

浸透固化処理工法を用いた合理的な液状化対策範囲に関する実大現場実験

浸透固化処理工法研究会 池野 勝哉

同上 宇梶 伸

(独) 港湾空港技術研究所 構造振動研究室長 菅野 高弘

(独) 港湾空港技術研究所 特別研究員 中澤 博志

1. はじめに

近年、災害時における空港の役割が見直され、特に航空輸送上重要な空港に関して、優先的な耐震化が求められている。従来、仕様規定に基づいた滑走路直下の液状化対策は、対象地盤の液状化判定を行い、液状化する可能性があるとして判定された全ての液状化層に対して地盤改良が実施されていた。とりわけ、滑走路直下は供用しながらの施工が要求されるため、薬液注入工法や静的締固め工法など比較的高価な工法が採用されることが多い。しかし、仕様規定に基づいた液状化対策を講じることは必ずしも合理的ではなく、滑走路を始めとする広域な空港施設に対して全面的な改良を行えば莫大な事業費を要することになる。そのため、性能設計の概念を取り入れた合理的な対策によって、有意な被害をできるだけ軽減し、比較的簡単な補修によって要求性能が確保される形が望ましいと考えられる。

このような状況に鑑み、国土交通省と独立行政法人港湾空港技術研究所は平成19年10月末に北海道石狩湾新港西地区において、制御発破を用いた実大現場実験を実施した。実験の目的は、地震による地盤の液状化現象が滑走路等の社会基盤施設に与える影響を把握するとともに、軽微な被災に留めるための合理的で経済的な液状化対策の設計法を確立することである。

本報告は、石狩湾新港で実施された実大現場実験の概要を説明し、液状化対策として多くの施工実績と効果を有する浸透固化処理工法を、深度方向に部分適用した実験の速報結果を示すものである。

2. 人工地震動による実大現場実験の概要

2.1 実験の全体概要

発破実験は平成19年10月27日、北海道石狩市の石狩湾新港西地区において、独立行政法人港湾空港技術研究所の指揮の下、延べ41機関が参加する共同研究として実施された。埋め立て地の1.6haの敷地に実物大の空港施設を建設し、地中に装薬した約1.8tの爆薬を0.2秒間隔で連続発破することで、人工的に地盤の液状化現象を再現するとともに、舗装や空港施設への影響が調査された(写真-1)。



写真-1 実験ヤードの全景

実験サイトの地盤物性として、B-3、B-4 地点の標準貫入試験結果と B-4 地点の粒度分布を図 - 1 および図 - 2 に示す。原地盤は GL-5m まで N 値 5 以下の埋立土、GL-5m~10m まで N 値 10 程度の緩い砂地盤であることに加え、非常に液状化しやすい粒度分布であることが分かる。調査地点を含む実験の全体図を図 - 3 に示す。

実験エリア中央部には、滑走路を模擬したアスファルト舗装（延長 60m×幅員 50m）が建設され、未改良部（延長 20m×幅員 50m）と地盤改良部（延長 40m×幅員 50m）に区分されている。地盤中には埋設管（高耐圧ポリエチレン管 Φ1000, L=55m）が未改良部と改良部それぞれに埋設され、液状化によって作用する土圧やひずみなどの諸データが計測されている。浸透固化処理工法は、低圧注入で地盤中の間隙水を恒久薬液（ゼリー状）に置換えるため、周辺構造物への影響が少ない工法である。そのため、地中埋設管を含む改良部に当工法が採用された。その他、実験エリアにはエプロンを模擬したコンクリート舗装、ローライザーやグライドスロープなどの空港施設、盛土など実際の地盤に実物大の空港土木施設が再現されている。

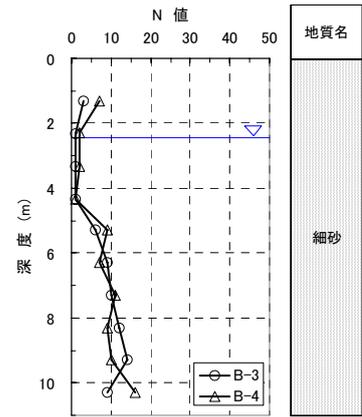


図 - 1 B-3, 4 の N 値分布

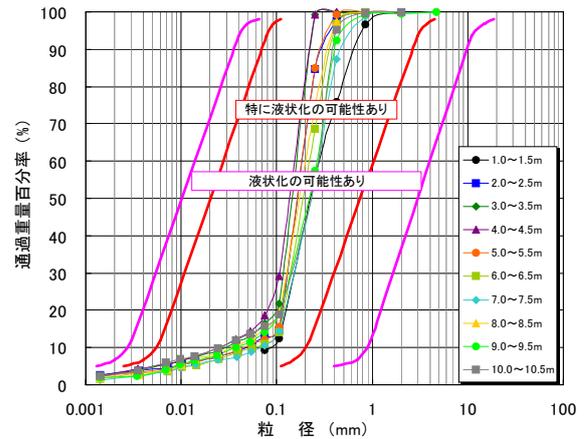


図 - 2 B-4 地点の粒度分布²⁾

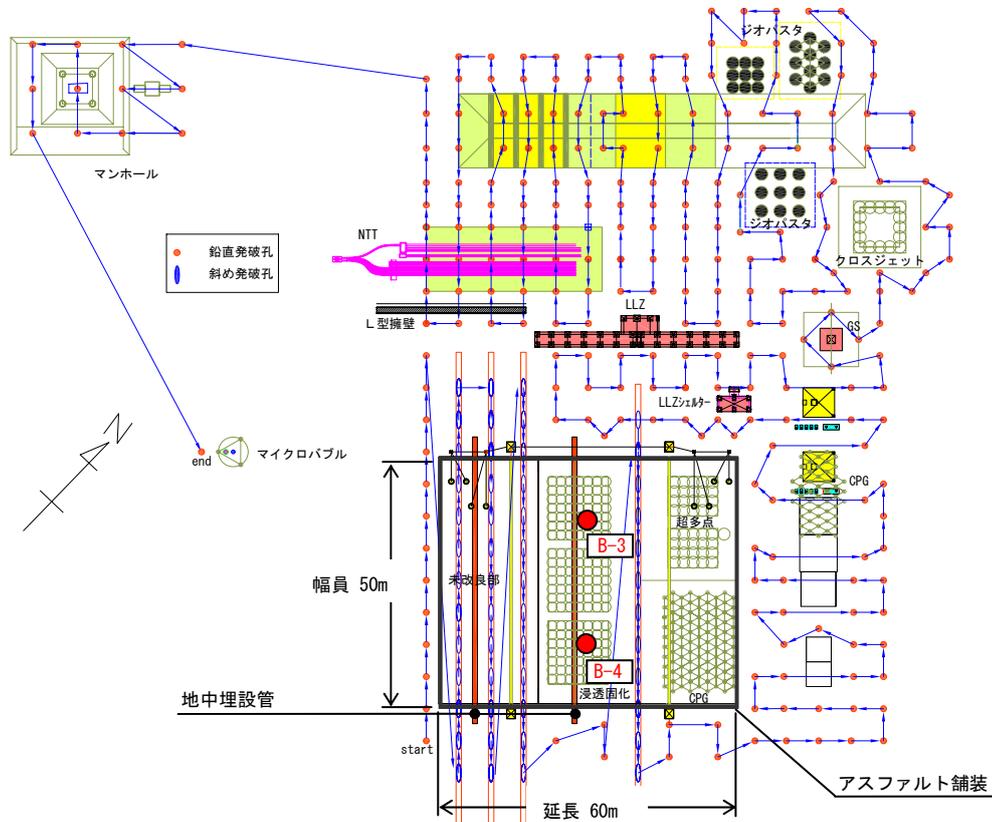


図 - 3 実験全体図

2.2 浸透固化処理工法を部分的に適用した滑走路直下の液状化対策実験概要

近年では、対象構造物の耐震性能に着目した性能設計の概念が導入されている。すなわち、液状化層全てを地盤改良するのではなく、部分的に地盤改良することで液状化によって生じる若干の沈下量を許容しつつ、平坦性が要求される空港舗装に対して有意な不同沈下を抑制するとともに、地中埋設物等を無被害あるいは被害を最小化に抑えることが求められている。

そこで、当実験エリアでは GL-2.5m～-10.0m の液状化層に対して、直径 2.0m の球体を改良率 70% で配置し、A 改良 (GL-2.5m～-7.9m)、B 改良 (GL-2.5m～-6.1m)、C 改良 (GL-2.5m～-4.3m) の 3 改良を実験ケースとして設定した。ここで、改良率とは、設計による改良範囲に対する純改良体積の割合を体積百分率で表したもので、改良範囲の土が全面的に改良される改良率 100% に対して、隣り合う球状の改良土が互いに接し、未改良部が残された状態を改良率 70% と定義している (図 - 4)。

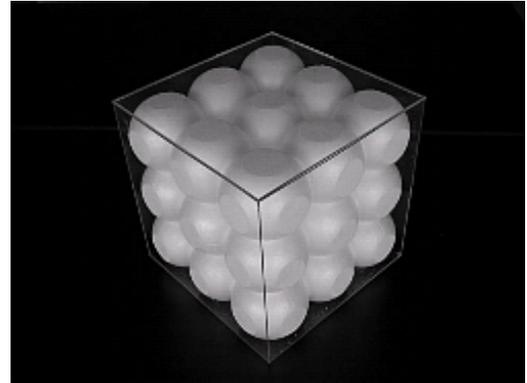


図 - 4 改良率 70% のイメージ³⁾

実験ケースの平面図・断面図を図 - 5 に示す。

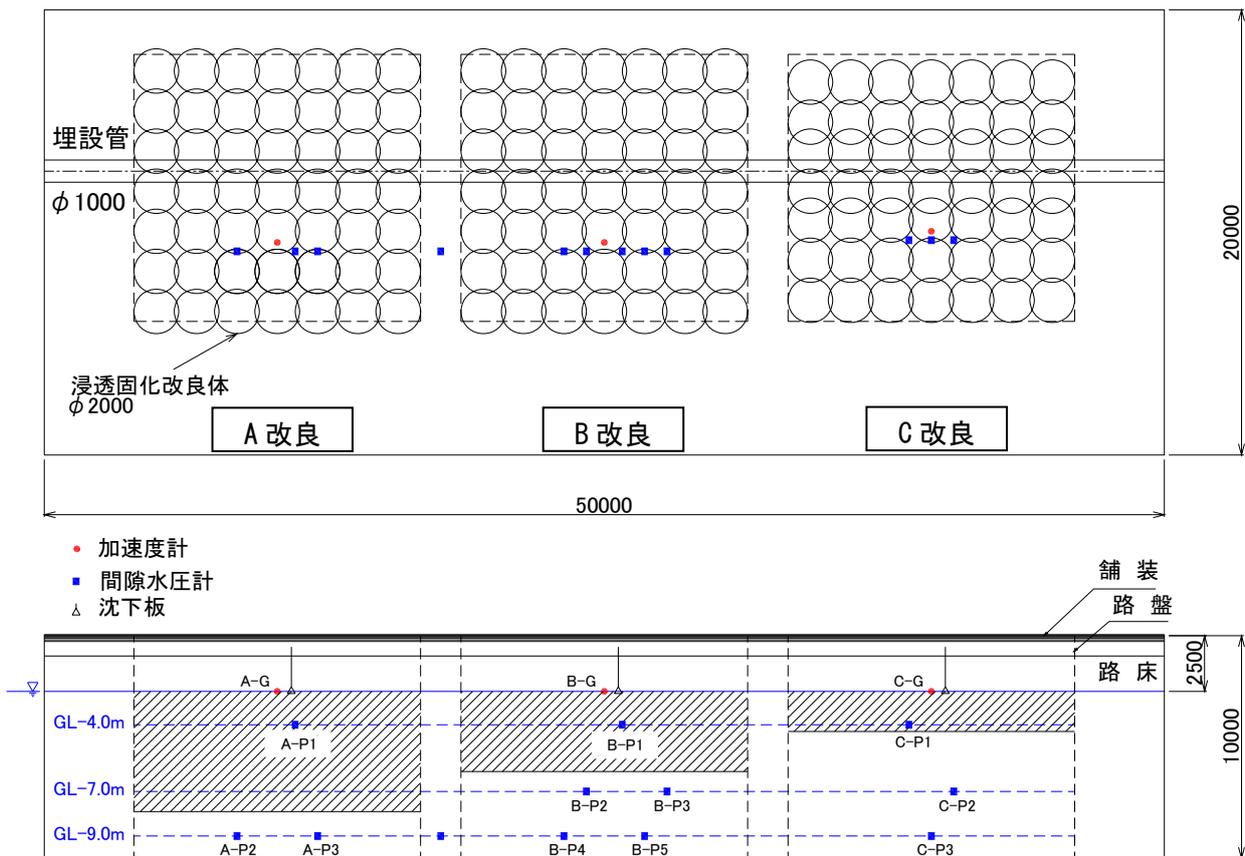
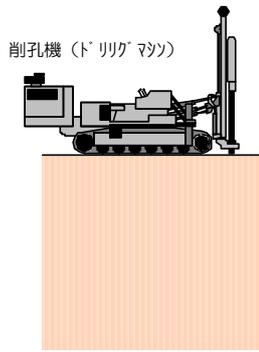


図 - 5 平面図 (上), 断面図 (下)

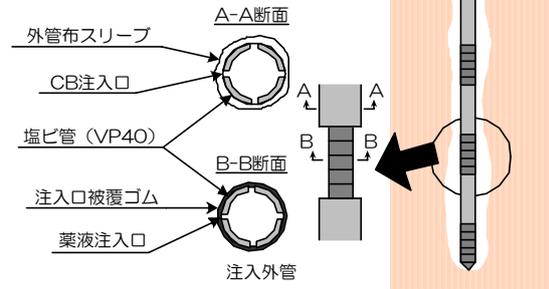
浸透固化処理工法は既設構造物直下地盤あるいはその近傍の液状化対策を行うことを目的として開発された工法であり、施設を供用しながらの施工が可能である。通常の手順を図-6に示す。

①削孔機（ドリルマシン）セット

所定の注入孔位置に削孔機を据え付ける。

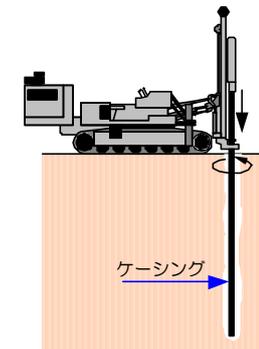


⑤注入外管建て込み完了



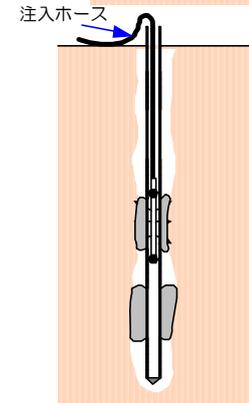
②削孔作業

ケーシング (L=1.5m) を継ぎ足しながら、所定深度まで削孔を行う。



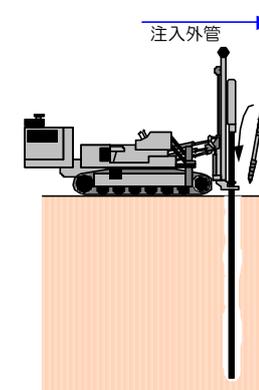
⑥注入ホース建て込み

外管布スリーブにセメントナット（CB）を注入するための注入ホースを建て込み、CBを下端から順次ステップアップ注入する。注入するときは、ダブルパッカーを送水圧で膨らませて外管内に固定する。



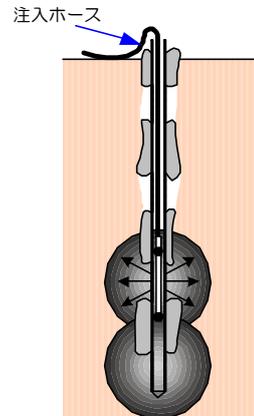
③注入外管建て込み

所定深度まで削孔後、特殊スリーブパッカーおよび塩ビパイプ等により構成される注入外管を建て込む。



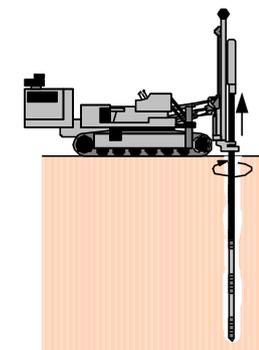
⑦浸透固化処理注入

CB養生（1日）後、薬液を下端より所定量注入し、順次ステップアップする。注入するときは、ダブルパッカーを送水圧で膨らませて外管内に固定する。



④注入外管建て込み

注入外管の建て込み完了後、ケーシングを引き抜く。



⑧浸透固化処理注入完了

改良天端まで浸透固化処理が終了したら、突出管を切断し、注入外管内にCBを充填し、全工程を終了する。

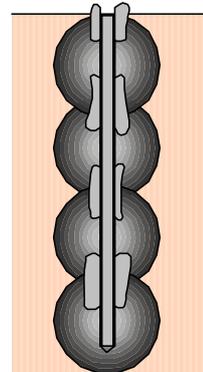
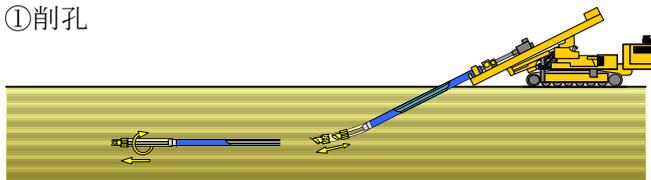


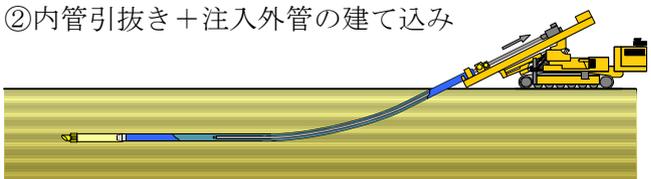
図-6 施工手順³⁾

①削孔



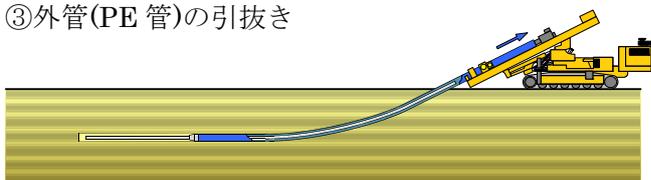
直線部は回転削孔にて、曲線部は先端ビットの斜面の向きを調整してロッドを回転させず押し込み操作のみで削孔する。

②内管引抜き+注入外管の建て込み



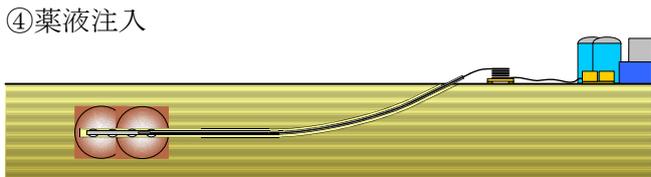
所定の位置まで削孔を行ったら先端ビットを地盤中で切り捨て、外管 (PE 管) を残して内管のみを引き抜き、PE 管内に注入外管を建て込む。

③外管(PE 管)の引抜き



注入外管を残し、外管 (PE 管) のみを引き抜き、その後、マシンを移動して次の削孔へ移る。

④薬液注入



①～③の工程にて設置された注入外管内に薬液注入用ホースを建て込み、特殊スリーブパッカーを膨らませた後順次薬液注入を行う。

図 - 7 曲り削孔式浸透固化処理工法の施工手順⁴⁾

なお、本実験では、挙動計測のための計器設置や発破に対する計測ケーブルの養生を優先し、舗装工の前に薬液を注入した。実空港への適用に際しては、空港運用上、施工時間等の制約があることが多いため、自由曲線による曲り削孔工法を併用すると効果的である。参考までに、曲り削孔式浸透固化処理工法の施工手順を図 - 7 に示す。

地盤中には、液状化による水圧の動的挙動を計測するため、間隙水圧計 (200kPa) を GL-4.0m, GL-7.0m, GL-9.0m の 3 深度に設置した。その際、衝撃圧による受圧面への損傷を懸念し、間隙水圧計を $\Phi 50 \times 3 \times 250\text{mm}$ (外径, 厚み, 長さ) のアクリルパイプで保護した後、中には緩衝材としてゴム風船を配置した。使用した間隙水圧計を写真 - 2 に示す。さらに、改良体上部には 3 成分の加速度計 (10G) と沈下板を設置した。発破前及び発破中の動的計測は、サンプリング周波数 100Hz で収録するとともに、完爆確認後はサンプリング周波数 1Hz で計測した。

また、液状化後の過剰間隙水圧の消散過程を捉えるため、静的計測を適宜行った。なお、計測ケーブルは有害な引張力が作用しない様、 $\Phi 65$ の FEP 管で保護し、改良深度の異なる不連続な境界部に関しては、さらに $\Phi 100$ の FEP 管で保護する 2 重管構造として養生した。



写真 - 2 間隙水圧計

3. 実験結果の速報（11月16日現在）

3.1 実験前後の状況概説

平成19年10月27日午前11時、地中2深度（滑走路部はGL-4.5m, GL-9.0m）に設置されたエマルジョン爆薬が0.2秒間隔で点火され、計130秒間にわたる約580ヶ所の連続発破が実施された。滑走路部の発破前、発破中、発破直後の状況を写真-3に示す。滑走路周辺地盤では、爆破の通過から数十秒後、泥水混じりの墳砂（約5m）が生じるなど、地盤の液状化現象が再現されていた。発破直後は、未改良部で最大30cmの路面沈下が生じ、滑走路周辺部より噴出した泥水で浸水するなど、空港滑走路の供用に悪影響を及ぼす状況が確認された（写真-3, 写真-4）。また、未改良部と改良部の境界で、沈下量の違いにより滑走路面が大きく湾曲したが（写真-5）、浸透固化処理工法を用いた改良部では滑走路面にクラックなどの目立った損傷もなく（写真-6）、無被害であった。



写真-4 未改良部の浸水状況



写真-5 未改良部の湾曲状況



写真-3 発破前後の滑走路



写真-6 浸透固化改良部の舗装面状況

3.2 滑走路面の沈下測量

滑走路面沈下における実験前後および7日間の経時測量を行った。5m 格子の基本測量に加え、改良域に関しては2.5m 格子の詳細測量を追加した。図-8に基本測量格子および測線名を示す。発破前・発破3日後の地形等高図を図-9に、発破3日後の累積沈下等高図を図-10、11に示す。滑走路部の等高図より、未改良部と比較すれば明瞭な改良効果を読み取れる。発破3日後の未改良部の沈下量が最大35cmであるのに対して、当エリアの評価対象域は全域に渡って5cm以下、中央部では0.5~1.5cm程度であった。改良域では、改良範囲が浅くなる順に、端部において未改良部の沈下影響を受けるものの、

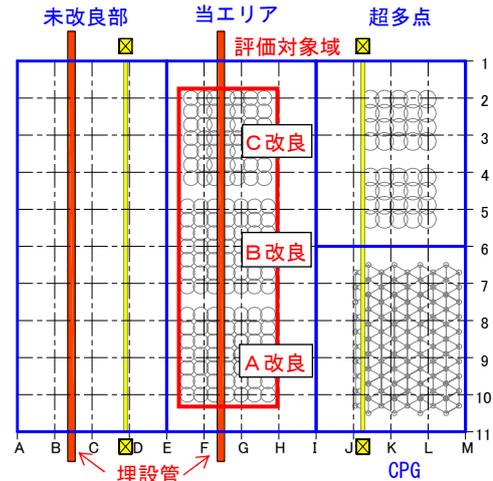


図-8 滑走路面の基本測量格子

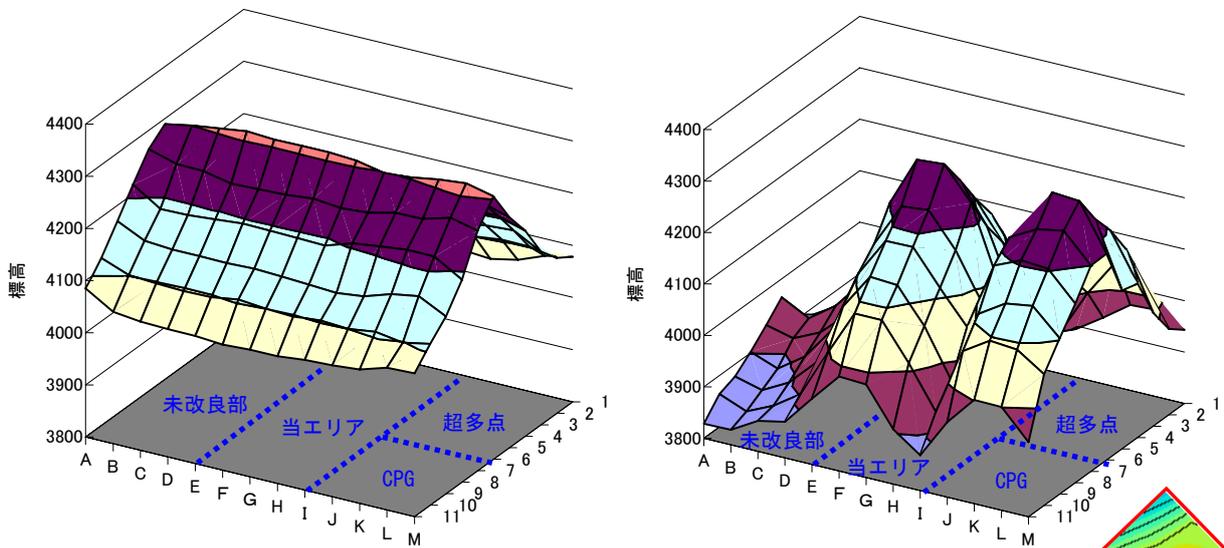


図-9 発破前（左）、発破3日後（右）の地形等高図

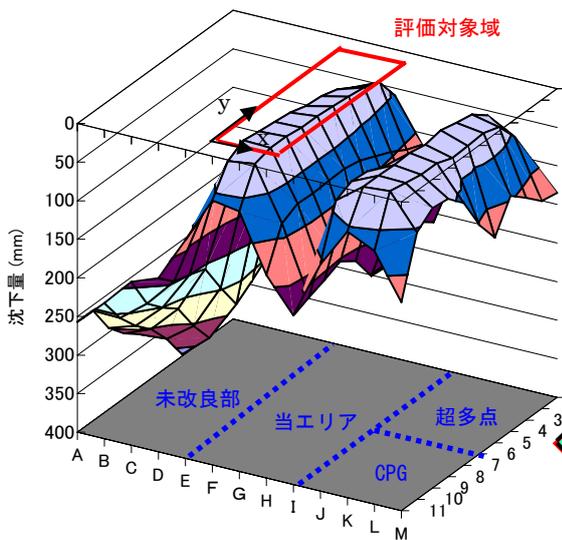


図-10 発破3日後の累積沈下等高図

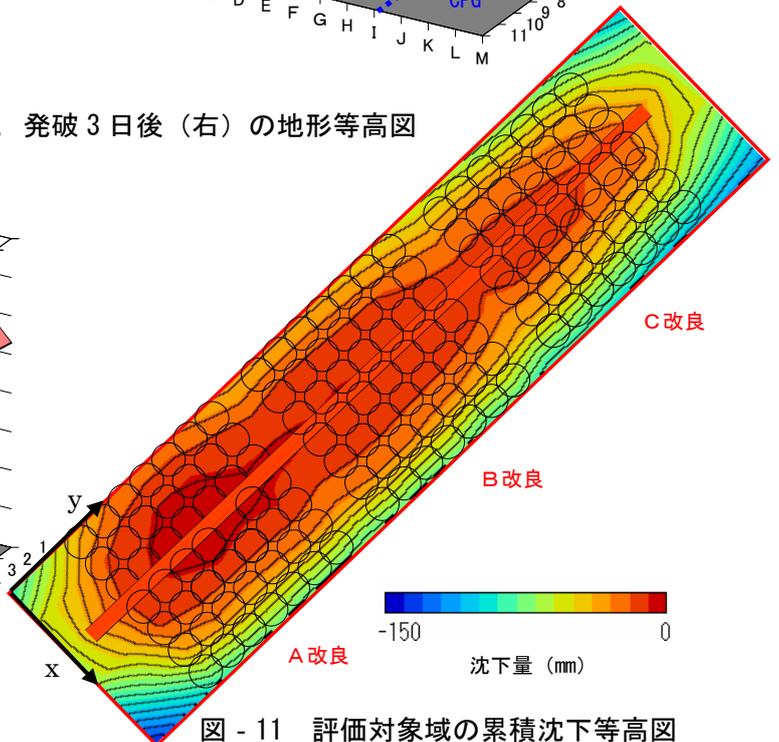


図-11 評価対象域の累積沈下等高図

中央部では部分的な浸透固化改良で未改良部の沈下量を 5%以下に低減できることが確認された。また、未改良部の代表点と評価対象域の各改良部中央点における時間沈下(発破直後を基準)を図 - 12 に示す。図より、路面沈下が発破後 24 時間で収束していることが分かる。

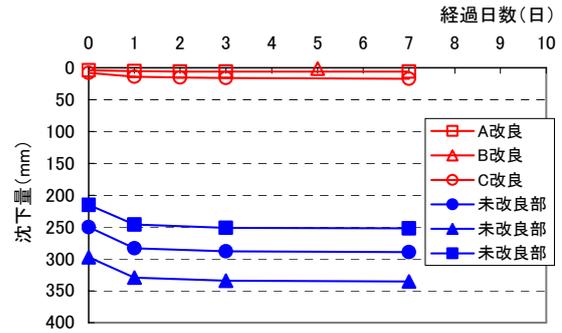


図 - 12 代表点の時間沈下

3.3 加速度および水圧の時系列データ

図 - 13 に代表的な B 改良の加速度および水圧の時系列データを示す。図中の青太実線は 1Hz のローパスフィルターを施したもので、赤太実線は水圧計の設置深度(凡例のアンダーバー以降, 単位 m)における有効上載圧を表している。なお、時間軸は同期信号入力時を基準にした。加速度および水圧データより、 $t=47(s)$ に最も大きな衝撃圧を感知するとともに、過剰間隙水圧比で概ね 0.9 以上の状態が約 100 秒間継続し、液状化状態まで上昇した過剰間隙水圧は $t=150(s)$ に消散し始め、発破 24 時間後には静水圧状態に収束した。これは、滑走路面の沈下計測が発破 24 時間後ではほぼ収束していることに対応している。なお、他の水圧計も同様の傾向を示していた。

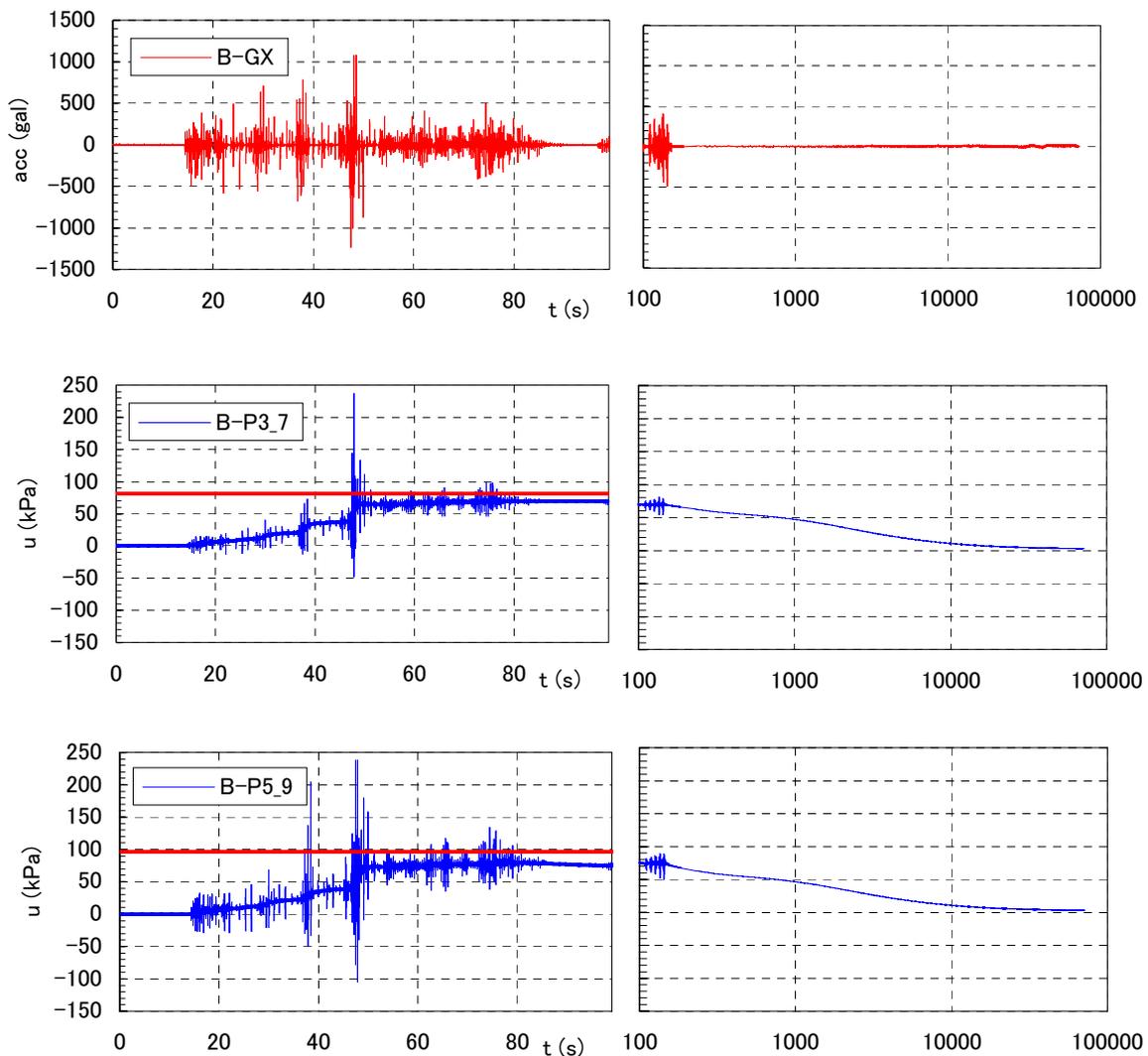


図 - 13 加速度(上)・水圧(下)の時系列

4. まとめと今後の課題

本報告では、石狩湾新港で実施された実大現場実験において、浸透固化処理工法の改良率を 70%に抑え、改良範囲を深度方向に部分適用した実験結果の速報を示した。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 発破制御による地盤の液状化現象は約 100 秒間継続し、滑走路の未改良部で最大 35cm の沈下が生じたが、当改良部では目立った沈下および損傷は確認されなかった。
- (2) 当工法において、改良率 70%および改良範囲の部分的な適用で、十分な液状化対策効果が確認された。
- (3) 今回の実験では、改良範囲の違いによって沈下量および沈下形状に有意な差異があり、合理的な液状化対策範囲を検討しうるデータが取得できた。

今後は、現在までに取得したデータに加え、実験前後の地盤サウンディング調査や改良体の沈下測定、強度試験などを行い、合理的な液状化対策範囲についての検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 佐々木広輝，上田正樹，山崎浩之，菅野高弘：浸透固化処理工法の人工地震による液状化対策効果に関する実証実験，第 5 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.77-80，2002.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997.
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル，2003.
- 4) 山本敦，植田勝紀，河村健輔：曲がり削孔を用いた既設構造物直下の液状化対策，第 5 回空港技術報告会資料，pp.103-119，2004.
- 5) 山崎浩之，前田健一，高橋邦夫，善功企，林健太郎：溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発，港湾技術研究所資料，No.905，1998.