

# 関西国際空港 2期護岸築造工事における 情報化施工への取り組み

The approach to the real time construction control system used by  
The Seawall Construction of 2nd Phase Kansai International Airport Island

池内章雄<sup>1</sup>・角谷清宣<sup>1</sup>・大本泰久<sup>2</sup>・川上雅彦<sup>2</sup>

Akio IKEUCHI, Kiyonori KAKUTANI, Yasuhisa OHMOTO and Masahiko KAWAKAMI

<sup>1</sup> 正会員 みらい建設工業株式会社 関西支店 技術部 (〒550-0004 大阪市西区鞆本町 1-11-7)

<sup>2</sup> みらい建設工業株式会社 関西支店 土木部 (〒550-0004 大阪市西区鞆本町 1-11-7)

This paper shows the realtime construction control system used for the Seawall Construction of 2nd Phase Kansai International Airport Island. In order to properly complete the construction which required rapid completion of such a large-scale construction, we have established the radical and high-quality construction control systems by applying the advanced measuring technology and the advanced geotechnical analysis- technology.

**Key Words :** Realtime construction control system ,Measurement technology ,Analysis-technology

## 1. はじめに

関西国際空港 2期空港島造成工事は 1999年7月に着工し、供用中の 1期空港島の沖合に約 540ha、埋立土量で 1期の約 1.4 倍を要する空港島を造成するものであり、さらなる大量・急速施工が必要となる。

本工事はサンドドレーン改良地盤上への大量・急速盛土工事であるため、1期工事と同様、施工中に生じる地盤の沈下・変形を適切に予測し実測との比較・修正をしながら、施工管理を行わなければならない。1期工事と比較して 2期工事の敷砂、サンドドレーン、土運船による直投など基本的な作業方法に大きな変化はないが、その施工管理方法は、パーソナルコンピューターの普及と高速化あるいは RTK-GPS (Real-Time Kinematics Global Positioning System) をはじめとする精密計測機器の発展により大きな変化を遂げている。

筆者らが担当した関西国際空港 2期空港島護岸築造工事(その 5)は、1期空港島に面した約 1500m の護岸直線部、南側連絡誘導路の屈曲した護岸、および幅 310m・長さ 200m の連絡誘導路埋立部から構成され、護岸背後に主要な 2期空港島施設が計画されるため、高精度な施工管理と正確な工事記録が求められる工区であった。

本論文は品質向上と合理性を追求して、情報技術を活用した新たな施工管理を実践した関西国際空港 2期護岸築造工事での取り組みについて述べたものである。

## 2. 情報化施工への取り組み

サンドドレーン改良地盤上への盛土工事などでは、事前の調査・試験によって地盤特性をすべて把握することは技術的にも経済的にも極めて困難であり、設計段階では避けられない地盤の不確実性を、施工段階において地盤の挙動を現場計測することによって明らかにし、すみやかに設計と施工に反映させる情報化施工を採用することが有効である。

筆者らは 1期護岸工事から圧密沈下計算に基づく層厚管理手法<sup>1)</sup>など情報化施工に積極的に取り組んできた。2期工事においては情報技術の発達を背景とした要素技術の開発・導入による情報化施工の高度化を図り、施工品質の向上、合理的な施工管理、工事情報の積極的活用を目指すことを基本方針とし、方針ごとに以下の具体的な目標をあげた。

(施工品質の向上)

- ・薄層均一の安定した盛土施工
- ・不同沈下を抑制するための正確な盛土層厚管理 (合理的な施工管理)

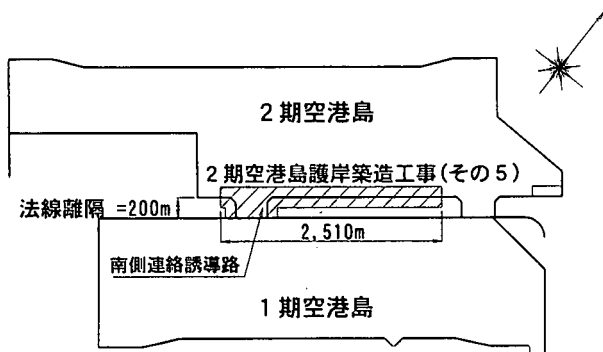


図-1 関西国際空港平面図

- ・効率的な盛土形状データの取得
- ・効果的な盛土直投計画の作成

**(工事情報の積極的活用)**

- ・多様な様式の工事情報の一元管理
- ・容易な検索・抽出・分析機能の確保

これらの目標を達成するために、解析技術、施工技術、計測技術、情報処理技術の分野ごとに次の8つの要素技術を開発し、2期護岸築造工事の施工管理に導入することとした。

**(1) 施工段階の多様な目的に応じた解析技術**

- ・一次元圧密変形解析
- ・三次元弾塑性圧密変形解析

**(2) 容易かつ確実な施工技術**

- ・圧密沈下計算に基づく層厚管理手法<sup>1)</sup>
- ・直投シミュレーションシステム

**(3) 高精度・高密度にデータを取得する計測技術**

- ・高精度深浅測量システム
- ・水際線計測システム

**(4) 施工情報を保全・活用する情報処理技術**

- ・GIS工事情報管理システム
- ・計測データ保全管理システム

**3. 要素技術の開発**

近年の情報関連技術の急速な進歩は土木技術分野にも大きな影響を与え、次々と新技術が開発されている。開発された新たな技術は連鎖的に他分野の技術開発を促し、相乗効果による大きな成果を上げている。GPS(全地球測位システム)は計測技術分野に改革をもたらし、それによって解析、施工、情報処理分野で多岐にわたる新技術が開発された。

ここでは、筆者らが関西国際空港造成工事において開発した技術について、その概要を述べる。

**(1) 解析技術**

情報化施工における解析技術は、地盤の不確実性によって生じるリスクを軽減し、合理的な施工管理を実施するために極めて重要な役割を果す。

筆者らは次項の施工技術で述べるように、1期護岸工事において盛土層厚管理手法に沈下解析技術を積極的に取り入れて、管理精度の向上と合理化に努めてきた。施工管理に用いる解析技術には、次のような機能が求められる。

- ・施工状況に対応した入力が可能にできる。
- ・解析に多くの労力・時間を必要としない。
- ・施工中の実測値との整合が容易である。
- ・施工管理上に求められる精度に適合している。

施工状況と目的に応じて解析技術を選択することにより、合理的な施工管理が実現できる(表-1)。

護岸工事においては、沖積層の沈下を対象とする施工中の盛土層厚管理には各種基準等に記載されている慣用法を用い、長期の沈下予測には深層部の洪積層まで考慮できる有限要素法による一次元圧密変形解析を用いる。また、水平方向の変形を考慮する必要が生じた場合には二次元圧密変形解析の適用が考えられる。

埋立工事では、盛土の平面展開に対応した一次元圧密変形解析を用い、隅角部などには水平変形も考慮できる三次元圧密変形解析の適用が望まれる。

ここでは、これらの解析手法のうち一次元圧密変形解析と三次元弾塑性圧密変形解析について述べる。

表-1 解析技術一覧表

目的	適用箇所	解析方法
施工中の沈下管理	護岸	慣用法による沈下計算
	連絡誘導路・埋立	一次元圧密変形解析
長期の沈下予測	護岸	一次元圧密変形解析
	連絡誘導路・埋立	
地盤の水平変形	護岸	二次元弾塑性圧密変形解析
	連絡誘導路埋立隅角部	三次元弾塑性圧密変形解析

**a) 一次元圧密変形解析**

護岸工事の盛土層厚管理で用いた慣用法は、無限長の帯状荷重を前提とした沖積層の沈下を対象としているため、盛土が平面的に展開し、沖積層だけでなく深部の洪積層に及ぶ地盤変形を考慮する必要が生じる埋立工事には適用できない。

そこで、埋立工事の盛土層厚管理を合理的に実施するために、盛土荷重を積木状に細分化した荷重ブロックとして設定し、各ブロックからの三次元の応力分散を考慮して、有限要素法による一次元圧密計算を実行する一次元圧密変形解析手法を開発した。この手法は以下の特徴を有する。

- ・地中応力計算においてBoussinesqの式に基づく三次元応力分散の考慮が可能であり、平面的に展開する埋立工事に対応できる。
- ・有限要素法の採用により、洪積層を含む多層かつ複雑な地盤条件にも対応でき、計算を鉛直方向(沈下)に限定することにより、剛性マトリックスのサイズと解法に要する計算時間を従来法の1/100以下に短縮した。
- ・荷重をブロック化することにより入力を簡略化し、浮力の考慮等、詳細な荷重条件にも対応可能であり、ブロック形状の細分化により、実際の施工状況に近似した荷重条件を設定できる。
- ・多様な出力形式を有し、計算結果の分析・評価の利便性を向上させた。

この一次元圧密変形解析を複雑な形状を有する南側連絡誘導路に適用した。隅角部には細分化した積木モデルにより実際の形状に近似したモデルを設定し、後述する新しい計測技術で得た詳細かつ正確な施工履歴を用いた(図-2)。

解析結果は沈下板の計測値と比較しながら、その妥当性を確認し、施工中の盛土層厚管理に用いたほか、長期変形予測に基づいて隅角部や1期護岸との接合部の上部施工時に天端高設定の参考とした。

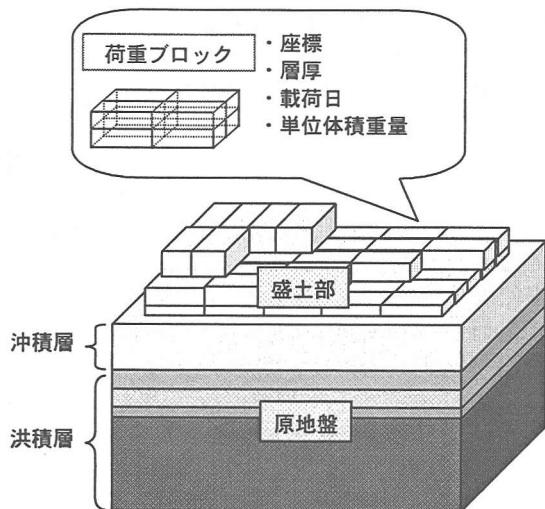


図-2 積木モデル概念図

### b) 三次元弾塑性圧密変形解析

前項のように、実際の地盤の変形を一次元変形に近似する方法は、地盤変形解析の実務的な手法として多く用いられている。しかし、軟弱な粘土地盤が有限幅の盛土载荷を受ける場合、すなわち、隅角部などでは、载荷中の沈下に加えてせん断変形が生じ、側方変位の影響が大きくなる。特に、連絡誘導路は複雑な形状であるため、地盤の鉛直方向(沈下)だけでなく水平方向の変形も考慮できる三次元地盤変形解析が必要となった。

地盤変形解析手法としては、土の弾塑性的性質や圧密を考慮する弾塑性圧密解析法が有効であるが、現在の段階では確信を持てるほどの信頼性の高い側方変位予測法は見当たらない。地盤工学ハンドブックでは、『土-水連成解析によって地盤の変形に関する実現象を的確に評価するための三つの要素として、

- ①基礎地盤-構造物系の幾何的条件(geometry)
- ②地盤材料の物理・力学特性(material)
- ③载荷される外力としての施工工程(loading)

の正しいモデル化が不可欠であり、これらのうちのどれかでもその精度を落とせば得られる結果はそのレベルになってしまう』と記述している<sup>2)</sup>。

①の幾何的条件に関しては、数多くの事前の地盤調査によるボーリング柱状図より適正な地盤モデルが造られている。②の物理・力学特性では、1期事業からの計測調査結果に基づいた土質パラメータ分析が実施され、地盤の変形に大きな影響を与える透水係数をはじめ地盤の土質特性に関する研究が進んでいる。

したがって、筆者らは施工者としての立場を活かして③の施工工程の正しいモデル化により信頼性の高い三次元弾塑性圧密変形解析手法の確立を目指した。三次元解析では解析に要する計算処理速度や容量が膨大となり、現在の進んだコンピュータ技術によっても施工管理段階に活用する事は容易でなく、施工工程の正しいモデル化を可能とする新たな解析手法が必要となった。そこで、DACSAR (Deformation Analysis Considering Stress Anisotropy and Reorientation: 土/水連成有限要素解析プログラ

ム)の三次元版(太田・飯塚 1989)に基づき、解法部に反復法の一つであるICCG法(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method: 不完全コレスキー共役勾配法)を適用することで、解析に要する計算時間を従来手法の十分の一程度に低減できる三次元弾塑性圧密変形解析手法を開発した(図-3)。

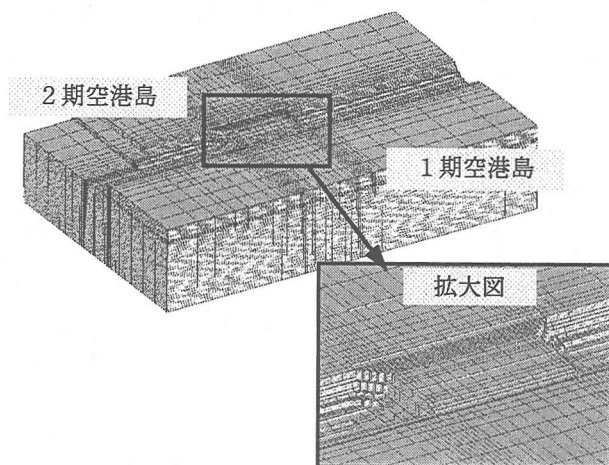


図-3 南側連絡誘導路解析モデル

南側連絡誘導路部への適用にあたっては、前項の一次元圧密変形解析と同様に実際の形状に近似した詳細な解析モデルを構築し、解析を前提とした詳細な施工管理により、正確な施工履歴を解析に取り入れた。その結果、施工期間中4ヶ月間の護岸上部工の鉛直変位(沈下)は、解析値70cm~90cmに対し実測では80cm~90cmを示し、同様に水平方向(X方向)は、変位の大きいところで20cm~30cmに対し25cm~50cmであり、従来の解析手法と比べその予測傾向に一致が見られた。今後は長期間の動態観測結果に基づいて地盤深層部の変形についての検証を進めていきたい。

### (2) 施工技術

施工技術は盛土品質の向上と合理的・効率的な施工を目指して開発・運用した技術である。

本工事はサンドドレーン改良地盤上への大量・急速盛土工事であるため、施工中の沈下量を知ることにより盛土層厚を管理し、施工に起因する不同沈下を抑制する必要がある。また、局所的な盛土形状の凹凸を無くし、均一な载荷形状とすることで安定した盛土施工と容易な盛土層厚管理が可能となる。

ここでは、後述する高精度深淺測量システムにより得られたデータを有効活用した合理的な盛土層厚管理手法と効率的な直投シミュレーションシステムについて述べる。

#### a) 圧密沈下計算に基づく層厚管理手法

サンドドレーン改良地盤上の盛土施工管理では、大きな沈下が進行する中で所定の盛土厚に施工するための層厚管理が最も重要な課題となる。従来の層厚管理手法は工事範囲を管理可能な区分に分割し、管理区域ごとに沈下板を設置して沈下板で計測される沈下量に基づいて盛土施工を実施していた。

この手法で管理精度を向上させるためには沈下板

の増設が必要となり、大型作業船の使用制限や作業効率の低下を招いたり、施工中に沈下板を破損した場合に沈下管理の指標を失うなど、本工事のように大量・急速施工が要求される場合には適用が困難であった。

そこで、筆者らは新しい深浅測量技術によって得られる施工情報に基づいた正確な盛土施工履歴の把握による圧密沈下計算を実施し、沈下板のみに依存せず盛土層厚管理を行う新しい手法を開発して1期護岸工事に適用した。その検証として延長1800mに及ぶ1期護岸上部工の圧密沈下に伴う時間的推移を示す(図-4)。施工直後には盛土施工履歴の差により不規則な分布を示していた上部工天端は、沖積粘土層の圧密沈下が収束した18ヶ月後の調査では平均値を中心とした正規分布を呈し、±15cm以内の範囲に全計測点の84%が、±25cm以内に99%が収まっており、施工に起因する不同沈下の抑制に有効であったと考えられる。

この圧密沈下計算に基づく盛土層厚管理手法は、1期護岸工事の実績を評価され、2期護岸工事においても採用された。

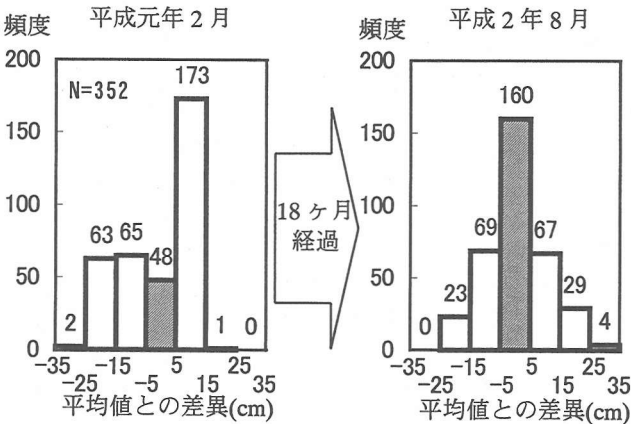


図-4 1期護岸上部コンクリート天端の推移

また、現場での沈下管理業務を効率よく実施するため、実際の施工状況に近似した盛土載荷モデルの選定、深浅測量手法との連携による施工履歴の選定など、業務のシステム化により大幅に作業量を低減した。

#### b) 直投シミュレーションシステム

従来の底開式あるいは全開式土運船を用いた大規模埋立工事では、シングルビーム測量で得られた比較的粗い深浅図上に熟練技術者が経験に基づいて投入位置を計画していた。2期工事では1工区あたり日最大100,000m<sup>3</sup>程度の施工量があることから、簡便で効率的な投入計画技術が欠かせない。

土運船から投下された土砂の挙動は、水中落下現象や海底面衝突後の横方向への拡散現象に加え、土運船の浮上、土運船内の土砂流動・流出現象など複雑な諸現象が関連する。

2期工事の施工に先立ち、投入後の土砂堆積形状などの研究に基づきパーソナルコンピュータ上で堆積形状を再現するシステムを構築した。このシステムは、土運船積載容量・満載吃水・土倉有効幅・

底扉幅・土砂落下時間など土運船諸元を入力することにより、拡散幅、堆積厚、天端幅などの土砂堆積形状を予測し得られた予測堆積形状を5m×5mの堆積厚メッシュデータとして数値化する(図-5)。この堆積厚メッシュデータを後述する高精度深浅測量システムから読み込んだ形状データと重ね合わせるシステムとして構築し、簡便で効率的な直投計画が可能となった(図-6)。

施工においては、この直投シミュレーションシステムで計画した投入計画位置に、発注者である関西国際空港用地造成(株)が開発した土運船運行管理システムにより正確に土運船が位置誘導され、薄層均一な盛土施工が計画的に実施可能となった。

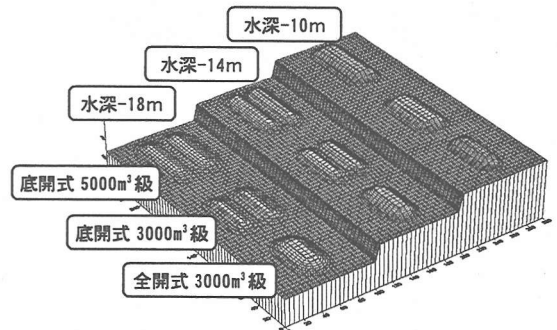


図-5 直投シミュレーション基本データ

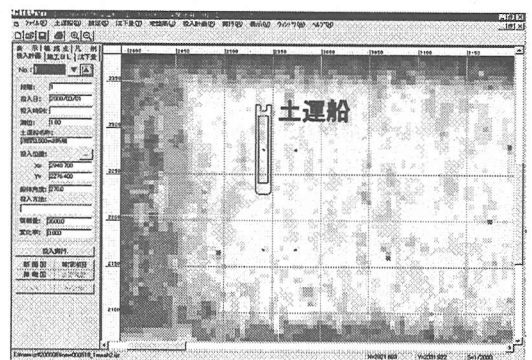


図-6 直投シミュレーションシステム

#### (3) 計測技術

情報化施工の根幹を支える重要な技術である計測技術は、近年の情報化技術の発達に伴い大きく変貌している。また、計測により取得されるデータは予測結果の評価や品質管理の精度向上のための最も重要な基礎データといえる。

本工事では、盛土施工管理として日々深浅測量が実施される。しかし、従来のシングルビームによる深浅測量では管理測線10m間隔程度での線状管理が作業時の限界であり、地盤の詳細な形状を把握することは困難であった(図-7)。また、水際線付近は、測量船の吃水や立入り制限等から、従来は計測が実施されていなかった。

ここでは、大量・急速施工や水際線付近の計測にも対応できる高精度深浅測量システムと水際線測量システムについて述べる。

##### a) 高精度深浅測量システム

水中部の計測を、より効率的で高精度・高密度に実施するため、ナローマルチビーム測深機と移動体

では最も測位精度の高い RTK-GPS とを組み合わせた高精度深浅測量システムを開発した(図-8)。

ナローマルチビーム測深機は 1.5° と鋭い指向角の音響ビーム 60 本からなり、一度に 90° 即ち、水深の 2 倍の範囲(水深 10m の場合、測深幅 20m)を同時に計測することができる。これにより、従来の計測に比べ作業効率が大きく改善され面的な管理も可能となった。また、船体の動揺、RTK-GPS のレイテンシー、ナローマルチビームのビームヘッドの傾斜・音響速度など多数の補正を行っているため、シングルビームの線上管理では不可能であった位置誤差のない高精度のデータ取得が可能となった(表-2)。

このシステムで得られた高精度・高密度データを用いることで、従来と比べて正確な計測データおよび施工履歴の取得を可能とした。

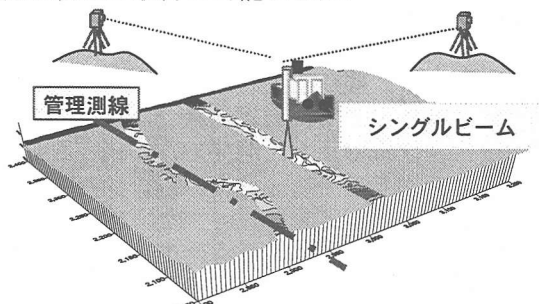


図-7 シングルビーム測量概念図

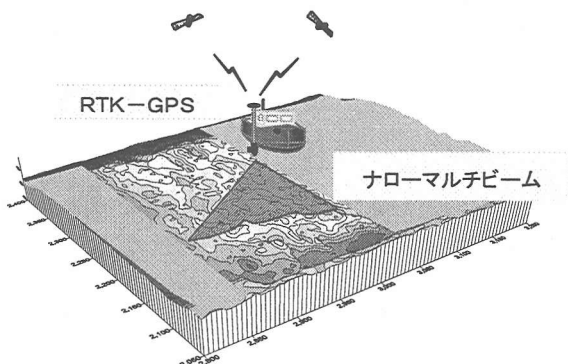


図-8 ナローマルチビーム測量概念図

表-2 高精度深浅測量システムの比較

	従来	今回
計測方法	電波測位機+ シングルビーム	RTK-GPS + ナローマルチビーム
補正方法	・上下動(ヒープ)	・上下動(ヒープ) ・横回転(ロール) ・前後動(ピッチ)
取得データ	線データ (10~20m間隔)	面データ (1×1mメッシュ)
取得データ精度	測量船の蛇行による位置誤差が生じる。	実際の測深位置の水深値で整理するため位置誤差はない
未計測部	測線間は補完して作成するため推定値となる	なし

#### b) 水際線計測システム

工事の進捗に伴い現れる水際線付近の計測を、容

易かつ安全に実施できる新たなシステムとして、高精度深浅測量システムとレーザースキャナを組み合わせた水際線計測システムを開発した。

レーザースキャナは距離測定レーザー(近赤外線:0.9μm)を照射させその反射光をとらえることで、ノンプリズムで最大 350m程度離れた対象物の形状を計測できる。

このシステムにより、従来計測データが空白となっていた水中から陸上に至る水際線付近での高密度な計測データの取得を目指した。また、このレーザースキャナを単独で高所作業車等に搭載することで、陸上部において地表面計測の実施も可能であり、水中、水際線、陸上に至る全区域で同密度の計測を実現できる(図-9)。

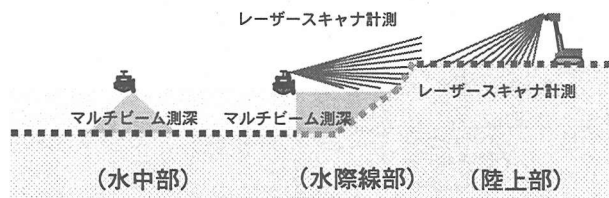


図-9 水際線測量等のイメージ図

#### (4) 情報処理技術

本工事では、日々蓄積される詳細な深浅測量データ、沈下や変位などの計測データ、および資材、機材、出来形等の施工情報は膨大な量となり、データ整理、検索に多大の労力が必要となる。また、施工途中で異常箇所が発見された場合の原因究明や、将来のトレーサビリティを容易とするため、情報の適正な保安全管理が重要となる。

ここでは、深浅測量データを時系列に保安全管理する計測データ保安全管理システムと各種施工情報をGIS (Geographic Information System: 地理情報システム) 技術の利用により保安全管理するGIS 工事情報管理システムについて述べる。

##### a) 計測データ保安全管理システム

今回開発した計測データ保安全管理システムは、水中部、水際線、陸上部等の各種計測データを 1m×1m 単位のメッシュに変換し基本データファイルとして時系列に保安全管理するものである。

基本データファイルは全て座標(x, y, z)を持つデジタルデータとして保管されており、CAD等の汎用ソフトとの連動により多様な出力や変換も容易に実施できる(図-10)。

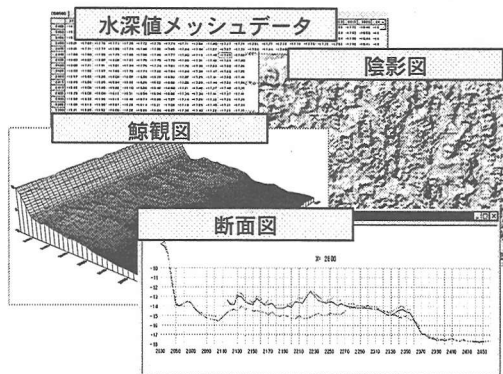


図-10 計測データの出力例

本システムの導入により日々の深淺測量データの事後処理時間が大幅に短縮された。さらに、このデータは時系列で単一データベースに保安全管理されており、施工中の出来形・品質管理はもとより、正確な施工履歴の取得も可能であり施工後のトレーサビリティの確保にも大きく寄与した。

#### b) GIS工事情報管理システム

本工事のように大量・急速施工を実施する場合、短期間に多量の施工情報が発生する。これらの情報を適切に管理するには、以下の課題があった。

- ・ 複数のシステムから発生する施工情報の一元化
- ・ 高精度な沈下管理のための施工履歴情報の確保
- ・ 必要な情報の共有化と活用

したがって、多様な施工情報を適切に保安全管理し、目的に応じた情報の検索・抽出・分析を可能とするGIS工事情報管理システムを開発した。

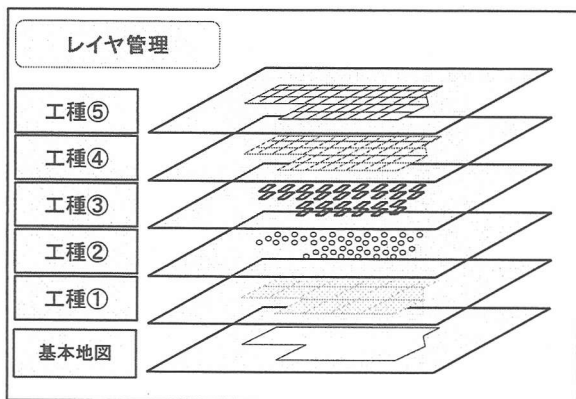


図-11 GIS工事情報システム概念

GIS工事情報管理システムは、施工管理の過程で得られた多様な施工情報をデジタル化し地図上に工種単位でレイヤ展開することにより、視覚的で容易なデータ検索を可能としたものである(図-11)。また、各レイヤ内の情報は領域情報と属性情報に整理されており、利用者は地図上の領域情報から、もしくは材料、施工船舶、日付等の属性情報の双方から必要な情報を容易に検索ができる(図-12)。

本システムの導入により工事のトレーサビリティ確保に必要な膨大な施工情報を適正に保全できるとともに、一元的な管理を可能としているため、各種情報の検索・抽出・分析に要する時間も従来の数日から数時間へと大幅に短縮された。

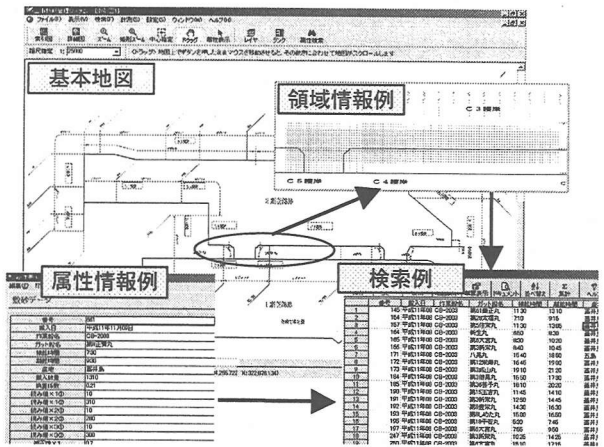


図-12 GIS工事情報管理システム概要

#### 4. あとがき

関西国際空港2期空港島護岸築造工事(その5)で採用した情報化施工技術は、様々な課題に対して従来の技術の改良や新たに開発した技術を有効に活用することで、人工島造成技術の総合的な施工管理技術の確立を目指した。

積極的な新技術の開発と導入により、当初方針の施工品質の向上、合理的な施工管理、工事情報の積極的活用が達成されるとともに、新しい工事管理のあり方を示したと考える。

また、本工事によって得られた豊富な工事情報は次工程の計画や護岸の維持管理に重要な役割を果たすと確信する。

謝辞：本工事を遂行するにあたり、貴重な御意見や御指導をいただきました関西国際空港用地造成(株)、関西国際空港(株)建設事務所の方々ならびに御協力いただいた国際航業(株)をはじめとするコンサルタント会社の方々に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 福手勤, 大上修三, 犬山忠之, 池内章雄: 関西国際空港の緩傾斜石積護岸工事における沈下管理システムについて, 土木学会, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp27-32, 1988
- 2) 地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, p.134, 1999
- 3) 池内章雄, 本多隆: 3次元圧密変形解析手法の適用について, 近畿地方整備局平成14年管内技術研究発表会論文集, pp. 調・計・設 12\_1-12\_6, 2002