

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研究 — 石狩 実物大現場実験 —

池野 勝哉* 三藤 正明*
宇梶 伸**
菅野 高弘*** 中澤 博志***

要 旨

平成 19 年 10 月 27 日、国土交通省と(独)港湾空港技術研究所は北海道石狩湾新港西地区において、空港施設を対象とした制御発破による実大現場実験を実施した。実験の目的は、地盤の液状化を再現し、滑走路等への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な液状化対策の設計法を確立するためである。筆者らは、共同研究の一つである滑走路直下地盤の液状化対策に参画し、既設直下の液状化対策として多くの実績を有する浸透固化処理工法を適用した。その際、滑走路の耐震性能に着目し、従来よりも改良率を低減しながら、且つ、地盤の上層部を重点的に改良するなど、合理的な液状化対策範囲に関する検討を行った。実験の結果、浸透固化処理工法による改良エリアの大部分で、有害な変位や舗装の損傷等は確認されないなど、液状化対策効果を確認した。また、下部に未改良地盤を残した本実験ケースにおいて、予想以上の沈下低減効果があったが、そのメカニズムの解明については課題を残した。

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。通常、滑走路直下の液状化対策には、供用しながらの施工が要求されるため、周辺地盤への影響がない溶液型の薬液注入工法など比較的高価な工法が採用される。しかし、従来の仕様規定に基づいて適用した場合、莫大な事業費が必要になるばかりでなく、滑走路の耐震性能に着目した合理的な対策とは言い難い。一方、近年では、対象構造物の耐震性能に着目した性能規定型の設計法が導入されており、従来よりも自由度の高い液状化対策が可能になった。

このような状況に鑑み、国土交通省と(独)港湾空港技術研究所は平成 19 年 10 月 27 日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¹⁾。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。

筆者らは、共同実験研究の 1 つである滑走路直下の液状化対策実験に参画し、溶液型の薬液注入工法である浸透固化処理工法を適用した。実験では、改良率を従来の 100%から 70%に低減し、深度方向の改良範囲を液状化層の上部分に適用した合理的な液状化対策範囲に関する検討を行った。

2. 実大現場実験の概要¹⁾

実験は、平成 19 年 10 月 27 日に北海道小樽市銭函の石狩湾新港西地区において実施された。本実験ヤード内には、実際の空港と同様な設計仕様の滑走路(アスファルト舗装)、エプロン(コンクリート舗装)および航空無線施設(グライドスロープ、ローカライザー等)が建設され、地盤内に装薬した爆薬を連続発破することで、人工的に地盤の液状化現象が再現されている。発破仕様は、鉛直削孔 253 孔、曲がり削孔 8 孔(滑走路部)、総火薬量 1760kg、斉発破数 583 段、発破時間 139 秒間(0.2 秒差)の大規模な段発破である。実験後のヤード全景を写真 - 1 に示すとともに、発破概要を図 - 1 に、実験ヤード平面図を図 - 2 に示す。

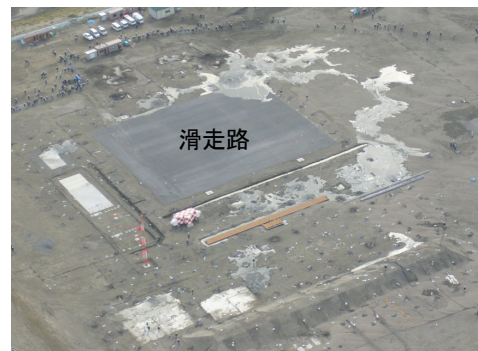


写真-1 実験後ヤード全景¹⁾

(国土交通省北海道開発局ヘリコプター撮影)

* 五洋建設(株)技術研究所

** ライト工業(株)

*** (独)港湾空港技術研究所

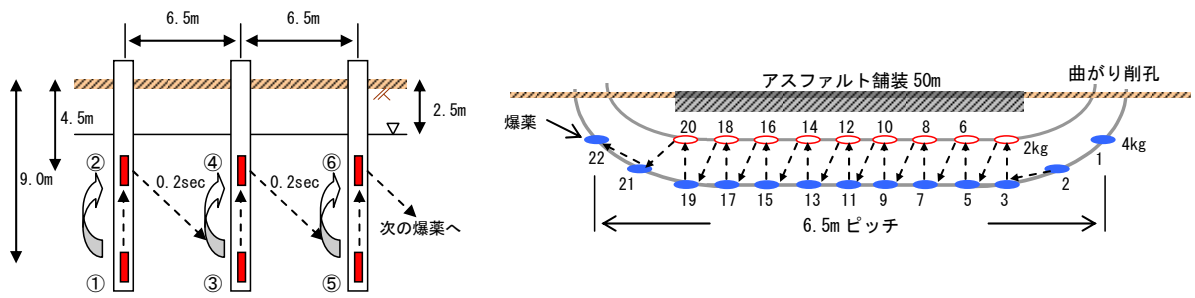


図-1 発破概要(左:鉛直発破、右:曲がり発破)¹⁾

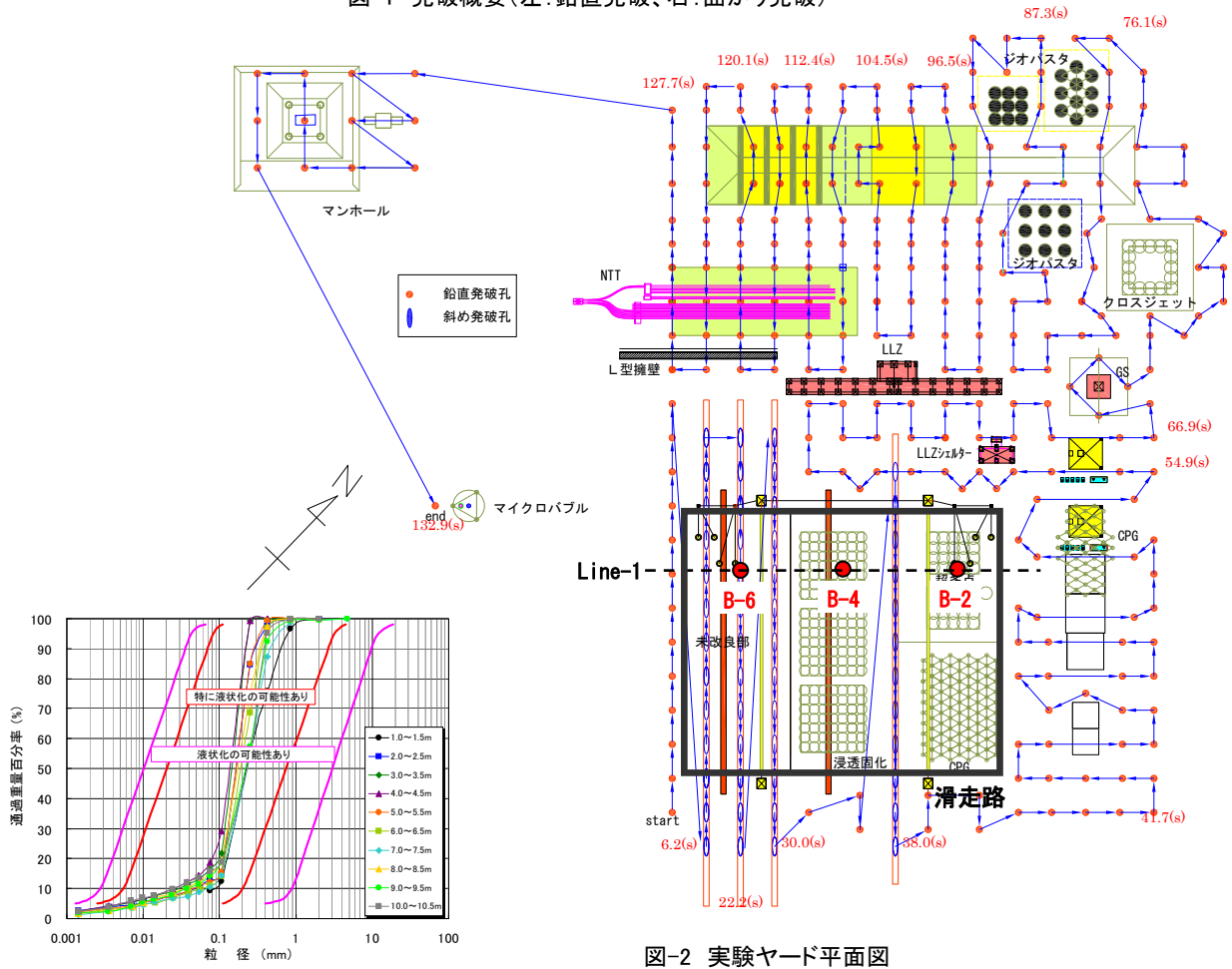


図-2 実験ヤード平面図

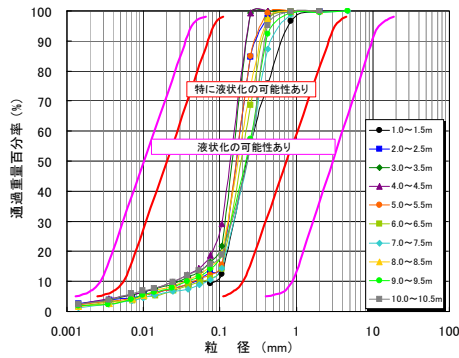


図-4 B-4の粒径加積曲線

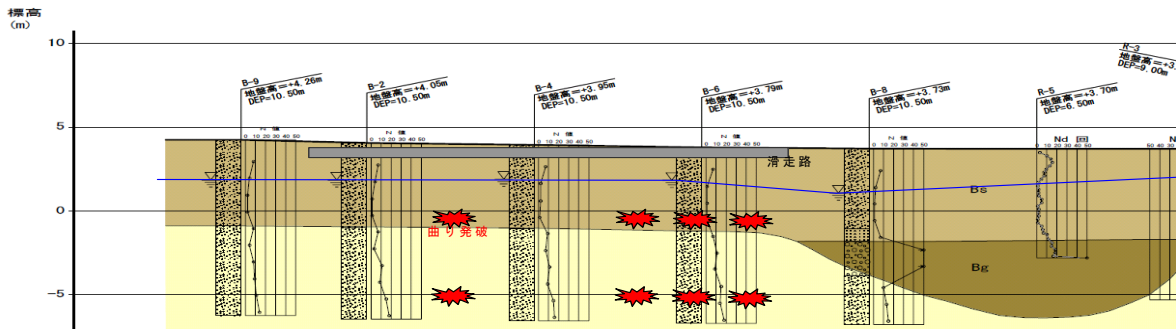


図-3 推定地質断面図 (Line-1)

滑走路部の代表的な地盤物性として、Line-1 の推定地質断面図を図 - 3 に示すとともに、当実験エリア内 B-4 地点の粒径加積曲線を図 - 4 に示す。図 - 3 より、滑走路部の原地盤は GL-5m まで N 値 5 以下の埋立土、GL-5m~-10m まで N 値 10 程度の比較的緩い砂地盤で構成されており、地下水位は概ね GL-2.5m 付近である。また、図 - 4 の粒度分布から港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾による「特に液状化の可能性あり」の範囲に属しており、当実験エリア地盤が非常に液状化しやすい性質を有していることが分かる。

図 - 5 に滑走路部の実験エリア区域を示す。浸透固化処理工法を適用した当実験エリアは、滑走路中央に位置し、未改良エリアと隣接する延長 20m、幅員 50m の比較的広い改良エリアである。滑走路部(延長 60m、幅員 50m)は、未改良エリアと改良エリアに区別されており、地盤中には、埋設管(Φ1m、L=55m)がそれぞれに埋設されている。浸透固化処理工法は、低圧注入で地盤中の間隙水を恒久型薬液(ゼリー状)に置き換えるため、周辺構造物への影響が少ない工法である³⁾⁴⁾。そのため、地中埋設管を含む改良エリアに同工法が適用されている。

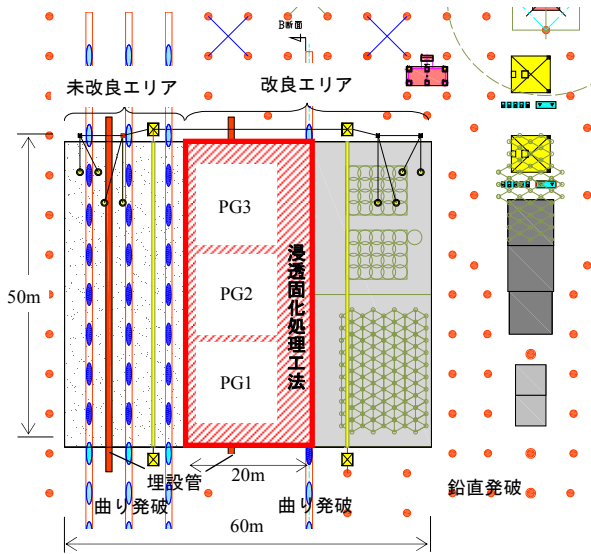


図-5 滑走路部の実験エリア区域

3. 実験ケース⁵⁾

性能規定型の合理的な液状化対策の一つとして、液状化層全てを地盤改良するのではなく、液状化層の上層を部分的に改良する方法が考えられる。耐震性能は、液状化によって生じる若干の沈下量を許容しても、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し、航空機の輪荷重に耐える程度の地盤支持力が確保されていることが求められる。

そこで、当実験エリアでは、浸透固化処理工法の改良率を低減し、液状化層厚に対する上部改良層厚の割合を実験パラメータとした。

以上より、当実験エリアでは、液状化層を GL-2.5m~-10.0m の範囲と仮定して、換算改良径 2.0m の球体を注入孔間隔 1.8m の改良率 70%で配置し、PG1 改良(GL-2.5m~-7.9m)、PG2 改良(GL-2.5m~-6.1m)、PG3 改良(GL-2.5m~-4.3m)の 3 改良を実験条件として設定した。

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³⁾。改良率 70%のイメージを図 - 6 に示す。

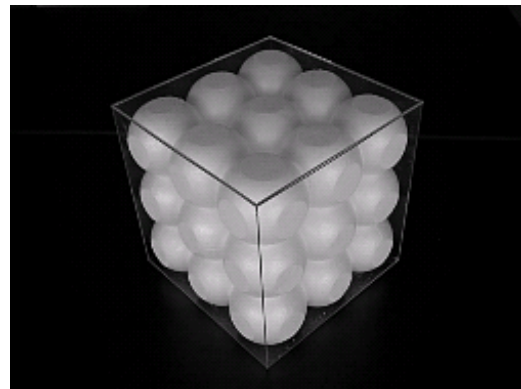


図-6 改良率 70%のイメージ³⁾

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。発破による作用加速度の測定は、改良体天端に設置した 3 成分の加速度計(10G)で行った。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、長期的な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。実験ケースを表 - 1 に示すとともに、実験平面図および断面図を図 - 7 に示す。

表-1 実験ケース

ケース名	改良率	改良範囲			
		改良層厚	部分改良率*	改良深度	
PG1改良	70%	5.4m	72%	上端	GL-2.5m
				下端	GL-7.9m
PG2改良	70%	3.6m	48%	上端	GL-2.5m
				下端	GL-6.1m
PG3改良	70%	1.8m	24%	上端	GL-2.5m
				下端	GL-4.3m

*) 改良層厚/液状化層厚(7.5m)

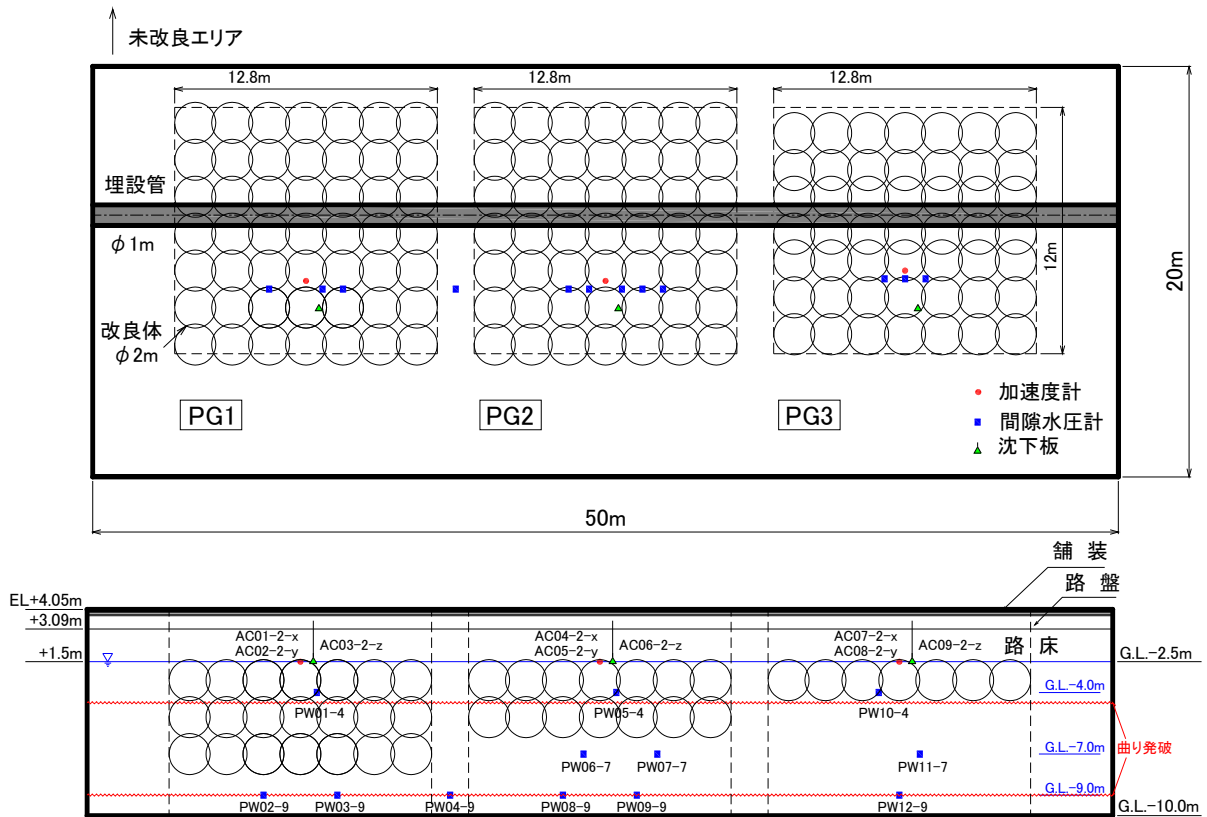


図-7 平面図(上)および断面図(下)

4. 実験結果および考察⁵⁾

発破直後の滑走路全景を写真-2 に示す。発破時、滑走路の周辺地盤では、時差 0.2 秒の連続的な発破の進行に伴い、泥水混じりの噴砂が生じるとともに、未改良エリアでは 30cm 程度の地盤沈下が発生するなど、液状化による被害が再現されていた。噴出した泥水は写真-3 に示すように、沈下した未改良エリアに流れ込み、滑走路面が浸水していた。一方、浸透固化処理工法を用いた当実験エリアでは、写真-4 に示すように、舗装面に損傷もなく、沈下の影響が少ないなど、液状化現象による被害は発生していない。



写真-3 未改良エリア



写真-2 滑走路全景



写真-4 当実験エリア

代表的な PG1 改良における加速度 (α) および過剰間隙水圧 (Δu) の時刻歴を図-8 に示す。過剰間隙水圧の太実線は 1Hz のローパスフィルターを施したもので、凡例の右数字は水圧計の設置深度 (m) 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。

改良部下の未改良地盤に設置した水圧計 (PW02-9) は、同期信号入力時から約 $t=50s$ 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 $\Delta u / \sigma_v' = 0.76$ を約 100 秒間継続していることから、当実験エリアの未改良地盤が概ね液状化状態であったことが分かる。液状化状態まで上昇した過剰間隙水圧は $t=150s$ に消散し始め、発破 24 時間後にはほぼ静水圧状態に収束した。一方、改良層内に設置された水圧計 (PW01-4) は、間隙をゼリー状の固化体で置き換えられているため、過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma_v' = 0.16$ に抑えられおり、液状化には至っていない。

地盤剛性の逆数である体積圧縮係数は、過剰間隙水圧の上昇に伴い大きくなることが知られている⁶⁾。本実験では、発破後 24 時間で過剰間隙水圧が消散し、後述するように滑走路面の沈下挙動も収束している。従って、地盤の体積圧縮係数が概ね回復し、航空機の運行に必要な地盤支持力が確保されているものと考えられる。

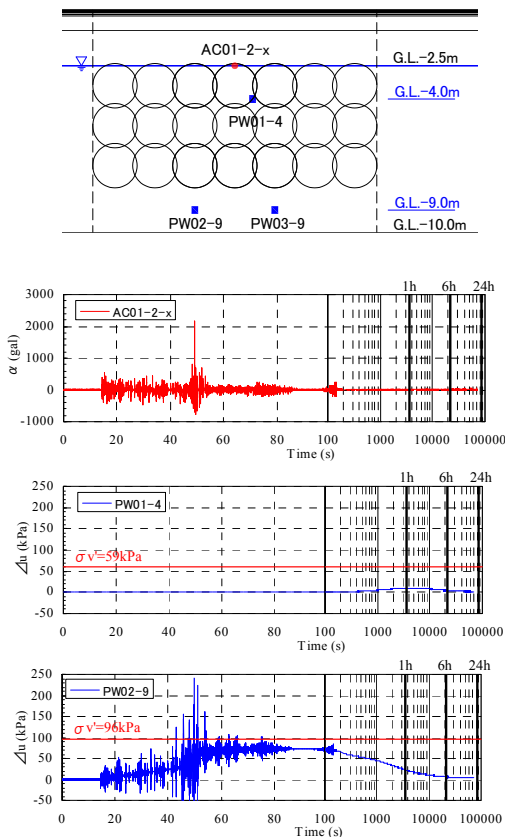


図-8 加速度および過剰間隙水圧の時刻歴 (PG1)

次に、発破 3 日後の滑走路面の沈下コンターを図-9 に示す。未改良エリアや各改良エリアの境界部では、液状化によって最大 35cm 程度の沈下が生じているのに対して、浸透固化処理工法による当改良エリアでは中央部で最大 1.5cm 程度の沈下に留まっている。しかし、人工的に液状化を発生させるための発破条件が、未改良エリアと改良エリアで異なるため、当実験エリア内の未改良部の沈下を基準に比較を行う。図-10 に未改良エリアを含む各改良ケースの断面沈下形状 (Line-PG1~PG3) を示す。図中より、当実験エリア未改良部 (距離 40m) の沈下量が 20cm 程度であり、当改良部中央では、未改良部の沈下の 8% 程度以下に抑える効果があったと言える。各改良ケースの断面沈下形状は、中央部の沈下量が小さく、改良域端部に近づくに従い、未改良エリアの沈下影響を受けた凸な形状を呈している。また、沈下量および尖度は、改良層厚が薄くなるに従い (PG1 から PG3 にかけて)、顕著になる傾向がある。滑走路面の平坦性について、各実験ケースの舗装勾配分布を図-11~12 に示す。なお、勾配の算出は 2.5m ピッチで行い、空港土木施設設計基準⁷⁾に示されている滑走路の許容縦断勾配 1.5% を規定勾配としている。図中より、当改良エリアは発破 (被災) 3 日後において、規定の平坦性を概ね満足するものと考えられる。

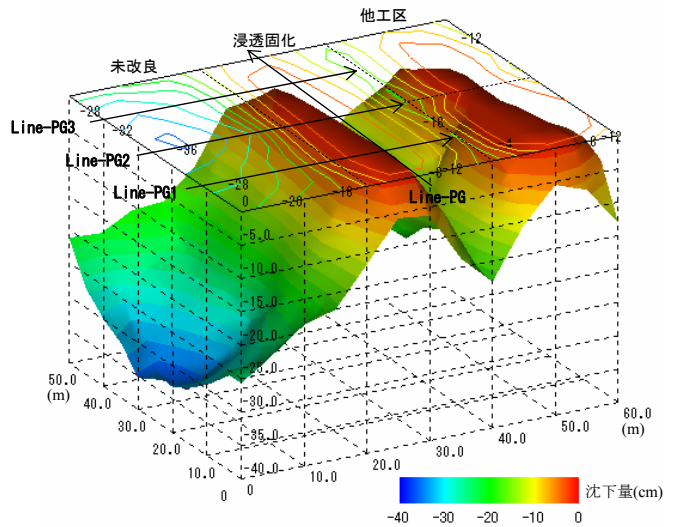


図-9 発破 3 日後の沈下コンター

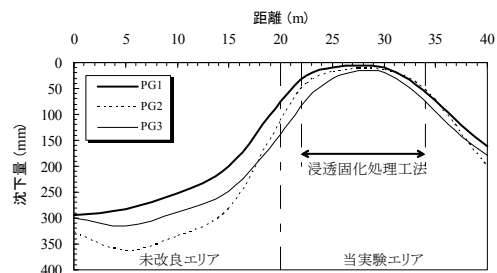


図-10 当実験エリアの断面沈下形状

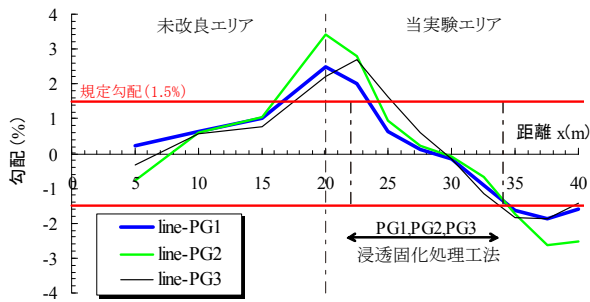


図-11 当改良部の舗装面勾配分布

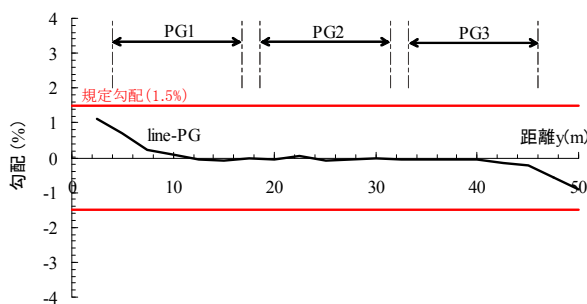


図-12 当改良部の舗装面勾配分布

なお、図-11の未改良エリア側の改良域端部については、若干、規定勾配を逸脱している箇所が見受けられる。これは、未改良エリアから改良エリアにかけて、実際の滑走路仕様に基づいたアスファルト舗装が連続的に施工されており、未改良エリアの沈下影響を隣接する当改良エリアが過大に受けたためだと考えられる。

最後に、発破直後を基準にした各改良中央部における時間沈下を図-13に示す。図中より、滑走路面の沈下が概ね発破後24時間で収束しており、前述した過剰間隙水圧の消散過程と対応していることが分かる。

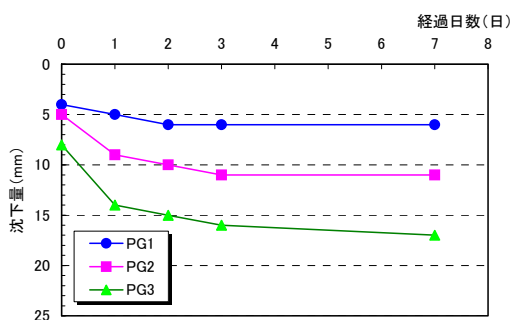


図-13 各改良中央部の時間沈下

5. まとめと今後の課題

本実大現場実験では、滑走路直下地盤に対して浸透固化処理工法を適用した。その際、改良率を従来の100%から70%に低減し、改良層厚を液状化層厚に対して上層に部分適用した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 改良率を70%に低減した改良体においても、過剰間隙水圧の上昇を抑え、滑走路面の平坦性を確保した
- (2) 改良層厚が薄くなるに従い、沈下量が増加し、改良域端部で未改良エリアの沈下影響を受けやすくなった
- (3) 下部に未改良地盤を残した本実験ケースにおいて、改良中央部で未改良部の沈下の8%程度以下に抑えた
- (4) 過剰間隙水圧が、発破24時間後にほぼ消散し、滑走路面の沈下挙動も収束していることから、液状化した地盤の支持力は概ね回復している

当改良エリアでは、未改良部の沈下と比較して、予想以上の沈下低減効果があった。これは、発破条件が異なることや、液状化層の上層を部分的に改良することで層全体系の地震応答特性が変化したことなどが考えられるが、そのメカニズムについては不明確なことが多く、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、国土交通省および(独)港湾空港技術研究所が実施した「発破制御による実大現場実験」の内、滑走路直下の液状化対策に関する共同研究として、浸透固化処理工法研究会が参画したものである。紙面を借りて関係者の方々に感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 中澤博志、菅野高弘：制御発破を用いた空港施設の液状化挙動に関する実物大実験、震災予防協会、No. 218、pp.40-44、2008年
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻)、pp.384、平成19年
- 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、平成15年
- 4) 山崎浩之、善功企、河村健輔：溶液型注入工法の液状化対策への適用、港湾空港技術研究所報告、第41巻、第2号、2002年
- 5) 池野勝哉、宇梶伸、菅野高弘、中澤博志：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、第43回地盤工学研究発表会、pp.1835-1836、2008年
- 6) (社)地盤工学会：液状化対策工法、pp.369-370、平成16年
- 7) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設設計基準、平成11年