

地盤工学の最近10年の歩み

1. 関西国際空港プロジェクトと地盤工学

ふるど い てる あき
古土井 光 昭

関西国際空港用地造成課 代表取締役専務

1. はじめに

関西国際空港の歴史の中で、最近の10年を振り返ると、1999年に着工した二期工事（口絵写真—1）の最盛期にあたる。工事は順調に進捗し2007年8月2日に関西国際空港の2本目の滑走路が供用され完全24時間運用可能な国際拠点空港としての活動が開始された（写真—1，口絵写真—2）。20年前となると、1987年に着工した一期工事（口絵写真—3）の最盛期にあたり、さらに30年前になると関西国際空港プロジェクトの調査が本格的に実施されていた頃に相当する。実に30余年も前からプロジェクトの推進と地盤工学は不即不離の関係にあったわけである。

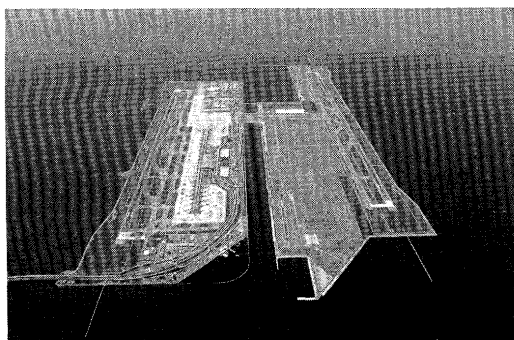
関西国際空港は大阪湾南東部泉州沖5kmの海上に500ha級の二つの人工島上にあり、騒音公害がなく、風や霧による影響を受けない空港として実績を積んでいるが、現地の水深は約18～20m、海底には軟弱な厚さ20～25mの沖積粘土が堆積し、埋立によって大きな沈下が発生する。我が国でもこれだけの水深で、これだけの規模の人工島の造成の例はなく、沖積層のみならずその下に堆積している洪積層も圧密沈下し、建設開始後60年間の沈下量は平均で12～18mと見込まれている。

このようにプロジェクト推進のための技術課題の多くは地盤工学的な問題であった。以下には関西国際空港プロジェクトが直面した地盤工学的課題とその対応について振り返ることとする。

2. 関西国際空港プロジェクトの技術課題

2.1 海底地盤の調査¹⁾

1977年～83年にかけて、65本のボーリング調査（最大深度400m）と土質試験が当時の運輸省によって実施



写真—1 関西国際空港の全景（2009年8月）

された。大深度の土質調査においては従来のボーリング・サンプリング技術では高品質の試料を採取することには限界があるとされ、当時の運輸省港湾技術研究所において、岩盤調査に用いられていたワイヤーライン方式を改良した港研ワイヤーライン工法が開発された。土質試験については、標準よりも荷重増分比を小さくした段階載荷による圧密試験によって、より正確な圧密降伏応力を求める多段階圧密試験や、定ひずみ速度載荷圧密試験等も導入し、海底地盤の力学特性の把握が進められてきた。

また関西国際空港の地盤調査において特筆されることは、地質学的調査が広範囲の地層構成を同定する技術として提案され確立されたことである。特に海棲のナンノプランクトンの深度方向の含有分布を基に層のつながりを同定し地盤モデルを構築するなど、その成果を地盤の沈下予測等の地盤工学的検討に有効に活用している。

2.2 海底地盤の沈下予測²⁾

沖積層の沈下はこれまでも十分な知見があったが、洪積層のそれについては、未経験の領域であった。したがって、一期工事着工前の事前予測（1983年）においては、砂層の排水性や圧密降伏応力の採り方などをパラメータにし、予測値に幅を持たざるを得なかった。1987年の着工後、先行調査工区（口絵写真—3）による観測値から、予想以上に洪積層の沈下が発生していることが分かった。1989年に予測の見直しを行ったが、それは砂層の全層を排水層と想定するなど、実測値が説明できるパラメータを探したようなものであって、その後判明する深部洪積層の沈下や、実際には砂層別に過剰間隙水圧の消散具合が異なる、といった現象はまだ捉えていなかった。

一期開港後の1994～1995年に二期地区の大深度ボーリングを行い、1996年に二期地区の沈下予測モデル（データベースモデル）を開発した。このモデルは4km四方程度のエリアでも、地域的に物性、力学特性が異なること、また同じ粘土層内でも深度方向に変化があることに着目して、ボーリングデータのゾーニング、細分層化を行ったもので、圧密モデルは線形の弾塑性モデルである。また砂層の過剰間隙水圧については2次元浸透流解析を用いて島外の広域にわたり水圧が拡散・消散している現象をモデルに組み込んだ。深部洪積層については、古典的な二次圧密理論ではあるが、一期地区で得られた実測とのフィッティングを行ってモデルに反映させた。

さらに圧密曲線のひずみ速度依存性を考慮した新力学モデル（弾粘塑性モデル）も二期工事の進捗とともに2002年頃に開発し、最新の知見によっても現地の沈下が説明できるか検証を行ってきた。

これらの二期の予測は工学的には、ほぼ満足できるものであるが、今後の地盤挙動の推移や学術的な観点からは引き続き有識者の先生方にご議論いただきたいと考えている。

2.3 海底地盤の地盤改良

全沈下量のうち6~7 mは、沖積粘土層の沈下量である。海底から20~25 m堆積している同層に対しては、早期に圧密沈下を収束させ、開港後に同層の沈下が残らないようにサンドドレーン工法による地盤改良を実施した。造成した砂杭は、一期で100万本、二期で120万本に上る。現場では直径400 mmのケーシングパイプを洪積第一砂層まで打設し海砂を投入し、ケーシングパイプの引き抜き時はケーシングパイプをバイプロで起震させ、砂切れを起こさないように注意した。これに対しては、「粘土を乱す」というような議論もあったが、その後の沈下データから改良効果が完全に機能しており、残留沈下も皆無である。

2.4 護岸・埋立工事の実施

一期および二期空港島ともに護岸延長の9割に、緩傾斜石積護岸構造を採用している。この断面は埋立に伴う地盤変形に追従でき、経済的な断面である。直立護岸等と比べれば施工のスピードでは劣るが、埋立に必要な土砂採取地の開発に2~3年を要すこともらんで、経済性が発揮できる緩傾斜石積護岸構造を採用していることはあまり知られていない。

護岸が概成すると埋立を本格化させた。埋立土砂の投入管理においては、「層厚を計る」と「薄層均一施工」を念頭においた。いくら予測理論が進んでも、やはり荷重を精確に把握することが沈下予測の重要な要素と考える。二期ではGPSとナローマルチ深浅測量との組み合わせにより層厚管理システムを構築した。このシステムによって土運船によって投入された土砂の堆積形状を計測し荷重履歴として蓄積した。また、面的で層状に立ち上げるために、システムで次の投入位置のシミュレーションを行って、1層(2.5 m厚さ)を全面的に仕上げてから次層の投入を行った。

2.5 地盤計測技術の開発

地盤挙動の計測については、沈下量の把握と先述の層厚管理のために、工事開始時から計測を行っている。一期は沈下板(鋼板に鋼管を溶接したもの)を海底に設置し、ダイバーが沈下板位置の水圧を計測することで沈下量を把握した。沈下板による計測の問題点は、荒天時には計測が出来ないこと、突出する鋼管周辺の施工が煩雑であることが挙げられる。これに対し二期では試作段階であった磁気伝送水圧式沈下計を本格的に導入し、沈下計測の効率化を図った。その他、大深度にわたり洪積層の層別沈下量や砂層および粘土層の間隙水圧の計測も実施し、現象の理解と予測モデルへの反映に役立ててきた。

2.6 埋立土砂の調達

埋立土砂は一期で1億8千万 m^3 、二期で2億5千万 m^3 と見積もられたが、これをどこから、どのように採取運搬していくかということは、工期と工費に重大な影響を与える施工上の大問題であった。土取場の選定、開発、運搬から埋立にいたる一連の検討にも多くの地盤工学上の知恵が活用された。この埋立土砂の調達が円滑に行われたことが二期事業の大幅なコスト削減と工法の短縮につながっている。

2.7 埋立地盤の地盤改良

埋立地の地盤改良については、あまり話題になっていないが、空港島の埋立地盤厚さは一期の空港島で平均35 m、二期で43 m程度である。埋立土は山を崩した岩砕土を使用している。一期ではターミナル等の建築物の基礎のあり方について、建築、土木の基礎の専門家に議論いただき、建築基礎は埋立地盤をサンドコンパクションなどで改良した上、直接基礎とし地盤の不同沈下にはジャッキアップシステムなどで対応することで意見が一致された。二期では、一期よりも造成天端高が高く、二次運搬する土量が多いため、作業効率やコスト面を考慮して大型振動ローラを用いた転圧締固め工法を採用した。施工に先立ち試験施工を行い、施工層厚(60 cm)、転圧回数(8回)、締固め含水比(5%)等の仕様を決めた。また現場では土運船毎に含水比管理を行った。試験で求めた締固めに最適な含水比に対し、乾燥側であれば、海水を利用して加水を行うなどの管理を行った。

3. おわりに

2005年に大阪で開催された第16回国際地盤工学会議のポストカンファレンスとして関西国際空港シンポジウムを開催させていただいた。2日間で延べ1000人を超える内外の研究者の参加を得て、それまでの関西国際空港プロジェクトに関する地盤工学上の成果について発表いただいた。関空が直面しなければならなかった地盤工学上の課題への対応にあたり多くの方々のご指導をいただいたことに、深く感謝を申し上げるとともに、今後とも地盤工学会の皆様のご指導・ご鞭撻をお願いして結びとする。

参 考 文 献

- 1) 中瀬明男：関西国際空港の沈下問題，土木学会論文集，No. 454/Ⅲ-20，pp. 1~9，1992.
- 2) 鈴木慎也・江村 剛・水上純一・小野正博：関西国際空港の建設と地盤工学的諸問題，第6章，地盤挙動の予測，地盤工学会誌，Vol. 56，No. 8，pp. 78~85，2008.

(原稿受理 2009.9.29)