

超音波振動による薬液注入工法の最適化

(株)人材開発支援機構 正会員 ○野口 好夫
 名古屋工業大学 国際会員 森河 由紀弘
 東陽工業(株) 石田 明人
 三信建設工業(株) 正会員 本谷 洋二
 東興ジオテック(株) 正会員 岡田 宙

1. はじめに

薬液等の流体を地盤内に浸透させた場合、地盤内部では浸透流により土粒子骨格を形成していない土粒子が移動して目詰まりを起こし、地盤の透水性が大きく低下することが確認されている。また、薬液の浸透時には削孔水などの泥水も連行されるため、注入源付近では細粒分膜が形成され、薬液の浸透が阻害される可能性もある。地盤の透水性が低下すると薬液の浸透範囲が低減したり、改良体の品質が低下したりするばかりか、注入外管付近からのリーク現象を発生し、薬液の浸透そのものが困難になる場合もある。ところで、超音波振動²⁾には液体や固体を激しく運動させる効果があり、超音波カッターやメガネなどの洗浄に使われている。そこで、本研究では従来からよく用いられているダブルパッカ工法に適用可能な超音波発生装置を開発し、超音波による目詰まりの解消効果や注入源の洗浄効果を室内試験によって検討した。さらに、実施工機を用いた現地実験も行い、超音波振動が改良範囲や改良体形状に及ぼす影響を検討した。

2. 目詰まりの解消効果に関する検討

2.1 実験概要

図-1 に実験状況を示す。本試験機は一般的な変水位透水試験機をベースに超音波振動発生装置や熱電対センサー、注入ホースなどが装着可能な専用ヘッドを新たに作成している。ここで、本試験機に装着されている超音波発生装置は超音波振動子と超音波振動を増幅する振動ホーンから構成されており、本多電子(株)社製のものを実施工機に装着可能なように改良した専用設計の装置である。超音波の周波数は20kHz、出力は300Wとなっている。また、本試験における振動ホーンの表面から供試体面(注入源)までの距離は、実施工機における振動ホーンから注入外管表面までの距離に合わせ、30mm程度に設定した。



図-1 実験状況 (目詰まりの解消実験)

表-1 に実験ケース、表-2 に使用材料を示す。薬液注入工法は主に砂地盤を対象としているため、Case A では珪砂7号のみ、Case B では珪砂7号に藤森粘土を乾燥重量比で20%混合した供試体を用いた。供試体の直径は100mm、高さは127mmである。

表-1 実験ケース

実験ケース	注入圧力	締固め度 $D_c(\%)$	超音波発生時間 $t(\text{min})$
A(S)-10kPa	10kPa	94.3	60 - 120
A(S)-50kPa	50kPa		10 - 18
B(SF)-10kPa	10kPa	81.3	60 - 110

Optimization of chemical injection method using ultrasonic vibrator: Noguchi Yoshio (Human Resource Development Organization), Morikawa Yukihiro (Nagoya Institute of Technology), Ishida Akihito (Toyo Kogyo Corporation), Hontani Yoji (Sanshin Corporation), Okada Hiroshi (Toko Geotech Corporation)

Case A(S)-10kPa は珪砂 7 号のみを用いた供試体に注入圧力 10kPa 一定の条件で 120 分間透水を行い、超音波振動を 60 分後から 120 分後まで与えたケースである。

Case A(S)-50kPa は Case A(S)-10kPa と同一の供試体を用いて注入圧力 50kPa 一定の条件で透水を行い、超音波振動を 10 分後から 18 分後まで与えたケースである。ここで、Case A(S)-50kPa において超音波振動を与えるタイミングが Case A(S)-10kPa よりも早くなっているのは、注入タンクの容量と透水速度によるものである。Case B(SF)-10kPa は珪砂 7 号と藤森粘土の混合土を対象に注入圧力 10kPa 一定の条件で透水を行い、超音波振動を 60 分後から 110 分後まで与えたケースである。

ところで、本実験では超音波振動を供試体の上面から与えることによって供試体内部における目詰まりの解消を試みるが、超音波振動を直接供試体を与えることによって供試体上面が洗掘されると供試体の状態が大きく変わるため、安定した試験結果が得られないことが懸念された。そこで、本実験ではエポキシ樹脂と繊維材からなる粒子固定材を用いて供試体を作成し、土粒子骨格を形成している土粒子同士のみを固定して実験条件の単純化を行った。つまり、本実験においては浸透に伴う透水性の低下要因は土粒子骨格を形成していない未固化の自由粒子が引き起こす目詰まりによるものだと考えられる。ここで、粒子固定材は水分との混合が不可能であるため、供試体の作成には加水を行うことが出来なかった。よって、本実験で用いた供試体は最適含水比で締め固められておらず、特に珪砂 7 号に藤森粘土を 20% 混合した Case B(SF)-10kPa の供試体では締め固め度が低くなっていることが分かる。

表-2 使用材料

項目		珪砂 7 号	藤森粘土
土粒子の密度	ρ_s g/cm ³	2.686	2.717
礫分	%	0.0	0.0
砂分	%	94.7	6.1
細粒分	%	5.3	93.9
最大粒径	mm	9.5	0.850
均等係数	U_c	1.9	4.5
50%粒径	D_{50} mm	0.153	0.034
20%粒径	D_{20} mm	0.112	0.016
液性限界	w_L %	NP	43.5
塑性限界	w_P %	NP	29.7
塑性指数	I_p	NP	13.8
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}$ g/cm ³	1.537	1.442
最適含水比	w_{opt} %	17.9	24.8
透水係数	k_{15} m/s	6.48×10^{-5}	1.49×10^{-9}

2.2 実験結果

図-2 に Case A(S)-10kPa の実験結果を示す。本ケースは注入圧力 10kPa 一定で透水を行いながら、超音波振動 (20kHz, 300W) を 60 分後から 120 分後まで与えたケースである。ここで、(a)図は各時間における透水係数を初期透水係数で正規化した透水係数比を示し、(b)図は供試体上面での注入温度と供試体下面からの排水温度を示す。実験結果より、透水開始直後から供試体内部では浸透流に伴う自由粒子の目詰まりが発生し、透水を開始してから 60 分後には透水係数比が 0.36 程度まで低下

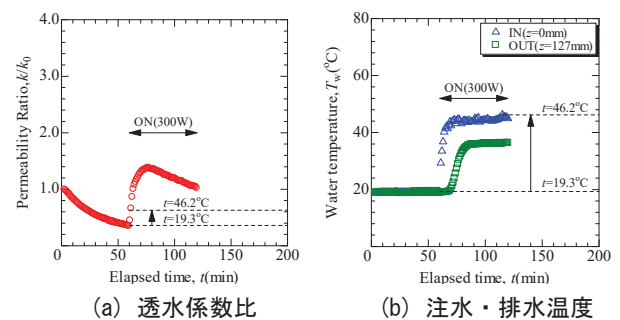


図-2 実験結果 (Case A(S)-10kPa)

していることが分かる。ところが、透水開始から 60 分後において超音波振動を与えるとすぐに透水係数比は大きく増加し、最大で超音波振動を与える直前の 3.78 倍 (透水開始直後の 1.38 倍) まで大きく増加した。また、超音波振動を増幅させる振動ホーンが激しく振動することにより、供試体上面における最大注入温度は 46.2°C、供試体下面から排水される最大排水温度は 36.4°C にまで上昇していることが分かる。ここで、超音波振動を与える直前における水温は 19.3°C であるため、水温が 19.3°C から 46.2°C に上昇した場合の透水性は水の粘性係数 ($\mu=0.00103$ Pa·s at 19°C, 0.000588 Pa·s at 46°C) から約 1.75 倍になると考えられる。しかし、実験結果では透水係数が最大 3.78 倍まで増加していることから、供試体に超音波振動を与えることによって流体温度の上昇に伴う透水性の増大効果に加え、目詰まりの解消効果も十分に得られていることが分かる。

図-3 に Case A(S)-50kPa の実験結果を示す。実験結果より、注入圧力が高い Case A(S)-50kPa においても注入圧力が低い Case A-10kPa と同様に超音波振動による透水性の改善効果が確認できた。ここで、Case A(S)-50kPa における注入温度の上昇量が Case A(S)-10kPa に比べて低いのは、Case A(S)-50kPa では注入圧力が高いため透水速度も高くなり、流体温度が上昇しきる前に供試体内へ浸透したためだと考えられる。また、両ケースにおいて超音波振動によって透水係数比が初期値を超えた原因としては、供試体の飽和度を上げるために事前透水を行っており、さらに同じ供試体を用いて両実験を行っているため、試験の開始時には初期目詰まりが発生していたためだと考えられる。図-4 に Case B(SF)-10kPa の実験結果を示す。細粒分を混合した供試体においても、珪砂 7号のみを用いた Case A と同様の現象が確認できた。

以上より、超音波振動には流体の温度上昇による粘性係数の低下効果、および目詰まりの解消効果による透水性の増大効果があることが明らかとなった。

3. 注入源の洗浄効果に関する検討

3.1 実験概要

表-3 に実験ケース、図-5 に実験状況を示す。本検討では図-1 に示す試験機と同様の試験機を用いて、ミキサーによって攪拌された泥水を空気圧ではなく水頭差を 0.695m を与えることによって透水させた。ここで、実験結果を明確にするために泥水には表-2 に示す藤森粘土を質量比で 1% 混合した非常に濃い泥水を用いた。また、実験結果のバラつきを減らすため、透水実験を開始前に供試体への注入コックは閉じたままで泥水を 60 分間ポンプで循環させ、泥水中にある比較的大きな粒子を沈降させた状態で透水実験を行った。ここで、本検討で用いた供試体は全てのケースにおいて最適含水比で締固められた珪砂 7号であり、供試体の直径は 100mm、高さは 127mm であり、粒子固定材は使用していない。

本検討では超音波振動の作用時間を変えた 4 ケースの検討を行っており、Case C(S)-60-120 は超音波振動を 60 分後から 120 分後まで与えたケース、Case D(S)-0-60 は 0 分後から 60 分後まで与えたケースである。また、Case E(S)-Int.2 は 2 分後から 2 分間隔で繰り返し与えたケース、Case F(S)-Int.10 は 10 分後から 10 分間隔で繰り返し与えたケースである。

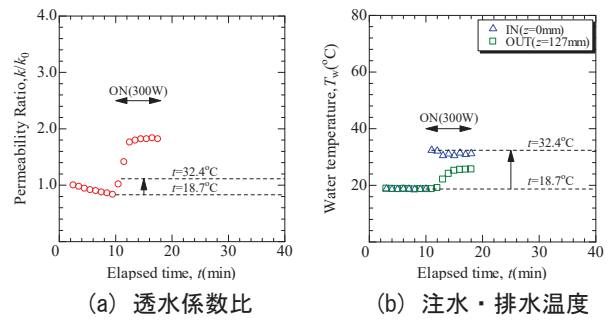


図-3 実験結果 (Case A(S)-50kPa)

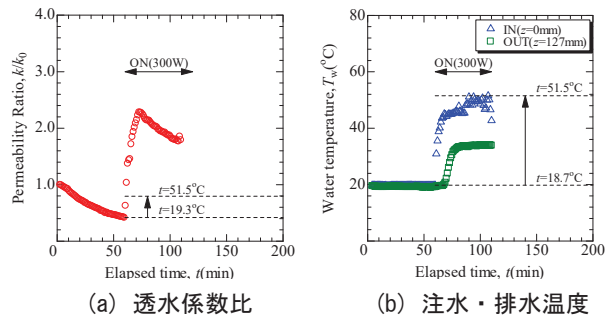


図-4 実験結果 (Case B(SF)-10kPa)

表-3 実験ケース

実験ケース	水頭差 Δh (m)	締固め度 D_c (%)	超音波発生時間 t (min)
C(S)-60-120	0.695	98.9	60 - 120
D(S)-0-60		98.7	0 - 60
E(S)-Int.2		98.1	Interval 2 min (2-4, 6-8, ..., 58-60)
F(S)-Int.10		97.3	Interval 10 min (10-20, 30-40, ..., 50-60)



図-5 実験状況 (注入源の洗浄実験)

3.2 実験結果

図-6 に全ケースにおける実験結果を示す。図-6(a)に示す Case C(S)-60-120 では非常に濃い泥水を一定の水頭差で透水させることにより、透水開始直後から供試体上面に細粒分がたまりはじめ、透水を開始してから60分後には透水係数比が0.12まで大きく低下していることが分かる。しかし、透水を開始してから60分後に超音波振動を与えることによって、透水性が回復していることが分かる。

図-6(b)に示す Case D-0-60 では透水開始直後から60分後まで超音波振動を与えているが、超音波振動が作用している間も透水性は低下している。これは本検討で用いた泥水の濃度が非常に濃いためであり、超音波振動を止めた60分後において急激に透水性が低下していることから、実際には超音波振動は注入源の洗浄にきちんと作用していると言える。

図-6(c)に示す Case E-Int.2 では2分間隔で超音波振動を与えているが、他のケースと同様に注入源に細粒分が付着して透水性が低下したとしても、超音波振動を与える事によって透水性が回復していることが分かる。また、図-6(d)に示す Case F-Int.10 についても同様の傾向が確認できる。

以上より、薬液浸透時において削孔水等に含まれる細粒分が注入源に付着しても、超音波振動を用いることによって注入源の洗浄が可能であり、超音波振動には透水性の回復に効果的であると言える。

4.現場実証実験

4.1 実験概要

図-7 に超音波振動注入装置を示す。本実験は一般的な薬液注入工法の一つであるダブルパッカ工法³⁾を採用しており、ほぼ実用機レベルの注入装置である。ここで、本装置は注入外管内で本体の固定および止水を行う上部パッカおよび下部パッカ、超音波振動を発生させる振動子、超音波振動を増幅する振動ホーンから構成されており、通常のダブルパッカ工法とは異なり20kHz、300Wの超音波振動を与えながら薬液の注入が可能となっているのが大きな特徴である。また、本装置の全長は2,000mm、最大径は57mm、重量は15kgであり、注入外管には塩ビ管VP65を用いる。

表-4 に実験ケースを示す。今回の実証実験では全てのケースにおいて2m×2mの矩形範囲を対象に注入が行われ、基本ケースとなるCase Dp-0では超音波振動を与えない一般的な方法で注入を行い、Case Dp-1では室内試験結果を参考に超音波振動を作動2分、無作動4分の6分周期で与えながら注入を行った。

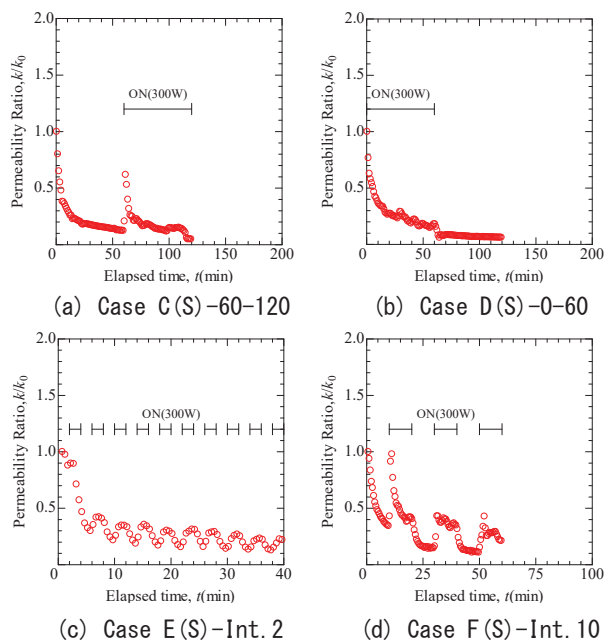
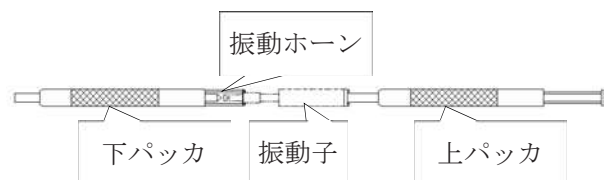


図-6 実験結果（注入源の洗浄実験）



(φ: 57mm, L: 2000mm, w: 15kg)

図-7 超音波振動注入装置（試作番号機）

表-4 実験ケース（試作番号機）

実験ケース	超音波振動	対象土量 (m ³)	計画注入量 (L)
Dp-0	無し	8.00	3,200 (40%)
Dp-1	有り	8.00	3,200 (40%)

図-8 に対象地盤のボーリング柱状図を示す。一般的な薬液注入工法は主に緩い砂地盤を対象としているため、本実験においても G.L. -2.00m~G.L. -4.00m (改良長：2.00m) にある N 値が 11 以下、細粒分含有率が $F_c=16\%$ の緩い砂地盤を改良対象とした。また、改良長のうち、注入は図-9 に示すように上下 2step に分割して注入孔の深度は G.L.-2.50m, および G.L.-3.50m とした。ここで、注入材は最も一般的なセメントベントナイト (一次注入, 注入量：5%) および水ガラス系無機溶液型注入材 (二次注入, 注入量：35%) を採用した。ただし、本検討では超音波振動を用いることによって対象地盤の透水性を確保し、薬液を均一かつ広範囲に浸透させることを目的としているため、二次注入材のゲルタイムは一般的な薬液注入に比べて比較的長い 60 分に設定した。

図-10 に限界注入速度試験⁴⁾の結果を示す。実験結果より、対象地盤では注入速度が 6L/min を超えたあたりから割裂注入が始まり注入圧力が低下するため、本実験における注入速度は 6L/min とした。

4.2 実験結果

図-11 に施工状況を示し、図-12 および表-5 に下段の注入孔深度となる G.L.-3.50m 付近における改良体径の計測結果を示す。超音波振動を与えた Case Dp-1 では超音波振動を与えていない Case Dp-0 に比べて最大浸透距離は約 1.3 倍、最小浸透距離は約 2 倍、改良体面積は約 1.6 倍、改良体径の変動係数は約 1/2 となっており、図-13 に示すように超音波振動を与えることによって薬液が均一、かつ広範囲に広がっていることが分かる。

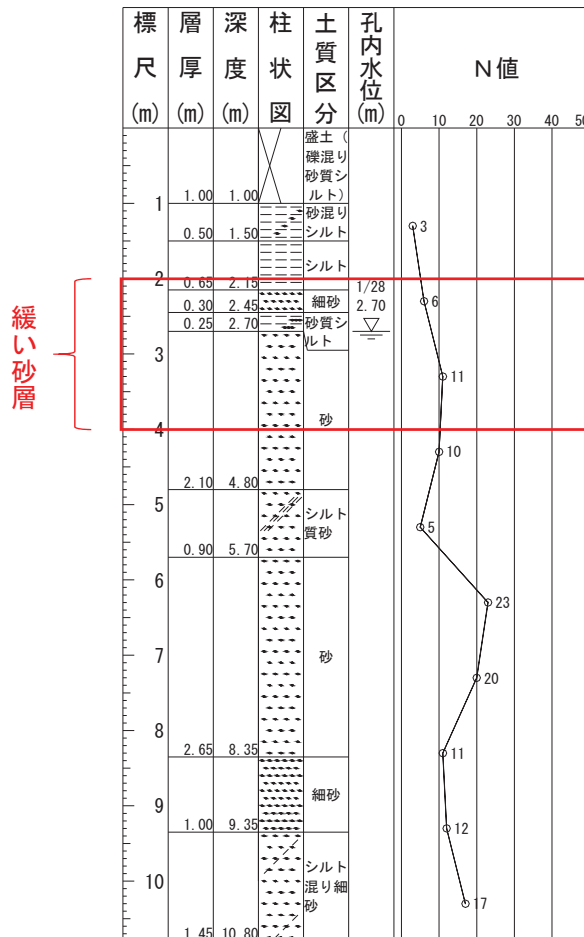


図-8 ボーリング柱状図

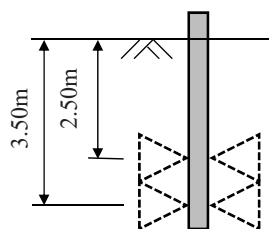


図-9 注入孔の深度

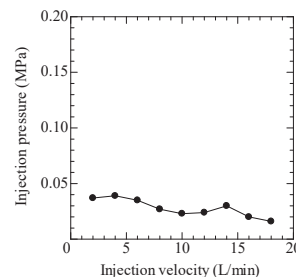


図-10 限界注入速度

表-5 改良体の計測結果一覧 (G.L. -3.50m)

項目	Case Dp-0	Case Dp-1
データ数	24	24
改良体面積 (m ²)	2.74	4.47
最大浸透距離 (mm)	1,210	1,600
最小浸透距離 (mm)	490	1,000
平均値 (mm)	910	1,186
中央値 (mm)	975	1,150
標準偏差 (mm)	229	150
変動係数	0.25	0.13



図-11 施工状況

図-14にボーリングコアのフェノールフタレイン反応の結果を示し、図-15にフェノールフタレイン溶液に反応した合計長を計画改良長 ($L=2.00\text{m}$) で正規化した薬液浸透率を示す。超音波振動を与えた Case Dp-1 は超音波振動を与えていない Case Dp-0 に比べて薬液が広範囲に広がっており、さらに深度方向においても薬液の浸透率が高くなっていることから、超音波振動を与えることによって全域にわたって薬液が均一に浸透しやすくなっていると言える。また、Case Dp-0 では施工時に若干のリーク現象が発生していたため薬液が十分に浸透しきれず、0.75m以上離れた G.L.-3.0m 以深においてフェノールフタレイン溶液の反応が少なかったと考えられる。一方で、Case Dp-1 では超音波振動による影響で薬液が広範囲、かつ均一に浸透しやすくなり、リークの抑制にもつながったと考えられる。

図-16に G.L.-2.50m~G.L.-3.00m 付近でブロックサンプリングした試料の一軸圧縮試験結果を示す。検体数はそれぞれ 3 本のみであるため今後も更なる検証が必要であるが、超音波振動を与えた Case Dp-1 では全ての供試体の強度が高いことが分かる。

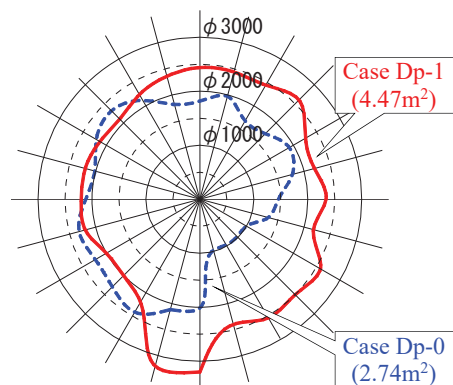


図-12 改良体形状 (G.L. -3.50m)



図-13 改良体状況 (Case Dp-1)

5. 結論

本検討では室内実験や現場検証実験により超音波振動が地盤の透水性に与える影響や薬液注入工法の最適化に関する検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 目詰まりの解消効果や注入源の洗浄効果に伴う透水性の改善効果が期待できる。
- 2) 透水性の改善に伴う浸透距離の広範囲化や、薬液の均一な浸透、改良体品質の向上に期待が出来る。

謝辞

本研究の実施にあたり、本多電子(株)や原工業(株)には多大なる協力を頂いた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 前田健一・近藤明彦 (2014) : 粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, 土木学会論文集 A2, Vol. 70, No.2, I_507-517.
- 2) 本多電子(株) 企画・編集・取材: 聞こえない音の世界: 超音波ハンドブック, 2008.
- 3) 公益社団法人 地盤工学会: 薬液注入工法の理論・設計・施工, pp.51~53, 2009.
- 4) 公益社団法人 地盤工学会: 薬液注入工法の理論・設計・施工, p.20, 2009.

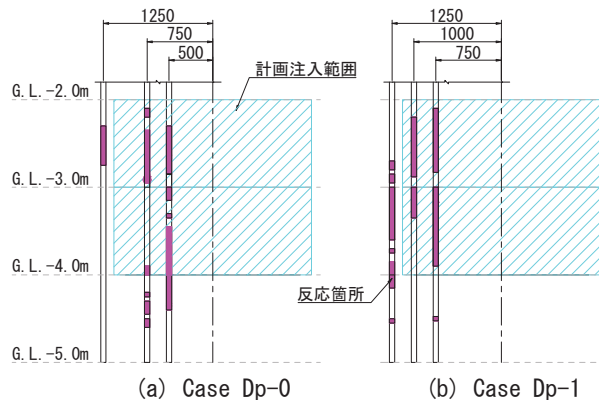


図-14 フェノールフタレイン溶液の反応結果

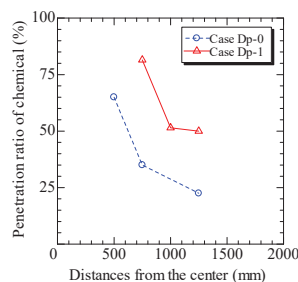


図-15 薬液浸透率

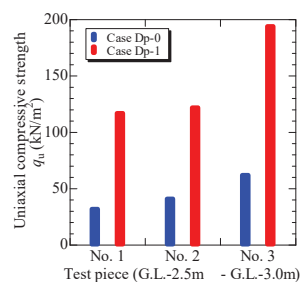


図-16 一軸圧縮強度