

現場液状化実験における地中レーダー による滑走路変状調査

中澤 博志¹・菅野 高弘²・高橋 清³

¹港湾空港技術研究所耐震構造研究チーム
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:nakazawa@pari.go.jp

²港湾空港技術研究所地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:sugano@pari.go.jp

³アイレック技建株式会社営業開発本部 (〒111-0041 東京都台東区元浅草三丁目18-10)

E-mail:takahashi@airec.co.jp

空港は地震災害時には緊急物資輸送の拠点等としての役割を果たし、非常に重要な社会基盤施設の一つである。大規模地震の襲来時、供用の可否判定をするにあたり、被災程度に応じ対応が異なってくることから、実際にどのような被害が起こり得るかの把握が必要となる。

本研究では、臨海部の軟弱地盤上に施工された滑走路を想定し、実大滑走路試験体を現場に施工し、制御発破により地盤の液状化を発生させ、実際の被災程度の把握を試みた。水準測量より液状化に伴うアスファルト舗装の変状を把握するとともに、地表面では確認できない液状化によるアスファルト舗装下の空洞化や地盤の緩みを調べるため地中レーダー探査を実施し、被害傾向についてまとめた。

Key Words : *field experiment, runway pavement, ground-penetrating radar, liquefaction, controlled blast technique*

1. はじめに

巨大地震時・地震後における空港の果たす役割は、空路による救急・救命活動、救援物資輸送、復旧物資輸送、陸路の復旧までの代替輸送機関等として期待されており、非常に重要な社会基盤施設の一部を担っている。少なくとも、被災時に最低限の機能を確保するためには、巨大地震時の被災想定、震災時に求められる機能、被災後の供用判断基準の整備などの検討が必要である。現在、主要空港の巨大地震時のあり方として、発災後、早期に緊急・救命活動拠点として機能すること、3日以内に緊急物資及び人員の輸送拠点として機能し、民航機の運航再開のため、通常時の50%の施設能力を回復することを目安として、対策が考えられている¹⁾。

空港における過去の地震被害では、1964年の新潟地震時の新潟空港で生じた液状化による被害が有名である。当時の報告²⁾からは、空港用地内随所に地盤の液状化に起因する被害が見られ、ターミナルビルでは、液状化に伴う地盤の支持力の消失により1mの沈下および階下の浸水、滑走路においては、舗装盤のせり上がり破壊や液状化により不等沈下が

生じ、舗装面に波状の凹凸が生じる等の被害が発生したことが報告されており、被災後、空港機能が完全に麻痺状態に陥った様子が伺える。しかし、現在の既存空港土木施設への影響に関しては、例えば、滑走路舗装の設計法や考慮すべき航空機荷重レベル等の技術的背景が新潟地震当時と異なることもあり、新潟地震のような過去の被害事例から予測することは困難であると思われる。

本研究では、重要な空港土木施設として滑走路に着目し、液状化による滑走路への影響について検討するため、実際に供用されている滑走路と同等に設計されたアスファルト舗装を現場に施工し、制御発破により地盤の液状化を発生させることで被災程度の把握を試みた。特に、滑走路については、空港によりアスファルト舗装構造が1m以上と厚くなっているため、路床を含めたアスファルト舗装直下地盤や舗装構造への影響について把握することが難しいことが予想される。このような地表面では確認できないアスファルト舗装下の空洞化や地盤の緩みについて、早期に把握する方法として地中レーダーを用い、アスファルト舗装に生じた損傷や変状に関する評価を実施した。

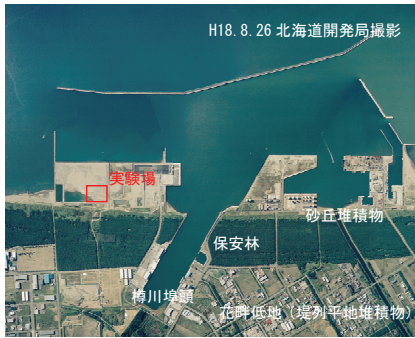
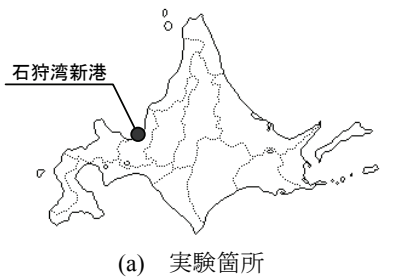


図-1 実験位置図

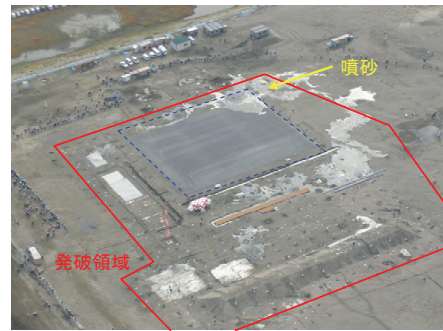


写真-1 発破後の様子（北海道開発局ヘリより撮影）

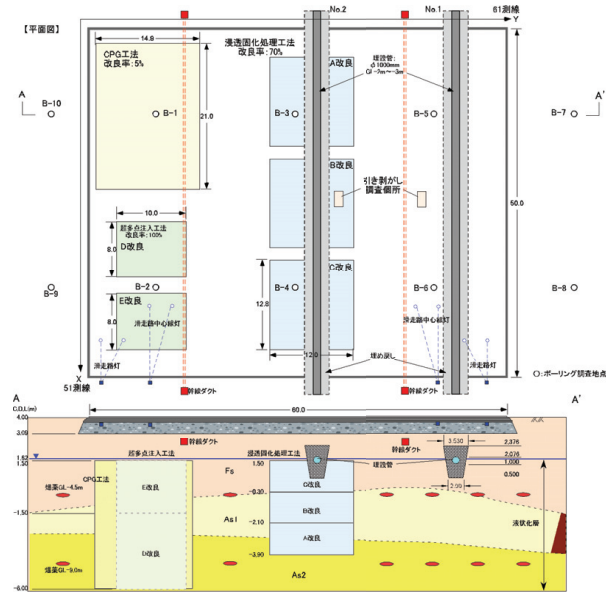


図-2 アスファルト舗装の平面図および断面図

2. 制御発破を用いた現場液状化実験

(1) 実験概要

本来、発破工は、地下水で飽和された緩い砂地盤を対象に、発破のエネルギーを利用し、人工的に液状化を発生させ地盤を締固める工法³⁾として、古くから適用されてきたが、発破を液状化の発生手段として使い、液状化の発生過程や発破による液状化時の構造物の挙動観測を目的とした現場実験が、2001年に十勝港で実施されている⁴⁾。この実験では、実物大の試験体が4800m²の領域に設置され、斉発数254段、総装薬量844kgの規模で段発発破が行なわれた。一方、本研究では、2007年10月27日に図-1に示す北海道小樽市銭函の石狩湾新港西地区において、国内空港の耐震対策の検討を目的として、空港施設の液状化時挙動に関する制御発破を用いた現場液状化実験を実施した。なお、今回実施した制御発破は、斉発数583段、装薬量1760kgの大規模な段発発破である。

写真-1に発破後の実験用地の全景を示す。実線部分が発破領域、点線部分がアスファルト舗装部分である。約1.65haの実験用地内において、施工前の地盤調査に始まり、液状化対策工および実際の滑走路と同様なアスファルト舗装を施工した。また、発破実験時には、過剰間隙水圧の測定を実施するとともに、その前後において、水準測量によるアスファルト舗装の変状観測と地中レーダーによる舗装構造や空洞化の有無の確認を実施した。

(2) 地盤条件および試験体の概要

a) 地層概要

図-2に、アスファルト舗装の平面図と断面図をそれぞれ示す。図中には、液状化対策範囲および地下

表-2 液状化対策工法

改良方法	工法	改良ケース	改良率(%)	改良深度GL-(m)
密度増大	静的圧入締固め工法 (Compaction Grouting)	CPG	5	2.5~8.0
薬液注入	浸透固化処理工法 (Permeable Grouting)	A	70	2.5~7.9
		B	70	2.5~6.1
		C	70	2.5~4.3
	超多点注入工法 (Multiple Permeation Grouting)	D	100	2.5~10.0
		E	100	2.5~5.5

埋設管が図示されている。施工前に実施したボーリング調査結果から地層構成をまとめると、地表面からN値1~8の埋土層(Fs層)、N値3~12の砂質土層(As1層)、およびその下位にN値8~20の砂質土層(As2層)が堆積している。また、実験場内の地下水位は、ボーリングの孔内水位から、概ねGL-2.0m~2.5mの範囲にあることが確認された。

アスファルト舗装下には、液状化対策工として、表-2に示す密度増大工法と薬液注入工法が合計6箇所に施工された。以後、これらの地盤改良域以外の部分を未改良域と呼ぶこととする。

b) 土質特性

表-3に各層における試料の物理的性質、図-3にFs層における粒径加積曲線を示す。Fs層の細粒分含有

率は、 $F_c \leq 30\%$ を示し、港湾基準⁵⁾の「特に液状化の可能性あり」の範囲に分布していることがわかる。また、別途実施した液状化試験では、軸ひずみ両振幅 $DA=5$ (%)、繰返し載荷回数 $N=20$ (回)で得られる液状化強度 R_{L20} がFs層で $R_{L20}=0.189\sim 0.244$ 、As2層で $R_{L20}=0.204\sim 0.222$ と比較的低い値を示し、液状化しやすい土質特性であった。

c) アスファルト舗装

アスファルト舗装の設計条件は、空港舗装構造設計要領⁶⁾に基づき、空港舗装における一般的な値として表-4に示す値とした。図-4にアスファルト舗装構造を示す。アスファルト舗装構造の構成は、表層から基層までが16cm、上層路盤(アスファルト安定処理)が15cm、下層路盤が65cmであり計96cmである。なお、アスファルト舗装の表面は、長期にわたる施工・現場観測を考慮し、排水勾配1.0%とした。

d) 滑走路付帯設備

アスファルト舗装内には幹線ダクトおよび灯火(滑走路灯、滑走路中心線灯)が配置されている。図-2に示す様に、幹線ダクトに関しては、GL-1.25mの路床内に150mm間隔でSGP管が9条(3×3)施工され、灯火に関しては、GL-0.35mの下層路盤上部にSGP管が1条埋設されている。

e) 地下埋設管

アスファルト舗装直下のA~C改良域および未改良域におけるGL-2.0mの深度にφ1000mmの高耐圧ポリエチレン管(No.1, No.2)を施工した。これらの埋設管は、アスファルト舗装脇のマンホールに連結されている。なお、埋設管の敷設時には、図-3に示す粒径の再生骨材を使用し、締固めを行った。

(3) 実験方法

本実験では、液状化層をGL-10mとし、基本的な装薬パターンとして、GL-4.5mおよびGL-9.0mの上下方向2段、水平方向6.5m間隔、上段の爆薬は2kgおよび下段は4kgのエマルジョン系含水爆薬を配置し、秒時差200msで制御発破を行った。なお、液状化対策範囲では、改良体の内部に発破孔を設けず、改良体間の周辺地盤に装薬し、改良体周辺を液状化を発生させた。

(4) アスファルト舗装の変状に関する調査

アスファルト舗装下の液状化層内に設置した間隙水圧計により、発破開始から発破後まで過剰間隙水圧の測定をするとともに、発破前後において、5mメッシュによる水準測量を発破前後、1時間後、1日後、3日後および7日後に実施した。

また、アスファルト舗装下における液状化による空洞化や緩み等の影響を把握するため、1mメッシュ(X:51測線×Y:61測線)による地中レーダー探査を発破前、発破後24時間以内に5回、2日後、3日後および7日後に実施した。探査の様子を写真-2に示す。地中レーダー探査装置は、図-5に示す様に送信装置(アンテナ)から電磁波を送信し、物性境界面からの反射波観測記録から地中の物性境界面の分布を

表-3 試料の物理的性質

地層	N値(平均)	細粒含有率	湿潤密度	塑性指数
		F_c (%)	ρ_s (g/cm^3)	I_p
Fs	1~8(2.6)	7~38	1.827~1.867	NP
As1	3~12(7.9)	5~22	—	NP
As2	8~20(14.1)	8~32	1.796~1.819	NP

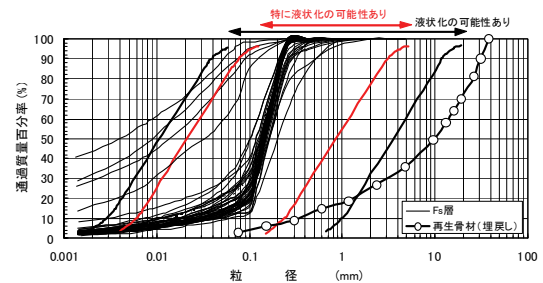


図-3 Fs層における粒径加積曲線

表-4 アスファルト舗装の設計条件

項目	設定値
設計荷重の区分	LA-1
設計反復作用回数	20,000回
路床の設計支持力	CBR10%
	$K_{75}=3.5MN/m^3$
アスファルト舗装の範囲	50m×60m(矩形)

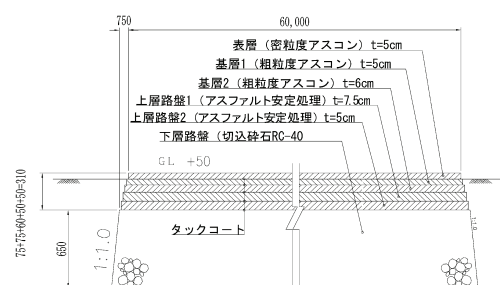


図-4 アスファルト舗装構造



写真-2 探査の様子

推定しようとするものである。探査方法は、地中に向けて電磁波を連続的に発射し、その電磁波が地中の物性境界面で反射した地点とほぼ同一の地上の点において、反射波記録として解析することにより地中の状態を調べることができる。なお、探査深度に関しては、図-6に示す通りである。本実験では、アスファルト舗装表面から、地下水面相当であるGL-2.5m程度までを測定可能とする400MHz周波数で探査を実施し、発破前と比較し、異常箇所分布の抽出を行った。

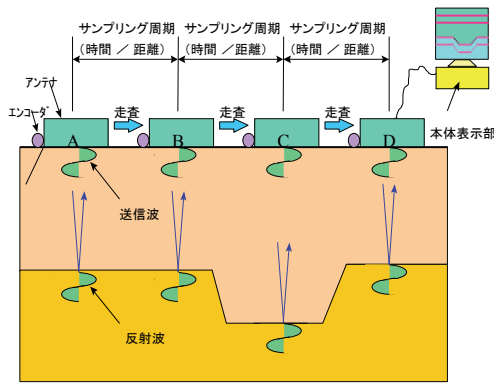


図-5 地中レーダー法による探査概念図

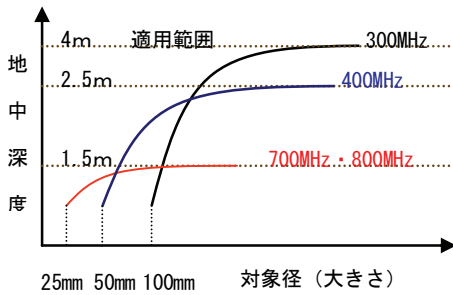


図-6 地中レーダー法の対象深度

3. 発破実験結果

(1) 液状化発生とアスファルト舗装の変状

アスファルト舗装上5mメッシュにより実施した水準測量結果，7日後における沈下分布図およびGL-4.0mで観測された過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ と沈下量の経時変化について，図-7，図-8および図-9にそれぞれ示す．これらの図より，アスファルト舗装の未改良域に関しては，発破一時間後に顕著な変状が生じ，その後，過剰間隙水圧の消散過程と同様に，発破一日後にはアスファルト舗装の変状はほぼ収束傾向となっていることがわかる．また，ほぼ残留変形に収束したと見られる発破7日後においては，各液状化対策工法の改良体中心の沈下量は，未改良域における最大値368mmに対し，いずれも20mm以下程度に収まり，地盤改良の有無で明瞭な差が生じている様子が確認できる．

(2) 滑走路の付帯設備および地下埋設管の変状

滑走路の付帯設備である幹線ダクトに関しては，液状化実験後の目視調査より，アスファルト舗装変状に伴う変形が一部見られたが，アスファルト舗装構造を損なうまでには至っていないと考えられる．また，地下埋設管周辺では，発破直後から連結しているアスファルト舗装脇のマンホール周辺で，激しい噴砂が見られた．地下埋設管の挙動について，発破前後におけるアスファルト舗装面と埋設管上面との相対変位量を図-10に示す．なお，相対変位量の正の値は，アスファルト舗装面と管上面との距離

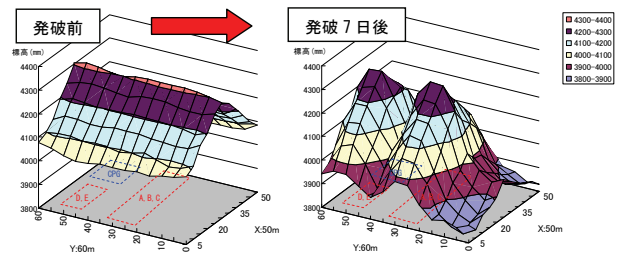


図-7 水準測量結果

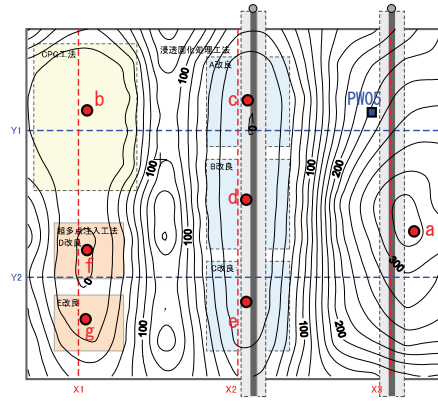


図-8 発破7日後における沈下量分布

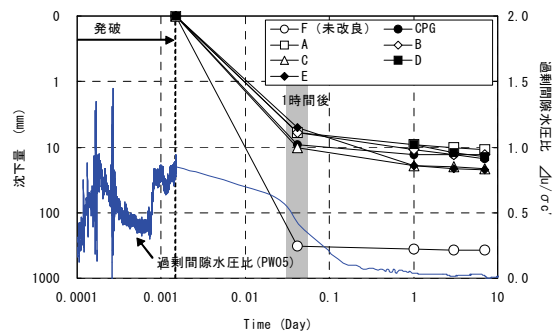


図-9 過剰間隙水圧および沈下量経時変化

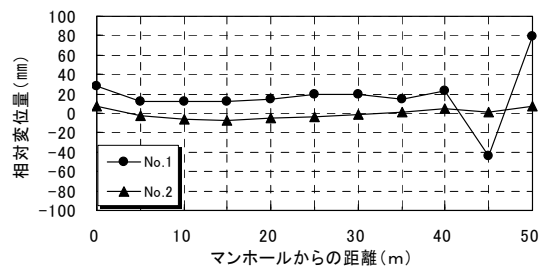


図-10 舗装表面と埋設管との相対変位

が近くなったことを示す．未改良域のNo.1では，アスファルト舗装面と埋設管との相対変位が概ね20mm，一方，改良体上のNo.2では，アスファルト舗装の沈下が20mm以下で小さかったこともあり，相対変位がほとんど見られなかった．No.1の相対変位については，地下埋設管の浮き上がりは見られず，むしろ沈下が生じたが，この沈下量に比べ，密度の高いアスファルト舗装の沈下が有意であったことを示している．

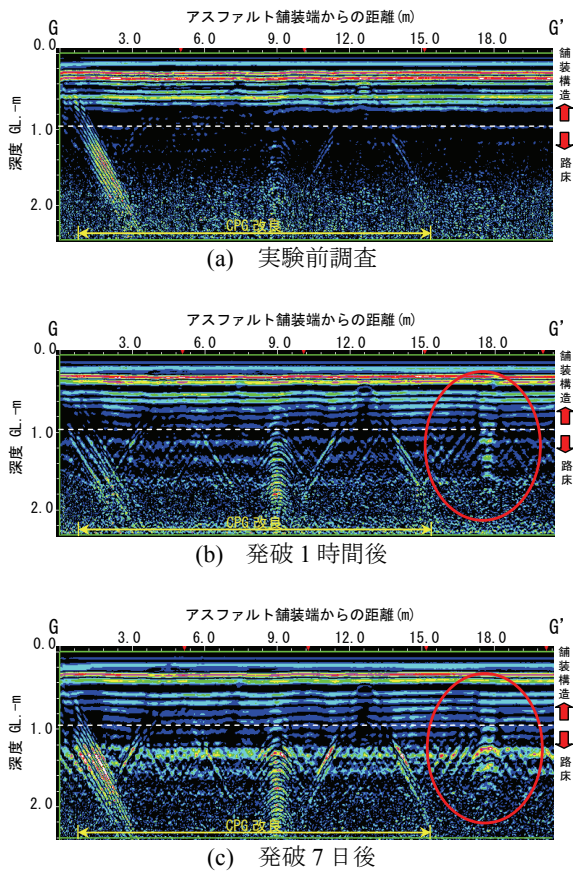


図-11 アスファルト舗装における探査事例 (No.1)

4. 地中レーダーによるアスファルト舗装探査

(1) 地中レーダーによる探査結果の例

図-11、表-5および図-12に、探査映像の一例、アスファルト舗装部での空洞と考えられる異常反射信号発生件数、および発生履歴のあった箇所を平面図をそれぞれ示す。

図-11はNo.1地点で得られた探査結果であるが、発破1時間後には事前調査では確認していない異常反射信号が検出され、その時の過剰間隙水圧比も約0.5と消散過程にあることから、アスファルト舗装表面から目視では確認できないものの、路床以深の地層で生じた液状化の影響を受けたものと推察される。次に表-5および図-12を見ると、確認した異常反射信号は、比較的未改良域に集中していることがわかる。また、異常反射信号検出箇所は、液状化発生から1時間後に最も多い9箇所が抽出されたが、その後は、4~6箇所に安定した。なお、常時、異常反射信号が検出された4箇所は、No.1, 3, 4および6地点であり、このうち3箇所については、いずれも未改良域のアスファルト舗装内であることが確認できる。

異常反射信号の検出深度について、GL-0.96mを基準としてアスファルト舗装構造と路床に分類し、図-13に経時変化を示す。図より、未改良域における路床以深の異常反射信号の検出については、発破1時間後に液状化による噴砂等による路床の攪乱に

表-5 アスファルト舗装直下の異常信号発生状況

経過時間	1時間	7時間	12時間	16時間	1日	2日	3日	7日	発生箇所	付帯設備または地下埋設管	液状化対策
発生件数(箇所)	9	4	4	4	4	5	6	6			
No.1 GL: -0.44m	○	○	○	○	○	○	○	○	アスファルト舗装	無	未改良
No.2 GL: -0.32m						○			アスファルト舗装	無	未改良
No.3 GL: -0.91m		○	○	○	○	○	○	○	アスファルト舗装	無	薬液注入
No.4 GL: -0.40m	○	○	○	○	○	○	○	○	アスファルト舗装	無	未改良
No.5 GL: -1.04m							○		路床	無	未改良
No.6 GL: -0.75m	○	○	○	○	○	○	○	○	アスファルト舗装	滑走路中心線灯	未改良
No.7 GL: -0.50m	○							○	アスファルト舗装	無	未改良
No.8 GL: -1.00m							○		路床	地下埋設管	未改良
No.9 GL: -1.00m								○	路床	滑走路中心線灯	未改良
No.10 GL: -1.23m	○								路床	無	未改良
No.11 GL: -0.71m	○								アスファルト舗装	無	薬液注入
No.12 GL: -0.84m						○			アスファルト舗装	無	薬液注入
No.13 GL: -1.24m	○								路床	無	未改良
No.14 GL: -1.31m	○								路床	無	未改良
No.15 GL: -1.15m	○								路床	無	未改良

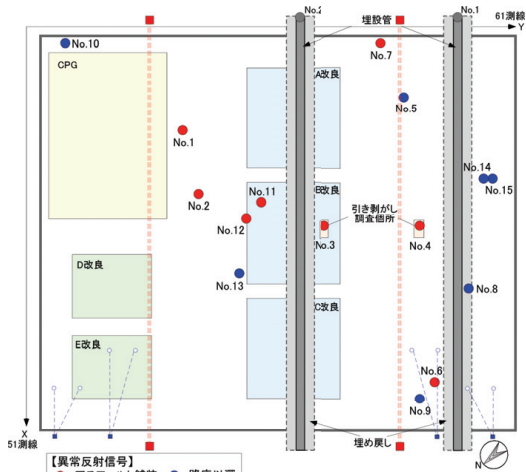


図-12 異常信号発生位置の平面位置図

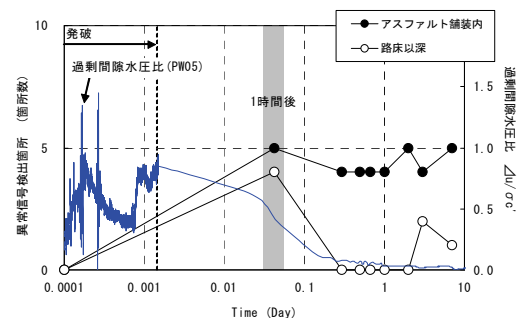


図-13 異常信号検出箇所数の変化

より一旦増加し、以降、過剰間隙水圧消散過程における砂粒子の再堆積やアスファルト舗装の沈下に伴い減少したものと考えられる。一方、アスファルト舗装内で確認された異常反射信号を見ると、アスファルト舗装内で一旦生じた何らかの変状は、液状化による地盤挙動やアスファルト舗装の沈下にかかわらず、ほぼ残留するものと推察される。なお、異常反射信号検出箇所と付帯設備や地下埋設物との関係については、特に傾向が見られなかった。

(2) アスファルト舗装の引きはがしによる確認

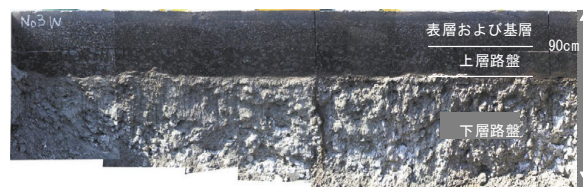
発破実験から5ヶ月後、アスファルト舗装に何らかの損傷、変状が残留していると考えられた図-12に示す2箇所（No.3, No.4）において、 $L=3.0\text{m} \times W=1.5\text{m} \times D=0.96\text{m}$ の範囲でトレンチ掘削を行い、掘削壁面の目視観察を実施した。アスファルト舗装の断面を写真-3に示す。いずれの地点においても、特に液状化に伴う顕著なアスファルト舗装内の変状や空洞は、掘削断面からは認められなかった。これは、異常反射信号検出箇所がピンポイントに近いのに対し、トレンチ掘削がある程度の範囲を伴うこと、また、発破5ヶ月後の調査であり、十分な時間が経ってからの実施であり、発破直後の変状の痕跡を必ずしも示していない可能性がある。

5. まとめ

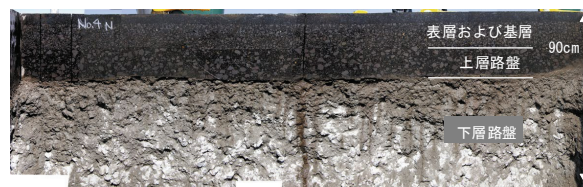
本研究では、制御発破によりアスファルト舗装周辺地盤を強制的に液状化させ、アスファルト舗装の変状調査を実施した。実験結果より、液状化はほぼ一日で収束し、アスファルト舗装の沈下についても、液状化発生後、ほぼ一日の間に大部分が生じていることが確認された。また、地盤改良域と未改良域でアスファルト舗装の沈下量に明瞭な差が見られた。

また、アスファルト舗装の挙動に伴う舗装構造の変状、損傷について、地中レーダーにより探査を実施した。探査結果から、路床における異常反射信号については、未改良域の検出数が多かったが、過剰間隙水圧の消散に伴い減少すること、一方、アスファルト舗装構造については、一旦検出された異常反射信号は、液状化挙動にかかわらず、残留する傾向にあることが確認された。

今後の課題として、異常反射信号の検出パターンの整理、検出箇所における滑走路の供用上問題となる変状や損傷であるかどうかの評価方法、および広範囲における効率的な運用方法について検討する必要がある。



(a) No.3 (B改良上西側)



(b) No.4 (未改良地盤北側)

写真-3 掘削調査におけるアスファルト舗装の壁面

謝辞：実験の実施にあたり、北海道開発局と石狩湾新港管理組合の協力を得た。関係者各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：地震に強い空港のあり方検討委員会報告書，<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/12/120427/01.pdf>，2007.
- 2) 土木学会新潟震災調査委員会編土木学会：昭和39年新潟地震震害調査報告書，pp.584-588，1966.
- 3) 例えば，楠見晴重，谷口敬一郎：発破による砂質地盤の締固めに関する室内実験，土質工学会論文報告集，Vol.24, No.2, pp.161-170，1984.
- 4) 菅野高弘，小濱英司，三藤正明，塩崎禎郎：発破を用いた港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する十勝港における実物大実験，日本地震工学シンポジウム論文集11巻，pp.901-906，2002.
- 5) (社)日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説（上巻）平成19年7月 国土交通省港湾局監修，第6章地盤の液状化，pp.383-389，2007.
- 6) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領 平成11年4月 国土交通省航空局，第2章設計条件，pp.5-23，1999.

INVESTIGATION OF RUNWAY PAVEMENT DAMAGE BY GROUND-PENETRATING RADAR IN FIELD LIQUEFACTION EXPERIMENT

Hiroshi NAKAZAWA, Takahiro SUGANO and Kiyoshi TAKAHASHI

The role of an airport during and after a great earthquake is important as helpful existence for emergency medical service and special operation for transporting relief supplies to the stricken area. In this paper, a full-scale experiment using controlled blasting technique conducted at the Ishikari Bay New Port in Hokkaido Island, Japan, is discussed. The purpose of the experiment is to assess the performance of prototype runway pavement subject to liquefaction due to a large earthquake. Ground-penetrating radar and differential leveling before and after blasting investigated nondestructively the damage status of asphalt concrete including roadbed and underground occurred by the liquefaction. The investigation result revealed that aspects of the damages between asphalt concrete and roadbed were different.