1.6 \text{ mm}$ の粗い海砂(広島県忠の海産)を用いている。

この他に、次の事項が実験施工中に観察される。

i) 陸上施工の場合のごく残部(マンダレルを引抜いてお孔壁が自立するような深さ)を除いて、圧気しないマンダレルを引抜いても砂が排出されない。

ii) 地表でマンダレル内に砂を詰めて、マンダレルを吊り上げると、圧気なしでも砂が排出される。(この場合、バイブレーションハンマーを作用した方が排出が円滑である)

以上から、圧気の効果について、次のような仮説をたてることのできる。

- i) 砂はマンダレル下に空間があれば落下(排出)する。
- ii) 圧気圧力はマンダレル内の砂を透気してマンダレル下端に伝達される。
- iii) マンダレル引抜きによってできた空間を圧気圧力維持し、その空間内にi)によって砂が排出され砂抗ができる。

5. あとがき

施工というむずかしい問題を、施工状況を適当な方法で測定し、適当な指標で評価することにより、土質力学を適用できると考えられる。4節の仮説については、空間維持に必要な圧力や砂中の透気⁵⁾について別途に調べてあるので、別の機会にまとめて発表したい。

参考文献

- 1) 松とえは、「バーチカドレン工法の向題点をさぐる」、土と基礎, Vol. 20, No. 8, 1972.
- 2) 小川・謝・西山: クイの振動貫入と地盤強度の関係, 第9回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 913-916, 1974.
- 3) 横・峰岡: 粘性土地盤に鋼管を振動貫入したときの側面抵抗と先端抵抗, 第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 673-696, 1976.
- 4) 横・西山・伊藤・峰岡: 中空管内部に詰まった砂の挙動, 第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 897-900, 1978.
- 5) 横・伊藤・峰岡: 粘性土地盤の工圧に関する現場測定, 第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 893-896, 1978.
- 6) 横・伊藤: 砂中の透気について, 第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 785-788, 1976.

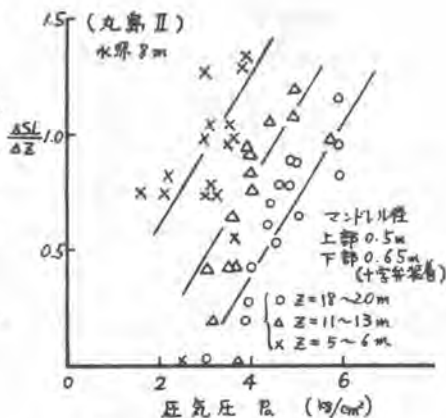


図-8. $\frac{\Delta SL}{\Delta Z}$ と圧気圧 P_a の関係。(正味パラメータ)

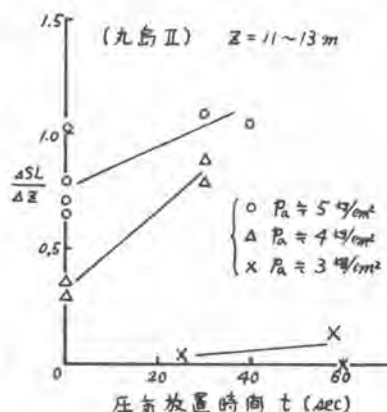


図-9. $\frac{\Delta SL}{\Delta Z}$ と圧気放置時間 t