海上空港･臨海部埋立空港の耐震対策戦略及び液状化現象に起因する施設の機能障害に関する検討

EARTHQUAKE RESISTANCE IMPROVEMENT STRATEGY OF RECLAIMED AIRPORT LOCATED IN COASTAL AREA AND FUNCTIONAL DISORDER OF AIRPORT FACILITIES DURING LIQUEFACTION

春日井康夫[1]・牛嶋龍一郎[2]・水上純一[3]・麻山健太郎[4]・中澤博志[5]・菅野高弘[5]
Yasuo KASUGAI, Ryuichiro USHIJIMA, Jun-ichi MIZUKAMI, Kentaro ASAYAMA, Hiroshi NAKAZAWA and Takahiro SUGANO

[1]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）
[2]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）
[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）港湾空港技術研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

The role of Airport during and after large earthquake is important as assist emergency medical service, stating special operation for transporting living necessities for suffers' daily life immediately and restarting commercial logistic operation to support the activities of the enterprises located around the airport. 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. Airport facilities in this study included runway pavement with full specifications for B747 aircraft and apron pavement with/without countermeasures for liquefaction, air traffic control facilities such as the Glide Slope Antenna, the Localizer Antenna, drainage conduit and etc. This paper presents that the earthquake resistance improvement strategy and some of the test results while the measurement and investigation are progressing now.

Key Words : *Airport facilities, urgent project for improving large-scale earthquake countermeasures, countermeasures for liquefaction, liquefaction countermeasures.*

1．はじめに

巨大地震時・地震後の空港の果たす役割は大きく，過去の被害地震においても救急・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．

平成７年兵庫県南部地震においては，山陽新幹線が不通となったため代替輸送として平成７年１月17日から４月14日までに3672往復[1)]の臨時便により広島，岡山，福岡，東京などと大阪間の旅客輸送に活用された．また，海外からの援助チームの受け入れも行われた．

中央防災会議の平成20年度防災対策の重点[2)]で挙げられている８項目（1.大規模災害の被害軽減への戦略的取組，2.国民運動の展開等による社会防災力の向上，3.迅速・的確な防災情報の提供，4.建築物の耐震化の促進，5.災害に強い社会基盤づくりの推進，6.災害応急対応力の増強，7.被災地の復旧・復興支援，8.国際防災協力の推進）において空港施設は，ほぼ全ての項目と密接に関係している．

この様な背景から，国内の空港について，巨大地震時の被災想定，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・実施が急務である．本論文では，国内主要大都市が臨海部に位置する事から，臨海部の空港施設の耐震対策戦略，これに付随する液状化対策について検討した．

2．地震後に求められる空港機能と耐震戦略

(1) 発災からの時系列での検討

過去の被害地震後の対応状況等を分析すると，発災直後から時間とともに空港施設に求められる機能が変化するものと考える．

図-1 に示すように主な機能として，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など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．これらの活動は発災後概ね 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・復興活動支援及び，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）も期待される事になる．このため，全国的な視点からの耐震性向上に加え，地域防災計画における空港の位置付けなども考慮する必要がある．

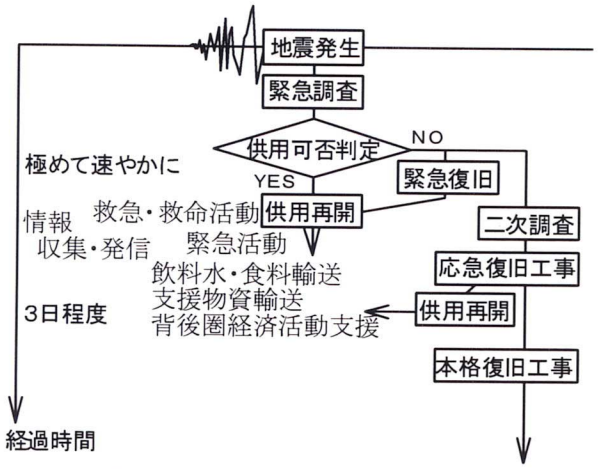


図-1 空港に求められる機能と対応

(2) 活動圏の定義・他空港との連携

地震直後から求められる機能を発揮させるために，ヘリコプターによる救急・救命活動について考察する．一般的なヘリコプターを想定した場合には，600km～800km 程度の航続距離があり，被災地の空港での給油が不可能であること，重篤な患者の輸送など迅速性が要求されることから，無給油で 2 往復程度と仮定すると，概ね半径 100km 圏内をカバーする必要がある．発災後に航空機等の受入れを実施することから空港間での連携が必要不可欠であり，半径 100km 圏内に複数の空港が存在する場合には，役割分担を行い効率的に運用することになる．

(3) 空港の耐震性向上の方向性

国内には約 100 港の空港が存在し，これら全ての耐震性を向上させる必要があるが，各々の空港の地理的・地震学的・社会的条件等を考慮し，優先順位を付けて順次対策を実施することが現実的である．このため，航空ネットワーク維持のために重要な空港（旅客数・路線数が多く，震災により運航が出来なくなると，他空港へも重大な影響を及ぼす空港），背後圏経済活動性確保に重要な空港（大都市や国内の地域ブロックの拠点都市を背後圏に持つ空港）として，東京国際・成田国際・中部国際・大阪国際・関西国際・新千歳・福岡・那覇・仙台・新潟・広島・高松・鹿児島の 13 空港が航空輸送上重要な空港として選択され，これに僅かな整備で耐震性が確保可能な空港や半径 100km の活動圏を考慮に加え，半径 100km の円を描くことによりほぼ国内全域をカバーすることを目指すものである．

図-1 に示したように，地震直後から時系列で考えると，救急・救命活動に資する施設の耐震性は高い事が要求される．数日間の余裕が有る場合には，軽微な補修作業を許容することも考えられ，各々の施設に求められる用途・機能によって，耐震対策方策を変えて対応する事になる．すなわち，地震直後に機能する事が要求される場合には「事前」に耐震性を向上させておく必要があり，地震後 3 日程度以内に機能を回復できれば良い施設の場合には予め補修資機材を準備し補修する「事後」対策の選択も有り得るものと考える．

空港の場合，耐震性を確保する必要がある施設が多岐（例えば，管制塔・ターミナルビル・電源施設などの建築施設，滑走路・誘導路・エプロンなどの土木施設，航空灯火・電波施設など）に渡り，各々の参照基準を基に耐震性評価・対策を実施しているところである．本論文では，空港土木施設の耐震性に大きな影響を及ぼすと想定される「液状化」について論ずる．

(4) 空港土木施設の耐震性向上思想

昭和 30 年代から 40 年代の高度経済成長時代に，空港を含め多くの社会基盤施設が急速に整備された．平成 7 年兵庫県南部地震によって，多数の死者，社会基盤施設の損傷・崩壊による住民生活レベルの低下・経済活動の停滞等が甚大であったことから，耐震設計において 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ている．また，各種設計基準類の国際標準への対応もあり，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」[3] では性能設計体系

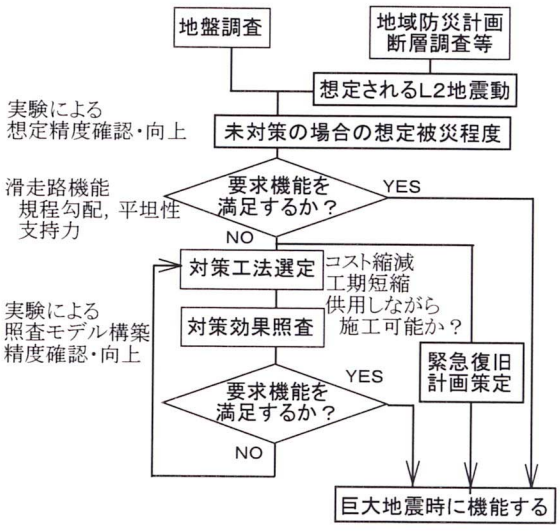


図-2 液状化対策策定フロー

が取り入れられている．空港土木施設の液状化対策の検討フローを**図-2** に示す．中央防災会議・地震調査研究推進本部・地域防災計画や活断層調査によって想定さる地震の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した当該空港に来襲するであろうと想定されるレベル２地震動が作用した際に所定の耐震性能が発揮されるよう対策計画を策定する．

以上のような状況において，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する，既存施設を供用しながら耐震性を向上させる，環境への配慮が必要であるなどの新たな技術課題に直面しつつある．空港施設を対象とした「既存施設を供用しながら耐震性を向上させる」工法は少ないのが現状である．特に，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必要がある．

(5) 空港施設(滑走路・誘導路)の液状化対策

液状化発生のメカニズムが，緩く堆積した砂地盤が地震時のせん断変形によって過剰間隙水圧の上昇，有効応力を失う事によることから，a)地盤の密度を増大させる，b)固結させる，c)液状化しない材料に置換する，d)地下水位を低下させる，e)間隙水圧上昇を抑制する，f)間隙水圧を消散させる，g)地盤のせん断変形を抑制するなどの対策原理に基づき，国内外で多数の液状化対策工法が提案されている．

前節で示した制約条件下において，現時点において滑走路等への適用実績のある液状化対策工法は，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工法（静的圧入締固め工法[4]），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工法（浸透固化工法[5]）が挙げられる．

前者は，**図-3** に示すように，圧入したモルタルの体積増により地盤が締まる効果に加えモルタルが固化することによる固結体と密度が増加した砂の複合構造が形成され a)と c)の効果により液状化抵抗が増加する．無騒音・無振動で，既存構造物を痛めない施工管理が可能である．

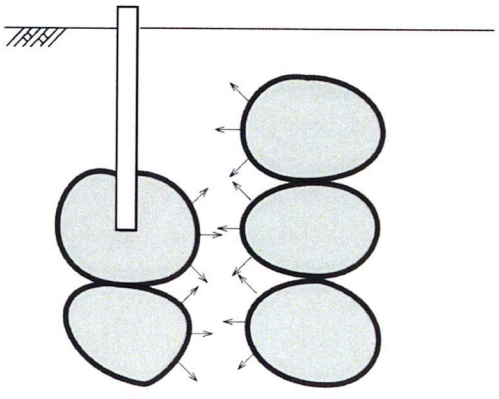


図-3 モルタル圧入による締固め概念図

後者は，浸透性が高くゲルタイムの長い水ガラス系薬剤を低圧力・低速度で注入することにより砂粒子の骨格を崩すこと無く間隙水を薬剤で置換(**図-4**)し，e)により液状化対策するものである．これにより無騒音・無振動，かつ，地中構造物や既存施設等への影響が少なく，液状化対策が可能となる．

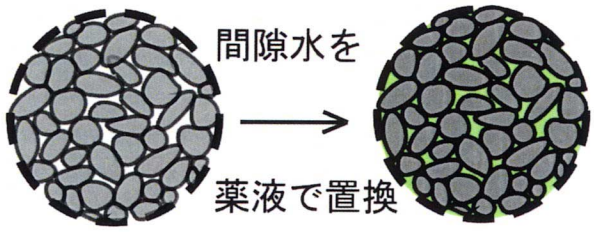


図-4 薬液による間隙水の置換概念図

他に，セメント系固化剤を地中に噴出・撹拌することによる液状化対策工法など，滑走路への適用が可能な工法が開発されてきているが，さらに多くの効果的・経済的な液状化対策工法の技術開発が望まれる．

一般的に，既存施設（特に滑走路・誘導路）の液状化対策工法は工費が高く，工期が長い．このためコスト縮減及び工期短縮が強く望まれる．

3．空港施設の実物大液状化実験

(1) 実験概要

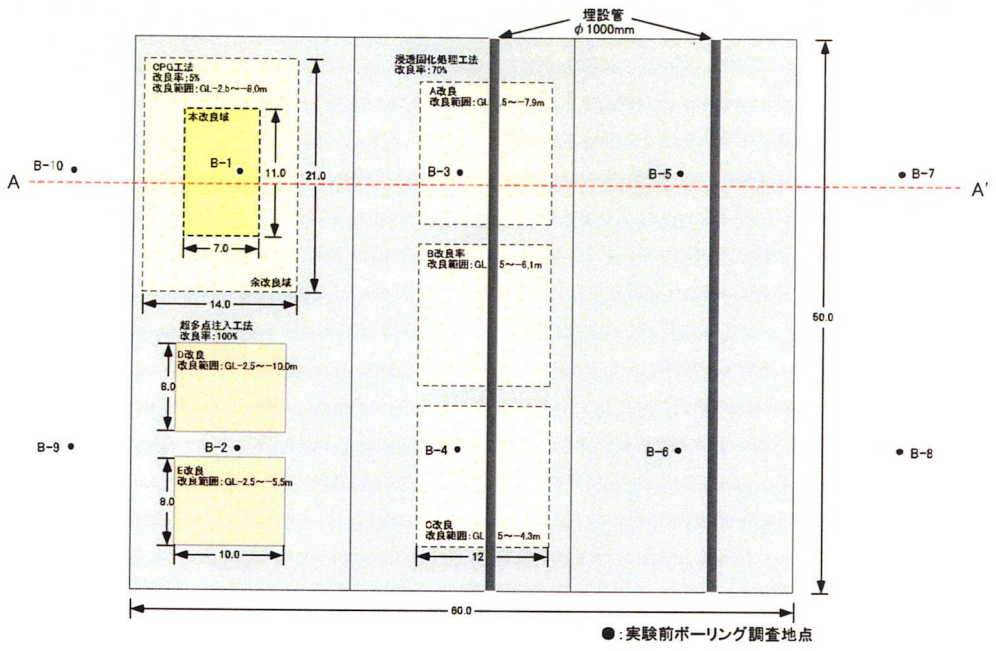
2007 年 10 月 27 日に北海道小樽市銭函の石狩湾新港西地区において，地震災害時に緊急物資輸送の拠点等となる国内空港の耐震対策の検討を目的として，空港施設の液状化時挙動に関する現場実物大実験を実施した．本実験では，約 1.65ha の実験ヤード内に，実際の空港と同様な設計仕様の滑走路を模擬したアスファルト舗装，駐機場エプロン（コンクリート舗装）および航空保安施設（グライドスロープ，ローカライザー，航空灯火等）を再現した．また，実験の実施にあたり，地盤内に装薬した爆薬を発破することにより大規模な液状化を発生させ，各種施設の液状化挙動をほぼ実現象で追跡することで，地盤の液状化に伴う空港施設の変状の詳細なデータを得ることができた．

主な検討内容は，以下に示す 3 点である．

①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，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：コスト縮減，工期短縮の検討を目的に，滑走路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被災時における共用の可否判断：物理探査技術等を用いた非破壊検査による，被害程度の把握，健全性評価の可能性を探る．



【断面図】

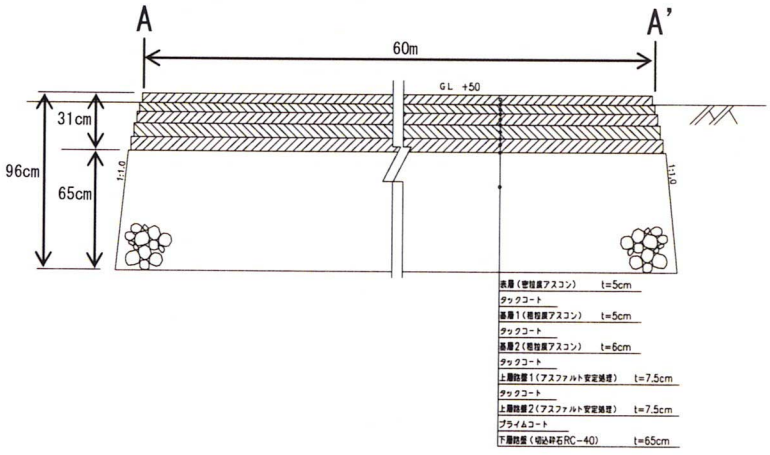


図-5 アスファルト舗装平面図（液状化対策），　舗装断面図

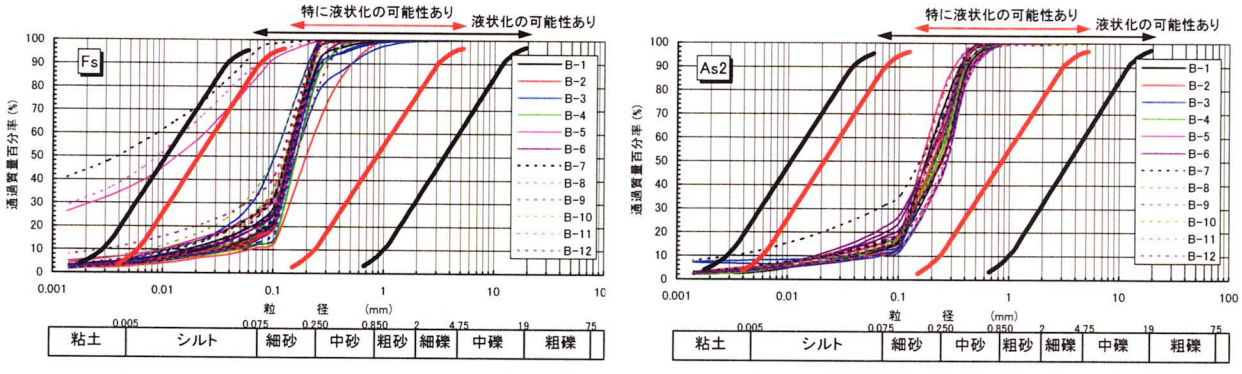


図-6　実験ヤード内から採取した砂の粒径加積曲線

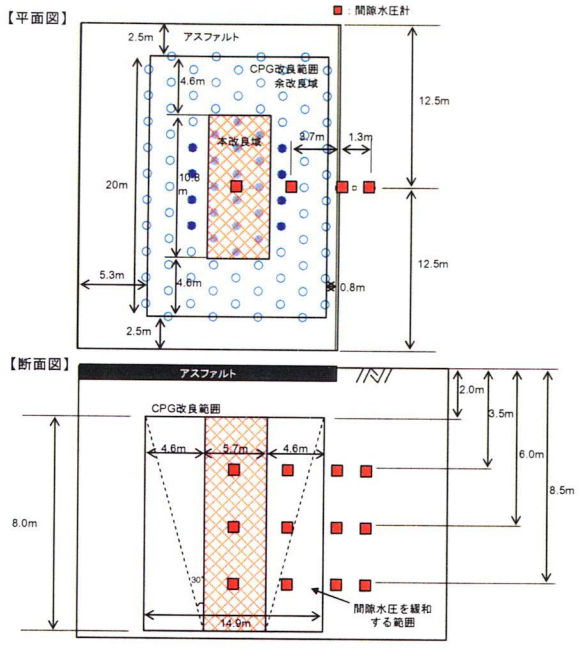


図-7 静的圧入締固め工法改良域概念図

アスファルト舗装下に施工した液状化対策工は，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．本論文では，静的圧入締固め工法について報告する．

図-7 に静的圧入締固め（CPG）工法の改良範囲概念図を示す．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，かつ改良率 8%を 5%に設定し試行的に施工した [4]．また，液状化対策効果を確実にするため改良範囲の周囲に余改良域 [3]を設ける必要があるが，この範囲の縮小の可能性について検討するため，液状化時に発生する過剰間隙水圧の伝搬状況・CPG 施工前～液状化後の K_0 値を確認しており，液状化後 6 カ月にも K_0 値計測を予定している．

(3) 実験結果

図-7 の断面図では，アスファルト舗装端部から 0.9m 部分までが CPG により改良されている．余改良域は液状化対策工底面から 30 度の範囲であり，本断面ではアスファルト端部から 0.9m 位置から内側に 4.6m の範囲となる．制御発破による過剰間隙水圧の時刻歴は**図-8** に示すように，未改良域では過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma_v'$ が 1.0 まで到達しており，余改良域では過剰間隙水圧比の上昇に時間遅れがあり，かつ，時間と共に直線的に上昇している．図中の点線は当該地点の上載圧を示している．過剰間隙水圧比の最大値は，未改良部，余改良部，実改良部で各々1.0，0.8，0.7 を示し，過剰間隙水圧比の上昇程度からは余改良部が緩和領域として機能していることが伺える。

当該地点の静止土圧係数 K_0 値は，**表-1** に示すように，未改良部では 0.36，改良端部で 0.96 程度と，

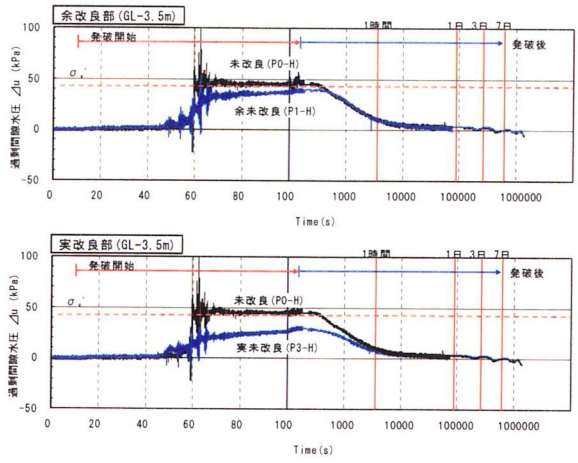


図-8 CPG改良域付近の過剰間隙水圧比時刻歴

表-1 CPG 改良部付近の静止土圧係数

	測定部位	測定深度 GL-(m)	静止土圧係数 K_0
発破前	未改良部	8.5	0.36
	改良端部	8.5	1
	改良内部	8.5	0.92
発破後	未改良部	8.5	0.39
	改良端部	8.7	0.63
	改良内部	8.7	0.82

明らかにセメントミルクの圧入効果が反映された数値を示している．静止土圧係数 $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ は，上載圧 σ_v と水平方向土圧 σ_h の比で表されるものであり，同じ深度であれば 1 に近づく程拘束圧が大きい事を表し，本実験においては改良効果の指標として計測したものである．制御発破後，すなわち，液状化実験 2 週間後の計測値では改良端部で 0.63 と若干低下しているが，未改良部と比較すると効果は持続しているものと判断される．

次に，滑走路の健全性の観点から考察すると，航空機が走行可能な条件として勾配・平坦性・段差が挙げられる．沈下が問題になるのは，不同沈下の発生により規程勾配を維持出来ない場合や，平坦性が確保されずに段差が発生することであり，有る程度の均一な沈下は許容されるものと考えられる．

竣工時の滑走路表面と制御発破による液状化発生・過剰間隙水圧消散に伴う沈下後の比較を**図-9** に示す．CPG 改良部分，浸透固化改良部分，未改良部分で沈下量に差が出ているが，本研究で注目している CPG 改良部分の端部の状況を見てみると，液状化後に沈下し，端部の沈下が大きいように見える．しかし，施工時の出来高からの差分を見ると，極端に大きいとは言えない．

今回試行した CPG 改良仕様では，アスファルト端部から 0.9m までの範囲は未対策部分が残っているが，液状化に伴う沈下量としては 6cm 程度であり，余改良域部分・改良域部分では概ね 2～3cm の沈下量となっている．この事から，未改良部分で発生し

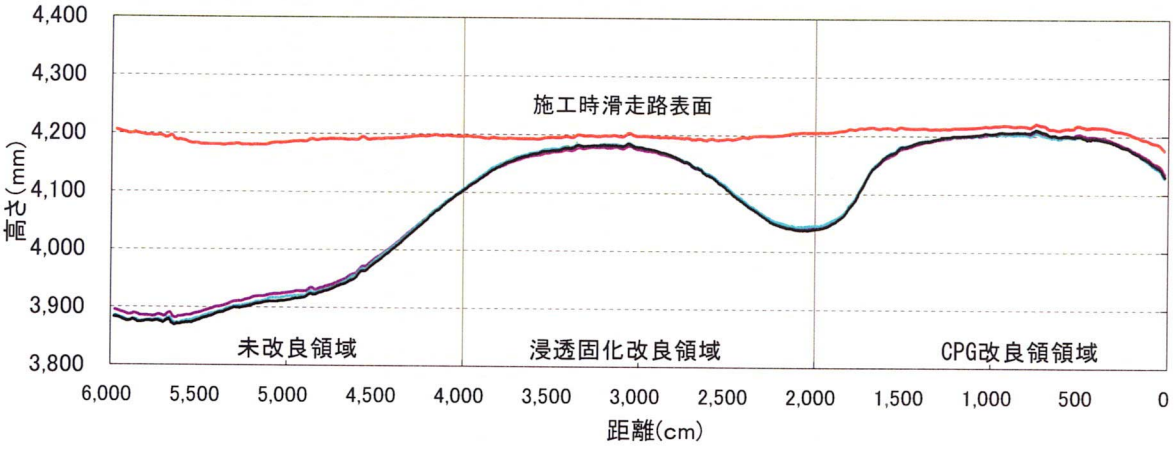


図-9 アスファルト舗装表面の沈下状況

た過剰間隙水圧が余改良部分を経て改良部分へ侵入することによるアスファルト舗装への影響は小さいと考えられる.

4. まとめ

本論文では，巨大地震災害時の空港の果たす役割の，地域社会から求められる機能等を整理した．特に発災直後から時系列で求められる機能が変化することを考慮するとともに，国内の航空ネットワークの維持を念頭に，優先的に耐震性を向上させる必要のある 13 空港を選定することを提案した.

また，ドクターヘリコプター等による救急・救命活動や被災情報の収集・発信の観点から半径 100km の活動圏を設定し，各空港の相互補完によりほぼ全域をカバーすることを提案した.

我国の主要空港が概ね臨海部に設置されている事から，耐震対策の大きな柱として「液状化対策」が挙げられる．供用しながら対策を実施する必要があることから，適用可能な液状化対策工法を選定し，過去の実績を考慮し，実物大の施設を用いた制御発破による液状化状態の再現実験を実施した.

非液状化部分の過剰間隙水圧が液状化改良部への侵入に伴う劣化が想定されることから「余改良域」が設定されているが，過剰間隙水圧比の経時変化・静止土圧の経時変化・アスファルト舗装の機能を総合的に判断し余改良域を縮減することが可能であることが示唆された．現場の雪解け後に，再度事後計測・改良地盤の掘削調査等を計画しており，これらの結果を合わせることにより結論付けたいと考えている.

謝辞：石狩湾新港での現地実験は，行政・大学・独立行政法人研究所，協会等，民間企業による共同研究として当所を入れて 47 機関が担当した．また，実験の実施にあたり，国土交通省北海道開発局および石狩湾新港管理組合の協力を得た．ここに記して謝意を表します.

参考文献

1) 運輸省：平成 7 年度運輸白書、第 1 章　阪神・淡路大震災と運輸　第 2 節　地震発生後の対応，1995
2) 内閣府中央防災会議：平成 20 年度防災対策の重点（平成 19 年 6 月 21 日　中央防災会議決定），2007.
3) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 19 年 7 月.
4) （財）沿岸技術研究センター：液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル-コンパクショングラウチング工法-, 平成 19 年 6 月.
5) 山崎浩之・善　功企・河村健輔：溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用，港湾空港技術研究所報告，第 41 巻，第 2 号，pp. 119～151，2002.