

サンドドレーン打設時の地盤の圧密について

BRIEF NOTE ON THE CONSOLIDATION OF GROUND
DUE TO INSTALLATION OF SAND DRAIN

赤井 浩 一*

By Koichi AKAI

1. はじめに

各種パーチカルドレーンの中で、サンドドレーンは最も歴史が古く施工実績も多いため、現在でも深層地盤改良工法の主流としての地位を占めており、この工法をさらに深い軟弱土層の改良に利用しようとする気運がみられる。しかし、元来サンドドレーン工法の効用については種々の論議がなされてきたところであり、それらは大別して、(1) 圧密理論に直接関連する問題、(2) 圧密計算に必要な諸数値の決定方法に関する問題、(3) ドレーンの造成という施工に関する問題、(4) 圧密促進効果の判定に関する問題となる¹⁾。前報²⁾でパーチカルドレーンの圧密機構に関する基礎的な事項を考察したが、その際、砂柱の打設による周辺粘土層内の過剰間隙水圧の発生についても言及した。本文では、その後の検討をもとに、サンドドレーン打設時の地盤の圧密について考究しよう。これはまた、最近一部で流行の動圧密工法を飽和粘土地盤に適用することに対する批判ともなるであろう。

2. 砂柱打設時の発生間隙水圧の特性

サンドドレーンの施工において、砂柱打設時の圧密に関して調べたものはわずかである。ことに現地地盤で打設時の間隙水圧や沈下が計測された例はほとんどなく、また仮にそれがあっても、理論的裏づけがなされた例は皆無といってよい。

排除型砂杭の打設による圧密に関して、赤木^{3),4)}は一連の解析的研究を行い、それが改良地盤の強度に対して多くの場合無視できない効果をもつことを述べた。すなわち、サンドドレーン工法に用いられるマンドレルの打込みと、排除型の杭の打込みとは軟弱地盤に対して同じ

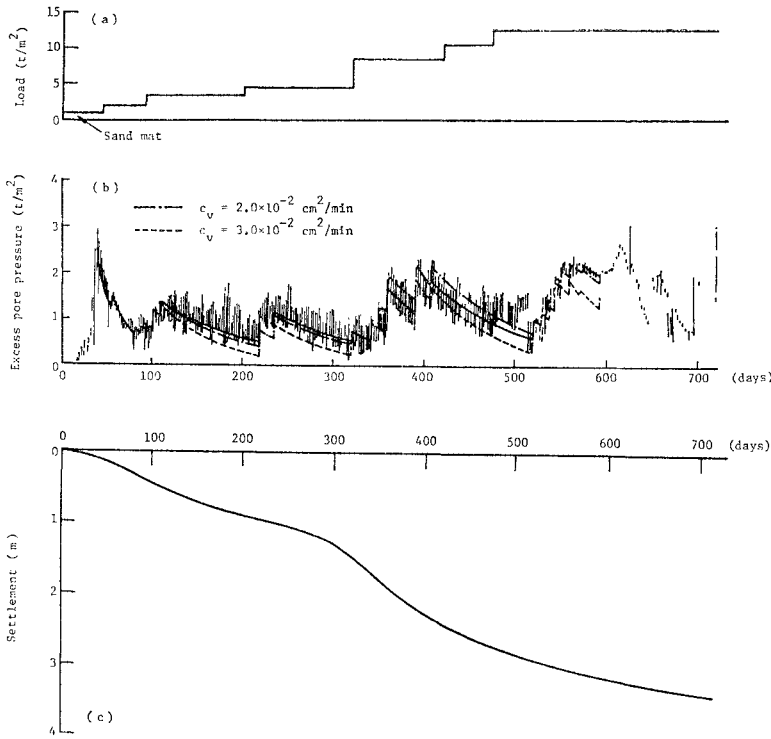
効果を及ぼすものとする。飽和粘性土は杭の打込みに対して非圧縮的に挙動し、一部は地表面の隆起として、残りは側方への移動として排除されるが、同時に打込み地点周辺の間隙水圧は大幅に上昇し、このように発生した過剰間隙水圧の消散が杭の打設による圧密現象⁵⁾であるとするとするものである。砂柱と杭との唯一の相違は、地盤土との境界における排水条件であり、後者がそれを不透水性とするのに対し、前者では透水性境界面とみなしている。

ここで、砂柱打設時の地盤の圧密の考察に役立つと思われる現地での実測記録を検討しよう。前述のように、この種のデータはきわめて限られているが、中瀬・小林⁶⁾により報告された錦海湾干拓堤防の基礎地盤のサンドドレーン施工実績を引用しよう。この工事は、岡山県錦海湾に塩田を造成するにあたって、湾口約2 kmを締切る干拓堤防の基礎の軟弱粘土地盤にサンドドレーンを打設したものである。このサンドドレーンの目的は、比較的小さい堤防(堤高3.5 m, 押え盛土部分を除く本堤幅約15 m)を短期間に完成するために、軟弱地盤を構成する粘土のせん断強度を急速に増大させることであった。

土質や施工条件などの詳細は原文献によるとして、本堤下部のサンドドレーン施工部分における過剰間隙水圧の測定結果と、基礎地盤の沈下記録の一例が図-1である。測定された過剰間隙水圧は潮位に対して1~2時間遅れた変動を示したが、この図の鉛直線群は1日における測定値の範囲を示したものである。

図において、最初に現れる大きな水圧(最大約3.0 t/m²)はサンドドレーンの打込みによるものである。この時期における載荷重は、敷砂によるものだけにすぎない。ドレーン打設による水圧は、その後の盛土荷重のもとのものに比べて消散が速い。打設によって海底面が10 cm程度盛り上がり、打設位置も側方にかなり移動したことが認められている。なお、ドレーン施工区域から

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科



図一 サンドドレーン施工区域での過剰間隙水圧と沈下の挙動
(中瀬・小林⁶⁾の好意による)

20 m 外側の無荷重区域のピエゾメーターでは、砂柱打込みの影響はみられず、過剰間隙水圧の発生も認められていない。

3. 砂柱打設による過剰間隙水圧と有効応力

軟弱地盤にサンドドレーンを打設するときの圧密に関しては、第1にマンドレルの打込みという動的な衝撃応力の効果、第2に砂柱土による地盤土の排除の影響が考えられる。

衝撃応力の効果は、単発のパルスによる地中発生応力によるものと考えられる。粘性土中の波動伝播には、これに減衰を考慮しなければならないが、この減衰は伝播距離により波高を低くするとともに波速をも減少させる。図-2はこの様子を模式的に示したものである。この図で距離による減衰はもちろん有限波速で生ずるとはいえ、これは後に続く間隙水圧の消散に比べるとけた違いに速いから、図のようなスパイクパルスが砂柱打設の瞬間に粘土層内に発生しているとみなすことができる。

このような初期過剰水圧面は、砂柱打設という瞬間的な衝撃により出現した一過性のものであ

り、たとえ打撃が次々と繰り返されるにしても、通常の盛土荷重の際のように圧密期間中作用し続けるものではない。たとえていえば、盛土荷重を途中で除去したのと同じことである。その除荷の様相は各位置によって先の図のように異なるが、これを永久荷重のように考えるのは誤りである。

したがって、サンドドレーン打設における間隙水圧の消散が速いといっても、消散分だけ有効応力の増加となっているのでないことに注意せねばならない。すなわち先述のように、この場合は全応力そのものが一定(ステップ状)ではなく、非常に短い有限時間だけ一定(または等価スパイク状)となるからである。つまり、このときの問題を正確に解くには、この等価スパイク応力をドレーンからの異なる距離ごとの各点について推定し、その消散機構を数学的に解かねばならない。その際、全応力のピークは衝撃入力面からの距離とともに指数的に減少し、かつ各点では時間とともにまた指数的に減衰することがショックチューブを用いた粘性土中の波動伝播実験⁷⁾で明らかにされているが、単発の衝撃荷重のもとでは間隙水圧も全応力とほぼ同一の位相で消滅する⁸⁾。

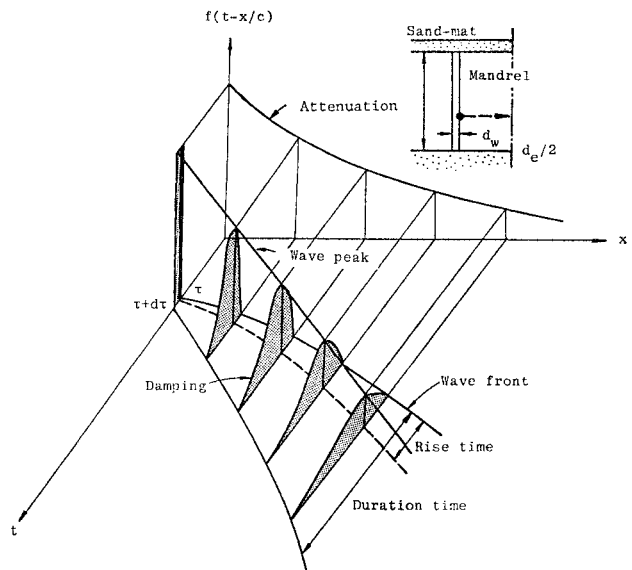


図-2 衝撃応力の地中伝播中の減衰特性

一般に、圧密は過剰間隙水圧の消散で生ずるのではなく、有効応力の増加で生ずることに注意せねばならない。すでに述べたように、砂柱打設時の地盤内全応力の発生は一過性で間隙水圧の消散も速いが、衝撃による有効応力の発生は大いに疑問視される。結局、

$$\sigma' = \sigma - u \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ' ：有効応力、 σ ：全応力、 u ：間隙水圧
という有効応力の原理は、 t を時間として、

$$\sigma'(t) = \sigma(t) - u(t) \dots\dots\dots (1)'$$

という意味であって、普通は全応力が一定 ($\sigma = \text{const.}$) と考えられる場合 (圧密試験のある荷重段階や現地での長期間の盛土載荷) を暗に認めて、 $u(t)$ の減少がそのまま $\sigma'(t)$ の増加と考えることになるのである。杭打ちやサンドドレーンの打設では全応力は $\sigma = \sigma(t)$ であり、しかも杭の半径またはドレーンの半径を r_w 、等価有効半径を r_e とすると、

$$\left. \begin{array}{l} r = r_w \text{ において} \quad \sigma = \delta_\xi(t - \xi) \\ r_w < r < r_e \text{ において} \quad \sigma = \sigma(x)e^{-\alpha t} \end{array} \right\} \dots (2)$$

ここに、 $\delta_\xi(t - \xi)$ は Dirac の δ 関数、 $\sigma(x)$ は杭周からの距離 $x (= r - r_w)$ による応力の減少関数なる一過性のパルス (孤立パルスまたはスパイクパルス、図-2 参照) である。一例として杭周での孤立パルスをとると、全応力 σ は非常に短い期間に 0 に回復するが、間隙水圧 u は完全に消散しないうちに全応力とともに消滅してしまい、有効応力 σ' の増加はほとんど期待できないことになる*。

したがって、ドレーン打設による有効応力増加があるとすれば、それは衝撃応力とはまったく別の機構、すなわち砂柱設置による周辺粘性土の排除効果である。面積比から考えれば、排除による粘性土のひずみ ϵ は $1/n^2$ ($n = d_e/d_w = r_e/r_w$) となる。たとえば、サンドドレーンでよく用いられる $n=5$ のとき $\epsilon = 1/25 = 4\%$ 。元来、飽和土では、砂でも粘土でも脱水がない限り体積変化を生ずることができないから、マンドレル挿入直後は非排水 (等体積) 変位だけが生ずるのである。この変位はおもに水平方向であるが、一部鉛直上方にもあって、このため地表の隆起がみられる。サンドドレーンの打設は、ある間隔をおいて次々とマンドレルが挿入されるから、もしその挿入順序がある特定の方向に向かってだけであるなら、その方向に次々と水平ひずみが累積し、粘土層がかなり側方変位をして横に押されることになる。杭打ち工事でも、敷地の周辺から先に打設して中央部分を残

しておく杭が入らないことがよくあるが、これも側方変位がそこに累積するためである。サンドドレーン工法では、杭の代わりに砂柱があるので、排除というひずみを与えることにより粘土層内に全応力が発生し、これは非排水条件下ではただちに過剰間隙水圧になるが、砂柱での過剰間隙水圧が 0 であれば、これを排水境界として粘土層内の過剰水圧が消散することができる。サンドドレーン施工中に観測記録されている間隙水圧は、おそらくこの部分のものであろう。

それでは、この過剰水圧が消散してしまえば全部有効応力に転換し得るであろうか。答えは、この場合も全部ではなく、その一部が有効応力となるにすぎない。その理由は、砂柱打設に伴う衝撃と同じく、全応力が一定でないことによる (もちろん衝撃応力ほど急速には消滅しないが)。マンドレル挿入による土の排除という過程は、一種の定ひずみ条件を地盤に与えることになり、地盤内応力 (全応力) は当然応力緩和を伴う。この場合、拘束が緩くて粘性土が側方に移動できればほど応力緩和は大きくなる。現象を理想化して、もし 1本の砂柱についてその有効集水面積内だけにひずみが生ずるという定ひずみ条件をとれば、先述のように $\epsilon = 1/n^2$ であり、たとえば $n=5$ とすれば $\epsilon = 4\%$ に相当する応力緩和が生じて、時間とともに全応力が減少する。一例として、図-3 は飽和粘土の非排水応力緩和試験における有効応力経路を示したものであり、これは必ずしも砂柱打設時の周辺粘性土の伸張ひずみ条件をシミュレートするものではないが、これより $\epsilon = 4\%$ の一定ひずみのもので、

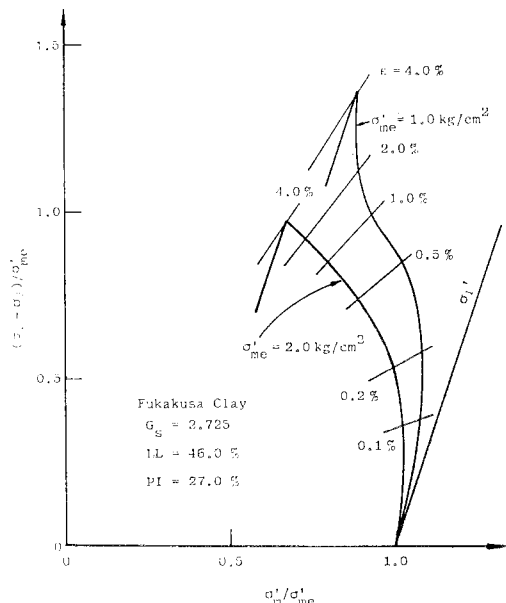


図-3 飽和粘土の非排水応力緩和試験における有効応力経路

* この意味で、飽和粘土地盤に対する動圧密 (dynamic consolidation; DC) 工法⁹⁾は理論的根拠がない。事実、最近の現地計測結果の報告^{10),11)}によれば、DC 工法は軟弱地盤上の砂質盛土の締固めには有効であったが、地下水面以下の粘土地盤の圧密促進にはなんら寄与するところがなかったと記述されている。

粘土供試体内の正規化されたせん断応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_{me}'$ (ただし、 σ_{me}' は有効圧密応力) が当初の値の約 75~80% にまで減少することがわかる。

このような全応力の時間的推移のもとにおける粘土層内過剰間隙水圧の消散は、もちろん全応力一定の場合よりすみやかである。図—1 に示されたような現地の間隙水圧計測記録において、後に続く一定高さの盛土載荷時の記録に比べて間隙水圧消散が速いのはこのためであると結論される。したがって、式 (1)' から明らかなように、基礎地盤の圧密沈下や強度増加に役立つ有効応力の増加は過剰水圧の消散分全部ではなく、それから全応力の減少分を差し引いたものとなる。

各地の盛土試験における沈下計測記録の中で、載荷以前または載荷初期にみられる沈下がこのような砂柱打設時の過剰水圧の消散と有効応力の増大による場合が少なくないと考えられる。この意味から、サンドドレーンなどを施した地盤は、砂柱打設という工程によって、ある程度過圧密されているとみなさねばならない場合もあり、その後の地盤の圧密に及ぼすこの先行効果を無視することができない。

謝 辞：文献 6) より図の転載を許可された中瀬明男・小林正樹の両氏に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 室町忠彦・渡辺 進：圧密による軟弱地盤の改良効果，土と基礎，Vol. 20, No. 8, pp. 33~40, 1972.
- 2) 赤井浩一：バーチカルドレーンの圧密機構について（ノート），土木学会論文報告集，No. 277, pp. 137~140, 1978.
- 3) Akagi, T. : Effect of Mandrel-driven Sand Drains on Strength, Proc. 9th Intern. Conf. SMFE, Vol. 1, 1-1, 1977.
- 4) 赤木俊允：排除型砂杭の打設による圧密，土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集，III-104, pp. 187~188, 1977.
- 5) Soderberg, L.O. : Consolidation Theory Applied to Foundation Pile Time Effects, Geotechnique, Vol. 12, No. 3, pp. 217~225, 1962.
- 6) 中瀬明男・小林正樹：圧密による軟弱地盤の改良効果，土と基礎，Vol. 20, No. 8, pp. 19~24, 1972.
- 7) Akai, K., M. Hori and T. Shimogami : Study on Stress Wave Propagation through Saturated Cohesive Soils by Means of Triaxial Shock Tube, 土木学会論文報告集，No. 228, pp. 99~108, 1974.
- 8) 赤井浩一・岡二三生：SHOCK TUBE による土中の波動伝播に関する研究（その 3），第 11 回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 371~374, 1976.
- 9) 森 博：衝撃力による地盤改良方法について，土と基礎，Vol. 23, No. 9, pp. 47~54, 1975.
- 10) Choa, V. et al. : Compaction of Sand Fill at Changi Airport, Proc. 6 ARC SMFE, Vol. 1, pp. 137~140, 1979.
- 11) Choa, V. et al. : Pilot Test for Soil Stabilisation at Changi Airport, Proc. 6 ARC SMFE, Vol. 1, pp. 141~144, 1979.

(1979. 8. 27・受付)