

シェル型浸透固化処理工法

新しい注入形態

林 健太郎・秋 本 哲 平

溶液型恒久薬液を使用する浸透固化処理工法は、既設構造物直下地盤の液状化対策として、多くの実績のある工法である。しかしながら、締固めなどの一般的な地盤改良工法と比べて5～10倍ほど高価な工法である。今回開発したシェル型浸透固化は、薬液の使用量を2割削減することでコストダウンをはかる新しい注入形態である。今回、遠心載荷模型振動実験を行い、コストは2割下がったが、耐震効果は100%改良と同程度であることが確認された。

キーワード：砂地盤、滑走路、液状化対策、薬液注入、地盤改良

1. はじめに

2011年の東日本大震災の後で多くの耐震基準が見直され、より大きな地震動に対する安全性が求められるようになった。特に原子力施設などに関してはこれまでになく巨大な地震動に耐えられるように基準が変更されている。これらの方向性は正しいが、コスト面で考えると施工に係わる費用は莫大になっている。

本来、幅広く多くの構造物の耐震性を向上させるためには、既存の耐震工法の多くでコストダウンの試みが必要である。また、すべての構造物に原子力施設並みの耐震性が必要というものでもなく、構造物の目的に合ったコストバランスのとれた、いろいろなバリエーションの耐震性が求められる。

今回報告するシェル型浸透固化処理工法は、通常の浸透固化処理工法で使用する薬液量の8割の薬液を先行して注入し、後から2割の海水を注入することで、外側が硬く固結して、内側に未改良砂が残る改良体を作る方法である。いわば、できるだけ少ない材料を使いながら、耐震効果を最大にしようとする新しい地盤改良の試みである。

もともと浸透固化処理工法は、供用中の既設構造物の耐震対策として、20年前に開発され実績も多い地盤改良工法である¹⁾。地盤中の一点から低圧で薬液を注入することで、直径2m程度の球状の改良体を造成する方法である。既設構造物の耐震対策として実績も、効果もある反面、改良費は、通常の地盤改良の5～10倍程度高価な方法である。本方法が高価である一因は、使用する溶液型恒久薬液が高価で、多くの場

合、工費の半分以上を占める点である。工費を下げようとするれば、使用する薬液の量を減らすのが最も有効である。

「シェル型浸透固化処理工法」は、浸透注入すると薬液が球状に固まる性質、すなわち、後から注入した溶液は先行注入された溶液を追い越さないという性質を利用して、先に薬液を、後から海水を注入する方法である。本文では「シェル型改良」についての造成方法と実際に注入して作成した模型盛土地盤を用いて、遠心載荷装置による振動台実験を行い、盛土の地震時の沈下量に関する耐震効果についてとりまとめている。

2. シェル型改良の造成方法

粒径のそろった均質な砂地盤に土中の一点から薬液を注入すると、薬液は放射状に広がり、固化するまでの時間と注入が終了する時間を同じにすることで、球状固化体を造成することができる。実際には、この固結までの時間（ゲルタイムと呼ばれる）と注入するのに要する時間をほぼ同じにすることは容易なことではないが、薬液注入による地盤改良では改良品質に最も影響を与える要因である²⁾。実際に模型土槽や実地盤に注入にして造成された球状の改良地盤を写真—1、2に示す。

(1) 70%改良とシェル型改良

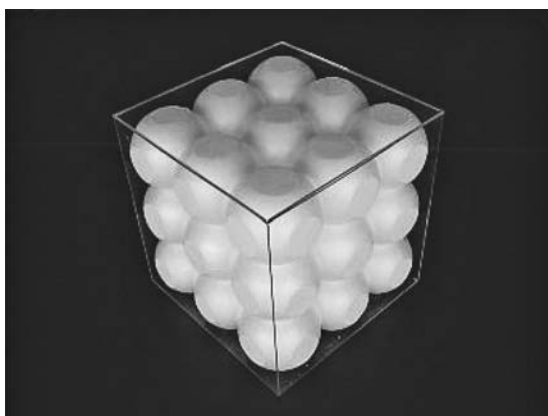
改良体が球状にできることから、通常の施工では、液状化が予想される範囲に対して、注入点を土中に等



写真—1 確認された改良体（模型注入実験）



写真—2 確認された改良体（松坂 2000）



写真—3 70%改良の出来形イメージ

間隔に配置し、一点が負担する体積に応じて、未改良部が残らない量の薬液を注入する³⁾。いわゆる 100% 改良である。このときに必要な薬液量を 1 として、7/10 の薬液を注入する方法が 70% 改良である。70% 改良時の出来形イメージを写真—3 に示す。

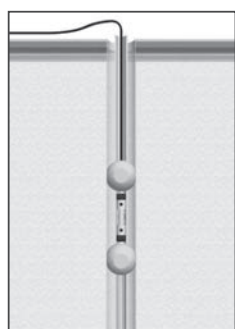
写真からも分かるように、改良体はお互いに連結しているが、未改良部も連続しているのが特徴的である。この方法は薬液注入対策工事の施工コストを下げる方策として有効であり、危険物保安協会による旧法タンク基礎の液状化対策の設計手法の一部に使用されている。

写真—1 から分かるように、球状に固結すると言うことは、先にも述べたように、先行して注入された薬液は、後から注入された薬液から追い越されることはないことを示している。シェル型改良は、この注入原理を利用して、先に薬液を、後から水または海水を注入することで造成される。

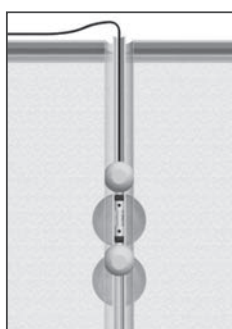
(2) 室内模型実験による造成

シェル型改良体の造成方法を図—1 に示す。通常の注入と同じように土中に注入ポイントを設置し、分担する空隙量の 7 割の薬液を注入したのち、配管を変え、3 割の水または海水を注入する。このときに薬液のゲルタイムを、水の注入が終わった時点と一致させることが重要である。

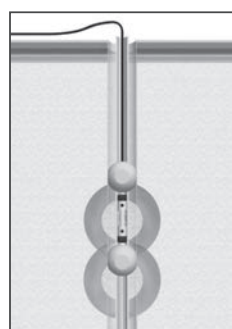
ドラム缶内に作った模擬地盤に薬液 7 リットルと水 3 リットルを注入して、作製したシェル型改良体と 7 リットルの薬液を注入して作製した通常の改良体を比較したものを写真—4 に示す。二つの改良体を比べると、どちらもほぼ球状であるが、同じ薬液量を注入したにもかかわらず、シェル型改良体は 1.4 倍ほど大きく固結しているのが分かる。このシェル型改良体を二つに切断し、中央部の未改良砂を洗い流したのが写真—5 である。写真から水も球状に薬液を押し出していることが分かる。



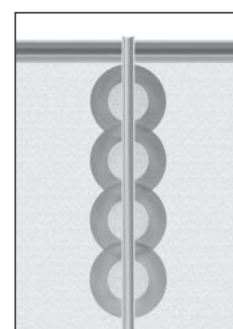
(1) 注入管配置



(2) 薬液注入(外殻)

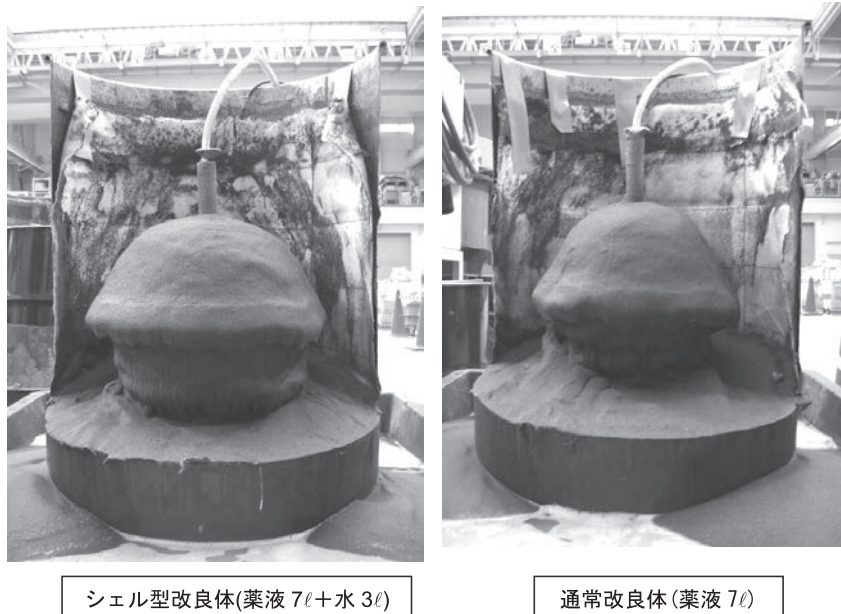


(3) 海水注入

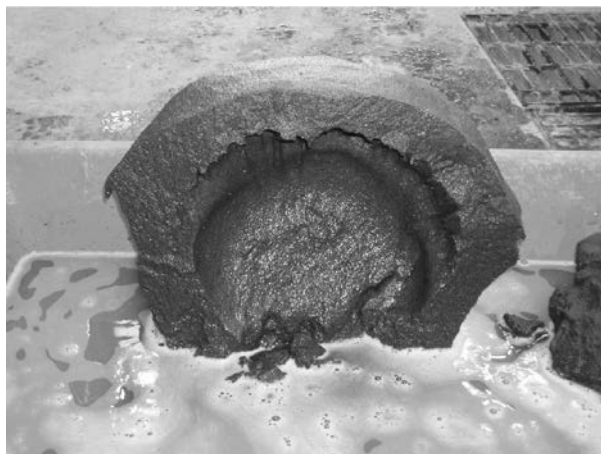


(4) 固化体完成

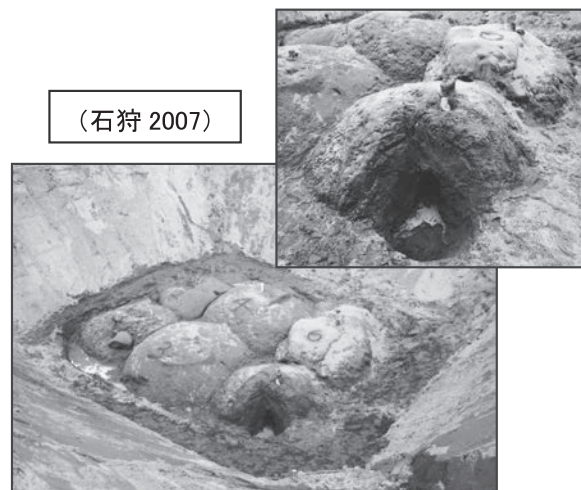
図—1 シェル型工法の施工方法



写真—4 模擬地盤注入実験の改良体の比較



写真—5 シェル型改良体（写真—4）固結部の断面形状

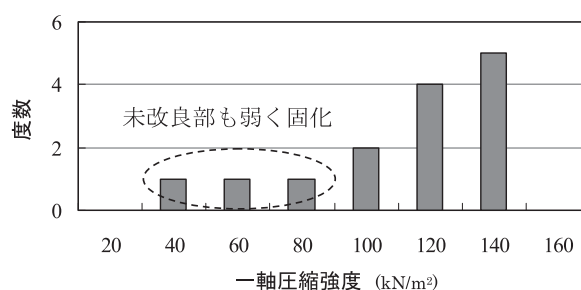


写真—6 確認されたシェル型改良体

(3) 現地実験による作製の検証

シェル型改良の実地盤への適用性を調査するため、2007年に石狩湾新港にて、現地注入実験を実施した。本実験では、シェル型の改良体を作成するために、1箇所あたり、942ℓの薬液を注入後、628ℓの海水を注入した（総注入量：1,570ℓ）。写真—6に改良体を掘り出した状況を示す。先行注入した薬液が固結して球状改良体の表面を形成し、直径1.9mのシェル型改良体が地盤中に造成されていることが確認された。

また、トリプルチューブによりシェル型固化体のサンプリングを行い、一軸圧縮試験により調査した結果を図—2に示す。得られた一軸圧縮強度は、当然ながら外殻部分と未改良の中央部で明確に異なった。外殻部では100 kN/m²を超える十分な強度が得られていたが、中央の未改良部においても、薬液が通過したことにより弱く固化的していることが確認された。



図—2 トリプルチューブ採取によるシェル型固化体の強度分布

3. 注入により造成されたシェル型改良地盤の遠心模型沈下実験について

(1) 注入による模型地盤の作製方法

今回の実験は、盛土が載ったシェル型改良地盤や100%薬液注入を行った地盤などに加振を行い、未改

良部分に液状化を発生させて沈下量を比較し、シェル型地盤の耐震性を評価しようというものである。

改良された地盤の耐震性を模型実験で確認する場合、模型改良地盤によく用いられるのは型枠等を使って地盤改良部分の模型を作成し、固結後、型枠を外して、模型地盤の中に埋め込んで作成する方法である。この方法を用いれば、ほぼ均一な改良地盤を作成することができる。深層混合処理工法などの均一な改良体であればこの作成方法が最適であることは理解できる。ただし、薬液注入後方に適用するには均一すぎるのが問題であると考えられた。

このため、今回の模型改良地盤は、実施工と同様に地盤内に薬液を注入することにより、一様ではない薬液改良地盤を作成している。実際には、地盤内に薬液を注入するための内径2mmのチューブによる注入口を10cm間隔に24箇所設置し、ゲルタイム≒注入時間と設定した薬液を注入することにより、薬液による改良地盤を作成した。

盛土材には貧配合の固化処理土を用い、飽和砂地盤にはケイ砂5号を使用した。実験ケースを表1に示す。無対策の飽和砂地盤のケース0のほか、改良地盤として、改良域の空隙に100%薬液を注入したケース1と80%注入のシェル型浸透固化改良のケース2およびDr90%まで締め固めた飽和砂地盤のケース3を実験の対象とした。

表1 実験ケース

実験ケース	改良方法	改良仕様	改良率
ケース0	無対策	無対策	0%
ケース1	浸透固化	100%改良	100%
ケース2	浸透固化	シェル型	80%
ケース3	締め固め	Dr90%	100%

模型縮尺は1/40、地震動としては、最大加速度250 galのSIN波30波を使用した。地震の実振動数は1.25 Hzを対象として、模型縮尺率1/40から、土槽には50 Hz、継続時間0.6 sを作用させた。

シェル型改良地盤の模型形状を図3に示す。盛土はプロトタイプで高さ2mを想定し、盛土材には貧配合の固化処理土を使用し、地表面付近には非液状化層として、1cm程度の不飽和地盤の薄い層を設けた。模型地盤内には、盛土中央と側部に水圧計と加速度計を設置した。

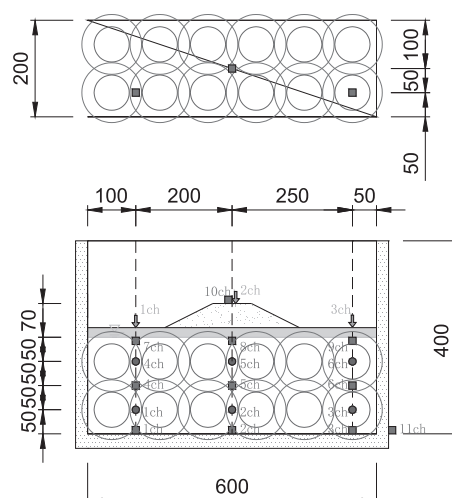


図3 シェル型改良地盤の模型形状

(2) 加振結果

加振後の各ケースの盛土天端と底面の沈下形状を図4に示す。ケース0の無対策では過剰間隙水圧比が100%まで上昇し、完全液状化が生じ、盛土天端にプロト換算で80 cmの沈下が生じた。100%改良とシェル型改良のケース2では、地盤内部の過剰間隙水圧の上昇は認められず、盛土の沈下量もほとんどなく、無

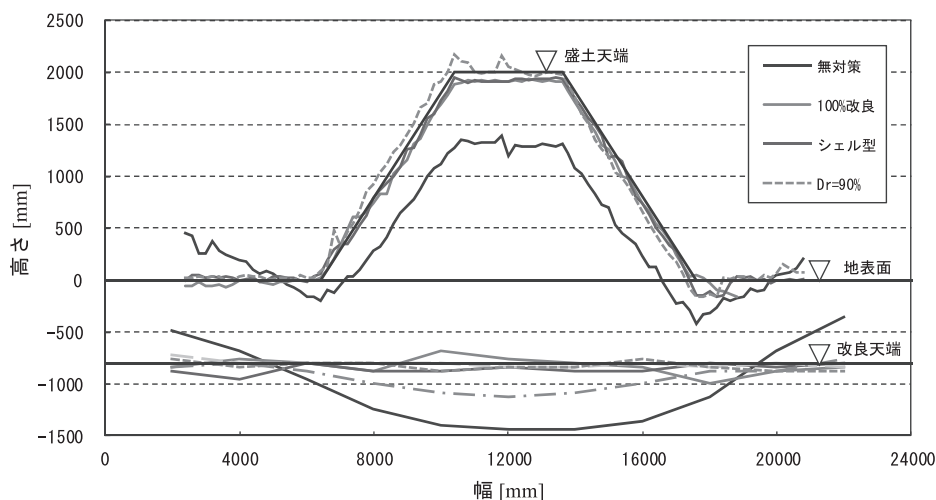
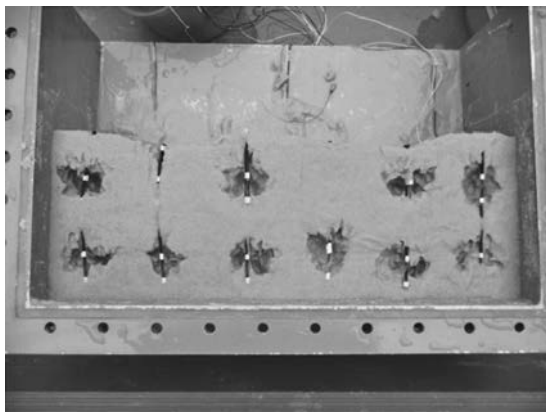


図4 加振後の沈下形状

対策飽和地盤（ケース0）の1/10程度となった。締固めのケース3では、盛土天端の沈下は殆どなく、過剰間隙水圧の上昇も認められなかった。

この結果から、90%まで締め固めたケース3が盛土の沈下を抑止するのに最も効果的であることがわかった。これに比べると薬液注入による改良地盤では若干の沈下が生じたが、シェル型改良も100%改良も盛土の沈下に関しては同程度の耐震効果があることがわかった。

加振終了後にシェル型地盤の解体を行い、ガラス面から数センチほど奥まで削り取り、未固結砂を水で洗い流して、シェル型の出来型形状を確認したものを写真一七に示す。これから分かるように、薬液注入によって作られたシェル型改良体では、注入口の周りから2 cm ほど不均一な形状の未固結の状態で存在していることが分かる。ただし、これらの未固結部の外側には連続して固結した部分がつながっており、盛土の荷重を伝えることができたことが分かる。



写真一七 解体されたシェル型改良地盤

4. おわりに

薬液を使った液状化対策の新しい改良形状であるシェル型改良に関して、現地注入実験、遠心載荷装置による盛土地盤の加振実験を実施し、現地での実現性や改良効果に関して確認を行った。この結果、対策が必要な全体を改良した100%改良の場合に比べ、80%のシェル型改良では、耐震性能に大きな差はなく、液状化による地盤沈下などの被害は100%改良の場合と同程度に防ぐことができることがわかった。薬液注入による液状化対策工事のコストの半分程度は薬液代であることを考えると、使用する薬液量を20%削減することで大きなコストダウンが期待される。すべての構造物に完全な液状化対策を実施している現状において、多少の変形を許すが致命的な変状を防止できる、安価な対策の必要性を感じている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 浸透固化処理工法技術マニュアル（2010版）：沿岸技術研究センター，平成22年6月
- 2) 溶液型薬液注入工法の施工管理方法に起因する改良土の強度低下のメカニズム，土木学会論文集C，林健太郎，山崎浩之，善功企，Vol70，No.4，387-394，2014
- 3) 旧法タンクの液状化対策工法に関する自主研究報告書（注入固化工法），危険物保安技術協会，平成12年3月

【筆者紹介】

林 健太郎（はやし けんたろう）
五洋建設技術研究所
副所長



秋本 哲平（あきもと てっぺい）
五洋建設技術研究所
土木技術開発部
係長

