

溶液型薬液注入工法により改良された地盤の 事後調査方法の選定

秋本 哲平¹・林 健太郎²・善 功企³・
長津 辰男⁴・山本 敦⁵・車田 佳範⁶

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: teppei.akimoto@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kentaro.hayashi@mail.penta-ocean.co.jp

³ フェロー会員 沿岸技術研究センター (〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2 新橋エス・ワイビル 5F)

⁴ 五洋建設(株) 土木本部 土木部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁵ 正会員 五洋建設(株) 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁶ 正会員 五洋建設(株) 土木本部 土木部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

溶液型薬液注入工法の1つである浸透固化処理工法によって改良された地盤の強度は、一軸圧縮強さ $q_u=100\text{kN/m}^2$ 程度であり、軟弱地盤の地盤改良としては低強度であるため、事後調査時の乱れの影響で過小に評価されることが懸念されている。乱れの影響を抑制できる改良地盤の評価方法として、原位置試験による一軸圧縮強さの推定も検討されているものの、実際に適用する際の選定条件は明確になっていない。本研究は、事後調査としてサンプリング試料による一軸圧縮試験が実施された結果を分析することにより、事後調査方法を選定する際の条件について検討するものである。検討結果から、サンプリング試料の一軸圧縮試験による評価は、礫分含有率15%以下、平均粒径1mm以下、試料採取率75%以上において適用可能と考えられる。

Key Words : *quality assurance, permeable grouting method, sampling, unconfined compression test, effect of disturbance*

1. はじめに

既設構造物直下の液状化対策工法として、溶液型薬液注入工法の1つである浸透固化処理工法が広く適用されている。この工法は、浸透性の高い溶液型の薬液を低圧で地盤内に注入し、間隙水を薬液で置き換えることによって地盤を改良する工法である。土粒子骨格を壊すことなく地盤を改良でき、周辺地盤への影響が極めて小さいことから、既設構造物直下の液状化対策に適しており、多くの構造物に適用されている¹⁾。

液状化対策として地盤改良を実施する場合、改良地盤には、地震によって発生する最大せん断応力比(L_{max})以上の液状化強度比(RI_{20})が要求される。浸透固化処理工法では、室内試験で RI_{20} と一軸圧縮強さ(q_u)の関係を算定し、設計基準強度として q_u を設定することが一般的であり、改良後の地盤の品質確認も q_u で評価されている¹⁾。浸透固化処理工法の設計基準強度は、想定される地震動によって異なるものの、概ね 100kN/m^2 程度であり、軟弱地盤の改良強度としては低強度である。

一方、液状化対策が必要となる砂質地盤は、間隙が大きい緩く堆積した地盤が多い。また、液状化対策としての適用実績が多い港湾や空港等の埋立によって造成された地盤は、砂質地盤に礫や貝殻等が不均質に堆積しており、木くず等の異物が混入していることもある。

浸透固化処理工法の品質は、改良地盤にてサンプリングした試料の一軸圧縮強さで評価される。しかしながら、不均質に堆積し、低強度に改良された地盤から乱れの少ない試料を採取することは困難であり、サンプリング、試料運搬および試料成形時等の機械的な乱れの影響で、改良強度が過小に評価されることが懸念されている。近年、乱れの影響を抑制するために、孔内載荷試験や動的コーン貫入試験といった原位置試験結果に基づく評価方法が提案されている²⁾ものの、適用事例はわずかであり、適用条件も明確になっていない。

本研究では、これまで施工された現場のサンプリング試料による品質確認結果から、サンプリングによる評価の適用限界を明らかにすることで、溶液型薬液注入工法における事後調査方法を選定する際の条件を提案する。

2. 土の物理的特性と試料採取率

浸透固化処理工法における事後調査での試料採取(材令28日)は、砂質地盤で乱れの少ない試料採取が可能であるロータリー式三重管サンプラー(JGS1223)を標準としている¹⁾。そのため、まずはこの方法で採取した際の試料採取率について検討を行った。ここで、試料採取率とは、サンプラーの押込み長さに対する試料採取長を示している。ただし、明らかに崩壊している試料は採取長として計上していない。

(1) 検討内容

浸透固化処理工法によって改良された地盤の品質確認(事後調査)のために、ロータリー式三重管サンプラー(以後、トリプルサンプラー)によって試料採取が行われた16現場の試料採取率を算定し、各現場の土の物理的特性と比較した。比較した土の物理的特性は、試料採取率に影響を及ぼすと考えられる、礫分含有率、最大粒径、平均粒径 D_{50} 、均等係数 U_c 、細粒分含有率 F_c である。なお、土の物理的特性は、地盤改良前の事前調査時の結果を使用している。

(2) 検討結果

土の物理的特性と試料採取率の関係を図-1~5に示す。それぞれの関係における相関係数を表-1に示す。試料採取率と最も相関が高いのは礫分含有率であり、次に最大粒径、平均粒径 D_{50} となった。均等係数 U_c や細粒分含有率 F_c は試料採取率にほとんど影響を与えないことがわかる。粒径の大きな土粒子が多く含まれている場合、サンプラーの先端で大粒径の土粒子と接触して掘進不能となるか、土粒子が振動もしくは移動することによってサンプリング試料の周囲が乱され、試料を回収することができなかったと考えられる。なお、礫分含有率の相関係数は0.95、最大粒径と平均粒径 D_{50} の相関係数は0.86であり、これら3つの物理的特性の相関性が高いことは、それぞれの相関係数からも明らかである。

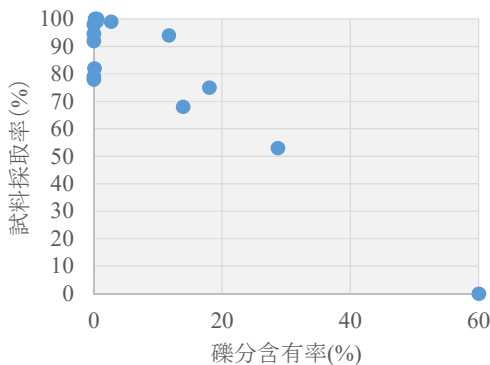


図-1 礫分含有率と試料採取率の関係

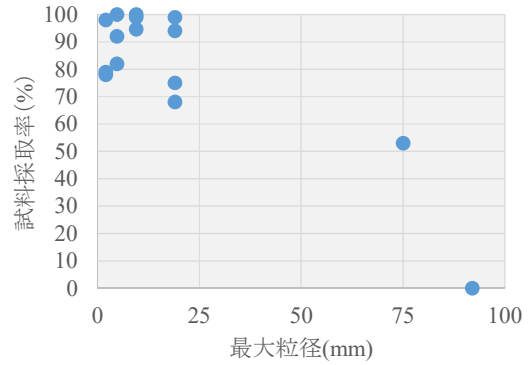


図-2 最大粒径と試料採取率の関係

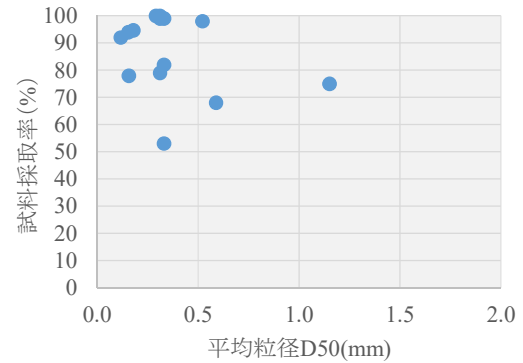


図-3 平均粒径 D_{50} と試料採取率の関係

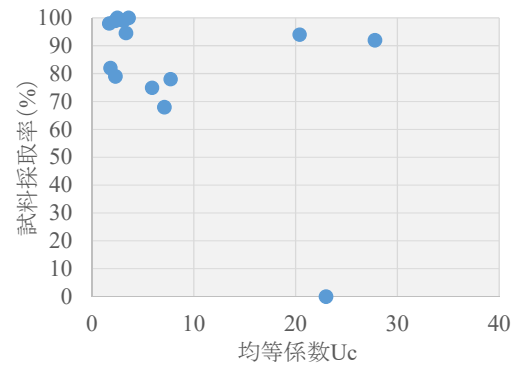


図-4 均等係数 U_c と試料採取率の関係

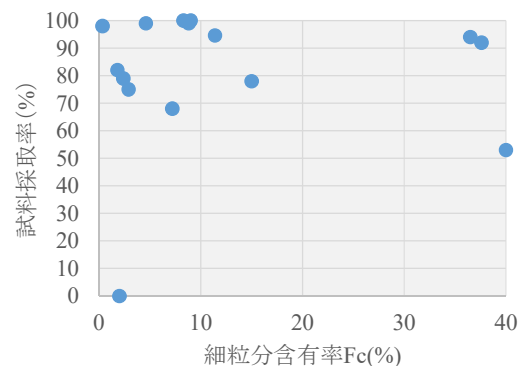


図-5 細粒分含有率 F_c と試料採取率の関係

表-1 試料採取率との相関係数

礫分含有率	最大粒径	平均粒径	均等係数	細粒分含有率
0.95	0.86	0.86	0.33	0.04

3. 試料採取方法の比較

浸透固化処理工法の事後調査で一般的に実施されるトリプルサンプラーによる試料採取（以後、トリプルサンプリング）以上に乱れの少ない試料採取が可能な方法として、高品質サンプリングがある³⁾。

高品質サンプリングのうち、泥水の噴出方法を工夫した方法である固定ピストン式ロータリー二重管サンプラー（以後、GS サンプラー）による試料採取（以後、GS サンプリング）を、上記の16現場のうち2現場（地点A・B）にて実施している。溶液型薬液注入工法の事後調査での高品質サンプリングの適用を検討するため、同じ現場内で実施したGSサンプリングとトリプルサンプリングでの事後調査の比較を行った。なお、両サンプリングの実施者は異なるものの、試料運搬、試料成形および一軸圧縮試験は同条件で実施している。

(1) 試料採取箇所

地点Aと地点Bは、ともに礫分含有率10%以上、最大粒径が19mm以上であり、トリプルサンプリングが困難と想定される地盤であった。トリプルサンプリング箇所とGSサンプリング箇所の平面的な離隔は、両現場とも2m以内であり、採取深度も同様であることから、土の物理的特性に大きな違いはないものと想定される。

(2) 試料採取方法

図-6にトリプルサンプラー⁴⁾、図-7にGSサンプラー⁵⁾の構造図を示す。トリプルサンプラーは、アウターチューブ、インナーチューブ、ライナーの三重管からなるサンプラーであり、硬さが中位以上の粘性土や締まりの程度が中位以上の砂質土を対象に乱れの少ない土試料を採取する方法である。GSサンプラーは、アウターチューブ（外管）とインナーチューブ（内管）の二重管からなるサンプラーに固定ピストンを組み合わせたものであり、礫質土を含む幅広い土質で乱れの少ない試料を採取することが可能な方法である。固定ピストンは中間ロッドによって地表部で固定されており、内管は透明アクリル管を用いている。内管と固定ピストンとの間に摩擦が働くことで、外管回転時の内管の共回りを防止している。また、内管内は固定ピストンによって真空に保たれるため試料の脱落が防止される。さらに、掘削時の送水圧が直接採取試料に影響しないように循環水の出口がビット側面に設けられている。

(3) 検討結果

図-8にトリプルサンプリングとGSサンプリングの試料採取率を示す。試料採取率は、GSサンプリングの方

が地点Aで19%、地点Bで32%高い値を示した。地点A（礫分含有率14%）においては、全採取深度で同じ土質分類であったものの、下部に礫が多く存在しており、上部にはほとんど礫が入っていなかった。上部では、試料採取率にほとんど違いがみられなかったものの、礫の多い下部の試料採取率は、トリプルサンプリングが45%、GSサンプリングが82%であり、37%の違いがみられた。

トリプルサンプラーは、先端の刃がビットとシューの二層構造となっており、切削能力のないシューに大粒径の土粒子が接触すると、掘進不能となるが、シューとビッ

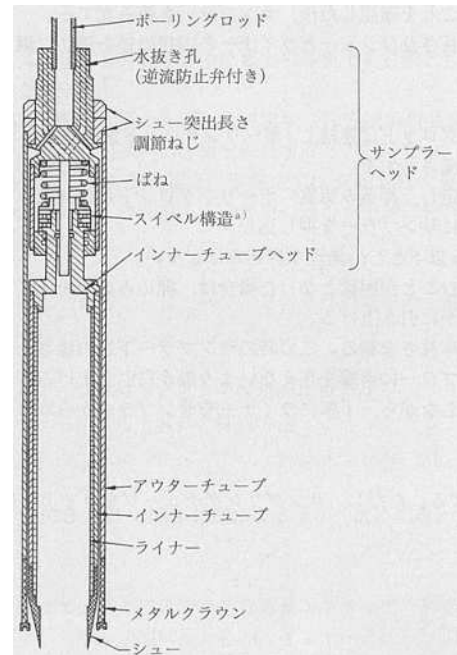


図-6 トリプルサンプラー⁴⁾

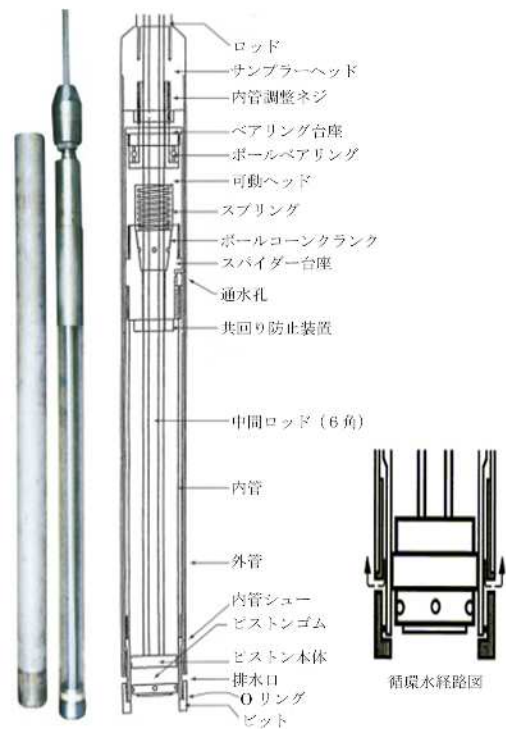


図-7 GSサンプラー⁵⁾

トの間で土粒子が移動して試料が攪乱されるため回収できず、試料採取率が低下したと考えられる。

一方、GS サンプラーは、先端の刃は強力な切削能力のあるビットのみであるため、大粒径の土粒子は、切断されるか、もしくは内か外に区分されるのみで、先端での移動量が大きくないため、試料を回収することができたと考えられる。また、脱落防止や循環水の出口の工夫も試料採取率向上に影響していると考えられる。

図-9 にトリプルサンプリングと GS サンプリングの試料による強度比を示す。ここで、強度比とは、現場での採取試料による一軸圧縮試験結果の平均値 (平均 q_u) と設計基準強度 (設計 q_u) の比 (平均 q_u /設計 q_u) を示したものである。浸透固化処理工法の薬液濃度は、施工前に実施される現地試料での室内配合試験によって決定され、配合目標強度は、実績等から設計基準強度の 2 倍となっている。配合試験時の強度と比較して現場採取試料での強度が低下する要因は多々考えられるものの、主な要因は、ゲルタイムと注入時間の差による薬液の希釈とサンプリングに伴う乱れの影響といわれている⁶⁾。薬液の希釈による影響を考慮することは困難であるが、近年ゲルタイム管理がより厳密になっている状況⁷⁾を踏まえると、希釈による低下割合は少ないと想定されるため、平均 q_u と設計 q_u の比から算定される強度比は、サンプリングに伴う乱れの影響を多分に含んでいるものと考えられる。したがって、強度比が 1.0 以上となっている場合、サンプリングによる乱れの影響はあるものの、想定よりも大きな乱れは生じていないものと考えられる。

強度比は、GS サンプリングの方が地点 A で 0.3、地点 B で 0.1 高い結果となったが、試料採取率に比べてサンプリング方法の違いによる差が小さくなっている。これは、採取できた試料で作製した供試体の品質には大きな違いがないことを示している。礫分含有率が低い箇所では、両サンプリングとも試料採取が可能であり、試験結果も概ね同様である。しかし、地点 A 下部のように全採取深度で大粒径の土粒子が多く存在する場合は、トリプルサンプリングでは事後調査に必要な試料が採取できない可能性があるため、高品質サンプリングを使用することが非常に有効である。また、仮に一軸圧縮試験ができない程度の乱れがあった場合でも、試料採取さえできていればシリカ含有量試験によって一軸圧縮強さを推定する⁸⁾ことも可能である。

4. サンプリング試料による評価

上記と同様の 16 現場の一軸圧縮試験結果から強度比を算定し、トリプルサンプリング試料による一軸圧縮試験での評価について検討を行った。

(1) 検討内容

強度比の算定方法は上記と同様であり、強度比が 1.0 以上であれば想定よりも大きな乱れが発生していないものと考えられる。試料採取率と強度比の関係を確認し、採取箇所の土の物理的特性 (礫分含有率、最大粒径、平均粒径 D_{50} 、均等係数 U_c 、細粒分含有率 F_c) と強度比を比較することにより、サンプリングによる乱れを受けやすい土の物理的特性を確認した。

(2) 検討結果

図-10 に試料採取率と強度比の関係を示す。相関係数は 0.67 であり、試料採取率が高いほど強度比が高くなる傾向にある。試料採取率が 75% 以下の場合、強度比が 1.0 以下となる可能性がある。

図-11 に礫分含有率と強度比の関係を示す。礫分含有率 15% 以下においては、強度比との相関係数が 0.25 と低くなっており、バラツキがみられるものの、強度比 1.0 以上が得られている。一方、礫分含有率が 15% 以上においては、強度比が 1.0 以下となる傾向がみられる。なお、細粒分含有率 $F_c \approx 40\%$ のケースでは、礫分含有率が 15% 以上でも強度比 1.0 以上となっているケースもみられた。

図-12 に細粒分含有率 F_c と強度比の関係を示す。事前検討なく本工法の適用が可能と判断される $F_c < 20\%$ にお

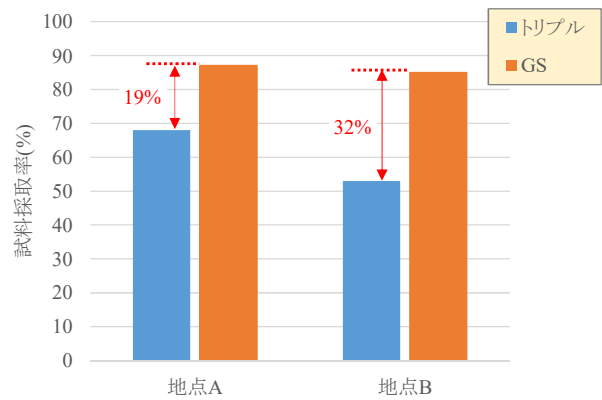


図-8 採取方法による試料採取率の比較

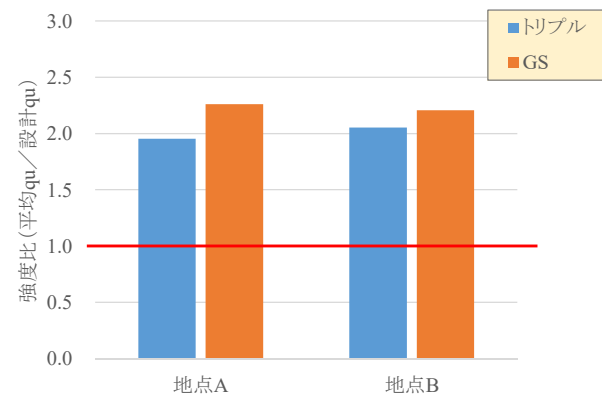


図-9 採取方法による強度比の比較

いては、強度比との相関性がみられなかった。なお、 $F_c=40\%$ 付近においては強度比が高い傾向を示しているが、 F_c の高い地盤では、大粒径の土粒子が減少する傾向にあるため、サンプリング時の乱れの影響が低減された可能性がある。

図-13に平均粒径 D_{50} と強度比の関係を示す。礫分含有率の増加に伴い平均粒径も増加する傾向にあるため、礫分含有率と概ね同様の相関係数となっており、 D_{50} が 1.0mm 以上において強度比は 1.0 以下となった。

図-14 に最大粒径と強度比の関係を示す。最大粒径と試料採取率とは相関のある関係であったが、強度比との相関は低くなった。粒径 20mm 程度以上の大きな土粒子が削孔先端のシュエーに接触すると掘進不能となり試料採取ができなくなるものの、採取できた試料の乱れに及ぼす影響は小さいため、最大粒径と強度比の相関係数が低くなったと考えられる。

表-2 に強度比と土の物理的特性との相関係数を示す。礫分含有率と平均粒径 D_{50} は強度比とやや相関のある関係であり、その他の物理的特性は相関性の低い結果となった。

未改良土における採取試料の乱れの判定は、粘性土であれば変形係数 E_{50} によって可能であり、式(1)によって算定される α で評価される⁹⁾。

$$E_{50}/(q_u/2) = \alpha \quad (1)$$

文献2)では薬液改良土も変形係数が低下するとされていることから、地点A、地点B並びに強度比が 1.0 以下

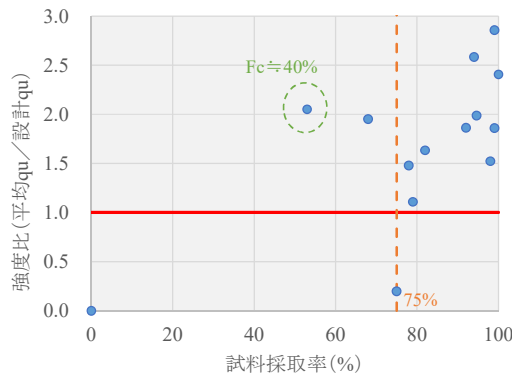


図-10 試料採取率と強度比の関係

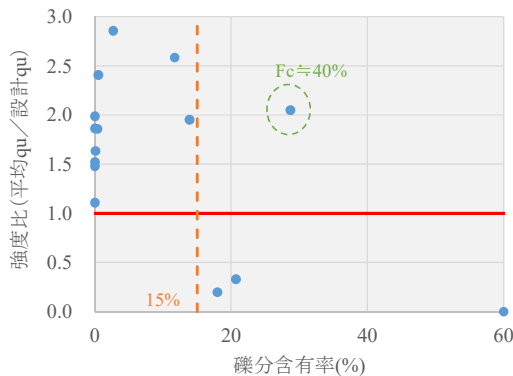


図-11 礫分含有率と強度比の関係

となる地点Cの3地点における α を算定した(表-3)。3地点の α から、地点Aが乱れの影響が少なく、地点Bと地点Cが乱れの影響がある試料と想定される。地点AとBの強度比は同等であるものの、 α には違いが見られた。これは、地点Bの細粒分含有率が高いため、破壊ひずみが増加していることに起因するものと考えられる。地点Aの平均破壊ひずみは 1.0% であり、地点Bの平均破壊ひずみは 3.5% であった。薬液により改良された砂質土は、

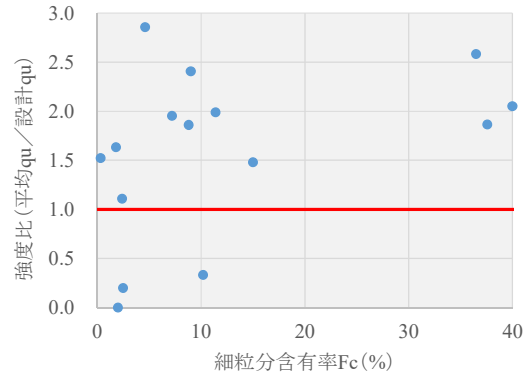


図-12 細粒分含有率 F_c と強度比の関係

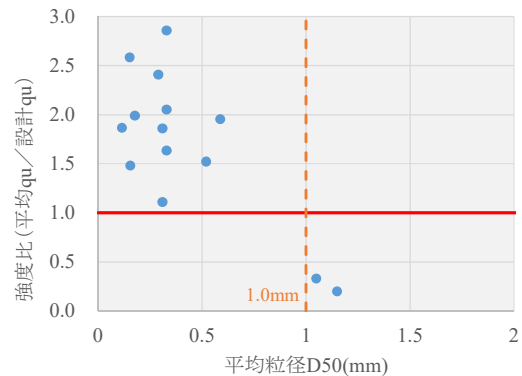


図-13 平均粒径 D_{50} と強度比の関係

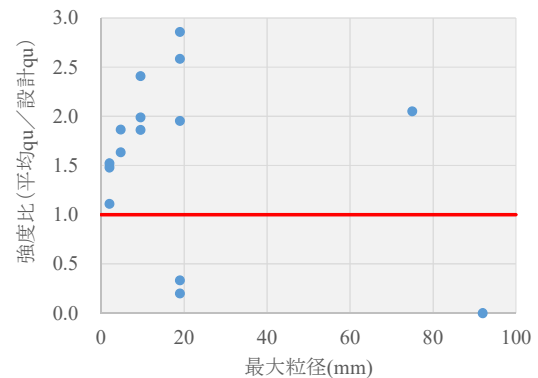


図-14 最大粒径と強度比の関係

表-2 強度比と物理的特性の相関係数

礫分含有率	最大粒径	平均粒径	均等係数	細粒分含有率
0.57	0.34	0.60	0.08	0.33

表-3 3地点における α 算定結果

	地点A	地点B	地点C
α	408	118	136

砂質土の間隙を薬液で満たした固化体であり、本質的に粘性土とは粒子構造が異なり、変形係数の低下が少ない微細なクラックによる強度低下も考えられるなど、今回のデータを整理した範囲では、変形係数や α によって乱れの影響を判断することは困難であった。

5. おわりに

溶液型薬液注入工法によって改良された地盤の評価方法は、サンプリング試料の一軸圧縮強さでの評価、もしくは原位置試験結果より推定された一軸圧縮強さでの評価に大別される。本研究は、事後調査方法を選定する際の条件設定を目的として、16現場の事後調査結果について分析を行い、以下のような知見を得た。

- ① 標準的に行われるトリプルサンプリングによる試料採取率は、対象地盤の礫分含有率や平均粒径と高い相関がある。
- ② 高品質サンプリングは、トリプルサンプリングに比べて、供試体の品質に大きな差はみられないものの、試料採取率は高くなる。
- ③ 礫分含有率が15%以上、平均粒径が1.0mm以上もしくは試料採取率が75%以下の地盤では、トリプルサンプリング試料の一軸圧縮強さは、サンプリング等の乱れの影響により過小評価となる可能性がある。

以上より、礫分含有率が15%以下、平均粒径 D_{50} が1mm以下および試料採取率が75%以上であることが、事後調査方法としてサンプリング試料による一軸圧縮試験を選定する目安になると考えられる。また、本条件に該当しないような場合は、原位置試験による方法等の採用を検討することが考えられる。

本研究は、平均 q_u /設計 q_u から算定した強度比によって評価したものであり、サンプリングによる乱れの影響を多分に含んでいるものの、薬液の希釈の影響も含まれていると考えられる。今後、更なる詳細データの蓄積および分析を行い、配合強度と現場強度の違いや乱れの主要因を明らかにするとともに、乱れの影響を防止した強度評価手法について検討していきたい。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（2010年版），2010.
- 2) 菅野高弘，善功企，末政直晃，春日井康夫，山崎浩之，林健太郎，澤田俊一，遠藤敏雄，加藤幸輝，中川大，規矩大義，山口恵美，藤井紀之，馬場香奈江，藤井照久，高田圭太：液状化対策として薬液を注入した地盤の原位置調査による強度評価法，港湾空港技術研究所資料，No.1366，2020.
- 3) 渡部要一，金子崇，佐々真志：サンゴ礫混じり土の力学特性－高品質試料のせん断特性に対する支配パラメーター，港湾空港技術研究所報告，Vol.55，No.3，p.9，September 2016.
- 4) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.244~246，2013
- 5) 稲垣光艶，前田正志，成迫法之，平井孝治：固定ピストン式二重管サンプラー（GS サンプラー）による砂質土のサンプリング品質について，全地連「技術フォーラム2014」秋田.
- 6) 沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（2010年版），p.107，2010.
- 7) 国土交通省：薬液注入工法による地盤改良工事に係る地盤改良効果の調査方法等について，事務連絡，平成29年8月1日.
- 8) 沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（2010年版），p.112，2010.
- 9) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p.213，2013.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

SELECTION OF TEST METHOD FOR QUALITY ASSURANCE OF GROUND IMPROVED BY PERMEABLE GROUTING METHOD

Teppei AKIMOTO, Kentaro HAYASHI, Kouki ZEN, Tatsuo NAGATSU, Atsushi YAMAMOTO and Yoshinori KURUMADA

The unconfined compressive strength (UCS) of the sandy ground improved by the Permeable Grouting Method is usually set to about 100 kN/m² of the UCS. Since the strength reveals rather lower value than that of the clayey improved ground, it is concerned that the strength could be underestimated due to the disturbance of samples during sampling. To avoid the effect of disturbance, in-situ tests, as alternative methods, are proposed to use for estimating the unconfined compressive strength. However, in actual application, the conditions to select the method for quality assurance have not been clarified so far. In this study, an analysis on the UCS of core samples is carried out to study the conditions for selecting methods in quality assurance. The results show that the unconfined compression test using undisturbed samples is applicable to the evaluation of the improved ground with the gravel content of 15 % or less and the average particle size of 1 mm or less. In this case, it is noted that the specimen obtained from the sample with the sampling rate of 75 % or more should be used.