# 特集≫ 防災、安全・安心を確保する社会基盤整備

# 空港滑走路の浸透固化処理工法による液状化対策 福岡空港地盤改良工事

# 林 健太郎・鈴 木 定 義・曽 和 洋 平

全国の主要空港で滑走路の液状化対策が施工されているが、滑走路工事のリスクとして滑走路削孔箇所の離着陸時の破損による事故、または、それに伴う空港使用停止が想定される。このため、滑走路に削孔をしない施工法が求められていた。今回、新しい曲がり削孔式浸透固化処理工法が開発され、1日の施工時間が短い空港でも滑走路に孔を開けることなく施工可能となり、東京国際空港、福岡空港で適用され、いずれも安全に施工を終了することができた。本稿では、新しく改良された曲がり削孔式浸透固化処理工法の概要と福岡空港での施工事例を紹介する。

キーワード:液状化対策, 曲がり削孔, 既設滑走路, ボーリングマシン, 薬液注入

### 1. はじめに

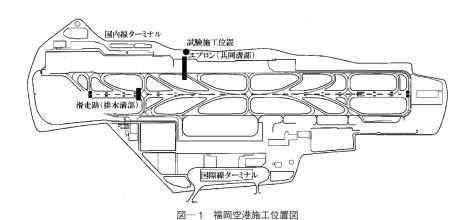
1994年の阪神大震災以来,多くの耐震設計基準が見直されており、同時に既設構造物についても耐震性の見直しが行われている。仙台空港滑走路や仙台港高松埠頭などの施設においても耐震性の見直しが行われ、耐震性能を上げるため浸透固化処理工法が適用された。直後に起こった2011年の東日本大震災では、これらの対策を施した施設において液状化の被害が生じなかったことから<sup>1)</sup>、奇しくも対策工法の有用性が認められる結果となった。

空港の滑走路では、1999年の東京国際空港新 B 滑走路液状化対策工事ではじめて溶液型薬液の注入による対策が適用され<sup>2)</sup>、新千歳空港、仙台空港と拡大されていった。これらの工事ではいずれも滑走路に注入用の孔を開ける施工法が用いられた。2013年度の新東京国際空港の対策工事では2つのジャイロでリアルタイムに正確な削孔ラインを形成できる曲がり削孔式

浸透固化処理工法が適用されており、今回の福岡空港でも同様のシステムが適用された。本稿では、この曲がり削孔式浸透固化処理工法を用いて施工された福岡空港の事例について報告するものである。

## 2. 工事概要

福岡空港の地盤改良工事の施工位置平面図を図—1に、主な施工数量を表—1に示す。本工事は共同溝と滑走路を横断する排水溝の2箇所について薬液注入により液状化対策を行うものである。エプロン(共同溝部)に関しては、図—2に示すように延長200mの共同溝側面は直斜削孔で、共同溝の直下は両端部から曲がり削孔式で延長100mの削孔が計画された。エプロン(共同溝部)は一部60m区間がPC版構造の誘導路の直下に位置しており、この区間では地表からの直斜削孔ができないため、曲がり削孔式で削孔が適用された。滑走路(排水溝部)に関しては、図—3



表— 1	福岡空港施工数量

	エプロン (共同溝)	滑走路 (排水溝)		
改良土量 (m³)	2,439	3,192		
改良球数	586	399		
うち直斜の球数	466	123		
うち曲がりの球数	120	276		
実作業工程	2013.12/3~2014.3/11	2013.11/14~2014.3/4		

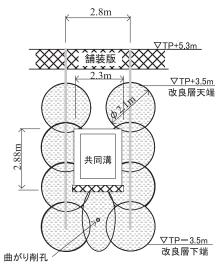


図-2 エプロン (共同溝部) 誘導路直下断面

2.0m × 2.0m

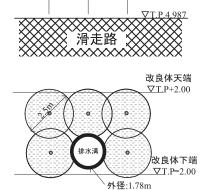


図-3 滑走路(排水溝部)標準断面図

に示すように、直径 1.8 m の排水溝の両側に曲がり削 孔式で滑走路を横断するように延長 80 m, 上下 2 段 の削孔が計画された。

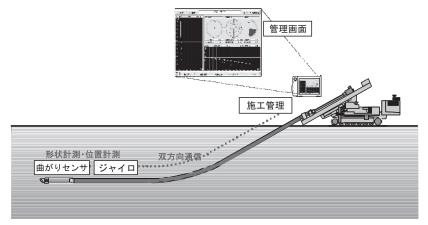
施工場所は空港の制限区域内となり、飛行機が離発着しない夜間にしか作業はできない。作業時間は滑走路部で22時30分から翌朝6時00分まで、エプロン部は23時00分から翌朝6時00分までとなった。制限区域内への入場から削孔機械の設置までに約1時間半程度を要した。また、施工終了後、機材を搬出、後片付け、清掃後、全員で最終点検した後、制限区域を退場するのに1時間半を要した。飛行場においては飛行機の安全運行が最優先されるため、作業箇所に小石ひとつ残すことも許されない。空港運営にはAM6時00分の退場時間は厳守する必要があるため、削孔作業はAM4時30分で終了とした。実質的な作業時間は滑走路部の削孔作業で4時間半、注入作業では5時間となり、空港の地盤改良工事では時間的な制約が最も大きな課題となった。

土質は、共同溝部は薄い粘土層を含む軟弱な砂質埋め戻し層が対象となり、排水溝部は均質な在来の砂質土が対象となった。ただし、福岡空港の砂は、全般に均等係数  $(U_c)$  が 10 以上と大きいため、薬液が充填されると液状化強度  $(R_\ell)$  は改善されるが、一軸圧縮強度  $(q_u)$  は発現しにくいことが 2009 年度の試験施工で確認されていた。このため、事後調査は、シリカ分含有量の増加と三軸 UU 試験が用いられることとなった。

#### 3. 削孔システムについて

## (1) 従来の曲がり削工式注入システムと課題点

従来の曲がり削孔工式浸透固化処理工法の施工システムを図—4に示す<sup>3)</sup>。本システムは、先端に斜めの傾斜がついた削孔ビットを用い、回転と押し出しを組



図―4 従来の曲がり削孔システム

み合わせることで、自在の削孔曲線を施工するものである。先端ビットから 1.5 m 離れた位置からポリエチレン製の直径 15 cm の削孔外管(以下 PE 管と称す)を有しており、削孔元から泥水が管内を伝わって送水され、先端で掘削された土砂はこの泥水によって PE 管の外を通って削孔元まで回収される。

削孔の先端部分には、削孔の方向を示す曲がりセンサーと位置検知用のジャイロを装備しており、3m 掘進するごとに掘進を止めてセンサー類を静置させ位置検知を実施し、手元装置のモニターに位置情報と計画線とのずれを表示する。予定の削孔ラインが完成すると、先端ビットと PE 管を土中に残して内部の削孔装置が回収される。次の工程では、布パッカーがついた注入外管が PE 管の中に挿入され、予定の注入位置にセットされたのち、PE 管が引抜・回収される。

この削孔システムを用いて施工を行う場合,80 m ~ 100 m の削孔延長が最長規模であり,1 本の削孔を終了するまでに12時間程度を要する。空港内の施工環境で作業する場合,5.5 時間という1日の施工時間の制約があるため,複数日で1本の削孔を完了させる必要がある。

本システムを用いて、削孔している間、PE管と地山の間には、掘削した土砂を排泥するためにベントナイト泥水が循環され、削孔された穴とPE管が縁切りされた状態になっている。削孔を一旦中止した場合、このベントナイト泥水が止まるため、地山の土砂がPE管の周りに集積し、PE管が土中に固定される。再稼働時に削孔管と地山との付着を切るためには大きな力でPE管に衝撃を与える必要があり、PE管ではこの衝撃に耐えることはできないため、複数日にわたる削孔はできず滑走路での適用はできなかった。

## (2) 福岡空港における新しい施工システム

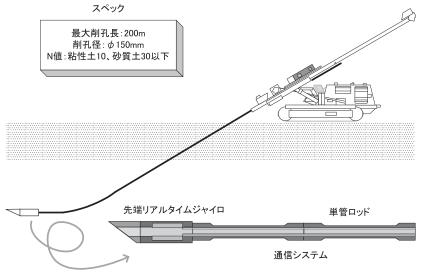
空港での複数日にわたる削孔と遠距離削孔を前提とした新しい削孔システムを開発した。システムの概要を図—5に、福岡空港滑走路での施工状況を写真—1に示す。削孔管は従来のポリエチレン製から中空の鋼製のロッドに切り替えられ、より大きな力で削孔管の前後に衝撃を与え、土砂が付着した状態から削孔管を縁切りができるようになっている。

新システムは、先端ジャイロと後挿入の2つのジャイロを使用し、リアルタイムに位置情報を操作員に伝え、正確な削孔を可能としている。先端のジャイロは中空の削孔ロッドを経由して現在の先端位置情報をリアルタイムで地上まで伝達する。10 m 程度掘削するごとに削孔を休止し、精度のよい挿入式ジャイロを挿入し、より正しい位置情報を求め、先端ジャイロの位置情報を補正している。

予定の位置まで削孔が完了した場合, 注入外管が挿 入され, 挿入完了後, 注入位置に薬液が注入される。



写真-1 滑走路(排水溝部)の施工状況



図─5 新しい曲がり削孔システム概要

## 4. 工程管理

本工事は、平成25年10月に着工し、試験工事により安全な注入速度とその注入速度で構造物に隆起等を与えないことを確認したのちに、共同溝側から施工を行い、全工程で改良土量5,631 m³を6カ月で施工を完了した。

#### (1) 試験施工

試験施工は、本工事における薬液濃度や注入速度などの注入仕様を決めるために図—1に示す位置で実施した。施工平面図と断面図を図—6および7に示す。試験施工では、4箇所で表—2に示す注入仕様を

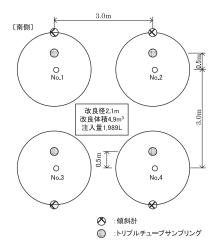
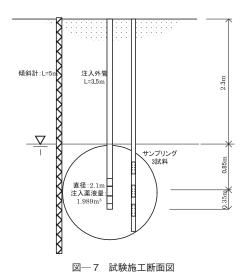


図-6 試験施工平面図



表一2 試験施工実験ケース

ケース	注入速度 (L/min)	舗装厚さ (cm)	注入時間 (min)	注入量 (L)	
No.1	10	10	199	1,989	
No.2	12	10	166		
No.3	14	15	142		
No.4	16	15	124		

変えて注入を実施し、地中水平変位量や舗装面の隆起 量等の測定を行い、既設構造物に影響を与えない最適 な注入仕様を決定した。

試験施工により、決まった注入仕様を表―3に示す。また、共同溝の水平変位の許容量5mmから逆算して、舗装面の許容変位量の最大値を15mmに設定し、注入速度を下げる一次管理基準値を10mmに、注入を止める二次管理基準値を15mmに設定した。実施工では、舗装変位に伴う空港施設への影響をより小さくするために、薬液標準注入速度を12L/分から10L/分に低下させ、舗装面変位が10mm以上になった場合は作業を中断して、変位が低下してから注入作業を再開という管理基準を設定し管理を行った。

#### (2) 本施工における工程管理

削孔に関しては、エプロン部と滑走路部を合わせて 直斜用のドリリングマシンと曲がり削孔機をそれぞれ 2 台投入した。曲がり削孔に関しては、約80 m~ 90 mの1本の削孔を終えるのに数日間を要した。削 孔が完了しない場合、施工終了後に削孔機と削孔管を 切り離し、削孔管を残置した状態で削孔機のみ場外ま で搬出した。

注入に当たってはエプロン部と滑走路部で離れているため 18 台の注入ポンプを車上に設置した注入ポンプ車 2 台を使用し、最大で日 36 箇所の注入を計画した。土被りが少ない現場条件のため地表変位を観測しながらの施工で日 32 箇所が最大注入実績となった。

### 5. 品質管理

エプロン (共同溝部:延長 200 m. 改良土量 2.439 m³)

表一3 注入仕様

改良径 (m)	等価な立方体 (m)	改良体積 (m³)	注入率 (%)	薬液量 (kL)	注入速度 (L/min)	注入時間 (時間)	場所
2.1	1.7	4.9	40.5	1,990		2.8	エプロン(共同溝)
2.3	1.85	6.3	40.5	2,564	12	3.6	エプロン(共同溝)
2.42	1.95	7.4	27.0	2,002		2.8	滑走路 (排水溝)

では3箇所、滑走路(排水溝部:延長109m、改良土量3,192m³)では2箇所の不撹乱試料の採取を実施し、薬液の改良土の品質確認を実施した。今回の施工範囲の土質は、エプロン(共同溝部)は埋戻しの砂質土、滑走路(排水溝部)は地山の砂地盤であり、ともに均等係数( $U_c$ )が5から20と大きい砂であった。2009年度に福岡空港で実施された試験工事において、この様な砂に溶液型の薬液による改良を適用した場合、液状化強度 ( $R_\ell$ ) は増加するが、一軸圧縮強度 ( $Q_u$ ) が発現しにくいことが確認されていた。今回事前に実施した試験施工においても、事後調査サンプリングで同様の傾向が求められたため、本工事の品質確認は採取された不撹乱資料に対して、薬液の充填性と力学試験、シリカ分含有量などの化学試験が実施され、改良地盤の品質が確認された。

事後調査では、礫混じりのエプロン(共同溝部)で 不攪乱試料が採取できず、力学試験ができなかった が、薬液の充填確認とシリカ分含有量から十分な品質 になっていることが確認された。滑走路(排水溝部) では、採取できたすべての試料ですべての項目で必要 な仕様を満足しており、十分な品質であることが確認 された。

## 6. 空港滑走路における技術的な課題

空港滑走路の液状化対策が港湾構造物などの対策と異なることは、①施工時間が夜間に限られること、②重要構造物であるため、レベルII地震動に対しても液状化しない目標液状化強度の設定が求められること、の2点である。施工時間に関しては、作業前後の準備工を除くと4~5時間となる場合が多く、この作業時間内で1球の注入が終わるようにするため、改良体の直径が制限を受ける。コストを下げるためには、安全にできるだけ早い速度で注入を行うことで、改良径を大きくすることが有効である。目標液状化強度に関しては、レベルII地震動が大きくなる傾向にあるため、それで液状化しない改良体の目標強度も大きくなり、コストが上がる傾向にある。

また、滑走路の直下地盤に関しても、滑走路に削孔ができないため、事後調査で試料を採取できないことも課題である。削孔を行わずに、改良状況を把握できる技術の開発が求められる。

#### 7. おわりに

空港における液状化対策工事の最大のリスクは、滑走路や誘導路の変状により空港を停止させることである。もちろん誘導路も同様な危険性をはらんでいる。特に福岡空港は地下水位が高く土被りの少ない注入となるため、リスクが高い。曲がり削孔式浸透固化処理工法は滑走路面に穴を開けないことから、路面変状のリスクが比較的低く、安全な施工法である。また、今回使用した2つのジャイロで位置を確認するシステムは、リアルタイムに削孔ラインを正確に確認できることから空港のような重要構造物では必要不可欠な技術である。

東京国際空港に続き、福岡空港の滑走路で曲がり削 孔式浸透固化処理工法が適用され、今後は松山空港滑 走路でも適用される予定である。今後は滑走路の液状 化対策に標準的に使用されるものと期待している。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 山本敦: 仙台塩釜港における岸壁背後の液状化対策一浸透固化処理工法一, 土木施工, 2012, 5月号
- 2) 善功企, 野上豊治, 松下信夫, 菅野秀樹, 菅野雄一:溶液型薬液注入 工法の液状化対策の試験工事, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.2431-2432, 2000.6
- 3) 植田勝記, 高木泰士: 既設構造物直下の液状化対策「曲がり削孔工法」の開発, 土と基礎 56-3, pp.14-17, 2008



[筆者紹介] 林 健太郎 (はやし けんたろう) 五洋建設㈱ 技術研究所 副所長



鈴木 定義(すずき さだよし) 五洋建設㈱ 札幌支店 土木部 所長



曽和 洋平 (そわ ようへい) 五洋建設㈱ 札幌支店 土木部 工事主任