

液状化を利用した海底土中への貫入装置に関する基礎的研究

浦 環*・小林 敬幸**

1. はじめに

海岸工事や沖合での工事では、船舶の係留に広く使われている爪式のアンカーとは異なって、鉛直方向の力に対して大きく抵抗するアンカーが求められることが多い。この目的のためには、重量型のアンカー、すなわちシンカーの利用もあるが、海底土中深く抵抗物を貫入させ、結果として上方に引き抜く力に対しても大きく抵抗するより軽量の係留機器の開発も考えられる。この場合、海底での埋設法が問題となる。ここではその一方法として、海底土を液状化させ、係留機器を埋設させる方法について検討する。たとえば、係留機器の下面から水を吐出させ、吐出水の圧力により吐出口付近の間隙水圧を上昇させ、有効応力を減少させる。吐出水の水圧が海底土の液状化を起こすのに十分大きければ、この係留機器を小さな力で海底土中に貫入させることができる(図-1 参照)。貫入させた後、吐出を止めると、海底土はほぼ元の状態に戻る。あるいは逆に吸引して、海底土を締めることも考えられる。このように液状化を積極的に利用すれば、係留機器を深く貫入させることが容易にできる。

本研究では、このような係留装置を念頭において、2種類の抵抗物の下端より下向きに水を吐出させ、それと同時に定速で貫入させる装置を試作し、吐出水頭と貫入抵抗力との関係を実験的に検討した。また、第1次近似

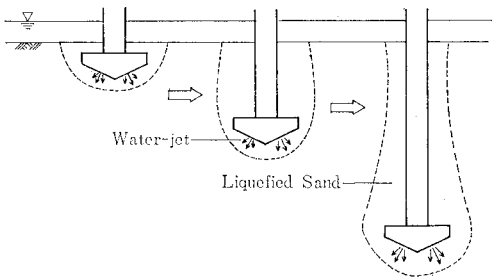


図-1 液状化を利用した係留機器の貫入

として透水理論に基づき定常状態の液状化領域を推定し、実験により求めた間隙水圧との比較・検討をおこなった。

2. 水吐出型貫入装置による実験装置

2.1 実験装置

実験装置の概観を図-2に示す。直径50 cm、深さ60 cmの土槽は底面からも排水できるように2重底にしてあり、その中に豊浦標準砂を入れ、水で飽和させた。実験は外径15 mmφ、内径13 mmφの導管に取り付けられた抵抗物を鉛直に移動させ、吐出する水頭を一定に保ち、定速で砂中に貫入させた。そして、砂中の過剰間隙水圧の分布、貫入抵抗力、吐出する水の流量を計測している。水を吐出する抵抗物は、図-3及び図-6中に示す2種を用いた。図-3に示すものは、導管をそのまま切断したもので、外径15 mmφ、内径13 mmφの円筒形である。図-6のものは、直径50 mm、頂角120°の円錐形で、その斜面の中央に5 mmφの穴を8箇所あけて吐出口とした。両者の吐出口の面積はほぼ同じである。

間隙水圧計は呼び径1/8インチの鋼管の一端に金網を取り付け受圧部とし、他端を圧力変換器へ導いた。貫入及び引き抜き抵抗は、導管の上部と駆動部の間に設置し

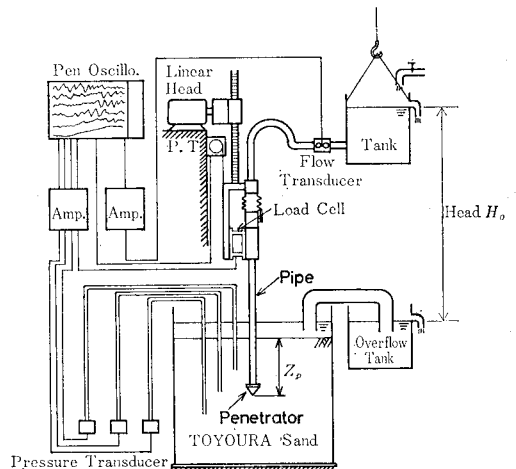
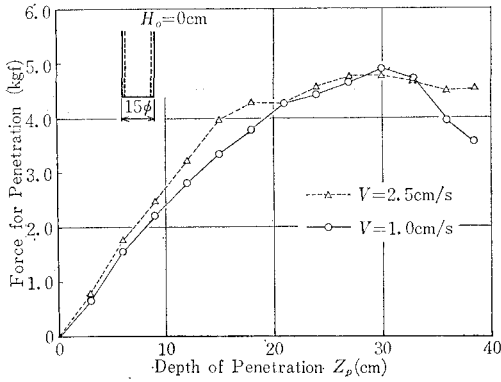
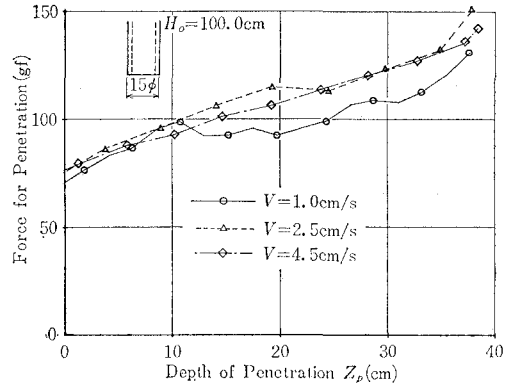


図-2 実験装置の概略図

* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 助教授
 ** 正会員 工修 (財)日本海事協会 開発部



(a) 水を吐出させない場合



(b) 水を吐出させた場合

図-3 円筒形の抵抗物による貫入深さと貫入抵抗力との関係

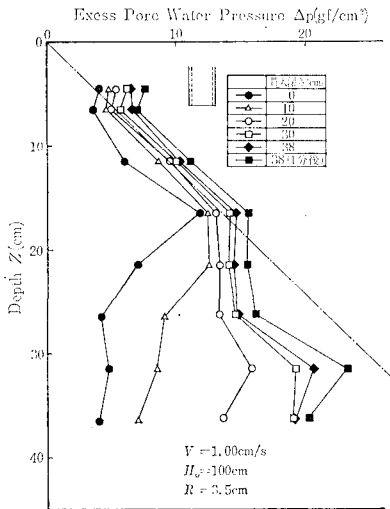


図-4 過剰間隙水圧分布の変化

たボックス型の荷重計で計測した。吐出口での供給水頭 H_0 は、水の吐出ししない 0 cm から 100 cm まで、貫入速度 V は、1.0 cm/sec から 4.5 cm/sec まで変化させている。

2.2 円筒形の抵抗物による貫入実験

図-3 に円筒形の抵抗物を砂中に貫入させた時の貫入深さと貫入抵抗力との関係を示す。図-3 (a) は水を吐出しない場合、同 (b) は水頭 $H_0=100$ cm の圧力で水を吐出した場合である。貫入速度を 2~3 通りに変えてある。水を吐出させて、抵抗物の周囲の砂を液状化させることにより、貫入抵抗力が激減することが示されている。図-4 は、 $H_0=100$ cm、 $V=1.0$ cm/sec のとき、導管の中央(吐出口の中心位置)から 3.5 cm 側方に離れた点での過剰間隙水圧 Δp の深さ方向の分布を、貫入深さ Z_p にしたがって示したものである。吐出口の深さの増加とともに、土槽の深い部分での Δp が上昇しており、

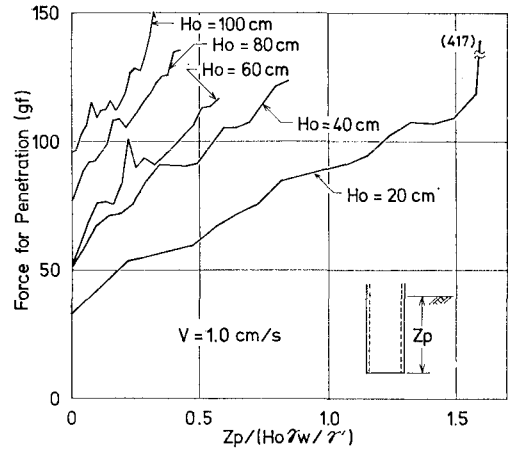
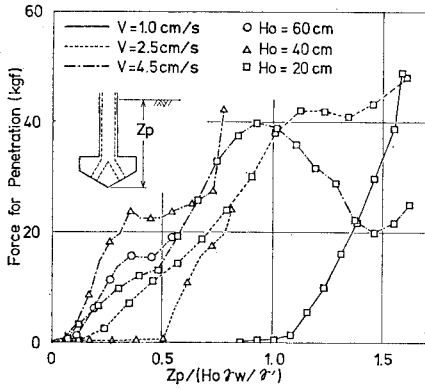


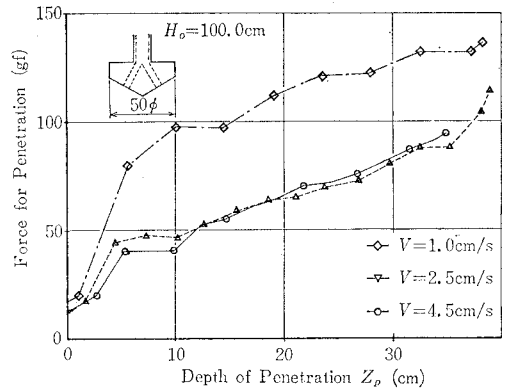
図-5 吐出水頭別の貫入抵抗力

液状化領域が下方へ広がっていることを示している。図中の一点鎖線は、初期状態の砂の有効応力 $\sigma'_v = \gamma' z$ (γ' は砂の水中単位重量 $= 0.85$ gf/cm³ (8.33 kN/m³)) である。貫入速度を $V=1.0$ cm/sec と一定にし、吐出口での水頭 H_0 を 20~100 cm に変化させた場合の貫入深さと貫入抵抗力との関係を図-5 に示す。

図-4 に示されるように、水を吐出させると吐出する水の圧力によって吐出口近傍の過剰間隙水圧は、最大 $\gamma' z$ まで上昇し、砂は部分的に液状化を起こす。吐出口をさらに貫入させると、吐出口の変位とともに液状化領域も下方へと広がり、貫入量がほぼ $H_0 \gamma_w / \gamma'$ に等しなるまで貫入抵抗力はほとんど上昇していない。ここで、 γ_w は間隙水の単位体積重量である。貫入深さ $Z_p=10$ cm~30 cm の範囲では水頭 H_0 が 40 cm 以上であれば、貫入抵抗力に対する水頭の影響は少ない。図-3 (b) において変位が 0 cm の場合の抵抗力は、吐出する水の反力であり、十分な液状化領域が形成された場合には、この力が貫入抵抗力の大きな割合を占める。水頭が貫入深さに比



(a) 液状化が十分でない場合



(b) 液状化が十分な場合

図-6 円錐形の抵抗物による貫入深さと貫入抵抗力との関係

べて小さい $H_0=20$ cm の場合には貫入深さが 30 cm を越えると抵抗は急激に増加する。 $Z_p < H_0 \gamma_w / \gamma'$ となる位置では、過剰間隙水圧が初期の有効応力 σ'_v を越えず、したがって砂の液状化がおこらず、砂の塑性変形によって生じる貫入抵抗力の増加が起こる。

2.3 円錐形の貫入端による貫入実験

貫入端の形状が円錐形の場合の貫入深さ Z_p と貫入抵抗力の関係を 図-6 に示す。 図-6 (a) は $H_0 \leq 60$ cm の場合であり、(b) は $H_0=100$ cm の場合である。 H_0 が 20 cm ~ 60 cm の間では、抵抗力に対する貫入速度の影響が顕著である。 H_0 が貫入深さに比べて十分に大きくなく V が速いときに、貫入抵抗力は大きな値を示す。これは先端形状が大きいため、十分に広い幅の液状化領域が作られないこと、液状化領域の広がる速度が水頭 H_0 に依存し、動的な効果が生じたためであると考えられる。

2.4 引き抜き抵抗

次に、約 40 cm 貫入させて水を止め、1 分後に抵抗物を逆に引き抜いて引き抜き抵抗を計測した。その結果を 図-7 に示す。水を吐出させずに貫入させた後に引き抜

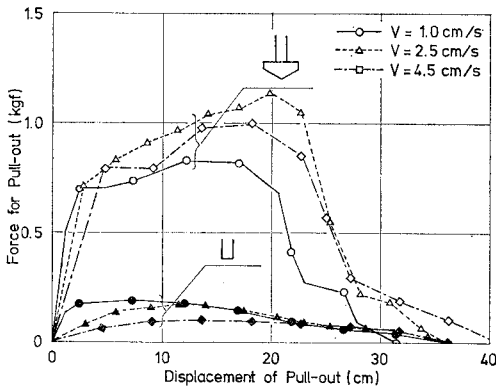


図-7 引き抜き抵抗力

いたときの最大抵抗力は、円筒形、円錐形各々 0.4 kgf (3.92 N), 7.2 kgf (70.56 N) であり、 図-7 の最大値はこれらの値を大きく下まわる。これは、水を吐出させ貫入させると、吐出水を止めても抵抗物の周囲の砂が直ちには締まらず、ゆるい状態のままであることによる。しかし、引き抜き抵抗力の最大値と貫入抵抗力の最大値の比をとると、円筒形の場合では $H_0=100$ cm で水を吐出させたときに 1.1、吐出させないときは 0.09 である。円錐形の場合には各々 8.9、0.08 となる。このように、先端形状と吐出口及び吐出水頭を工夫するところにより小さな貫入力で大きな引き抜き抵抗力を生む留置機器を開発できると思われる。

3. 液状化領域の推定

3.1 数値計算法

吐出水の圧力による液状化領域を推定するため Darcy 則に基づいた透水理論により、有限要素法によって数値解析をおこなった。解析においては、簡単のため貫入速度の影響を無視し、先端が貫入するにしたがって常に定常状態になると仮定した。したがって、基礎方程式は間隙水の水頭 h を未知として、

$$k \nabla^2 h = 0 \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで k は透水係数である。上式を適当な境界条件のもとで解き、過剰間隙水圧 Δp を

$$\Delta p = \gamma_w \cdot \Delta h \dots\dots\dots (2)$$

によって求め、後述する液状化条件式により液状化領域を求めた。

3.2 液状化条件と透水係数

過剰間隙水圧 Δp の上昇により砂は液状化されるが、液状化による応力の再配分がないものとする、次式により定義される有効応力の一次の不変量

$$J_1 = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \dots\dots\dots (3)$$

がゼロになると液状化すると判定した。ここで、 σ'_z ,

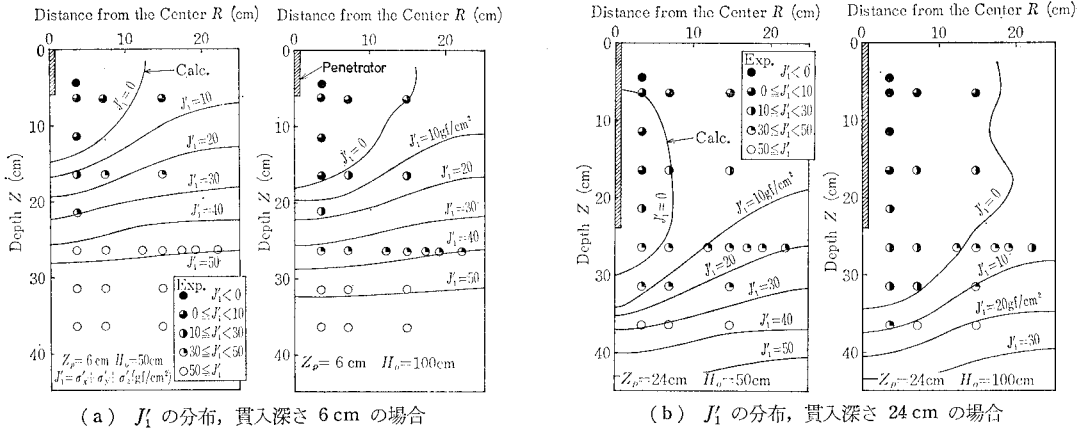


図-8 円筒形の抵抗物による実験と計算との比較

σ'_y, σ'_z は Z 軸を深さ方向に取った座標系における各方向の有効応力で、

$$\sigma'_z = \sigma'_y - \Delta p = \gamma'z - \Delta p \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma'_x = \sigma'_y = K_0 \sigma'_y - \Delta p = K_0 \gamma'z - \Delta p \quad \dots\dots\dots(5)$$

となり、故に(3)式は、

$$J_1 = (2K_0 + 1)\gamma'z - 3\Delta p \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここに、 K_0 は静止土圧係数である。

液状化領域内では間隙水の流れにより砂が大きく移動する部分があり、厳密には式(1)が成り立たない。透水係数を一定として式(1)を解くと、狭い液状化領域が得られるにすぎない。砂の移動により見掛け上透水性が良くなると考えられるので、以後の解析においては、液状化が発生すると透水係数が大きくなるとし、繰り返し計算により解を求めた。すなわち

$$\begin{aligned} k &= 0.025 \text{ cm/sec} & J_1 > 0 \\ k &= 2.65 \text{ cm/sec} & J_1 \leq 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7)$$

とする。

3.3 解析例

貫入先端は 3 cm 間隔で下げ、その前のステップで求められた液状化領域をもとにして式(1)を解き、繰り返し計算を行なって、液状化領域を収束させて解を求めた。ただし、 $K_0 = 1.0$ としている。

図-8 は、円筒形の貫入端についての本計算法による解析結果と実験結果を有効応力の一次の不変量 J_1 で比較したものである。図-8 (a) は貫入量が比較的上部の 6 cm, (b) は 24 cm の場合で、それぞれ供給水頭は 50 cm, 100 cm である。図中の実線は解析による J_1 の等高線で、丸印は間隙水圧から求めた実験値を示している。

図-9 は、円錐形の貫入端の場合の同様の比較である。図-10 (a), (b) は円筒形の場合の導管中心から 3.5 cm 側方に離れた位置の過剰間隙水圧 Δp の分布の比較を示す。図中の一点鎖線は σ'_x を表している。実験値は貫入速度の異なるものを示す。図-10 の間隙水圧分布の比

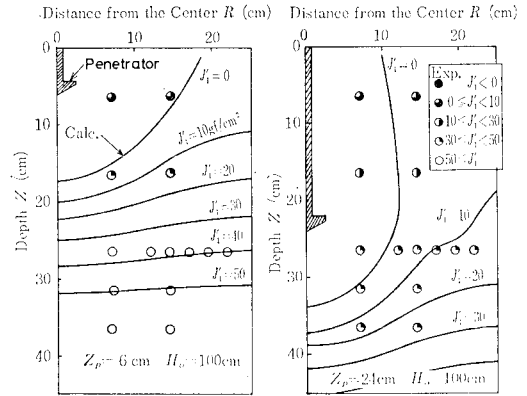


図-9 円錐形の抵抗物による実験と計算との比較

較より明らかなように、 Δp の計算値は実験値より大きめの値を与えている。特に液状化領域内の Δp は、初期の有効直応力 σ'_y を越える結果となっている。液状化領域内では透水性の増大により水が多量に上方へ流れ、それと同時に砂粒子も上方へ押し流され、砂構造が大きく変形し、そのため、実際には液状化領域内の間隙水圧が解析結果のように上昇しないことによる。本計算法では、液状化領域において透水性の増大のみに着目し、このような砂粒子の運動を無視しているため、液状化領域が実際よりも拡大している結果となった。

4. 結 論

本研究により、

- 1) 水を吐出させ液状化領域を作りながら係留機器などを貫入させる方法は、貫入抵抗力を減少させる手段として有効であることが示された。
- 2) 小さな吐出水頭であっても、海底の表層土に対して十分な効果を生み得ることが明らかとなった。
- 3) 貫入速度が遅い場合、液状化の効果を利用し得る深

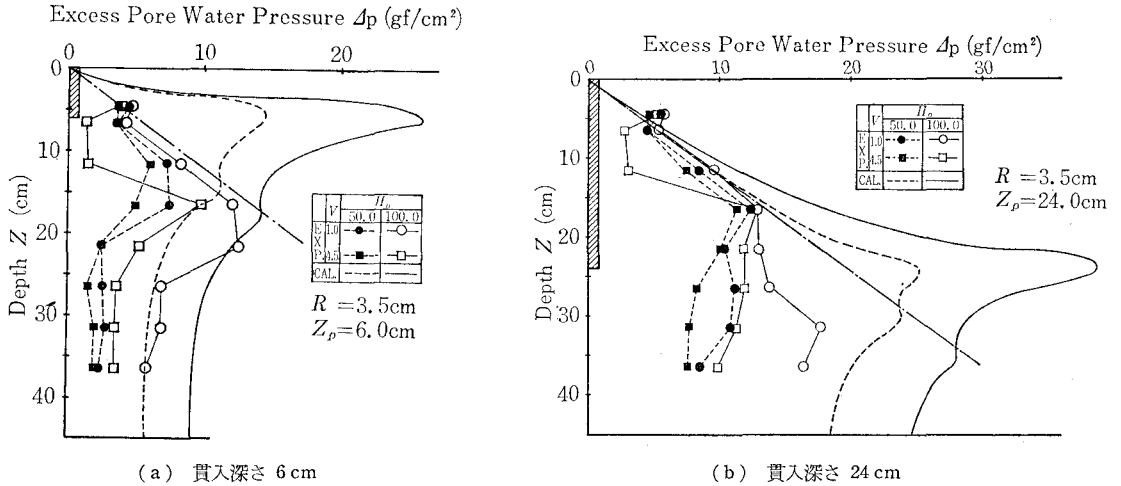


図-10 過剰間隙水圧分布の計算値と実験値との比較

さの最大値は吐出させる水の水頭 H_0 によって定まり、概ね $H_0 \gamma_w / \gamma'$ で与えられる。

- 4) 貫入速度が速い場合、液状化による貫入抵抗力の軽減効果が十分に得られない場合がある。これは、液状化領域の拡大する速度に関係し、十分に液状化していない領域に貫入する現象が起きることによる。この場合、吐出させる水の水頭と流量を増加させる必要が生じる。
- 5) 液状化した領域の透水係数を変化させて、透水理論のみに基づいて過剰間隙水圧を解析する簡易計算法は、実験結果を定性的には説明し得ることが示された。しかしながら、液状化した領域内での砂と水の運動を無視しているため、定量的には問題が残る。この点は今後の研究課題である。

謝辞： 本論文を作成するに当たり、東京大学名誉教授高橋幸伯博士、同生産技術研究所助手能勢義昭氏にご指導・ご協力を賜わった。また、(財)日本海事協会開発部長新田顕博士に種々ご便宜を計っていただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 浦 環・小林敬幸・高橋幸伯：水噴射型貫入装置の基礎的研究，生産研究，第 36 巻 7 号，pp. 17~20, 1984.
- 2) 小林敬幸：海底土の液状化を利用した水噴射型貫入装置の基礎的研究，東京大学工学系大学院修士論文，1984.
- 3) 内田一郎・村田重之：浸透水圧を受ける砂のせん断強度について，土木学会論文集，第 310 号，pp. 89~95, 1981.
- 4) Wilson, Q. and B. S. Sahota: Pull-out parameters for buried suction anchors, Offshore Tech. Conf., OTC 3816, pp. 205~216, 1980.