

砂礫地盤への浸透固化処理工法の適用

- 苫小牧港勇払埠頭地盤改良工事 -

河村 健輔* 三根 範俊**
後藤 克人*** 中井 共成***
北郷 仁彦*

要 旨

本論文は、苫小牧港勇払埠頭における既設矢板岸壁背後地盤の土圧低減を目的とした地盤改良に、浸透固化処理工法を適用するに当たり、事前に行った試験工事の結果について取りまとめている。特に、施工位置の地盤が砂礫～礫混じり砂～細砂といった礫分を多く含む土質であるため、本工法の適用性、改良効果の調査方法について検討を行った。試験工事の結果、礫分を含んだ地盤に対しての浸透固化処理工法の適用性が確認でき、改良効果の評価手法として、従来方法とは異なる新たな事後調査方法を確立できた。

1. はじめに

浸透固化処理工法は、既設構造物直下の液状化対策工法として、旧運輸省港湾技術研究所との共同研究のもとで開発された。1998年に東京国際空港新B滑走路地盤改良工事¹⁾に採用されてから、現在までに20件を超える施工実績があり、砂質地盤の液状化対策として非常に有効な工法である。本工法の原理は、恒久型の水ガラス系薬液を砂質地盤に浸透注入し、土粒子間隙にある間隙水をゲル状の固化体に置換することである。そのため、砂質地盤は粘着力を付加され、一軸圧縮強さが $q_u=50\sim 100\text{kN/m}^2$ 程度になることにより、地盤の液状化強度が増進する。



写真 - 1 本工事工区全景

一方、最近では、液状化対策以外の改良目的として地震時の土圧低減²⁾や支持力増加などを目的とした地盤改良に本工法が使用されるケースが見られるようになった。また、礫分を含んだ砂礫地盤への適用性についての検討も増えている。苫小牧港勇払埠頭工事において、浸透固化処理工法の砂礫地盤への適用性について、事前に試験工事を行い、施工仕様の検討、事後調査方法の検討を実施し、改良効果の検証を行った。本論文は、この試験工事の結果を中心とし、砂礫地盤への本工法の適用性について取りまとめている。

2. 工事の概要

2.1 本工事の概要

本工事は、北海道苫小牧市西港区勇払埠頭にある控え矢板式鋼矢板岸壁(-12m)の地震時土圧低減を目的とした岸壁背後の地盤改良工事である。写真-1に示す本岸壁は、稼働率が非常に高いコンテナ埠頭であり、施設の撤去および使用停止が不可能である理由から、供用しながら施工可能である浸透固化処理工法が採用された。

表-1に本工事の概要を、図-1に本工事の施工標準図を、図-2に施工区域の土質状況を示す。本岸壁は、掘込み式港湾であるため、施工区域の地盤は、埋立土ではなく自然体積地盤であり、図-2に示すように、礫分

*技術研究所 **リニューアル事業部 ***札幌支店

表 - 1 本工事の概要

工事名称	苫小牧港西港区勇弘埠頭-12m岸壁改良工事
発注者	北海道開発局 室蘭開発建設部
工期	2001.9.12 ~ 2002.3.25
改良土量	2,980 m ³
改良強度	$q_{u\text{ ave}}=100\text{kN/m}^2$ 、 $q_{u\text{ min}}=50\text{kN/m}^2$

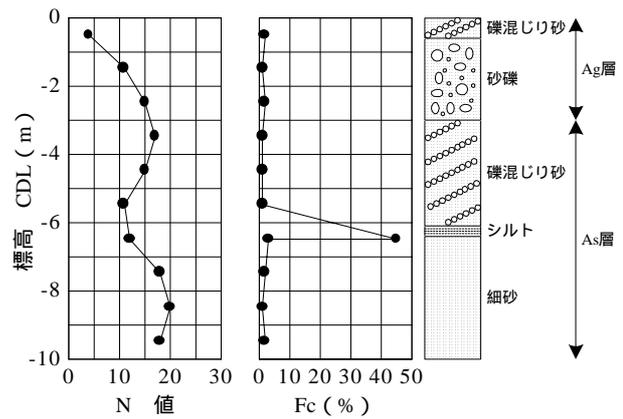


図 - 2 土質柱状図

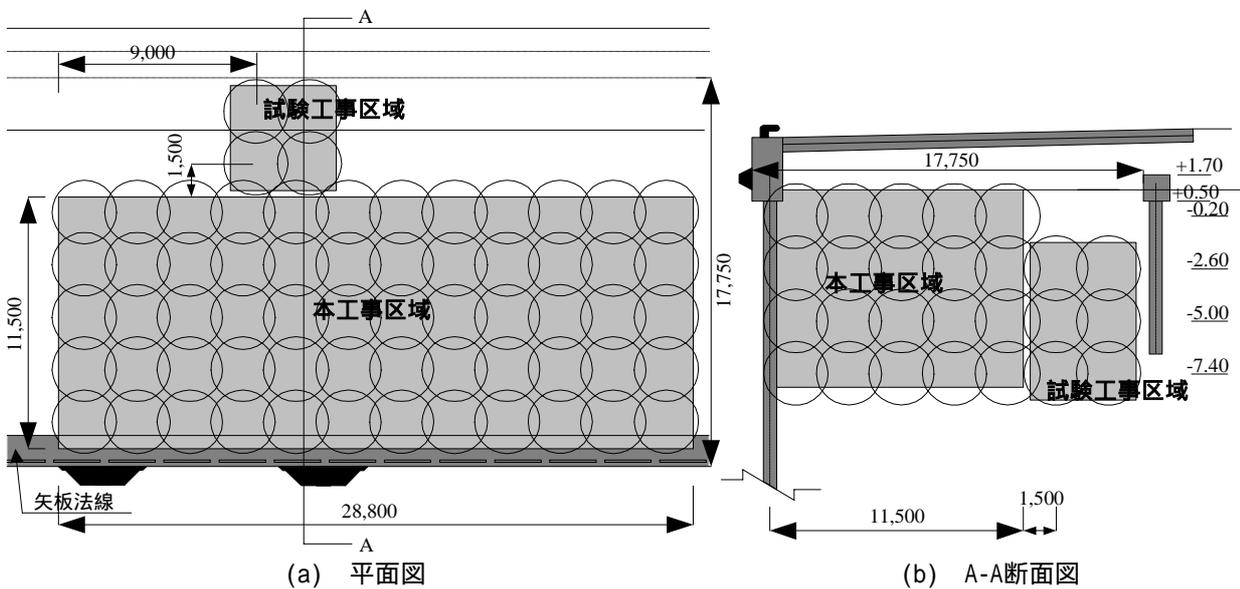


図 - 1 本工事施工標準図

が多く混入した砂礫土と細砂を主体とする砂質土から成る複雑な土質状況を呈している。浸透固化処理工法の適用性に最も影響する細粒分含有率(F_c)は、平均で $F_c=2\%$ と非常に低い。また、礫分含有率は最大で約50%である。

2.2 試験工事の概要

図 - 2 に示すような砂礫土への浸透固化処理工法の適用事例はないため、事前に試験工事を行い、均質な改良体の施工、所定の改良強度の確認など改良効果について検証する必要があった。試験工事を行うにあたり、事前に検討すべき事項は以下の通りである。

2.2.1 配合試験による薬液の選定

表 - 1 に示す原位置改良強度 $q_{u\text{ ave}}=100\text{kN/m}^2$ を満足する薬液およびその濃度を選定するために、砂礫土である現地土質を用いた配合試験を実施した。配合試験での目

標強度は、過去の施工実績から強度発現率(現場/室内強度比) =60%、安全率 $F_s=1.2$ と設定し、 $q_{uL}=200\text{kN/m}^2$ となる。また、図 - 2 に示すように、原地盤が砂質土と砂礫土に分けられるため、各々の土質で配合試験を実施した。配合試験に使用した薬液³⁾は、シリカ系溶液型薬液のエコシリカ、エコシリカの2種類である。図 - 3 に配合試験の結果を示す。結果から、 $q_{uL}=200\text{kN/m}^2$ を満足する薬液およびその濃度は、砂礫土でエコシリカの7.0%、砂質土でエコシリカの5.0%となった。

2.2.2 均質な改良体の施工

本工法は、先に述べたように、薬液の浸透注入による改良原理に基づいているため、原地盤の透水性が不均一であると、その影響を受け、不均質な改良となる可能性がある。本工事のように、砂質土、砂礫土が混在していると、薬液は透水性のよい砂礫土に浸透しやすくなり、

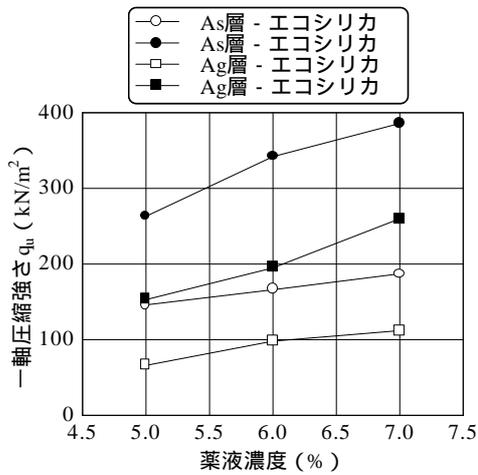


図 - 3 配合試験結果

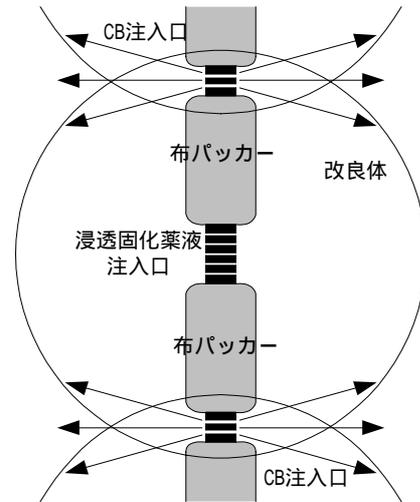


図 - 4 CB注入口配置図

透水性の劣る砂質土には浸透しにくくなる傾向がある。そのため、事前に地盤の透水性を均質にする補助工法を併用する必要があった。そこで、本工事では、事前注入として、図 - 4 に示すように注入管の浸透固化薬液注入口の間に別途注入口を設け、そこから 500 リットル/箇所 (注入率で約 5%) のセメントベントナイト (CB) を最大注入圧力 0.5MPa で、地盤内に注入した。それにより、砂礫土の透水性を低下させ、均質な改良体の施工を可能とした。

2.2.3 砂礫土の改良効果の事後調査方法

通常の改良効果の確認方法は、不攪乱試料をサンプリングし、一軸圧縮試験を実施して、改良土の一軸圧縮強さを直接測定する。ところが、この方法では、サンプリング時の試料の乱れの影響を受けるため、強度の評価にバラツキが生じる可能性がある。また、本工事のような砂礫土の場合、サンプリングが困難であり、サンプリングができて砂質土以上にサンプリングによる品質の低下が著しく、改良効果の適正な確認は不可能である。そこで、本工事では、新たな事後調査方法として、以下の方法を採用した。

1つの方法は、原位置試験である孔内水平載荷試験⁴⁾である。孔内水平載荷試験を用いた粘性土や砂質土の強度の推定は、既往の研究もあり、関係式等が提案されている⁵⁾。しかし、固化処理土のような粘着成分と摩擦成分の両方を有するいわゆる c-材についての検討はなされていなかった。しかし、近年になり、固化処理土の圧密降伏応力に着目した強度の推定が提案^{6), 7)}されており、孔内水平載荷試験から求められる降伏圧と固化処理土の強度定数との関係について考察されている。そこで、本

表 - 2 試験工事の施工仕様

改良範囲	2列×3段
改良土量	170m ³
改良径	3.0m
改良ピッチ	2.4m
注入率	40%
注入速度	13リットル/min
備考	事前にCBを注入

試験工事において、浸透固化処理工法による改良効果の評価方法として、孔内水平載荷試験の適用性について検証を行った。

もう1つの方法は、シリカ含有量試験⁸⁾である。浸透固化処理工法において使用する薬液の固化成分は、シリカ (SiO₂) を主体としており、改良強度は、注入される薬液の濃度に依存する⁹⁾。したがって、薬液の濃度と改良強度に相関性があり、薬液の濃度を測定することにより改良強度を推定できると考えられる。本試験工事において、薬液の主成分であるシリカ (SiO₂) の含有量と改良土の一軸圧縮強さ q_u の相関性を調査し、過去の事例との比較を行い、シリカ含有量から q_u の換算式について検証を行った。

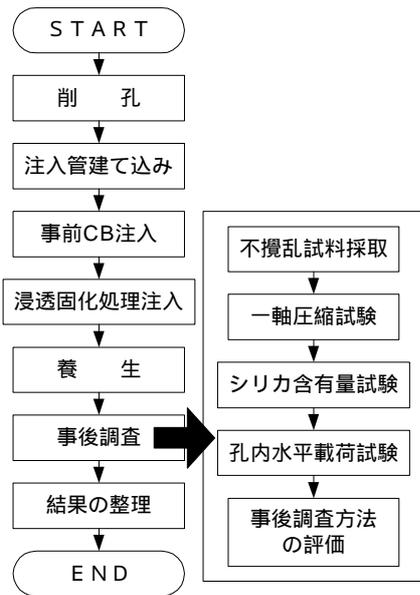


図 - 5 試験工事のフロー

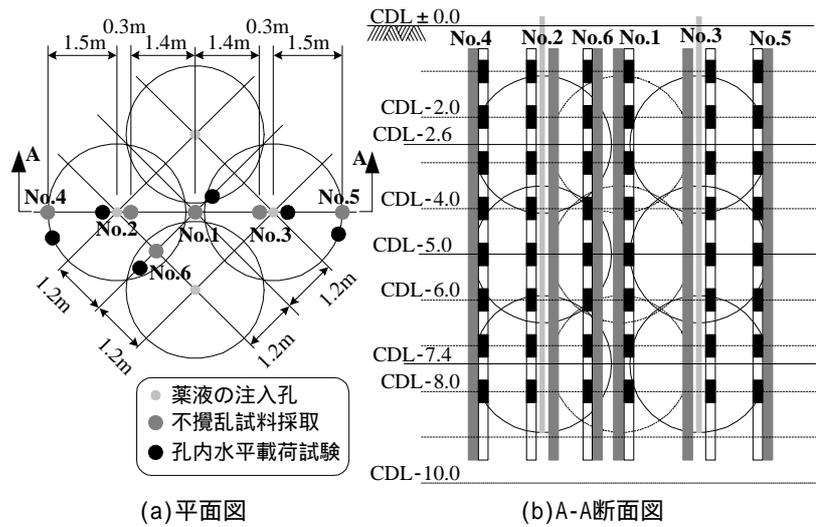


図 - 6 試験工事施工標準図

2.2.4 試験工事のフロー

以上の検討を行うことを前提として、試験工事を実施した。表 - 2 に施工仕様を、図 - 5 にフローを、図 - 6 に施工標準図を示す。

3. 試験工事の結果

3.1 事後調査結果

3.1.1 不攪乱試料の一軸圧縮試験結果

図 - 6 に示す不攪乱試料採取位置でロータリー式三重管サンプラーにより、不攪乱試料を採取し、一軸圧縮試験を実施した。深度方向の改良後の q_u の分布を図 - 7 に、A-A 断面において得られた q_u のコンター図を図 - 8 に示す。図より、改良範囲内において、多少のバラツキはあるが、良好な改良効果が得られていることがわかる。ただし、改良範囲内の CDL-3.0m より上部の部分が空白となっているのは、その部分が特に礫分の多い砂礫層であることから、試料を採取できなかったためである。

3.1.2 孔内水平載荷試験結果¹⁰⁾

孔内水平載荷試験の降伏圧 P_y' に着目し、改良土の一軸圧縮強さ q_u との相関性について調査した。試験は、不攪乱試料の一軸圧縮試験と比較する必要があるため、図 - 6 に示すように、不攪乱試料採取の位置とお互いに影響を及ぼさないように、水平に 50cm 程度離れた位置で行っている。これは、ボーリング孔径の違いから同一孔で試験を行うことできないためである。また、孔内水

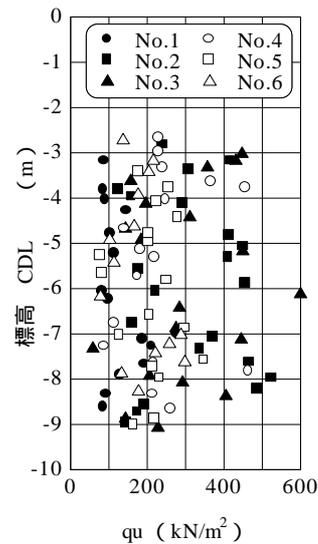


図 - 7 q_u 深度分布図

平載荷試験は、LLT 方式¹¹⁾と呼ばれる装置を使用した。図 - 9 に孔内水平載荷試験により得られた降伏圧 P_y' の深度分布図を示す。図より、未改良部の P_y' と比較して、改良範囲内の P_y' の値は大きくなっており、改良による効果が見られる。また、不攪乱試料を採取できなかった CDL-3.0m より上部の砂礫層でも P_y' では良好な改良効果が見られる。そこで、図 - 7 と図 - 9 の同一地点、同一深度の q_u と P_y' の相関性を図 - 10 に示す。図には、別途、松阪地区、志布志港で同様の方法で実施した試験結果も併せて示している。図 - 10 より、バラツキはある

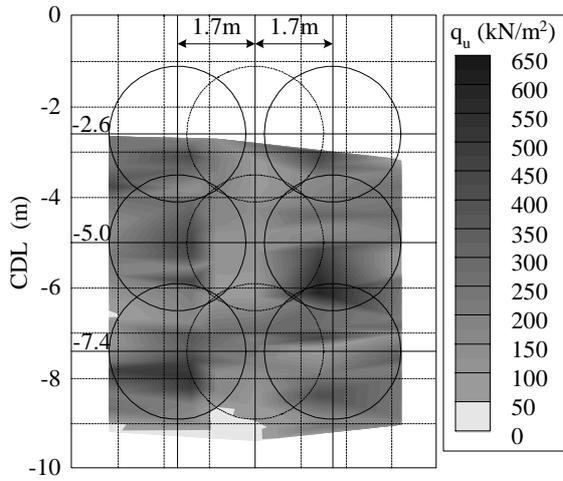


図 - 8 改良強度 q_u 分布図

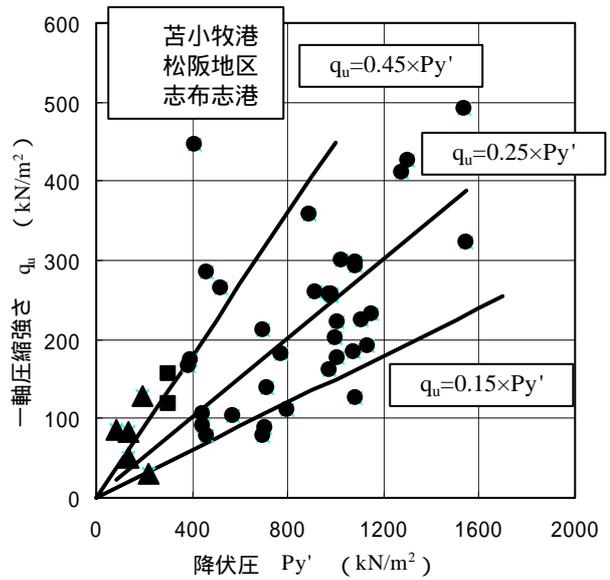


図 - 10 $q_u \sim Py'$ の相関性

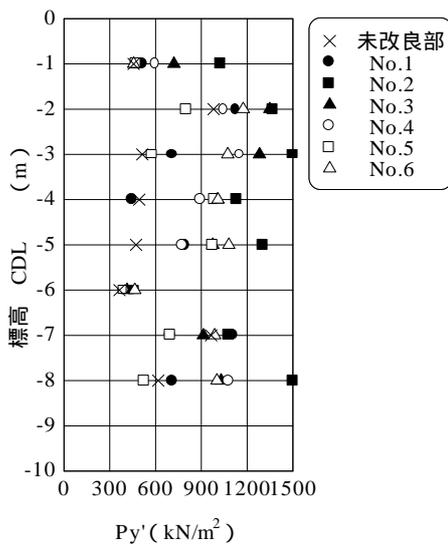


図 - 9 Py' 深度分布図

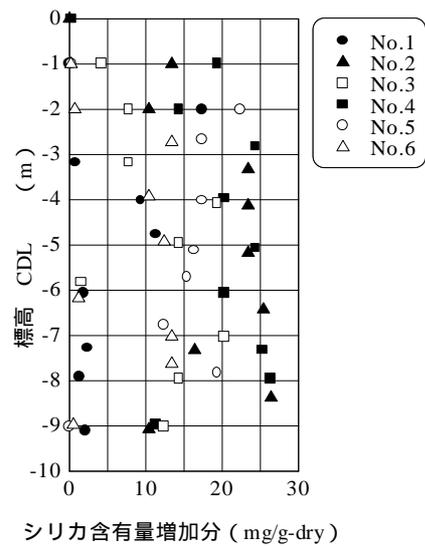


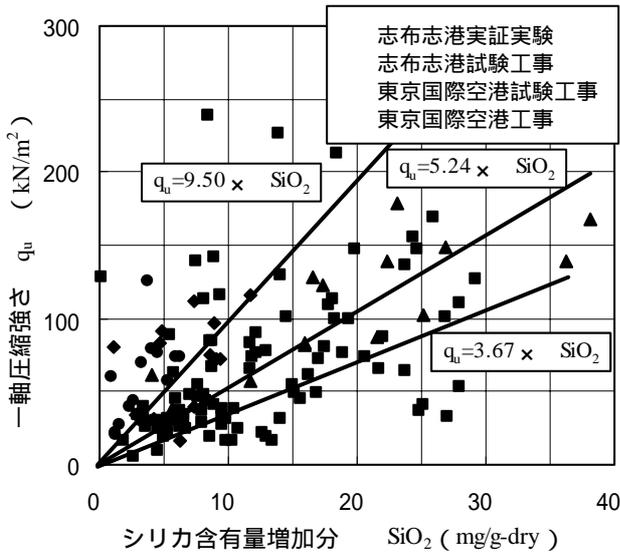
図 - 11 シリカ含有量深度分布図

がほぼ線形の相関性があると判断でき、 q_u (kN/m^2) = $0.15 \sim 0.45 \times Py'$ (kN/m^2)、平均して q_u (kN/m^2) = $0.25 \times Py'$ (kN/m^2) の関係がみとめられた。このバラツキの原因については、サンプリングによる乱れを含んでいる不攪乱試料を用いていること、ボーリング径の関係から比較している結果が同一地点でないことなどが考えられる。

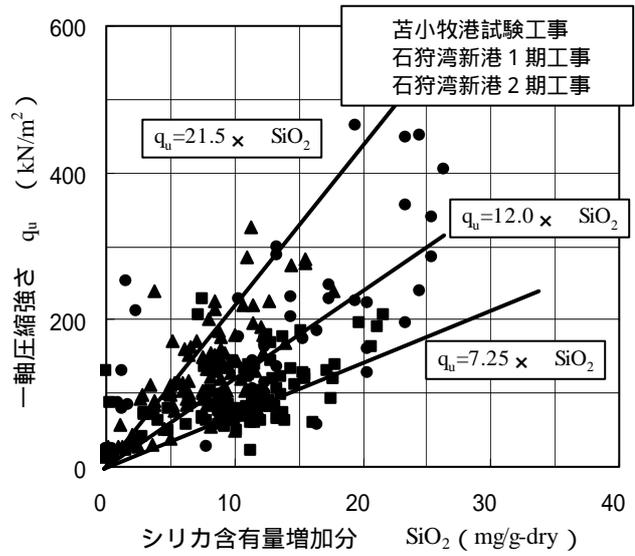
3.1.3 シリカ含有量試験結果¹²⁾

シリカ含有量試験は、一軸圧縮試験を行った供試体を使用し、試験を行った。ここで、シリカ含有量試験は、土中のシリカ分を測定する試験であるが、改良前の原地

盤にもシリカ分は若干含まれているため、事前の初期値を計測し、改良後の測定値から初期値を差し引いた増加量を算出している。図 - 11 にシリカ含有量増加量の深度分布図を示す。図 - 11 より、改良範囲内においてシリカ含有量は増加しており、改良効果の判別に有効な方法であることがわかる。そこで、各供試体ごとのシリカ含有量増加量と q_u の相関性を示したものを図 - 12 に示す。同図には、今回のエコシリカの試験工事以外に過去に行ったエコシリカの結果、エコシリカの他工事の結果も併せて示している。図 - 12 から、シリカ含



(a) エコシリカ



(b) エコシリカ

図 - 1 2 q_u ~シリカ含有量増加分の相関

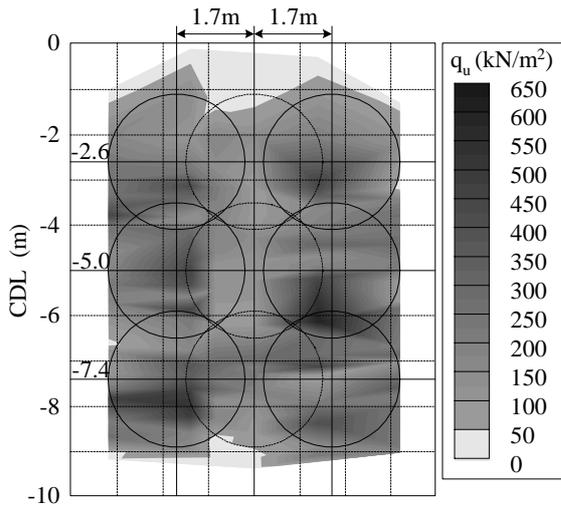


図 - 1 3 改良強度 q_u 分布図

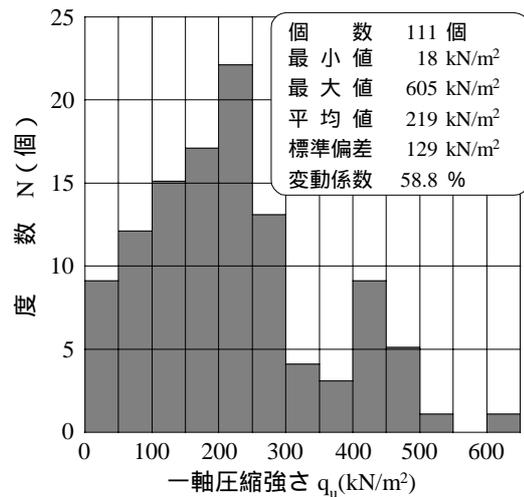


図 - 1 4 q_u 度数分布図

有量増加分が大きいほど改良土の一軸圧縮強さは大きくなる傾向がある。エコシリカの場合、シリカ含有量増加分 $\sim q_u$ の間にバラツキはあるものの $q_u(\text{kN/m}^2)=3.67\sim 9.50\times(\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係があり、平均して、 $q_u(\text{kN/m}^2)=5.24\times(\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係がある。同様に、エコシリカでは、バラツキはあるが $q_u(\text{kN/m}^2)=7.25\sim 21.5\times(\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係があり、平均して $q_u(\text{kN/m}^2)=12.0\times(\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係がある。

3.2 改良効果の検証¹³⁾

前節から得られた事後調査結果、および孔内水平載荷試験、シリカ含有量試験から得られた関係式の中で、安全側の値となる $q_u(\text{kN/m}^2)=0.15\times P_y'(\text{kN/m}^2)$ および、 $q_u(\text{kN/m}^2)=7.25\times(\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係式から推定した砂礫層の改良強度 q_u を図-13、図-14に示す。図から、バラツキはあるものの改良範囲内が良好に改良されているのがわかる。また、改良土の q_u に関する変動係数は58%であり、過去の事例¹²⁾の50%前後と比較すると若干大きくなっている。この原因として、

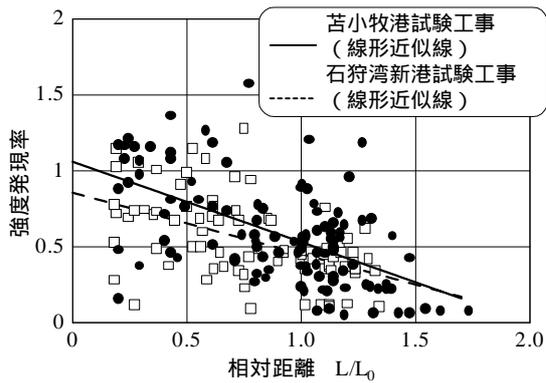


図 - 15 L/L_0 ~ 関係

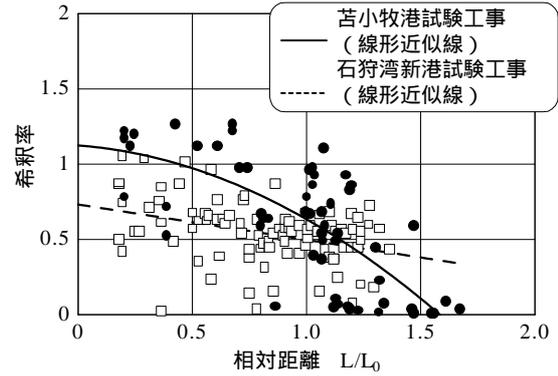


図 - 16 L/L_0 ~ 希釈率関係

現地盤が礫混じりであること、サンプリングによる乱れの影響が大きかったことが考えられる。

図 - 15 に注入口からの相対距離と強度の関係を示す。ここで、相対距離 L/L_0 は、注入口からの距離 L を浸透想定距離 L_0 (改良体の半径) で除した値であり、強度発現率は、各地点の q_u を図 - 3 に示す配合試験により得られた q_{uL} で除した値である。また、同図には石狩湾新港での事例⁹⁾も併せて示している。注入口付近では $L/L_0=1.0$ であり、離れるに従い L/L_0 は小さくなり、 $L/L_0=1.0$ 付近で 0.6 前後となっている。この傾向は、石狩湾新港とほぼ同様の結果となっている。

シリカ含有量の結果を薬液濃度 7.0%の室内配合供試体のシリカ含有量で除して算出した希釈率と相対距離 L/L_0 との関係を示したものを図 - 16 に示す。同図には石狩湾新港での事例⁹⁾も併せて示している。注入口付近では希釈率は 1.0 であり、離れるに従い希釈率は小さくなり、 $L/L_0=1.0$ 付近で 0.5 前後となっている。この傾向は、石狩湾新港とほぼ同様の結果となっており、図 - 15 の L/L_0 ~ 関係と非常に密接な関係を持っている。

3.3 改良体の試掘

砂礫土への浸透固化処理工法の適用性について、施工仕様の検討、事後調査方法の検討などを行った結果、十分な改良効果があることが検証できた。そこで、試験工事の一環として、試験工事区域の上部砂礫層の部分に別途、直径 3.0m の改良体を施工し、改良体の形状を確認するための試掘を行った。写真 - 2 に試掘した改良体を示す。試掘の結果、砂礫層において、ほぼ想定通りの形状で良好な固結状況が確認でき、砂礫層での改良効果は十分に検証できた。



写真 - 2 改良体試掘状況

4. まとめ

以上、本試験工事から得られた結論を以下に示す。

- (1) 砂礫層においても、浸透固化処理工法の適用が可能であることが確認でき、十分な改良効果があることが確認できた。特に、砂礫層と砂質層が互層になっている場合、事前注入として CB を用いて砂礫層の空隙を間詰めし、透水性を低下させることにより、浸透固化処理の改良効果を均質にすることができる。
- (2) 事後調査方法として、孔内水平載荷試験、シリカ含有量試験の有用性が確認でき、孔内水平載荷試験から求まる降伏圧 Py' と改良強度 q_u およびシリカ含有量増加量と改良強度 q_u に有意な相関性があり、 $q_u(\text{kN/m}^2)=0.25 \times Py'(\text{kN/m}^2)$ もしくは、 $q_u(\text{kN/m}^2)=5.24 \times (\text{シリカ含有量増加分}(\text{mg/g-dry}))$ の関係があることがわかった。ただし、この関係式については、バラツキが多く、データ数も少ないため、今後、データの蓄積および解析を通して、より適正な関係式を提案する必要がある。

参考文献

- 1) 林健太郎ほか：溶液型薬液注入工法による既設滑走路直下の液状化対策、五洋建設技術研究所年報、Vol.30、pp7～16、2000
- 2) 河村健輔ほか：浸透固化処理工法による既設矢板岸壁の地盤改良、基礎工、Vol.29、pp33～36、2001-5
- 3) 山崎浩之ほか：溶液型薬液改良土の強度特性に関する研究、第 35 回地盤工学研究発表講演集、pp1193～1194、2000
- 4) (社)地盤工学会：地盤調査法、pp249～257
- 5) 太田秀樹ほか：原位置による変形・強度定数の決定と設計への適用性、土木学会論文集、No.346、-1、pp77～86、1984
- 6) 笠間清伸ほか：原位置による固化処理地盤の強度評価法、土と基礎、Vol.49、No.5、Ser.No.520、pp19～21、2001
- 7) 笠間清伸ほか：圧密降伏応力に着目した固化処理土の強度推定、平成 13 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、ppA-328～A-329、2002
- 8) 垂水尚志ほか：注入固結土の化学分析に影響を及ぼす諸因子について：第 26 回土質工学研究発表講演集、pp1947～1948、1991
- 9) 佐伯茂ほか：溶液型薬液注入工法による既設矢板岸壁背面の地盤改良、日本材料学会第 4 回地盤改良シンポジウム講演集、pp37～42、2000
- 10) 河村健輔ほか：溶液型薬液注入工法の原位置試験による改良強度の評価手法、第 57 回土木学会年次学術講演会、投稿中、2002
- 11) 陶山国男ほか：地盤の横方向 K 値の研究(1)、土と基礎、Vol.14、No.10、Ser.No.104、pp31～38、1966
- 12) 後藤克人ほか：溶液型薬液注入工法のシリカ含有量の測定による改良強度の推定、第 57 回土木学会年次学術講演会、投稿中、2002
- 13) 首藤敦ほか：溶液型薬液注入工法における浸透距離と強度発現率および希釈率、第 57 回土木学会年次学術講演会、投稿中、2002

謝 辞

本工事および本試験工事を実施するに当たり、北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所関係者各位および、九州大学大学院善教授、笠間助手に多大なるご助言およびご指導を頂きました。本紙面を借りて謝意を表します。