

シリカ薄液による液状化対策工法の開発

日下部 伸* 高橋一成** 古賀 明**
 柳原純夫*** 森尾 敏****

1. まえがき

兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災：1995年）以来、さまざまな耐震設計基準が見直されてきた。また、地震時の地盤災害から社会資本を守るため、種々の液状化対策も実施されてきた。既設構造物直下や構造物周辺地盤の場合、その対策工法は限定され、せん断変形抑制工法、注入固化工法、間隙水圧消散工法、地下水位低下工法などが用いられている。その中であって、従来の注入固化工法は、施工性に優れ適用範囲が広いものの、経済性に劣るという欠点があった。

今回、既設構造物直下、及び周辺地盤の液状化対策として、経済性・施工性に優れた新しい浸透注入固化工法を開発した。この工法では、注入薬液として溶液型超微粒子シリカを低濃度の薄液状態で用い、薬液コストを抑え、低い注入圧力で周辺構造物への悪影響を無くし、高速注入による迅速な施工を特長としている。

本研究では、東京湾沿岸の埋立て地盤において、現場施工実験を行い、施工能力、出来形管理、シリカ薄液による改良砂の液状化抵抗などについて開発技術を実証した。さらに、有効応力法に基づく液状化解析プログラム FLIP を用いて改良効果について解析的にも検討を加えた。以下に、その概要を報告する。

2. 溶液型超微粒子シリカと改良土の特長

本工法で用いる注入薬液は、水ガラスのアルカリをイオン交換法によって除去した純粋なシリカからなり、固結後は溶脱が少なく耐久性に優れている。また、超微粒子（平均粒子径 5nm、粘土・超微粒子セメントの1/1000）であるため、優れた浸透性を発揮し、**図-1**に示すように従来の注入工法に比べて改良径が大きく工期・工費が大幅に改善される。改良砂は、サンドゲル化開始直後に中性域に入り、薬液の構成成分も全て

無機質であるため、環境保全性に優れている。

さらに、室内配合試験の研究成果^{1)~4)}により、シリカ薄液で改良された土は、小さな一軸圧縮強さ（15kPa 以下）でも優れた液状化抵抗性と靱性を発揮することが実証されている。その結果、低濃度の薬液で改良が可能であり、材料費を大幅に低減できる。

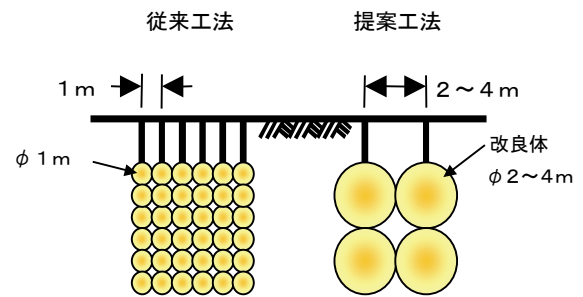


図-1 大口径改良体の概念

3. 低圧・高速注入パッカーの開発と注入速度試験

低圧・高速注入を行うため、長尺ストレーナ構造を採用し、注入開口面積の増大をはかった。逸出防止にはシールグラウトの代わりに特殊な注入パッカーを開発した。パッカー注入材が外部地盤に浸透する構造にし、パッカーを膨張させるとともに、孔壁地盤の強度増加をはかる構造とした。高効率注入パッカーの概念を**図-2**に示す。このパッカーの注入効率の向上効果を確認するために、水を使用した注入速度試験を行った。従来工法「二重管ダブルパッカー」との注入速度-注入圧力の比較を**図-3**に示す。開発した注入パッカーは注入速度を大きくしても注入圧は低く抑えられることがわかる。低圧(0.1MPa 程度)の一定圧力の浸透注入を考えれば、従来工法の2~3倍の高速注入が可能になる。

*技術研究所 **東京支社土木設計部 ***技術本部土木部 ****舞鶴工業高等専門学校

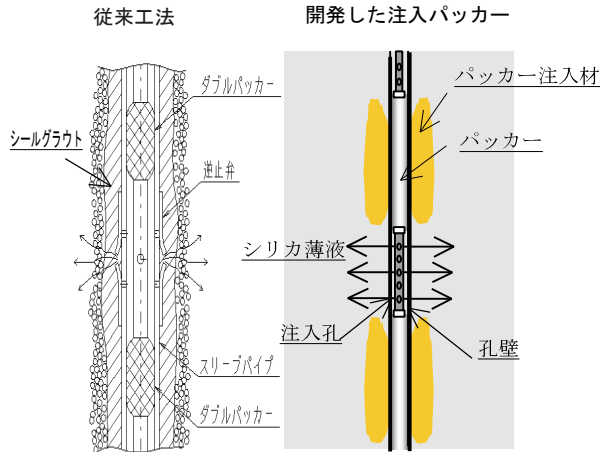


図-2 注入パッカーの比較

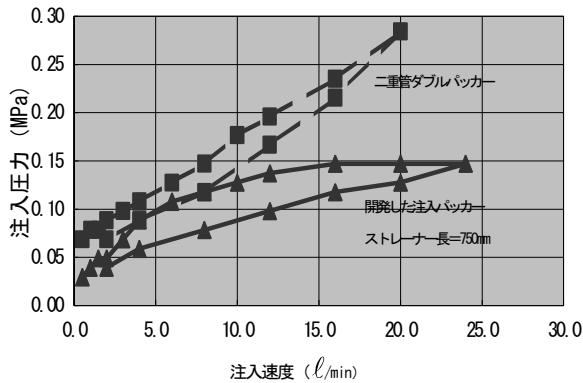


図-3 注入速度試験

4. 現場施工実験の概要と注入範囲の確認方法

実験を行った埋立て地盤は、緩い細砂で構成されており、地下水位はGL-3mである。対象地盤の物性値を表-1に、施工実験の注入諸元を表-2に示す。

表-1 対象地盤の物性値

土粒子の密度 (g/cm ³)	2.719
間隙比	0.967
細粒分含有率 (%)	8.8
均等係数	2.14
現場透水係数試験 (cm/sec)	2.26 × 10 ⁻³

表-2 注入諸元

ケース	1	2	3	4	5
シリカ濃度	4.5%	4.5%	2.25%	4.5%	4.5%
注入速度	30 l/min	20 l/min	20 l/min	20 l/min	20 l/min
注入直径	2m	2m	3m	4m	2m 2段
注入量	1.8m ³	1.7m ³	6.2m ³	14.7m ³	1.8 m ³ ×2

注入速度は従来の注入速度の 2~2.5 倍の速度を設定した。表-2に示すケース4の注入量は、従来注入の標準径を 1.0m とすると、その 64 倍の注入量であった。薬液の逸出も無く、低圧力で施工できた。ケース3では薬液費の削減を図るため、原液を2倍希釈した低濃度のシリカ薄液を注入しており、一軸圧縮強さは 15~50kPa 程度である。そのため、提案工法を実現場に適用するには、低強度の改良体を現場で適切に評価する必要がある。ここでは、注入範囲を明確に特定できる電気比抵抗コーン試験結果について述べる。

電気比抵抗試験は、コーン先端ロッド部に電極を設け、地盤の電気比抵抗を図-4に示すように、深さ方向に連続的に計測する試験である。図-5は、表-2のケース3について、注入中心から 50cm 離れた位置で実施した注入前後の計測結果の比較を示している。同図から読み取れるように、注入前の原地盤では比抵抗値は 10~30Ωm 程度の値を示す。それに対し、注入後は 5 Ωm まで値が低下し、深さ方向にほぼ一定値を示す範囲が見られ、薬液が注入された範囲を明確に特定できる。

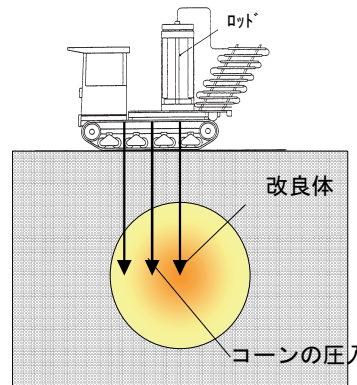


図-4 電気比抵抗試験

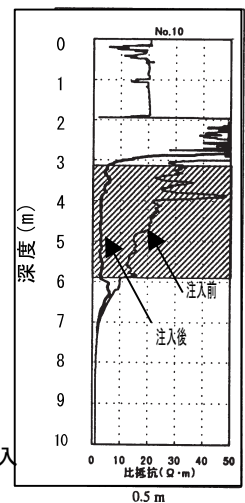


図-5 試験結果

さらに、注入中心を原点に直交する2方向に合計 14 箇所測定を行い、比抵抗値が小さい範囲をプロットしたものが図-6である。注入ストレーナを中心に球状浸透していることがわかり、理論解から得られる範囲とほぼ一致していた。電気比抵抗を測定することで、薬液が浸透した位置、範囲を明確に知ることができ、出来形管理が容易に行えることがわかった。

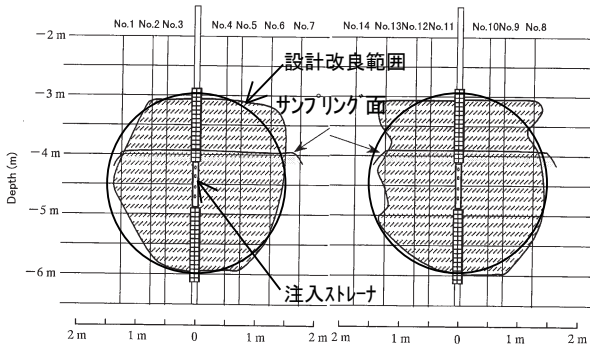


図-6 改良範囲の推測

5. 試掘による改良体の確認と液状化抵抗の実証

写真-1 にケース3の試掘状況を示す。一軸圧縮強さは15kPaと小さいものの、不透水性を発揮し、水洗いにより改良体を確認することができた。改良体の形状は、電気比抵抗コーン試験による推定と一致し、直径約3mの球体であった。

改良体からブロックサンプリングで供試体を取り出し、液状化強度試験を実施した。試験結果の一例を図-7に示す。未改良部では繰返し载荷により急激にひずみが増大する、いわゆる液状化破壊を呈している。一方、改良部はひずみが徐々に増加するものの、優れた靱性を発揮し、液状化破壊しないことがわかる。液状化強度比(繰返し回数20回、せん断ひずみが両振幅で7.5%になるせん断応力比)を求め、注入中心からの分布を描くと図-8のようになる。液状化強度比は未改良砂で0.25だが、改良部では最大0.5程度を示し、液状化に対する抵抗性が大きくなっていることが確認できた。シリカ濃度が低い場合でも、注入中心から離れても、液状化強度比は急減することなく、広い範囲で液状化抵抗を維持できていることがわかった。



写真-1 改良体の試掘(ケース3)

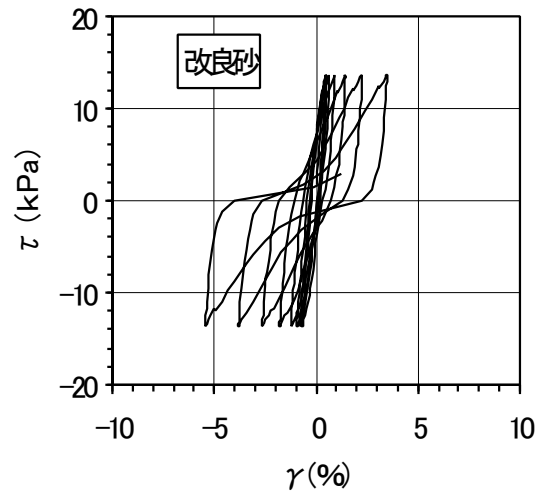
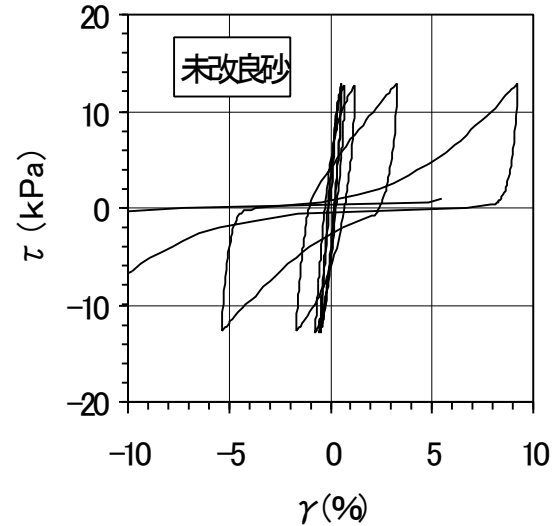


図-7 せん断応力～せん断ひずみ関係

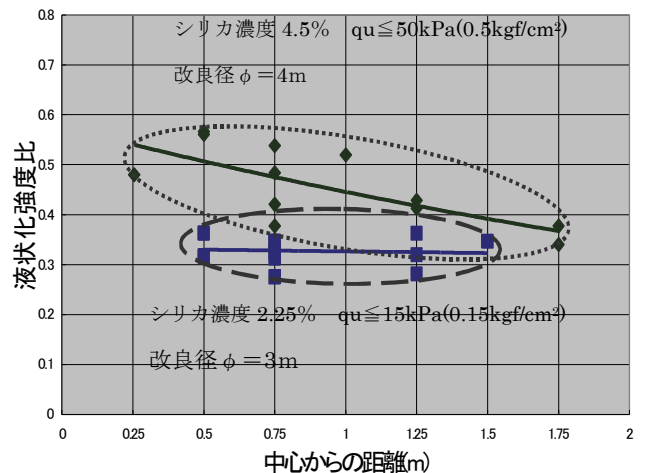


図-8 液状化強度比の分布

6. 改良土の耐震性能に関する一次元液状化解析

シリカ薄液注入による改良土の耐震性能を一次元の液状化解析を通して解析的に検討した。対象地盤は、兵庫県南部地震において鉛直アレー観測が実施されたポートアイランド地盤とした。解析には、有効応力法に基づく液状化解析プログラム FLIP を用いた。使用する構成式は、いわゆる全ひずみ型のモデルで、せん断挙動と体積ひずみ挙動が分離されたものである。せん断に関しては、多重せん断ばねモデルが用いられ、主応力軸の回転も含めた任意方向のせん断の評価が可能である。個々のせん断ばねには双曲線モデルが、この履歴特性には修正した Masing 則が適用される。修正した Masing 則とは、せん断ひずみ振幅に応じて履歴ループの大きさ（減衰定数）を調整したものである。体積ひずみに関しては、せん断仕事モデルが用いられる。塑性せん断仕事と一般化したせん断応力に基づいて液状化フロントと状態変数を定め、この状態変数から塑性体積ひずみを決定している。

解析対象地盤を図-9に示す。ポートアイランド地盤では、GL-0~-18m の埋土に六甲まさ土が使用されている。本解析では、まさ土の代わりにシリカ薄液の現場注入実験を行った地盤（未改良富津砂）を用いた場合と改良砂（6倍希釈と2倍希釈）を用いた場合の違いを調べる。未改良富津砂と改良砂のパラメーターを表-3に、液状化強度曲線を図-10に示す。入力地震動は、アレー観測におけるGL-32.4mでの加速度記録（NS成分）を図-9の砂れき層下端から地中振幅（E+F）として入力する。

最大絶対加速度、最大相対変位、最大せん断ひずみの深さ方向分布を図-11、12、13に示す。地表面の最大加速度は2倍希釈の場合が最も小さい。これは、埋土の強度を高めることで図-13にみられるように下部のMa13にせん断ひずみが集中し、地表への波動伝播が抑えられたためであろう。地表面の最大変位は、2倍希釈の場合が最小（27cm）で、未改良と6倍希釈は同程度（約40cm）である。

図-14に地表面の相対変位時刻歴を示す。この解析は、地震動の20秒以降の加速度をゼロとして、残留変形量をみたものである。未改良では10cm程度の残留変形が生じているのに対し、2倍希釈と6倍希釈の残留変形はほぼゼロである。6倍希釈の場合、一軸

圧縮強さは13kPa程度である。この程度の値であっても、液状化が進行した後のねばりにより残留せん断ひずみが抑えられ、残留変形が低下したものである。

L2 地震動による地盤の耐震性能を検討するとき、土のねばりが重要である。6倍希釈改良土の液状化強度は未改良土と大差ないが、有効応力が低下した後のねばりがあり、優れた変形性能を有する。

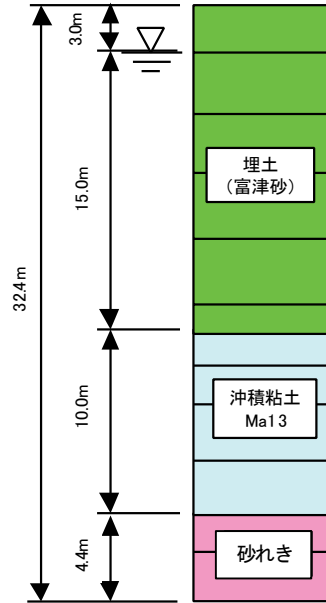


図-9 解析モデル

表-3 パラメーター

パラメーター	未改良	6倍希釈	2倍希釈
σ_r (kPa)	98	98	98
G (kPa)	112400	112400	112400
K (kPa)	299700	299700	299700
ϕ (deg.)	37	37	41
ϕ_m (deg.)	28	28	30
S1	0.005	0.005	0.005
W1	7.0	8.5	10.0
P1	0.5	0.5	0.5
P2	1.3	1.0	0.8
C1	4.0	4.0	6.0

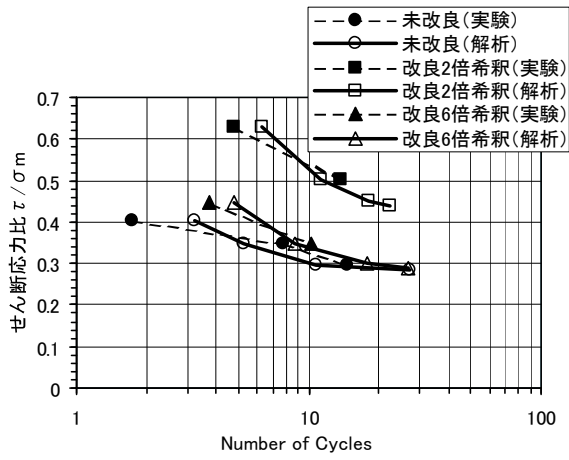


図-10 液状化強度曲線

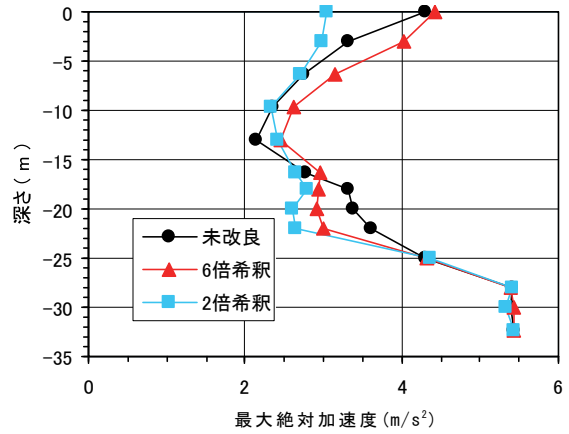


図-11 最大絶対加速度の深度分布

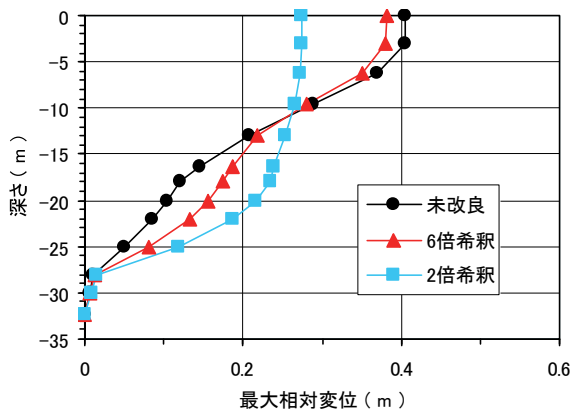


図-12 最大相対変位の深度分布

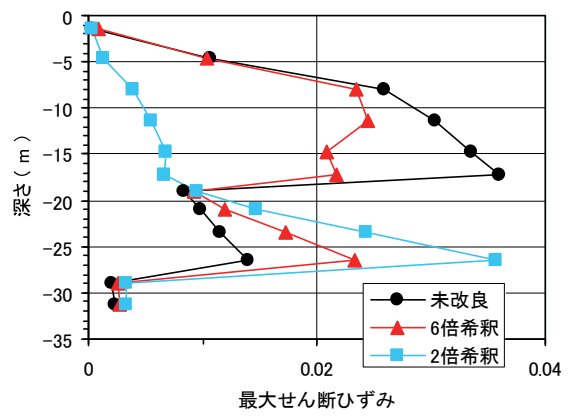


図-13 最大せん断ひずみの深度分布

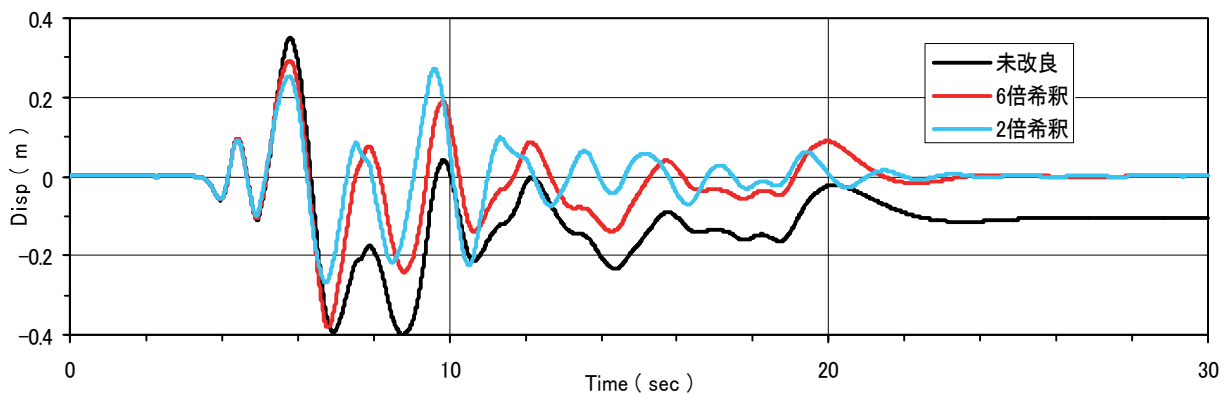


図-14 地表面の相対変位時刻歴

7. 開発工法の特長

開発工法の特長を以下にまとめる。

- i. 低濃度で高い液状化抵抗性を示し、材料費を低減することができる
- ii. 電気比抵抗の測定により、改良範囲を明確にすることができる
- iii. 低い圧力(従来工法の 1/2 程度)で注入が可能で、周辺構造物への影響を抑制できる(図-15 参照)
- iv. 優れた浸透性を発揮するため改良半径が従来の注入固化の 2～4 倍程度となり、注入管の削孔本数が大幅に減少し、工費・工期の縮減が可能である
- v. 改良径 $\phi 1m$ の高強度注入固化工法との比較(一軸圧縮強さ $\geq 1000kPa$) では最大 40%のコストダウン、約 55%の工期短縮が可能である
- vi. 薬液は無機質材料で構成されており、耐久性に優れ、環境保全性に優れている
- vii. 注入設備は小型機械で構成されているため、施工性に優れている

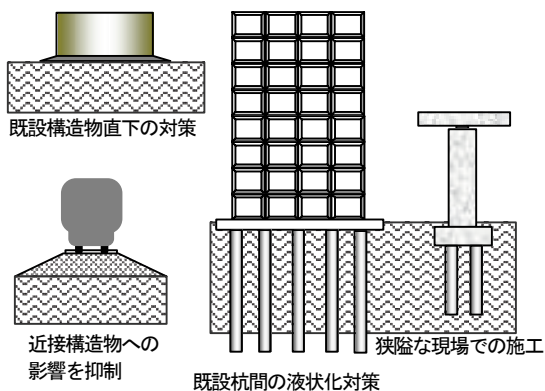


図-15 開発工法の適用

8. あとがき

液状化対策工を計画・設計するにあたり、液状化する・しないの判定については、事業者の各種基準等で定められている。しかし、液状化対策の具体的な設計方法は定められておらず、施工方法を検討しながら設計することが多い。本開発工法の適用に際しても、改良範囲、改良率、液状化強度比等を決定する必要がある。新しい工法が開発されても、これらの設計方法に

より経済性は大きく左右される。当社においては工法開発と同時に、超微粒子シリカの動的特性が反映できる有効応力法の有限要素解析による設計が可能になっている。ソフト・ハードの両面から、合理的な液状化対策工が提案できると考えている。

【参考文献】

- 1) 日下部他、「薬液注入による低強度改良砂の液状化抵抗」、地盤工学会、第 33 回地盤工学研究発表会、pp.87～88、1998.
- 2) 日下部他、「薬液注入による低強度改良砂の動的挙動」、土木学会、第 53 回年次学術講演会、pp.226～227、1998.
- 3) 日下部他、「シリカ薄液による改良砂の液状化抵抗の評価」、地盤工学会、第 34 回地盤工学研究発表会、pp.1009～1010、1999.
- 4) 日下部他、「大ひずみ履歴がシリカ薄液改良砂の液状化抵抗に与える影響」、土木学会、第 54 回年次学術講演会、pp.160～161、1999.