

地盤改良の原理と新技術

Development of Ground Improvement Methods

菊 池 喜 昭 (きくち よしあき)

東京理科大学 教授 理工学部 土木工学科

1. はじめに

地盤にかかわる技術は、小手先では対応できず、原理原則に基づいた対応が必要であるものが多いと日頃から感じている。地盤改良に関する技術は特にそうではないかと思う。これまでの地盤改良の技術の特徴を極めて単純化して筆者なりに紹介し、これから期待される技術について考えてみたいと思う。

話題はどうしても港湾の技術に偏ってしまうと思うが、ご容赦いただきたい。

2. これまでの技術

地盤改良の技術といえば、古くは軟弱地盤対策技術であった。その後社会の要求が変化し、液状化対策のほか、人工地盤造成技術なども含まれるようになったと思われる。

2.1 置換工法

軟弱地盤対策技術として古くからあったものの1つに、床掘置換工法がある。これは海底にある軟弱粘性土地盤を必要箇所すべて取り除き、砂に置き換えるという技術である。たとえ緩い砂であっても正規圧密粘性土地盤に比べれば、圧縮性が小さく、せん断強度も大きいいため、防波堤や重力式の岸壁を建設するには必要な技術であった。

まだ大型機械が導入されていない頃、40 mに及ぶ粘性土層の表層5 m程度を床掘置換工法で施工した防波堤の断面を見たことがある。このような工法では長期的な沈下とそれに伴う不同沈下は免れない。今ならこういう施工はしないと思うが、当時は、たぶん、細心の注意を払ってこういった設計をし、施工をしたものと思われる。当時の技術者の判断に頭の下がる思いがした。

この工法には大きな弱点がある。大量に生じる乱された軟弱粘性土の処理である。また、床掘した粘性土の斜面は乱されており、床掘面の表面に攪乱された粘性土が堆積すること、海中に投入した砂が緩く堆積することなどが問題となる。特に、置換した砂が緩い状態で堆積するため、液状化に対しての対策が必要となるという問題がある。ただし、この工法が普及していた時代には、液状化対策工法が進んでいなかったこと、また、上に重量物が載る場合には、その下の地盤の液状化の可能性が低いことが言われていたため、液状化対策をせずに用いられていた。現在ではこのような考え方では設計、施工さ

れていない。

これらの問題点から、その後サンドコンパクションパイル工法（SCP工法）が置換工法として一般化した。SCP工法には砂質土地盤に対するものと粘性土地盤に対するものがある。SCP工法を置換工法と称するのは、粘性土地盤の高置換工法の場合である。粘性土地盤におけるSCP工法は、粘性土地盤に強制的に砂を押し込む工法であり、粘性土は短時間では体積変化を生じないと考えられるので、砂を強制的に押し込んだ分、粘性土が排除される。そういった意味でSCP工法は置換工法であるといえる。一般的な改良率は70～80％である。床掘置換工法との決定的な違いは、①砂の柱を強制的に作るため砂が緩い状態にはないこと、②押しのけられた分の排土が生じるが、それも原位置で有効に使う工夫がなされること、③短期的には周辺の粘性土地盤が乱されたままの状態になること、④基本的に柱状に砂を押し込むため、鉛直方向と水平方向で大きな異方性を有する地盤となることである。

SCP工法によって、8割が砂という地盤ができるため、水平方向からの荷重に対しても最終的な抵抗力は粘性土地盤の時よりも大きくなる。しかし、水平力を受ける杭の設計の時には注意が必要である。杭の設計で要求される地表面変位は地表面で数cm以下ということがよくある。このわずかな変位を問題にしようするとSCP工法による改良地盤が強い異方性を持っているということが如実に表れてしまうのである。

2.2 排水促進工法

粘性土地盤であれば、圧密促進工法ということになる。圧密を促進するためには排水距離を短くすることが必要、ということが基本原理である。排水距離を短くするには、通水性の高い材料（ドレーン材）を地中に埋め込むことになる。圧密を促進するには、排水距離を短くしたうえで、荷重をかけることが必要になる。荷重は盛土などの荷重をかけることのほかに、ドレーン部に負圧をかけることで荷重差を作る方法がある。

サンドドレーン工法の場合の一般的な改良率（全断面に対する砂の柱の面積率）は4％程度である。これが大きくなると原地盤の粘性土を乱すことになり、排水効果を低減させる原因となる。

圧密を促進させることに重点が置かれるので、ドレーン材が必要以上に強いのは好ましくない。例えば、固まってしまう材料を用いるのは適切ではない。固まってい

総 説

まうと上からの荷重がドレーン材に選択的に作用してしまい、ドレーン材間の粘性土の圧密が思うように進行しない場合が出てくるためである。

液状化対策としては、礫などの排水性の高い材料をドレーン材として用いる工法もある。

2.3 置換工法と排水促進工法の折衷工法

粘性土地盤で用いられる低置換率サンドコンパクション工法（低置換率 SCP 工法）がこれに当たる¹⁾。

地盤改良は原理に基づいたものが必要という観点からすると、置換工法と排水促進工法の利点を生かそうとすることによって、置換工法と排水促進工法の負の面を引き出すことになりかねない。置換工法としての SCP 工法の特徴として強い異方性がある。低置換率 SCP 工法では、SCP の間に粘性土が残ることになり、また、鉛直荷重が主として SCP に作用することになる。この結果、粘性土の圧密はあまり進まないことになる。そして、砂の柱が柔らかい粘性土の間に立っていることになり、水平方向の抵抗性が小さいという結果をもたらす可能性が生じる。

また、SCP 工法であるため、SCP は周辺粘性土を排除することで施工される。つまり、粘性土を乱す工法である。このことによって、周辺粘性土の圧密係数が低下し圧密促進工法としての特徴が生かされにくい状況が起こりかねない。

2.4 締め固め工法

粘性土地盤では締め固め工法は基本的に適用されない。砂質土地盤では締め固め工法が適用される。締め固めることで密度を上げ、圧縮性を小さくする、せん断抵抗を高める、そして液状化抵抗を高めることが目的といえる。

締め固める際には、振動が生じたり、地盤に強制的に地盤材料を押し込んだりするため、周辺地盤に何らかの影響を与える。従来からこのような問題を解決するための技術開発がなされてきている。

2.5 固化工法

地盤にセメントや石灰を混ぜることで固める工法ということになる。地盤工学における固化工法で期待される改良土のせん断強度はコンクリートよりもはるかに小さいことが特徴である。条件によって要求される圧縮強さは変わると考えられるが、一般的にコンクリートの強度の 1/50~1/200 程度であると思われる。また、セメント改良土の場合、セメント量に対する水の量が多いことが特徴である。

土を固めて利用することは三和土にみられるように古くから行われていた。その技術を深層混合処理工法（DM 工法）として現代化したことが固化工法の普及につながったのではないと思う。DM 工法は、改良体の配置から、ブロック式、壁式、柱式に分類される。ブロック式、壁式といっても施工時には、ロッドを挿入し、柱状の改良体を作るところは共通している。柱状体を作ることから、異方性を持つ地盤を作ることになるのは、粘性土地盤における高置換の SCP 工法と共通である。さらに、DM 工法では、柱状の改良体が強度を持つこと

から、周辺粘性土の強度増加がほとんど期待できないことになる。ブロック状や格子状改良ではこのことを考えて、改良体だけで十分な抵抗を発揮するように考えられている。

薬液注入工法も固化工法の一部といえると思う。固化材が十分にいきわたっているか、どの範囲に固化体ができているかを確認することが重要であると思う。

その後、流動化処理土やハイグレードソイル、事前混合処理土、FCB、SGM、管中混合処理土のように、プラントなど地上でセメントと地盤材料を混合して固化処理する技術が普及した。これらの技術開発が進んだのは DM 工法の技術と実績による影響が大きかったように思う。母材となる地盤材料が粘性土の場合、セメントと混合しようとする、流動性を確保する必要があるため、粘性土の含水比を高くすることが一般に行われる。セメントを混ぜるとその後ほとんど体積変化せずに固化するため、非常に間隙比の大きな地盤材料でかつ、十分なせん断強度を持つ地盤材料となる。このような地盤材料は構造物に作用する土圧の低減、圧密沈下量の低減に寄与する。

筆者も SGM 軽量土の開発に携わったが、出来上がったもののばらつき、施工中の材料分離、耐久性が大きな課題であった²⁾。

ばらつきを抑えるためには、配合設計と十分な攪拌が必要となる。特に、攪拌・混合については、均質な材料を作るための努力と工費の節減との二面からの注意が必要となる。工費を如何に抑えて、ばらつきの少ないものを作るかが重要である。

SGM 軽量土では、せん断強度の耐久性と材料密度の耐久性が問題となった。セメントで処理した粘性土の場合、体積収縮、強度低下の観点から乾燥は絶対に避けなければならない。その一方で、水中に放置された場合にも、水との接触によるセメントの溶脱、含有する気泡中の空気の水への置換などが懸念材料として残る。結果として、地盤中におかれた場合には、これらの劣化が著しく進行が遅いことが明らかとなった³⁾。現段階ではおおむね、劣化に対して大きな問題はないとされているが、その結論に至るにはそれなりの時間がかかった。いずれにせよ、新しい材料を開発した場合には、その耐久性が大きな問題となる。その大きな理由の 1 つに、促進試験を実施できないことがあげられると思う。

固化工法では、新材料も多く使われてきている。鉄鋼スラグには、固化する性質があるため、それを利用することが行われてきている。

高炉水砕スラグは当初は軽量地盤材料として用いられてきた。ただし、高炉水砕スラグを砂状の材料としてみた場合、軽量化しても設計上土圧低減に寄与せず、液状化対策としてもうまみのあるものではなかった。さらに、施工後の現地調査をしてみると、固化しているケースが多くあった。そのようなことから、固化させて利用することが検討された。

砂状の材料を固化することのメリットの 1 つは、液

状化抵抗の向上であろう。これまでのいくつかの研究の結果、一軸圧縮強さで100 kPa あれば、ほとんど液状化しない材料となることが知られている⁴⁾。

筆者は高炉水砕スラグについてもその条件が満たされると当初は考えていたが、実際に施工後の追跡調査を試みると、強度を発現するにはそれなりの時間を要することが分かった⁵⁾。そうすると、簡単には固化する材料として評価できなくなる。そのため、固化を促進する工法が検討された⁶⁾。

製鋼スラグについては、粘性土と混合することで固化することが知られている。これは画期的なアイデアであると思う⁷⁾。

3. これからの地盤改良に求められるもの

前章ではこれまでの技術を振り返りながら、地盤改良工法の基本原理について、筆者の感じていることを記した。基本原理には自由度はあまりないが、その技術の応用には無限の可能性があると思う。

今後、既設の施設の補強、補修のために地盤改良が必要となるケースが増えてくるものと思われる。以前に、既設構造物の液状化対策の検討に携わったことがあるが、その当時は、既設基礎の直下の地盤改良技術は不十分であったため、地盤改良工法の選択に大きく制限されたことがある。近年では、施工方法の開発が進み、基礎直下の改良も不可能ではなくなっている。

また、既存の施設の基礎周辺を地盤改良する際には、施工時にその地盤を攪乱したり、地盤改良によって強制的な変位や圧力を作用させてしまったりすることがある。地盤改良工事による周辺施設への影響をゼロにすることは不可能であると思うが、できるだけ影響を小さくする努力は今後とも必要であろう。

施工方法のほかに、用いる材料について今後さらにさまざまなものが出てくると思われる。力学的検討を十分にすることは必然であるが、副産物を用いる場合には、環境問題についても留意することが必要である。特に、長期的な影響について慎重に検討することは、実用化するうえでは必須の項目であると考えられる。

4. おわりに

技術開発には、「必要は発明の母」という側面と「発明が必要の母」という側面とがある。地盤改良技術の場合、主として「必要は発明の母」という局面が多かったと思う。しかし、「発明が必要の母」という側面も大事にしていきたいものである。

参 考 文 献

- 1) 寺師昌明・北詰昌樹：低置換率 SCP 工法により改良された粘性土地盤の支持力，港湾技術研究所報告，Vol. 29, No. 2, pp. 119～148, 1990.
- 2) 勸沿岸技術研究センター：港湾・空港における軽量処理土工法技術マニュアル（改訂版），371p., 2008.
- 3) 北詰昌樹・菊池喜昭：固化処理度の長期耐久性，基礎工，Vol. 39, No. 5, pp. 55～59, 2011.
- 4) 勸沿岸技術研究センター：事前混合処理土工法技術マニュアル（改訂版），p. 85, 2008.
- 5) Kikuchi, Y., Ikegami, M. and Yamazaki, H.: Field investigation on the property change of granulated blast furnace slag used for backfilling of quay wall, Proc. Int. Sym. on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, pp. 263～268, 2004.
- 6) 菊池喜昭・岡 祥司・水谷崇亮：高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討，港空研報告，Vol. 49, No. 2, pp. 21～46, 2010.
- 7) カルシア改質土研究会：カルシア改質土 設計・施工マニュアル，2014.

（原稿受理 2015.5.11）