

超音波振動を併用した薬液注入工法

UVG 工法

本 谷 洋 二

都市土木の掘削補助工として仮設的に用いられる薬液注入工法は、近年、建築物基礎地盤の液状化対策や土構造物等の耐震補強でも施工実績を伸ばしている。この工法では注入圧力によって構造物等に変状を生じることなく、効率的に広く良質な改良体を作ることが要求される。こうしたなか、従来には無い試みとして薬液注入工法に超音波振動を組み合わせた新しい工法を開発した。超音波振動併用注入装置を開発し実地盤において注入を行った結果、浸透性能の向上が確認できた。

キーワード：地盤改良，薬液注入，超音波，浸透性，液状化対策

1. はじめに

インフラや各種土木構造物は甚大な気象作用（巨大地震・台風・豪雨など）に直面しても簡単には崩壊しない粘り強い構造を持つことが望まれる。その対策として薬液注入工法は有効な手段の一つであり、いまま液状化対策や基礎地盤の補強を目的とした注入工事が各地で行われている。薬液注入工法は他の地盤改良工法に比べて簡易かつコンパクトで機動性が良く、騒音・振動が少ないため今後も需要は拡大していくものと思われる。今回開発した超音波振動を併用する新しい薬液注入工法も、こうした状況に適用できるものである。本稿では注入装置の開発およびそれを用いた実証実験について紹介する。

2. 超音波振動注入工法の概要

超音波振動注入工法（Ultrasonic Vibration Grouting, UVG 工法）（以下「本工法」という）は、従来型のダブルパッカ工法が持つノウハウと超音波振動が有する力学的特性を組み合わせた工法である。

（1）薬液注入工法の概要

薬液注入工法は任意に硬化時間が調節できる注入材料（薬液）を地中に設置した注入管を通して地盤中に圧入し、止水や地盤強化を図る地盤改良工法である¹⁾。主に砂質土を対象とした工法で、土の組織を変えることなく土粒子間隙に薬液が浸透固結することで地盤の遮水性（透水係数の低減）と地盤強化（粘着力の増加）

が確保できるものである。

この工法は一般に地下水の遮水と地盤崩壊の防止を目的として都市土木の仮設補助工に用いられている。いっぽうで近年は長期耐久薬液を用いて構造物基礎地盤の補強や護岸などの液状化対策でも数多く施工されている。

薬液注入工法の技術的課題として「浸透性」（「浸透距離」、「均等性」、「均質性」）と「注入速度」（「注入圧力」）が挙げられる。「浸透距離」が長ければ広範に効率的な改良が行える。また改良体が「均等」形状であれば（いびつでなければ）、所定の改良範囲内に未改良部の無い改良体配置が可能となり、マスとしての「均質性」によって強度などの要求性能が確保しやすい。いっぽう「注入速度」は速くできれば工期が短縮し工費が縮減できるが、「注入圧力」が高くなって割裂注入状態になる。その結果、改良地盤の「均質性」が損なわれてマスとしての性能評価ができなくなる。

従来、高い注入効果（品質）を期待する場合はダブルパッカ工法が選定されてきた。ダブルパッカ工法は「注入速度」を低く抑え、低い「注入圧力」で注入することで「浸透性」を向上させる工法とされるが、例えば浸透を阻害する細粒分などの目詰まりを防ぐ性能は有しておらず、「浸透距離」、「均等性」、さらには「注入速度」に課題が残る工法と言える。

（2）超音波振動の概要²⁾

（a）超音波とは

音は空気の振動である。その中で超音波とは周波数が 20 kHz（或いは 15 kHz）を超える不可聴音をいう。

(b) 超音波振動の利用

超音波振動は、①媒質が多様、②可聴音に比べて加速度が大きい、③強度が大きい、といった特徴を有しているため様々な分野で利用されている。小さな振動変位で高い音圧と強いパワー密度を持っているのでエネルギーとしても利用されている。

具体的な利用としては「通信的利用」、「動力的利用」、「電子回路素子」に分類できる。その中で「通信的利用」とはパルス状の超音波を水中や空中に放射し、反射（透過）してくる信号を計測するものである（魚群探知機、距離計測、非破壊検査など）。また「動力的利用」とは強力な超音波を収束させて直接機械を振動させたり、強力な超音波を水中に照射して発生するキャビテーションのエネルギーを利用したりするものなどがある（洗浄機、カッター、溶接など）。

土木分野における超音波の利用は、探査や計測といった「通信的利用」は見られるものの「動力的利用」についてはほとんど見られない。本工法は土木分野において超音波を動力的に利用するものである。

(c) 超音波を発生させる仕組み

音は物が振動することによって発生する。超音波の発生には電気エネルギーを振動エネルギーに変換する圧電セラミックスが広く用いられている。圧電セラミックスは酸化チタンなどの高純度な粉体を高温で焼き固めた多結晶性セラミックスで、外部から圧力を加えると電圧が発生し、また逆に電圧をかけると極性に応じて伸縮する性質がある（圧電効果）。この圧電セラミックスに電極を付けて 20 kHz 以上の交流電圧を印加すると圧電効果により振動し超音波が発生する。圧電効果のイメージを図-1²⁾に示す。

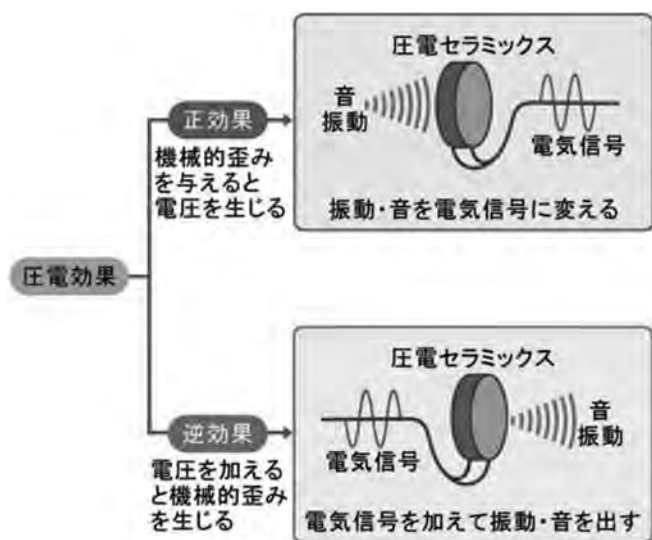


図-1 圧電効果のイメージ²⁾

(3) 超音波振動を付与した場合の注入効果

液体中に超音波を照射するとキャビテーションが発生する。また超音波には低周波ほど減衰率が小さく力学的なエネルギーが大きいという性質がある。以上のことから、薬液注入時に超音波振動を発生させると次のような現象が起こると考えられる。

- ①照射された超音波によって振動体近傍の注入外管（塩ビ管）が振動する。
- ②塩ビ管の振動および透過した超音波振動により近傍地山に緩み部を発生させ、大きな薬液の浸透源を形成する。
- ③薬液内に照査された超音波によってキャビテーションが発生し、衝撃波によって土粒子間隙の細粒分による目詰まりを防止する。
- ④振動を付与された薬液はエネルギーを得ることで浸透が加速される。

以上のプロセスによって浸透性能が向上すると考えられる。

3. 本工法用超音波振動注入装置の開発

(1) 試作機の開発

装置の開発にあたり、まず超音波振動の薬液浸透に及ぼす効果を簡易的に見るために、小型土槽内に振動体を挿入した塩ビ管をセットして薬液の拡散状況を確認する実験を行った。その結果、「振動あり」の薬液拡散距離は「振動無し」に比べて1.5倍程度伸びていることが確認され、超音波振動が薬液の広がりに寄与することが想定された。

次に実地盤での検証を行うため、既存の振動体を流用して試作機を作製した。

試作機は注入ホース先端に取り付ける先端注入装置と、それを駆動する発振器から成る。先端注入装置はいわゆる注入内管に相当するもので、シングルバックカーと振動体で構成される。先端注入装置の外観を写真-1および図-2に示す。いっぽうの発振器は地上に据え置いて使用するもので、地中の先端注入装置とは信号ケーブルで繋がっている。本工法注入装置は強力な超音波振動のエネルギーを得るために、大きな振動子を選定したことでサイズが大きくなった（全長 1,500 mm、最大外径 136 mm、質量 35 kg）。

(2) 本工法試作機を用いた実大の浸透試験³⁾

実地盤を対象に試作機で注入を実施した。対象地盤は GL-2.15 m ~ GL-4.80 m の砂質土層（ $N \leq 11$, $F_c = 16\%$ ）である。事前に VP150 の注入外管を地盤に設



写真一 1 本工法先端注入装置外観（試作機）



(ϕ :136, L:1500mm, w:35kg)

図一 2 本工法先端注入装置概略（試作機）

表一 1 本工法試作機の実大浸透実験ケース

実験ケース	Case 1	Case 2	Case 3
超音波振動	なし	あり	あり
対象土量 (m ³)	2.65	2.65	5.96
注入率 (%)	40.0	40.0	40.0
注入量 (L)	1,060	1,060	2,386

置し、そこに先端注入装置を挿入しパッカーを膨らませて位置固定することで浸透注入を行った。実験ケースを表一 1 に示す。施工後にサンプリングを実施して薬液の浸透状況を確認した。

この実験で得られた知見は以下のとおりである。

- ①振動を併用したケースの注入圧力は、併用しないケースに比較して若干低い傾向にある（併用ありでは 0.35 MPa、併用なしでは 0.40 MPa）。
- ②振動を併用しないケースでは地表面に薬液のリークが確認されたが、振動を併用したケースでは確認されなかった（全て地中に浸透した）。
- ③棒状サンプリング試料の薬液分布率（フェノールフタレインの噴霧で確認）では、振動を併用したケースが併用しないケースよりも最大で 30% 程度高い（薬液が多く存在する）。

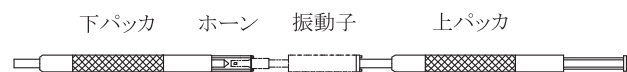
以上より超音波振動には薬液の浸透性能を向上させる効果があることが判った。

(3) 本工法実用機の開発

本工法試作機によって超音波振動による注入効果（浸透性能）は確認できたが、装置のサイズや質量が過大であり、そのままでは実用に供することはできない。したがって浸透性能を維持しつつ装置のサイズダウンを図り施工性を向上させるための開発を行った。小型振動子の適正化の結果できあがった本工法実用機（先端注入装置）の外観を写真一 2、図一 3 に示す。新しい先端注入装置は試作機に比べて 35 kg から



写真一 2 先端注入装置外観（実用機）



(ϕ :57, L:2000mm, w:15kg)

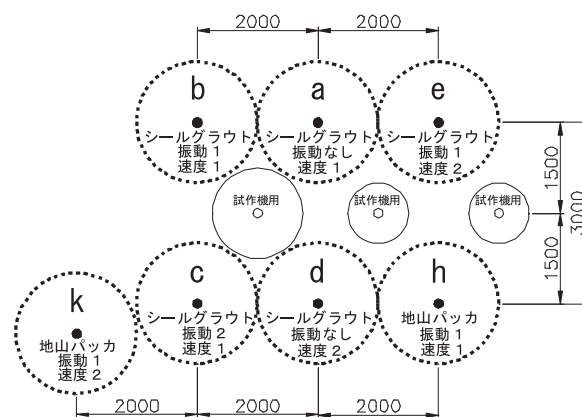
図一 3 本工法先端注入装置概略（実用機）

15 kg まで軽量化され人力による持ち運びが可能となった。また外径を 136 mm から 57 mm まで細くできたことで注入外管のサイズが VP150 から VP65 までダウンでき、より汎用的な削孔径（4～5 インチ）で施工できるようになった。パッカーもシングルからダブルに変更したことで、ステップアップ注入やステップダウン注入が自由に行えるようになり、特定の深度・土層を狙ったピンポイント注入が可能になった（ダブルパッカーになったため全長は 1,500 mm から 2,000 mm になった）。

この本工法実用機を用いて、実大実験の施工仕様や注入外管の仕様を検討するための大型水槽実験等を実施した。

4. 本工法実用機を用いた実大実験⁴⁾

新たに開発した本工法実用機の浸透性能および施工性の確認を目的として実地盤において注入実験を行った。注入対象地盤は GL-2.0 m ～ GL-4.0 m の砂質土層 ($N \leq 11$, $F_c = 16\%$) で、改良上端部が旧水田の底盤シルト層である。本実験では図一 4 に示すように注入管の仕様や注入速度、振動仕様の異なる 7 ケースで実験を行ったが、本稿では表一 2 に示すように単



図一 4 本工法実用機の実証実験ケース

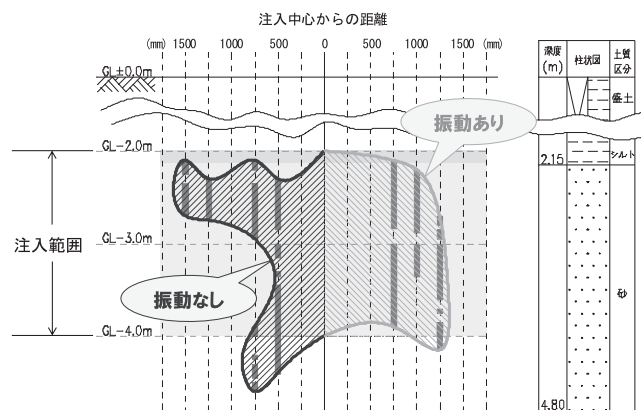
表一 2 本工法実用機による実験ケース

実験ケース		振動なし	振動あり
超音波振動		なし	あり
		—	20 kHz, 300 W
注入速度		6 ℓ/min	
注入材	一次	セメントベントナイト	
	二次	水ガラス系無機溶液型 (GT: 60 分)	
注入深度・改良長		GL-2.0 m ~ GL-4.0 m (L = 2.0 m)	
注入ステップ長		1 m/step (全 2 step)	
対象土量		2.0 m × 2.0 m × 2.0 m = 8.0 m ³	
注入率		40% (一次: 5%, 二次: 35%)	
計画注入量	一次	400 ℓ	400 ℓ
	二次	2,800 ℓ	2,800 ℓ
	計	3,200 ℓ	3,200 ℓ

純に同一条件のもとで実施した「振動あり」のケースと「振動無し」のケースを比較することで超音波振動の併用による改良効果を紹介するに留める。なお、超音波振動の付与方法については、平行して実施された室内透水試験の結果に基づいて設定した。また、施工後にサンプリングと現地掘削（改良体の掘り出し）を実施した。

図一 5 はサンプリング試料から想定した薬液の分布状況である。「振動あり」では薬液の分布が計画深度内で注入孔から 1,500 mm までの水平範囲内で大きな塊として存在していることが確認できた。一方で「振動なし」では浸透途中で薬液が重力により沈降したり、土圧の小さい上方へリークし、GL-2 m 付近のシルト盤直下を広く逸走したりといった状況が想定され、塊状の改良体ではないことが確認できた。実際に改良体を掘り出してみると「振動あり」では写真一 3 に示すように大きな塊状を成していることが確認された。

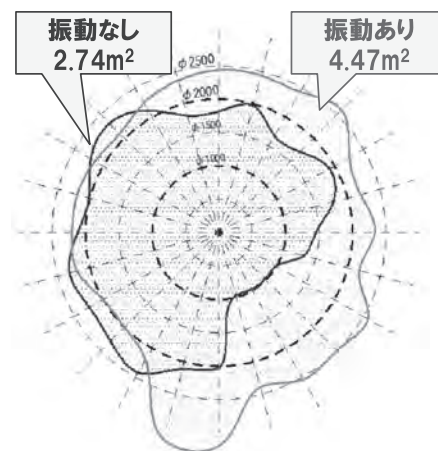
図一 6 は GL-3.5 m 付近の改良体形状比較である。「振動あり」は「振動なし」に比べて広く薬液が浸透しており、面積比で約 1.6 倍の違いがあることが判った。



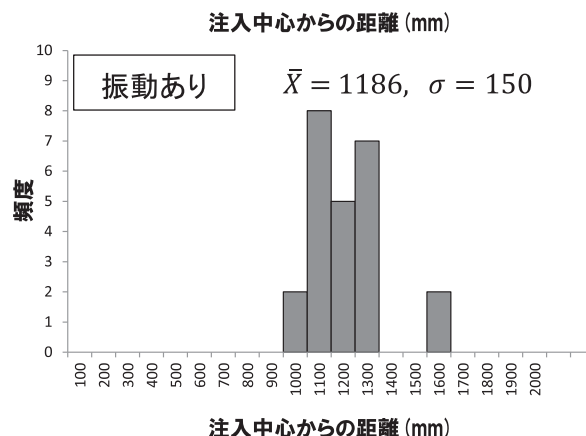
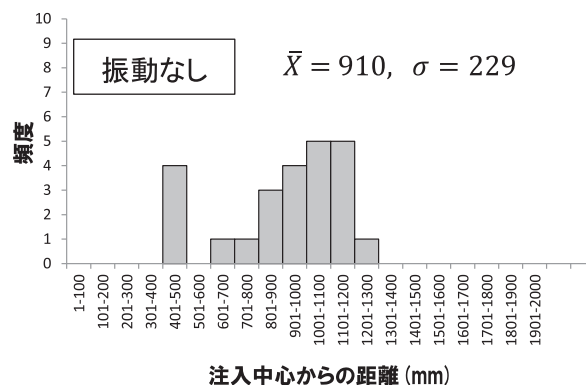
図一 5 薬液分布状況



写真一 3 改良体（振動あり）



図一 6 浸透形状



図一 7 浸透距離のヒストグラム

図—7は各ケースの注入孔から放射状に24方向への浸透距離を測定し、その値をヒストグラム化したものである。この図は超音波振動を付与することで浸透距離（平均値）が大きくなり、浸透距離のバラツキ（標準偏差）が小さくなることを示している。言い換えれば、超音波振動を付与することで薬液は比較的均等に浸透距離を拡大することが確認された。

注入圧力については、「振動あり」は「振動なし」に比べて若干低い傾向が見られた。

施工性については先端注入装置の取り扱いに多少の慎重さを要するものの、超音波の発生に特別な操作を必要としないため、通常のダブルパッカ工法とほぼ同等であったと考える。

以上をまとめると、薬液注入に超音波振動を併用することで、薬液が計画範囲内にマスとして分布し（均質性）、均等に浸透距離が拡大することが判った。また注入圧力が若干低かったことについては、注入速度を増大できる余地があることを示唆している。さらに施工性についてはダブルパッカ工法と同様の施工が行えることが確認できた。

5. おわりに

超音波振動を併用する新しい薬液注入工法を開発し、実用機を作製した。実大実験による検証の結果、本工法超音波振動注入工法（UVG工法）は従来工法と同様の施工性の中で、薬液の浸透性能を向上させた工法であることが確認できた。

今後は更なる施工性向上のために今以上の小型化が課題の一つである。また、注入速度の向上、細粒分含有率が比較的高い地盤への適用、浸透性能向上による注入率の適正化に取り組んでいきたい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 一般社団法人日本グラウト協会：薬液注入工 設計資料（平成29年度版）、2017
- 2) 本多電子(株)：超音波ハンドブック 聞こえない音の世界（第2版）、2008
- 3) 岡田ら：超音波振動を併用した薬液注入工法の開発（第1回現場実証実験）、第52回地盤工学研究発表会（名古屋）、pp.713-714、2017
- 4) 本谷ら：超音波振動を併用した薬液注入工法の開発（第2回現場実証実験）、土木学会第72回年次学術講演会Ⅲ、pp.55-56、2017

【筆者紹介】

本谷 洋二（ほんたに ようじ）
三信建設工業(株)
技術本部
課長

