空港滑走路における密度増大工法による 液状化対策効果に関する現場実大実験[†]

中 澤 博 志* 菅 野 高 弘* 足 立 雅 樹**
山 田 和 弘** 大 沢 一 実** 新 坂 孝 志**
原 田 良 信**

Full-Scale Field Test on Estimation of Countermeasure for Liquefaction by Densification Method for Runway Pavement

by

Hiroshi NAKAZAWA *, Takahiro SUGANO *, Masaki ADACHI **, Kazuhiro YAMADA **,
Kazumi OOSAWA **, Takashi SHINSAKA ** and Yoshinobu HARADA **

The role of an airport during and after a great earthquake is important because of its helpful function for emergency medical services and special activities of the transport of relief supplies to the disaster areas. In this study, the authors conducted a full-scale field experiment on liquefaction phenomena induced artificially by controlled-blast technique in the experimental site at the Ishikari Bay New Port in Hokkaido Island, in order to investigate the influence of a great earthquake on the airport's function in Japan. This experiment especially focused on the assessment of the performance of runway pavement and the effect of densification method as countermeasure for liquefaction with a cost-reduction design. This study concludes that densification method examined with cost-reduction design in this experiment keeps its effectiveness based on results of measurements of liquefaction behavior of liquefied layer and runway pavement, ground investigations after liquefaction and liquefaction-induced residual deformation analysis.

Key words : Full-scale field test, Liquefaction, Countermeasure for liquefaction, Densification method, Runway pavement, Residual deformation, Controlled blast technique

1 はじめに

空港は、地域間を直接結ぶことができる特性を有し、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すために、被災後3日を目標に定期民間航空機の運航が可能、再開後には早期の段階で通常時の50%の運航規模の確保が求められている。しかし、国内の空港においては、約4割の空港が大規模地震動に対し液状化の可能性があるといわれている。¹⁾このような背景において、従来の耐震設計思想とは異なり、構造の安定だけでなく施設の機能に着目し、かつ既存施設を供用しながら耐震性を向上させる等の新たな技術課題に直面しつつあるのが現状である。

本研究では、実際の滑走路と同様な設計仕様であるアスファルト舗装、その直下に液状化対策として密度増大工法および薬液注入工法を施工し、現場実大実験を実施した。この実験では、アスファルト舗装直下の未改良地盤と周辺地盤において、制御発破により人工的な液状化を強制的に発生させ、対策効果の検証を目的とした各種計測、調査を行った。本研究では、密度増大工法として、空港での施工実績が多い静的圧入締固め工法（以下、CPG工法）を対象に、コスト削減を目的とした低改良率による施工を実施した。実験で得られた地盤改良域にお

ける液状化時の過剰間隙水圧の計測結果およびアスファルト舗装の変状調査結果より、地盤改良後から実際に液状化が発生し、その収束後における改良効果の持続性や滑走路機能について検討を行い報告する。

2 滑走路に求められる機能と液状化対策

平成7年兵庫県南部地震において、社会基盤施設の損傷・崩壊による経済活動の停滞等が甚大であったことから、近年の耐震設計においては2段階の地震動（レベル1、レベル2地震動）を考慮することになってきた。例えば、空港施設の液状化関連事項が準拠している「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾では性能設計体系が取り入れられている。空港においても、想定される地震の震源特性・伝ば経路特性・サイト増幅特性を考慮したレベル2地震動が作用した際、所定の耐震性能が発揮されるよう個別に対策計画を策定することになっている。

以上より、従来の耐震設計思想と異なり、a) 構造の安定だけでなく施設の機能に着目する、b) 既存施設を供用しながら耐震性を向上させることが必要となる。a) に関しては、Table 1に示すようにレベル2地震動による滑走路の設計限界値が設定されている。³⁾

一方、b) における供用中の滑走路・誘導路の液状化対策は、航空機の離発着に支障の無い深夜の数時間に施

[†] 原稿受理 平成21年5月8日 Received May 8, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* (株)港湾空港技術研究所 〒239-0826 横須賀市長瀬, Port and Airport Research Inst., Nagase, Yokosuka, 239-0826

** 静的圧入締固め工（CPG工法）研究会 〒111-0052 東京都台東区柳橋, Compaction Grouting Society of Japan, Taito-ku, Tokyo, 111-0052

Table 1 Limit value for present serviceability of runway pavement against L2 seismic motion.

Facility	Deformation of ground by liquefaction	Bearing capacity of ground
Center part in Runway Pavement (Range of 2/3 of width of R/W)	The maximum inclination of R/W shows the value of 1.5% in the direction of crossing and 1.0% in the direction of running though.	Required bearing capacity for present serviceability of R/W is decided by time history of dissipation of excess pore water pressure.
Edge part of Runway Pavement (Range of 1/3 of width of R/W)	The maximum inclination of R/W shows the value within 1/2 in the crossing direction and 1.5% in the running direction. (Partial inclination of 50% in edge part of R/W is permissible.)	

工する必要がある。このため、施工機械の搬入・液状化対策・施工機械の搬出というサイクルが空港運用時間帯を避けて繰返されることが求められる。このような制約条件下、現時点における滑走路等への適用実績のある液状化対策工法としては、密度増大工法として、流動性の低いモルタルを対象地盤に圧入し地盤を締固める CPG 工法⁴⁾、薬液注入工法として、浸透性の高い薬液を浸透させ間隙水をゲル状物質に置換する浸透固化処理工法⁵⁾が挙げられる。

3 実大試験体を用いた現場液状化実験

3・1 実験条件

現場実大実験は、北海道小樽市に位置する石狩湾新港西地区における造成地で実施した。Fig. 1, Fig. 2 に実験前の実験ヤードの全景およびこれに対応する地層の代表断面図を示す。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) とそれ以深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。

Table 2, Fig. 3 に各地層における試料の物理的性質等、粒径加積曲線 (Fs 層) をそれぞれ示す。Fig. 3 より、Fs 層の N 値の分布は 8 以下と非常に緩く、それ以深

に続く As1 層で 3 ~ 12、および As2 層で 8 ~ 20 を示し、 N 値の増加が見られる。また、Fig. 3 に示す実験ヤード内 12 ヲ所で得られた Fs 層の粒径加積曲線は、一部を除き細粒分含有率 F_c が 38 (%) 以下の範囲に分布しているが、殆どの試料が港湾基準⁶⁾の“特に液状化の可能性あり”の範囲に分布している。

Fig. 4 および Fig. 5 に液状化試験結果の一例と CPG 工法施工予定箇所における道路橋示方書⁷⁾による F_L の深度分布をそれぞれ示す。Fig. 4 に示す液状化試験結果を見ると、 $DA = 5$ (%), $N_c = 20$ (回) で得られる液状化強度が $R_L = 0.189 \sim 0.244$ と比較的低い様子がわかる。また、同図には、B-1 地点における道路橋示方書による N 値からの算定値が示されているが、Fs 層にややばらつきがあるものの、試験結果と概ね整合が取れており、算定式が適応可能であることを示している。次に、Fig. 5 に示すタイプ II 地震動により数種類の地表面最大加速度 α から得られた算定された F_L の深度分布を見ると、概ね $\alpha = 250$ (Gal) で地層全体的に液状化が生じる予測となった。

3・2 試験体および地盤改良

Fig. 6 に滑走路模型を含む発破後実験ヤードの全景、Fig. 7 に滑走路模型のアスファルト舗装の構成を示す。本実験における滑走路模型は 50m × 60m の範囲で施工され、その直下には、CPG 工法、浸透固化処理工法および超多点注入工法⁸⁾が液状化対策として施工された。アス

Table 2 Physical properties of each sand layer in the experimental site.

Soil Layer	N-Value (Average)	Liquefaction Strength, R_L	Fine Content F_c (%)	Wet Density ρ_s (g/cm ³)	Plasticity Index, I_p
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	8~20 (14.1)	0.204~0.222	8~32	1.796~1.819	NP

Fig. 1 Photo.1 View of the experimental site at the Ishikari Bay New Port in Hokkaido Island (before blasting).

Fig. 2 Typical soil profile including the runway area in the experimental site.

Fig. 3 Grain size distribution of Fs sand layer tested before blasting.

Fig. 4 Results of undrained cyclic triaxial test carried out before blasting.

Fig. 5 Safety factor against liquefaction at B-1.

Fig. 5 Bird's eye view of the experimental site after blasting.

Fig. 7 Section of asphalt pavement.

ファルト舗装の構成は、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（切込碎石RC-40）が65cmの構成とし、計96cmとした。

Fig. 8にCPG改良域の拡大断面図および平面図を示す。本実験における静的圧入締固め工法では、従来の設計条件⁴⁾における改良率8～15%、注入孔間配置間隔1.2～1.7mに対し、本実験条件ではコスト縮減を目的に、改良率5%、注入孔間配置間隔2.0mで⁹⁾かつ、従来の設計条件で必要であった滑走路外側に設けていた余改良域を省略し、設計・施工を行った。本実験条件を検証することにより、最低改良率側の適用範囲拡大の可能性について検討するとともに、改良域周囲からの過剰間隙水圧の伝搬を緩和するための余改良域を省略することによる滑走路への影響について検討した。

3.3 実験方法

既存施設の液状化時挙動を把握するため、制御発破により地盤の液状化を再現した。液状化層厚の設定については、地表面からGL-10m程度とし実験の準備が行われた。爆薬の設置箇所については、Fig. 8に示すように、GL-4.5mおよび-9.0mの2深度、また、平面的には6.5mピッチで装薬するように設計された。実験時には、全体として総火薬量1760kgのエマルジョン系含水爆薬583段を概ね0.2秒間隔で発破し、総発破時間139秒間に

Fig. 8 Plan and section view of Compaction Grouting area under runway pavement.

わたる段発発破を実施した。地盤内に周辺の液状化地盤からの過剰間隙水圧の伝搬を考慮し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、水準測量（5m メッシュ）および小型路面性状測定装置（10mm ピッチ）により液状化に伴う地表面変状を把握した。

4 実験結果

4.1 液状化挙動

液状化層内、改良域内で発生した過剰間隙水圧 Δu の時系列データを同一深度で比較するため、PW08-6、CP-1M および CP-3M で得られた結果について Fig. 9 に示す。全体的な特徴として、未改良部の Δu の上昇傾向に対し、改良端部および改良中央部における Δu は漸増する傾向が見られ、他の地点で得られたデータに関しても同様であった。なお、全地点の計測結果から算定した過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ を確認すると、未改良域ではほぼ 1 を示すが、改良端部、改良中央部でそれぞれ 0.63 ~ 0.77, 0.51 ~ 0.76 を示している。また、改良内部の位置にかかわらず過剰間隙水圧の消散傾向は同様であり、 $\Delta u/\sigma_v'$ は一時間後に未改良域、CPG 改良域でばらつきはあるものの、概ね 0.2 ~ 0.3 程度を示し、一日後にはほぼ 0 に収束した。Fig. 7 にも示されているように、Fig. 8 に、各地点における計測データに基づき作成された過剰間隙水圧の断面分布を示す。発破直後に近い時間帯では、未改良部から CPG 改良域にかけて過剰間隙水圧の伝搬が確認され、改良端部における $\Delta u/\sigma_v'$ が 0.9 程度、改良中央部で 0.7 程度の値を示し、想定よりも大きな過剰間隙水圧の伝搬が確認された。発破一時間後では、未改良域 - CPG 改良域全域にかけてほぼ同様な値を示し、 $\Delta u/\sigma_v'$ は 0.2 程度であった。

滑走路模型の沈下分布について、Fig. 11 に発破一時間後の水準測量結果を示す。未改良域では 300mm 以上を示した。CPG 改良中央部付近では 8mm 程度の沈下が確認された。

Fig. 9 Comparison of excess pore water pressure measured at GL-6.0m between Compaction Grouting area and unimproved area.

Fig. 10 Dissipation of excess pore water pressure measured in Compaction Grouting zone and unimproved zone.

Fig. 11 Subsidence contour chart at one hour after

4.2 液状化対策効果の確認

CPG 改良域における地盤沈下が若干確認されたため、液状化後の改良中央部における発破実験前後の N 値 ($N-1, N-2$)、および孔内水平載荷試験から得られた発破前後における水平土圧係数 K 値 ($= \sigma_h/\sigma_v'$) を比較し Fig. 12 に示す。なお、実験後の調査は発破数日後に実施し、過剰間隙水圧が完全に消散した後である。 N 値に関し、横軸に発破前の N 値を示しており、●から○への矢印は、発破前の地盤改良時の施工履歴による N 値の増加を表している。○で表示される地盤改良後の N 値は、液状化履歴を受けることにより、若干低下傾向にある様子が見られる。一方、 K 値については、改良中央部で 0.92

Fig. 12 Comparison of N -values and K -values before and after blasting in Compaction Grouting area and unimproved area.

から 0.82, 改良端部で 1.00 から 0.63 と若干の低下が認められたものの, 地盤改良前の地盤調査において $K = 0.35$ であったことを考えると, 周辺地盤が液状化履歴を受け, 若干の影響は被るものの, 改良効果は持続していると判断される。

5 液状化流動解析による評価

5・1 液状化流動解析による残留変形の評価

液状化による滑走路機能の検討を行うため, CPG 改良域を含む代表断面として, Fig. 8 および Fig. 11 に示す A-A'断面において ALID¹⁰⁾による 2 次元液状化流動解析を実施し, 液状化による地盤の残留変形や滑走路の変状について, 再現解析を試みた。解析モデル図および解析定数一覧を Table 3, Fig. 13 にそれぞれ示す。解析に用いた定数は, 滑走路部分に関しアスファルトの一般的な値, 液状化層を始めとする地盤については調査結果を基にそれぞれ設定した。なお, 本解析方法は, 液状化安全率 F_L と細粒分含有率 F_c より, 地震前に対する液状化時のせん断剛性低下率 (G/G_0) を求めることが必要となる。 F_L の算出にあたり, 発破による外力条件が不明確であるため, 未改良域における残留変形が実験結果と概ね一致するように地表面加速度を設定した。また, 液状化後の沈下量については, Ishihara and Yoshimine¹¹⁾の試験結果に基づき算定した。

Fig. 14 に解析結果を示す。本解析結果は, 液状化直後

の変状を経て, 排水を考慮した液状化後の残留変形を表した変形図であるが, 地盤改良域外において沈下が顕著に生じ, 地盤改良域では CPG 改良域に関わらず, 全体的に沈下が少ないことがわかる。改良域一未改良域において山一谷の残留変形状が確認されることから, 本解析では実験で得られた滑走路模型の残留変形の傾向をほぼ再現できていると判断される。

5・2 実験および解析による滑走路機能の評価

小型路面性状測定装置を用いた平坦性調査を再現解析と同一断面 (A-A'断面) で実施した。CPG 改良域の滑走路機能について詳細に検討するため, Fig. 14 に示す CPG 改良域と隣接する未改良域を含む A-A'断面の一部である C-C'断面部分の測定値および液状化流動解析結果をまとめ, Fig. 15 に滑走路模型表面の沈下分布を示す。測定値による滑走路模型の沈下傾向を見ると, 発破一日後以降, ほとんど進展がないことがわかる。また, CPG 改良端部において, 若干ではあるが測定値, 解析結果ともに沈下が生じていることが確認できる。

次に, Fig. 15 における測定値および解析結果の勾配について整理し, レベル 2 地震動に対する滑走路縁部縦断方向の設計限界値 1.5% と比較し Fig. 16 に示す。通常は, 5m ピッチにより滑走路勾配を管理することが多いが, 同図では測定値, 解析結果ともに 50cm ピッチによる舗装勾配についても整理し比較した。測定値によると,

Table 3 Key input for residual deformation analysis.

Materials		Shear Modulus G (kN/m ²)	Poisson's Ratio ν	Wet Unit Weight γ (kN/m ³)	Safety Factor against Liquefaction, F_L	Fine Content F_c (%)	Relative Density D_r (%)
Asphalt Concrete	① Surface course	1850000	0.35	23.0	—	—	—
	② Upper-base	1850000	0.35	23.0	—	—	—
	③ Sub-base	150000	0.35	20.0	—	—	—
Soil Layer	④ Fs (Unsaturated Layer)	2000	0.33	18.0	—	—	—
	⑤ Fs (Saturated Layer)	2000	0.33	18.0	0.57	16.9	28.7
	⑥ As1 (Liquefiable Layer)	9000	0.33	18.0	0.80	13.0	51.0
	⑦ As2 (Non-liquefiable Layer)	14000	0.33	19.0	—	—	—
	⑧ CPG (Fs)	4000	0.33	18.0	—	—	—
Improved Soil Layer	⑨ CPG (As1)	18000	0.33	18.0	—	—	—
	⑩ Permeable Grouting (Fs)	2000	0.33	18.0	—	—	—
	⑪ Permeable Grouting (As1)	9000	0.33	18.0	—	—	—

Fig. 13 Schematic representation of residual deformation analysis model for runway and liquefiable layer.

Fig. 14 Result of residual deformation analysis.

勾配は改良中心部ではほぼ 0% を保ち、滑走路模型端部から約 2m の範囲において、50cm ピッチによる勾配では既定勾配を上回る変状が生じていることから、局所的な変状が大きくなっていることがわかる。しかし、該当部分に関し、通常の管理の上では設計限界値内を示していることから、供用的には特に問題が無いと判断される。一方、解析結果による勾配については、改良域全体にかけて設計限界値内に納まり、測定値に比べ勾配を過小評価する傾向を示した。

以上より、平坦性調査による測定値から、滑走路模型の変状は設計限界値内であり、CPG 改良域における滑走路機能が維持されていることが確認できた。しかし、液状化流動解析による評価については、実験結果の再現は概ねできているものの、局所的に大きな変状が生じる場合には、評価が困難であるものと考えられる。

6 結 論

密度増大工法の一例として、静的圧入締固め工法を現場に施工し、液状化時の改良効果やその持続性、また、改良に伴う滑走路機能についての調査を現場実大実験により評価した。実験を通じて得られた主な知見は以下に示すとおりである。

(1) 液状化時に CPG 改良内部への過剰間隙水圧の伝搬が認められたものの、液状化前後における改良域の N 値、 K 値の比較や滑走路模型の沈下から、液状化後においても対策効果が持続していることがわかった。

(2) 密度増大工法は、滑走路機能を守るため、従来の設計条件では余改良域を設ける必要があったが、余改良域を省略しても、滑走路機能が維持されることが示された。

Fig. 15 Comparison of longitudinal profile of runway between measured and calculated along C-C' line.

Fig. 16 Evaluation of pavement performance from residual deformation by measurement and residual deformation analysis along C-C' line.

(3) 本実験では、従来の設計条件よりも低改良率、かつ注入孔の配置間隔を広げた施工を実施し、改良効果を確認した。今後に向けて、改良率の適用範囲拡大およびコスト縮減の可能性を見出すことができた。

(4) 液状化流動解析では CPG 改良域および未改良域を含め、残留変形の傾向を概ね再現できたが、局所的に大きな変状が生じる箇所に関し、残留変形量を過小評価する傾向にある。

実験の実施にあたり、国土交通省北海道開発局並びに石狩湾新港管理組合の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, "Report of Technical Advisory Committee which Concerned with Seismic Performance of Airports in Japan", <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/12/120427/01.pdf> (2007).
- 2) Japan Port and Harbour Association, "Technical Standards for Ports and Harbour Facilities and Commentaries", Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (ed.) (2007).
- 3) Service Center of Port Engineering, "Technical Standards for Earthquake resistant Design and Case Study of Airport Facilities, Ministry of Land, Infrastructure", Transport and Tourism (ed.) (2008).
- 4) Coastal Development Institute of Technology, "Manual of Compacting Grouting Method as a Countermeasure for Liquefaction" (2007).
- 5) H. Yamazaki, K. Zen and K. Kawamura, "Study on Applicability of Permeable Grouting Method to Countermeasure against Liquefaction", Report of Port and Airport Research Institute, Vol.41, No.2 (2002).
- 6) Coastal Development Institute of Technology, "Handbook of countermeasure for liquefaction in Reclaimed land" (1997).
- 7) Japan Road Association, "Specifications for Highway Bridges V Earthquake Resistant Design" (2002).
- 8) Study Group on Ultra Multi Grouting Method, "Manual of Ultra Multi Grouting Method as a Countermeasure for Liquefaction" (2004).
- 9) Y. Harada, T. Konishi, Y. Morikawa, T. Fujii, T. Sugano and H. Nakazawa, "On the Liquefaction Countermeasure by CPG Construction in the Artificial Liquefaction Experiment (the 1st) -The improved effect-", 43th Japan National Conference of Geotechnical Engineering, pp.1831-1832 (2008).
- 10) S. Yasuda, N. Yoshida, K. Adachi, H. Kiku, S. Gose and T. Masuda, "A Simplified Practical Method for Evaluating Liquefaction-Induced Flow", Journal of Construction Management and Engineering, No.638, III-49, pp.71-89 (1999).
- 11) K. Ishihara and M. Yoshimine, "Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes," Soils and Foundations, Vol.32, No1, pp.173-188 (1992).