

実物大の空港施設を用いた液状化実験

～液状化対策コストの縮減に向けて～

菅野 高弘

巨大地震時・地震後に空港の果たす役割は大きく、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として活躍している。1995年兵庫県南部地震においては、代替輸送として地震直後から4月14日までに3672往復の臨時便により広島、岡山、福岡、東京等と大阪間の輸送に活用された。このため地震時の被災想定、震災時に求められる機能、ハード・ソフト両面からの対応策の検討・実施が急務となっている。主要大都市が臨海部に位置することから、臨海部の空港施設の耐震対策戦略の一環として、液状化の影響について検討するため、制御発破による現場実大実験を実施した。

キーワード：空港土木施設、液状化対策、地震時対応

1. はじめに

巨大地震は頻繁に発生するものではないが、万一発生した際の、人的被害を含め社会的・経済的損失は非常に大きく、重要な課題となっている。中央防災会議の予想で、30年以内にマグニチュード8クラスの巨大地震として東海、東南海、南海地震などは50%以上の発生確率と発表され大きな被害の発生が予測されているため、対応策の検討が急がれている。巨大地震の発生を防止することは不可能であるが、発生した際の損害をできるだけ小さくすることが肝要であり、ハザードマップの整備、被災予測の公表、地震直後の緊急対応マニュアルの整備などのソフト面の対策と施設の耐震性向上というハード面の対策の効果的な組み合わせによる対応が必要となっている。

巨大地震後の空港の果たす役割は大きく、例えば、2004年10月23日新潟中越地震においては、上越新幹線とき325が脱線、12月28日に運転再開されている。同時に新潟県内の関越自動車道にも甚大な被害が発生し、11月5日の運用再開まで時間を要した。当時、新潟空港では、地震後の緊急点検で無被災と判断され、運用を停止することなく、救急・救命活動、救援物資輸送や人員輸送に活用された。全日空と日本航空が地震の翌日10月24日から11月14日まで臨時便を運用し被災地の復旧・復興に活用されている。

国土交通省航空局は、「地震に強い空港のあり方検討委員会」（委員長：森地茂政策大学大学院教授）を組織し、2007年4月に報告書を公表しており、空港

に求められる地震後の機能として、

- 発災後極めて早期の段階に、救急・救命活動の拠点機能を発揮できること。
- 発災後3日以内に、緊急物資輸送・人員等輸送受け入れが可能となること。

等が挙げられた。これを受け、地震後に求められる機能を確保するために、空港施設の現状把握に基づく耐震性向上が急務となった。特に、国内の主要空港の多くが臨海部に位置するため、供用中の空港施設の液状化対策が耐震性向上のため重要であることが認識された。

発災時に空港に求められる機能をとその対応について図-1のように時系列で整理できる。

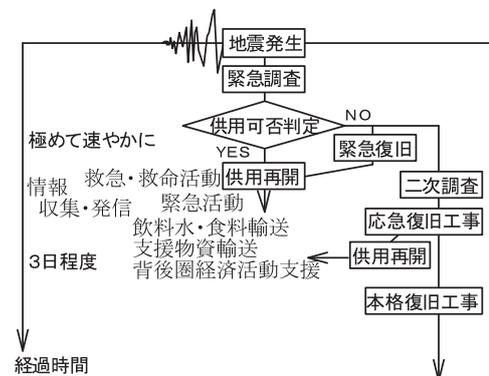


図-1 発災時に空港に求められる機能と対応

空港には発災直後から救急・救命活動の拠点機能が求められる。特に迅速な対応が必要となるためヘリコプターによる救急・救命活動が中心となる。同時に、緊急物資・人員等の輸送活動および被災程度の把握等

的確な防災情報を発信するための防災ヘリコプターや報道機関のヘリコプターによる情報収集・発信が開始されるものと想定される。これらの活動は震災後概ね3日間程度に集中するものと想定している。その後、被災地域の復旧・復興活動支援および、国内外の航空ネットワークの維持、背後圏の経済活動の継続性確保に活用される。また、比較的広大な敷地を有することから、負傷者、帰宅困難者、近隣住民への対応（例えば緊急避難所としての機能）も期待されることになる。

地震直後から機能を発揮させるためには事前の対策が必要であり、液状化時の施設被災・対策等に関する検討には、過去の被災事例の検討、数値解析や模型実験による被災シミュレーションを用いることになる。過去の被災事例として1964年新潟地震時の新潟空港の液状化被害が挙げられるが、当時の航空機と現在の航空機は異なり、例えば、滑走路の舗装構造も当時と現在では大きく異なる。よって、新潟地震時の被災事例が参考にはなるが、同じ被災が最新の空港で発生するとは考え難い。数値解析や模型振動実験に関しても、その精度が被災事例等で確認されていなければ実務への適用には困難が伴う。このため、国土交通省の委託を受け（独）港湾空港技術研究所は、実物大の空港施設を用いた制御発破による液状化実験（図-2）を企画・立案した。主な検討内容は以下に示す3点である。

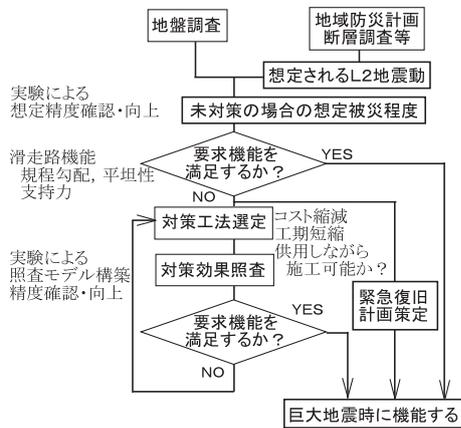


図-2 液状化対策策定フロー

①現象把握

地盤の液状化現象を再現し、地盤物性値と液状化の程度、液状化の継続時間、地盤沈下量等を詳細に調べ、液状化現象が滑走路、航行支援施設等の構造物へ及ぼす影響を確認する。

②低改良率、改良範囲縮小による液状化対策効果の検証

コスト削減、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。

③被災時における供用の可否判断

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。

これら3項目について、大別して表-1に示す項目(サウンディング手法、舗装の供用判断、液状化対策、地下埋設管その他、挙動計測・地盤振動計および盛土補強方法等)にグループ分けし、総数で30テーマの研究を、

表-1 研究テーマ一覧

種目	研究課題
サウンディング	各種サウンディング手法を用いた液状化前後の地盤物性値の評価に関する共同研究
	液状化による空港施設への影響に関する現場実大実験
	各種地盤調査による耐震設計に関する地盤物性の比較に関する研究
舗装の供用判断	液状化による舗装体の挙動把握および供用性の評価方法の研究
	人工液状化実験における舗装被害の評価に関する研究
	自走式FWDを用いた支持力調査および沈下量調査
	舗装体内部の変状計測システム
	実験ヤードの発破試験前後の舗装の路面性状と構造評価
	舗装平坦性調査
	高強度RCプレキャスト舗装版の地震時挙動及び早期供用性の評価
	港湾・空港施設のヘルスマonitoringに関する研究
	地中レーダーを用いた地震災害時の舗装の供用判断に関する実験的検討
	レーザープロファイラーを用いた舗装面変状・地盤面変状に関する研究
舗装積算・現場監視	
液状化対策	人工液状化実験における合理的な液状化対策(CPG工法)範囲検討に関する実大現場実験
	人工液状化実験における合理的な液状化対策(浸透固化処理工法)範囲検討に関する実大現場実験
	液状化対策工法(超多点注入工法)における合理的な設計・施工法に関する研究
	ゲル状注入材による地盤改良効果の評価法の検証
	交差噴流式高圧噴射工法を用いた格子状改良による既設舗装直下での液状化対策効果の確認
	マイクロバブル水を利用した不飽和化による液状化対策工法に関する実大現場実験
地下埋設管その他	高圧噴射攪拌工法(ジオバスタ工法)を用いて、杭状の改良体をランダムに配置することによる液状化対策効果の確認
	地下埋設物の液状化時の浮き上がりに関する実大現場実験
	液状化に伴うマンホール浮上抑制装置の効果確認
挙動計測・地盤振動計測	異種地下構造物接続に伴う地震時挙動の解明
	各種計測手法を用いた地盤および各種構造物の液状化挙動の評価
	液状化による空港施設への影響に関する現場実大実験
	高精度GPS計測技術を用いた液状化現象に伴う地盤変動量計測に関する共同研究
盛土	発破時地盤振動計測による周辺環境への影響評価
	液状化地盤上の盛土補強技術に関する研究

国内外 47 機関の共同研究（行政 1，大学 5，独法研究所 3 機関，協会等 8 機関，および民間 30 社）で実施した。

2. 実験概要

(1) 実験用地施設配置

北海道小樽市銭函の石狩湾新港西地区の整備中の埋立地に 1.65 ha の実験ヤード（図-3）を石狩湾新港管理組合のご厚意により借用し，実物大の空港施設を

- | | |
|---------------------|------------------------|
| ① 滑走路（アスファルト舗装） | ⑩ 通信管 |
| ② 駐機場（エプロン） | ⑪ 盛土（H=3m） |
| ③ 埋設管（φ1000mm） | ⑫ マンホール |
| ④ 幹線ダクト | ⑬ 液状化対策工（浮上り防止対策等 4 基） |
| ⑤ 進入角指示灯 | ⑭ 液状化対策工（地盤改良：7 工法） |
| ⑥ グライドスロープ（H=16.5m） | ⑮ サウンディングエリア |
| ⑦ ローカライザー（L=40m） | ⑯ 予備実験エリア |
| ⑧ ローカライザーシェルター | ⑰ 予備実験用試験舗装 |
| ⑨ 防油堤（L=32m） | ⑱ 高強度ジオシンセティクス |

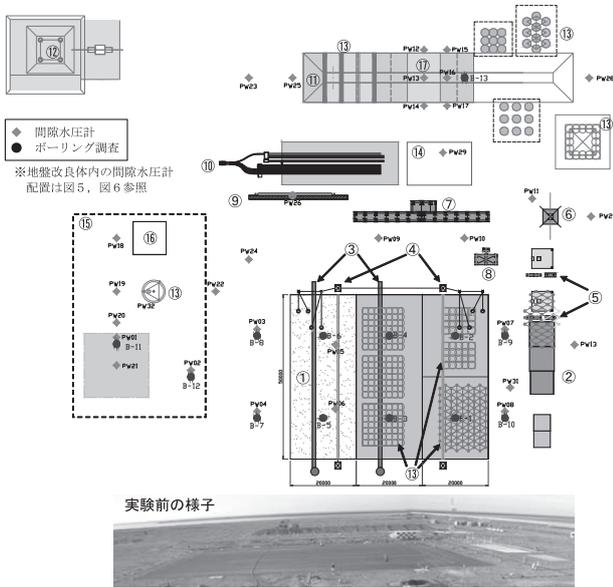


図-3 実験ヤード内の空港施設

建設，制御発破により液状化状態を再現した。現地の地盤は，石狩湾新港の浚渫砂（比較的均一な細砂）で埋立てられている。整備中であることから，液状化対策は実施されていないため，液状化実験に適した地盤構成を有していると判断された。

空港の主要施設である滑走路は，50 m × 60 m の範囲にボーイング 747 クラスの航空機が離発着可能な舗装構造を築造した。滑走路舗装領域では，図-4 に示すように液状化対策工として，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 工法を施工し，比較のため未改良部分を残した。コスト削減の可能性を探るため，各工法の標準的な設計と改良率や改良深さを変えた対策を実施している。他に，空港に設置されている計器着陸装置であるローカライザー，グライドスロープ，ローカライザーシェルター，航空灯火として進入灯，進入角指示灯等の実物を施工した（写真-1）。

(2) 制御発破による液状化実験

実験フィールド内の想定液状化層は GL-10 m 程度までであり，図-5 に示すように爆薬の設置箇所については，GL-4.5 m および -9.0 m の 2 深度，平面的には 6.5 m ピッチのグリッドで装薬（概ね 1 箇所当たり 4 kg）するように，予備実験結果を基に設計した。滑走路の直下における液状化現象を再現させるため，舗装工終了後，曲がり削孔を用い，装薬を実施した。削孔後，各孔内への装薬作業を繰り返し行い，全体として総装薬量 1,760 kg のエマルジョン系含水爆薬を 583 箇所埋設した。実験時には，概ね 0.2 秒間隔で発破を行い，総発破時間 139 秒間にわたる段発破により地盤の液状化現象を再現した。実験では，間隙水圧の

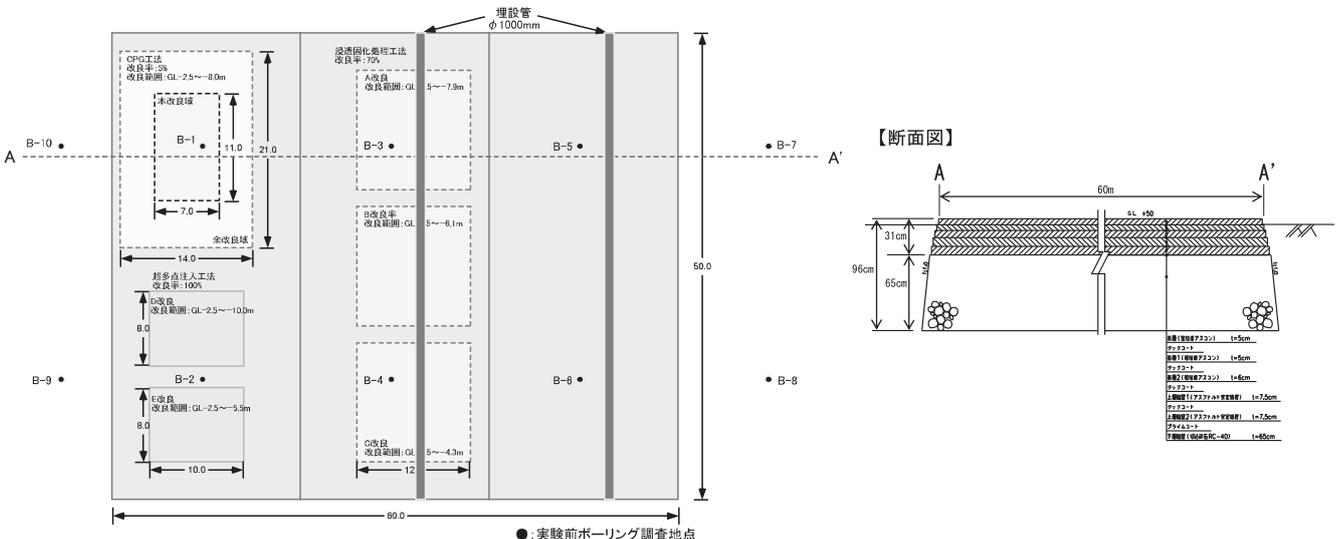
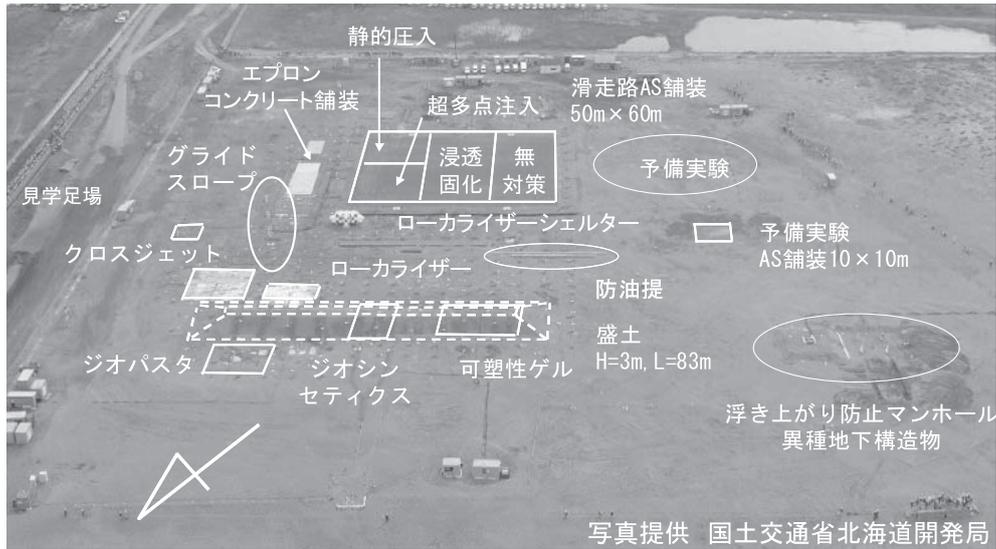
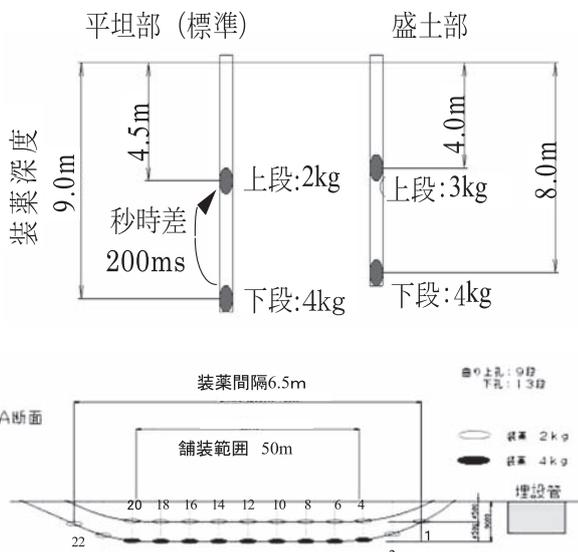


図-4 滑走路舗装平面図および断面図



写真一 実験ヤード内施設配置状況



図一 制御発破のための装薬断面

3. 実験結果の概要

(1) 液状化発生状況・液状化後沈下状況

発破は2007年10月27日(11:00点火)に実施した。発破直後から写真一2に示すように、滑走路舗装に亀裂等は発生せず、周辺部各所で液状化による噴砂・噴水が認められた。地中に設置した間隙水圧計の記録からも、想定した液状化層が完全液状化状態に達したことが確認された。

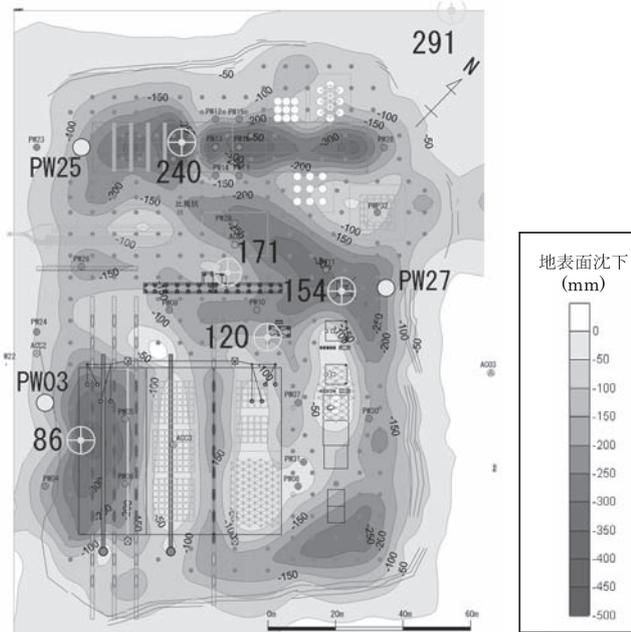


写真二 実験直後の噴砂状況
(上: 実験ヤード全体 下: 滑走路端部マンホール付近)

計測により、発破時の液状化の状況や過剰間隙水圧の消散過程を計測するとともに、実験前後の水準測量により、地盤沈下状況や施設の不等沈下等の変状を確認した。

液状化状態の再現は、爆発に伴う振動により爆心周辺の砂粒子の骨格が崩れることによる過剰間隙水圧の上昇を狙ったものであり、一般的な地震時の砂地盤のせん断変形に伴う負のダイレイタンスに起因する過剰間隙水圧の上昇とはメカニズムが異なる。特に、地震時の振動による施設への影響については制御発破による液状化実験では再現できない。このため、振動台実験、室内土質試験、数値シミュレーション等も併せた検討を実施している。

図一六に示すように発破後7日目の沈下状況を見ると、滑走路直下の液状化対策部分の沈下は極めて小さく、未対策部分では30 cm以上の沈下が確認された。当該地点の液状化層の砂が比較的均一な細砂であることから沈下量の経時変化特性は、発破後4時間程度で概ね80%程度の沈下が発生し、7日程度でほぼ収束した。各空港における液状化想定層の砂質は異なることから、透水性の違いによって、過剰間隙水圧の消散に要する時間は数時間から数日の範囲になるものと推定される。



図一六 液状化実験後の沈下状況（発破後7日）

(2) 実験結果のまとめ

本プロジェクトでは、制御発破による地盤の液状化現象を再現し、実物大の空港施設の液状化時挙動を把握することを試みた現場実物大実験を実施した。

- ①現象把握：液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴い各種空港施設に変状が生じた。アスファルト舗装、進入灯、ローライザーおよびグライドスロープ等の空港施設、いずれも未改良域に施工された施設に、沈下あるいは不等沈下の被害が生じ、また、アスファルト舗装脇のマンホール周辺において、激しい噴砂が生じ施設によっては機能に重大な影響を与えることが確認された。
- ②液状化対策効果およびコスト縮減案の検討：地盤の低改良率化や改良範囲縮小によるコスト縮減、およびその時の地盤改良効果について検討した。その結果、締固めを原理とする液状化対策工法の余改良域縮小、改良率の低減、および薬液注入工法にお

ける深さ方向で部分改良が可能であることが確認された。余改良とは、液状化対策部分への未対策部分からの過剰間隙水圧の侵入を緩和するために余分に改良するものであり、港湾の岸壁背後の液状化対策に関する検討から設定されたものであるが、水平成層に近い滑走路の場合、機能面から縮減が可能と判断した。部分改良については、滑走路の機能の観点から均一な沈下は許容されることから、想定される液状化層全層改良が原則ではあるが、現場の状況によっては下部に未対策部分を残すことも可能となる。両者とも、数値シミュレーションにより、想定地震時の挙動を解析、所要の性能（平坦性、規定勾配、支持力）が担保されることを確認する必要がある。

- ③供用の可否判定：本稿ではページ数の関係で示していないが、舗装表面の状況把握として、平坦性をレーザープロファイラー、平坦性測定器、勾配をGPS、絶対沈下システム、舗装構造変状について光ファイバー、地中変状について表面波探査、地中レーダー等のツールの適用性を確認した。特に、目視点検ができない舗装内部や地中部の状況を迅速に把握することが可能なツールとして今後の発展が期待される。

4. おわりに

各空港においてソフト・ハード両面からの耐震対策検討が鋭意進められており、既に対策に着手した空港も複数あり、本プロジェクトの成果が活用されている。ページ数の関係で概要のみの報告となっており、詳細については参考文献を参照いただければ幸いである。

本プロジェクトにおいては、石狩湾新港管理組合、国土交通省北海道開発局をはじめ、多数の方々の支援を得て「地震に強い空港」整備のための知見を得ることができた。ここに関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

JICMA

【参考文献】

菅野高弘他：液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究、港湾空港技術研究所資料 No.1195, 2009.6.

【筆者紹介】

菅野 高弘（すがの たかひろ）

(株)港湾空港技術研究所

地盤・構造部 地震防災研究領域 領域長

