併用中の滑走路直下を大断面シールドで横断

清水建設株式会社	正会員			○神伊	ネ 誠二
	正会員			安夫	‡ 克豊
	正会員	鹿島	竜之介	谷田	友里恵

1. はじめに

東京国際空港では、首都圏の国際競争力の強化や日本 各地と世界の交流の活発化のために国際線の増便に向 けた取り組みが進められている.今後、国際線と国内線 の乗り継ぎの一層の増加が想定されることから、大型乗 り継ぎバスが走行可能な際内トンネルの整備により、旅 客の効率的なターミナル間の乗り継ぎ動線を確保し、移 動時間の短縮や利便性、定時性の向上を図っている.本 工事は、第1、第2ターミナル側の国内線アプローチ部 を開削トンネルで施工し、第3ターミナル側の国際線ア プローチ部までをシールドトンネルで接続する工事で ある.このうち、シールドトンネルで接続する工事で ある.埋立地内の不均質で超軟弱な地盤において、供用 中の空港施設(滑走路,誘導路、エプロンなど)や東京モノ



図-1 トンネル鳥瞰図(イメージ図)

レール,首都高速道路などの直下をシールドが通過するため,これらの重要構造物への影響を最小限に抑える ことが本工事の最重要課題の1つであった. 図-1にトンネルの鳥瞰図を示す.

2. 工事概要¹⁾

本工事の主要工種は、仕上がり内径 10.7m, 延長 1,853.6m のシールドトンネル、シールドの発進立坑およ びトンネルから第 1, 第 2 ターミナル側へ連絡するアプ ローチ部(函渠・U型擁壁)からなる.表-1 に工事概要を, 図-2,3 にそれぞれトンネルの平面図、縦断図を示す.な お、第 3 ターミナル側へ連絡する到達側アプローチ部は、 他 JV が施工を行い、その端部にシールドを到達させる 計画である.

施工区域は、多摩川河口左岸に位置しており、周辺地 形は低平な埋立地からなっている.地質構成は図-3に示 すように、沖積粘性土層(Ac2層)を主体に砂層との互層と なっている.当該地盤は、上部砂層(As1層)が浚渫床掘さ れ、その上に東京湾の航路などを浚渫したヘドロ(Ac1層) や建設発生土(Bs層)によって埋め立てられた超軟弱地盤

表-1 工事概要

工事名	東京国際空港際内トンネル他築造等工事					
工事場所	東京都大田区羽田空港内					
工 期 平成 28 年 6 月 7 日 ~ 令和 2 年 8 月 31 日						
発 注 者	国土交通省関東地方整備局					
施工者	清水·五洋特定建設工事共同企業体					
	泥水式シールド工法(φ11.93m, L=1853.6m),					
シールドエ	合成セグメント(外径 11.7m, 内径 10.7m, 直線部					
_	B=1.5m, 曲線部 B=1.2m)					
山が推筑て	プレキャストボックスカルバート据え付け工,					
内部傳業上	流動化処理土充填工					
発進立坑	地中連続壁工法,L=28.7m,W=16.7m,H=18.5m					
	函渠部 L=63.0m(W=13.3~13.7m, H=7.6~8.0m),					
アプローチ	U 型擁壁部 L=156.5m(W=10.5~12.9m, H=1.0~					
	12.9m)					
	流動化処理土置換工,					
地盆以艮	砂圧入式静的締固め工法					
その他	舗装工,排水工,標識工					

キーワード 泥水式シールド工法,近接施工,計測管理,トライアル施工,滑走路,埋立地盤 連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社 土木技術本部 TEL 03-3561-3892 であり,東京国際空港沖合展開事業において地盤改良時に使用されたドレーン材が路線上に存在している²⁾. また,As1層には溶存メタンが確認されているため,掘削土砂を流体輸送で地上まで排出できる泥水式シール ド工法を採用した.図-4に示すように,シールドには造成時に残置された鋼管杭などの支障物や,前述のド レーン材を切断・撤去可能な特殊装置を装備している³⁾.

図-2,3に示すように,路線上には空港施設の滑走路・誘導路・エプロンのほかに首都高速道路や国道,共同溝,東京モノレールなどの重要構造物が存在し,それらの直下を通過する.

3. 地盤特性を考慮した掘進管理計画¹⁾

(1) 割裂試験による泥水ブロー現象の防止

泥水式シールドによる施工では、泥水圧により粘性土 地盤が割裂し、泥水ブロー現象が発生することが懸念さ れるのことから、軟弱な Ac2 層を対象に割裂試験を実施 した.素掘り孔を造成し、泥水を充填した状態から割裂 試験を開始する.地上の圧力水槽に空気圧を作用させる ことで孔内泥水圧を 0.01MPa ずつ増加させ、流量計によ り割裂発生の有無を判定する.深度の異なる 3 本の試験 孔において割裂試験を実施したところ、K-1 孔(GL-25m)、 K-2 孔(GL-27m)、K-3 孔(GL-30m)では、それぞれ 0.45、 0.45,0.53MPa で割裂した.ここで、小土被り部における 泥水による割裂圧 P_f は次式で表せる⁷.

 $P_f = \sigma_3 + q_u = K_0 \cdot \gamma \cdot H + 2c \quad (1)$

ここに、 σ_3 :水平土圧(kN/m^2)、 q_u :一軸圧縮強さ(kN/m^2)、 K_0 :静止土圧係数、 γ :単位体積重量(kN/m^3)、 H:土被り(m)、c:粘着力(kN/m^2)

図-5は、試験結果と上式の算定結果をプロットしたものである.結果がよく一致しているため、上式を用いて切羽水圧および裏込め注入圧の上限値を設定した.











図-4 泥水式シールド

(2) トライアル施工による掘進管理値の設定

当該地盤における地盤変状結果を分析し、最適な施 工方法を確立することを目的として、発進基地内でト ライアル計測を実施した.トライアル計測区間は 60m とし、10m 毎に切羽水圧、裏込め注入率を変化させ、 切羽水圧などの掘進方法の妥当性を検証した.図-6,7 にトライアル計測の概要図を、図-8 に計測点④-2 の計 測結果を記す.切羽水圧は主働土圧+水圧、裏込め注 入量は 120%以上が適正値であると考えられた³⁾.

4. シールド掘進に伴う空港施設への影響評価方法¹⁾ (1) 計測管理方法

シールドトンネルと空港施設との近接状況を表-2 に示す.シールド掘進に伴う空港施設への影響に関す る計測管理方法は,空港管理者との協議により,空港 施設の変状量(沈下・隆起量)についての管理値を設定 し,これらの管理値を逸脱した場合に備え,表-3に示 す対応方法を準備した.なお,変状量の計測方法は, 夜間に空港施設が閉鎖された時間帯に水準測量を行う ものとし,表-4,図-9に示すように,シールド先端か ら空港施設までの距離が100mの時点で計測を開始し, シールドが通過して100m 程度離れた時点から約1か 月後まで計測を継続する.また,主要な計測範囲(a 部 ~c 部)の位置を図-2 中に,それらの詳細を図-10~12 に示す.これらの計測点は縦断勾配および横断勾配の

表−2	シール	・ドト	・ンネル	と空港施設の)近接状況
-----	-----	-----	------	--------	-------

空港施設	G-TWY	H-TWY	エプロン	W-TWY	H-TWY	A-TWY	A-RWY	L-TWY	P-TWY
最小離隔(m)	24.1	29.4	23.1	21.8	20.6	20.2	18.3	16.1	13.8



計測管理	計測管理値 根拠		逸脱した場合の対応		
一次管理値	12mm	FEM解析	①基本施設,構造物の点検・勾配確認 ②施工状況の点検および変状原因の究明		
二次管理値	40mm	許容値の2分の1	 ①切羽水圧,裏込め注入圧・量の調整 ②基本施設,構造物の点検・勾配確認 ③計測体制の強化(空港管理者に連絡・協議) ④損傷がある場合は修復 		
許容値	80mm	最大縦断勾配0.8%	①基本施設,構造物の点検・勾配確認 ②対策を協議 ③損傷がある場合は修復		
緊急時	-	緊急を要する場合	①舗装業者や灯火業者による緊急補修 ②緊急時は30分程度で参集可能なように事前手配 ③緊急資機材の事前準備		

表-4 計測範囲と頻度

計測範囲	頻度
シールド先端100m前方~シールド100m後方	1回/閉鎖日毎(夜間)
シールド先端100m後方からさらに後方	1か月後まで1回/週(夜間)













図-9 計測範囲

変化を把握できるように,影響範囲を考慮してトンネル左右各 40mの範囲について,空港施設のセンターラインに対し平行・ 直角に約10m ピッチに配置した.

(2) 地上設置型合成開口レーダによる計測

人為測量による計測は、メンテナンスのために空港施設を閉 鎖する深夜帯に限られてしまう.このため、24時間連続して計 測する方法として、地上設置型合成開ロレーダ(以下、GB-SAR と記す)による計測を採用した.写真-1、図-2にGB-SAR 装置の 設置状況を示す.GB-SAR による計測は、17GHz 帯の電磁波を 観測対象物に照射して面的な変位分布を計測する手法である. また、GB-SAR は、反射プリズムなどの設置が不要であるため、 立ち入りが困難な場所であっても計測できるという利点がある ⁴⁾.電磁波の入射角を 90 度に近づけ、電磁波の反射強度を大き くさせると計測精度が向上するが、空港周辺には高い建物が少 ないため、計測装置の設置場所は限られる.

本計測では、A 滑走路におけるレーダ入射角が約3度(水平距 離700m,設置高さ40m)となり、計測精度の確保が課題であっ た.このため、試験計測を実施して精度を確認したところ、場所 や天候などによって計測精度にばらつきが大きいことが判明し たため⁵,計測結果を前述の空港施設の計測管理には適用せず、 空港内に立ち入れない時間帯の空港施設の変状傾向を把握する ために利用した.

(3) A 滑走路の監視体制

A 滑走路直下におけるシールドの掘削対象地盤は軟弱な沖積粘 性土層(Ac2層)であり(図-3),土被りは約24mである.計測監視 方法は,①高感度望遠カメラによる路面の監視(図-14,写真



写真-1 GB-SAR 計測装置設置状況





図-12 計測点(A 滑走路, c 部)

-2), ②ノンプリズムトータルステーションによる 動態観測(図-14), ③中央制御室における掘進データ 監視の3つの方法を採用した.図-13に用いた計測 監視フローを示す.

5. 併用中の空港施設の計測管理事例

(1) A 滑走路

A 滑走路の影響範囲内では,24 時間体制でシール ド掘進を実施した. 写真-3 に示す路面の動態観測 (ノンプリズムトータルステーションによる水準測 量)では,夜間においても比較的観測が容易で計測 精度の確保できる点(滑走路灯など)を選定して実施 した. 図-15 に示すとおり,シールドの通過に伴い 沈下が発生したものの,最大沈下量は 11 mmと一次 管理値の 12 mm(二次元弾性 FEM 解析による推定値) を下回った.また,写真-4~6 に示すように高感度 望遠カメラによる路面の監視や中央制御室におけ る掘進データの監視を実施したところ,路面の変状 や掘進データの異常などは確認されなかった.

なお, A 滑走路影響範囲の施工中には, 写真-7 に



写真-3 動態観測状況



図-15 A 滑走路動態観測結果



写真-2 高感度望遠カメラ

示すように国際線アプローチ側のヤード内に緊急資 機材を確保し,応急補修班を待機させて,応急補修 要請があれば速やかに出動できる体制を整えた.

(2) 誘導路・エプロン

写真-8 にエプロンの水準測量状況を示す.また, G 誘導路(図-10 中の GT005), エプロン(図-2 中の No.51), H 誘導路(図-11 中の Ht003)における水準測 量結果をそれぞれ図-16~18 に示す.

経時変化グラフより、各計測対象でばらつきはあ











写真-8 水準測量状況(エプロン・夜間)



写真-4 高感度望遠カメラ画像(昼間)



写真-5 高感度望遠カメラ画像(夜間)



写真-6 中央制御室における掘進状況監視



写真-7 応急補修班待機状況

るもののシールド通過に伴う沈下は通過後 3~20 日程 度以内に収まり,沈下量は一次管理値以内(9~11 mm)と なっている.当該計測箇所以外でも同様の結果を示し ており,制限区域内において適切な掘進管理による施 工が実施できたと考えられる.

また,図-2における測点 No.64 での GB-SAR による計 測と水準測量の比較を図-19に示す.測点 No.64 では, GB-SAR によりシールド掘進に伴う地表面の沈下傾向 を捉えることができた.しかし,それ以外の測点では, 航空機や植生,周辺建物などの影響を受けて,人為測量 と同等のミリ単位の精度を求めることが困難な場合が 多かった.前述のとおり,電磁波の入射角が小さいこと が計測精度低下の主原因と考えられる.

6. まとめ

本工事では、供用中の滑走路・誘導路・エプロンの直 下にシールドを通過させる必要があるため、シールド 掘進に伴う地盤変状の抑制が求められた.そこで、適切 な掘進管理値を把握するためのトライアル施工や割裂 試験を実施した.また、空港施設の変状をリアルタイム に把握するために、GB-SAR およびノンプリズムトータ



図-18 H誘導路動態観測結果(Ht003)



図-19 GB-SAR と水準測量の結果比較(No. 64)

ルステーションによる路面変状計測や,高感度望遠カメラによる路面監視などの計測管理を実施した.その結果,航空機の運航に支障をきたすことなくシールド掘進を実施することができた.今後は,本施工で得られた 多くの知見をシールド施工に適用していく予定である.

7. 参考文献

- 1) 安井克豊他,供用中の滑走路直下を横断するシールド工事の計測管理-東京国際空港際内トンネル他築造等 工事-,トンネルと地下, Vol.52, No.5, pp.80-87, 2021.5.
- 2) 第一期土木関連工事完成を祝う会協賛会,東京国際空港沖合展開事業第一期工事建設記録, p.7, 1988.7.
- 3) 安井克豊他, 埋立地盤におけるシールド工事のリスク対策と支障物対応-東京国際空港際内トンネル-, トンネルと地下, Vol.51, No.7, pp.15-26, 2020.7.
- 4) 田村圭司他, 雲仙・普賢岳における溶岩ドームの変位計測について, 砂防学会誌, Vol.65, No.1, pp.69-72, 2012.5.
- 5) 安井克豊他, 合成開口レーダによる空港内におけるシールドの計測管理, 土木学会第75回年次学術講演 会, VI-547, 2020.9.
- 6) 栗原和夫・森麟・田村昌仁, 泥水式シールドのブロー現象に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 397 号, pp.95-104, 1987.
- 7) 森麟他,シールドトンネルの裏込め注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象,トンネルと地下, Vol.22, No.1, pp.41-46, 1991.1.