

発破を用いた人工液状化実験

THE FIELD TEST OF LIQUEFACTION BY CONTROLLED BLASTING

前田幸男¹・永尾浩一²・牛嶋龍一郎³・春日井康夫⁴・菅野高弘⁵・中澤博志⁵

Sachio MAEDA, Koichi NAGAO, Ryu-ichirou USHIJIMA, Yasuo KASUGAI,
Takahiro SUGANO and Hiroshi NAKAZAWA

¹ 佐藤工業株式会社 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

² 正会員 工修 佐藤工業株式会社 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

³ 正会員 工修 (財) 名古屋港埠頭公社 (〒455-0847 名古屋市港区空見町 40 番地)

⁴ 正会員 国土交通省 航空局 飛行場部建設課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

⁵ 正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

It is known that "Blast Densification Method" is a technique which can improve the ground strength for the liquefaction by the artificial trembling with the shock wave of explosives detonation set in ground. It is carried out a full scale test which has the airport facility at Ishikari Bay New Port in Hokkaido Island, Japan.

The shaking by blasting continues for about two minutes, with 1769kg explosives, 583 delay numbers, at about 1.6 hectares experiments. It is executed safely, surely without damage to structures by blasting.

As a result of the experiment, it is confirmed the increasing excess pore water pressure, sand pumping phenomenon, and settlements after blasting. This report is described a summary of experiment on this test

Key Words : Controlled blasting, Soil liquefaction, Full-scale experiment

1. はじめに

本実験は空港施設などの耐震対策検討のため、発破により人工的に地盤の液状化を発生させ、各種実物大の施設の液状化時挙動や液状化後の変状等を把握することを目的として行われた¹⁾。

実験は独立行政法人港湾空港技術研究所を主務機関として、37 機関、29 テーマの共同研究として実施された。共同研究の各参加機関は目的に応じて試験体となる施設・構造物の挙動観測や各種調査・計測を実施した。液状化を発生させる手段となる発破は、各種の実物大施設が配置される約 1.6ha の広範囲の実験ヤードを対象とする多段の段発発破となる。このため、安全・確実に数多くの爆薬を起爆し、人工的な液状化を発生させ、かつ各種試験体に発破による損傷を与えない仕様の設定が課題となった。

実験は、2007 年 10 月 27 日、北海道石狩湾新港の埋立地において実施され、使用爆薬量 1760kg、斉発数 583 段、発破時間約 2 分間の大規模な段発発破により地盤の液状化現象を発生させた。この結果、過剰間隙水圧の上昇、噴砂現象が確認され、また、液状化後の沈下が観測された。

本報では、液状化を生じさせる発破仕様の設定、

液状化時の間隙水圧発生過程、液状化発生状況などについて報告する。

2. 実験概要

(1) 実験目的

今回の実験プロジェクト「実物大の空港施設に対する液状化実証実験」は、国土交通省航空局が空港の耐震対策を進めるうえで、必用となる以下の項目を調べる目的で実施された。

- ・ 液状化が滑走路や無線施設等の空港施設に及ぼす影響の把握
- ・ 液状化対策の効果確認
- ・ 液状化対策に係るコスト縮減方法の検討
- ・ 空港供用再開の判断基準の検討

(2) 実験場所

実験場所は、北海道小樽市銭函 5 丁目 61 番 2 地先、石狩湾新港 西地区の埋立地である(図-1)参照。

(3) 地盤状況

実験場所は平成 18 年以降に埋め立てられた砂地

盤で、図-2 および表-1 に示す地層構成となっている。
地盤調査結果より、細粒分含有率が概ね 20%以下でN値が 10 程度以下の液状化しやすい緩い砂質土層であるFs層およびAs1層を液状化させる対象（層厚 9～10m）とした。

(4) 各施設の配置

写真-1（および後述の図-5 参照）に示すように、下記の施設・構造物が設置され、地盤物性調査、舗装下空洞調査、水圧・加速度・沈下・変状などの計測が実施された。

- ・ 滑走路アスファルト舗装 (50×60m)，舗装下は注入系地盤改良（対策A～C）および埋設管 (φ1m)
- ・ エプロンコンクリート舗装 (7.5×22m)，一部舗装下には地盤改良（対策B：滑走路下と同じ）
- ・ 各種航行支援施設（電波塔 H=16.2m，ローカライザー等電波施設，各種誘導灯）など
- ・ その他の構造物（盛土，防油堤，マンホール，各種地盤改良 A, B など）

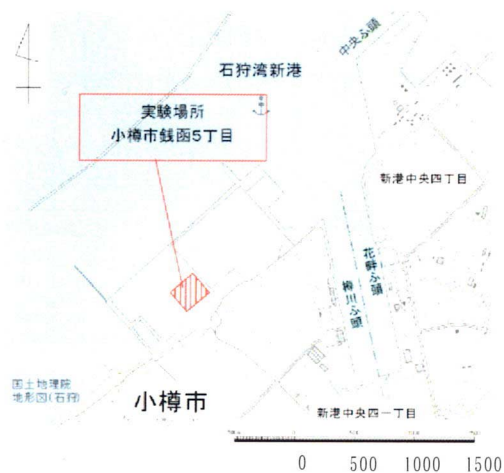


図-1 実験場所

3. 発破工

(1) 発破仕様の設定

実験時の発破孔間隔，装薬深度，装薬箇所数（段数），1 段当りの装薬量などの発破仕様は，発破を用いた締固め工法^{2), 3)} および 2001 年実施の十勝港における人工液状化実験^{4), 5)} の実績をもとに単位装薬

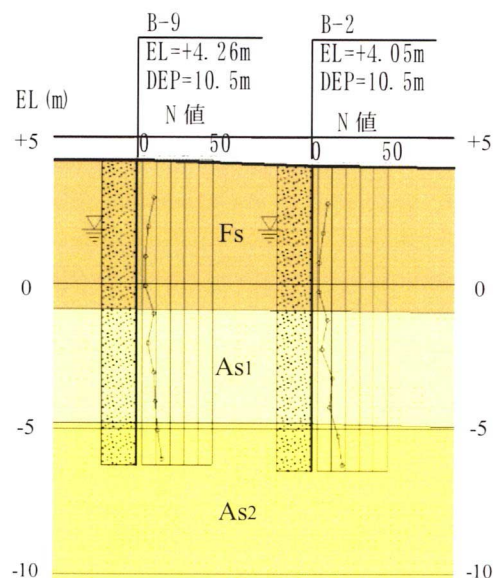


図-2 地層構成

表-1 地盤状況一覧

地層名		層厚 (m)	N 値 (平均)
Fs	埋土 (砂質土)	4.3～5.7	1～ 8 (2.6)
As1	砂質土	1.3～4.0	3～12 (7.9)
As2	砂質土	12.9～16.5	8～20 (14.1)

地下水位：EL+1.6～+1.9m (GL-2m程度)

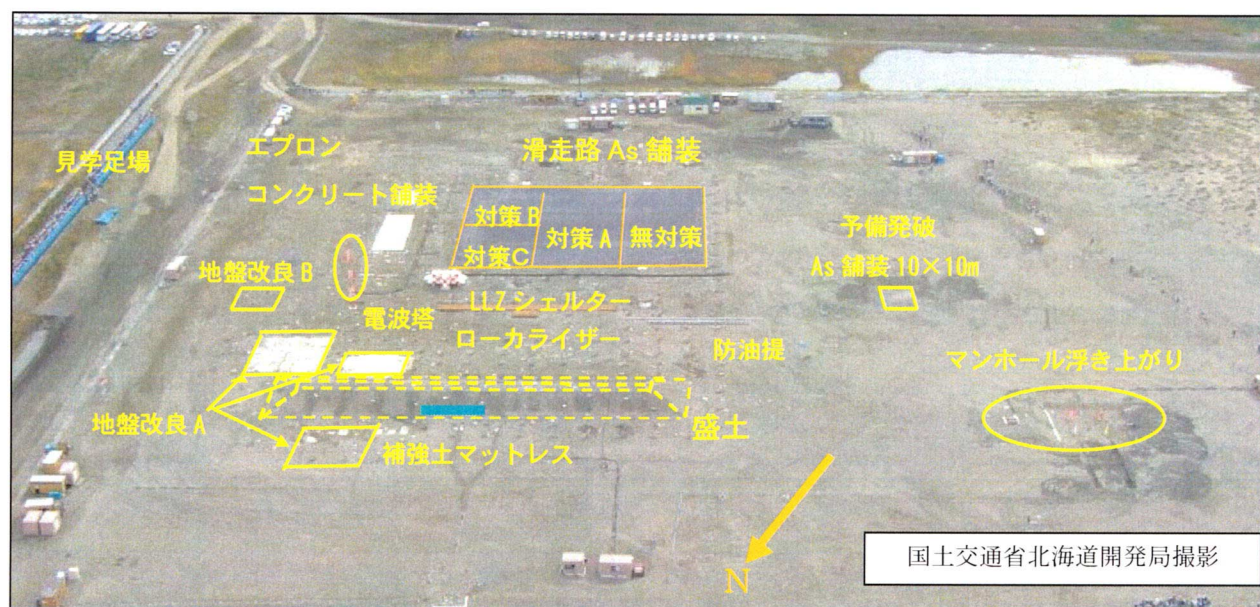


写真-1 共同研究各機関の施設配置状況

量（1m³当りの爆薬量）の目安を 15～18g/m³として設定した。所定の単位装薬量に対して、爆薬の配置間隔（発破孔間隔、深度方向間隔）を大きくすると1ヵ所当りの装薬量は多くなり、これに伴い発破振動は大きくなる。液状化実験の場合は、発破孔間に試験体を配置するため、発破振動の試験体への影響を考慮して発破仕様を決定しなければならない。

図-3 にこれまで実施した発破の振動速度の測定結果を示す³⁾。横軸のスケールディスタンスとは図中の式に示すように、発破地点からの離隔を爆薬量で正規化した値である。コンクリート構造物にクラックが発生する限界値は構造物に発生する変位速度より、30～40cm/sec 程度と言われている⁶⁾。ここで、振動速度 40cm/sec 時のスケールディスタンス SD を同図の相関式より求めると SD=3.45 となり、この値となる装薬量 W と離隔 D の組合せは、W=2～4kg/段に対し必用離隔は 4.4～5.5m となり、この条件のもとで、発破孔配置の検討を行った。

また、試験施設である舗装については、液状化時に噴砂の水みちとなる発破用の装薬孔を空けないことが要求されたため、曲線ボーリング内に爆薬を装薬し起爆させる方法を採用した（従来の発破は鉛直の発破孔に爆薬を挿入し、間詰め材となる砕石などを投入するものであった。曲線の場合には、爆薬の挿入方法、間詰め材の投入方法が課題となった）。

発破振動が試験施設におよぼす影響、曲り削孔発破の方法について、下記の予備実験を行い本実験の最終発破仕様を決定した。

- ・ 相馬港予備実験、2007 年 3 月 17 日～18 日実施、曲り削孔発破方法の検討
- ・ 石狩湾新港予備実験、2007 年 9 月 29 日実施、舗装構造に及ぼす発破振動の影響調査、液状化を発生させる発破仕様の最終確認

(2) 使用した爆薬および雷管

実験に用いた爆薬は地下水以下の発破であることから、耐水性に優れ、装薬作業時の安全性から耐衝撃性に優れたエマルジョン系含水爆薬とした。

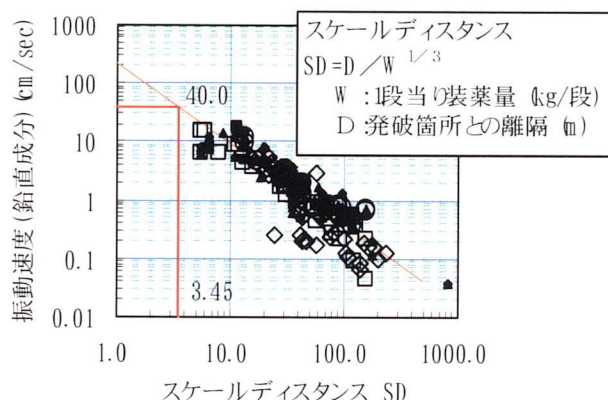


図-3 振動速度の測定結果（既往実績）

雷管は、無限の多段発破が可能であること、脚線などの養生が不要であること、落雷・漏洩電流による誤爆に対する安全性が高いことなどから、導火管付雷管（内壁に爆薬が塗布された中空チューブ内を伝搬する爆ごう波により雷管を起爆する非電気の雷管）を用いた。

(3) 発破孔配置および発破仕様

予備実験結果を踏まえ決定した発破孔配置(断面)、本実験の発破仕様一覧、発破孔・各試験施設の配置を図-4、表-2、図-5（次頁）に示す。なお、図-4 中（下図）の番号は1列内の起爆順序を、また図-5 中の□内数値は起爆秒時（発破順）を示している。

装薬は液状化対象層厚 9～10m に対して上下方向2段、水平方向 6.5m 間隔（標準）とし、滑走路 As

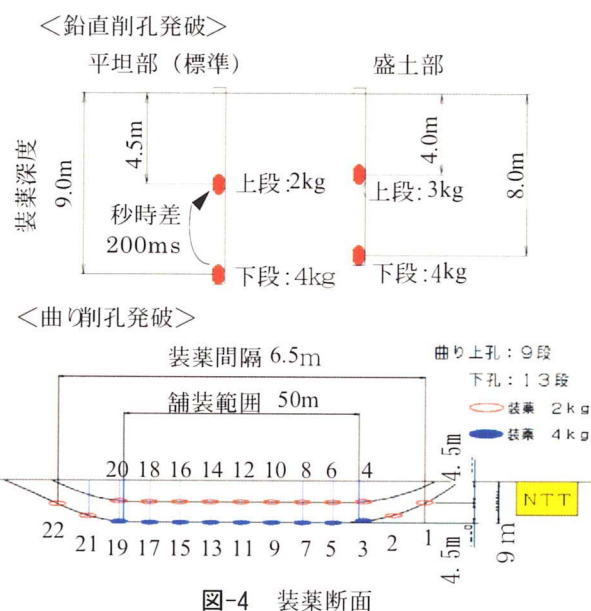


図-4 装薬断面

表-2 発破仕様一覧（予備実験を除く）

	鉛直削孔		曲り削孔	
削孔方法	ロータリー パーカッションドリル		誘導式水平 ボーリング工法	
使用爆薬	エマルジョン系含水爆薬			
装薬量	516 kg	1004kg	70 kg	170 kg
	合計 1760 kg			
装薬深度 GL- (m)	上段	下段	上孔	下孔
	4.5 標準部	9.0	4.5	9.0
	4.0 盛土部	8.0		
発破孔数	253 孔		4 孔	4 孔
斉発数	246	252	35	50
	合計 583 段			
秒時差	200ms (一部 500ms)			
発破時間	132.9 秒 (雷管延時の総和)			
使用雷管	導火管付雷管			
	DS-2～27 (延時 200～8000ms)			

舗装下に曲り削孔 4 列上下 2 段の計 8 孔、滑走路以外に鉛直削孔 253 本の発破孔を配置した。発破は斉発数 583 段、装薬量 1760kg、秒時差 200ms（標準）、で発破継続時間 132.9 秒間かけて行う極めて大規模な段発発破とした。なお、予備実験では、滑走路舗装に及ぼす発破の影響（図-5 中ケース P1）、および次節で示す段発発破による液状化発生状況（図-5 中ケース P2-2）を確認した。

4. 実験結果

(1) 発破時の水圧上昇状況（予備実験結果）

石狩湾新港予備実験のケース P2-2 では鉛直削孔発破 30 段（=15 孔×上下 2 段）、上段（GL-4.5m）2kg、下段（GL-9.0m）秒時差 200ms の段発発破を実施した。

発破時の水圧測定結果を図-6 に示す。同測定結果は発破領域境界から約 3m 外側の深度 GL-4m 地点（PW03:測定箇所、発破位置は図-5 中に示す）の結果である。なお、上図は発破時の衝撃的な水圧測定用の高容量（5MPa）水圧計の結果、下図は過剰間隙水圧測定用 200kPa 容量の水圧計に衝撃水圧に対する損傷対策として緩衝装置を設置した測定結果であ

る。これより、各段発毎に衝撃的な水圧発生し、秒

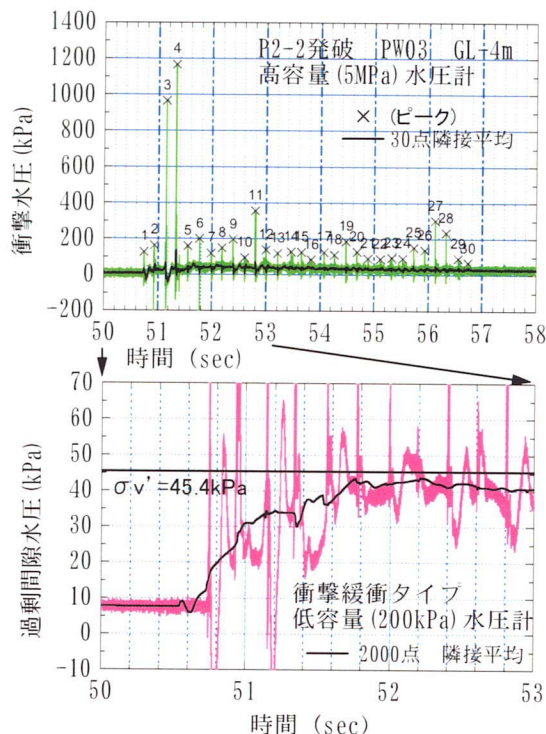


図-6 発破時の水圧発生状況（予備実験結果）

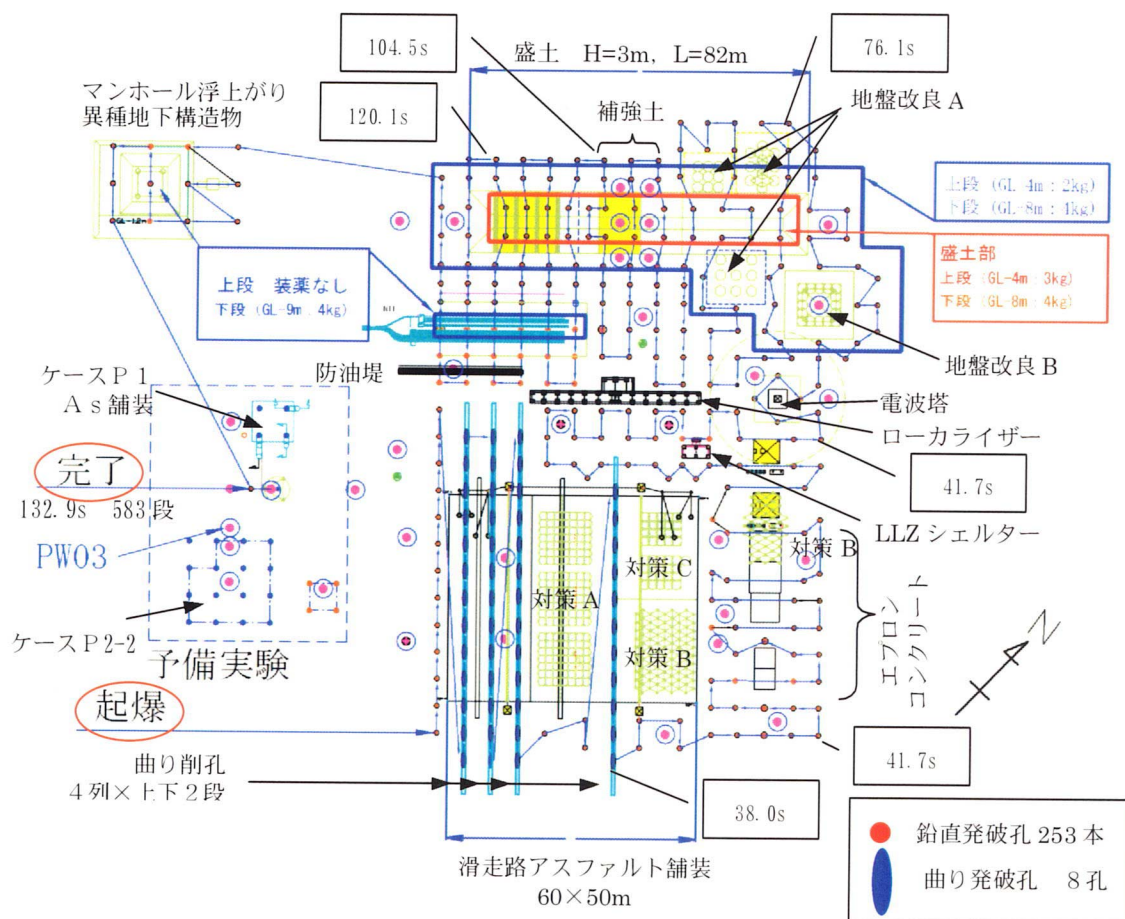


図-5 発破孔・各試験施設の配置および発破順序

時差 0.2 秒毎にピークが 30 波確認できる（上図）。この衝撃水圧発生後に過剰間隙水圧が段発毎に上昇していく（下図）。同測定結果は発破領外側の結果であるが、ほぼ有効上載圧（ $\sigma_v' = 45.4 \text{ kPa}$ ）ただし、地下水位 $GL-1.6\text{m}$ 、 $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$ ）に上昇したことから、段発数の多い本実験の領域内では液状化に達すると判断された。本実験では P2-2 の条件を基本に発破使用を設定した（図-4、図-5、表-2 参照）。

なお、過剰間隙水圧の上昇程度は、既往の結果より衝撃水圧の大きさ（爆薬量と距離に依存）、段発回数、補正 N 値（液状化判定で用いられる細粒分含有率の影響を補正した N 値）に影響を受けることが知られている³⁾。

(2) 本実験 液状化発生状況

発破は平成 19 年 10 月 27 日 (11:00 点火) に実施した。発破直後から滑走路部を除く各所で液状化による噴砂・噴水が認められた（写真-2～写真-4 参照）。なお、図-7 に示す発破後の沈下分布図に、撮影カ所、過剰間隙水圧測定位置および後述図-9 の沈下の経時変化対象地点杭 No を併記する。

3 地点の発破による過剰間隙水圧（容量 200kPa 緩衝タイプ）の上昇過程を図-8 に示す。各測定位置とも発破とともに上昇し、発破箇所が近づいた時に水圧が急増し初期液状化状態（図中 σ_v' は有効上載圧）に達することがわかる。



写真-2 液状化発生状況（滑走路端部）



写真-3 液状化発生状況（無舗装平坦部）

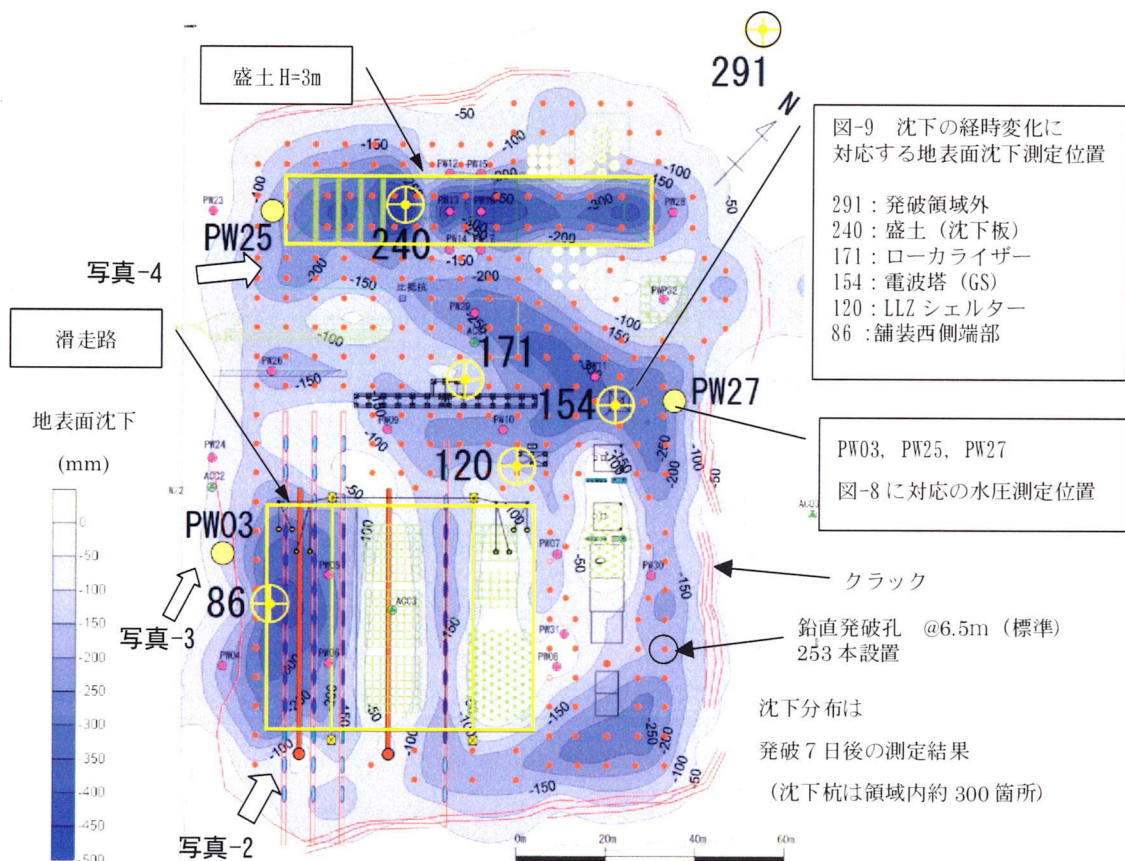


図-7 地表面沈下分布およびクラック発生状況

また、振動測定や水圧測定のパーク波形の数（斉発数）を確認することで完爆（不発のないこと）を確認した。

(3) 液状化後の沈下発生状況

液状化後の地表面沈下は図-7に示すように、上載荷重が大きい盛土部で最も大きく 500mm 以上（No240）、盛土外の平坦部では滑走路南西側（No86）の舗装端部で 350mm となり、発破領域外周は同図の等高線に沿った形でクラック認められた。なお、沈下は図-9の経時変化に示すように、沈下のはんは発破後4時間以内に生じ、発破後1週間ではば収束している。



写真-4 液状化発生状況（盛土のり尻部）

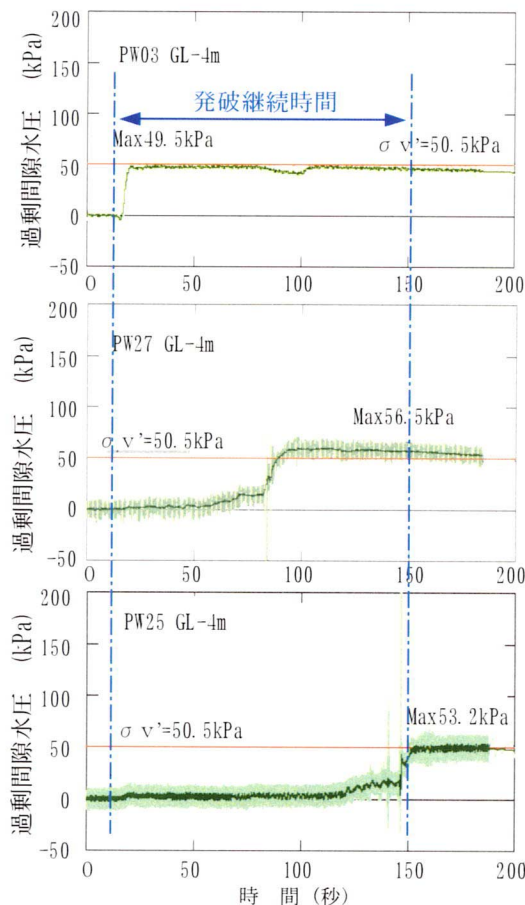


図-8 過剰間隙水圧の発生状況

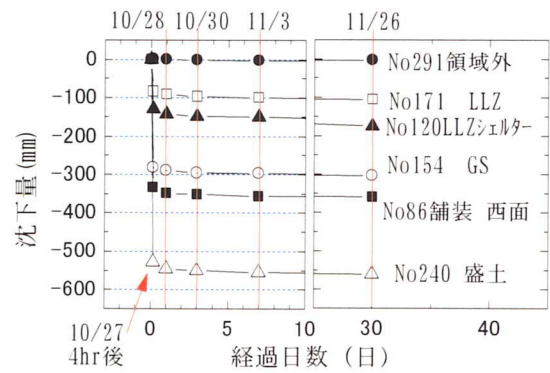


図-9 沈下の経時変化

5. おわりに

実物大の施設を用いた現場実験において、極めて大規模な段発発破を安全・確実に実施することにより、人工的に液状化状態を再現することができた。

本報告では、発破仕様の設定、液状化発生状況について紹介したが、本プロジェクトの各研究成果や事後長期観測結果については、(独)港湾空港技術研究所ホームページなどを参照いただきたい^{7), 8)}。

謝辞：本実験では、国土交通省北海道開発局、石狩湾新港管理組合、共同研究各機関の関係者の皆様にご協力頂いた。ここに、謝辞を述べる。

参考文献

- 1) 中澤博志、菅野高弘：空港施設の液状化挙動に関する実物大実験、土と基礎、vol. 56, No. 3, pp. 49, 2008. 3
- 2) 辻野修一、前田幸男、永尾浩一ほか：発破を用いた締固め工法の液状化対策への適用性に関する現場実験、地盤工学ジャーナル、vol2, No3, pp. 125-137, 2007
- 3) (財)沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第05002号 制御発破を用いた液状化対策工、2005. 11
- 4) 菅野高弘、小濱英治、塩崎禎夫ら：十勝港における発破を用いた鋼矢板岸壁の動的挙動に関する実物大実験、港湾・臨海都市機能の耐震性向上に関するシンポジウム発表論文集、pp. 47-69, 2003. 12
- 5) Koichi NAGAO, Sachio MAEDA, Nozomu YOSHIDA et al.: IN-SITU FULL SCALE LIQUEFACTION TEST BY CONTROLLED BLASTING, 港湾・臨海都市機能の耐震性向上に関するシンポジウム発表論文集、pp. 71-86, 2003. 12
- 6) ジェオフロンテ研究会掘削工法分科会制御発破 WG: 現場技術者のための制御発破工法の実験-発破による騒音や振動を制御する技術資料-, pp. 37-39, 1996. 11
- 7) 第8回空港技術報告会 (2007. 12. 7) 発表会資料, 事例発表⑤~⑪, 国土省 HP, URL: http://www.mlit.go.jp/koku/03_information/12_kuukougijutu/0712_shiryou.html
- 8) (独)港湾空港技術研究所：HP「実物大の空港施設に対する液状化実証実験」, URL: <http://www.pari.go.jp/information/news/h19d/14/kekka.htm>