

寒冷地エプロン舗装の液状化発生後の凍上等による変状拡大実験と調査結果

(独)土木研究所寒地土木研究所

○渥美洋一

(独)土木研究所寒地土木研究所

久保純一

北海道開発局港湾空港部港湾建設課

時田恵生

1. 研究の背景と目的

積雪寒冷地である北海道特有の港湾構造物の被災現象として、地震等によりエプロン舗装下に液状化現象が発生した場合、液状化後の過剰間隙水の上昇と冬期間における凍結融解の影響によって、地震直後ではなく越冬した後にエプロン舗装に被害が拡大する場合が想定される(図-1 参照)。このような場合、雪解け後の春に岸壁背後の舗装が陥没するという危険性が想定されることから、液状化が発生した舗装の越冬実験を現地スケールで行い、被害発生メカニズムの確認を行うことが必要である。

今年度、(独)港湾空港技術研究所が、平成13年度に続いて北海道内で2度目となる液状化の実物実験を石狩湾新港埋立地において実施することとなった。そこで、

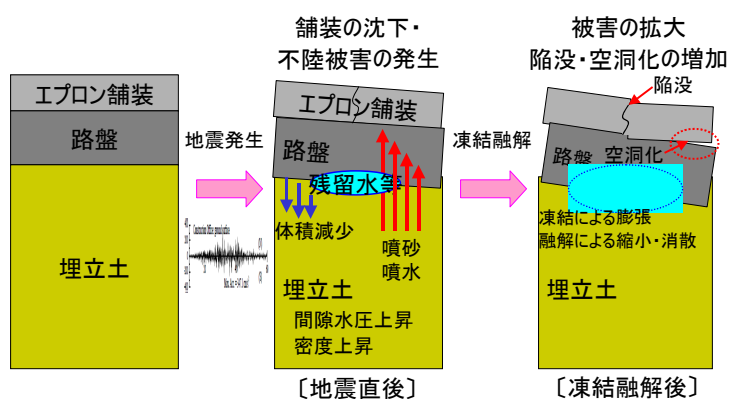


図-1 液状化発生後凍結融解による被災拡大メカニズムの概念図

この試験フィールド及び液状化現象を利用して、液状化未実施箇所における地盤の液状化と凍結融解によるエプロン舗装への影響を把握し、寒冷地である北海道における港湾施設の被災メカニズムの解明に関する基礎データを取得するための現地実験を行った。本報告では、この実大試験フィールドを用いた試験方法及び調査項目、試験エプロン舗装体の概要を述べたうえで、発破による液状化実験により生じた変状調査と観測データの解析結果より、試験舗装帯における液状化現象の発生について考察する。

2. 研究手法

本実験フィールドは、(独)港湾空港技術研究所が石狩湾新港埋立地に設置した試験フィールドに隣接して設置されている(写真-1)。試験エプロン舗装帯の平面図、標準断面図を図-2に示す。また、当該地近傍のボーリング柱状図を図-3に示した。地下水位はGL-2.25mにあり、深さ5m程度までN値1~3の極めてゆるい砂層が分布して

いることがわかる。試験エプロン舗装帯を構築するにあたっては、液状化現象及び凍上現象の両方の発生を可能とする構造体を構成する必要がある。このため、次に示す3点に留意した。



写真-1 石狩湾新港西地区 実験フィールド

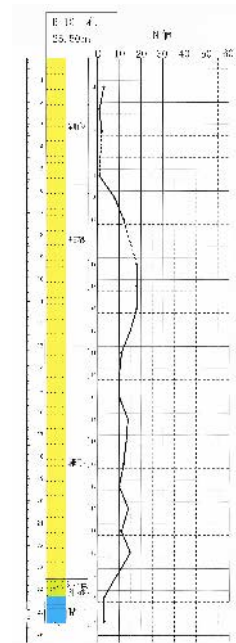


図-3 ボーリング柱状図

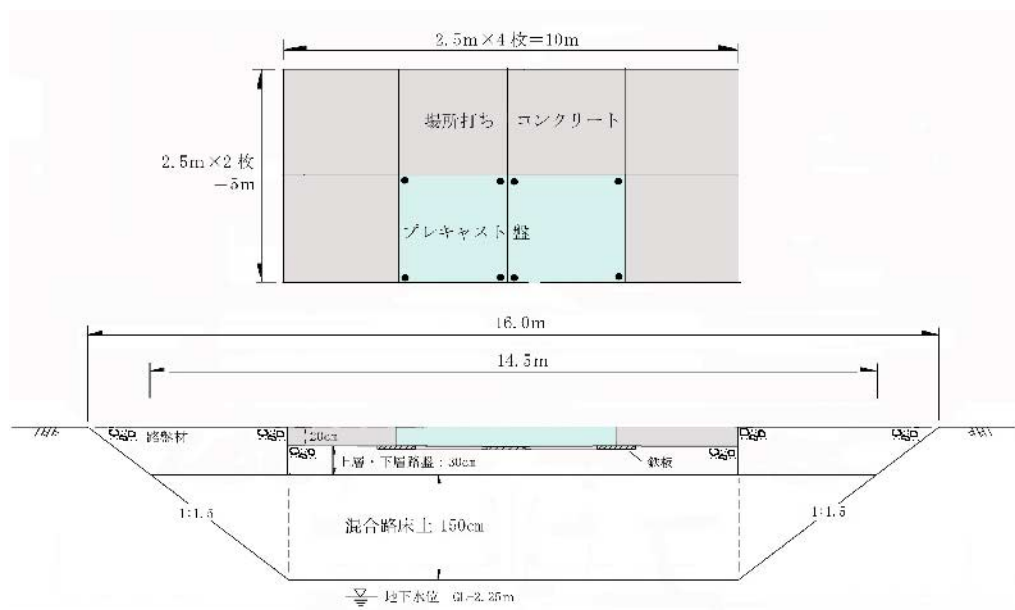


図-2 本実験フィールドの概要

①試験基礎地盤の構成

液状化現象が発生する地盤材料の条件は、飽和して緩くしまった砂質土である。一方、凍上現象の場合は、水が通過するための土のすきまの大きさ、すなわち土の粒の大きさが凍上を支配する土質に関する要因となる。一般に粒径 0.1 mm 以上の砂では凍上は起こらない。また、粒径 0.002 mm 以下、すなわち粘土のような材料でも凍上しない¹⁾。よって、これらの中間くらいの粒の大きさである、シルト分以下の含有量が、凍上性を左右すると言える²⁾。一方、液状化現象は、粒径 0.1mm~1.0mm の砂地盤で

発生しやすく、かつ粒径が均一であることが土質要因となる。

現地実験を行う石狩湾新港廃棄物処理埋立地の砂で実施した、粒度試験の結果を図-3に示す。凍上に大きく影響するシルト・粘土分の合計は7.2%であり、凍上試験の結果により求めた凍上率は、図-4に示すように、そのままでは0.6%とほとんど凍上しないことを確認した。そこで、現地の砂に対して、シルト分の多い細粒土を、体積比20%で混合することによって、シルト分・粘土分の合計が32.3%、凍上率は5.7%となり、凍上しやすい地盤材料を構成することができた。

②構造及び施工上の工夫

試験舗装体については、①で述べたように凍上しやすい地盤材料を混合して施工した。さらに、液状化現象及びその後の凍結融解による地盤の盛上りや沈下等の変状が発現しやすいように、上層路盤及び下層路盤厚は最低仕上がり厚を考慮した15cm(合計30cm)とし、スリッパー、タイバーによる版同士の剛結も行わないこととした。また、施工にあたっては、さらに、舗装版の内、2枚はプレキャスト版として、液状化実験直後や越冬実験終了後、写真-2のように吊り上げて、舗装体内部の沈下や空洞化の状況を、確認できるようにした。路床の施工にあたっては、液状化現象が締まっていない(ゆるい)

場合に発生するといわれていることから、基本的には密度が90%以上になるよう管理すべきであるが、今回はあえてそのような施工管理は実施しないこととした。

③変状等のモニタリング体制

液状化現象、越冬実験による凍結融解現象を通して試験舗装体の変位・変状・支持力低下等については、舗装体完成時、液状化実験直後、凍上期開始前、凍上期、融解時期の各段階で、表-1に示す方法でモニタリングすることとした。また、特に液状化実験時においては、発破による振動発生時に発生する変位及びそれより換算できる荷重を動的に計測するための、ひずみ計を設置した。ここで、液状化現象発生時には、鉛直方向の荷重及び変位が卓越すると想定し、サンプリング間隔を0.001sとした。

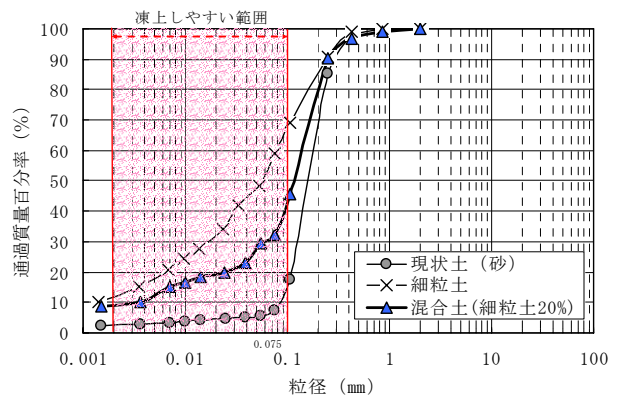


図-3 粒度試験結果

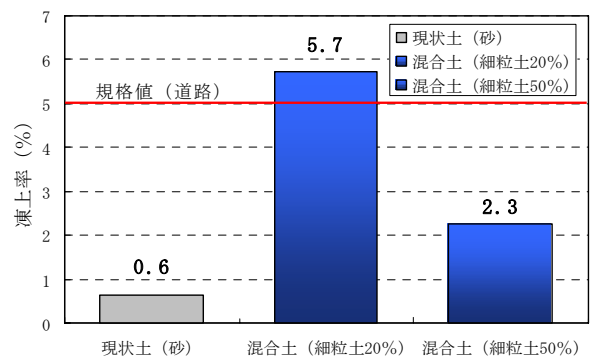


図-4 凍上試験結果



写真-2 プレキャスト版の敷設状況

3. 発破現象による液状化について

実大液状化実験は、石狩湾新港廃棄物埋立て地において、平成19年10月27日に行われた。発破数は583発、総火薬量1760kg、これを0.2秒間隔にて総継続時間132.9秒の時間に連続的に発破させ、液状化現象を発生させた。本試験体設置箇所においては加速度計、間隙水圧計等を設置していない。そこで、寒地土研試験箇所を確認した発破試験直後の外観及び水準測量結果、及び（独）港湾空港技術研究所が寒地土研試験箇所近傍に設置した間隙水圧計記録、及び試験舗装体における支持力試験結果等より、以下に液状化現象発生 の程度を確認評価していくこととする。

1) 外観調査及び水準測量結果

まず、外観及び水準測量調査結果より、発破実験直後の状況について述べる。舗装体近傍に設置した発破抗設置箇所には、写真-3に示すような典型的な憤砂現象が確認できた。ただし、エプロン舗装体自体には、明確な亀裂及び憤砂等の発生は確認できなかった。舗装体については、端部に小さな亀裂が2箇所確認できたが、これは発破実験時に、スリッパー等で接合されていないプレキャスト版が、衝撃で一瞬浮き上がる状況を確認しており、液状化現象発生によるというよりも、その衝撃により発生したと考えられる。また、写真-4に示すように、発破実験直後、プレキャスト版を吊り上げて、路盤等の状況を目視により観察したが、細粒分の浮き上がりも確認できなかった。



写真-3 液状化による憤砂



写真-4 液状化後の路盤上面

次に、水準測量結果については、発破実験直後より明確な沈下が確認できた。図-5に、発破実験直後から1ヶ月後までの舗装体における水準測量結果の経時変化を示す。この水準測量結果は、各版(B1～B6、P1～P2)の4角、及び4辺の中心点の合計8点の標高の平均値である。発破直後(安全確認30分後)での沈下量は18～22cmとなり、1日経過で更に約2cm値が大きくなったことから、液状化実験直後に比べて、さらに明確な沈下が発生していることが確認できる。1ヶ月後の水準測量結果としては、22～26cmの沈下が発生し、舗装体路盤下の基礎地盤に何らかの変状が発生したことが推定できる。

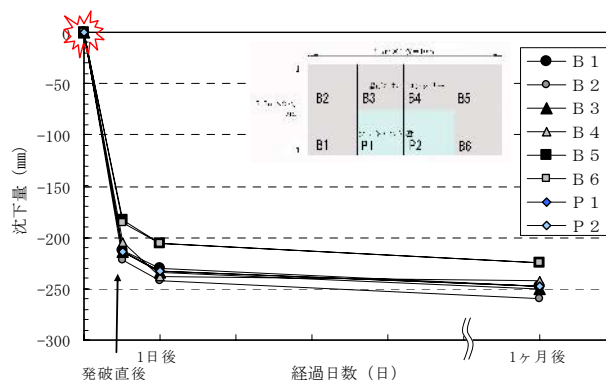


図-5 水準測量結果

2) 間隙水圧計観測結果

基礎地盤における液状化現象を最も明確に確認できるのは、対象地盤における間隙水圧の上昇である。本試験舗装体直下には間隙水圧計が設置されていず、間隙水圧の上昇及び消散の状況については、試験舗装体近傍に設置された3箇所の間隙水圧計観測値から確認することとした。試験舗装体と3箇所の間隙水圧計設置箇所との位置関係を図-6に、3点の観測位置における間隙水圧計の経時変化を、図-7に示した。

最も近接している観測点①が3点の中で最もノイズが少なく、間隙水圧の発生と消散の状況が明確に確認できる。間隙水圧計の設置深度は

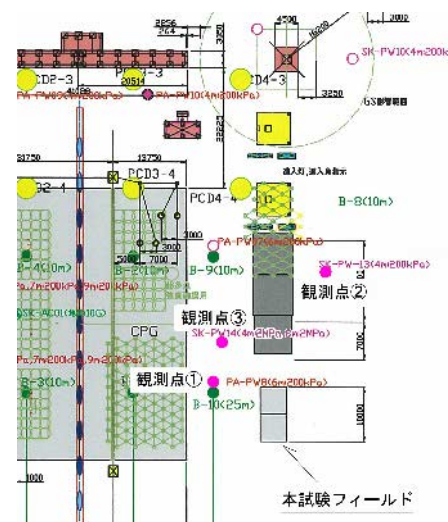


図-6 間隙水圧計 計測位置

GL-6.0m である。この地点における間隙水圧計の値は、近傍点での発破に対して一時的に 200kPa 以上を示すが、その後 30 秒程度で最大 60kPa 程度と、ほぼ間隙水圧計設置位置の有効土被り圧程度まで上昇している。また、近傍の発破後、約 20 分 (1200s) 後にはそのおよそ半分の 30kPa まで下降し、約 3 時間後には間隙水圧がほぼ消散していることが確認できる。また、観測点②については、発破実験の衝撃によりゼロ点がシフトしてしまっているが、100 - 100000 秒間のグラフを見ると、最大値から最小値の差はおよそ 50kPa となっ

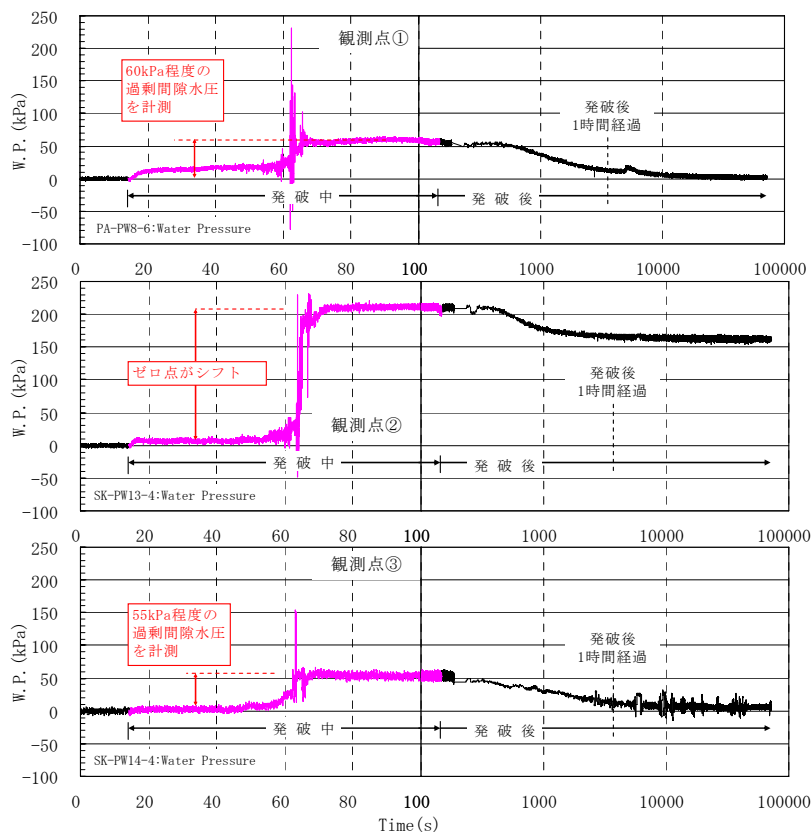


図-7 間隙水圧計 計測結果

ている。この間隙水圧計の設置深度は GL-4.0m であり、発生した間隙水圧は、観測点①と同様、観測地点の有効土被り圧と同等の値を記録し、約 20 分 (1200s) 後にはそのおよそ半分程度まで消散していることが確認できる。観測地点③についても、発破による間隙水圧の増加は、おおむね 50kPa であることがわかる。

以上 3 点の観測値から、発破による振動により間隙水圧はほぼ有効土被り圧と同等

程度まで発生していることから、試験舗装体近傍の間隙水圧観測値から推定する限り、試験舗装体直下の砂地盤に液状化が発生し、間隙水圧が増加したと考えられる。また、図-5 の水準測量結果と比較すると、発破直後の沈下量（安全確認 30 分後）より、試験舗装体近傍の間隙水圧計観測値が 3 点共に有効土被り圧の半分程度まで消散する間に、1 ヶ月間に舗装体に生じた沈下量の大部分が生じていることが、確認できた。

3) FWD 試験及び地中レーダー探査結果

本試験における舗装の強度については、FWD 試験機を用いて評価した。発破 3 日前に基準値を測定するとともに、発破後約 6 時間後（発破当日）と 1 日後、3 日後および 7 日後の計 4 回計測を実施した。FWD 試験から得られる表面たわみについて、「FWD 運用マニュアル（案）、（財団法人 道路保全技術センター）」によれば、荷重盤直下の D_0 たわみは表層以下の全層の強度を示し、荷重盤から最も遠い D_{150} たわみは路床の支持力を示している。FWD 試験の概念図を図-8 に示す。FWD 試験の結果を図-9 に示す。

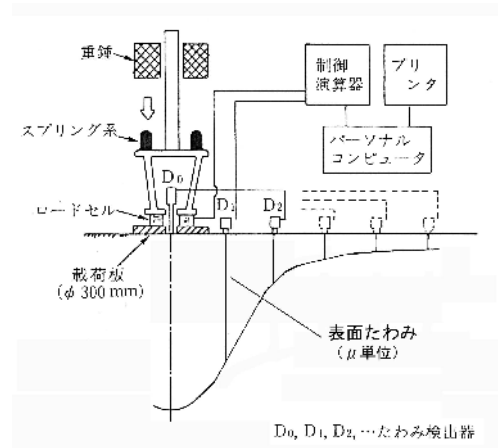


図-8 FWD 試験機の概要

一方、地中レーダー探査法は、電磁波は電気的物性が異なる境界において反射波が発生する原理を利用している。反射波の情報としては振幅と極性がある。振幅を決定する要因は、物性固有の電気的特性である比誘電率の差であり、境界において比誘電率の差が顕著であれば、反射波の振幅は大きくなる。また、極性については、一般的には物性境界の比誘電率が大きい物質から小さい物質へ移行する場合、負極性の反射波が発生する。図-10には、地中レーダー探査法における振幅及び極性の表示方法を示した。カラー区分としては正極性が暖色系で示し、負極性を寒色系で示してある。各極性は8階調になっており、振幅の最大値をカラー表示している。本調査における探査目標の比誘電率を考えた場合、コンクリートは6~11程度であるのに対し、空洞及び鉄筋は比誘電率が1、∞であるため、空洞及び鉄筋が存在する箇所では周囲と比較し強い反射波を生じることになる。図-11には、

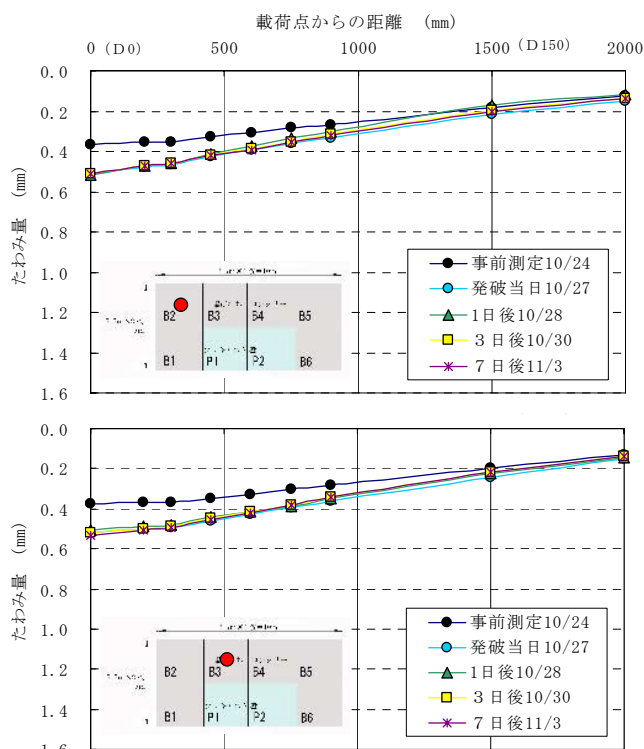


図-9 FWD 試験結果

をカラー表示している。本調査における探査目標の比誘電率を考えた場合、コンクリートは6~11程度であるのに対し、空洞及び鉄筋は比誘電率が1、∞であるため、空洞及び鉄筋が存在する箇所では周囲と比較し強い反射波を生じることになる。図-11には、

コンクリート版中心線の探查結果を示す。

図-9を見ると、路床の支持力を示す D_{150} たわみにおいては、3点の計測位置共に、発破直前と直後のたわみ量はほぼ変化していないことがわかり、路床部分に大きな変状が生じたとは考えにくい。その一方、表層以下全層の強度を示す D_0 たわみは、直前の値に比べ、構造体としての強度の低下を示している。外観観察の結果から、コンクリート版には亀裂等の変状はほとんどなく、版を外して路盤面を観察した結果においても顕著な変状は見られないことから、地下水下面で生じた液状化現象により地盤が軟らかくなったことにより、たわみが生じやすくなったと考えられる。また、地中レーダー探查結果(図-11)では、発破直前と直後を比較しても、大きな密度変化が生じてはいないことから、空洞等が生じていないことが推定できる。このことは、 D_0 たわみ量(全層の強度を表す)増分が大きくなること、 D_{150} たわみ(路床支持力を表す)がほぼ変化しないこととも整合している。

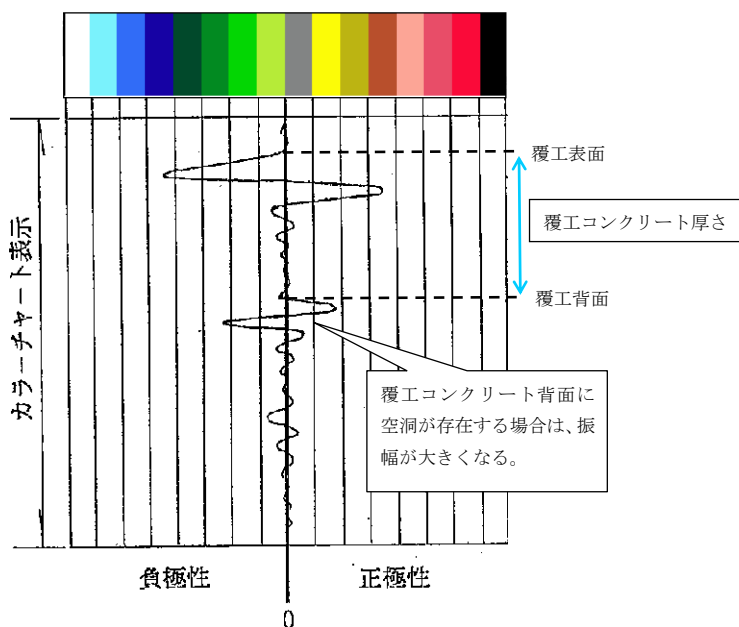


図-10 地中レーダーの振幅及び極性の表示方法

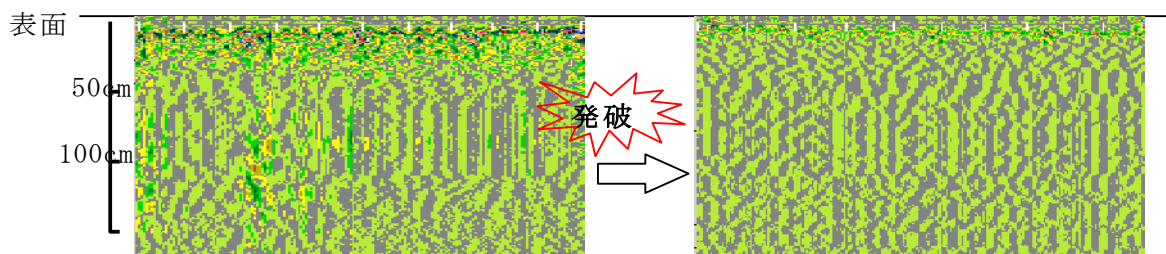


図-11 地中レーダー探查結果

4. まとめ

寒冷地エプロン舗装の液状化後の凍上による被害拡大実験について、試験舗装体の設置、及び液状化実験直後の試験舗装体の変状を中心に報告した。主な要点は、以下4点である。

①石狩湾新港廃棄物埋立て地に、(独)港湾空港技術研究所の現地液状化実験フィールドに隣接して、試験舗装体を設置した。試験舗装体の基礎地盤は液状化と凍上の両方が発生しうる粒度構成の混合土とし、液状化及び凍上による変状をモニタリングする計測システムを構成した。

②液状化実験直後の変状として、試験舗装体に大きな亀裂は生じなかったが、18～22cm程度の明確な沈下が確認できた。沈下については、発破直後に全沈下量の約9割が生じ、その後さらに全体の約1割程度の沈下の進行が確認できた。

③ただし、エプロン舗装体直近に設置した3点の間隙水圧計において、ほぼ有効土被り圧に相当する間隙水圧の上昇が確認できたこと、及び同じく舗装体直近に生じた慣砂現象より、試験舗装体基礎地盤においては、液状化現象がほぼ確実に発生したと考えられる。

④試験舗装体が沈下したことに整合し、FWD試験結果より舗装体支持力の明確な低下が確認できた。ただし、路床支持力を示すD₁₅₀たわみ量は、発破実験前とほぼ変化していないこと、地中レーダー探査結果からも試験舗装体に大きな密度変化が生じてはいないと推定できることから、試験舗装体支持力の低下は、地下水位以下の基礎地盤に生じた発破による液状化が主要な原因と考えられる。

これ以降は、冬期における凍上現象による試験舗装体の変状拡大、及び春先の雪解け時期における舗装体支持力の低下等を追跡調査し、液状化現象が発生したと考えられる寒冷地エプロン舗装の冬期における被害拡大のメカニズムに関するデータを取得する予定である。最後に、液状化実験時における間隙水圧計、地中レーダー探査結果等の観測データを提供して頂いた(独)港湾空港技術研究所構造振動研究室の中澤主任研究官に謝辞を述べて、今回の報告を終える。

5. 参考文献

- 1)土の凍上－その理論と実際－、土質基礎工学ライブラリー23、pp.6、社団法人 土質工学会（現地盤工学会）、pp.6
- 2)凍上試験方法の改良に関する実験－改良案による凍上試験－、pp.11、第30回 北海道開発局技術研究発表会資料、北海道開発局土木試験場 第3研究部舗装研究室