

住宅地盤を対象とした割裂注入による改良効果の確認試験

FIELD TESTS ON IMPROVEMENT EFFECTS OF FRACTURE GROUTING IN RESIDENTIAL AREAS

高田 徹 — * 1 関 平和 — * 2
松本樹典 — * 3 藤井 衛 — * 4
岡野泰三 — * 5 今井敬介 — * 6

Toru TAKATA — * 1 Hirakazu SEKI — * 2
Tatsunori MATSUMOTO — * 3 Mamoru FUJII — * 4
Taizou OKANO — * 5 Keisuke IMAI — * 6

キーワード：
小規模建築物, 地盤改良, 割裂注入, 粘着力

Keywords:
Small scale building, Ground improvement, Fracture grouting, Cohesion

This paper reports the results of confirmation tests aiming at understanding the strength characteristics of ground improved by fracture grouting. It was found that the improvement effect of the fracture grouting could be obtained with less quantity of grout materials as compared to the conventional grouting method, although the test cases are limited. In addition, the paper describes the applicability of the grouting method to housing sites.

1. はじめに

住宅の地盤補強では, 一般に浅層・深層混合処理工法, 小口径鋼管杭工法が利用され, また住宅の不同沈下修正には, 鋼管圧入工法によるアンダーピニングが代表的である¹⁾。多くの住宅地盤ではこれらの工法を適用できるが, 例えば, 大型な施工機械が入りにくい住宅密集域や基礎下掘削の困難な地盤などのように, 適用しにくい施工条件や地盤条件もある²⁾。

このような条件に対し, 筆者らは注入工法を採用し, 既に 1,000 棟以上の住宅地盤に対する適用実績を有している^{3,4)}。注入技術は地盤改良だけでなく, 注入圧を利用して地盤隆起させることにより, 住宅の不同沈下修正にも効果が期待できる。しかしながら注入技術には未だ不明瞭な部分があり, 特に割裂注入による改良効果(強度・変形特性など)の確認が難しく, 現場技術者の経験に依存しているのが現状である。

本稿では, 従来の注入技術の現況と課題, および原位置注入実験(割裂注入)によって得られた注入改良効果について報告する。さらに, これらの結果を踏まえて, 割裂注入による改良効果の判断基準や有効な確認方法について考察を行う。

2. 注入技術の現況と課題

注入実績の多くは, 仮設工事での利用であり, 主に掘削工事前の地下水の湧水と土砂の崩壊防止を目的としている。最近では, 注入材料や施工法に関する技術開発が進められ, 液状化対策や筆者らが対象とする構造物の不同沈下修正など本設工事での利用も増えつつ

表 1 注入工法の目的と設計・施工の考え方
(文献 5), 6)をもとに作成)

対象	仮設利用	本設利用
注入目的	地盤掘削段階の止水・強度増加	地盤支持力の増加, 沈下修正, 沈下抑止
注入方式	・二重管ストレナ方式 ・ダブルパッカ方式	左記とほぼ同じ
注入率	(砂質土)間隙率×充填率 (粘性土)経験値 (30~40 %程度)	改良強度(主に土の粘着力)と注入範囲における改良率の関係から, 目的に応じた注入範囲, 注入率が設定される。
改良範囲	掘削時の外力に対して,改良土の粘着力で安全率が確保できる改良範囲を計算する。	
効果確認	コーン貫入試験, 採取土試料を用いた室内透水試験(止水), 施工中の現場観測など。	コーン貫入試験, 標準貫入試験, 採取土試料を用いた一軸圧縮強度試験など。
注入材料	水ガラス系材料	セメント系, 粘土系, 特殊シリカ系材料
改良効果	(砂質土) 改良地盤の粘着力 c^* = 40~100 kN/m ² (原地盤の N 値による), 透水係数 $k = 1 \times 10^{-4}$ cm/s 程度まで減少 (粘性土) $c^* =$ 原地盤の粘着力 $c + 10$ kN/m ² (ただし最大 $c^* = 40$ kN/m ²)	注入材・対象地盤によって目標強度は異なる。劣化・耐久性などに配慮した目標強度
耐久性	仮設期間内(1 年以内~数年)で改良効果が保証されること。	構造物の耐用年数にわたり地盤改良効果が保証されること。

¹⁾ ㈱設計室ソイル
(〒103-0039 東京都中央区日本橋 3-9-12)

²⁾ 金沢大学理工研究域 教授・農博

³⁾ 金沢大学理工研究域 教授・工博

⁴⁾ 東海大学工学部建築学科 教授・工博

⁵⁾ 三井ホーム㈱

⁶⁾ ㈱グラウト工業

¹⁾ Soil design Inc.

²⁾ Prof., School of Environmental Design, College of Science and Technology, Kanazawa Univ., Dr. Agr.

³⁾ Prof., School of Environmental Design, College of Science and Technology, Kanazawa Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokai Univ., Dr. Eng.

⁵⁾ Mitsui Home Corporation

⁶⁾ Grout Kogyo Corporation

あるが、現在のところ、その実績数は仮設工事での利用に比べて少ない。表 1 に、注入工法を仮設工事および本設工事で利用する場合の相違点を示す。

仮設工事での注入には、掘削を安全でかつ周辺に悪影響を及ぼさないことが求められ、支障なく掘削できれば、目的に合致した注入設計・施工がなされたと判断する。よって、本設構造物の構造計算には関与しない。

しかし本設工事での注入は、注入地盤の耐久性と地盤支持力の評価が重要となるので、注入地盤の改良効果を定量的に明確にする必要がある。このため、本設構造物の安全性や機能を確保するための新たな設計・施工管理・品質確認が必要となる。ところが注入技術には未だ不明瞭な部分が多いことから、従前からの仮設工事に対する設計法がそのまま適用されており、改良効果について十分な検討がなされていない。特に粘性土（細粒土）での注入効果の評価が課題である。砂質土（粗粒土）であれば、図 1 に示されるように注入材が浸透し易く、地盤が一体となって固結するため容易に土試料が採取できる。しかし粘性土へ注入すると、割裂注入となって複合土（割裂脈＋未固結な粘性土）が形成されるため、土試料の採取が難しく、またその評価手法は確立されていない。

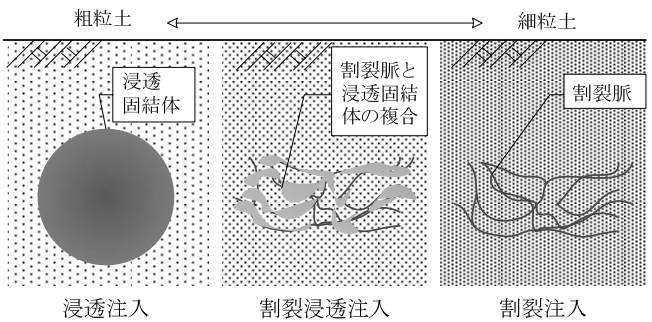


図 1 注入形態の模式図

3. 割裂注入改良地盤の性能評価実験の概要

ここでは、注入工法を住宅地盤の本設工事で利用するために、割裂注入改良地盤の強度特性（一軸圧縮強さ、変形特性など）をマクロ的に把握することを目的とした原位置注入実験を試みた。以下に、その実験地盤、実験方法などの概要を述べる。

3.1 地盤概要

実験場所は、神奈川県三浦市の傾斜地にある畑地に厚さ 0.2～2.0 m の偏盛土を施した造成地盤である（図 2）。敷地は高さ 2 m の L 型擁壁で囲われている。擁壁底版の影響を避けるため注入改良範囲は、図 2 に示すように、擁壁から 6 m 離れた位置から幅 5 m、奥行き 5 m、厚さ 3 m とした。

図 3 に注入改良範囲の中央部で実施したボーリング調査と標準貫入試験（SPT）の結果を示す。当地盤は粘性土主体の盛土が表層から深度 1.1 m まで存在する。盛土以深は、 $N = 1 \sim 3$ の火山灰質粘性土が深度 4.15 m まで、さらに $N = 11 \sim 42$ の粘土質砂が深度 7.45 m まで堆積している。調査深度内で地下水位は認められなかった。

3.2 注入実験概要

表 2 に実験に用いた注入材の配合を示す。注入材は、割裂脈の強度を高めるために懸濁型薬液としてゲルタイム 10 秒に設定した LW

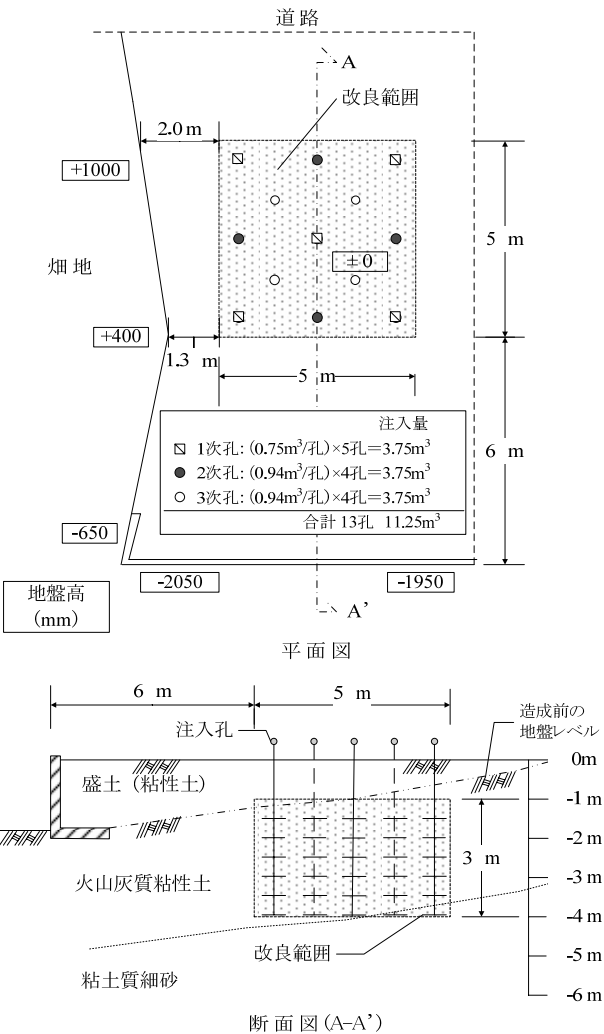


図 2 注入実験位置

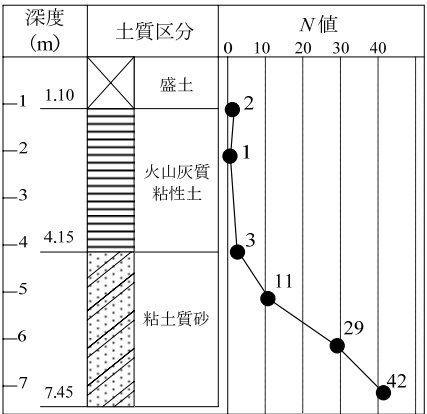


図 3 対象地盤のボーリング柱状図と SPT 結果

表 2 注入材 1 m³ 当りの配合

A 液（水ガラス）		B 液（セメント）	
3 号珪酸ソーダ	0.25 m³	普通ポルトランドセメント	187.5 kg
水	0.25 m³	硬化剤	75.0 kg
		水	0.40 m³
計	0.50 m³	計	0.50 m³

〔備考〕ホモゲルの一軸圧縮強さ（4 週）：5000 kN/m²（カタログ値）
硬化剤：品名：LG-1P（製造：（株）ムツミ化学）（石膏と消石灰の混合物）

液（水ガラス（A 液）+セメント（B 液））を使用した。

注入は二重管ストレーナ方式により、一般的な注入速度 16~18 L/min で所定量注入した。注入孔は注入改良範囲内(改良面積：25 m²，改良土量：75 m³) で計 13 本配置した(図 2)。ここでは注入率 α 〔注入量/改良土量 × 100 (%)〕と改良効果の関係を見るために、注入孔を図 2 に示すように 1~3 次孔に配置し、1 次孔→2 次孔→3 次孔の順に注入した。そして各次の孔の注入が完了する毎に地盤調査を実施した。1 孔当りの注入量は、各次数の合計注入量が等しくなるように設計し、ここでは、1 次孔当りの注入率を $\alpha=3.75 \text{ m}^3 / 75 \text{ m}^3 = 5 \%$ に設定した。よって 1→2→3 次孔へと注入が進むと、それまでの注入量が積算されるため、1, 2, 3 次孔の注入率 α は、それぞれ $\alpha = 5, 10, 15 \%$ となる。

3.3 地盤調査方法

表 3 に地盤調査法と調査時期を、図 4 に地盤調査の配置を示す。調査は、注入前と最終注入完了時 ($\alpha=15 \%$) に、ボーリング調査 (BOR)、各種サウンディング (SWS, CPT, SPT)、表面波探査 (SWE) および孔内水平載荷試験 (LLT) を各調査基準類⁷⁾に準じて実施した。なお SWE は住宅地盤用に開発された表面波探査機⁸⁾を用いた。注入後の調査は、各注入段階完了から 1~2 日経過後に実施した。

4. 割裂注入改良地盤の性能評価実験結果と考察

4.1 注入材料強度

図 5 に注入材単体 (ホモゲル) の一軸圧縮試験結果を示す。供試体は、現場の注入プラントで作製された 2 液 (表 2) を鋼製モール

ド (直径 50 mm，高さ 100 mm) の中で攪拌しながらゲル化させた後、20 ℃の恒温水槽で養生した。図 5 よりホモゲルの一軸圧縮強度 q_u は、材令 28 日で平均 $q_u = 4054 \text{ kN/m}^2$ が得られている。この値は材料メーカーが示す値 (表 2) に比べて約 2 割低い。この低下要因は、現場混練時の配合管理や練水の温度管理が材料メーカーの室内試験時と異なることや、供試体を作製する際に 2 液間の攪拌具合にばらつきが生じたためと考えられる。

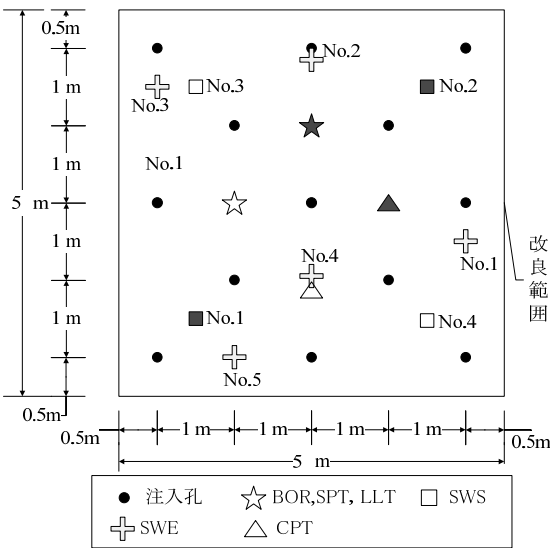
4.2 注入前後の地盤調査データの比較

図 6 に注入前後の SPT 結果を示す。未改良範囲を含む深度 7m までの SPT 結果を全体的に見ると、明らかな改良効果があるとはいえない。例えば、図 6 でわかるように未注入の深度 4~5 m でも注入後の N 値が注入前より大きかったり、反対に深度 6~7 m では注入後の N 値が注入前より小さくなったりしている。ここで、改良深度 1~4 m に着目すると、注入後の N 値は、注入前に比べて 1.2~2.7 倍に増加した。深度 1.0~1.5 m, 2.0~2.5 m の SPT 用サンプラー内では割裂脈の存在が認められた (写真 1)。このことより改良範囲で見られた N 値の上昇は、注入による改良効果と予想される。今後、改良土試料の目視確認を行った上で、SPT による改良効果評価の是非をさらに検討する必要がある。

図 7 に注入前後の SWS 結果を示す。図より注入深度 1~4 m に見られた $W_{sw} = 0.75 \sim 1.0 \text{ kN}$ の自沈層は、注入後には $N_{sw} = 20 \sim 100$ に高まっており、明らかな差が認められる。

表 3 使用した地盤調査法と調査時期

調査名	略称	調査時期
表面波探査	SWE	$\alpha = 0, 5, 10, 15\%$ 注入後
スウェーデン式サウンディング	SWS	$\alpha = 0, 15\%$ 注入後
三成分コーン貫入試験	CPT	$\alpha = 0, 15\%$ 注入後
孔内水平載荷試験	LLT	$\alpha = 0, 15\%$ 注入後
標準貫入試験	SPT	$\alpha = 0, 15\%$ 注入後
ボーリング調査	BOR	$\alpha = 0, 15\%$ 注入後



備考 ①各調査孔マークの色付は注入前，白抜は $\alpha=15 \%$ 注入後の調査位置を示す。
②表面波探査(SWE)は、 $\alpha=0, 5, 10, 15 \%$ 注入後とも同じ位置で実施した。

図 4 地盤調査位置

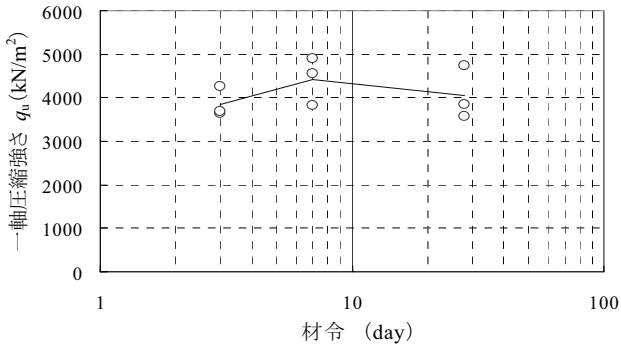


図 5 注入材料 (ホモゲル) の一軸圧縮試験結果

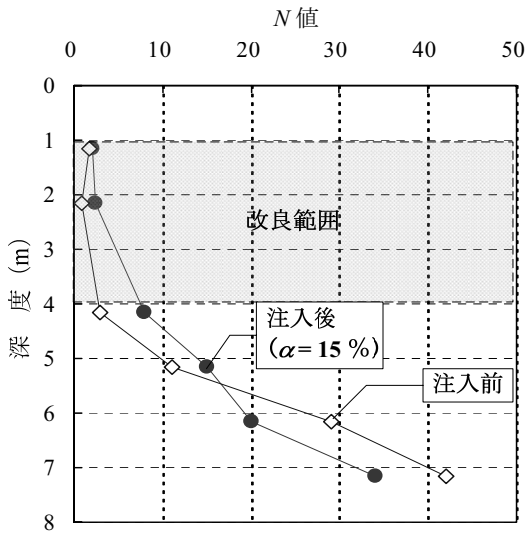


図 6 注入前後の SPT 結果の比較

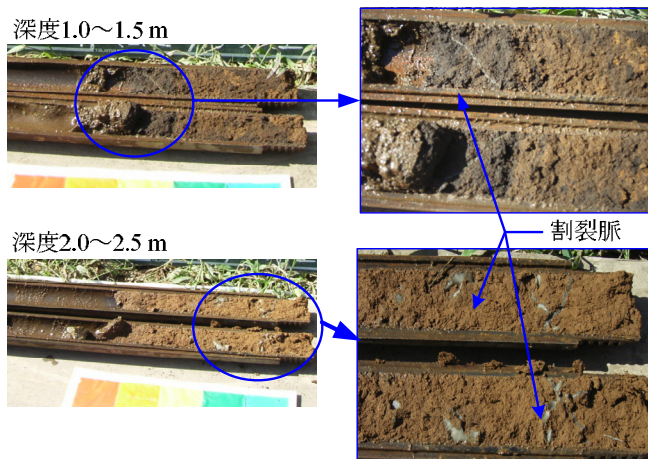


写真 1 ボーリングで確認できた割裂脈

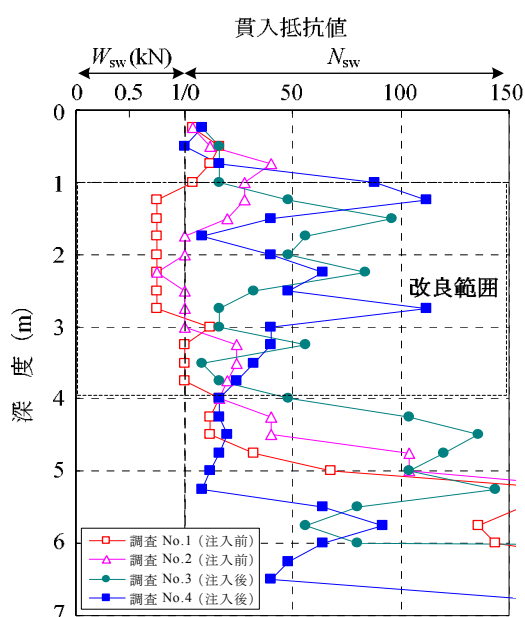


図 7 注入前後の SWS 結果の比較

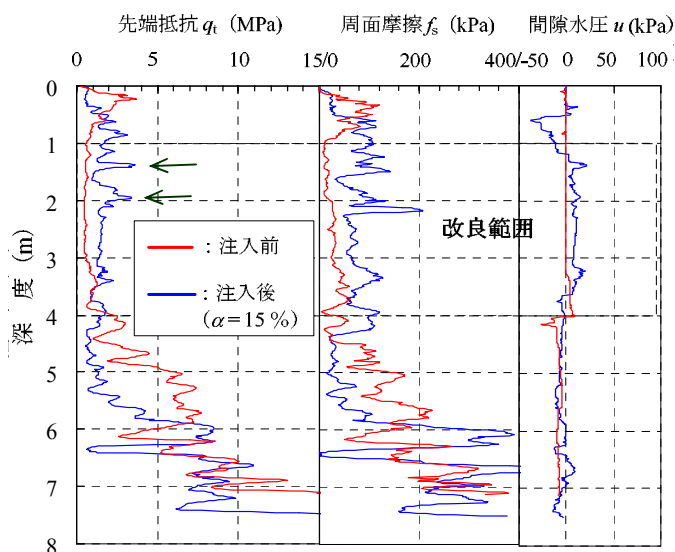


図 8 注入前後の CPT 結果の比較

図 8 に注入前後の CPT 結果を示す。注入区間の先端抵抗 q_t は、注入前が $0.5 \sim 1.2$ MPa であったものが、注入後は $0.9 \sim 3.6$ MPa に上昇しており、明確な差が見られた。また周面摩擦 f_s も q_t と同様に、注入後に増加した。CPT は深度 10 mm 毎に測定したため、極めて薄い地層の変化も確認でき、深度 1~2 m の q_t (注入後) に、厚さ 20~50 mm だけ急激に高くなる部分 (図 8 中の矢印) が見られた。これは割裂脈の強度が周辺地盤に比べて、かなり大きいことを考えると、コーンが割裂脈を貫通したときの抵抗値であると判断される。

図 9 に注入前後の SWE 結果 (振動数 f - 表面波速度 V_r の関係) の一例を示す。この SWE は、弾性波探査の一種で、周波数を制御できる起振器によって正弦波の定常振動 (鉛直方向) を地表面で与えたときの表面波速度を測定する試験である。一般に表面波速度は地表面近傍を伝わる速度を意味し、S 波速度と同程度かやや遅い。表面波は、地表面から概ね 1 波長分の深さまでの領域を伝播するのであり、 V_r 、 f 、深度 z には、均質地盤を条件として、 $V_r = 2 \cdot z \cdot f$ の関係がある⁹⁾。すなわち、振動数の小さな表面波だと波長が長くなるので深い層までの範囲で伝播し、逆に振動数が増加するにつれ、表面波は浅い層の範囲で伝播する。図 9 では、例えば $f = 20$ Hz で $V_r \approx 100$ m/s と測定されたが、 $z = V_r / (2f) = 100 / (2 \cdot 20) = 2.5$ m となり、この V_r は深度 2.5 m までの範囲で伝播したこととなる。図 9 より、 $f = 10 \sim 40$ Hz の範囲で注入後の V_r は、注入前に比べてやや大きくなった。弾性波は硬質な地盤ほど、速く伝播する。したがって、地表面付近を除けば、改良効果があったことがわかる。

図 10、表 4 に注入前後の LLT 結果を示す。LLT は深度 3.0~3.6 m の 1 測点のみで実施した。表 4 より、注入前の地盤のヤング率 E は $E = 2000$ kN/m² であったが、注入後は $E = 5600$ kN/m² と増加した。

一般に、地盤のヤング率 E と S 波速度 V_s には、式 (1) の関係がある。

$$E = 2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (V_s)^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ : 土の密度、 ν : ポアソン比

図 9 で示される V_r は振動数 f によって異なるが、概ね、 $f = 15 \sim 50$ Hz の範囲で $V_r = 70 \sim 90$ m/s (注入前) である。今、粘性土の数値として、 $\rho = 1400$ kg/m³、 $\nu = 0.3$ を与え、 $V_s \approx V_r$ として、式(1)に代入すると、地盤のヤング率は $E = 19000 \sim 32000$ kN/m² となり、LLT

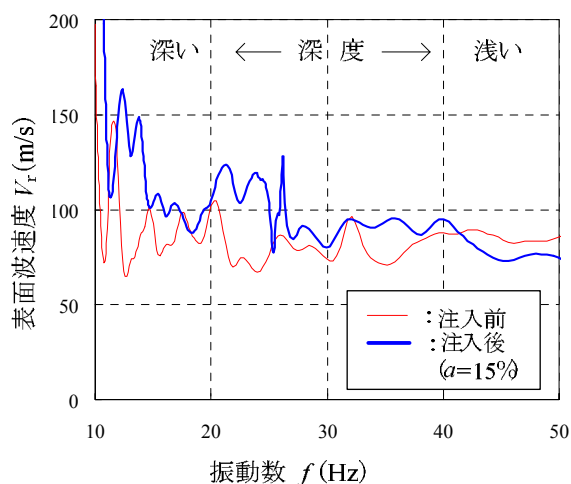


図 9 注入前後の SWE 結果の比較 (代表測点 No.1)

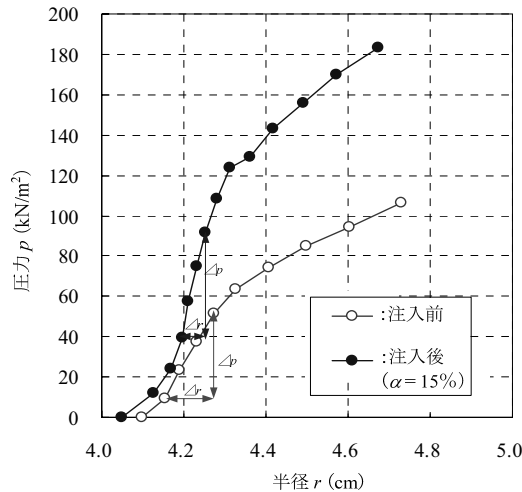


図 10 注入前後の LLT 結果（圧力－半径(変位量)の関係) の比較

表 4 LLT 結果

定 数	注入前	注入後 (α=15%)
初期圧力 p_0 (kN/m ²)	9.4	38.8
降伏圧力 p_y (kN/m ²)	41.6	52.3
極限圧力 p_1 (kN/m ²)	75.2	116.8
ヤング率 E (kN/m ²)	2000	5600

結果で求めた E よりも大きな値である。これは、両者の試験で地盤のひずみレベルが大きく異なるためである。一般に弾性波探査で求められる E は、ひずみの小さな領域 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ オーダー) で求められている。一方、LLT では孔壁周辺で $10^{-2} \sim 10^{-4}$ オーダーのひずみが発生する。このようなひずみレベルでは、変形係数が微小ひずみレベルに比べて、大きく低下することが知られている¹⁰⁾。したがって弾性波探査から求められる E を、建物の沈下予測に用いると、沈下量を過小評価する危険性があるため、注意を要する。

図 11 に今回実施した各種調査データをもとに、注入深度 1～4 m の注入前の土の粘着力 c ($=q_u/2$) と注入後の土の粘着力 c^* ($=q_u/2$) の比較を示す。なお各種調査データからの q_u の推定には、式(2)¹⁾、式(3)⁷⁾、式(4)⁷⁾、式(5)¹¹⁾を用いた。また SWS, CPT, SWE データは深さ 1 m 区間の平均値を用いた。

SWS データを用いた場合

$$q_u = 45W_{sw} + 0.75N_{sw} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 W_{sw} (kN)、 N_{sw} は、それぞれ SWS における貫入抵抗値である。

CPT データを用いた場合

$$q_u = 2(q_t + \sigma_v')/N_{kt} \quad (3)$$

ここに、 σ_v' ：鉛直有効応力、 N_{kt} ：コーン係数 (13.4 と仮定)

SPT データを用いた場合

$$q_u = 12.5N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4)$$

LLT データを用いた場合

LLT で求めた E を、 $E = 700N$ (kN/m²) の経験式から N を推定し、この N を式(4)に用いて、 q_u を推定した。

SWE データを用いた場合

$$q_u = 98 \cdot (V_s/134)^{(1/0.443)} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (5)$$

ここで、 V_s (m/s) はせん断波速度である。

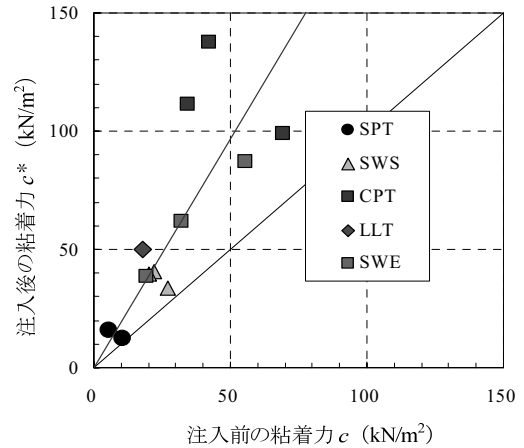


図 11 注入前後の土の粘着力の比較

図 11 からわかるように、各地盤調査データから推定した土の粘着力は、全測点とも注入前に比べて、注入後は増加した。ただし、図中に示した回帰式は、比較的大きなばらつきがあることに注意されたい。また図中に示した c, c^* は、全て地盤調査データによる推定値であるが、それぞれの調査法の特徴が表れている。例えば、SPT 結果で推定した c, c^* は、このような粘性土に対してモンケン自沈や少ない打撃数の影響により、他の調査法で推定した c, c^* より小さくなっている。一方、CPT 結果で推定した c, c^* は貫入体の先端部で貫入抵抗値を直接測定するため、他の調査法で推定した c, c^* より大きな結果が得られている。当初、土試料を採取して一軸圧縮試験を実施する予定であったが、注入後の土試料内にある割裂脈に破損が見られ、強度試験が可能な試料が確保できなかった。

複合土の強度の評価には、一般に式(6)で示すような、単純な重ね合わせで表す考え方がある¹²⁾。

$$c^* = \frac{c \cdot A_c + c_g \cdot A_g}{A} \quad (6)$$

ここに、 A_c ：粘土部分の断面積、 c_g ：注入材（割裂脈）の粘着力、 A_g ：割裂脈の断面積、 A ：全断面積

当実験で実施した最終的な注入率 ($\alpha = 15\%$) から A_c 、 A_g を評価し ($A_c = 0.85$, $A_g = 0.15$)、注入材の $q_u = 4054 \text{ kN/m}^2$ から $c_g = q_u/2 = 2027 \text{ kN/m}^2$ とし、注入前では $c = 10 \sim 70 \text{ kN/m}^2$ であることから、改良後の粘着力 c^* は、 $c^* = 312 \sim 363 \text{ kN/m}^2$ となる。すなわち、単純な重ね合わせ式である式(6)では、粘性土の割裂注入効果を過度に過大評価する。この理由は、割裂脈の方向に対する強度低減¹³⁾や、対象土量外への注入材の漏出により実際の A_g が小さくなることが考えられる。

4.3 注入率の違いによる改良効果の特性

図 12、図 13 に、注入率 $\alpha = 0, 5, 10, 15\%$ 時に実施した SWE データ (5 測点の平均値) から推定した土の粘着力 c 、地盤のヤング率 E の深度分布を示す。図 12 は、4.2 で述べたように、 V_r と f の測定から、 V_r が伝播する深度 z を推定し、その深度毎の V_r を $V_r \div V_s$ として式(5)に代入して c ($=q_u/2$) を求めている。また図 13 は、深度毎の V_r を $V_r \div V_s$ として式(1)に代入して E を求めている。よって、両図に示す c 、 E は、厳密には深度毎の c 、 E でなく、その深度までを均一層と仮定した平均的な c 、 E を表している。両図より、注入

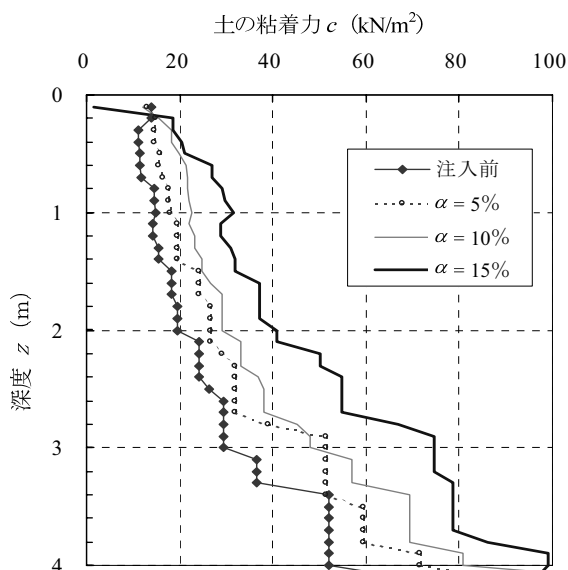


図 12 注入率毎の土の粘着力の深度分布

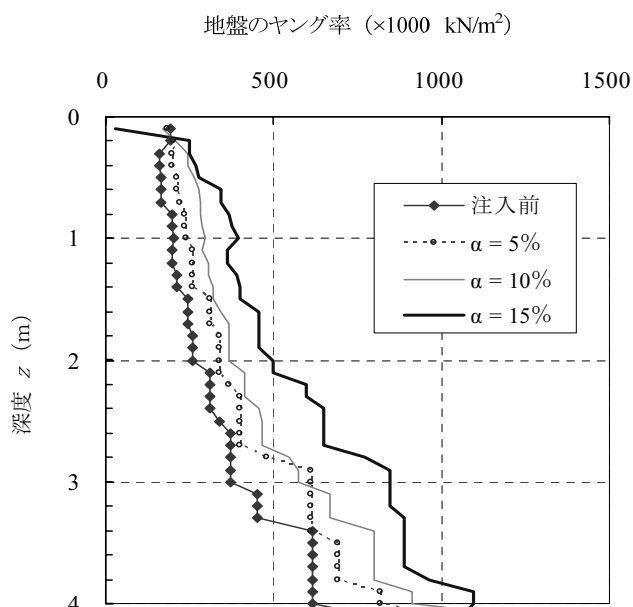


図 13 注入率毎の地盤のヤング率の深度分布

率 α が増えるにしたがって、土の粘着力 c 、地盤のヤング率 E はほぼ一様に増加することがわかった。

4.4 住宅地盤への注入工法の適用性

一般に住宅地盤では、住宅荷重の接地圧は概ね $30 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ である。すなわち、安全率を考慮すると $90 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ の極限支持力 q_d が必要である。この数値はテルツァーギの浅い基礎の支持力式で考えると、概ね $c = 18 \sim 30 \text{ kN/m}^2$ に相当する ($q_d = 5.1 \cdot c$ より)。よって今回の実験結果 (図 11, 図 12) からすると、 $\alpha = 15\%$ 以下の範囲でも、注入工法で対応できる可能性がある。

しかし、本実験結果 (図 11) では、割裂注入による改良効果は認められるものの、改良効果にばらつきが比較的大きく見られた。この改良効果のばらつきを考慮すると、注入後にその改良効果を確認

しながら実施することが重要であると言える。

なお、4.2 で示したように、割裂注入で改良された地盤を、SPT, CPT, SWS のようなサウンディングで評価すると、割裂脈と粘性土を別々に測定してしまうので、その調査箇所における割裂脈の数によっては改良効果が大きく異なってしまう。これを加味すると、サウンディングで評価する場合には、調査数量を多くする必要がある。それよりも LLT (載荷試験) や SWE (弾性波探査) のような調査法が、割裂脈と粘性土を複合的に調査できるので、割裂注入による改良効果確認に適していると言えよう。

5. おわりに

本実験では、注入工法を住宅地盤の本設工事で利用するために、粘性土地盤に注入率 $\alpha = 15\%$ までの範囲で割裂注入して、数種類の地盤調査法でその効果 (強度・変形特性) を調査した。本実験結果を以下に要約する。

- (1) 注入前後の土の粘着力 (c, c^*) を比較すると、全ての調査法で、注入前よりも注入後の方が増加した。また、注入率が増えるにしたがって、土の粘着力および地盤のヤング率はほぼ一様に増加した。
- (2) 割裂注入による地盤改良効果を確認するには、サウンディングよりも LLT (載荷試験) や SWE (弾性波探査) の方が適している。

本実験では、割裂注入による地盤改良効果は認められるものの、その効果のばらつきは比較的大きかった。注入工法を住宅地盤に適用するには、現時点では、注入効果を施工後に確認しながら利用することが適切だと言えよう。また本実験では、割裂脈の強度を高めるために仮設注入材料である LW 液を用いて実験しており、この耐久性についても見極める必要がある。

今後は、さらに実験データを蓄積して当工法の適用性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：小規模建築物基礎設計指針，2008。
- 2) 長坂光泰，菅澤才幸，檜田智之：特殊小型機による狭隘地での地盤補強施工例，基礎工，Vol.36，No. 3，pp.49～52，2008。
- 3) 高田徹，岡野泰三，平崎毅，今井敬介：割裂注入による地盤改良効果に関する原位置試験 (その 1，その 2)，第 43 回地盤工学研究発表講演集，pp.957-960，2008。
- 4) 高田徹，岡野泰三，平崎毅：注入による戸建て住宅の不同沈下修正工事例，基礎工，Vol.36，No. 5，pp.82～84，2008。
- 5) 日本グラウト協会：薬液注入工 設計資料 (平成 16 年度版)，2004。
- 6) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会：最新地盤注入工法技術総覧，1997。
- 7) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2004。
- 8) 黒須修，藤井衛：表面波探査法によるレーリー波速度とスウェーデン式サウンディング試験結果との関係，日本建築学会大会学術講演集，pp.1629～1630，1993。
- 9) F.E.リチャード Jr, J.R.ホール Jr, R.D.ウッズ：土と基礎の振動 - 地盤振動の基本的知識 -，鹿島出版会，pp.118～125，1975。
- 10) Atkinson, J.H.: Non-linear soil stiffness in routine design, Géotechnique, Vol. 50, No. 5, pp. 487～508, 2000。
- 11) 土質工学会：土質調査法，1985。
- 12) 地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工，2009。
- 13) 森麟，田村昌仁，小峰秀雄：薬液注入による粘性土の改良のメカニズムとその支配条件，土木学会論文集，Vol.24, No.400/III-10, pp.55～64，1988。

[2009 年 9 月 25 日原稿受理 2009 年 12 月 4 日採用決定]