

滑走路下の曲がり浸透固化処理工法の施工

片野 直樹

関東地方整備局 東京空港整備事務所 第二建設管理官室 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-10)

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が離着陸時に破損することによる事故、または、それに伴う空港運用停止が想定される。さらに施工時間帯は、滑走路閉鎖中の限られた時間帯の施工となり時間的制約を受けることから、滑走路上から施工をしない施工方法が求められていた。

今回、東京国際空港において、曲がり浸透固化処理工法を採用し、緑地帯位置から滑走路直下の改良を行った。直轄事業としては、滑走路供用時間帯に滑走路直下の改良を行う前例のない工事であるため、高精度の施工管理、安全管理が求められた。

キーワード 東京国際空港、地盤改良、曲がり削孔、浸透固化処理工法、液状化対策

1. 背景 工法を採用した経緯

東京国際空港は、首都圏にて大震災による被害が発生した際に広域医療搬送拠点、緊急輸送物資等輸送活動拠点としての役割に位置付けられているため、航空機の通行経路を確保すべく「基本施設耐震整備計画」に基づいて地盤改良の整備を進めている。

東京国際空港に4本ある滑走路のうち、C滑走路の耐震性は優先順位が最も高く位置づけられているため、早急に対策を行う必要がある。

また、24時間国際拠点空港化に向けた輸送能力強化を図るため、2014年12月11日からはC滑走路を閉鎖しての作業時間が週5日23:30～6:00から週3日2:00～6:00へと大幅に短縮され、作業時間が極めて短く滑走路上からの施工が困難であることから、航空機の運用を止めずに作業が可能な緑地帯からの曲がり削孔機を用いた地盤改良を採用した。



図-1 施工位置図

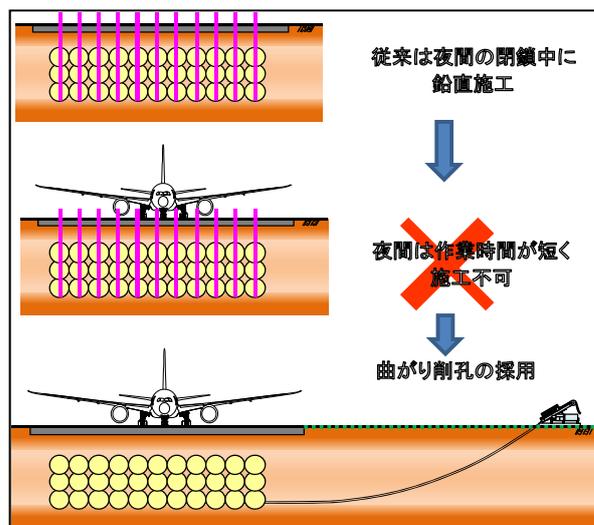


図-2 曲がり削孔採用イメージ

2. 曲がり浸透固化処理工法とは

本工法は、長距離型曲がり削孔機により、削孔ロッドに搭載した固定式位置検出装置と挿入式位置検出装置を併用し、削孔位置をリアルタイムに計測しながら高精度で地盤内の削孔を行った後、薬液を低圧力で浸透注入し地盤内の間隙水と薬液を置換しゲル化することで、液状化対策を行うものである。

削孔ロッドの先端（ビット）は斜めにカットしたテーパ構造であり、この面に土圧を受けることで土圧面と反対方向の推進力を得ることができる。直線削孔時はビットを回転させ推進させるが、曲線削孔時はビットの土圧面を回転させずに押し込むことで、削孔方向の制御を行う（図-3）。

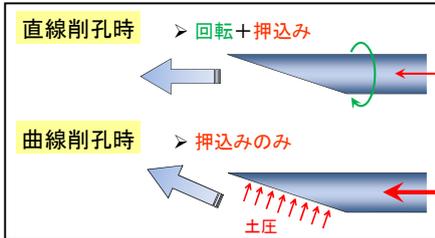


図-3 削孔メカニズム

3. 工事概要

航空機が運用している中で施工する場合、航空機の運用に支障を与えないよう、立ち入りが可能な範囲や施工高さに制約がある。本工事では滑走路センターから75m以遠の位置より、施工高さを7.1m以下に設定する必要があるが、空港運用への安全を最優先とするため、滑走路センターから80m以遠の位置より施工高さを6.1m以下と管理値を設けて施工した。

本工事の施工数量を以下に示す。

工事工期：2014年7月7日～2015年3月31日

曲がり削孔：最大削孔延長140m，最大削孔深度GL-20m，
削孔本数276本，削孔速度8分/m

薬液注入：10,429球，12,446,000L（12,446m³）

4. 施工管理・安全管理

地盤内に薬液注入を行う場合、対象地盤内を正確に削孔すること、また、注入圧力・速度を遵守し注入することが重要であり、削孔軌跡のズレや過度な注入圧力・速度を与えた場合、薬液が地下水を押し出し割裂・水みちが発生して地下水が上昇し、舗装面の隆起の原因となる場合がある（図-4）。滑走路舗装面が隆起した場合は滑走路緊急閉鎖に繋がる恐れがあり、社会的・経済的損失が大きいことから、正確かつ確実な削孔・注入が求められる。

本工事では滑走路供用中に滑走路直下の改良を行うことから、空港運用に確実に支障を与えないよう、曲がり削孔精度管理及び薬液注入時の舗装面隆起管理方法が課題であった。

(1) 長距離曲がり削孔の精度

曲がり削孔工法は、従来の鉛直削孔工法等と比較し削孔距離が長距離となる。削孔精度は削孔距離に比例し出来形管理が困難となることから、精度確保の工夫が求められる。

(2) 薬液注入時の施工管理

薬液注入は、通常、舗装面の隆起観測を行いながら注入圧力・速度を遵守して注入を行う。今回、滑走路供用中に薬液注入を行うことから、薬液注入時に滑走路舗装面の隆起観測を行えないため、舗装面隆起管理方法が課題であった。

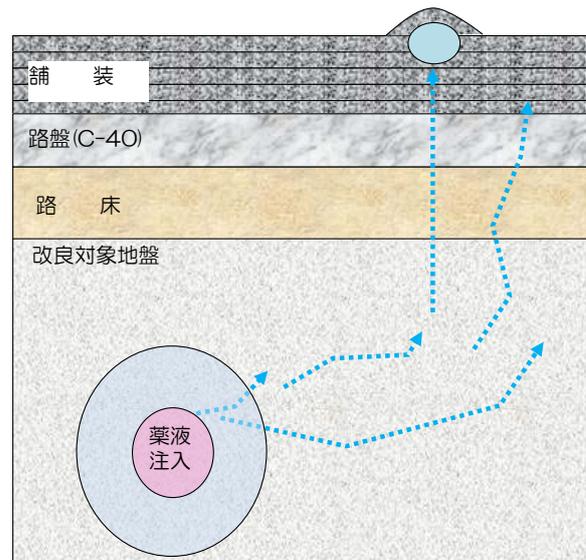
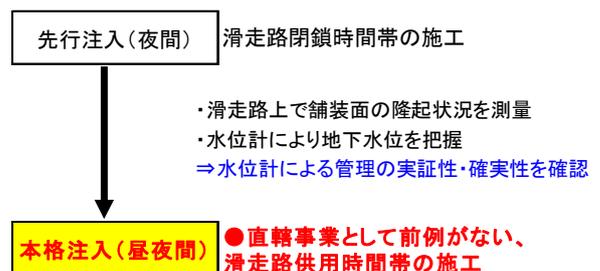


図-4 割裂注入イメージ

課題を解決するために、滑走路供用中の舗装面隆起管理方法として、滑走路直下に水位計を設置し、隆起の原因である地下水の動向を常時把握することとした。

また、表-1注入ステップのとおり、まずは滑走路閉鎖時間帯のみ先行的に薬液注入を行い、水位計による管理の確実性、安全性及び舗装隆起の状況が確認できた後、滑走路供用中も含めた昼夜間の注入に移行することとした。

表-1 注入ステップ



5. 施工方法

(1) 削孔精度の向上方法

曲がり削孔機の削孔ロッドに固定式位置検出装置を搭載し、計画座標に対して現削孔位置をモニターにリアルタイムに表示する。オペレーターはモニターを注視しながら土層中の削孔位置を把握することができ、削孔位置の時点修正が可能となる。

また、削孔距離18m毎に固定式位置検出装置と比較し高精度の挿入式位置検出装置を挿入し削孔位置の把握を行うことで、より高精度の削孔を行うことができる。

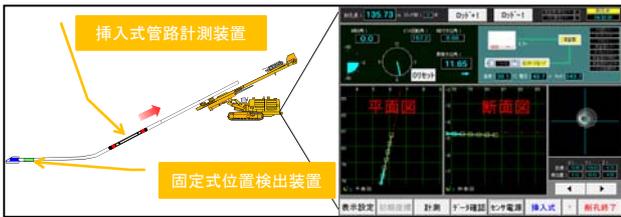


図-5 曲がり削孔機イメージ

(2) 薬液注入時の水位・舗装面隆起管理方法

水位計を滑走路直下（改良位置上部）に合計6箇所設置し、常時、地下水位の動向を把握することとする。水位計設置断面図を図-6に示す。

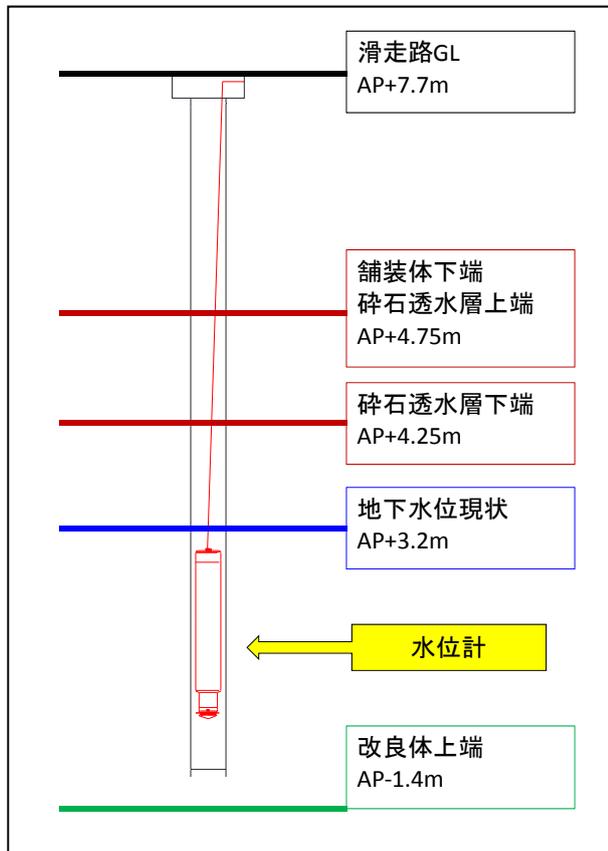


図-6 水位計設置断面図

危機管理体制として、常時、地下水位の動向を把握し、薬液注入時に地下水位が上昇した場合は、上昇値に応じて薬液注入を即座に中断する体制とした。具体的には、上昇した地下水は滑走路舗装体の下端の碎石透水層を通じ、緑地帯に設置したウェルポイントにより排水する計画としているが、地下水が碎石透水層の中段まで上昇した場合は薬液注入速度を80%に低減し、地下水が碎石透水層の上端まで上昇した際は、薬液注入を即座に中断することとした（図-7、表-3）。

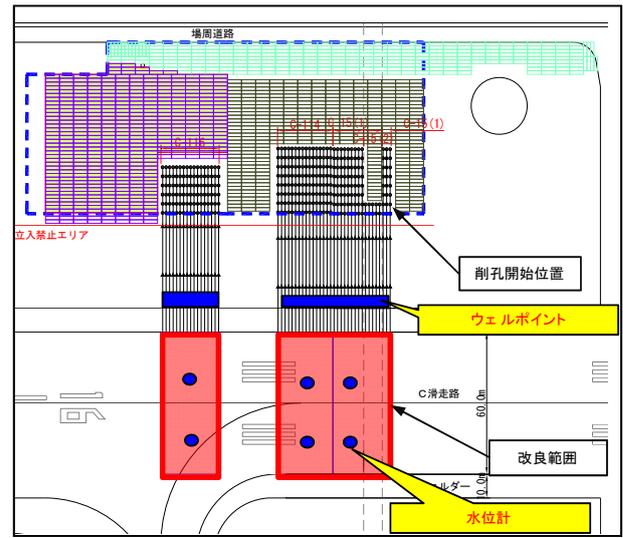


図-7 水位計及びウェルポイント設置位置平面図

表-3 水位管理毎の薬液注入対応表

管理水位	対応方法
二次管理値 (AP+4.75m) 以上	直ちに注入を中断
一次管理値 (AP+4.50m) 以上	注入速度を80%に低減
一次管理値以下	通常管理

また、注入順序として、舗装面隆起を最小限にするために局所的な注入ではなく離隔を設けた注入、さらに、ウェルポイントの排水機能を有効にするために、誘導路側からショルダー側に向けて注入することとした（図-8）。

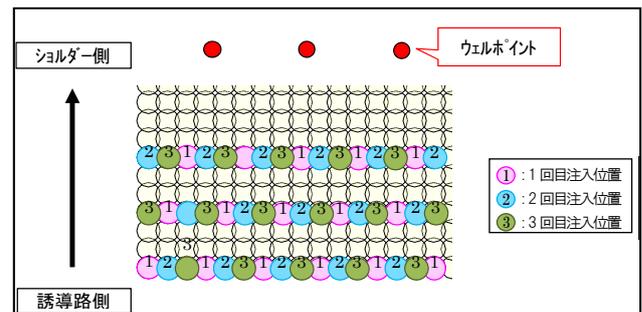


図-8 注入順序

6. 施工結果

(1) 削孔精度

削孔の位置管理は、注入中心位置からのズレとし、出来形許容値は465mm以下となる（表-4、図-9）。

表-4 削孔中心位置変位量計算式

$$\text{変位量} = \sqrt{(\text{平面変位量}A^2 + \text{断面変位量}B^2)}$$

上限値: $=D/4$ (D=改良径1860mm) = 465mm

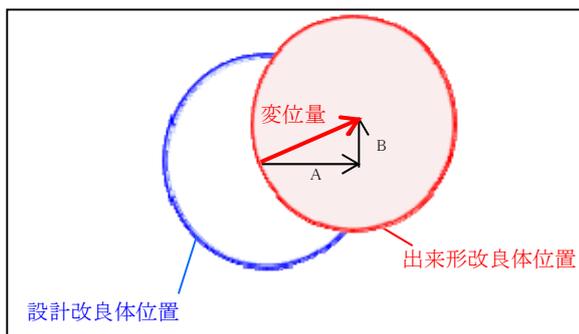
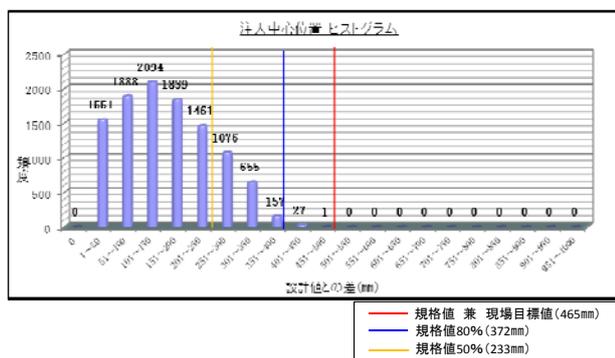


図-9 削孔中心位置変位量説明図

削孔時は固定式位置検出装置と挿入式位置検出装置の併用を行い、全ての注入中心位置に対して削孔中心位置を出来形許容値以内とすることが出来た。出来形実測値は表-5に示すとおり、許容値の概ね50%以内で施工できており、固定式位置検出装置及び挿入式位置検出装置による削孔位置の管理は有用であったといえる。

表-5 削孔中心位置出来形実測



(2) 水位・舗装面隆起観測

a) 先行注入時の水位観測結果

工事期間中の水位観測結果（代表値）を表-6に示す。先行注入は2014年11月5日～2014年12月4日の間に実施した。水位の傾向としては、降雨の際に一時的に水位上昇

が見受けられたが、全体的には水位に大きな変動はなく、一次管理値を大きく下回る結果であり、ウェルポイントによる排水機会は一度も無かった。また、水位計は常時正常に作動していたことを確認した。

表-6 水位観測結果

水位計	A.P+m						
	日付	11月5日	12月4日	1月20日	2月3日	2月11日	2月22日
No.114-1		3.09	3.15	2.94		3.03	
No.114-2		2.86	3.02	3.16		2.91	
No.15-1		3.21	3.17	3.19		3.19	
No.15-2		3.22	3.21	6.58		3.74	
No.116-1					3.13		3.08
No.116-2					3.04		3.15
一次管理値		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
二次管理値		4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75
記事	先行注入開始	先行注入完了	No.15-2	116ブロック	114・157ブロック	116ブロック	116ブロック
		本格注入開始	水位急上昇	注入開始	注入完了	注入完了	注入完了

滑走路閉鎖時間帯に実施した舗装面の隆起観測結果は最大4.6mm程度であり、勾配も施工前とほぼ変わらなかったことから、薬液注入による舗装面への影響は殆ど無かったと言える（表-7）。

表-7 先行注入時 隆起観測結果

項目	規格値	施工前	実測値(最大)
隆起量	GL+30mm以内	GL±0mm	GL+4.6mm
縦断勾配	1.0%以内	0.26%	0.27%
横断勾配	1.5%以内	1.12%	1.13%

以上のとおり、先行注入の結果として水位・舗装面隆起ともに施工管理、安全管理上において空港運用に支障が無いことを確認し、昼夜間の本格注入に移行した。

b) 本格注入時の水位観測結果

2014年12月4日より本格注入に移行した。本格注入の全期間において、基本的には一次管理値を上回ることはなくウェルポイントを稼働する事態も発生しなかった。しかしながら、2015年1月20日の注入作業中に水位が二次管理値を大きく超過する値を観測し、薬液注入を緊急中断したため、その原因及び対応について報告する。

地下水位の急上昇前までは、削孔中心位置及び注入速度は施工管理基準を満足しており、地下水位上昇時は上昇値に応じて薬液注入を中断したため、施工上の原因は見当たらなかった。原因としては、水位計設置直下を注入している際、水位計観測孔から薬液あるいは薬液に押し出された地下水が流入し、水位の上昇を観測したと思われる（図-10、表-8）。

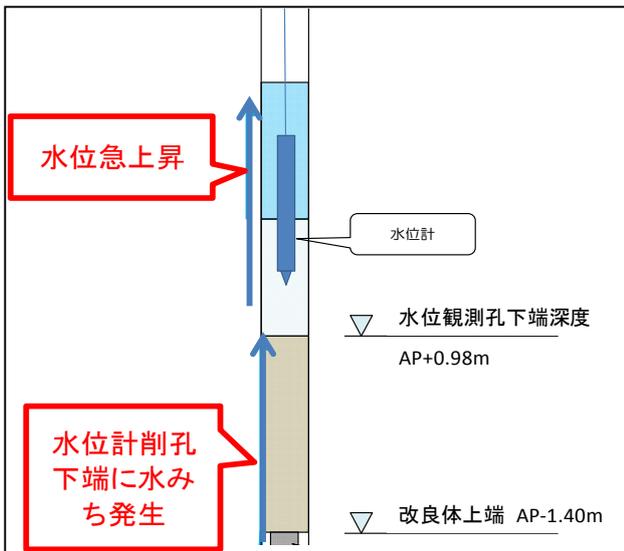


図-10 水位急上昇概念図

表-8 薬液注入中断時系列

注入時刻	水位観測値 AP+m	注入速度 L/min
2:10	3.63	10
2:20	3.63	10
2:30	3.66	10
2:40	3.96	10
2:50	4.21	10
3:00	4.63	8
3:10	4.92	0
3:20	6.00	0
3:30	6.23	0
3:40	6.58	0
3:50	6.47	0

A.P+4.75mを超過
注入中断

注入中断した後、滑走路舗装面を点検した結果、隆起や薬液噴出等の異常は確認できなかった。

本結果は、水位計を設置し地下水位を常時観測していたため水位上昇の緊急事態を迅速に感知することができ、さらに緊急事態において、施工管理方針通り薬液注入を中断した成果と言える。

原因と想定される観測孔については、観測孔内の水みちが発生したと思われる部分にセメントベントナイトを充填し閉塞させ、同孔に水位計を再設置し、その後、水位が平常に下がったことを確認し注入を再開した。発生した水みちを完全に閉塞したため、注入再開後の同水位計において、地下水位の急上昇を観測することはなかった。

また、注入全期間を通じての隆起観測値は表-9のとおりとなり、許容値を十分に満足する結果となった。

表-9 注入全期間における隆起観測結果

項目	規格値	施工前	実測値(最大)
隆起量	GL+30mm以内	GL±0mm	GL+5.0mm
縦断勾配	1.0%以内	0.26%	0.27%
横断勾配	1.5%以内	1.12%	1.13%

7. おわりに

滑走路の供用に支障となるような事象に至らぬよう、重要構造物の直下の改良として、適切な施工管理・安全管理を行うことが出来た。

本工事により、長距離削孔時における固定式位置検出装置及び挿入式位置検出装置による精度管理、舗装面隆起管理として水位計設置による常時の地下水位の把握の有効性が確認できた。

特に水位計により地下水位を常時観測したことは非常に有効であり、常時の観測により、管理基準値を超える水位の上昇というイレギュラーな事象が発生しても即座に対応することができ、空港運用に影響を与えることもなかった。

今後の課題としては、改良対象層がさらに浅くなる場合など、土層に応じた地下水位の上昇に対する更に厳密な検討が挙げられる。

東京国際空港C滑走路の耐震整備は、滑走路閉鎖時間が大幅に短縮されたことにより今後は曲がり浸透固化処理工法による施工となるため、本工事の成果が基礎資料・参考資料として活用されるよう整理していく必要がある。