

液状化現場実験における空港舗装の変形及び FWD たわみ測定結果

前川亮太¹・坪川将丈²・菅野高弘³・中澤博志⁴・水上純一⁵

¹正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

E-mail : maekawa-r28a@pari.go.jp

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

³正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

⁴正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

⁵正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

空港が震災を受けた際、地盤の液状化が滑走路等の空港施設に及ぼす影響の把握を目的として、液状化現場実験を実施した。その際、液状化前後における舗装の変形および FWD によるたわみを測定したので報告する。アスファルト舗装とコンクリート舗装それぞれについて、予め液状化対策としての地盤改良を実施した区域と実施しない区域を設け、液状化前後の舗装の変形およびたわみの変化状況を比較した。路面の変形について、液状化による地盤沈下に伴って、液状化対策実施区域と未実施区域の路面高さの差は 30cm となり、その変形は液状化後数時間で収束することが確認できた。FWD たわみについて、液状化対策の有無にかかわらず、液状化前に比べて液状化後にたわみが大きくなり、7日間程度かけて液状化前の水準に戻る傾向が確認できた。

Key Words : liquefaction, profile, FWD, portable FWD

1. はじめに

空港が震災を受けた際、地盤の液状化が滑走路等の空港施設に及ぼす影響の把握を目的として、液状化現場実験を実施し、液状化前後における空港舗装の変形および支持力測定を実施した。

舗装の変形については、小型路面性状測定装置を用いて、液状化前、液状化3時間後、6時間後、3日後および7日後に測定を実施した。FWD たわみについては、空港舗装対応 FWD 測定機(標準荷重 196kN)および小型 FWD 測定器を用いて載荷時の路面のピークたわみを測定した。



写真-1 実験サイト全景

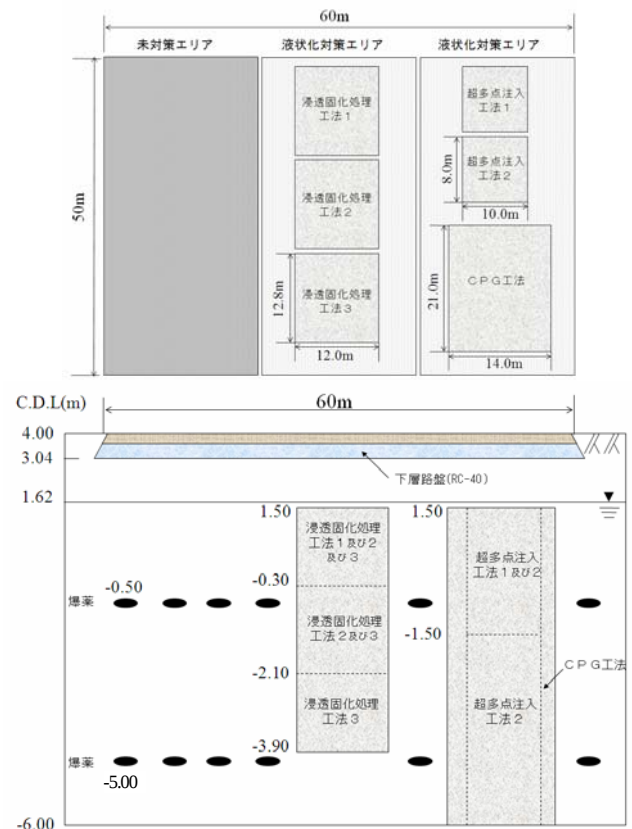


図-1 アスファルト舗装平面図(上)及び断面図(下)

測定時期は液状化前、液状化1日後、3日後および7日後とした。これら3種類の測定により得られた結果を報告する。

2. 液状化実験の概要

液状化実験は平成19年10月に石狩湾新港内の埋立地にて実施された。総面積約1.6haの実験サイトに種々の空港施設を設置し、地表面下4.5mおよび9.0mの2段に埋設された583弾の爆薬を発破させることによって液状化を発生させ、各空港施設に及ぼす影響を把握した(写真-1)。設置された空港施設のうち、アスファルト舗装の平面図と断面図およびコンクリート舗装の平面図をそれぞれ図-1および図-2に、舗装断面図を図-3に示す。アスファルト舗装は滑走路を、コンクリート舗装はエプロンを想定し、設計要領¹⁾に準じてB-747を代表機種とする20,000回の設計反復作用回数に対応する舗装構造を設定した。

本試験サイトの地盤は、旧海岸である砂質土層(As1層、As2層)の上に約5mの埋立層(Fs層)を設けたものであり、液状化しやすい地盤を採択した。埋立層(Fs層)が路床を

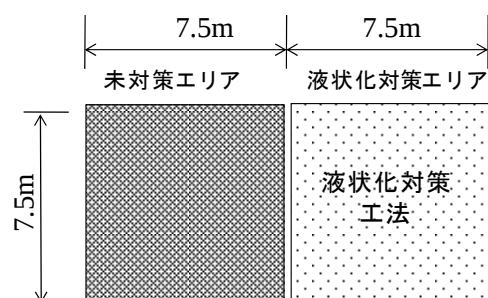


図-2 コンクリート舗装平面図

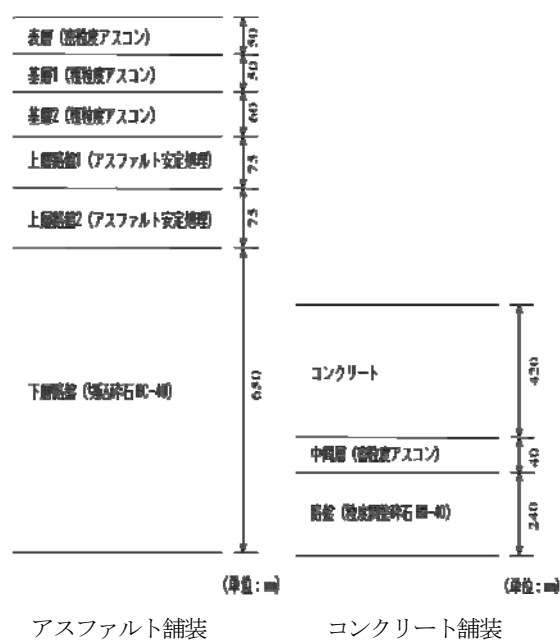


図-3 舗装断面図

構成しており、路床の設計支持力 K_{75} は 35MN/m^3 である。

図-1および図-2のとおり、アスファルト舗装およびコンクリート舗装それぞれ、液状化対策としての地盤改良を行った区域と未対策区域を設けた。液状化対策工法として、アスファルト舗装には浸透固化処理工法、超多点注入工法および静的圧入締固め(CPG)工法の計3工法を、コンクリート舗装には浸透固化処理工法を用いた。いずれの区域も地表面下2.5mを改良域の上端とし、下端を工法に応じて変化させた。

浸透固化処理工法は薬液注入工法の一つであり、地盤中の間隙水を恒久薬液に置換し、地盤構造の変化の抑制を図る工法である。本実験では改良域の下端を3種類に変化させた。超多点注入工法は薬液注入工法の一つであり、数十から数百の注入ポイントから低吐出かつ低圧で間隙水を恒久薬液に置換する工法である。本実験では改良域の下端を2種類に変化させた。静的圧入締固め(CPG)工法は密度増大工法の一つであり、流動性の低い注入材を振動や衝撃を加えずに地盤内に圧入し、固結体を造成することで周辺地盤を圧縮し、密度を増大させる工法である。本実験のアスファルト舗装およびコンクリート舗装において同一の工法を採用した。

発破の結果、路面において水平方向に最大約1,000Gal、鉛直方向に最大約5,200Galの加速度が発生し、実験サイト全面の地盤で液状化が発生した。液状化の持続時間について、地中の間隙水圧の測定結果によると、発破中に間隙水圧がピークに達し、増大した間隙水圧は発破後1時間で半分程度消散した。さらに発破後1日程度で発破前の水圧に戻ったことが確認された。

3. 路面形状の測定結果

測定に使用した小型路面性状測定装置は、装置中央に設置された測定輪により路面の凹凸を検知し、内蔵されたジャイロセンサーで装置の傾きを認識することにより路面勾配を得るものである。本実験では測線両端の標高を水準測量で得て、その間の標高を当該装置により10mmピッチで測定した。測定風景を写真-2に示す。



写真-2 小型路面性状測定装置

代表的な4本の測線(アスファルト3本, コンクリート1本)について測定結果を示す。

各測線の位置は図-4 および図-5 のとおりである。測線1(図-6)に示すとおり, 発破前はほぼ一様な高さにあった路面が, 発破3時間後には未対策域中央の沈下が29.8cmに達した。液状化対策域中央での沈下は1cm程度であった。測線2(図-7)および測線3(図-8)のとおりに, 未対策域は液状化対策域に比べて路面の沈下および変形ともに極めて大きかった。いずれの場所においても, 沈下および変形は発破後直ちに発生し, 比較的早期に収束した。例えば, 測線1の未改良域中央部における発破7日後の沈下量が31.5cmであるのに対して, 発破3時間後は29.8cmと, 7日後の沈下量に対して3時間後には既に95%の沈下が発生していた。

測線4(図-9)はコンクリート舗装の測定結果である。液状化対策を行った地盤上のコンクリート版に対して未対策地盤上の版が沈下しており, 未対策地盤上の7日間の沈下量は端部において最大であり, 10.2cmであった。2枚の版がダウエルバーで結合されていることにより液状化対策域の版が連れ込まれる形で沈下しており, 液状化対策域における未対策域に遠い方の端部(図-9の右側端部)での7日間沈下量が0.5cmであったのに対し, 未対策域側の端部での沈下量は1.5cmであった。

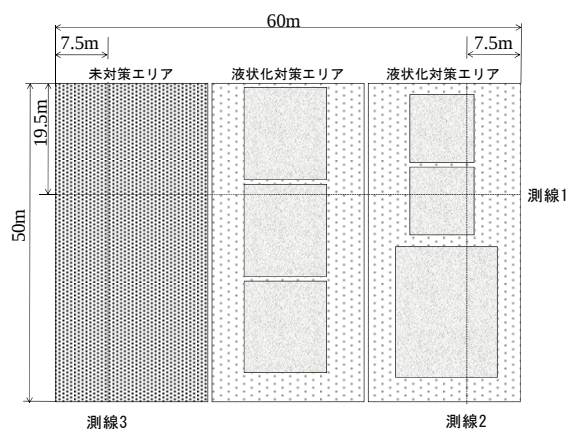


図-4 測線位置図(アスファルト舗装)

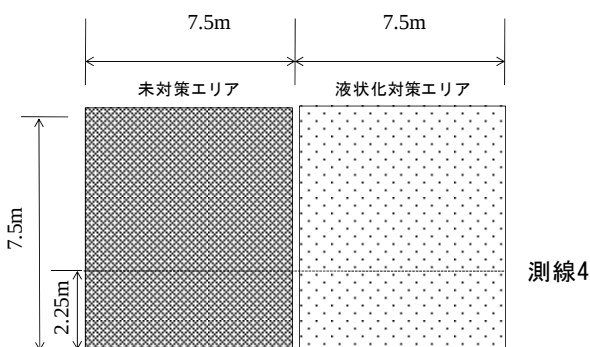


図-5 測線位置図(コンクリート舗装)

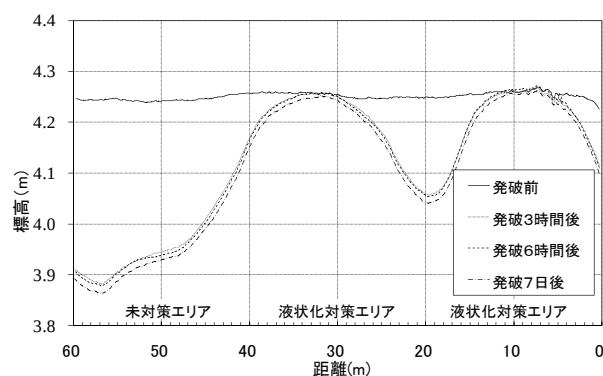


図-6 測線1の路面形状測定結果

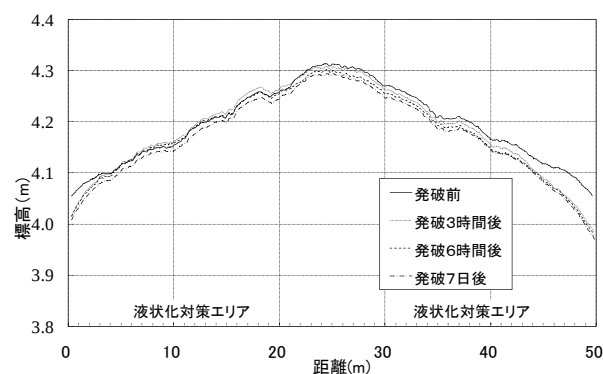


図-7 測線2の路面形状測定結果

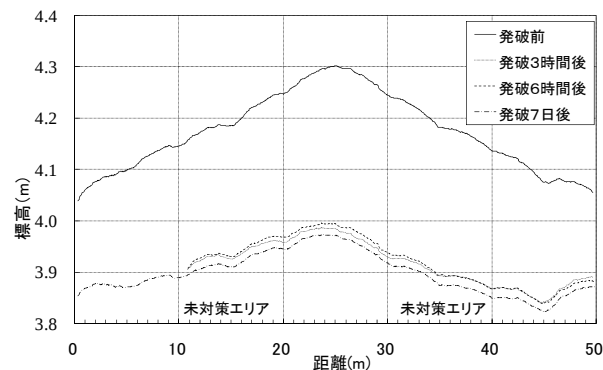


図-8 測線3の路面形状測定結果

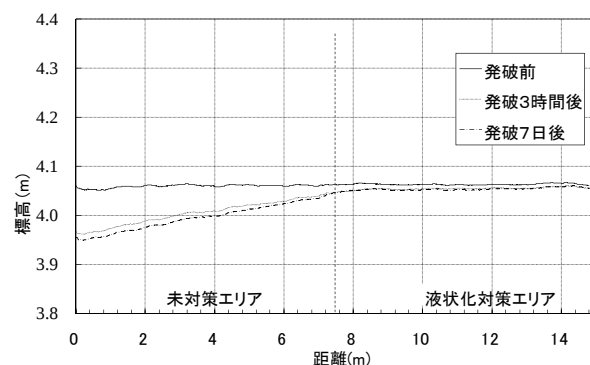


図-9 測線4の路面形状測定結果

4. 支持力の測定結果

(1) 空港舗装対応 FWD

空港舗装対応の FWD 測定機(写真-3)を用いて、載荷時のたわみを測定した。測定地点数はアスファルト舗装が 47 地点(うち液状化対策域 31 点、未対策域 16 点)、コンクリート舗装が 8 地点(うち液状化対策域 3 点、未対策域 5 点)であり、測定時期は発破前、発破 1 日後、3 日後、7 日後の 4 回である。目標とする衝撃荷重を 196kN とし、各地点の測定時期ごとに重錘を 4 回落下させ、2 回目から 4 回目までの荷重により発生するたわみ値を平均することにより結果を整理した。

液状化対策域および未対策域それぞれにおける測定結果の例を図-10 および図-11 に示す。FWD によって測定されたたわみ量は、一般的に、測定時の路面温度および重錘落下時に得られた荷重値による補正を行うが、図-10 および図-11 で示しているのは未補正の測定値である。

載荷版中心位置におけるたわみ(D0 値)について、舗装内温度および載荷荷重に関する補正を行った。



写真-3 空港舗装対応 FWD 測定機

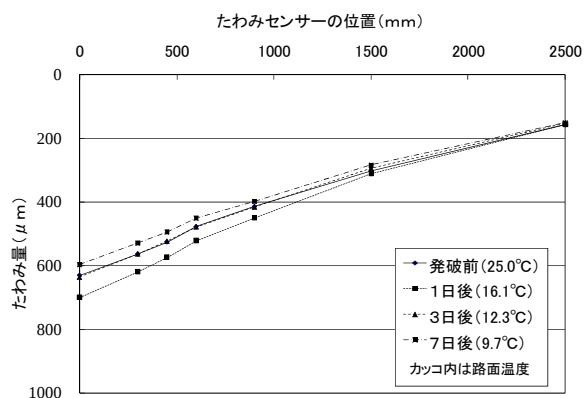


図-10 FWD 測定結果(アスファルト液状化対策域)

図-12 は各地点で測定された D0 値を補正し、液状化対策の有無ごとに補正後 D0 値の平均値を示したものである。D0 値の補正にあたっては、文献^{2),3),4)}を参考に基準値を設定し、坪川らが開発したシステム⁵⁾を用いて算出した。具体的には、測定時の気温、路面温度および測定前日の最高気温から測定時の舗装内温度を推定し、舗装内温度 20°C、載荷荷重 196kN を標準として D0 値を補正した。図-12 に示すとおり、液状化対策の有無にかかわらずたわみ量が発破前に対して発破後に増加し、その後減少に転じる傾向が確認できた。しかしながら、D0 値の大きさについて液状化対策の有無による明確な違いは見られなかった。

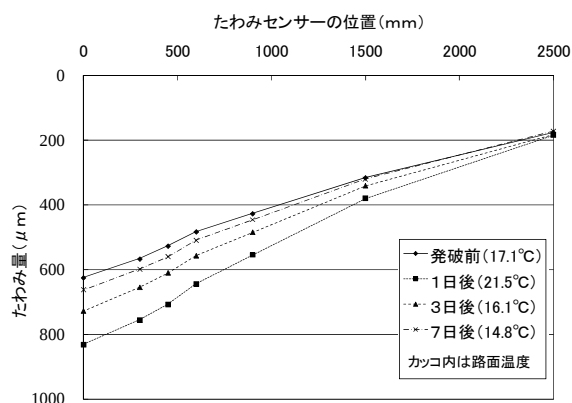


図-11 FWD 測定結果(アスファルト未対策域)

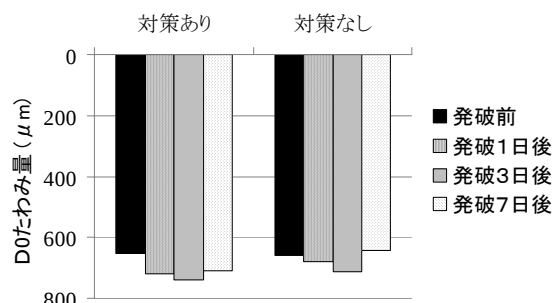


図-12 補正後 D0 値(アスファルト舗装)

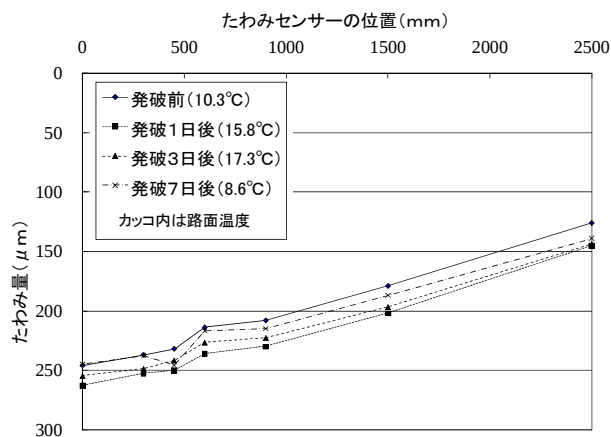


図-13 FWD 測定結果(コンクリート液状化対策域)

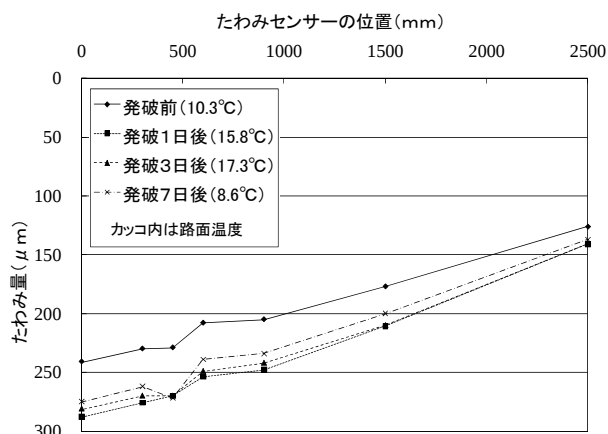


図-14 FWD 測定結果(コンクリート未対策域)

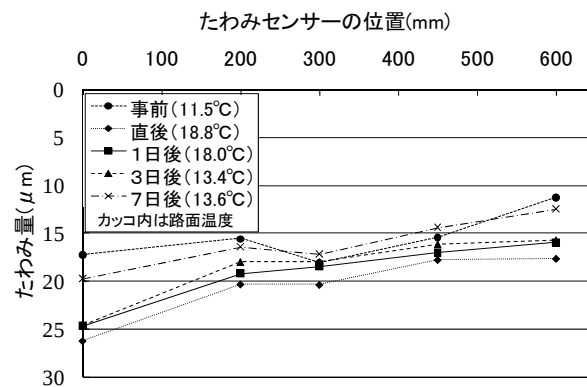


図-15 小型 FWD 測定結果(アスファルト液状化対策域)

(2) 小型 FWD

小型 FWD(写真-4)を用いて、載荷時のたわみを測定した。空港舗装対応 FWD と合わせて小型 FWD による測定を実施した理由は、空港が震災を受けた際、近隣に空港舗装対応 FWD がなくても迅速に舗装構造の診断が実施できることをねらいとしたためである。

測定地点数はアスファルト舗装が 89 地点(うち液状化対策域 59 点、未対策域 30 点)、コンクリート舗装が 8 地点(うち地盤改良域 3 点、未改良域 5 点)であり、測定時期は発破前、発破 3 時間後、1 日後、3 日後、7 日後の 4 回である。測定に用いた載荷重など、今回の測定において設定した基本条件を以下に示す。

- ①舗装表面のたわみ量：(D0, D20, D30, D45, D60)
- ②載荷重：10kN (載荷板半径 20cm、落下高さ 50cm)
- ③測定項目：たわみ量、舗装面温度、気温

重錘の質量および落下高さについて決まった規格はないが⁶⁾、今回の液状化現場実験では、実際の空港において被災後迅速に多くの箇所を測定できることを想定し、重錘の質量 15kg、落下高さ 50cm と比較的軽易な規模に設定した。また、空港舗装対応 FWD と同様に、各地点の測定時期ごとに 4 回載荷し 2 回目から 4 回目までのたわみ値を平均することにより結果を整理している。



写真-4 小型 FWD 測定器

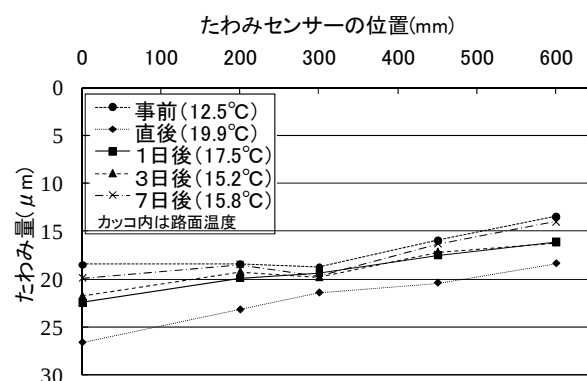


図-16 小型 FWD 測定結果(アスファルト未対策域)

アスファルト舗装に関して、液状化対策域および未対策域それぞれにおける測定結果の例を図-15 および図-16 に示す。

いずれの測点においても、発破前の D0 たわみ量が 20 μm 程度であるのに対して、発破直後は 30%~50%程度増加し、その後時間の経過とともに減少するという傾向がみられた。しかしながら、たわみの大きさについて、液状化対策の有無による明確な相違は確認できなかった。

前述のとおり今回の実験では、空港舗装対応 FWD および小型 FWD それぞれの目標荷重値として 196kN および 10kN を採択した。載荷荷重に 20 倍程度、測定された D0 値に 30 倍程度の違いがあったが、両測定の結果から、発破前に比べて発破後にたわみが大きくなり、7 日間程度かけて発破前の水準に戻る傾向が確認できた一方で、液状化対策の有無によるたわみ量に明確な相違が確認できなかった。

5. まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に示す。

- (a) 沈下に伴う舗装路面の変形について、液状化後の未対策域の路面高さは液状化対策域と比べて最大

30cm 低くなった。

- (b) 路面の沈下は発破後ただちに発生した。発破 3 時間後の沈下量は発破 7 日後に対して 95% に至っており、発破 3 時間後には沈下がほぼ収束していた。
- (c) FWD で測定したたわみ量について、液状化対策の有無にかかわらず、発破前に比べて発破後にたわみが大きくなり、7 日間程度かけて発破前の水準に戻る傾向が確認できた。
- (d) 舗装温度および載荷荷重について補正した D0 値の算出結果によると、液状化の前後それぞれにおいて液状化対策の有無による明確な違いがみられなかった。
- (e) 小型 FWD については、液状化対策の有無に関わらず発破直後のたわみ量の増加およびその後の減少が確認できたが、液状化対策の有無による明確な違いがみられなかった。

6. おわりに

本稿では、今回実施した液状化現場実験での舗装に関する測定結果を報告した。液状化が発生した後に路面の沈下が数時間で収束した一方で、FWD によるたわみ量の収束は沈下のそれよりも遅く、7 日程度かけて収束するなど、興味深い結果が多数得られたところである。

路面高と FWD たわみ量の推移傾向が異なったメカニズムについては現時点では解明できていないが、沈下に影響を与える深度と FWD たわみ量に影響を与える深度をそれぞれ特定しつつ今後詳細に分析する予定である。

今回は小型 FWD の衝撃荷重を比較的軽易な規模に設定したが、たわみ測定値の推移傾向として空港舗装 FWD と同様の傾向が得られたことは注目に値すると考えられ、今後、前述のとおり FWD たわみ量の推移メカニズムが解明できれば、小型 FWD による液状化状況の把握が期待できると考えている。

上記現象の解明をはじめとして、実験全般に関する詳細な分析を今後実施する予定である。

謝辞：当該実験の実施にあたっては、石狩湾新港管理組合および国土交通省北海道開発局から多大なご協力を賜りました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省航空局監修：空港舗装構造設計要領，1999.
- 2) 八谷好高，高橋修，坪川将丈：FWD による空港アスファルト舗装の非破壊構造評価，土木学会論文集，No.662/V-49，pp169-183，2000.
- 3) 八谷好高，坂井典和，廣田道紀，高橋修：200kN 荷重の FWD による空港コンクリート舗装の非破壊構造評価，土木学会舗装工学論文集，第 4 巻，pp.199-208，1999.
- 4) 阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林 正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No.460/V-18，pp.41-48，1993.
- 5) 坪川将丈，八谷好高，水上純一：FWD による空港舗装構造評価システムの開発，土木学会舗装工学論文集，第 10 巻，pp77-82，2005.
- 6) 土木学会舗装工学委員会：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー-2，2002.

AN INVESTIGATION OF SURFACE PROFILE AND PAVEMENT STRUCTURE ON LIQUEFACTION EXPERIMENT SITE

Ryota MAEKAWA, Yukitomo TSUBOKAWA, Takahiro SUGANO, Hiroshi NAKAZAWA
and Junichi MIZUKAMI

This paper reports an investigation on liquefaction experiment site. In the experiment, surface deformation and FWD deflection were measured on asphalt and concrete pavements which were on improved ground for liquefaction or unimproved one. The result showed that difference of elevation between pavement on improved ground and unimproved one were approximately 30 cm at most. The transformation of surface deformation continued for only a few hours. FWD deflection just after liquefaction exceeded that before liquefaction, and deflection kept decreasing for about seven days.