

臨海部埋立空港における地盤の液状化に伴う 滑走路変状に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION OF RUNWAY INDUCED BY
LIQUEFACTION IN AIRPORT CONSTRUCTED IN WATERFRONT RECLAIMED
LAND

牛嶋龍一郎¹・春日井康夫²・水上純一³・中谷行男⁴・中澤博志⁵・菅野高弘⁵

Ryu-ichirou USHIJIMA, Yasuo KASUGAI, Jun-ichi MIZUKAMI, Yukio NAKATANI,
Hiroshi NAKAZAWA and Takahiro SUGANO

¹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)

²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)

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

⁴非会員 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 博(工) 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)

Full-scale experiment using controlled blasting was conducted in the Ishikari Bay New Port (Ishikariwan-shinko) in Hokkaido Island, Japan, to assess the performance of airport facilities subjected to the liquefaction. This paper mainly describes effect of liquefaction remediation and behavior of runway pavement during and after liquefaction by optical fiber monitoring.

As a result of Full-scale experiment, a lot of valuable knowledge was obtained. Especially three types of tried liquefaction remediation with cost reduction design specification are effective. Additionally optical fiber sensor shows high possibility for utilization as a runway pavement performance monitor because its deformation induced by liquefaction could be measured.

Key Words : Full-scale experiment, airport facility, runway pavement, Liquefaction, liquefaction remediation, controlled blasting, optical fiber for health monitoring

1. はじめに

日本では臨海部・沿岸部に都市機能が集中している。しかし、このような地域では地盤が地形・地質的に脆弱であることが多く、地震時に被災しやすい条件を具備している。また、過去の地震被災事例を見ると、臨海部・沿岸部土木施設の地震時被害に大きな影響を与える要因として、地盤の液状化現象に起因する被害が数多く見られる。

このように、我が国において沿岸部に位置する多くの空港や港湾施設は、地震時に被災しやすい条件を数多く有している一方で、国内外の人的・物的交流を支え、かつ地震災害時に緊急物資輸送の拠点等として非常に重要な施設である。特に、昨今危惧されている東海、東南海地震等の巨大地震が発生した際には、これら諸施設の耐震性の確保や被災レベルに応じた施設の供用再開の判断が重要であろうと考えられる。前者については性能規程型の設計体系が整備されつつあるが、照査手法の高度化のためには

構造物の正確な挙動の把握が必要であること、また、後者については、構造物の挙動を的確にモニタリングし評価する技術が必要であるが、実際の被災事例に基づく研究成果が少ないのが現状である。

一般的に、液状化による地盤変状や構造物への影響を把握する検討手段は、模型実験、数値シミュレーションを始めとして幾つかの手法が挙げられる。本研究では、空港施設へ与える液状化の影響を定量的に把握することを目的として、現場実物大実験を実施した。本実験では、実物大の代表的な空港施設を施工し、それらの直下および周辺において制御発破を用い地盤の液状化現象の再現を行い、各施設の液状化挙動をほぼ実現象で把握することができた。

2. 実験の目的

本実験は、2007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、空港施設の液状化



写真-1 現場に設置された主な空港施設

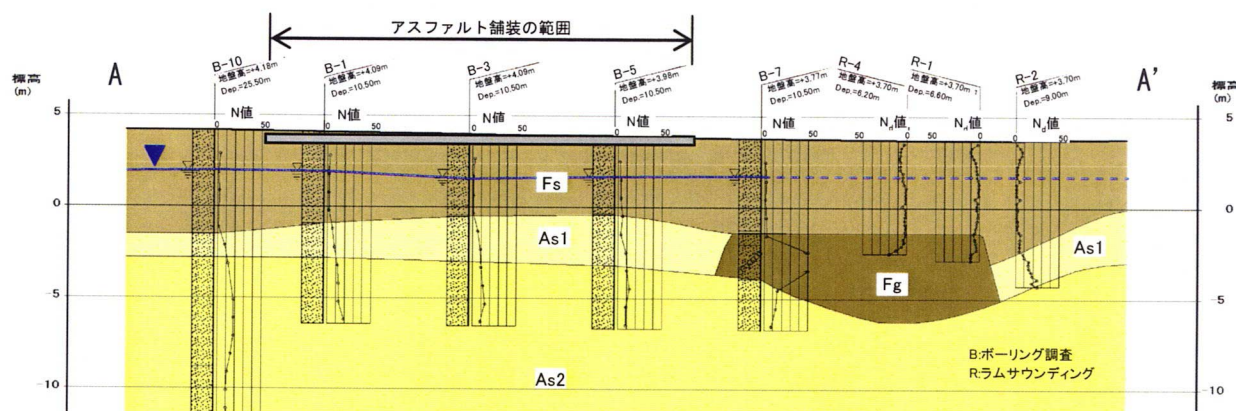


図-1 地層想定断面図

時挙動に関する検討を目的に行われた。写真-1に示す様に、実験ヤード内に実際の空港と同様な設計仕様の滑走路を模擬したアスファルト舗装、エプロンおよび空港保安施設等がそれぞれ再現された。

今回の実験の主な検討内容は、以下に示す3点である。

a) 現象把握

地盤の液状化現象を再現し、液状化現象が滑走路、空港保安施設等の構造物へ及ぼす影響を確認する。

b) 低改良率、改良範囲縮小による液状化対策効果コスト縮減、工期短縮の検討を目的に、アスファルト舗装下における低改良率、改良範囲縮小による液状化対策工を施工し、改良効果を確認する。

c) 被災時における共用の可否判断

物理探査技術等を用いた被災時における滑走路や駐機場の機能維持のための対策や判断基準、あるいは被害程度に応じ、地震発生直後～数日後に供用再開可能な判断基準について検討するためのデータを取得する。

本論文では、高い精度で平坦性の確保が求められる空港滑走路の液状化後の挙動に着目し、残留変形に及ぼす液状化対策工の効果およびアスファルト舗装の液状化時挙動に関する光ファイバセンサによるひずみの測定結果について報告する。

3. 実験概要

(1) 実験ヤードの地盤条件

実験場所である石狩湾新港西地区は、現在造成中であり、石狩湾からの浚渫砂で埋め立てられている。

図-1に写真-1に示すアスファルト舗装部を通るA-A'断面に対応する地層想定断面図を示す。アスファルト舗装下の地層構成は、表層から約5mの埋立て層（Fs層）とそれ以下は旧海岸である砂質土層（As1層、As2層）で構成され、地下水位が概ねGL-2.0～2.5mの範囲に分布している。

Fs層、As1層およびAs2層における試料の力学的・物理的特性を表-1に示す。全般的な特徴として、N値の分布が20以下であり緩く堆積した地盤であること、液状化強度が $RI_{20}=0.189\sim0.244$ と比較的低い分布を示していることがわかる。また、物理的性質は、細粒分含有率 $F_c(\%)$ が38%以下の範囲に分布しばらつきを示しているものの、いずれも非塑性であることが特徴的である。

図-2に実験ヤード内12カ所で実施したボーリング調査から得られたFs層の粒径加積曲線を示す。殆どの試料が港湾基準¹⁾の“特に液状化の可能性あり”の範囲に分布している様子がわかる。

以上より、力学的・物理的特性から総合的に判断すると、実験ヤード全体的に液状化しやすい性質を有しているといえる。

表-1 試料の力学的・物理的特性

地層	N値 (平均)	液状化強度 R_{f20}	細粒分含有率 F_c (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	コンシ テンシー
Fs	1~8 (2.6)	0.189~0.244	7~38	1.827~1.867	NP
As1	3~12 (7.9)	-	5~22	-	NP
As2	3~20 (14.1)	0.204~0.222	8~32	1.796~1.819	NP

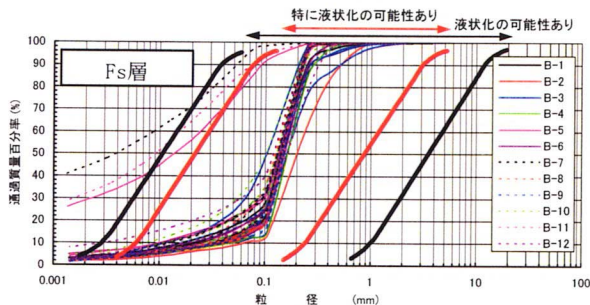


図-2 粒径加積曲線

(2) 液状化対策工法

アスファルト舗装下で施工した液状化対策工は、図-3 に示すように、静的圧入締固め (CPG) 工法、浸透固化処理工法および超多点注入工法の3工法である。各々の地盤改良ケースについて表-2 に示し、以下に簡単に述べる。

静的圧入締固め (CPG) 工法は、流動性の低い注入剤を地盤内へ圧入し、固結体を造成する事で地盤を締固める工法である。本実験では、従来設計において1.7mの施工ピッチを2.0mで実施し、かつ最低改良率8%を5%に設定し施工した²⁾。

一方、薬液注入工法である浸透固化処理工法および超多点注入工法は、地盤中の間隙水を恒久薬液に置換し地盤改良する工法である。本実験における両工法の改良率は、浸透固化処理工法が70%、超多点注入工法が100%でそれぞれ施工され、かつ、液状化層に対し部分改良を実施し、各ケース毎の改良効果を調べた³⁾。なお、改良率70%の場合は隣り合う個々の改良体が接している状態であり、改良範囲内において部分的に薬液で地下水が置換されていない部位が存在することを意味する。

上記に示した各改良体において、液状化時における改良効果を検討するため、図-3 に示す各改良体内および未改良地盤中に間隙水圧計を設置し、過剰間隙水圧の発生・伝搬状況を確認した。

(3) アスファルト舗装構造および光ファイバセンサの設置

図-4 にアスファルト舗装の断面図を示す。表層の密粒度アスファルトから下層路盤までの層厚は、96cmで設計・施工された。

実験では、液状化に伴うアスファルト舗装の変状を評価するため、センシング材料として光ファイバをアスファルト舗装に設置し、液状化に伴いアスファルト舗装に生じるひずみ観測も併せて行った。

本実験で用いた光ファイバセンサは、BOTDR方式であり、従来の電気計測では実現できない分布型ひ

表-2 地盤改良ケース

工 法	改良ケース	改良率(%)	改良深度 GL-(m)
静的圧入締固め (CPG)工法	-	5	2.5~8.0
	A	70	2.5~7.9
浸透固化処理工法	B	70	2.5~6.1
	C	70	2.5~4.3
超多点注入工法	D	100	2.5~10.0
	E	100	2.5~5.5

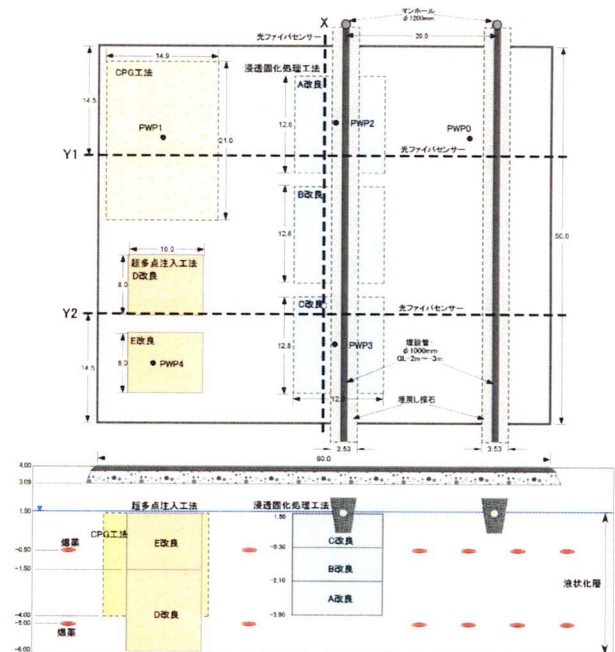


図-3 アスファルト舗装部分における平面図および断面図 (単位: m)

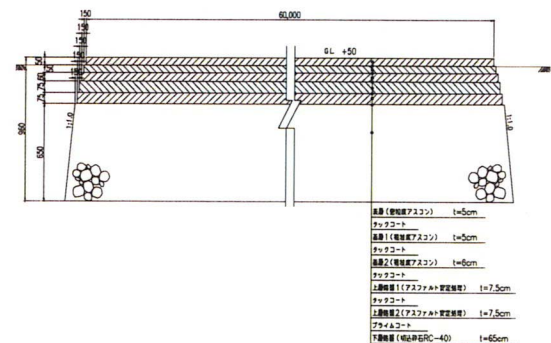


図-4 アスファルト舗装断面図

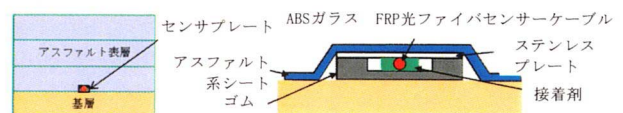


図-5 センサプレート設置断面

ずみ計測ができる特長を有し、設置個所としては図-3 に示すように、X 測線および直交する Y1, Y2 測線の計 3 断面に敷設された。図-5 にセンサプレートの設置断面、写真-2 に敷設状況をそれぞれ示す。光ファイバセンサの設置にあたり、厚さ

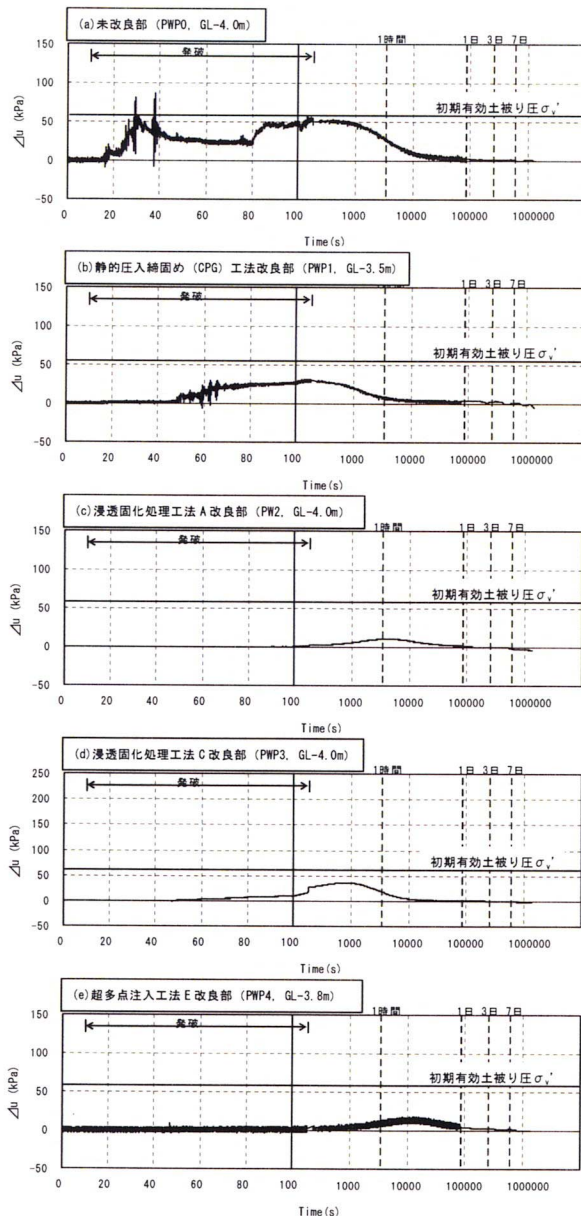


図-11 過剰間隙水圧時系列データ

しては、未改良地盤で一時間後に $\Delta u / \sigma_v'$ が概ね0.5、一日後には完全に消散する結果となった。また、地盤改良部においても、発生した過剰間隙水圧の大きさに拘わらず同様な傾向を示し、ほぼ一日で元の状態に収束した。

(2) アスファルト舗装の変状計測

光ファイバセンサの敷設測線であるX、Y1およびY2 測線において、小型路面性状測定装置による平坦性調査を実施した。本手法は10mmピッチで路面の実際の凹凸高さを詳細に測定が可能である。図-10に発破前後の舗装面のプロファイルを示す。

Y1、Y2 側線を見ると、液状化に至った未改良部で大きな変状が生じ、ほぼ液状化が終息した発破一日後には最大約35cmもの沈下が生じ、個々の改良体の間においても液状化の影響を受け、地表面の沈下が顕著に生じている様子がわかる。また、すべて

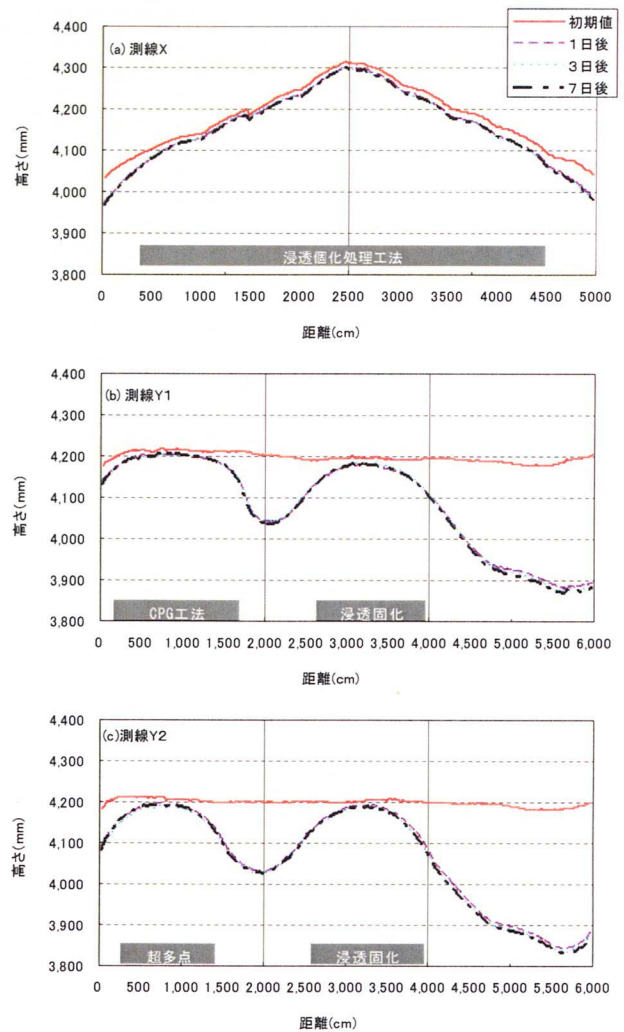


図-10 アスファルト舗装のプロファイル

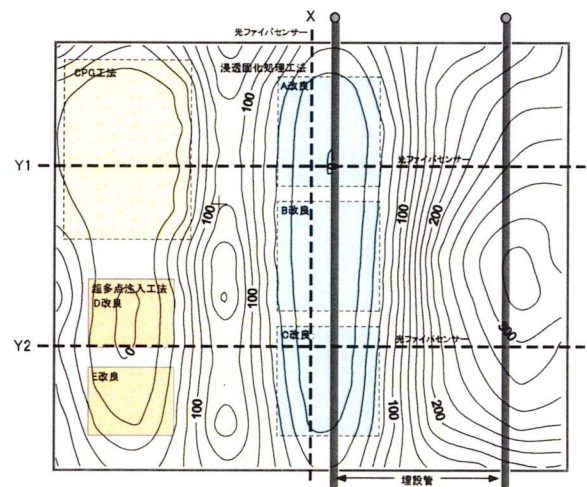


図-11 発破7日後の沈下量分布

の測線においても、液状化が終息した発破一日以降については、殆ど変化が見られないことがわかる。

図-11に5mメッシュにより実施した水準測量による発破7日後の沈下量コンター図を示す。各工法で生じた改良体中心の沈下量は、未改良部分328mmに対し、静的圧入締固め工法改良部6mm、浸透固化

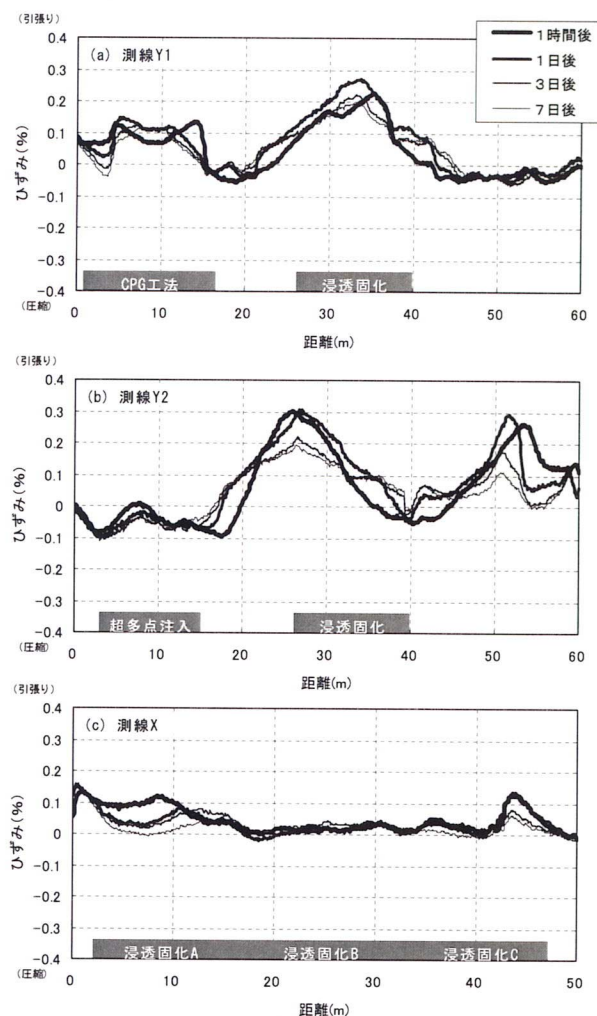


図-12 ひずみ測定結果

処理工法改良部 6mm, 超多点注入工法改良部 5mm 程度であり, 地盤改良の有無で明瞭な差が生じている様子がわかる。

(3) アスファルト舗装の変状計測

光ファイバセンサによるひずみ計測値を図-12に示す。X, Y1およびY2のいずれの測線においても, 計測値は発破直後から増大し, 発破当日において最大値を示し, 時間の経過とともに低下している。このことから, アスファルト舗装の変状は, 地盤の液状化発生後の数時間のうちに最大変化を迎え, その後, 過剰間隙水圧の消散とともに終息したものと考えられ, 舗装面の平坦性調査結果と概ね整合している。また, 舗装面の変状が小さかったX測線については, 全体的にひずみ分布が小さいものの, Y1, Y2測線については, 改良体上で引張りひずみが発生し, 未改良部では圧縮ひずみが発生している。この傾向は図-10と比較して, アスファルト舗装表面の変状傾向をうまく捉えており, 滑走路のモニタリング手法として, 光ファイバセンサが十分に適応可能であることが確認できた。

5. 結論

本実験から, 様々な空港施設・構造物の液状化挙動に関する貴重なデータを得る事ができた。本論文では, 滑走路を模擬したアスファルト舗装部における変状について述べた。以下に得られた知見を示す。

- アスファルト舗装部では, 低改良率, 改良範囲を縮小した部分改良による液状化対策工法を試し, 液状化後の舗装面の変状より, その改良効果が概ね認められた。
- 間隙水圧の計測結果より, 液状化対策の有無を問わず, 液状化発生後から約一時間後には過剰間隙水圧が約 50%まで消散し, 一日後にはほぼ元の状態に収束する。また, アスファルト舗装についても液状化直後に沈下・変形が生じるが, 一日後にはその進行がほぼ収束する。
- 光ファイバを用いたアスファルト舗装のモニタリングを実施した。アスファルト舗装に生じたひずみ分布と舗装面の平坦性調査から得た変状を比較し, モニタリング手法として光ファイバが十分に有効であることが確認できた。
- 実物大の試験体を用い, 液状化時に生じる実現象を把握することで, 実際に起こり得る被災状況を再現することができた。性能規程型の設計体系においては, 被災予測の高精度化が重要となるが, 本実験より滑走路の要求性能や供用再開判断の検討に資するデータの取得ができた。

謝辞: 本実験は, 行政・大学・独立行政法人研究所 9 機関, 協会等 8 機関, 民間企業 29 社による共同研究として行われた。実験の実施にあたり, 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

- (財) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), P. 116, 1997.
- 菅野高弘・中澤博志・足立雅樹・原田良信: 人工液状化実験における CPG 施工による液状化対策について, 第 8 回空港技術報告会, (URL) http://www.mlit.go.jp/koku/03_information/12_kuukougijutu/0712_shiryou/1_07.pdf, 2007.
- 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 8 回空港技術報告会, (URL) http://www.mlit.go.jp/koku/03_information/12_kuukougijutu/0712_shiryou/1_08.pdf, 2007.
- (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.