

経済的なサンドコンパクションパイル工法的设计について

Economical Design for the Sand Compaction Pile (SCP) Method to Improve Soft Soil Ground

梅木康之*・白石 悟**・金子英久***

UMEKI Yasuyuki, SHIRAIISHI Satoru and KANEKO Hidehisa

* (財) 沿岸技術研究センター 企画部 研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

*** 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 先任建設管理官

A Sand Compaction Pile (SCP) method has been widely used for soil improvement in Japan. In order to respond to the demand of society for the reduction of the public investment, a new economical design for SCP method is required. As one of the means of solving, a decrease in the improvement volume is proposed. The present paper describes the analytical results of the settlement of the proposed SCP section as a structure, and points to which special attention should be paid in the design of it.

Key Words : sand compaction pile, finite element method, alluvial clay

1. はじめに

従前より港湾施設の整備において、軟弱な海底粘性土の破壊・沈下対策にはサンドコンパクションパイル（以下、SCP と呼ぶ）工法が採用され、全国に多くの実績を残している。しかし一方では、公共投資の縮減が求められるようになり、改良断面の縮小が考案されてきている。

国土交通省近畿地方整備局では、改良断面を矩形から T 型に縮小した経済的 SCP 工法（以下、T 型 SCP 工法と呼ぶ）の開発が積極的に行われており、現地実証試験や設計手法の確立に向けた取り組みが進められている。（財）沿岸技術研究センターでは、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所より調査業務を受託し、学識経験者による「経済的地盤改良工法検討調査技術検討会」を設置し、T 型 SCP 工法での挙動特性ならびに設計の考え方等について検討を行った。本稿は、その検討成果の一部をまとめたものである。

2. T 型 SCP 工法の特徴

2.1 改良範囲の縮小

T 型 SCP 工法は、従来採用されてきた SCP 改良範囲である矩形断面（以下、従来型と呼ぶ）に対し、安定計算上、安全率が確保されると判断された袖下部を切除し、改良断面を T 型に縮小した工法である（図-1 参照）。改良範囲を縮小することで施工数量が軽減され、工費を安価に抑えることができる。

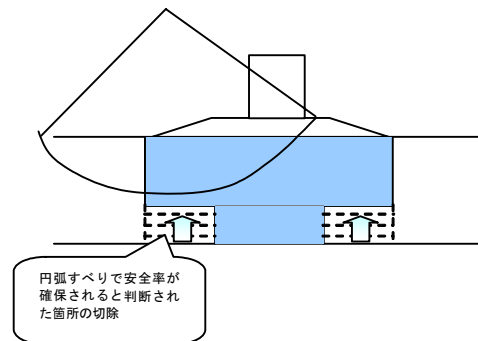


図-1 改良範囲の切除

2.2 発生応力およびひずみ分布

従来型と T 型のそれぞれについて、構造物が完成して 50 年後のせん断ひずみ γ_{max} の分布とせん断応力 τ_{max} の分布を FEM 解析（弾粘塑性解析）を用いて比較する（図-2、3 参照）。ここでは波力は考えないものとする。

従来型に比べ T 型の袖下未改良部でせん断ひずみ γ_{max} が顕著であるが、せん断剛性が小さいために、せん断応力 τ_{max} の分布図では大きな差異は見られない。

2.3 設計において配慮すべき点

T 型 SCP 工法において、改良範囲の縮小は円弧すべり計算のすべり面によって決めることとしている。これは、円弧すべり面下部の改良効果は円弧すべりの安全率にほとんど寄与しないとする考え方に基づいている。しかしながら改良断面を T 型にすることで、未改良域との接点が複雑になるなど、箇所によって複雑な変形が生ずることが予想されるため、改良地盤全体としての破壊メカニズムを解明した上で、これに留意した設計の考えが必要である。

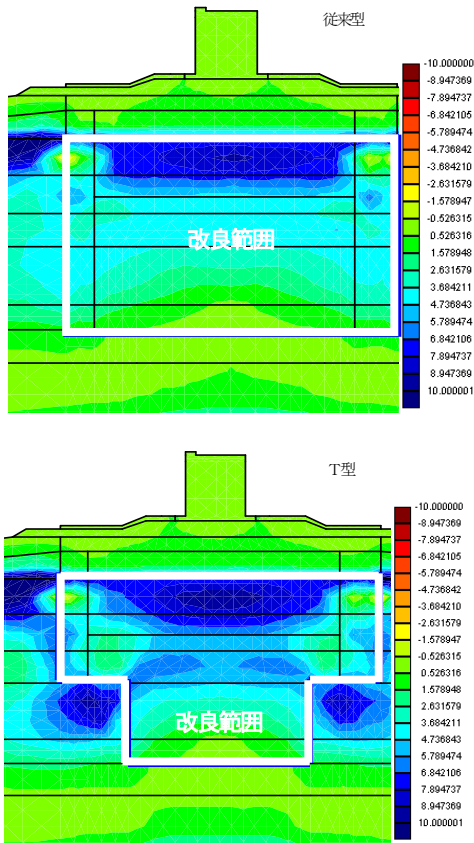


図-2 γ_{max} 分布図 (50年後)

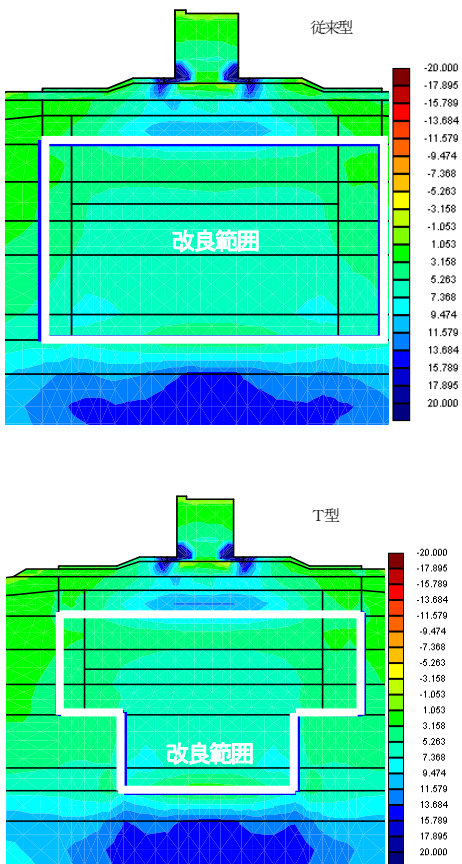


図-3 τ_{max} 分布図 (50年後)

3. SCP工法の設計の流れ

防波堤や護岸等の港湾施設を設計する場合、地盤の複合性と施工の影響に十分配慮しながら行うこと¹⁾としており、SCP工法においては砂杭および杭間強度、置換率や改良範囲等が適切に設定されなければならない。

矩形断面のSCP工法については、図-4に示すとおり設計手法が確立されている。

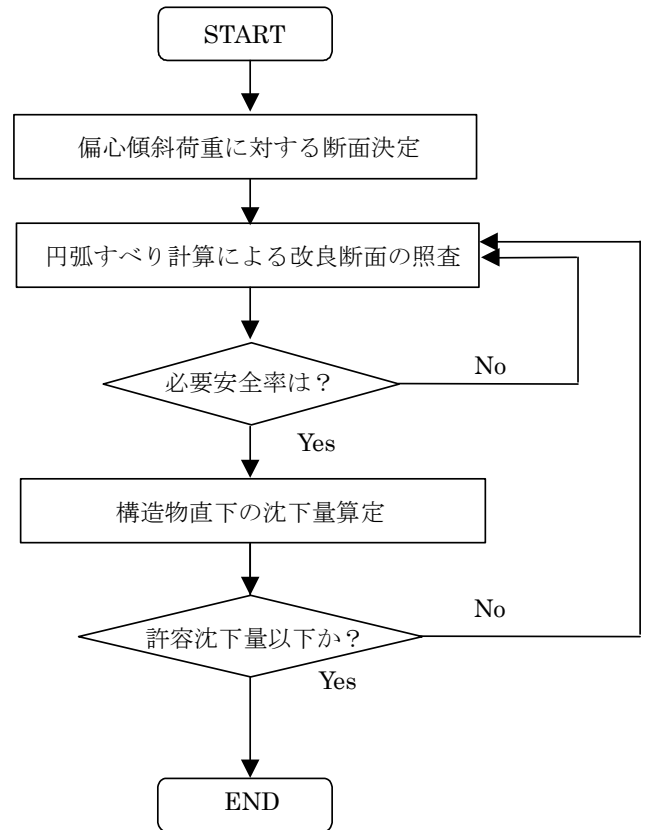


図-4 従来型 SCP 工法の設計フロー

T型SCP工法に関する設計手法については、今のところ確立されていない。ただし、基本的に矩形の改良域を決定した後にT型へ縮小するといった手順を踏むものと思われる。

T型SCP工法の採用に際しては、以下の点に留意した検討が必要である。

- ① 袖部および構造物天端の沈下挙動
- ② 改良範囲の切除によるT型と従来型の円弧すべり計算結果の相違
- ③ 沈下変形後の円弧すべり計算結果の把握

4. 現行設計法を適用した検討

4.1 概要

ここでは、T型SCP工法の採用に際して、現行設計法の適用性について述べる。ただしこの適用性について結論づけることは非常に難しく、多くの検討を重ねる必要がある。本稿では、そのうち円弧すべり計算および圧密沈下の2項目について、従来型とT型との結果の相違を比較し、現行設計法の適用性を考察する。

4.2 円弧すべり計算

(1) FEM解析と円弧すべりの比較

実際の施工断面を基本とした従来型と、それを縮小したT型(第2章参照)、及び改良率、改良幅、改良深度を変化させたケース²⁾について、弾塑性モデルによるFEM解析と円弧すべり計算(修正フェレニウス法)の安全率(F_s)を比較した。

FEM解析による安全率の算出方法は、
 $F_s = 1 / (\text{解析が収束する最大の強度低減率}^3) \tau_f / \tau_m$
 τ_f : せん断強度, τ_m : せん断応力
 とする考え方をを用いている。

表-1 FEM解析と円弧すべり計算の安全率の比較

ケース no.	安全率 F_s		
	FEM解析	円弧すべり計算	
		スライス法	応力分散法
T型	1.23	1.20	1.18
従来型	1.25		
ケース2	1.22	1.20	1.18
ケース3	1.22		
ケース4	1.27	1.25	1.24
ケース5	1.36	1.40	1.40
ケース6	1.27	1.25	1.23
ケース7	1.27		
ケース8	1.27		

表-1に示すように、FEM解析による安全率は円弧すべり計算のそれとほぼ同等である。

(2) スライス法と応力分散法

前項で用いた修正フェレニウス法(以下、ここではスライス法と呼ぶ)は、分割片間の鉛直面に作用する力の合力が分割片底辺と平行であると仮定する方法である。一方、地盤中の外力の分散を考慮しブシネスクの解よりすべり面上の鉛直応力を導き出す応力分散法という方法

もある。

代表的な2手法により求めた安全率は、前出の表-1に示すように、ほぼ同等の値が得られている。

(3) すべり面の比較

安全率に続き、FEM解析と円弧すべり計算(応力分散法)でのすべり面について、T型の断面を用いて比較した(図-5、図-6参照)。

FEM解析でのすべり面とは、降伏関数F(Mohr-Coulombの破壊基準)で降伏に至った部分(図-5 青色部)とする。比較の結果、降伏関数Fの分布に見られるすべり面は未改良部に向かう楔形となり、円弧すべりとは異なる形状を示した。

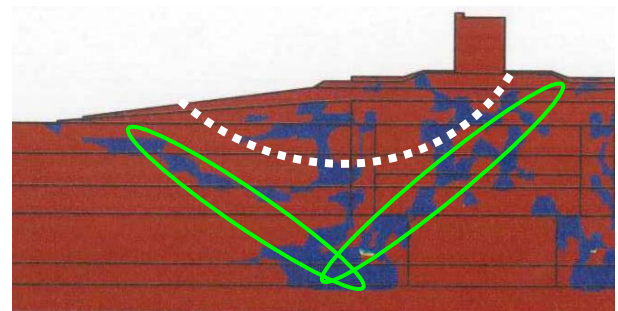


図-5 降伏関数Fの分布図

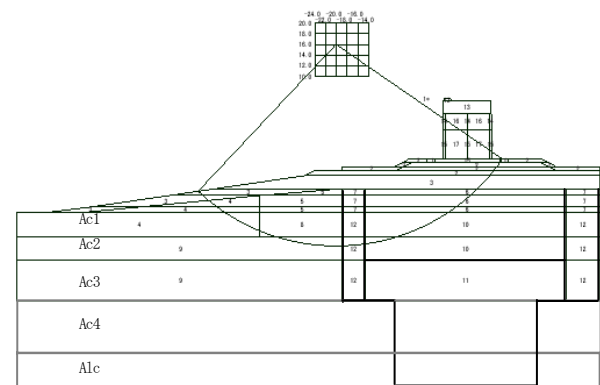


図-6 円弧すべり面

(4) 破壊特性

T型SCP工法の破壊特性について整理する。

図-2に示したように、最大せん断ひずみは未改良部である袖下部に卓越する傾向を示し、また降伏関数Fの分布(図-5参照)も同位置に発生した。これらによりT型SCP工法におけるせん断破壊は従来の改良域を切除した袖下未改良部に向かって発生するものと考えられる。

図-5、図-6で示したすべり面の形状の違いについては、円弧ですべる等の制約が無いFEM解析では、地盤の弱い

ところにひずみが大きく発生し、円弧とは一致しない形で地盤に降伏が生じたためである。

4.3 圧密沈下予測

(1) FEM解析と一次元圧密解析の比較

改良地盤について実挙動を精度良く再現できる FEM 解析（弾粘塑性解析：関口・太田モデル⁴⁾）と一次元圧密沈下計算（Mv 法、Cc 法及び Δe 法）の2手法を T 型の断面を対象に比較する。

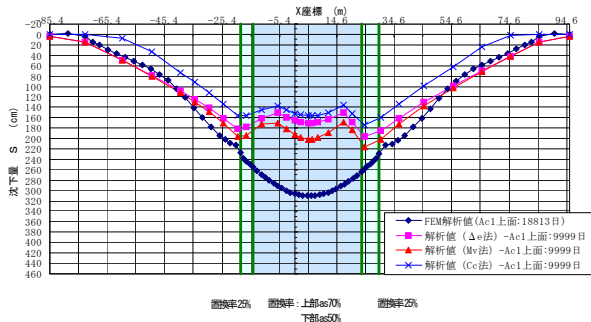


図-7 計算手法別最終沈下量の分布
(比較日数は解析プログラムの制限によるもの)

図-7 は、Ac 層上面(図-6 参照)の最終沈下量の分布を、計算手法別にまとめて示したものである。図によれば、FEM 解析は一次元圧密沈下計算より大きな沈下量を予測することとなった。また、FEM 解析ではケーソン直下の改良部中央の沈下量が最大値となり、かつ深度方向に凸型の沈下分布となるのに対し、一次元圧密計算では改良部、特に高置換率の箇所において沈下が抑制され、沈下分布も FEM 解析と異なっている。これは、FEM 解析では二次圧密の効果を考慮しているのに対し、一次元圧密計算では二次圧密を考慮できていないこと、沈下低減に影響を及ぼす沈下低減係数 β ($=1-as$) の設定方法によるものと考えられる。

(2) 沈下特性に関する設計手法として

T 型 SCP 改良地盤については、若干の過少評価となるものの、一次元圧密計算を用いることが可能と思われるが、構造物の側方まで沈下量が大きく発生する傾向が見受けられることから、袖部の沈下計算を行う等、より精度の高い予測が求められる。

5. 設計に関する留意事項

T 型 SCP 工法の設計時には破壊挙動に最新の注意を払う必要がある。破壊挙動を引き起こす要因として、施工時には改良断面を縮小していることによるせん断強度の不足、供用時には沈下に伴う断面変化による防波堤の安

定上の問題が挙げられる。

また経年的な沈下の発生も、T 型 SCP 工法において注意すべき点である。沈下の発生が著しい場合、天端高の不足といった機能上の問題が大きいと、設計時には十分検討する必要がある。今のところ、沈下量は従来型に比べて 10%程度増加という結果が得られており(図-8 参照)、適切に評価しておけば機能が著しく損なわれることはないと思われる。

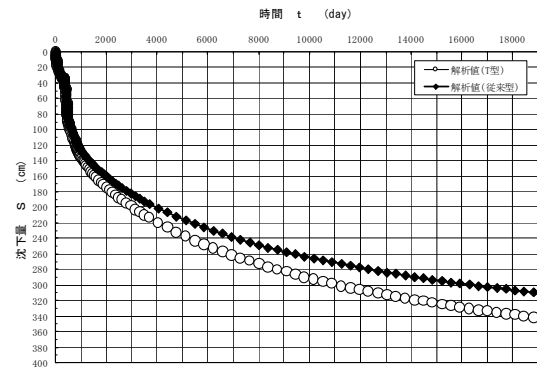


図-8 ケーソン天端沈下曲線

設計定数については、設計者の判断に負うところが少なくない。一方で設計定数の設定が、設計の結果に大きく影響を与える場合も多い。今後、設計事例について計測結果等をフィードバックさせることが、現行設計法の適用性や信頼性を向上させることに繋がるものと考えられる。

6. おわりに

本稿では、T 型 SCP 工法に対して現行設計法を適用する場合の着眼点・留意点を示した。今後はある程度の沈下を許容しつつ、構造物の機能を保持させる観点からライフサイクルコストの検討が必要である。

最後に本稿については、「経済的地盤改良工法検討調査技術検討会」(座長：田中泰雄 神戸大学都市安全研究センター教授)の委員ならびに関係者の方々から貴重なご助言を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1181p.，1999.
- 2) 石井 歩ほか：経済的な地盤改良工法検討調査，沿岸センター研究論文集，No. 1，pp. 21-24，2001.
- 3) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，港湾技術研究所報告，第 23 巻，第 1 号，pp. 83-101，1984.
- 4) 関口秀雄ほか：大水深護岸の変形解析，京都大学防災研究所年報，第 31 号，B-2，pp. 123-145，1988.