

浸透固化処理工法による既設矢板岸壁改良施工 - 寒冷地における浸透固化処理工法適用へのアプローチ -

三根 範俊* 菅井 和義*
井上 武司* 河村 健輔**

要 旨

本工事は、北海道開発局小樽開発建設部の試験フィールド事業の一環として発注された工事である。当工事で採用された浸透固化処理工法は、全国の港湾工事への適用例がないことから、今後の活用にあたり基礎資料を得ることを目的として、現位置において施工実験を実施した。本論文は、これらの試験結果を元に、既に研究レベルで確立された当工法を、寒冷地での実施工に適用するまでのアプローチとしてまとめたものである。本試験施工の結果から、寒冷地における施工性、矢板岸壁への適用性について確認することができた。また、現地土質に対する適切な注入速度、改良ピッチ等の施工仕様、改良土の強度等による改良効果についても十分に検証することができた。

1. まえがき

1995年1月の兵庫県南部大震災は、液状化対策の重要性を十分に認識させ、ひとつに既設構造物基礎の耐震性強化を目的とした液状化対策が望まれた。しかしながら、既設構造物の基礎地盤を対象とした、有効な液状化対策工法は皆無に等しかった。一方、五洋建設は、1993年度より既存構造物基礎地盤に適用可能な注入固化工法の開発を開始し、1995年度には運輸省港湾技術研究所と共同研究¹⁾を行い、恒久型薬液注入による『浸透固化処理工法』を開発した。その後、新潟における実証実験²⁾を経て、1998年度の東京国際空港新B滑走路地盤改良等工事(その11)³⁾において、はじめて本工事に採用された。本工事は、これに次ぐ2つめの工事であり、港湾施設への適用としては最初のものである。本報では、当工法の今後の活用を念頭に置き、以下の4点に着目して、試験施工の結果を取りまとめたものである。

<ポイント>

- 寒冷地における薬液注入への影響の確認
- 当該現地土質に対する適正な薬液注入速度の確認
- 当該現地土質での浸透距離(浸透の広がり)の確認
- 形成された改良体の強度の確認

2. 本工事及び試験施工の概要

2.1 本工事の概要

本工事の概要を表-1に示す。本工事は、既設-10m岸壁(隅各部)の土圧低減と液状化対策を目的とした地盤改良工事である。図-1、2に本工事の施工平面図及び断面図を示す。本施工区域は、控え式鋼管矢板岸壁であるが故に、タイワイヤーまたはタイロッド等が約2m間隔

表-1 本工事概要

項目	単位	数量	備考
改良対象土量	m ³	9,625	当初設計
改良深度	m	20.6	+2.0~-18.6
改良土強度		最低50kN/m ² 、平均100kN/m ²	

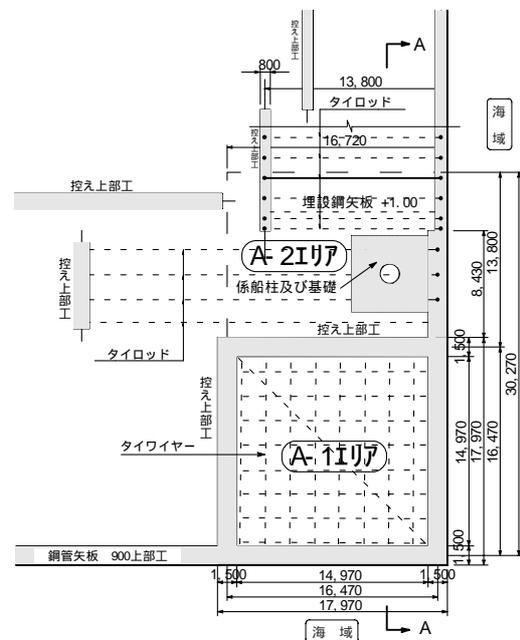


図-1 平面図

* 札幌支店 ** 技術研究所

で埋設されている。特に、A-1エリアではタイワイヤーが格子状に設置されているため、従来工法では対応が困難と考えられたが、施工性や改良効果の面から、検討を行った結果「浸透固化処理工法」が採用された。

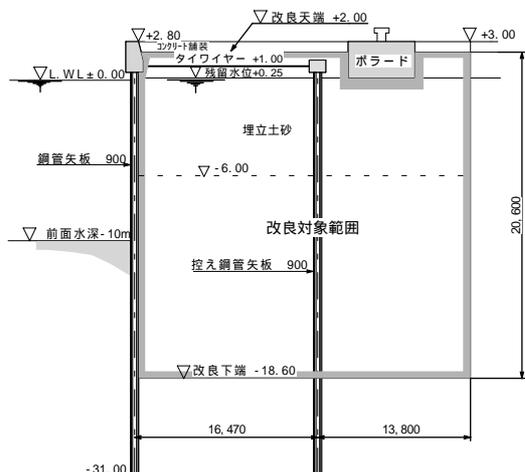


図 - 2 A-A 断面図

改良対象土の土質を図 - 3 の土質調査結果図に示す。図 - 2 の断面図からも分かるように、-6.0mまでが埋立土で、それ以下は原地盤である。埋立土と原地盤の境界でN値の変化が見られるが、平均してN値10程度の比較的ゆるい地盤である。また、改良対象土は主に細砂であるが、若干のシルトが互層で混在し、-17.6mから6mは均一なシルト層を有している。一方、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(Fc)は、平均で15%である。当工法は、Fc=0 ~ 40%程度の地盤に適用できることが経験的に把握されており、平均Fc=15%の値から十分適用可能であると考えられる。

2.2 試験施工の概要

先に述べた通り、本工事は発注者が行う試験フィールド事業の一環となっている。これは、本施工に先立ち、試験施工を実施し当該現場における当工法の適用性を確認することを目的としている。これを受けて本施工を実施し、今後の活用に当たり基礎資料を得るものである。

ここでは、このうち試験施工の概要について述べる。表 - 2 に試験施工の確認項目を示す。これは、当初設計で示された条件であり、試験施工にてこの妥当性を確認しようとするものである。これらの項目の確認を、図 - 4 に示す試験施工手順に従って行った。

試験施工は、事前調査、限界注入試験、及び単球施工試験 (STEP-1) 並びに複数球施工試験 (STEP-2) から構成される。事前調査では、液状化防止と土圧低減を満足させる地盤改良工と、寒冷地における薬液注入への影響を確認するため、冬期海水温度 (残留水温) に対する適正な薬液濃度を調査した。

限界注入試験 (qcr 試験) では、当該現地土質に対する薬液の適正な注入速度を検証し、本工事での注入速度を決定した。

単球施工試験 (STEP-1) では、上記の結果に基づき事前調査で決定した薬液にて注入口1箇所による単球の改良体の施工試験を実施した。この試験において同時に薬液の限界注入量を確認した。これは、事前に行われた薬液の土中ゲルタイムが約400minであり所定の注入時間では注入中に薬液がゲル化し所定の注入量を注入できずに、割裂注入となってしまう可能性があったためである。また、形成された改良体の大きさ (浸透の広がり) 及び強度をボーリング調査で確認し、得られたデータから注入ピッチを算出して、設計注入ピッチとの整合性を照査した。

複数球施工試験 (STEP-2) では、STEP-1 で決定した注入ピッチなどの条件に基づき注入を行い、本施工に反映するための最終的な強度確認試験を行った。

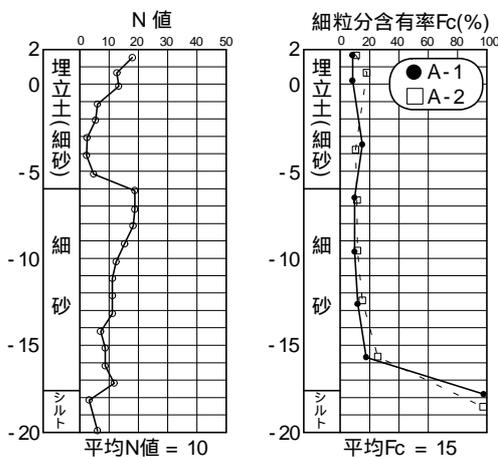


図 - 3 土質調査結果図

表 - 2 試験施工の確認項目

項目	設計条件
改良体強度	最低50kN/m ² 、平均100kN/m ² 以上
改良率	100%
強度発現率	60% (羽田での実績から)
薬液・濃度	事前室内配合試験より決定
注入速度	15L/min
注入時間	720min
注入率	40%
改良径	3.7m
改良ピッチ	3.0m
プ	3.0m (基本的にピッチと同じ)
補足事項	改良目的は、液状化防止と土圧低減

3. プラント施設

本工事に使用した薬液のプラント施設平面図を図 - 5 に示す。石狩地区の厳寒の状況下であるため、プラント及び改良区域は、試験施工および本工事の期間中、図 - 6 に示す防寒施設にて囲い養生を施した。施工期間中、防寒養生施設内の温度を5℃に保つことにより、施設の凍結を防いだ。

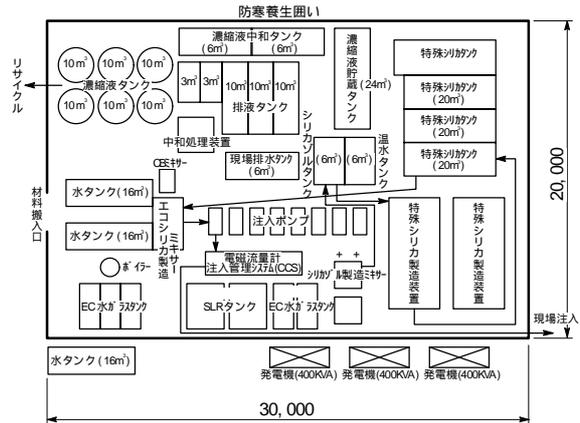


図 - 5 プラント施設平面図

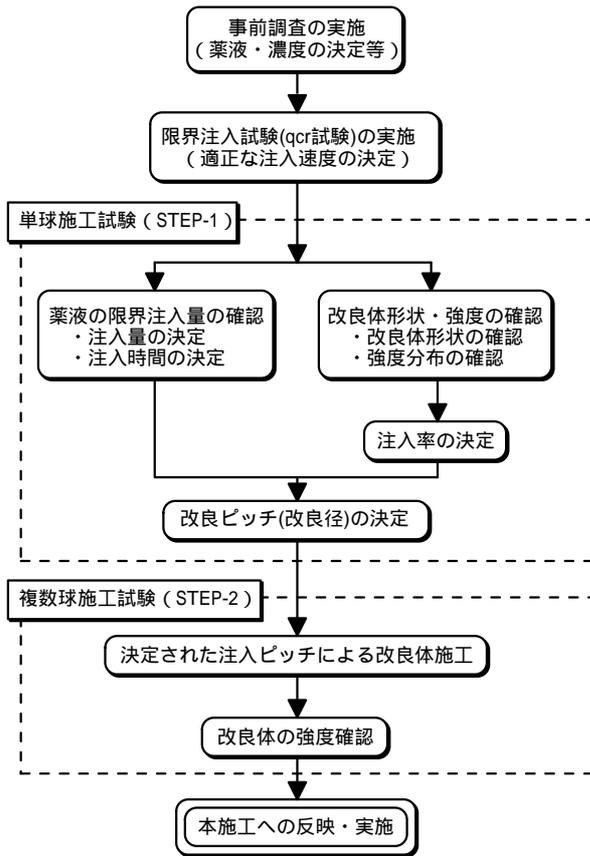


図 4 試験施工フロー図

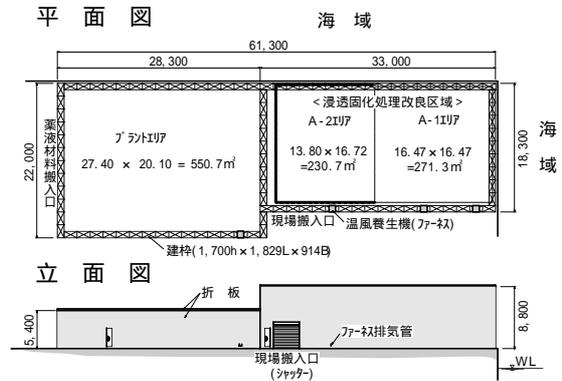


図 - 6 防寒養生施設

4. 試験施工の実施結果

4.1 事前調査結果

事前調査では、使用する薬液の種類、薬液濃度を決定するため、現地改良対象土を用いて室内配合試験を行った。配合試験を行うにあたり、試料の土質物性値を確認す

るため、事前に物理試験を行った。また、薬液注入後の改良体の改良効果(薬液浸透効果)を確認するため、改良前の土中のシリカ含有量も事前に測定した。

配合試験に使用した薬液は、シリカ系溶液型薬液のエコシリカ、エコシリカ⁴⁾の2種類である。これらの薬液は、既に恒久性、強度、浸透能力の面で液状化防止に適用できることが確認されている。配合試験では、この2種類の薬液を用い、濃度を変えた改良土を作製し、一軸圧縮強度試験で強度を確認した。

表 - 3 物理試験結果

採取	土粒子密度 (g/cm ³)	粒 度 (%)				pH
		粗砂	細砂	シルト	粘土	
A-1	2.657	8	77	7	8	8.31

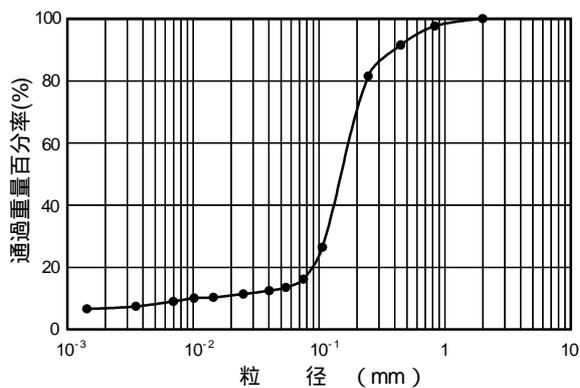


図 - 7 粒径加積曲線

表 - 4 シリカ含有量試験結果

採取	シリカ含有量(mg/g-dry)			平均値
A-1	4.8	5.3	4.9	5.0

表 - 5 エコシリカ(20 養生)試験結果

薬液	濃度 (%)	強度 (kN/m ²)		
		σ ₃	σ ₇	σ ₂₈
エコシリカ	4.5	87	90	97
	5.5	107	120	123
	6.4	123	147	157
エコシリカ	4.5	103	127	127
	5.0	143	150	163
	5.5	167	193	210
	6.0	197	223	223
	7.0	257	297	197

本工事で求められている改良体強度が平均100kN/m²以上であること、羽田³⁾での強度発現率(現場強度/室内強度)が0.6であることから、室内配合最低強度を200kN/m²に設定した。2種類の薬液の配合試験結果からこれを満足する薬液及びその濃度を選定し、あわせて改良対象土に残留する冬期水温の薬液への影響の有無を、低温養生下での強度発現で確認した。

表 - 3 に改良対象土の各種物理試験結果、図 - 7 に改良対象土の粒径加積曲線を、表 - 4 に改良前土中のシリカ含有量試験結果を示す。

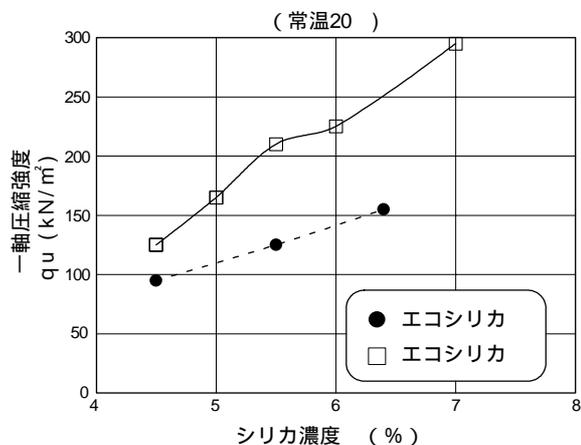


図 - 8 薬液の種類・濃度と強度 (28)

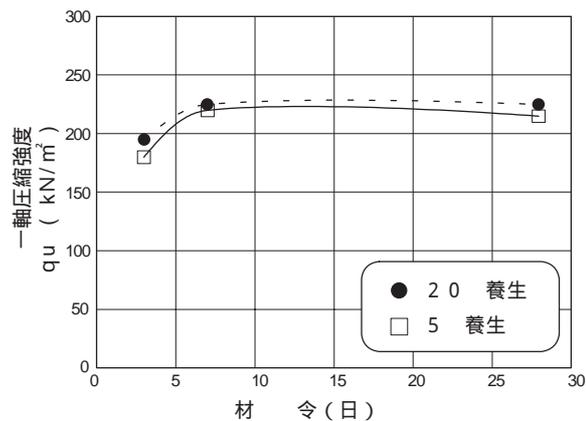


図 - 9 養生温度による強度変化

表 - 5、図 - 8 にエコシリカ と の各種薬液濃度の試験結果を示す。

上記の結果から、薬液については、室内配合最低強度 200kN/m² を満足するエコシリカ に決定して、濃度に関しては、5.5%と6.0%が材令28日において満足するが、材令3日～28日を通して200kN/m² オーダーを確保できるのは6.0%濃度であった。図 - 9 にエコシリカ 6.0%濃度における養生温度の違いによる試験結果を示す。

強度発現の傾向は、材令3日で概ね9割を呈し、材令7日でほぼ100%の強度発現を呈している。また、冬期土中温度が概ね5℃であることから低温(5℃)養生下での強度発現傾向を見てみると、常温(20℃)に比較して若干の強度発現が遅れるものの、大きな差異は認められなかった。

以上の結果から、本施工に使用する薬液はエコシリカ、濃度を6.0%とすることに決定した。

4.2 限界注入試験結果

試験施工に先立ち、現地盤の適正な注入速度を決定するために水道水を用いた限界注入試験を図 - 1 に示すA-1区域において行った。試験注入口の深度は標高 -1.50m の位置で行った。限界注入試験とは、良好な浸透注入となる限界注入速度(qcr)を求める試験であり、森ら⁵⁾によると、水注入による注入圧力(P)～注入速度(q)関係における初期勾配(ii)に限界比(β=0.3)を乗じた限界勾配(icr)とP～q曲線の交点からqcrが与えられるとしている。

本試験で得られたPとqの関係を図 - 10 に示す。図から、P～q曲線とicrの交点は求めることが不可能であり、qcrは20L/min以上となることが推測される。ところが、注入速度が14L/min付近から注入圧力は急激な減少を示し、その後16L/minから再び急上昇を示している。一般的に土中に割裂が生じると、圧力は減少・増加という波を繰り返すことによって割裂が発展していくことがわかっている。つまり、上図での減少から増加という変化は、土中に割裂が生じたものと判断できる。また、注入速度～注入圧力曲線とicr直線の交わる前に割裂が生じた理由は、試験を行った深度が浅く土被り圧の小さい箇所であり、比較的緩く締め固まった状態であったためであると考えられる。以上から、当初の設計通り、本工事での注入速度(qcr)=15L/minと決定した。

4.3 単球施工試験(STEP-1)試験結果

試験は図 - 1 に示すA-1において行った。表 - 6 に施工仕様を示す。

表 - 6 施工仕様

項目	仕様
改良範囲	1列×1段
改良径	3.7m
改良ピッチ	3.0m
改良体積	27m ³
注入率	40%
薬液注入量	10.8m ³
注入速度	15L/min
注入時間	720min

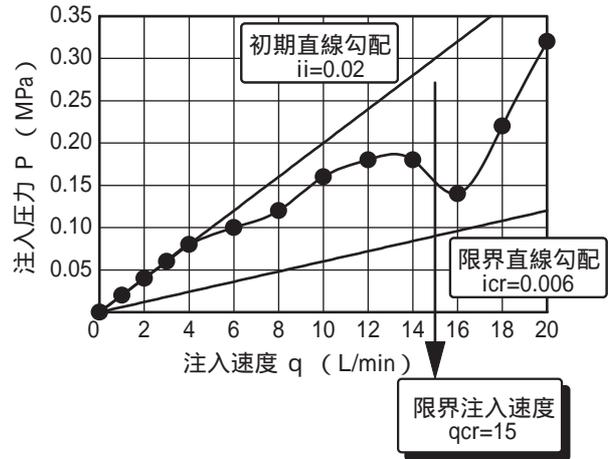


図 - 10 限界注入試験結果

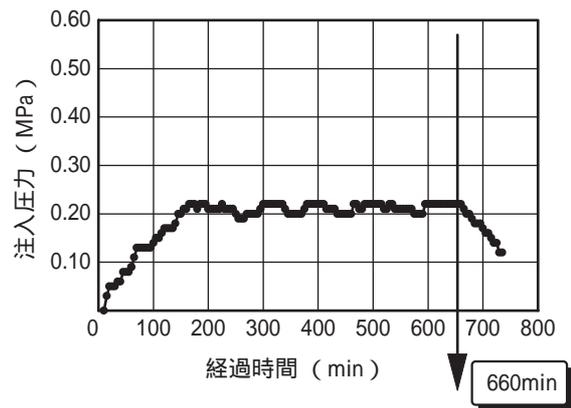


図 - 11 薬液の限界注入量の確認

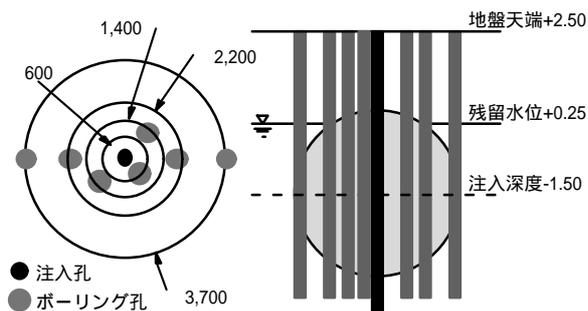


図 - 1 2 試料サンプリング位置

表 - 7 試験結果

項目		数量
注入速度	(L/min)	15
限界注入時間	(min)	660
限界注入量	(m ³)	9.675
有効注入量	(m ³)	9.675
改良範囲	(m ²)	9.724
改良径	(m)	3.519
改良体積	(m ³)	22.817

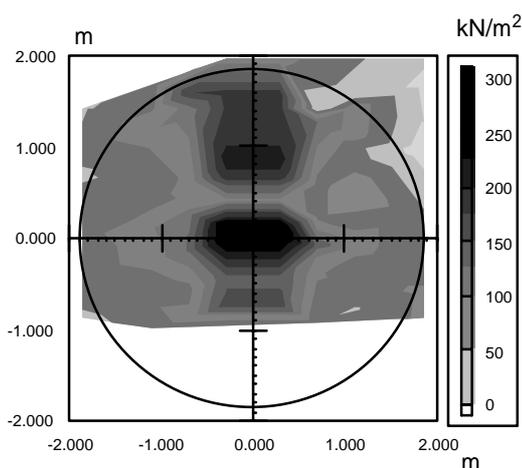


図 - 1 3 強度分布図

表 - 7 に得られた試験結果を示す。薬液の限界注入量の結果から、限界注入時間は600min程度と考えられる。注入量は10.8m³注入したが、改良体積が予定よりも小さかったことから、600min以降は割裂注入となり均質な改良体の形成には至っていないと考えられる。これは、図 - 1 3 の強度分布からも、改良体形成に有効であった注入量は限界注入量であると考えられる。したがって、この限界注入量で表 - 7 の改良体積が形成されたとすると、注入率は以下ようになる。

$$= \text{有効注入量} / \text{改良体積} = 43\%$$

を示している。これは、土中に亀裂等が発生し割裂注入状態に移行したと考えられる。したがって、本試験結果から薬液限界注入時間は600minと決定した。

続いて、注入後、材令7日にてロータリー式三重管サンブラーを用い不攪乱試料を採取し、一軸圧縮試験を行った。試料採取を行った位置は図 - 1 2 に示す。図 - 1 3 に一軸圧縮試験より得られた強度分布図を示す。図より注入孔から離れるに従い強度が低下していることがわかる。改良範囲は直径3.519mの球体と同体積となる。また、一軸強度50kN/m²以上の部分を改良体として判断すると、改良体の平均強度は100 kN/m²となり目標強度100 kN/m²とほぼ同じとなった。この強度有効改良範囲は直径3.321mの球体と同体積となり、予定改良体積に比べて15%ほど小さい改良体となった。

強度分布については、改良はされているが必要強度に満たない部分が改良範囲の約20%程あり、上方に広がった形状となっている。この原因としては、1点のみの注入であること、残留水位付近の土被り圧の小さい所で試験を行ったことなどが考えられる。

以上から、注入率、注入時間、注入量および改良径、改良ピッチを表 - 8 のように決定した。

表 - 8 施工仕様

項目	仕様
改良範囲	2列 × 2段
改良径	3.4m
改良ピッチ	2.7m
改良体積	157m ³
注入率	43%
薬液注入量	67.5m ³
注入速度	15L/min
注入時間	600min

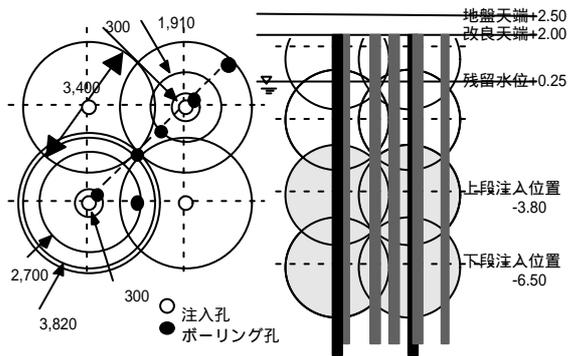


図 - 1 4 試料サンプリング位置

表 - 9 各試料採取位置の平均強度

ボーリング位置	平均強度 (kN/m ²)	ボーリング位置	平均強度 (kN/m ²)
No.1	79	No.4	124
No.2	133	No.5	89
No.3	97	No.6	78

4.4 複数球施工試験 (STEP-2) 試験結果

試験は図 - 1 に示すA-2区域において行った。表 - 8 に施工仕様を示す。

材令3日にてSTEP-1と同様に不攪乱試料の一軸試験を行った。採取位置については図 - 1 4 に示す。

図 - 1 5 に得られた強度分布図を示す。図 - 1 3 と同様に注入孔から離れるに従い強度は低下している。しかしながらこのケースでは、強度弱部となる複合部も十分に改良されていることがわかる。表 - 9 に各ボーリング位置での平均強度を示す。ただし、この表では、GL-6.50m 付近を未改良と考えて、強度50kN/m²以上の部分での平均としている。この部分は細粒分の多く含まれたシルト層であるため薬液は入らなかったと思われる。

また、図 - 1 6 に強度分布のヒストグラムを示す。図中の色の薄い部分は最低 50 kN/m² に満たない部分であり、未改良の部分である。改良体の中心部であるNo.2 (No.4) と最も強度が小さくなる部分である複合部のNo.1の平均強度を算出すると、それぞれ 110 kN/m²、104 kN/m² となり、目標強度を上回った。また、すべてのボーリングでの平均強度を算出すると、102 kN/m² となる。また、改良範囲についてもほぼ想定通りの範囲となった。

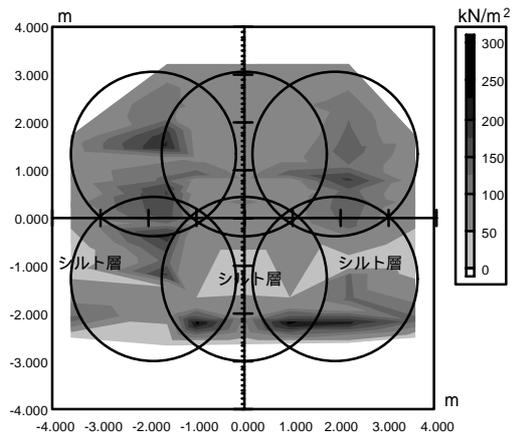


図 - 1 5 強度分布図

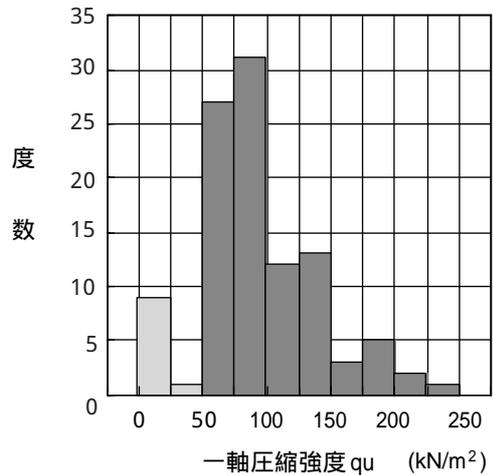


図 - 1 6 強度分布ヒストグラム

4.5 設計諸元との比較・検討

表 - 1 0 に当初設計諸元と試験施工結果から決定した各設計諸元の比較表を示す。

STEP-1、STEP-2での強度分布を注入口(中心)からの距離と強度の関係に整理し直したのが図 - 1 7 である。図の浸透相対距離とは中心からの距離を浸透到達距離 (STEP-1ではL₀=1.85m、STEP-2ではL₀=1.70m) で除した値であり、強度発現率とはそれぞれの強度を室内配合強度 (エコシリカ 6.0%で220kN/m²) で除した値である。この図から、STEP-1の注入口が1カ所で改良した場合の強度発現率は中心から離れるほど明らかに低下しており、平均強度発現率は ≈50%程度となっている。

表 - 10 設計諸元の比較

項目	当初設計	試験結果
薬液・濃度	エコシリカ - 6.0%	
強度発現率 (%)	60	60
目標強度 (kN/m ²)	100	100
最低強度 (kN/m ²)	50	50
改良率 (%)	100	100
注入速度 (L/min)	15	15
注入率 (%)	40	43
改良ピッチ (m)	3.0	2.7
改良径 (m)	3.7	3.4
注入量 (m ³)	10.8	9.0
注入時間 (min)	720	600

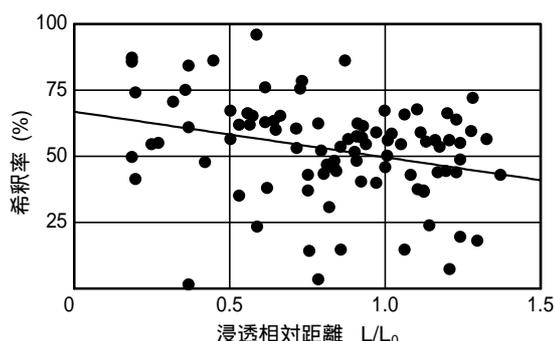


図 - 18 浸透距離による希釈率

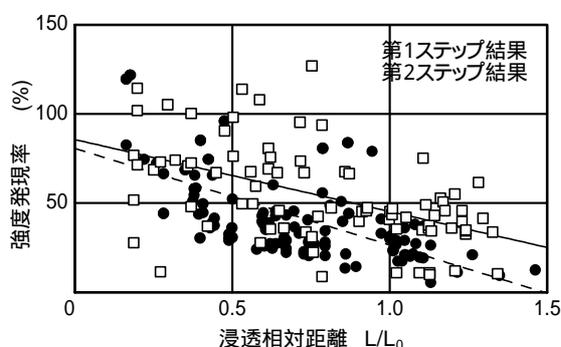


図 - 17 浸透距離による強度発現率

一方、STEP-2ではSTEP-1と同様に中心から離れるほど低下してはいるものの大幅な低下はなく、浸透相対距離 $L/L_0=1.0$ を超えた範囲でほぼ一定値 $\approx 45\%$ に収束しており、平均強度発現率は $\approx 59\%$ となっている。この値は、室内実験等から設定した設計強度発現率 $\approx 60\%$ とほぼ同じ値となっており、決定した各設計諸元は妥当であることがわかった。

5. 考察

5.1 限界注入速度に関する考察

本試験施工の限界注入試験結果については4.2節で述べたが、図-10の試験結果に示すように、試験を土被りの小さい浅い部分で行ったために、P-q曲線とicr直線が交わる前に注入圧力が増減し割裂注入が生じてしまった。土被りが小さいと拘束圧力が小さいため、浸透注入から割裂注入に比較的移行しやすい。このように深度方向の土被りの違いにより限界注入速度は影響を受けると考えられる。

また、上記のように土被りによる拘束条件の違いにより影響を受けるのであるならば、施工順序により周辺の改良体が施工され拘束圧力が増加した部分では、限界注入速度も変化すると考えられる。

現在のところ、土質状況が同じであるならば、限界注入速度を同じとして施工を行っているが、上記のような施工条件により注入速度を大きく設定できる可能性もあり、逆に小さく設定する必要もあると考える。今後、施工性、経済性、品質的な面から最良の注入速度が設定できるように、限界注入速度を行う位置、試験回数など統一性を計る必要がある。

5.2 薬液の希釈及び強度発現率に関する考察

既往の研究から強度と土中の薬液濃度には相対的な関係があることがわかっており、図-17の浸透相対距離と強度発現率の関係から改良体の外縁部では薬液が希釈されていると推測できる⁶⁾。そこで、STEP-2での一軸圧縮試験後の不攪乱試料を用いて改良土中のシリカ含有量試験を行った。計測した各供試体のシリカ含有量から次式により希釈率を算出した。

$$\text{希釈率}(\%) = \frac{\text{各供試体のシリカ含有量}}{\text{薬液濃度6.0\%の供試体のシリカ含有量}} \times 100$$

図-18に浸透相対距離と希釈率の関係を示す。図-17の強度発現率と相対的な結果となっており、注入口から離れるほど薬液は希釈され外縁部では約50%の希釈率となっている。したがって、薬液が比較的希釈されていない注入口付近では強度が大きく室内配合強度に近い値となっており、外縁部に向かうほど薬液は希釈され強度は小さくなっている。

結果において、改良目標強度である最低50kN/m²、平均

100kN/m²を上回ってはいるものの改良体の均質性という問題は今後の課題である。今後、最初に濃度の濃い薬液を注入し、続いて薄い薬液を注入する2段階注入方式などの工夫を行うことにより均質性という課題もクリアしていく必要がある。

5.3 事後調査方法に関する考察

浸透固化処理工法の品質管理方法としては、改良土の事後調査による管理となる。一般的な事後調査方法としては、改良土の不攪乱試料をサンプリングし、一軸圧縮試験による強度確認である。本試験施工においてもトリプルチューブサンプラーを用いた不攪乱試料の一軸強度により改良効果を確認した。ところが、本工法による改良土の一軸強度は平均50～100kN/m²、最大でも200kN/m²程度と低強度であるため、サンプリング時の乱れ⁷⁾の影響を多大に受ける可能性がある。実際に、サンプラーから抜き出した試料には多くの微細なクラックが入っており、サンプラーの内壁に接している試料表面は非常に乱されている。

そこで、本試験施工のSTEP-1において2つの方法で供試体の成形を行い、サンプリング時の乱れの影響について調査した。2つの供試体成形方法は次の通りである。

サンプラーから抜き出した試料の径はそのまま、高さを直径の2倍となるように端面のみ成形し供試体とする。供試体の大きさは75mm、h150mmとなる。

試料をよく観察しクラック等の影響のない部分を取り出し、その試料を50mm、h100mmにまで成形し供試体とする。

の方法で作製した供試体の一軸強度のヒストグラムを図-19に示す。同様にの方法によるものを図-20に示す。ヒストグラムの形状は、ともに同じ分布形状をしているが、全体的にの方が強度が大きくなっている。実際に、それぞれの平均値を算出してみると、は80kN/m²であり、は100kN/m²である。

以上の結果から、による方法の方が不攪乱試料の強度を適正に計測していると考えられる。つまり、の方が乱れの影響が大きいため、強度は小さく分布も不均質になってしまったと考えられる。本工法のような低強度の改良体の一軸試験を行う場合には、サンプラーから抜き出した試料を詳細に観察し、クラック等の乱れのない部分で、しかも表面を成形して表面の乱れ部を取り除いた状態で一軸試験を行うことによって、現地盤の状態に近い本来の改良強度を確認できる。

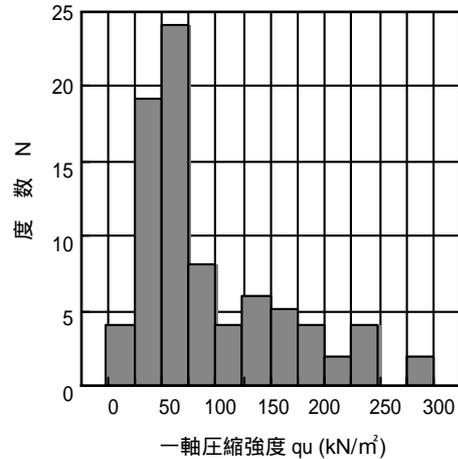


図 - 19 供試体形状 75 × h150mm (法)

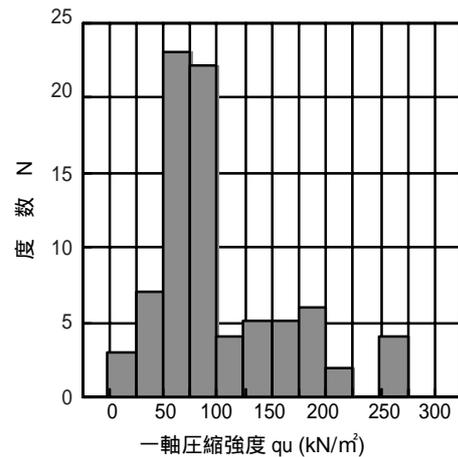


図 - 20 供試体形状 50 × h100mm (法)

このような低強度の改良体から採取した不攪乱試料は、採取時の乱れをかなり受けてしまう可能性があるため、細心の注意を払い、改良体の強度を確認する必要があると考える。今後、事後調査方法の統一性を計り、また、サウンディング等の強度の確認方法(コーン貫入試験など)についても検討していきたいと思う。

6. まとめ

本試験施工から確認された項目を下記に示す。

寒冷地における薬液注入への影響

低温養生による室内配合試験結果より、材令による強度発現は若干遅れるが、改良強度には影響がないことが確認できた。また、薬液注入試験からも改良強度に対する温度の影響はほとんどない。

当該現地土質に対する注入速度

限界注入速度により得られた結果は設計で設定した値と同じとなり、薬液注入試験からも割裂注入は生じていないことが確認でき、採用値は妥当であったと考えられる。

当該現地土質での浸透距離

単球施工試験 (STEP-1) より、当該現地土質の最大注入時間は600min程度であることが確認できた。また、注入率に関しても設定した注入率 =40%よりも若干大きい値 =43%であることが確認できた。これらについては、複数球施工試験 (STEP-2) の結果より妥当であったと考えられる。

改良土の強度

複数球施工試験 (STEP-2) の結果より、改良土の強度は目標強度をクリアしており、改良範囲についても所定の出来形が確認できた。本試験工事の結果から決定された項目が妥当であったと考えられる。

参考文献

- 1) 山崎ほか: 溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発、港湾技研資料、No.905、pp.1-29、1998
- 2) 善ほか: 薬液注入による液状化防止工法 - 新潟実証実験報告 -、第32回地盤工学研究発表会、1997
- 3) 善ほか: 溶液型薬液注入工法の液状化対策の試験工事、第35回地盤工学研究発表会、2000
- 4) 山崎ほか: 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会、2000
- 5) 森ほか: 薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法、土質工学会論文報告集、Vol.33、No.3、pp.159-169、Sept、1993
- 6) 善ほか: 大型土槽を用いた恒久型薬液の注入実験、第31回地盤工学研究発表会、1996
- 7) (社) 地盤工学会: 地盤調査法、pp.137-188、1995

謝 辞

本試験施工にあたり、北海道開発局小樽開発建設部関係者各位、および当社技術研究所の林健太郎氏ら、関連部署の方々にご指導を頂いたことに、この紙面をかりて感謝の意を表します。