

経済的な地盤改良工法検討調査

Investigation of Economical Soil Improvement Method

石井 歩*・勝海 務**・秋山 敬吾***

ISHII, Ayumu and KATSUUMI, Tsutomu and AKIYAMA, keigo

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 研究員

** (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 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

The present paper summarizes the research works on economical soil improvement methods that have been done so far together with analytical investigations. Based on the preliminary study, it is intended to grasp soil mechanics characteristics for an improved foundation focusing on economical aspects. Finally, several points that should be taken into consideration at design stage are presented.

Key Words: sand compaction pile, finite element method,

1. はじめに

旧運輸省第三港湾建設局（現：国土交通省近畿地方整備局）では、平成9年3月に策定された「2001年に向けての技術開発～第三港湾建設局における港湾の技術開発5箇年計画～」の中の一つである経済的な地盤改良工法（サンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法））に関して、現地実験や解析等に積極的に取り組み、これまでに数多くの有用な成果を残している。最近では、神戸港の第八防波堤を対象に、T型断面のSCP改良工事を実施し、沈下を考慮した経済的な地盤改良工として新たな提案を行っている。

本調査は、経済的な地盤改良工法について既往成果を収集・整理するとともに解析的検討を実施し、地盤工学的な視点から経済的な改良地盤の挙動特性の把握を試みるとともに、これらの設計を行う上での留意事項について整理を行ったものである。

2. 文献収集・整理と事例調査

2.1 文献収集・整理結果

SCP改良地盤の設計手法について、既往の研究成果を収集・整理した。その結果、せん断抵抗力の考え方、応力分担比、砂杭のモデル化、改良強度の評価、強度低下と強度回復、過剰間隙水圧の発生機構などに関わる多くの研究がなされているが、今だ未解明な部分が多いことも明らかとなった。

次に、経済的なSCP工法に係わる文献について整理した結果、最近では未貫通SCP工法の研究が積極的に行われており、経済的SCP工法の特有の課題として以下の2点が抽出された。

①未貫通SCPの圧密挙動

②低置換および未貫通SCPの応力分担比

2.2 事例調査結果

SCP工法の設計および施工実績について全国の事例を調査した結果、改良体の断面形状または改良率の配置形状によって表-1, 2のように概ね整理することができる。

表-1 経済的SCP工法の改良体の断面形状

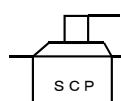
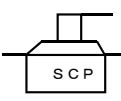
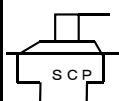
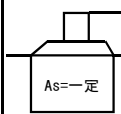
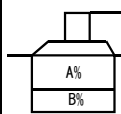
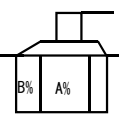
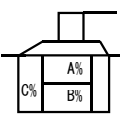
形式	全面着底型	全面非着底型	複合型
概念図	(一般型) 	(経済型) 	(経済型) 

表-2 経済的SCP工法の改良率の配置形状

形式	全面等改良率型	深度方向変化型	断面方向変化型	複合型
概念図				

3. 解析手法の適用性検証

FEM解析 (GeoFem) によるSCP改良地盤の適用性検証を目的として、舞鶴港防波堤における低置換SCP工法の現地破壊実験¹⁾を対象とし、解析シミュレーションを実施した。また、解析結果と実験結果を比較することにより、一般的なSCP改良地盤におけるFEM解析の適用性を検証した。なお、FEM解析プログラムは、実績が多く信頼性の高い旧運輸省港湾技術研究所で開発された「GeoFem」を用いることとした。

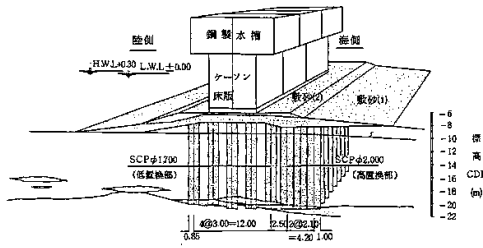


図-1 舞鶴港の標準断面図

表-3 解析ケース

ケース	解析モデル		内部摩擦角	
	粘性土	敷砂, SCP	敷砂	SCP
1	弾粘塑性	弾性体	37°	37°
2			37°	33°
3			37°	30°
4	弾塑性	弾塑性体	37°	37°
5			37°	30°

3.1 力学モデルの検証

(1) 圧密沈下挙動

粘性土を弾粘塑性体でモデル化したケース1～3における時間と沈下量の関係を図-2に示す。各ケースの解析結果は概ね実測値を表現できていることから、圧密挙動の影響が顕著な場合においては、粘性土層を弾粘塑性モデルで表現するのが妥当であると判断できる。

(2) せん断破壊

各ケースの荷重 p と沈下 S の関係を図-3に示す。いずれのケースにおいても、実測値のような急激な剛性低下による降伏点が表現できていない。しかしながら、図-4に示す通り、 $(\Delta S / \log t \sim p)$ 法により両者の関係を整理すると、弾塑性モデルを用いたケース4、5において急激な剛性低下による降伏点を確認することができる。

以上の検討結果に基づき、表-4に示す通り、着目する挙動によって土の構成モデルを使い分けることにより、精度の高い解析を行うことができるものと考えられる。

表-4 検討に用いる土の構成モデル

着目する挙動	土の構成モデル	本検討で用いたモデル
沈下	弾粘塑性モデル	関口・太田モデル
破壊	弾塑性モデル	モール・クーロン

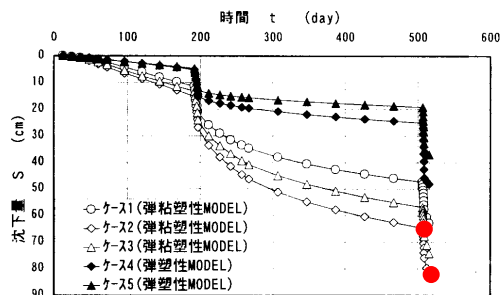


図-2 時間と沈下量の関係

3.2 円弧すべり計算結果との比較

舞鶴港の現地破壊実験では、砂杭と杭間粘土の応力分担比を円弧すべり計算法を用いた逆解析から求めており、この時の円弧すべり計算によるすべり面は、現地の破壊現象を良く再現できている。この円弧すべり計算結果とFEM解析結果との比較を行った。

(1) 現地破壊実験結果に基づくすべり面

舞鶴港の現地破壊実験において、降伏荷重によるすべり面を評価する目的で土質試験が実施され、更に地中変位計による計測も行われた。これより、変位計測結果と円弧すべり計算結果は概ね一致するという結果となった。

(2) FEM解析結果とのすべり面の比較

FEM解析の各ケースのうち、以下のケースを各構成モデルの代表として解析した結果、図-5に示す通り、弾塑性モデル（ケース5）ではせん断歪み分布図に現地破壊実験で想定されたすべり面と整合する結果が得られた。一方、弾粘塑性モデル（ケース1）による解析結果では、顕著なすべり面が想定される結果は得られなかった。

(3) 安全率の比較

現地実験での破壊時の安全率を1.0とした場合と比較して、二次元すべりとFEM解析結果は小さめの値を示すが、現地のすべり破壊現象が三次元的な円筒状すべり破壊であることを考慮すると、今回の二次元モデルの結果としては概ね良い値を示していると考えられる。

表-5 解析手法に基づく安全率

計算方法	安全率
二次元すべり	0.920
FEM解析	0.920
円筒すべり(側面抵抗を考慮)	0.981

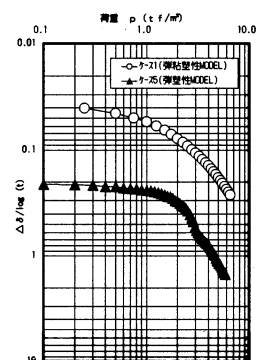
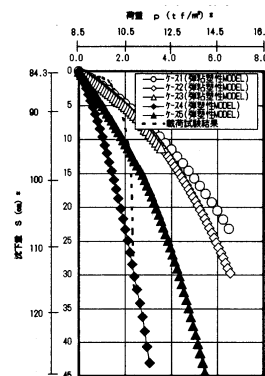


図-3 荷重と沈下量関係 図-4 $\Delta S / \log t$ と荷重 p 関係

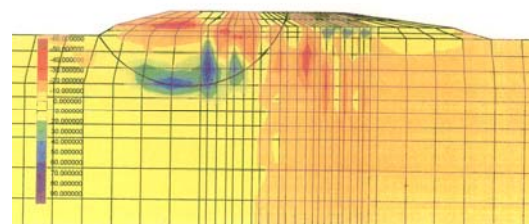


図-5 せん断歪み分布図

3.3 砂杭・粘土分離モデルと混合モデル比較検証

砂杭と杭間粘土の分離モデルと砂杭・粘土の地盤定数を混合したモデルの安全率の比較を行った結果、砂杭および杭間粘土の混合モデルは、分離モデルと概ね同等の安全率を示した。また、応力やひずみの分布図等も、混合モデルと分離モデルは良く似た結果となった。

従って、円弧すべり計算の安全率を評価する際、砂杭および杭間粘土の混合モデルで評価できると判断した。

4. 経済的SCP工法の挙動特性

4.1 計測データの整理・考察

神戸港第八防波堤においては、図-6 に示す通りのT型断面SCP改良による防波堤を施工し、沈下量、側方変位等の計測を実施している。以下、計測データ等に基づく、T型断面SCP工法の挙動特性について整理する。

神戸港第八防波堤の計測データにおいては、図-7 に示すようにSCP改良域周辺の未改良域にケーソン中心部付近よりも大きな沈下が局所的に発生している。この要因として以下の2点が推測される。

①SCP改良域では、計測の開始以前に圧密促進効果等である程度の沈下が進行したのに対し、改良域外では計測開始時において、沈下が進行していないため、計測開始後に見かけ上、大きな沈下が発生したように見える。

②SCP施工に伴う地盤の攪乱と過剰間隙水圧の発生があり、SCP改良域では早期に強度や体積膨張等の回復が行われるものの、無改良域では回復が遅れた状態で計測が開始され、計測後に大きな沈下が発生した。

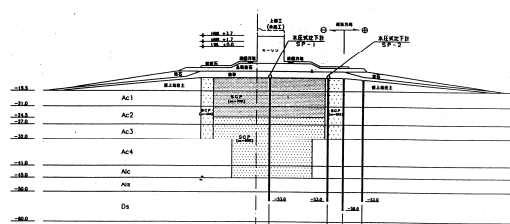


図-6 神戸港第八防波堤標準断面図

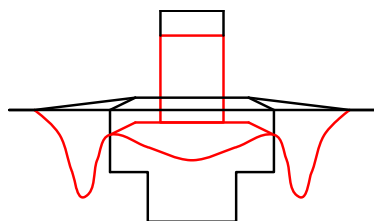


図-7 神戸第八防波堤の沈下状況概念図

4.2 経済的SCP工法の挙動特性

神戸港第八防波堤の断面を基本モデルとして、図-8 に

示すようにSCPの改良率、改良幅、改良深度をパラメータとするケーススタディを実施し、T型断面SCP工法の改良仕様に係る挙動特性の把握を試みた。各ケースの解析はFEM解析及び円弧すべり計算により実施した。また、解析モデルの内容を表-6 に示す。

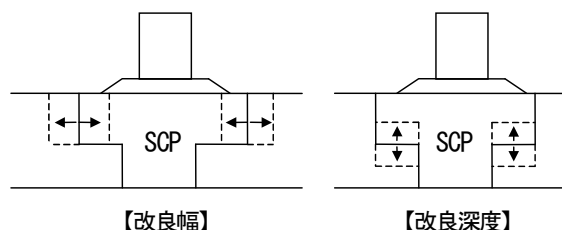


図-8 パラメトリックスタディのイメージ

表-6 各ケースの解析モデルの内容

ケースNo.	着底方式／改良形式	内 容
基本ケース	着底 / 経済 型	神戸港第八防波堤の設計断面
ケース1	着底 / 一般 型	円弧すべり計算上で不要となる改良域を復活させ、改良形状を矩形としたもの。
ケース2	非着底／ 経済 型	円弧すべり計算上で不要な改良域を無くしたまま、支持層に着底をさせてないもの。
ケース3	非着底／ 一般 型	円弧すべり計算上で不要な改良域を復活させ、支持層に着底をさせてないもの。
ケース4	着底 / 経済 型 (改良域拡幅1)	基本形の25%改良域を拡幅したもの。
ケース5	着底 / 経済 型 (改良域拡幅2)	基本形の25%改良域をケース4より更に拡幅したもの。
ケース6	着底 / 経済 型 (As=70%改良)	改良形状は基本形のままで、改良率を全てAs=70%としたもの。
ケース7	非着底／ 経済 型 (As=70%改良)	ケース6のモデルを支持層に着底させてないもの。
ケース8	着底 / 一般 型 (As=70%改良)	ケース6のモデルを円弧すべり計算上で不要な改良域を復活させ矩形としたもの。

(1) 圧密沈下挙動

各ケース(FEM解析結果)の50年後の圧密沈下量(防波堤天端部)を表-7 に示す。また、解析結果に基づく考察を以下に示す。

①支持層の非着底に対する影響

一般型形状及び経済型形状において、支持層に着底させないケースでは、着底させるケースに比べて、50年後の沈下量に大きな変化は見受けられないが、圧密の進行に若干の遅れが生じる傾向を示した。

②改良域を削減することによる影響

改良域を削減するケースでは、削減しないケースに比べて、圧密の進行に若干の遅れが生じる傾向を示した。

③改良率を低減することによる影響

改良率を下げるケースでは、50年後の沈下量が70～80cmほど増えることから、SCPの沈下低減効果は明らかに低下することが確認できた。

④改良幅を拡幅することによる影響

改良幅を拡幅しても50年後の沈下量に変化は無く、圧密促進効果および沈下低減効果への影響は殆ど見られない。なお、円弧すべり計算における必要安全率は各ケースとも満足している。

表-7 50年後の圧密沈下量と安全率

ケース	着底方式/改良形式	改良率	沈下量 (m)	安全率	
			FEM	FEM	円弧すべり
基本ケース	着底 / 経済型	複合 As=25% As=50% As=70%	3.54	1.30	1.19
ケース1	着底 / 一般型		3.52	1.39	
ケース2	非着底 / 経済型		3.51	1.32	
ケース3	非着底 / 一般型		3.47	1.34	
ケース4	着底 / 経済型	一様 As=70%	3.58	1.28	1.24
ケース5	着底 / 経済型		3.60	1.30	1.38
ケース6	着底 / 経済型		2.81	1.30	1.25
ケース7	非着底 / 経済型		2.76	1.33	
ケース8	着底 / 一般型		2.66	1.41	

(2) すべり破壊破壊挙動

パラメトリックスタディより得られた、FEM解析結果に基づくすべり破壊の安全率から、T型SCP工法のすべり破壊挙動について考察する。

①すべり面の位置

円弧すべり計算では、すべり面は円弧状であり表層からAc2層までを通る形となるが、FEM解析結果で想定されるすべり面はくさび状で改良域削減部を含むAc4層までを通過する形となる。一方、すべり面が地表面と交差する位置は両者において概ね一致する結果となった。

②支持層への着底に対する影響

一般型形状においては、支持層へ着底させないことにより僅かではあるが安全率が減少する傾向を示す。一方、経済型形状では、支持層へ着底させないことにより安全率が増加する傾向を示した。

③改良域を削減することによる影響

支持層へ着底させた場合においては、改良域を一部削減しT型形状にすることにより、安全率は明らかに減少する傾向を示す。一方、非着底型においても安全率は減少する傾向を示すものの、その減少は僅かであった。

④改良率を低減することによる影響

FEM解析においては、改良率を下げることによる安全率の減少傾向は見受けられるものの、その減少は非常に僅かとなる結果を示した。

⑤改良幅を拡幅することによる影響

必要な安全率を満足した状態で改良幅を拡幅したが、FEM解析での安全率は概ね変わらない結果を示した。一方、円弧すべり計算では、すべり面が改良域を拡幅する場所を通るため、この改良幅の拡幅によって安全率は大幅に上昇する。

(3) 設計手法の留意事項抽出

以上の結果から、経済的SCP工法を従来の円弧すべり計算手法により設計する場合、地盤全体の安定性を評価する点では大きな問題はないと推定される。ただし、支持層へ着底させた場合でT型形状などに改良域を削減する場合は、削減する場所の原地盤が十分な強度を有しているか、また、その削減する場所にすべり面が通過する可能性がないかなど、細心の注意を払って設計する必要があると考えられる。

5. 今後の課題

①FEM解析モデル

本調査では、圧密挙動については弾粘塑性モデル、極限状態については弾塑性モデルを用いるなど、目的に応じて土の構成モデルの使い分けを行う必要が生じた。従って、圧密挙動及び極限状態の解析を一連に行うことが可能なFEM解析モデルの開発が必要である。

②経済的SCP改良地盤の応力分担機構

経済的SCP改良地盤の特殊性（未貫通SCP杭であること、圧密沈下を許容するため沈下による影響が大きいこと、改良率が場所により変化すること等）を考慮した応力分担機構について土質調査などによる解明が必要である。

③神戸港第八防波堤に見られる地盤変状

神戸港第八防波堤の計測結果では、通常の一次元圧密理論に基づく計算では想定されない地盤変状（SCP改良域外周辺での大きな沈下）が発生している。これは、施工時における無改良域の地盤の攪乱による影響が一因であると推定している。この特異な地盤変状の発生機構について、土質調査などによる解明を試みる必要がある。

④経済的SCP工法の地震時の挙動

防波堤の場合には、荷重の偏心も少なく特に大きな問題とならないが、岸壁のように常に大きな偏心力が作用し、地震時において更に偏心状態が増幅されるような場合には、経済的SCP工法の地震時の安定性について十分な検討が必要である。

⑤FEM解析におけるすべり面

地盤の安全率を求めるケーススタディにおいては、円弧すべり計算とFEM解析で異なる位置にすべり面が現れた。従って、神戸港第八防波堤のように複雑な地盤構成や改良仕様を持つ場合のすべり面位置の妥当性については、遠心模型実験や現地破壊実験などによって十分に検証する必要がある。

6. おわりに

本報告は、「平成12年度 経済的地盤改良工法調査委託」（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）の成果の一部をとりまとめたものである。

最後に、本調査成果をまとめるにあたりご指導、ご協力を頂いた方々へ、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 複合地盤における非排水支持力に関する研究（浅岡顕・小高猛司・松尾稔），土木学会論文集，第408号／Ⅲ-19，1992.6.