

# 国内初！強震計観測情報を活用した港湾施設 診断システムの開発 ～地震時初動体制支援の新たな取り組み～

淵ノ上 篤史<sup>1</sup>・大塚 尚志<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 調査課（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3）

全国に先駆けて「強震計観測情報を活用した港湾施設診断システム」を開発した。このシステムは、地震発生時に強震計で観測された地震動情報を用いて係留施設（岸壁）の供用可否判定を行い、判定結果を基に被害推定マップを作成するものである。供用可否判定は、簡易判定と詳細判定の二通りの判定手法を備えており、地震動情報の入手から判定まで全て自動計算される。作成された被害推定マップは、現地の被災状況調査箇所の選定に活用でき、発災後の初動体制を支援する有効なツールとなる。

キーワード 大規模地震、強震計観測情報、係留施設の供用可否、初動体制支援

## 1. はじめに

中部地方では、今後30年以内の発生確率が極めて高いと想定される南海トラフを震源とする巨大地震による甚大な被害が懸念されている。このような大規模地震が発生した場合、港湾施設は被災地への緊急物資輸送の拠点として重要な役割が期待されている。また、図-1に示すような港湾背後圏の経済活動をいち早く回復させることを目的として、港湾BCP（事業継続計画）の作成も進められ、港湾機能を早期に復旧させる必要がある。そのため、地震発生後の港湾施設、特に係留施設（岸壁）の早急な供用可否判断が重要となる。

一方で、地震後に津波警報・注意報が発令された場合は、解除されるまで沿岸域への立ち入りが出来ないことや、夜間に地震が発生した場合など、現地調査に入るまで数時間～数十時間程度要することも想定され、岸壁の供用可否判断に時間を要する可能性がある。

そこで、中部地方整備局管内7港湾の国有港湾施設を対象に、地震発生後に臨海部に設置された強震計で観測された地震動情報を活用することにより、短時間で岸壁の供用可否判定を行うシステム「強震計観測情報を活用した港湾施設診断システム」（以下、「港湾施設診断システム」）を構築した。本論では、港湾施設診断システムの主な開発項目とシステムの稼働実績を取りまとめるとともに、今後の取り組みについて報告する。

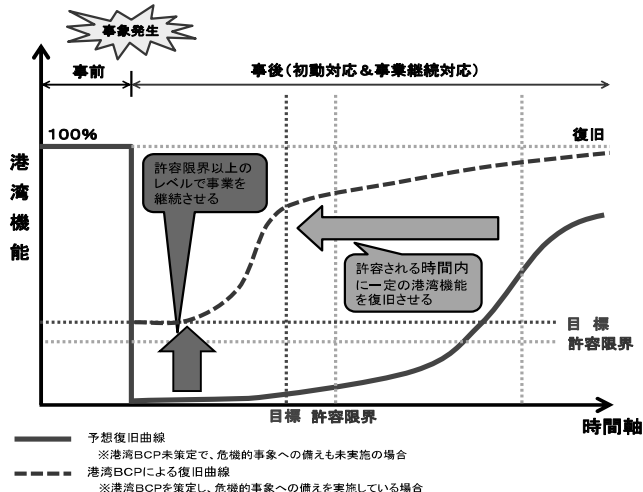


図-1 港湾BCPの概念<sup>1)</sup>

## 2. 港湾施設診断システムの概要

### (1) 港湾施設診断システムの地震後の時間的流れと構成

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所（以下、「港空研」）では、全国の港湾に設置された強震計（港湾地域強震観測網）で観測された地震動情報をメール配信する「地震動情報即時伝達システム」を構築している。このシステムは地震発生後約15分以内にPSI値、計測震度相当値、最大加速度の観測情報をメールにて配信するものであり、メール画面の最下段には港空研サーバーにおける地震動波形データの在

処が記載されている。(図-2)

この「地震動情報即時伝達システム」と連携することで、短時間に岸壁の供用可否判定を行う港湾施設診断システムを開発した。

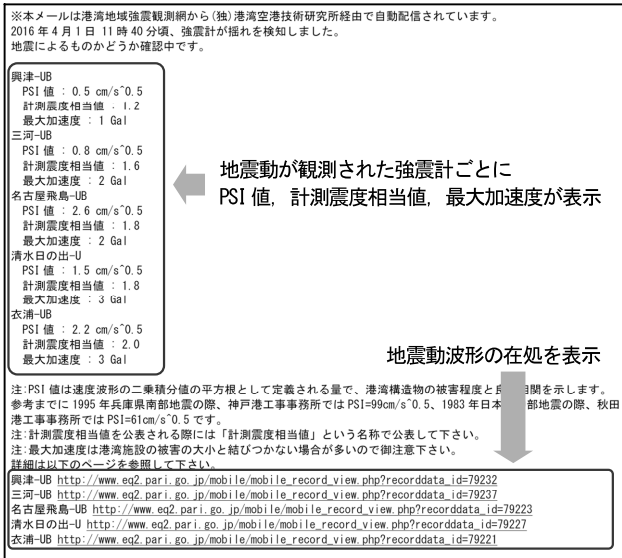


図-2 地震動情報即時伝達システムの配信メール

なお、速度のPSI値とは、野津ら<sup>2)</sup>により式(1a)で定義され、地震動の速度の二乗値を、時間方向に積分して平方根を計算した値であり、港湾構造物の被災程度と相関が高い地震動指標の一つである。

$$\text{速度のPSI値} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt} \quad (1a)$$

開発した港湾施設診断システムは、「地震動情報即時伝達システム」からのメール受信をトリガーとして、地震動波形データの入手から岸壁の供用可否判定、被害推定マップの作成までを自動処理で行うことを可能とした。このため、津波警報・注意報の発令中や夜間等で現地確認が困難な状況でも岸壁の供用可否を早期に判定できる。その時間的な流れの関係を地震発生後の経過時間と対比して図-3に示す。また、システム構成の概要を図-4に示す。

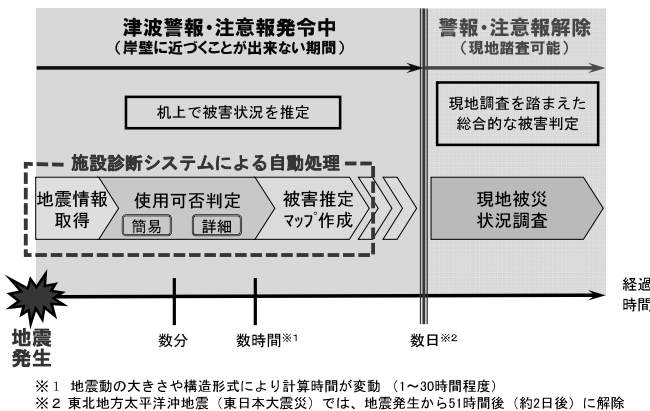


図-3 システムの供用可否判定の流れ

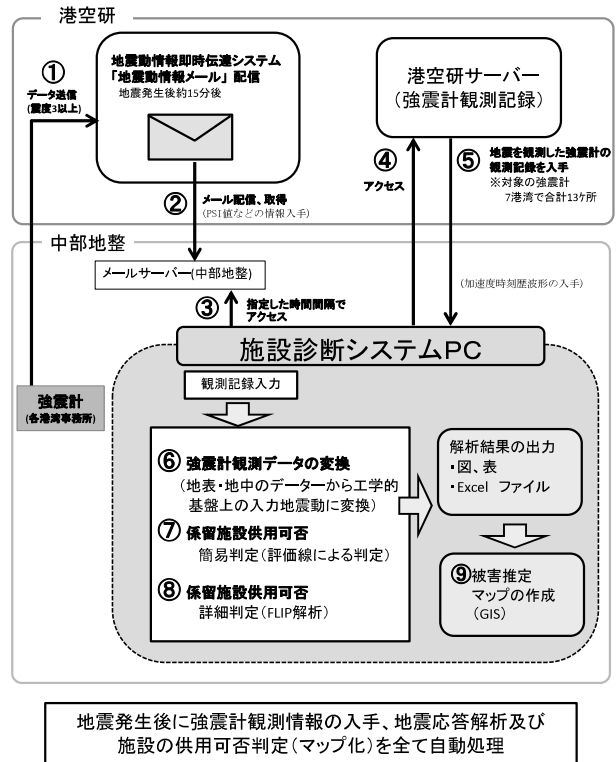


図-4 システム構成の概要

## (2) 対象の強震計と対象施設

港湾施設診断システムで対象とする強震計は、中部地方整備局管内7港湾にある13箇所の強震計とした。また、対象施設は国有港湾施設のうち、主に耐震強化施設とコンテナバース(矢板式岸壁、栈橋式岸壁および重力式岸壁)の計50施設とした。

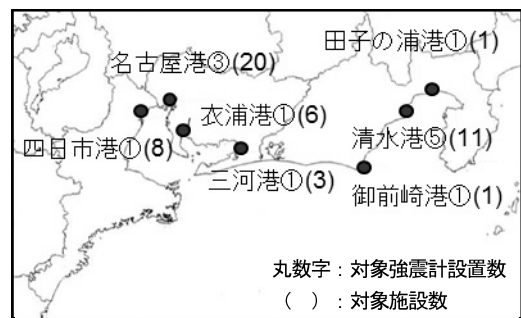


図-5 港湾施設診断システム対象港湾

## 3. 係留施設供用可否判定手法の構築

### (1) 強震計観測データの変換

港空研サーバーから入手する地震動波形は、地表もしくは地中で観測されたものである。供用可否判定では、工学的基盤上の地震動波形を利用するため、吉田<sup>3)</sup>が提案する周波数依存性を考慮できる等価線形化法を採用し、観測波形データを工学的基盤上の地震動波形に変換した。

## (2) 簡易判定手法

簡易判定手法は、係留施設の被害と相関性が高い速度のPSI値をパラメータとして、各施設における残留水平変位及び式(2a)に示す鋼部材の最大曲率比の評価線から行うこととした。

$$\text{最大曲率比} = \frac{\text{発生最大曲率}}{\text{全塑性モーメント発生時の曲率}} \quad (2a)$$

各施設の評価線は、対象施設が位置する地域で想定されているレベル2地震動（海溝型地震，内陸活断層型地震，M6.5直下型地震，南海トラフ巨大地震）及び再現期間（50～500年）を考慮した確率波の計10波程度を対象に，FLIP<sup>4)</sup>による地震応答解析を行い，その結果を用いて設定した。評価線の例として，ある施設における速度のPSI値と残留水平変位，鋼部材の最大曲率比との関係から設定された評価線を図-6および図-7に示す。

なお，FLIPとは二次元地震応答解析を行うプログラムであり，兵庫県南部地震等における係留施設の被災事例を再現できているとして，特に港湾施設の耐震性能照査で用いられるプログラムである。

最大曲率比は，地震中の鋼部材の状態を表す指標である。例えば，矢板式岸壁においては，港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>によると，最大曲率比が1.0未満であれば，構造的な安定が保たれており，残存耐力有りとして判定できる。しかし，地震後に係留施設に船舶が接岸した際に作用する接岸力や牽引力に対して鋼部材に発生する応力状態も評価する必要がある。このため FLIP解析では，地震後の10秒間に設計対象船舶の接岸力や牽引力相当の節点集中荷重を作用させ，地震後の船舶接岸時の応力状態も把握した。

設計では船舶接岸時（作業時）に，発生断面力が設計耐力以下（発生する応力が降伏以下）であることを照査する。地震後の接岸時の応力状態を示す指標に設計耐力比（発生応力/降伏応力）を用い，速度のPSI値との関係を整理すると，図-8に示すように地震後の船舶接岸時の設計耐力比が速度のPSI値と比較的高い相関性を示すことが明らかとなった。

以上に示したとおり，速度のPSI値と残留水平変位，最大曲率比および設計耐力比の関係を示す評価線（図-6～図-8）を用いることで，供用可否判定を実施する。

図-9に簡易判定における供用可否判定フローを示す。予め評価線（図-6～図-8）を作成しておくことにより，実際の地震発生時には，速度のPSI値が算出されると同時に係留施設の供用可否を判定することが可能となった。なお，通信網が不通になった時の対応として，気象庁発表の震度階級に対する供用可否判定機能も備えた。

評価線が図-6～図-8の係留施設では，図-6および図-7より速度のPSI値が61cm/s<sup>1/2</sup>未満で供用可能となり，図-8より速度のPSI値が57cm/s<sup>1/2</sup>未満では暫定供用（長期）と区別される。これらをまとめると，表-1に示す供用可否

分となる。

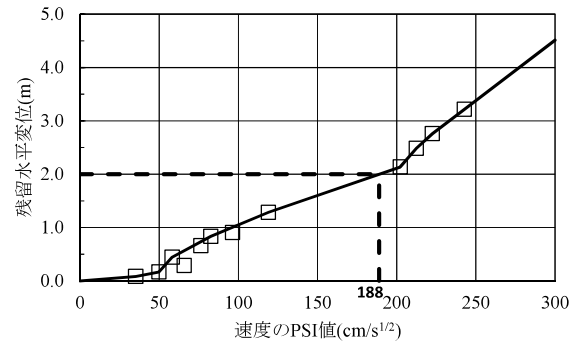


図-6 速度のPSI値と残留水平変位の関係

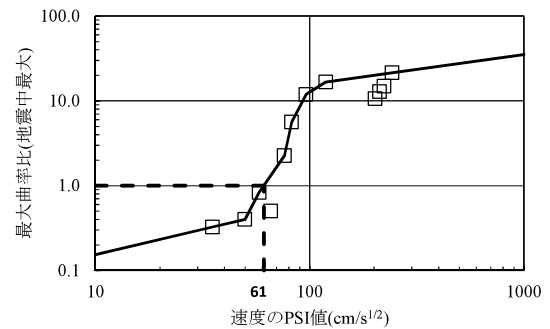


図-7 速度のPSI値と最大曲率比の関係

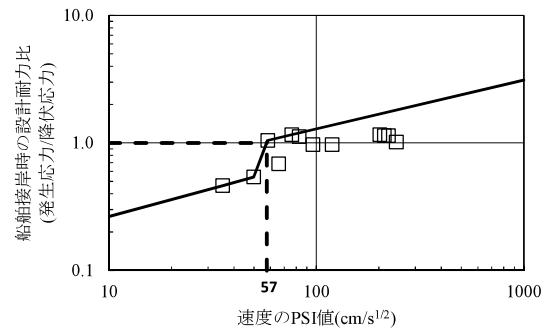


図-8 速度のPSI値と船舶接岸時の設計耐力比の関係

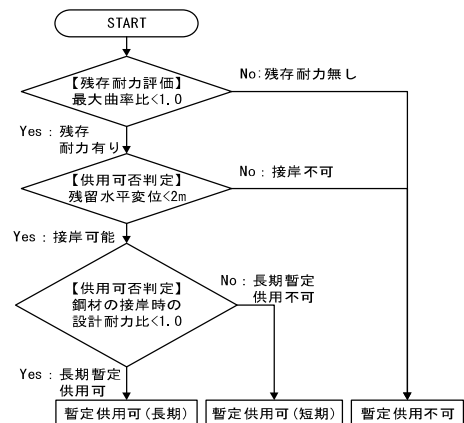


図-9 供用可否判定フロー（矢板式岸壁の場合）

表-1 供用可否区分

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 速度のPSI値 (cm/s <sup>1/2</sup> ) | 供用可否       |
| 57未満                           | 暫定供用可 (長期) |
| 57以上 61未満                      | 暫定供用可 (短期) |
| 61以上                           | 暫定供用不可     |

ここで、暫定供用可 (長期) とは、構造上の問題が無く、地震後であってもほぼ通常時と同じような供用が可能な施設である。また、暫定供用可 (短期) とは、構造上に問題があるが、水平変位の進展が無いことを確認しながら供用できる状態であり、緊急物資輸送等の一時的かつ短期的な供用を想定している。

簡易判定手法による判定結果の例を図-10示す。

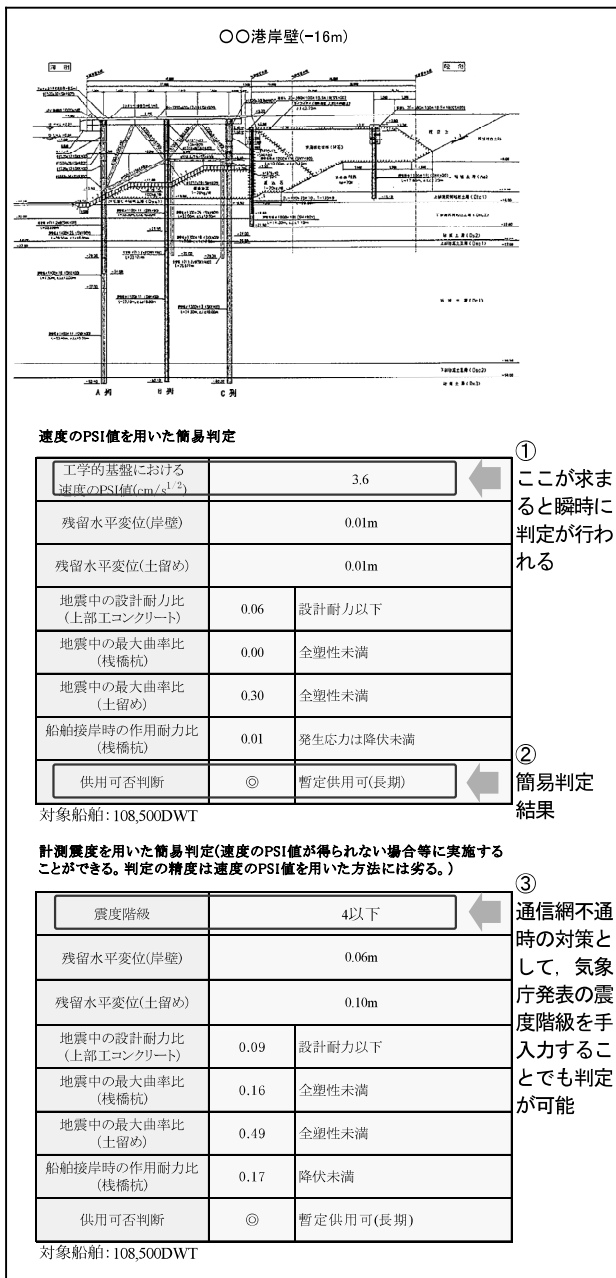


図-10 簡易判定結果の例

(3) 詳細判定手法

詳細判定は、二次元地震応答解析 FLIP を用いて計算するものとした。

まず、予め作成しておいた解析モデルに、観測された地震動波形データから工学的基盤上の地震動波形に変換した波形を入力し、FLIP解析を行う。続いて解析結果 (結果一覧、残留変形図、応答時刻歴波形、曲げモーメント図等) を出力し、供用可否の判定までを自動で行う。また、残留水平変位と船舶接岸時の設計耐力比の関係から相関性を把握し、図-11に示す評価線を設定した。観測地震動を用いたFLIP解析から得られる残留水平変位と図-11を用いることで、船舶接岸時の鋼材の応力状態を考慮した供用可否判定を行うこととした。評価線が図-11の施設では、残留水平変位が0.41m未満であれば、接岸時の設計耐力比が1.0未満となり、暫定供用可 (長期) の判定となる。

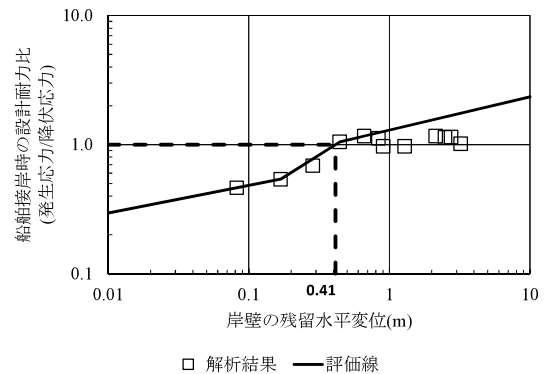


図-11 岸壁の残留水平変位と接岸時の設計耐力比の関係

また、コンテナクレーンが搭載されている岸壁については、コンテナクレーンを固有周期、重心位置および減衰定数を考慮したハリ要素と質点要素を用いてモデル化し、岸壁上部工に搭載した。これにより、FLIP解析でクレーン重心質点における応答最大加速度が得られる。この応答最大加速度を用いて、クレーンの浮き上がり限界加速度および設計震度に対する照査を可能とした。解析結果 (判定結果一覧、残留変形図、曲げモーメント図) を図-12および図-13に示す。

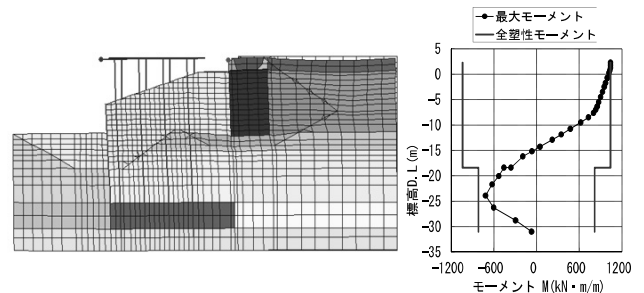


図-12 解析結果の例 (左: 残留変形図, 右: 鋼管杭のモーメント分布図)

〇〇岸壁(-14m) (荷役機械有り)

(1) 栈橋・護岸の先端変位(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

| 位置   | 変位    | 水平(m) | 鉛直(m) | 備考                                  |
|------|-------|-------|-------|-------------------------------------|
| 岸壁先端 | 残留変位  | -0.86 | -0.13 | 暫定供用可(長期)と暫定供用可(短期)の閾値(岸壁先端の残留水平変位) |
| 最大変位 | -1.05 | -0.13 | 0.23m |                                     |
| 護岸先端 | 残留変位  | -1.12 | 0.07  |                                     |
| 最大変位 | -1.39 | 0.10  |       |                                     |

\*) 水平 正=陸側, 負=海側  
\*) 鉛直 正=上向き, 負=下向き

(2) コンテナクレーンに対する照査結果(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り) クレーンに対する照査

| 応答加速度 (Gal) | 221.9 |
|-------------|-------|
| 浮き上がり       | 256.0 |
| 限界加速度 (Gal) | 0.25  |
| 設計震度        | ○     |
| 判定          | ○     |

\*) 応答値は設計震度以下

(3) 鋼管杭・鋼管矢板に対する照査結果(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

| 杭    | 最大曲率比 | 塑性ヒンジ箇所数 | 評価 | 備考                   |
|------|-------|----------|----|----------------------|
| 杭1   | 0.94  | 0        | ○  | ダブルヒンジとなっていない杭が存在する。 |
| 杭2   | 2.68  | 1        |    |                      |
| 杭3   | 0.97  | 0        |    |                      |
| 杭4   | 0.82  | 0        |    |                      |
| 杭5   | 0.93  | 0        |    |                      |
| 矢板   | 0.33  | 0        | ○  | 全塑性モーメントが発生していない。    |
| 控え直杭 | 0.89  | 0        |    |                      |

| 杭    | 押し込み力(kN/本) |         | 判定 | 引抜き力(kN/本) |         | 判定 |
|------|-------------|---------|----|------------|---------|----|
|      | 応答値の最大値     | 抵抗力の最大値 |    | 応答値の最大値    | 抵抗力の最大値 |    |
| 杭1   | 6595.0      | 16130.8 | ○  | —          | 11064.2 | ○  |
| 杭2   | 15222.0     | 46846.2 | ○  | 51.9       | 11779.6 | ○  |
| 杭3   | 1103.5      | 17561.6 | ○  | —          | 12495.0 | ○  |
| 杭4   | 1478.5      | 18277.0 | ○  | 45.6       | 13210.4 | ○  |
| 杭5   | 5405.0      | 18326.0 | ○  | 1731.0     | 13259.4 | ○  |
| 矢板   | —           | —       | —  | —          | —       | —  |
| 控え直杭 | —           | —       | —  | —          | —       | —  |

\*) 杭の番号は、海側からの番号である。

(4) タイ材に対する照査結果(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

| 発生最大引張り力 (kN/本) | 抵抗力の最大値 (kN/本) | 判定 |
|-----------------|----------------|----|
| タイ材             | 894.4          | ○  |

(5) 上部工に対する照査結果(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

| 発生モーメント (kN・m) | 設計曲げ耐力 (kN・m) | 判定 |
|----------------|---------------|----|
| 上部工            | 2935.0        | ○  |

\*) 発生モーメントと設計曲げ耐力の比が最も大きくなる部材位置での値

| 発生せん断力 (kN) | 設計せん断耐力 (kN) | 判定 |
|-------------|--------------|----|
| 上部工         | 988.3        | ○  |

\*) 発生せん断力と設計せん断耐力の比が最も大きくなる部材位置での値

(6) 供用可否の判断(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

○ 暫定供用可(長期)。

← 詳細判定結果

(7) 2点間の相対変位(〇〇岸壁(-14m): 荷役機械有り)

| 栈橋-護岸間の相対変位 (m)  | 残留変位  | 最大変位  | 相対変位 (m) |
|--|-------|-------|----------|
| クレーン基礎間の相対変位 (m) <td>-0.21</td> <td>-0.37</td> <td>0.00</td> | -0.21 | -0.37 | 0.00     |
| 最大変位   | 0.00  | 0.00  | 0.00     |

\*) 正=拡幅, 負=縮まり

図-13 詳細判定結果の例

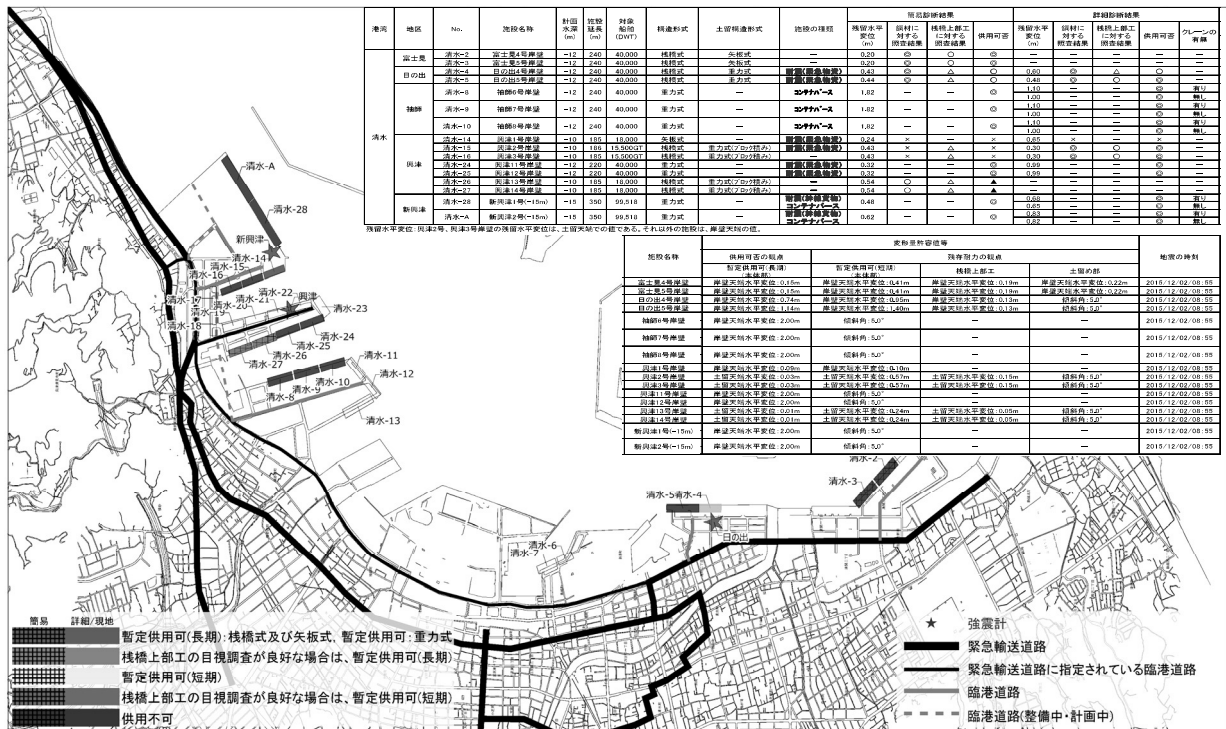


図-14 被害推定マップの例

#### (4) 被害推定マップの作成

簡易判定および詳細判定の結果を被害推定マップとして出力した例を図-14に示す。供用可否判定の区別別に色分けされ、発災時には災害対策本部への報告に使用されることを想定している。また、総合的な災害対策マップとしての活用も想定し、追加情報にも対応できるように、地図ソフトはGISを採用した。

### 4. システムの稼働実績と結果

2016年4月1日、三重県南東沖を震源とするM6.1の地震が発生した。この時強震計で観測された地震動データを基に、4港の36施設について港湾施設診断システムによる供用可否判定が行われた。港湾施設診断システム開発後、比較的広域の揺れを観測した初めての地震であり、貴重な稼働実績であることから以下に取りまとめる。

#### (1) 稼働実績

4月1日

- 11:39 ・地震発生(震源三重県南東沖, M6.1)  
清水港, 三河港, 衣浦港, 名古屋港の強震計で地震動を観測
- 11:49 ・港湾地域強震観測網(港空研)より地震動情報のメール配信
- 12:02 ・港湾施設診断システムによる地震動情報のメールチェック
- ・システム稼働開始【地震発生23分後】
- ・判定対象施設 36施設(清水港7, 三河港3, 衣浦港6, 名古屋港20)

- 12:05 ・簡易判定 1 施設目完了
  - 12:08 ・詳細判定開始
  - 12:09 ・簡易判定全施設終了【地震発生 30 分後】
  - 12:12 ・簡易判定結果のマップ化 1 港目終了
  - 12:19 ・全港の簡易判定結果のマップ化終了
  - 12:54 ・詳細判定 1 施設目完了
- 4 月 2 日
- 02:16 ・詳細判定全施設終了  
【地震発生 14 時間 37 分後】
  - 02:36 ・全港の詳細判定結果のマップ化終了

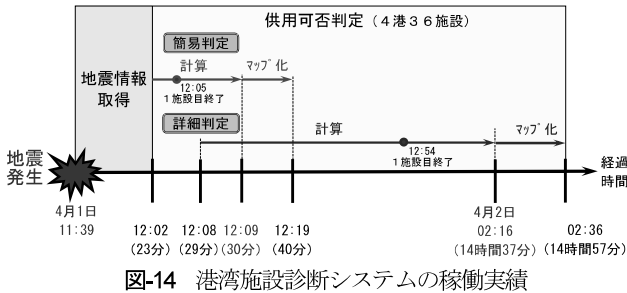


図-14 港湾施設診断システムの稼働実績

## (2) 結果

判定結果は全施設「供用可」であり、施設の変状等もなかったが、地震発生から全施設の詳細判定が完了するまでに15時間弱を要した。港湾施設診断システムでは、詳細判定を行う際のFLIP解析でパソコンに相当な負荷がかかることから、1台で同時に実行できるFLIP解析数は6ケースと設定している。解析を行う優先順位も設定しており、①観測された地震動の速度のPSI値の大きい施設、②施設の位置づけ（耐震強化岸壁かどうか）③取扱貨物量の3点より設定した優先順位を基に、優先度が高い施設から順次FLIP解析が実行されていく。現在は1台体制であり、計算待ちの状態の施設が非常に多かったことから全施設解析までに時間を要した。また、システム開発後初めての地震であり、様々な課題も見受けられたことから、逐次改善を進めているところである。

## 5. 結論

### (1) 港湾施設診断システムの開発

総合的な供用可否判定は、現地の被災状況を確認した後に行う必要があるが、この港湾施設診断システムを活用することで、津波警報・注意報発令中や夜間等、現地調査に入ることができない期間に、多くの施設の中から供用できる可能性が高い施設を予め机上で絞り込むことができる。特に、出力結果の被害推定マップは、現地の被災状況調査箇所の優先度を検討する判断材料となり、効

率的・効果的な初動体制構築のための一助になるものと考ええる。

### (2) 今後の取り組み

2016年熊本地震のように、最初の地震発生以降、同規模の後震が散発的に発生する場合において、後震の地震動レベルに応じた詳細判定実施の判断基準を設けることや、前震による変位や部材の応力状態を考慮した後震の施設診断手法の検討を進めていきたい。また、各港湾事務所に港湾施設診断システムを導入し、機動的かつ冗長的に供用可否判定が行える体制を構築していくとともに、当事務所においてはパソコンを増台し、総解析時間の短縮を図る。

港湾施設診断システムの一応の完成により、発災時の初動体制支援が可能となった。しかし、現地の被災状況調査では、人的な制約や資機材等の制約があることから、岸壁を全て隈無く調査することは、現実的に困難な状況が想定される。今後は効率的・効果的に点検・診断ができる技術、あるいは港湾施設診断システムと連携した点検システムの開発など、災害発生時の初動体制支援をより充実させるような取り組みを進めていきたい。

**謝辞：**本システムの開発に当たっては、広島大学大学院 一井准教授、京都大学防災研究所 飛田准教授、国土技術政策総合研究所 宮田港湾施設研究室長、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 野津地震防災研究領域長、小濱耐震構造研究グループ長にご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾の事業継続計画策定ガイドライン,2015.3
- 2) 野津厚・井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会関東支部,pp.18～19,2001
- 3) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYnamic response analysis of level ground by EQuivalent linear method,東北学院大学工学部, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>,2008
- 4) Iai,S.,Matsunaga,Y. and Kameoka,T.:Strain space plasticity model for cyclic mobility,Report of the Port and Harbour Research Institute,Vol.29,No.4,1990
- 5) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説,2007.

# 三次元CAD情報を活用した木造住宅の 耐震性能評価手法の開発

中川 貴文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 建築研究部 基準認証システム研究室（〒305-0902 茨城県つくば市立原1）

現在、新築されている戸建木造住宅の85%が軸組構法であり、そのうちの90%がプレカット（あらかじめ工場で木材を加工して、現場で短期間に組み上げることを）を利用して生産されている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組（柱・梁等の木材）の情報や、接合部（金物）に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用CADデータには上記情報が三次元情報として作成されており、許容応力度計算や応力解析との親和性は極めて高い。本研究では木造住宅用CADの構造図やプレカット加工の際に作成される三次元CAD情報に着目し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った

キーワード 木造住宅，プレカット，三次元CAD，地震応答解析

## 1. はじめに

現在、新築されている戸建木造住宅の85%が軸組構法であり、そのうちの90%がプレカット（あらかじめ工場で木材を加工して、現場で短期間に組み上げることを）を利用して生産されている（図1）。プレカット加工は三次元CAD・CAMを用いた全自動機械加工が主流となっている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組（柱・梁等の木材）の情報や、接合部（金物）に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用CADデータには上記情報が三次元情報として作成されており、許容応力度計算や応力解析との親和性は極めて高い。構造部材に関して、三次元CADによる詳細な情報が我が国の大半の木造住宅の生産において作成されていることは、他の国や、他の構造種別（鉄骨造、鉄筋コンクリート造等）による建築物と比べてみても特殊な状況といえる。現在2階建て木造住宅では、新築時の構造性能確認として壁量計算のみが求められているが、住宅生産時に作成される三次元CAD情報を活用すれば、すぐにでも詳細な構造計算を行える状況にある。しかし、毎年数十万戸分作成されている三次元CAD情報は、構造性能評価に活用されることなく、プレカット工場で死蔵されているのが現状である。図2に木造住宅の設計・生産の標準的な流れを示したが、現状では、意匠設計の段階で確認申請が行われ、その後にプレカット加工に入り初めて軸組の架構等の構造に関する検討が行われることが一般的である。この流れを変えてプレカット加工の際の三次元情報を構造設計に活かすことができれば、合理的により構造安全性の高い木造住宅の生産が可能となる。

ここでは、木造住宅用CADの構造図やプレカット加

工の際に作成される三次元CAD情報に着目し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った研究内容について紹介する。三次元CAD情報として研究対象としたのは、後述するCEDXM（シーデクセマ）と呼ばれるファイルフォーマットであり、これを木造住宅用の構造解析ソフトウェア（wallstat：ウォールスタット）と連携させることを試みた。

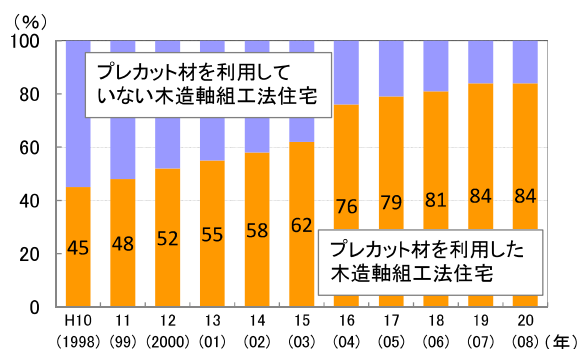


図-1 プレカット材を利用した木造軸組構法住宅の割合  
（資料：全国木造住宅機械プレカット協会）

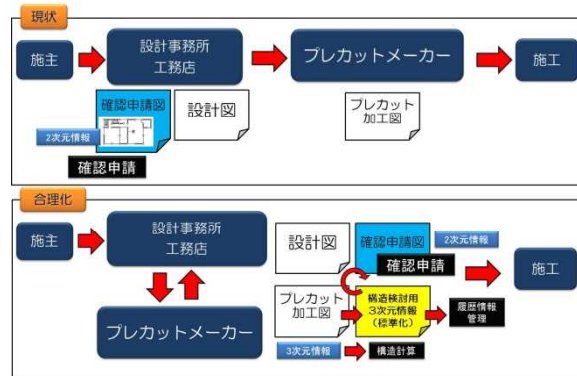


図-2 木造住宅の住宅生産の現状と合理化イメージ

## 2. CEDXM (シーデクセマ) とは

CEDXMとは、木造軸組構法住宅に関する建築意匠CADとプレカット生産CADのデータ連携を目的として構築された標準的なファイルフォーマットである。木造住宅用のCADには、意匠図作成用のCAD、構造図作成用のCAD、プレカット加工図作成用のCAD等があるが、三次元情報として作成されることが標準的であり、それらのCADの情報の橋渡しをするのがCEDXMファイルフォーマットである。三次元情報の中には、プレカット加工の際に必要な下記の情報が含まれている。

### ①軸組(木材)の架構の情報

木造住宅を構成する軸組の両端部の三次元座標、寸法(幅・高さ)、端部の加工形状など

### ②接合部の情報

軸組と軸組を繋ぐ継手・仕口の接合部の仕様、金物の種類、三次元座標など

### ③壁の情報

筋かいや合板釘打ち耐力壁や、内装材・外装材の壁の仕様、三次元座標など

### ④水平構面の情報

床、小屋組等の水平構面の仕様、面積、三次元座標など

これらの情報は許容応力度計算などの構造計算を行うために必要な情報であり、実際に木造住宅用CADソフトウェアの中には構造図を作成するだけでなく、許容応力度計算を行う機能を持つものも多い。CEDXMは①～④の情報をファイルとして作成する際の標準フォーマットであり、CEDXMに従ってファイル出力を行うことで様々なCADと連携をすることができる。NPO法人シーデクセマ評議会では標準ファイルフォーマットとして維持

管理と更新、さらなる開発及び普及などを目的として活動をしている。長期優良住宅の重要事項である「構造の安定」及び住宅履歴書の保存が求められているが、CEDXMファイルを長期優良住宅の履歴情報の保存等に活用することも可能となる。

## 2. 地震倒壊解析ソフトウェアwallstat

本研究で構造性能評価手法として用いたソフトウェアは、筆者が開発した木造住宅用の倒壊解析ソフトウェア(wallstat)である。2010年12月よりインターネット上で公開を開始し、下記URLから無償でダウンロードすることができる。

ダウンロードURL :

<http://www.nilim.go.jp/lab/idg/nakagawa/wallstat.html>

(短縮URL : <http://bit.ly/wallstat3>)

※Google等で「wallstat」で検索

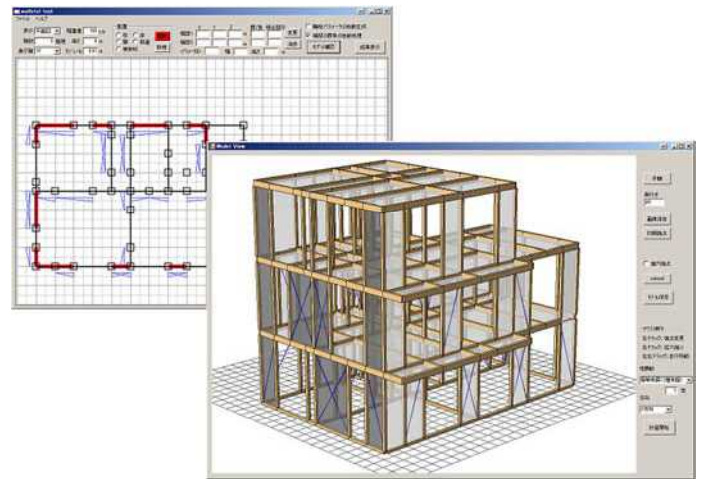


図-4 wallstatの画面

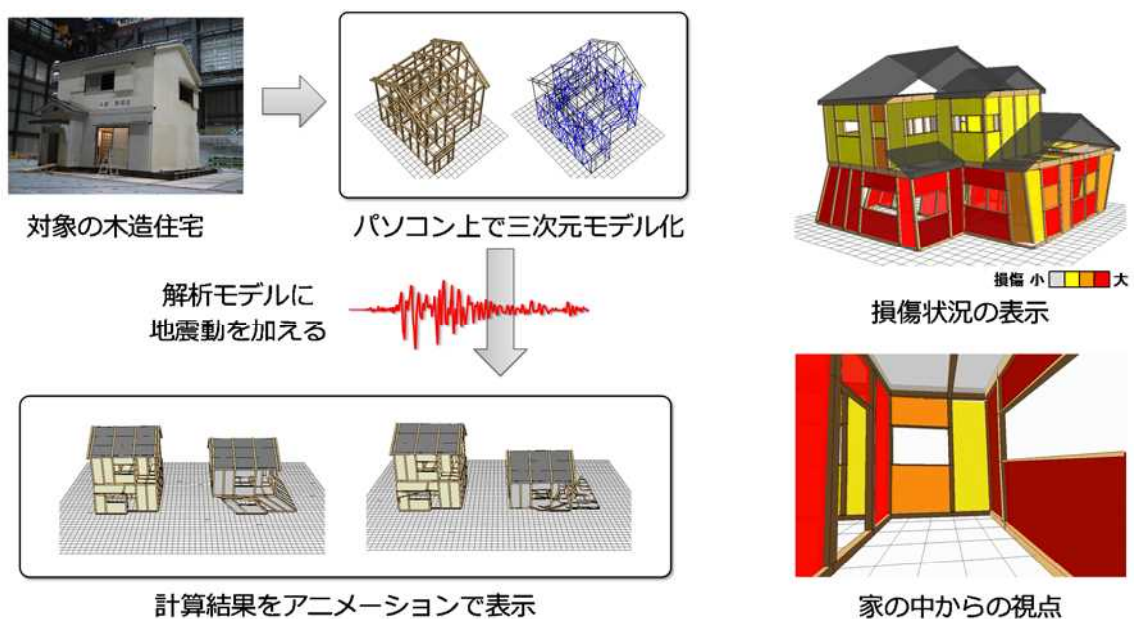


図-3 wallstatの概要



wallstatは木造住宅の建物全体の地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレートする数値解析プログラムであり、パソコン上で建物を立体骨組によりモデル化し、振動台実験のように地震動を与えて（時刻歴応答解析）、計算結果を動画で確認することが出来る（図3）。従来の解析ソフトウェアでは建物が倒壊するまでを追跡することは困難であったが、wallstatでは非連続体解析手法である「個別要素法」を基本理論とすることで木造住宅が地震時に損傷し、完全に倒壊するまでをシミュレーションすることが可能となった。多くの実大木造住宅の振動台実験との比較・検証により解析結果の精度が確認されている。メディア等で紹介されたこともあり、公開開始から現在（2016年8月）まで、ホームページのアクセス数は27,500回、ソフトウェアのダウンロード数は7600回、youtubeの動画の再生回数は29,100回に達している。wallstatは図4に示したようなwindowsのGUIを備えており、画面を見ながら木造住宅の解析モデルを作成し、変形の大さき、損傷状況、倒壊の有無等の解析結果をアニメーションによって確認することができる。数値解析の専門知識が無くても実際に目で見て地震時の木造住宅の応答挙動や、耐震性能を確認できるため、大学生や構造設計者の教育用ツールとしても使われている。図5は振動台実験に用いられた実大木造住宅の解析モデルの一例であるが、解析モデルでは構造躯体となる骨組（木材）1本1本をモデル化し、その中に耐震要素となる壁のパネや、骨組を連結する接合部のパネをモデル化する。壁や接合部のパネの強さは実験の結果や文献のデータから決定して設定する。図6はwallstatによる解析結果と振動台実験の倒壊過程を比較した動画のスナップショットであるが、試験体の接合部が引き抜けて破壊する過程や、1階が層崩壊する倒壊過程が精度よく再現されているのが分かる。その他、図7に示したように地震被害を受けた社寺建築の再現解析や6階建の中層木造建築物の構造検討等に活

用されている。

### 3. wallstatとCEDXMの連携

プレカットの際に作成される三次元CAD情報は、構造解析モデルとの親和性が高いということは、プレカット材を用いて生産される木造住宅全てが高度な三次元構造解析を行える状況にあることとなる。本研究ではプレカットの際の三次元情報を活用した木造住宅の耐震性能評価（構造計算）が広く普及することを目指して、CEDXMファイルを介してwallstatで木造住宅の三次元CAD情報を読み込み、自動で耐震シミュレーションを行うことが出来る連携手法の検討を行った。

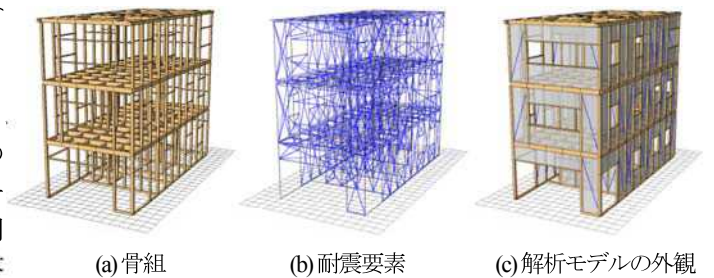


図-5 三次元骨組による解析モデル

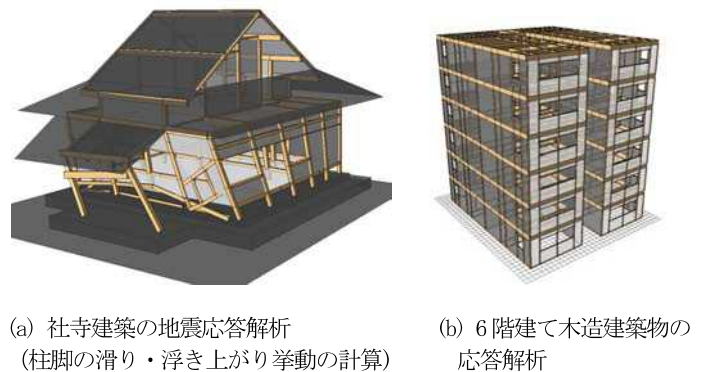


図-7 wallstatの解析例

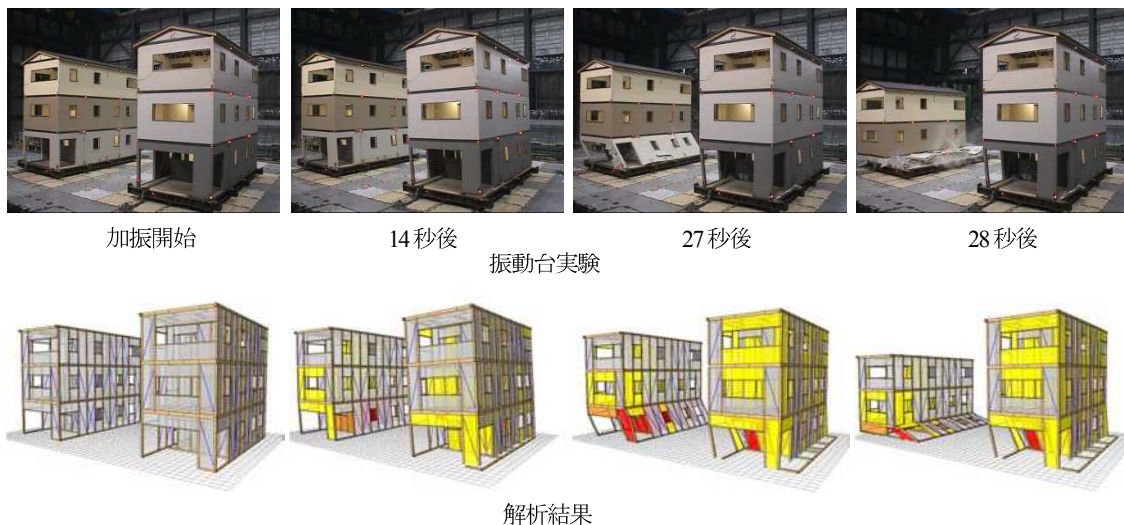


図-6 振動台実験の応答解析

実際の検討作業としては2013年度からCEDXM評議会の開発委員会において、連携に向けた情報の整理や、ソフトウェア開発を行った。

wallstatは解析モデル作成の際に、テキスト入力で軸組や構面の端部の3次元座標を入力する必要があり、木造住宅1棟分の主要構造部材や耐震要素を全て入力すると、1日がかりの作業となり、ユーザーの負担となっていた。CEDXMと連携して、3次元座標を自動で解析モデルに変換できれば、この負担が大きく軽減されることになる。CEDXMはXMLファイル形式が採用されており、木造住宅を構成する柱・梁等の軸組の端部の3次元座標、断面寸法、樹種、ヤング係数等がテキスト情報として、保存されている。2000年の開発開始からバージョンアップを継続し、現在バージョン7が最新である。木造住宅用CADやプレカットCADで普及しているのはバージョン4であるが、各CADソフトによってCEDXMファイルで出力する際の軸組等の情報の精密さ（解像度）が異なる場所があり、また、wallstatで解析モデル作成の際に必要なとされる情報についても、CADソフトで異なる場所があった。そこで、表1に示した通り、情報の解像度に応じて、両者の連携により自動でモデル化される項目のレベル分けを行った。レベル1では軸組・筋かい耐力壁は自動でモデル化されるが、他の情報は解析モデルに反映することは出来ない。接合部や水平構面の情報は反映されないため変形しないものとして解析を行うこととなる。レベル2では筋かい耐力壁以外の鉛直構面もモデル化され、レベル3になると、開口部や小壁、レベル4になると、接合部や水平構面についても解析モデルに反映されることになる。連携に関する検討で分かったこととして、レベル1～2までは標準的な木造住宅用CADやプレカットCADから出力されるCEDXMファイルで連携可能であり、レベル3～4となると、出力するCADソフト側で、wallstatで必要となる情報の解像度向上が必要となる。各連携レベルに対応する建物を考えてみると、レベル1～2は新築の壁量計算を想定した木造住宅（接合部は変形しない。水平構面は剛床と仮定。）であり、レベル3～4は性能表示制度や耐震診断を想定した既存、新築木造住宅（接合部、水平構面の構造検討も必要）を対象にしているといえる。

#### 4. wallstat ver.3の概要

前章の連携に向けた検討結果を反映して、CEDXMファイルを直接読み込む機能を実装した新たなバージョンwallstat ver.3を6月からインターネットで公開を開始した。各種CADソフトから出力されたCEDXMファイルから、簡単な操作で解析モデルを作成し、地震応答シミュレーションを実行することが可能となった。ファイルを直接読み込むだけで自動生成される解析モデルの連携レベルは2程度であるが、新たに開発したプリ・ポスト処理を行うGUIインターフェース（wallstat studio）により、鉛直

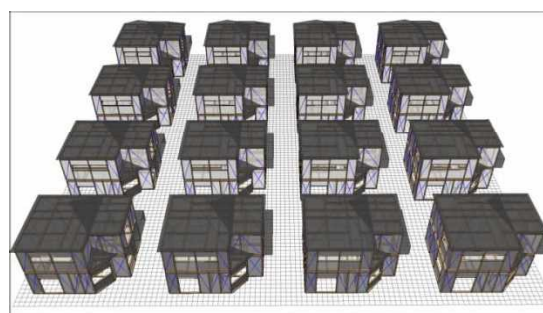
構面、水平構面、接合部等の手直しを簡単に行うことが可能となり、自動処理ではないが、レベル4相当の連携も実現された。ver.3のアップデートでは上記の三次元CADデータとの連携の他、様々な地震動を自動で連続入力したり、図8に示したように建物の強さを自動で変化させ、地震応答シミュレーションを連続実行する機能（パラメトリック・スタディ用ツール）の追加や、解析モデル ショーケース（様々な建築物の解析モデルのサンプル）の公開も開始された。

#### 5. カンファレンス「wallstatの利活用事例とCEDXMとの連携について」

wallstatの利活用事例とCEDXMとの連携に向けた検討の成果について、平成28年6月9日に東京、9月1日に広島において「木造住宅の耐震性能評価の見える化」と題してカンファレンス（主催：NPO法人CEDXM評議会、広島県工務店協会、国総研）が行われた。

表-1 wallstat と CEDXM の連携のレベル

| モデル化する項目     | レベル1 | レベル2 | レベル3 | レベル4 |
|--------------|------|------|------|------|
| 軸組           | ○    | ○    | ○    | ○    |
| 筋かい耐力壁       | ○    | ○    | ○    | ○    |
| 筋かい以外の耐力壁    | ×    | ○    | ○    | ○    |
| 開口部（小壁のモデル化） | ×    | ×    | ○    | ○    |
| 接合部の変形       | ×    | ×    | ×    | ○    |
| 水平構面の変形      | ×    | ×    | ×    | ○    |



一度に計算！

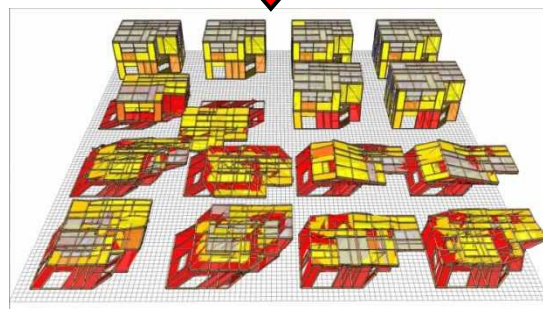


図-8 強さの異なる木造住宅のパラメトリック・スタディ

カンファレンスではwallstatとCEDXMの連携の状況、民間企業におけるwallstatの利活用事例の紹介が行われ、著者からwallstatとCEDXMの連携による耐震シミュレーションについて説明があった。ハウスメーカー、工務店、CADベンダー、大学、研究機関等から参加者がおり、討議の中では、今後の連携の展開の可能性等について活発な議論がかわされた。このカンファレンスを契機に今後、具体的な実証事例が提案されることなどが期待される。

## 6. おわりに

本研究による成果は、前述のURLから無償でダウンロード可能であり、動画等はyoutubeで公開されている(youtubeで「wallstat」を検索)。今後もユーザーや開発者の意見を反映させて改良を続けていきたい。

# Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成による 高精度広域雨量観測

山地 秀幸<sup>1</sup>・川崎 将生<sup>1</sup>・土屋 修一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 河川研究部 水循環研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

国土交通省では、近年、増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、河川管理や防災活動等に役立てるために、39基のXバンドMPレーダ雨量計で構成される「XRAIN」による高解像度かつリアルタイムのレーダ雨量情報を提供している。しかし、都市部と比べて山間部ではXRAINの観測範囲外の領域が多く、また、使用する電波の波長帯の特性から強雨域では観測不能となる領域が発生する場合があった。

本研究は、レーダ雨量計による雨量観測の概要を述べるとともに、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成によるレーダ雨量情報の高度化について報告するものである。

キーワード 豪雨監視、雨量観測、CバンドMPレーダ雨量計、XRAIN

## 1. はじめに

近年、増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、適切な河川管理や防災活動等に役立てるために、国土交通省では2010年より「XRAIN」によるレーダ雨量情報を提供している。これまでのXRAINは、39基のXバンドMPレーダ雨量計で構成されており、高解像度(250mメッシュ)でほぼリアルタイム(観測頻度1分、観測から配信に要する時間が1~2分)の雨量情報を配信していた。しかし、都市部と比べて山間部ではXRAINの観測範囲外の領域が多く、また、使用する波長帯の特性から強雨域では電波が大きく減衰(降雨減衰)、観測不能となる領域(電波消散域)が発生する場合があった。

この課題を克服するために、国土技術政策総合研究所では、XバンドMPレーダ雨量計と、降雨減衰が小さく電波消散域が発生し難いCバンドレーダ雨量計の連携技術について検討した。その結果、Cバンドレーダ雨量計を高性能化(MP化)したCバンドMPレーダ雨量計で観測されたレーダ雨量を、XバンドMPレーダ雨量計で観測されたレーダ雨量と組み合わせることで、XRAINの配信エリア拡大と従来のXRAINで問題視されていた電波消散域の発生を抑えた観測の安定化を可能にした。本研究では、レーダ雨量計による雨量観測の概要を述べるとともに、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成によるレーダ雨量情報の高度化について報告する。

## 2. レーダ雨量計による雨量観測



図-1 Cバンドレーダ雨量計(赤城山)

レーダ雨量計とは、国土交通省水管理・国土保全局及び道路局が所有している降水量観測に特化したレーダを指す。レーダ雨量計は回転するアンテナから指向性をもったパルス状の電波を送受信することで、レーダ雨量(降水強度)を算出しており、地上雨量計が設置されていない場所でも、降水量を面的に把握することができる。

### (1) Cバンドレーダ雨量計

Cバンドレーダ雨量計は1976年に赤城山でレーダ雨量計第1号機としての運用が開始されて以来(図-1)、2016年現在で26基設置されており、全国をカバーするレーダ雨量情報(最小観測面積1kmメッシュ、観測頻度5分、観測から配信に要する時間5~10分)を配信している。

Cバンドレーダ雨量計は、単偏波の電波を送受信することで算出されるレーダ反射強度 $Z$ を用いてレーダ雨量 $R_r$ を算定する $Z$ - $R$ 方式(式2a)を採用している。

$$Z = B \cdot R_r^\beta \quad (\text{式2a})$$

レーダ反射強度Zからレーダ雨量R<sub>r</sub>を算定するには、レーダ反射強度Zとレーダ雨量R<sub>r</sub>を結びつけるパラメータであるB及びβの値を定める必要があるが、雷雨や台風等の降雨タイプで異なり、また時々刻々と変化するため一義的に定めることができず、定量的にレーダ雨量を算定することが難しい。このため、地上雨量計で得られた雨量とのキャリブレーションを即時的に行うことで、面的な定量性を確保している。Cバンドレーダ雨量計の観測頻度が5分となるのは、地上雨量計とのキャリブレーションに要する時間によるところが大きい。

## (2) XバンドMPレーダ雨量計

Cバンドレーダ雨量計により、日本広域を対象とした豪雨監視が可能になった。しかし、2008年7月、兵庫県の新潟川では集中豪雨による河川水位の急激な上昇により、河川にいた5名が流され亡くなるという水難事故が発生し、また、石川県の浅野川では集中豪雨による氾濫で浸水被害が生じた。相次ぐ水難事故及び水災害を契機に、ゲリラ豪雨に対応した豪雨の監視体制の強化が求められた。そこで、当時のCバンドレーダ雨量計によるレーダ雨量情報の高度化（高頻度更新化、高解像度化）を実現するために、XバンドMPレーダ雨量計の導入が進められ、2016年現在、XバンドMPレーダ雨量計は39基設置されている（図-2）。

XバンドMPレーダ雨量計は、水平偏波と垂直偏波の2種類の電波を送受信することで、レーダ反射強度Zだけでなく、水平偏波及び垂直偏波の位相差の距離変化K<sub>dp</sub>を用いてレーダ雨量R<sub>r</sub>を算定することができるK<sub>dp</sub>方式（式2b）を採用している。

$$R_r = \alpha \cdot a1 \cdot Kdp^{a2} \quad (式2b)$$

ここに、 $\alpha$ ：雨量算定補正係数

$a1$ 、 $a2$ ：理論的に算出した係数

K<sub>dp</sub>方式を採用することで、地上雨量による補正を用いずとも定量的な雨量観測が可能であり、ほぼリアルタイムにレーダ雨量情報（最小観測面積250mメッシュ、観測頻度1分、観測から配信に要する時間1～2分）を配信することができる。

## (3) CバンドMPレーダ雨量計

Cバンドレーダ雨量計（最大観測範囲300km）はXバン



図-2 XバンドMPレーダ雨量計（新横浜）



図-3 CバンドMPレーダ雨量計（羅漢山）

ドMPレーダ雨量計（最大観測範囲80km）と比べて観測範囲が広いものの、1種類の単偏波を用いており観測精度が劣っている。そこで、国土交通省水管理・国土保全局では機器更新のタイミングで、K<sub>dp</sub>方式を採用したCバンドMPレーダ雨量計に順次更新している（図-3）。

## (4) レーダ雨量計の観測精度

2012年7月に発生した九州北部豪雨の事例を対象に、Cバンドレーダ雨量計、XバンドMPレーダ雨量計及びCバンドMPレーダ雨量計のレーダ雨量画像を図-4に示す。CバンドMPレーダ雨量計はXバンドMPレーダ雨量計に見られる強雨域での電波消散による観測不能領域が見られず、XバンドMPレーダ雨量計と雨域形状、雨量分布が概ね一致していることが確認された。また、地上雨量計（下関地点）、XバンドMPレーダ雨量計（古月山レーダ）、Cバ

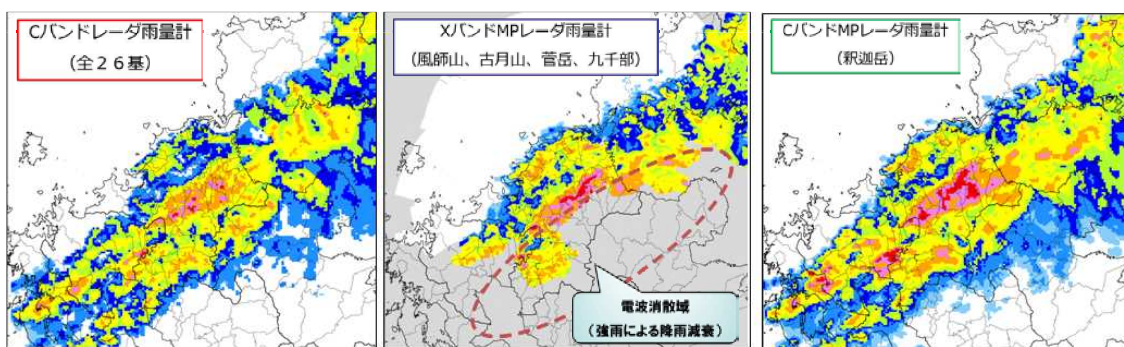


図-4 九州北部周辺地域におけるレーダ雨量画像（2012年7月 九州北部豪雨）

ンドMPレーダ雨量計（釈迦岳レーダ）の雨量時系列を比較したところ、図-5に示すように、降雨減衰による電波消散の影響で古月山レーダでは観測されていない時間帯があるが、釈迦岳レーダでは全ての時間帯で雨量が観測されており、また、観測精度も古月山レーダと同等程度であることが確認された。

### 3. MPレーダ雨量計の合成技術

XバンドMPレーダ雨量計とCバンドMPレーダ雨量計（以下、MPレーダ雨量計）が連携することによって、降雨減衰による電波消散域を補間できると同時に、観測条件等からCバンドMPレーダ雨量計によってXバンドMPレーダ雨量計より高精度な観測が可能な範囲はCバンドMPレーダ雨量を反映することで、より高精度な雨量情報の提供が可能となると考えられる。そこで、国土技術政策総合研究所ではXバンドMPレーダ雨量とCバンドMPレーダ雨量の合成技術について検討している。

#### (1) Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成

複数のXバンドMPレーダ雨量計で観測されたXバンドMPレーダ雨量はクレスマン内挿法を用いて合成される。クレスマン内挿法のイメージ図を図-6に示す。各XバンドMPレーダ雨量計で観測されたレーダ雨量は、XバンドMPレーダ雨量計の観測特性、合成メッシュとXバンドMPレーダ雨量計の距離、観測高度等に応じて重み付けがされており、XバンドMPレーダ雨量の重み付け平均値として、XバンドMPレーダ雨量計の合成雨量が算出される（式3a、式3b）。

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^N D_i W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (式3a)$$

$$W_i = W_h \cdot W_v \cdot W_s \quad (式3b)$$

ここに、 $G_j$ ：合成メッシュに内挿される合成雨量  
 $D_i$ ：極座標上のレーダ雨量  
 $W_i$ ：内挿に用いる重み係数  
 $W_h$ ：水平重み関数  $W_v$ ：鉛直重み関数  
 $W_s$ ：距離重み関数

XバンドMPレーダ雨量だけでなく、CバンドMPレーダ雨量計で観測されたCバンドMPレーダ雨量についても、クレスマン内挿法で合成するにあたり、XバンドMPレーダ雨量計とCバンドMPレーダ雨量計ではKdp方式の適用範囲や観測範囲が異なることから、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量を精度良く合成するためには、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量計の観測精度に応じて適切に重み付け

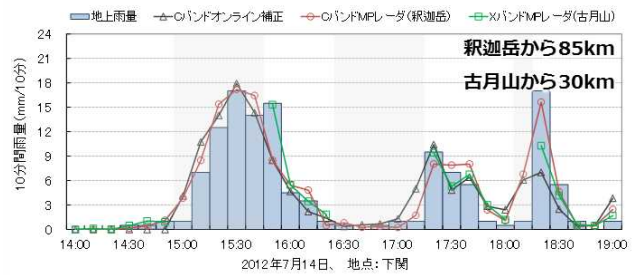


図-5 雨量時系列（2012年7月 九州北部豪雨）

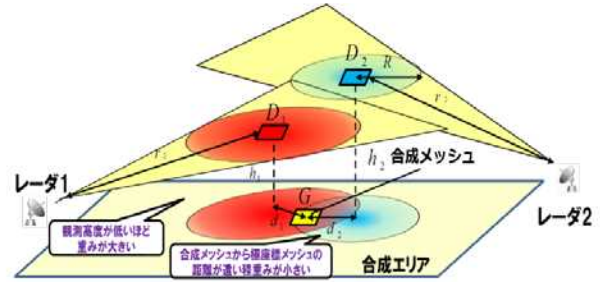


図-6 クレスマン内挿法のイメージ

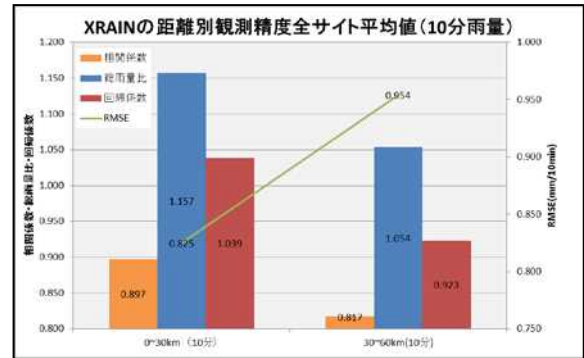


図-7 XバンドMPレーダ雨量計の距離別の精度指標

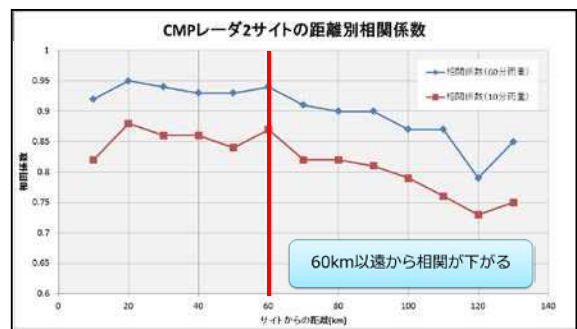


図-8 CバンドMPレーダ雨量計の距離別の相関係数

をして合成する方法を検討する必要がある。このため、MPレーダ雨量計について、距離別に観測精度を検証し、MPレーダ雨量計からの距離と観測精度の関係を明らかにした上で、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量を精度よく合成するための重み付けの方法を開発した。

図-7は平成25年度の35基のXバンドMPレーダ雨量計における距離別の精度指標（相関係数、RMSE、総雨量比、回帰係数）の平均値を示している。図-7を見ると、0～30kmの精度に比べて30～60kmの相関係数が低く、RMSEが増加しており、観測精度が下がっていることが分かる。

一方、CバンドMPレーダ雨量計（城ヶ森山、釈迦岳）では、図-8に示すように、60km以遠で相関係数が下がる傾向にあることが確認された。これらの結果を受け、図-9、図-10に示すように、XバンドMPレーダ雨量計とCバンドMPレーダ雨量計で、クレスマン内挿法に適用する距離重み関数  $W_s$  を変えている。

### (2) MPレーダ雨量計による合成雨量の精度検証

2014年8月に発生した台風12号におけるXバンドMPレーダ雨量計のレーダ雨量画像とMPレーダ雨量計の合成雨量画像（図-11）を見ると、合成によりXバンドMPレーダ雨量計の電波消散域がカバーされていることが確認できる。また、地上雨量、XバンドMPレーダ雨量、MPレーダ雨量計の合成雨量の時系列を比較した結果（図-12）、降雨減による電波消散の影響でXバンドMPレーダ雨量計による観測では過小となっていた強雨を捉えることができ、雨の降り始めから降り終わりに至るまでMPレーダ雨量計による観測結果が地上雨量計による観測結果とほぼ一致していることが確認された。

### (3) XRAIN（拡大試行版）による雨量情報

2016年7月より、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成技術の成果を活用したXRAIN（拡大試行版）の試験運用が開始され、XRAIN（拡大試行版）による雨量情報を「川の防災情報」<sup>1)</sup>で閲覧することができるようになった。XRAIN（拡大試行版）のホーム画面を図-13に示す。XRAIN（拡大試行版）による雨量情報は最小観測面積が250mメッシュ、観測頻度が1分、観測から配信に要する時間が1～2分程度で、従来のXRAINの観測性能と同等程度である。また、観測対象領域が日本全域に拡大され、広域の雨量情報を配信することが可能になった。

## 4. おわりに

本稿では、レーダ雨量計による雨量観測の概要を述べるとともに、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成によるレーダ雨量情報の高度化について報告した。Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成により、より広いエリアを対象に、高解像度かつリアルタイムな雨量情報の配信が可能になるとともに、従来のXRAINで問題視されていた電波消散域の発生が抑えられ、レーダ雨量計による雨量観測の安定性が向上した。

### 参考文献

- 1) 「川の防災情報」：  
<http://www.river.go.jp/>

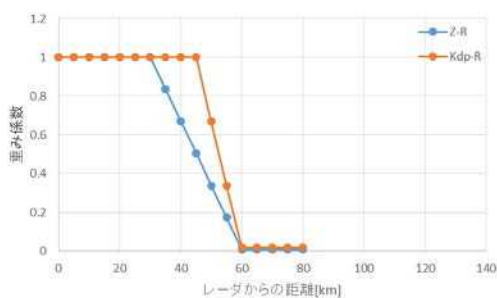


図-9 XバンドMPレーダ雨量計の距離重み関数

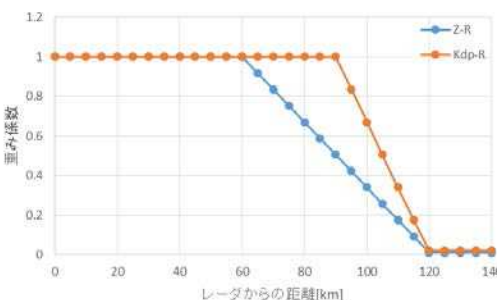


図-10 CバンドMPレーダ雨量計の距離重み関数

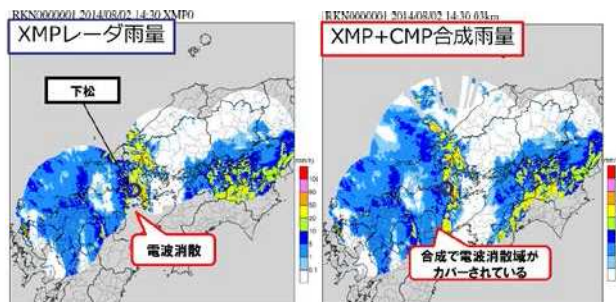


図-11 レーダ雨量画像（2014年8月）

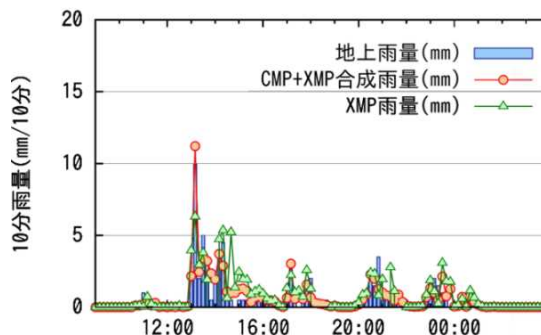


図-12 雨量時系列（2014年8月）

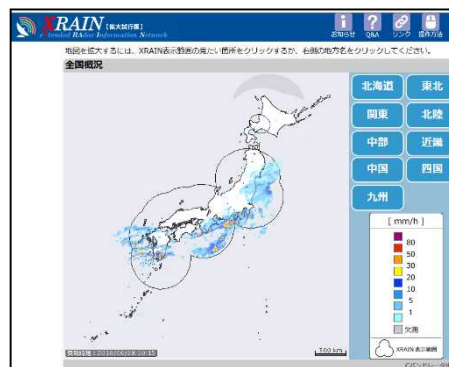


図-13 XRAIN（拡大試行版）のホーム画面

# 日々供用条件下における誘導路大規模改修について[羽田空港初の高強度PRC版の採用]

荒井 淳希

関東地方整備局 東京空港整備事務所 第一建設管理官室 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1)

東京国際空港の第1ターミナル前面に位置する無筋コンクリート舗装版で作られたエプロン誘導路部において、舗装版下の埋立て地盤の不等沈下が発生し、エプロン誘導路の表面排水勾配が変化し段差が生じていた。東京国際空港では航空機の運用上エプロンを24時間閉鎖しての施工ができないため、夜間の限られた閉鎖時間帯で施工を行うことができる高強度PRC版での施工を採用し、精度の高い施工と確実な施工時間の遵守を行い、日々供用に支障を与えることなくエプロン誘導路の大規模な改修を実施した。

キーワード 東京国際空港、エプロン誘導路改修、高強度PRC版

## 1. はじめに

空港には、航空機への旅客の搭乗や貨物の積み下ろしをするために航空機が駐機するエプロンと呼ばれる施設がある。

東京国際空港の第1ターミナルビル前面に位置する第1旅客ターミナル地区(写真-1)では、エプロンと誘導路をつなぐ、エプロン誘導路部において、無筋コンクリート舗装版下の埋立て地盤の不等沈下により、段差が発生し、表面排水勾配が変化したため、(写真-2)に示す区域において、大規模なコンクリート舗装の改修を行う必要が生じた。

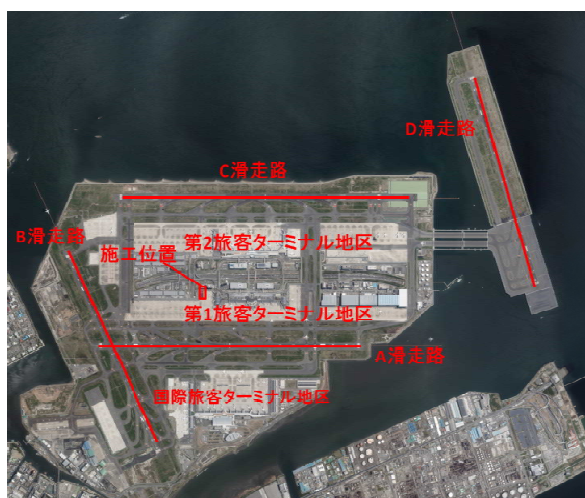


写真-1 施工位置図

東京国際空港で過去に実施したコンクリート舗装の改修工事では、エプロンを終日閉鎖して施工を行ってきた。

しかし、航空需要の拡大により、飛行機を駐機するエプロンを24時間閉鎖することができないため、国内線が利用しない23:00～5:00までの時間を活用し、短い時間で、コンクリートの舗装改修を実施することが求められた。

## 2. 工事概要

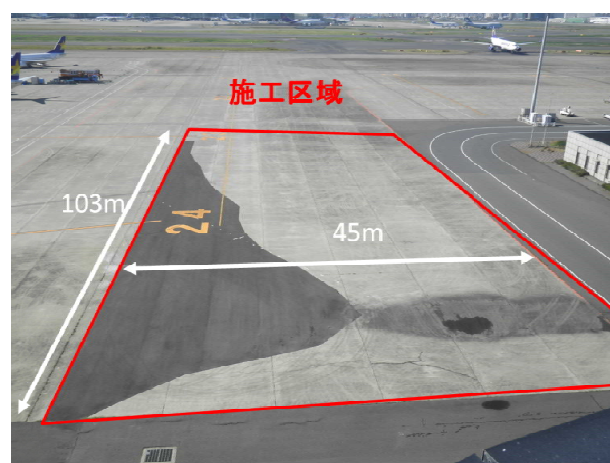


写真-2 施工区域図

エプロン誘導路の改修工事は、夜間閉鎖中(23:00～



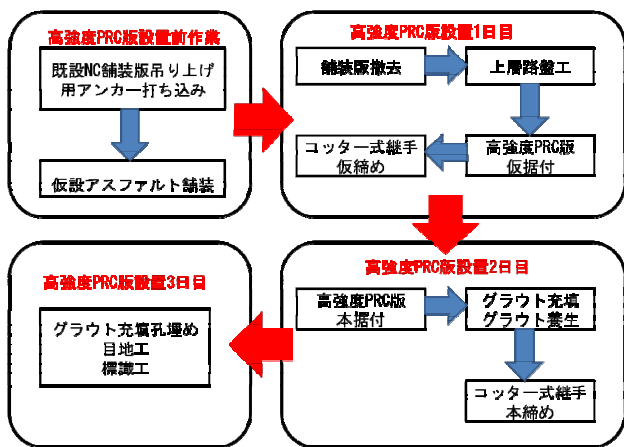


図-1 施工フロー

5:00) の限られた時間帯のみの施工であり、日中は航空機が使用することとなる(以下、日々供用という)。日々供用を厳守するため、確実な工法と施工サイクルの確立が必要となる。

このため、日々供用を可能とし、短い施工時間でも対応しやすい高強度PRC版にて、東京国際空港で初めて施工することになった。

本工事の施工数量と施工フロー(図-1)を以下に示す。

工事工期：2014年10月15日～2015年11月13日  
 無筋コンクリート舗装版撤去：4,635m<sup>2</sup>  
 高強度PRC版(1枚当たり約7.5m×2.5m)据付：合計252枚

### 3. 高強度PRC版とは

高強度PRC版(写真-3)は、高強度コンクリート(設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>)と圧縮鉄筋・引張鉄筋を部分的に連結させたラチストラス鉄筋(写真-4)により構成され、版の剛性が高く変形しにくい構造となっている。

また、高強度PRC版同士の連結には、コッター式継手(図-3)を用いている。コッター式継手は、H型金物をC型金物に挿入し、ボルトを締め付けることで目地部だけにプレストレスが導入され、隣り合う版を連結する構造となっている。

コッター式継手のボルト、H型金物を取り外せば、版の部分交換を行うことも可能である。また、沈下時には継手を外して版のジャッキアップをすることも可能である。

本工法は、コッター式継手を締め付けるだけで、高強度PRC版を一体化できるため、仮据付時でもエプロン誘導路を開放できる。

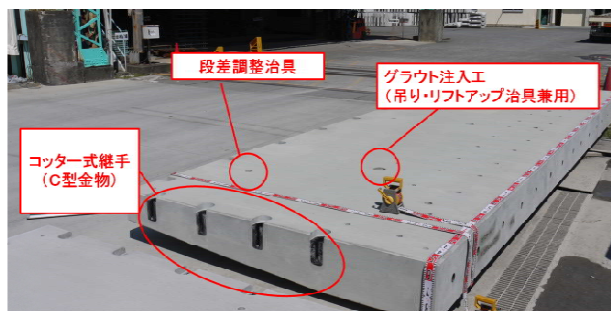


写真-3 高強度PRC版



写真-4 ラチストラス鉄筋

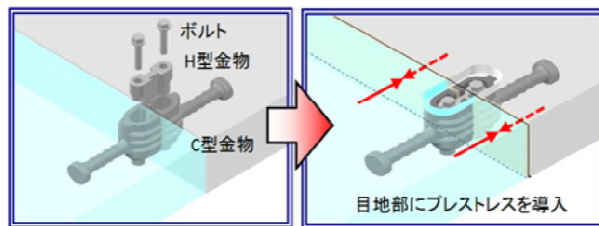


図-3 コッター式継手

### 4. 施工方法

本工事は施工フロー(図-1)のとおり、高強度PRC版を設置する前に既設のコンクリート舗装版に吊り上げ用の金具を設置し、事前に計画高まで、アスファルト舗装による仮設嵩上げを実施する。

高強度PRC版の設置の施工手順としては、(1日目)既設コンクリート舗装版撤去及び上層路盤新設・高強度PRC版仮置き、(2日目)裏込グラウト及び目地グラウト充填(3日目)跡埋めモルタル等仕上げ工の3日サイクルで行うよう計画した。

高強度PRC版設置の施工方法は下記のとおりである。

#### (1) 既設コンクリート舗装版撤去

事前に計画高まで仮設嵩上げたアスファルト及び既設コンクリート舗装版の撤去(写真-5)を実施する。

既設コンクリート舗装版については、コンクリート舗装版に事前に取り付けた吊り上げ金具を用い、ラフター



写真-5 既設コンクリート舗装版撤去



写真-7 コッター式継手仮締付け

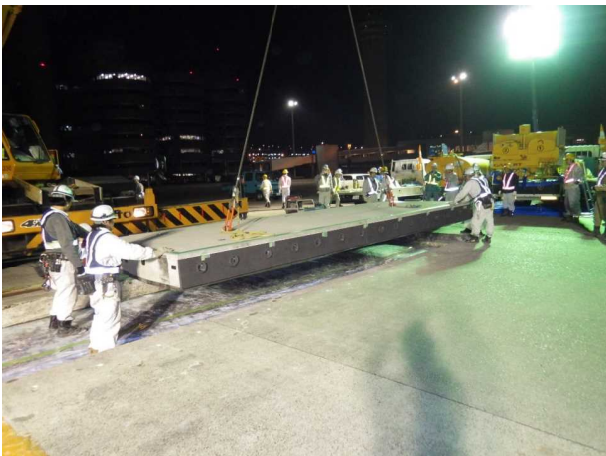


写真-6 高強度PRC版設置

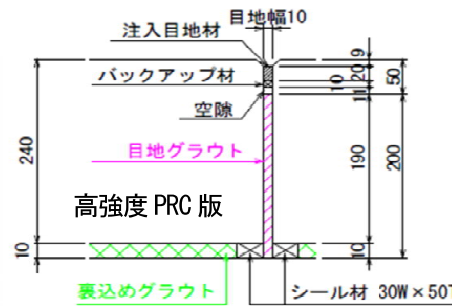


図-4 目地構造断面図

クレーンで吊り上げ、撤去を実施する。

## (2) 上層路盤敷設

既設コンクリート舗装版を撤去後、計画している地盤高に合わせるため、上層路盤の高上げを実施する。

敷設はブルドーザ及びバックホウで行い、初期転圧をタンデム振動ローラ、二次転圧にタイヤローラを用いて転圧締め固めを行う。

## (3) 高強度PRC版設置

高強度PRC版を設置する前に、裏込グラウトが十分に拡散するようにビニールフィルムを敷設し、その上に高強度PRC版を設置(写真-6)する。

敷設後、コッター式継手の仮締め(写真-7)を行い、夜間施工1日目の施工は終了となる。

夜間施工2日目は、高強度PRC版の高さ調整を行い、裏込グラウトや目地グラウトの注入(図-4)を実施し、その後、コッター式継手の本締めを行う。3日目は、裏込めグラウトの注入孔の跡埋めや目地工を実施し、仕上げを行う。

## 5. 施工上の課題と工夫

### (1) 施工上の課題

本工事では、エプロンの閉鎖時間の遵守が必要であり、なおかつ、高強度PRC版据付の段差の許容値(5mm)を満足しない場合に日々供用ができない。このため、許容値(5mm)を満足する施工が課題であり、精度の高い施工が必要となった。

日々供用に支障を与えないための施工として、夜間施工1日目の既設舗装版撤去及び上層路盤新設、高強度PRC版仮置き施工手順が特に重要である。

高強度PRC版の施工においては、特に下記の項目について細心の注意を払い、施工することとした。

#### 1) 既設コンクリート舗装版撤去

既設舗装版撤去(吊り上げ)時においては、隣接する舗装版に損傷を与えないよう慎重かつ短時間で実施する必要がある。

#### 2) 上層路盤敷設

上層路盤敷設においては、高強度PRC版設置1日目の中で最も施工に時間がかかるため、エプロンの閉鎖時間を確実に遵守できるよう、施工方法を工夫し、より短時間で施工できるようにする必要がある。



写真-8 油圧ジャッキを用いた地切り

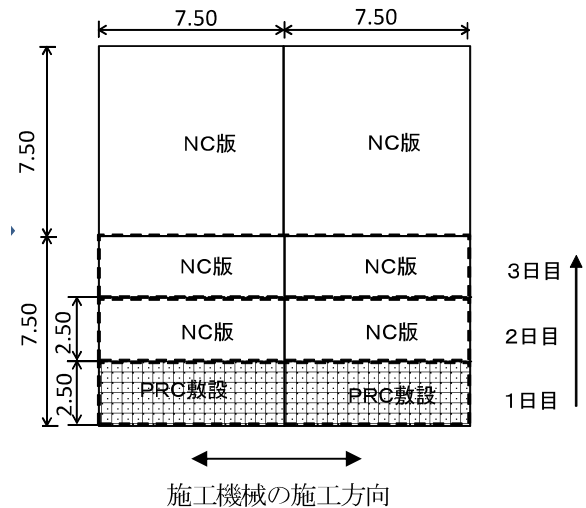


図-5 高強度 PRC 版の施工順序



写真-9 段差解消スロープ



写真-10 上層路盤仕上げ用高さ調整器具

また、上層路盤の高さ調整を確実に行わないと高強度 PRC版仮置き時に段差が生じることとなる。段差許容値は 5mm以内のため、高精度に敷設を行う必要がある。

## (2) 施工上の課題

### 1) 既設コンクリート舗装版撤去

既設舗装版撤去（吊り上げ）前においては、油圧ジャッキ（写真-8）を用いて、既設舗装版下の地切りを実施することにより、スムーズに吊り上げ作業ができるよう工夫した。これにより、本工事では隣接する舗装版を損傷することなく施工できた。

### 2) 上層路盤敷設

上層路盤敷設時では、下記のとおり、施工時間の短縮や敷均し高さ管理を工夫した。

#### a) 施工時間の短縮

敷均しの施工機械がスムーズに入れるよう、段差解消スロープを作成した。（写真-9）

また、施工方向を（図-5）のとおりとし、施工機械の施工性を向上させるため工夫した。

上記のとおり、施工方法を工夫したことにより、施工時間を5時間30分から4時間50分まで、40分程短縮することができた。

#### b) 敷均し高さ管理の工夫

仮設嵩上げアスファルトの舗装面と上層路盤表面の高さの差が設計上PRC版の厚さと一致するよう、仕上げ用高さ調整器具（写真-10）を用いて測定しながら、上層路盤の敷均しを行うことにより、上層路盤の敷均し高さ管理を徹底し、許容値以内に精度良く施工することができた。

また、施工中に発生した想定外の事象として、既設コンクリート舗装版を撤去した際に、既設上層路盤が劣化していることが判明した。施工時間が限られている中、新設上層路盤施工量が大幅に増えたため、急遽1日の施工予定枚数を減らすことにより、供用開始時間に間に合わせる事ができた。

## 6. おわりに



写真-11 施工後

今回の工事では、高強度PRC版設置については、出来形

精度及び適切な作業時間の管理を実施し、日々供用に答える、確実な施工を行うことができた。

羽田空港を利用する旅客数は国内最大であり、日々供用ができなかった場合の損失は甚大となる。このため、施工中に想定外の不具合が発生した場合でもリカバリーし、日々供用ができるよう、あらゆる事態を想定・準備しなければならない。

また、今回の施工区域では、23:00～5:00までのエプロンの閉鎖であったが、東京国際空港は、今後発着回数の拡大に対応していく方針であるため、エプロンの閉鎖時間がさらに短縮される可能性がある。これに対応していくためにもさらなる施工サイクルの効率化を検討することが今後の課題である。

本工事の実績が今後の工事の参考として活用され、日々供用という要求に応えるための一助となれば幸いである。



### 3. 施工の流れ

#### (1) 施工前

今回施工する発進立坑は、「いろは呑龍トンネル」の最下流に位置する京都府洛西浄化センター内に施工する。

シールドマシンを発進し、雨水南幹線が完成すれば、この発進立坑を呑龍ポンプ場の一部として利用する。



写真-1 発進立坑の施工場所

#### (2) 刃口金物据付及び影響遮断矢板

発進立坑を深さ34.8mまで掘削するための刃口金物（カッターのような金物）を設置する。刃口金物の周囲には、圧入沈下させるために使用するアースアンカー（深さ48.5m、定着長14m、12本）を施工する。

また洛西浄化センターの水処理施設が近接しており、施設への影響を防ぐため、影響遮断矢板を打設する。



写真-2 刃口金物据付

#### (3) 足場・型枠組立

刃口金物の上に鉄筋コンクリートを打設するため、作業足場及び型枠を設置する。



写真-3 足場・型枠組立

#### (4) 鉄筋組立

設置した型枠内部に鉄筋を配筋する。なお、シールドマシンが発進し開口する部分には、鉄筋の代わりに鉄筋と同じ形状の炭素繊維を設置する。



写真-4 鉄筋組立

#### (5) コンクリート打設

型枠内部に鉄筋を配筋した後、コンクリートを打設する。コンクリートの打設は、ロッド内に目地ができないように1日で、1ロッド約400m<sup>3</sup>を打設する。



写真-5 コンクリート打設

#### (6) 掘削・沈下

打設した円筒形のコンクリート（ケーソン）の上部に圧入ジャッキを12箇所設置し、圧入ジャッキにより、圧入沈下させると同時にクラムシェルでケーソン内を掘削する。ケーソン内を掘削すると地下水が出るが、排水せず、そのまま掘削する。

（沈下速度は、平均約40cm/日）



写真-6 掘削・沈下

## (7) 壁面清掃

(3)～(6)を6回繰り返し、6ロッド沈下させた後、ケーソン内部に水中コンクリートを打設する。水中コンクリートの施工後、内部の水を排水しながら、壁面を清掃し、壁に付着した泥等を落とす。壁面清掃は、ケーソン内部の排水による水位低下を利用し、フロート（いかだ）を浮かべて実施する。



写真-7 壁面清掃



写真-9 オープンケーソン工法

## (8) 完成

ケーソン内部の排水及び壁面清掃の完了後、底板コンクリートを施工し、発進立坑が完成する。



写真-8 発進立坑（完成）

## 4. 現場のポイントと使用した工法・特徴

### (1) オープンケーソン工法

地下約35mまでコンクリート構造物を構築するので、水圧や土圧の影響が大きく、本来なら大規模な土留等の仮設構造物が必要である。そこで、今回は、ロッドごとに地上でケーソンを構築し、荷重を载荷しながら地中にケーソンを沈下させ、所定の深さに達した後、中詰めコンクリートを打設する大規模な仮設構造物が不要なオープンケーソン工法で施工した。オープンケーソン工法でケーソン内部を掘削すると地下水が出てくるが、地下水を排水せずそのままの状態掘削することで、ボーリング、ヒービング、盤ぶくれ等の発生を抑制した。

その結果、硬い地盤と高い水圧であったが、オープンケーソン工法により大規模な土留等の仮設構造物を施工せずに、ケーソンを沈下することができた。

### (2) 影響遮断矢板

掘削箇所が洛西浄化センターの水処理施設に近接しており、水処理施設が沈下、傾斜すれば、適切な下水道処理ができなくなる可能性がある。そこで、影響遮断矢板（深さ10m）をケーソン周囲に設置し、周辺構造物への影響の軽減を図った。工事完了後、周辺地盤変状を把握するために設置した沈下計及び傾斜計で、周辺への影響がないことを確認できた。



写真-10 影響遮断矢板

### (3) ケーソン沈下管理システムによる情報化施工

今回の施工現場である洛西浄化センターは桂川に隣接しており、粘土層などの軟弱地盤があり、さらに施工深度が地下約35mと深いことから、N値5～60と幅広い土

質が分布している状況で、ケーソンを傾けず沈下させる必要がある。そこで、自動追尾トータルステーションやジャッキ圧力計などで取得したデータをリアルタイムにまとめ、ケーソン沈下管理システム（ICT）で情報を一元管理する。そのデータを瞬時にケーソン姿勢制御として活用することで、沈設精度の向上を図る。

その結果、軟弱地盤や地盤の変化による不等沈下を防ぎ、ケーソンを傾けず沈下することができた。

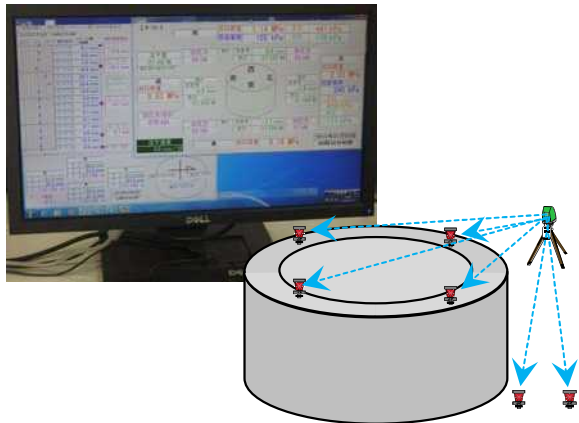


図-2 ケーソン沈下管理システム（ICT）

#### (4) 特殊突矢及び高性能滑材による沈下促進

地下17m以深からN値60程度の硬い砂礫層となることから、ケーソンの沈下が難しく、沈下が困難となる可能性がある。そこで、湾曲した形状の鋼材先端に幅広鋼を添付した突矢で硬い地盤をほぐす特殊突矢を使用した。

さらにケーソン躯体と接している地盤との周面摩擦力を低減するため、高性能の滑材を投入した。その結果、N値60程度の硬質地盤であったが、沈下速度約0.4m/日と普通地盤（N値10程度で約0.4m/日～0.5m/日）と同程度の沈下ができた。



写真-11 特殊突矢



写真-12 高性能滑材

#### (5) パイプクーリングによるコンクリート水和熱の低減

本ケーソンと躯体コンクリート（厚さ1.5m）は、マスコンクリート（厚さ80cm以上）であり、水和熱（セメントと水が反応して凝固硬化する時に発生する熱）により温度が高くなり、温度ひび割れの発生が懸念される。そこで、鉄筋配筋時にあらかじめ設置した鋼管（内径25mm）に冷却水（約17度）を流すことで水和熱の低減を図るパイプクーリング工法を使用する。無対策の場合、解析で最高温度約85度のところ、パイプクーリングにより平均約60度となり、その結果、温度ひび割れの発生を抑制することができた。

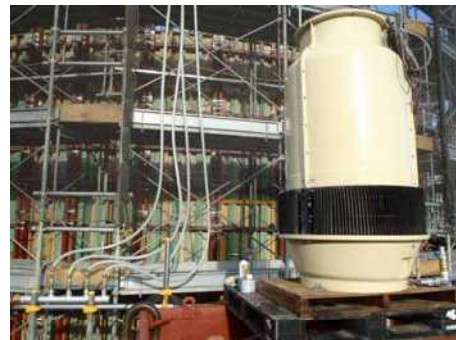


写真-13 パイプクーリング

#### (6) コンクリート打設管理システムによる情報化施工

ケーソンのロッド内に打継目を設置することができないので、1ロッド約400m<sup>3</sup>を連続して1日で打設する必要がある。そこで、生コン工場、現場事務所、打設現場をネットワーク化し、PCやタブレットで一元管理した情報をリアルタイムに関係者で共有するコンクリート打設管理システム（ICT）を導入する。これにより、コンクリートポンプ車の位置、運搬時間、搬入及び打設の時間、台数等をリアルタイムに管理し、情報共有することでコンクリートポンプ車や打設の待ち時間等のロスタイムを減らすことができる。その結果、1ロッド約400m<sup>3</sup>



(生コン車96台/日)を1日で打設することができ、コールドジョイント等の発生がないコンクリート構造物とすることができた。

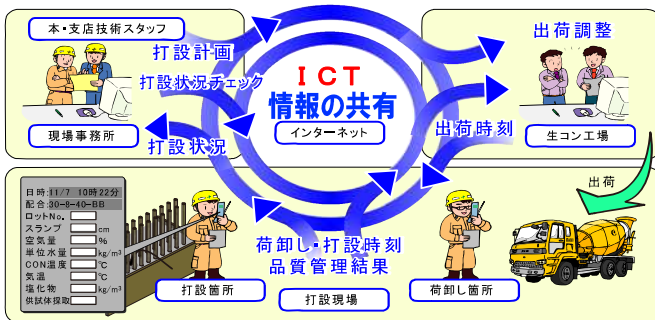


図-3 コンクリート打設管理システム (ICT)

### (7) 特殊止水材の設置と止水対策

高い水圧 (地下約35m) により、ロッド間やロッドと底板コンクリートの間等から漏水する可能性がある。

そこで、一つ目の対策として、ケーソン駆体の各ロッド間に標準で設置する塩ビ止水板に加えて、膨張する止水材であるポリニットロープを設置する。ポリニットロープは、コンクリート中の水分により、膨張し、コンクリート表面の凹凸になじみ、パッキン効果で止水効果を向上させる。またポリニットロープの網目から出るベントナイトにより、みず道が出来ても目詰まり効果で塞ぐことができる。

二つ目の対策として、第1ロッドの刃口金物部によって固定する磁着式止水材を設置する。この止水材は、水に触れると膨張し、刃口金物部と底板コンクリートの間からの漏水を防ぐ。

三つ目の対策として、コンクリートのロッドの継目及びセパ穴にガスファルト (ゴムアスファルト系塗膜防水剤) を塗布し、漏水を防ぐ。

このように高い水圧に対して、様々な止水対策を施工した結果、漏水を抑制することができた。



写真-14 ポリニットロープ施工状況

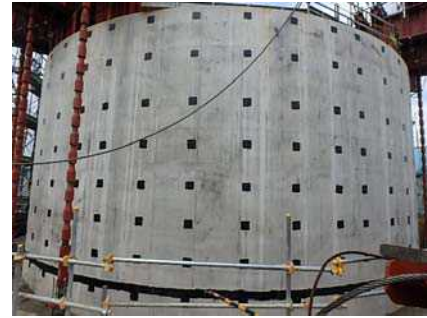


写真-15 ガスファルト施工後

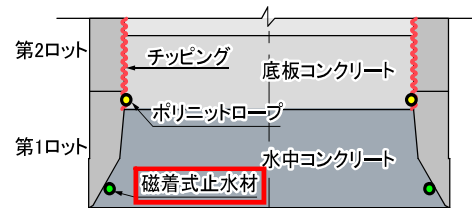


図-4 磁着式止水材

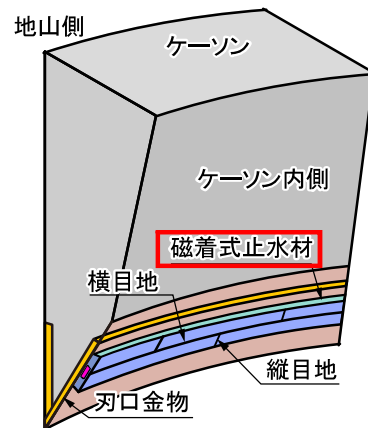


図-5 磁着式止水材 (拡大)

## 5. ICTとリアルが融合した現場の実現と効果

地下約35mまでコンクリート構造物を構築する工事であり、水圧や土圧の影響が大きく、大規模な土留等の仮設構造物が必要であったが、大規模な仮設を必要としないオープンケーソン工法を標準として、情報化施工 (ICT) と特殊技術で施工した。

自動化した計測器、機械、構造物などをネットワーク化 (IOT) することで、情報をリアルタイムに集約することが可能となり、その情報を工場、現場事務所、施工現場で共有した。さらにその情報を活用するとともに、特殊突矢やパイプクーリングなどの特殊技術を組み合わせることで、ICTとリアル融合した現場を実現し、高効率・高精度な施工を行うことができた。

その結果、コスト縮減として約2億円、工期短縮として約4ヶ月の効果があり、さらにICTの活用による安全性の向上、省力化等を図ることができた。

## 6. おわりに

雨水南幹線シールド発進立坑は、地下約35mまで掘削する工事であり、硬質地盤や水圧に対応するため、多くの技術を活用し、問題なく工事が完成したところである。

現在、雨水南幹線管渠を今回の発進立坑からシールドマシンにより掘削しているところであり、2021年の供用開始を目指している。

近年になって、ゲリラ豪雨、スーパー台風、線状降水帯のように局地化・集中化・激甚化する豪雨が増えており、さらに毎年のように「観測史上最大の雨量」、「過去最大の時間雨量」と報道されている。計画規模を超えるような雨量に対応するのは、困難であり、府民の防災意識の向上や自助・共助による減災がますます重要となっている。

府民の防災意識の向上等のため、浸水対策事業の効果をPRし、さらに施設の限界を知っていただくことが必要であるが、「いろは呑龍トンネル」は、地下にあるので、普段、目で見ることができない。そのため、いろは呑龍トンネルのマスコットキャラクター「呑龍太郎」を活用しながら、大人から子供まで楽しく、身近にそして、親しみやすい浸水対策事業のPRや見学会を実施している。この「呑龍太郎」は、2014年全国下水道マスコット総選挙で全国1位となり、さらに下水道展の出展者表彰として、京都府が優秀賞を受賞したところであり、事業のPRや公共事業のイメージアップの取り組みを認められたところである。

今後も府民や来訪者の安心安全のため、浸水対策事業の必要性をPRするとともに、ハード対策とソフト対策を進めていく。

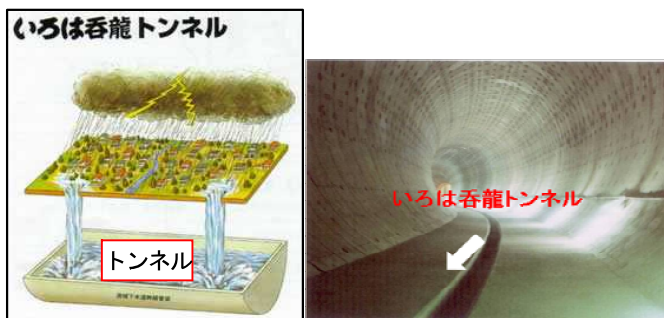


図-6 地下の「いろは呑龍トンネル」



写真-16 今回工事のイメージアップ (呑龍太郎)



図-7 いろは呑龍トンネルマスコットキャラクター (呑龍太郎)



写真-17 呑龍太郎によるPR (下水道展)



**【2014年全国下水道マスコット総選挙：全国1位】**  
**【2014年下水道展の出展者表彰：優秀賞】**

写真-18 下水道展での表彰式



写真-19 「いろは呑龍トンネル」見学会

# 広島港宇品ふ頭岸壁（1万トバース）における最新の維持管理手法の提案について

本山 一平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 調査課  
(〒730-0051 広島県広島市中区大手町3-13-18松村ビル5F)

本報告は広島港宇品ふ頭再編改良事業で設計した栈橋式岸壁における供用開始後の維持管理について建設現場の生産性向上（i-Construction）の視点で検討した結果を報告するものである。

キーワード 栈橋式岸壁，定期点検診断，維持管理，i-Construction，ROV

## 1. 広島港宇品ふ頭再編改良事業について

広島港宇品地区では、地域基幹産業の国際競争力の維持と強化を図るため、公共ふ頭の再編を進めている。

宇品地区の係留施設のうち、事業対象とする岸壁（-10m）の第3、4バースは、主に完成自動車等の外貨・内貨貨物を円滑に取り扱う施設として1963年より1970年にかけて建設されたものである。（図-1参照）

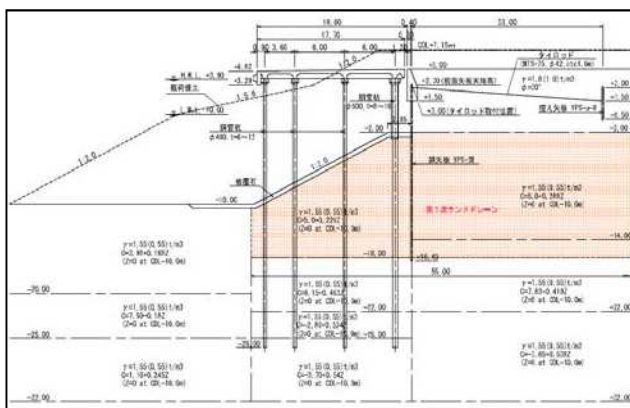


図-1 現況標準断面図

今般、完成自動車輸送の機能強化を図り、中国地方の自動車産物を物流面で支えるため2015年3月10日交通政策審議会第59回港湾分科会での審議を経て、図-2に示すとおり港湾計画の変更が行われた。自動車専用船の大型化に早期に対応するため第3、4バースを統合し延長を260m、水深を12mに増深することとされたところである。また、同時に緊急物資輸送拠点の早期確保のため、大規模地震対策施設として、耐震機能を有することとなった。

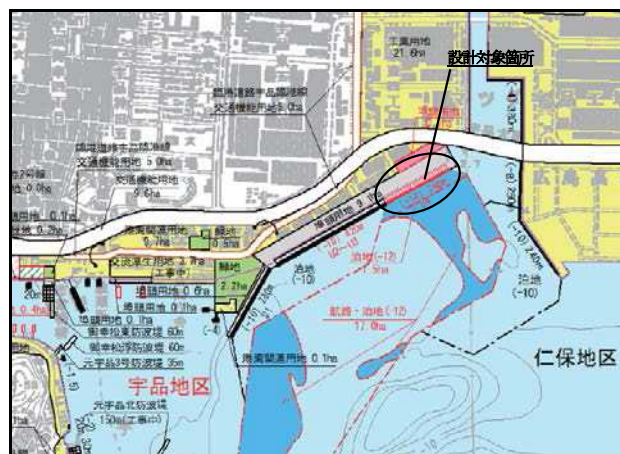


図-2 広島港港湾計画図（拡大）（2016年4月1日一部加筆）

広島港湾空港技術調査事務所では港湾計画の変更を受け、2015年に基本設計を実施し、最適な断面および維持管理手法について検討を実施した。なお、改良事業とあるが、施設の増深及び耐震化に伴い新設と同程度の改良を予定している。

## 2. 現状と課題の整理

本章では栈橋式岸壁特有の維持管理における現状と課題を整理する。

### (1) 一般定期点検診断～栈橋上部工を例に～

2013年6月の港湾法改正に伴い重点点検診断施設（耐震機能等を有する施設）における一般定期点検診断は、3年以内ごとに少なくとも1回実施することが義務づけられた。点検方法は主に陸上あるいは海上からの外観目視

とし、日常点検では見ることが出来ない床版裏の状況を点検・診断し、早期に異常を発見することが重要である。

#### a) 栈橋上部工の床版裏点検における現状と課題

栈橋上部工の床版裏における点検方法は図-3に示すとおり、小型のボート等を用いて作業員が直接海上から目視点検を実施している。広島港の干満による潮位差は約4.0mもあり、潮待ちによる作業時間の制約が生じる。また、船舶係船時には作業が出来ないため、作業効率が非常に悪いことが課題である。さらに、波浪による影響も大きく作業員の安全を確保することについても課題となる。

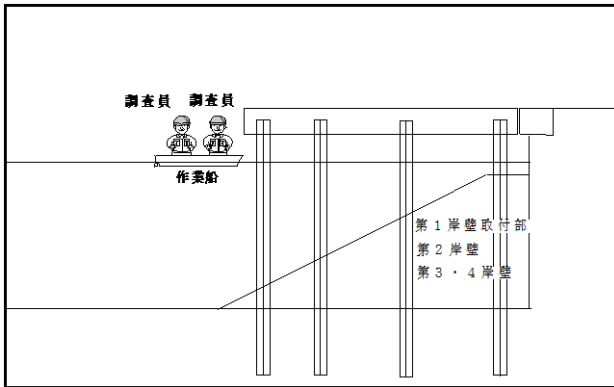


図-3 栈橋上部工の海上点検方法<sup>1)</sup>

#### (2) 詳細定期点検診断～栈橋基礎（鋼管杭）を例に～

前述した港湾法改正に伴い、本施設の詳細定期点検診断は、10～15年以内ごとに少なくとも1回実施することが義務づけられた。点検方法は主に潜水士による外観目視及び計測機器等を用いたデータ収集となる。鋼管杭の肉厚等を測定することで変状の原因や腐食の進行程度を推測できるため、重要な点検である。

#### a) 栈橋基礎（鋼管杭）の点検における現状と課題

栈橋基礎の鋼管杭における点検方法は図-4に示すとおり、潜水士が海中で作業を行っている。鋼管杭は海に面しているため牡蠣殻等の付着が激しく、肉厚測定時にはかき落としが必須であり作業時間が膨大となることから、作業効率が非常に悪いことが課題である。また、処理した牡蠣殻は産業廃棄物となり、処分費用が生じる。

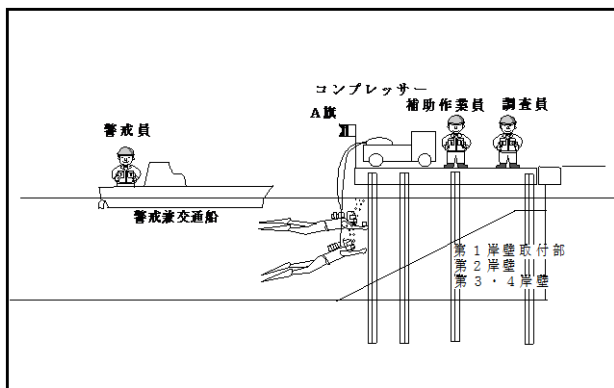


図-4 栈橋基礎（鋼管杭）の点検方法<sup>1)</sup>

さらに、栈橋基礎においては杭が多数配置されており、潜水士の呼吸用ホースが絡む等の重大な事故が考えられ、潜水士の安全を確保することについても課題である。

以上の課題により、維持管理に対するコスト増加及び手間が発生し、適切な維持管理を妨げる原因となっている。

### 3. 課題に対する解決策の提案

本章では前述した課題を受け、点検項目毎に考えられる解決策を提案する。

#### (1) 栈橋上部工の床版裏点検

##### a) ROV（Remotely Operated Vehicle：遠隔操作式ロボット）の活用

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所（以下、港空研と略す）で開発された図-5に示す点検装置は、浮遊しながら栈橋下に潜り、搭載されたカメラで床版裏を撮影出来るものである。本装置を用いることで床版裏の点検は基本的に無人で行えることになり、作業効率及び安全性が格段に向上する。

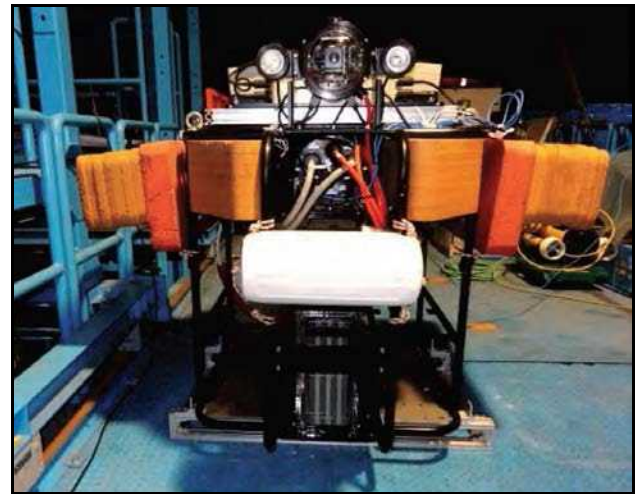


図-5 栈橋上部工点検用ROV試験機<sup>2)</sup>

また、本装置の大きな特長としては、栈橋下で装置の測位が可能である点である。これにより、どの地点で撮影されたものが判断可能であり、床版裏の状況を容易かつ安全に点検・診断することが可能である<sup>3)</sup>。

##### b) 切り欠き部の設置

栈橋式岸壁は図-6に示すとおり、海側に前垂れ部が存在する。これは船舶係留時に必要な防舷材を設置するための基礎となり、コンクリートで構成されている。床版裏の点検においては、前垂れ部が存在することで進入経路が主に岸壁延長方向に限られ、作業時間の制約が生じている。これに伴い、設計にて対象船舶の船型から最適な防舷材配置を検討した。結果、防舷材の不要箇所には

切り欠き部（前垂れ部を設けない箇所）を提案することが可能となり、床版裏の点検における作業効率の改善を図った。

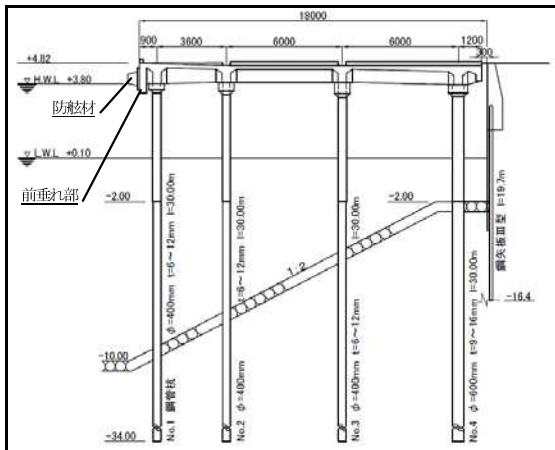


図-6 前垂れ設置状況

**c) 点検孔・点検歩廊の設置**

床版裏の点検は海上作業で行うことを前提とするが、本提案は図-7に示すとおり事前に栈橋上部工に点検孔（作業員が昇降する孔）を設け、作業員が床版裏を点検するために必要な歩廊（足場）の設置（図-8）を提案するものである。



図-7 点検孔<sup>4)</sup>



図-8 点検歩廊<sup>4)</sup>

点検孔および点検歩廊を設置することで、潮汐や波浪による影響を受けることが無くなり、床版裏の劣化状況を容易かつ安全に点検・診断することが可能となる。

**(2) 栈橋基礎（鋼管杭）の点検**

**a) 非接触型の鋼材肉厚測定装置の活用**

非接触型の鋼材肉厚測定装置の測定方法は、先ず、海中において潜水士が測定器を保持して被測定部に標準を合わせる。測定器に取り付けられている超音波送受波器から超音波が海中に放射され、超音波ビームを形成する。海中を伝搬した超音波は、被測定部の表面に収束して焦点を結ぶ。その一部は被測定部の内部に進入して、多重反射と呼ばれる現象を引き起こす。その多重反射波を超音波送受波器で検出することで、被測定物の肉厚が得られる。本装置は港空研で開発・試験がされており、肉厚の測定誤差は1mm以下となっていることが証明されている<sup>5)</sup>。

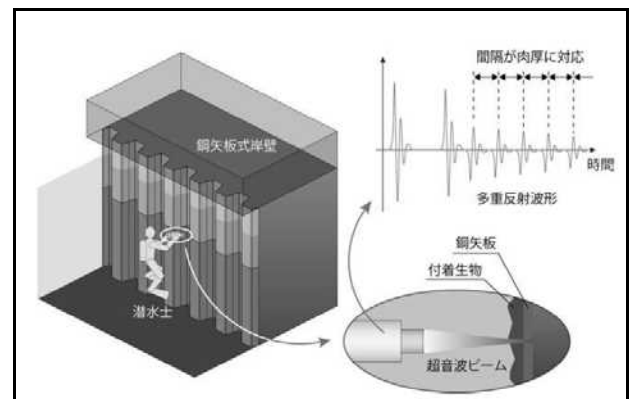


図-9 非接触型鋼材肉厚測定装置の概要<sup>5)</sup>

本装置を活用することで、潜水士による肉厚測定において半分以上の工程を占めるかき落とし作業が不要となり、大幅な作業効率の改善となる。

**b) 波力を利用した海生物除去装置の活用**

海生物除去装置を図-10に示す。本装置は波力を利用して牡蠣殻等を除去するものである。これにより潜水士によるかき落とし作業が不要となり、大幅な作業効率の改善を見込むことが出来る。

また、自然状態で牡蠣殻等が海に戻ることから産業廃棄物処理にかかるコストが不要となるメリットもある<sup>6)</sup>。



図-10 波力を利用した海生物除去装置<sup>6)</sup>

- ・ 棧橋構造ではその特性から補修を行うことがコスト増に繋がるため、エポキシ鉄筋の採用やプレキャスト化などに重点を置き、より良い品質のコンクリート部材を適切に管理していくことが総合的に有利になる場合が多い。
- ・ 岸壁の利用状況や現地の制約などを総合的に判断し、工法を抽出することが望ましい。

## 5. まとめ

本論文は、広島港宇品ふ頭岸壁（1万トナース）を例に維持管理における施設点検の視点から最新の手法を提案した。今後、これらのROVや非接触型の鋼材肉厚測定装置などの最新技術が活用されれば、建設現場の生産性向上（i-Construction）が図られ、従来の施設の維持管理に対する地味なイメージは払拭されるとともに若年層が興味を抱いてくれる（担い手の確保に繋がる）と確信している。

しかし、非接触型の鋼材肉厚測定装置を例に考えると、未だに潜水士による作業が必須であるものもある。より一層の建設現場の生産性向上（i-Construction）を考えると、非接触型の鋼材肉厚測定装置についてもROV等の活用を期待する。このような技術の進歩及び活用をすることで真の維持管理における生産性向上が図られる。

## 参考文献

- 1) 中国地方整備局 広島港湾・空港整備事務所：2008年11月 国有港湾施設健全度点検業務報告書。
- 2) 田中敏成, 加藤絵万, 野上周嗣, 平林丈嗣：港湾空港技術研究所資料 No. 1303。
- 3) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所：PARI VOL. 23 港湾・空港の維持管理。
- 4) 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所：ライフサイクルマネジメント支援センターHP。
- 5) 吉住夏輝, 松本さゆり, 片倉景義：港湾空港技術研究所報告 Vol. 48, No. 4。
- 6) NETIS 新技術情報提供システム：登録No.HKK-100001-A。

## 4. 検討会の開催

### (1) 委員会の設置

広島港湾空港技術調査事務所では別途業務において、『新設棧橋上部工の維持管理の省力化や合理化に配慮した対策』と題し、2016年3月11日に検討会を開催した。

開催にあたり、広島大学の土田教授、港空研の加藤チームリーダーを始めとした有識者と整備局の関係者から成る委員会を設置した。

検討会において、3.で提案した解決策について意見を伺った（ただし、非接触型の鋼材肉厚測定装置を除く）。

### (2) 主要意見の抽出

検討会において意見を伺った結果、主要意見を以下のとおり抽出する。

- ・ 点検孔を設置するにあたり、位置・蓋の重量、材質・昇降設備についても十分に検討すること。

# 防波堤消波工のICT技術を活用した現況把握における安全性と生産性の向上

鍋谷 泰紀<sup>1</sup>・齋藤 聡<sup>1</sup>・須藤 浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北地方整備局 秋田港湾事務所 保全課 (〒011-0945 秋田県秋田市土崎港西1-1-49)

防波堤の機能を健全に維持していくためには、消波工等の断面形状及び品質の劣化について現況把握をする必要がある。防波堤消波工における従来の現況把握としては、測量機器を使用した横断測量で実施しており、作業員が消波ブロックの上に直接上がるため危険であること、異形のブロックであり測点間隔を一定にできないこと、測点間の移動に時間がかかること、などの課題があった。

本検討では、防波堤消波工の現況把握における課題を解消するため、ICT技術を活用し、安全性と生産性の向上を図ることを目的とした。

キーワード ICT, 品質, 安全, 生産性向上, 港湾施設の現況把握, ドローン (UAV)

## 1. はじめに

国土交通省では、港湾の技術開発にかかる行動計画（H28.5策定）において、「海上や海中という特殊な現場環境において、施工や維持管理をより安全かつ効率的に実施するため、ICT（情報通信技術）を活用した新技術の導入を積極的に実施」<sup>1</sup>することを計画推進のための方針として定めている。

このような中で、秋田港飯島地区防波堤（新北）（図-1）の日常点検時において、消波工の天端高不足が確認（図-2）されたことを受け、平成27年度にICT技術を活用した現況調査を実施した。



図-1 秋田港空撮



図-2 確認された天端高不足箇所

防波堤の海上部についてはドローン（小型無人航空機）と3Dレーザースキャナを、海中部についてはナローマルチビームを使用して得られた相互のデータを統合することで、消波工の現況を海上部・海中部の一体的な3次元画像で把握することを東北の港湾で初めて実施した。その結果、レベルなど従来の計測機器を使用した横断測量に比べ、品質及び安全性・生産性の向上が図られた。

本稿では、防波堤消波工のICT技術を活用した3次元測量の有効性について報告する。

## 2. ICT技術を活用した防波堤消波工の現況把握

防波堤の機能を健全に維持していくためには、消波工

等の断面形状および品質の劣化についてしっかりとした現況把握が必要となる。

(1) 従来の現況把握

防波堤消波工における従来の現況把握としてはレベル等の測量機器を使用した横断測量(図-3)が行われており、作業員および潜水士が消波ブロックに直接上るため危険であることに加え、ブロックが異形であるため測点間隔を一定にできない、測点間の移動に時間がかかる等の課題があった。

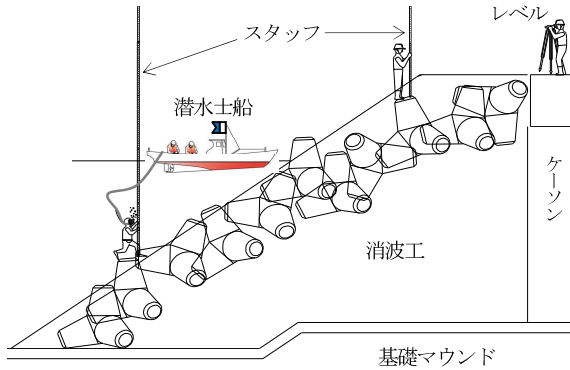


図-3 従来の現況把握

(2) ICT技術を活用した秋田港飯島地区防波堤(新北)の現況把握

秋田港飯島地区新北防波堤のICT技術を活用した調査(図-4)を行い、消波ブロックの沈下・散乱状況等の現況を確認した。調査範囲は図-5のとおりである。

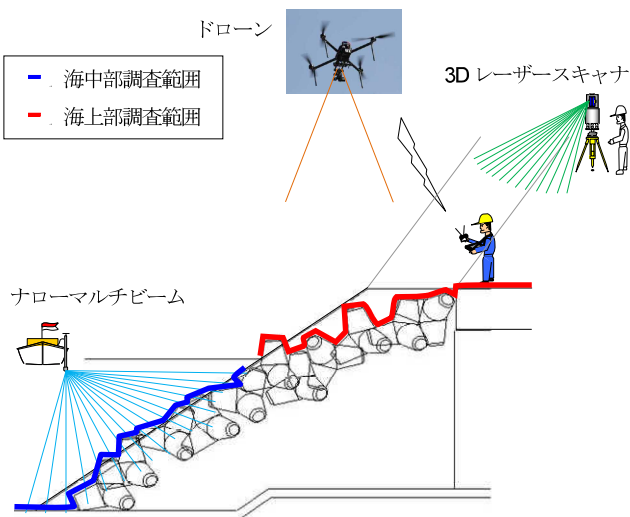


図-4 ICTを活用した現況把握

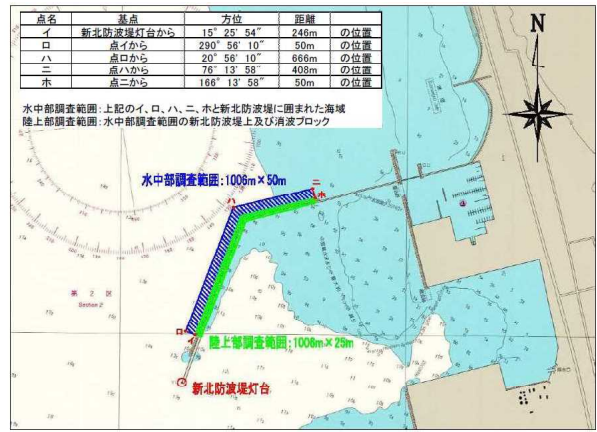


図-5 調査範囲

a) 海中中部調査

海中部の調査については、既に実用化されているナローマルチビーム測深(図-6)により取得したデータについて、潮位、喫水、船体動揺、方位等の補正を行い、3次元計測データを取得した。



図-6 計測機器(ソナーヘッド)及び計測状況

b) 海上部調査

海上部の調査については、ドローン(図-7)および3Dレーザースキャナ(図-8)を使用し、3次元計測データを取得した。



図-7 ドローン撮影状況



図-8 3Dレーザースキャナ



計測原理は航空写真測量と同様である。空中写真はドローンにより撮影し、対空標識点（位置および標高が分かる点）については、3Dレーザースキャナを使用して面的に取得し（図-9）、これらのデータより標定を行った。

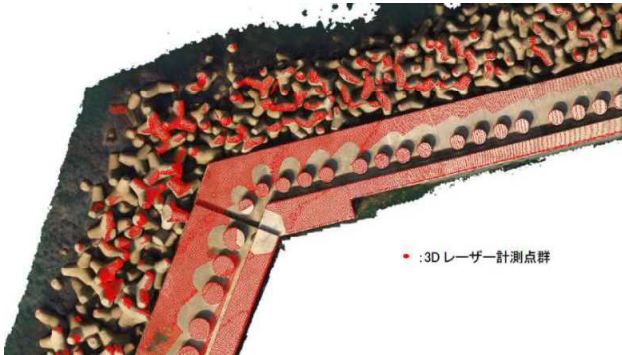


図-9 3Dレーザ一点群による対空標識点イメージ

### c) データの統合

ナローマルチビーム測深データとドローン計測データのそれぞれにおいて格子間隔メッシュデータを構築し、これらを統合することで消波工の海上部・海中部を一体的に3次元画像での把握（図-10）を行った。

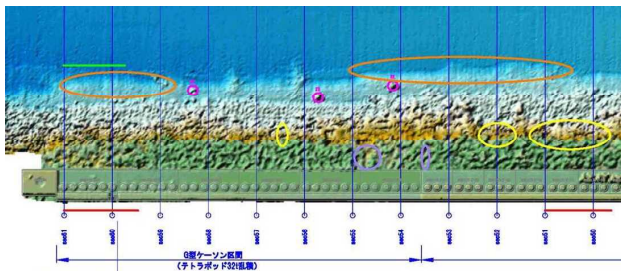


図-10 海上部・海中部データを統合した3次元画像

### (3) 調査結果

#### a) 消波工の断面形状

断面図（図-11）のとおり、部分的に沈下が見られる消波工の断面形状を確認することができた。消波工断面を任意間隔で抽出できるため、精度の高い数量計算が行えるようになる。（本調査では5m間隔で抽出）

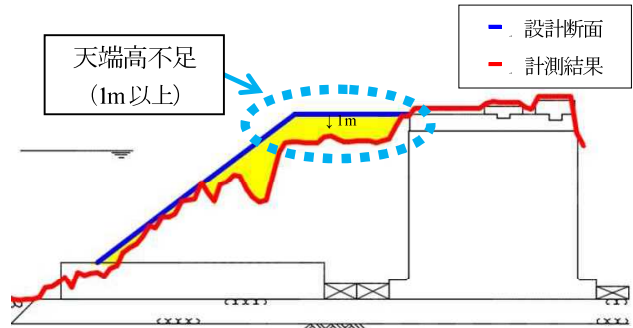


図-11 消波ブロックの変状が顕著な断面

#### b) 消波工のブロックの散乱状況

防波堤の前面海域には、高波浪により飛散したと考えられる消波ブロックが計24個確認することができた（図-12）。位置や個数を明確に把握できたため、散乱ブロックの再利用などの活用策を検討できるようになる。

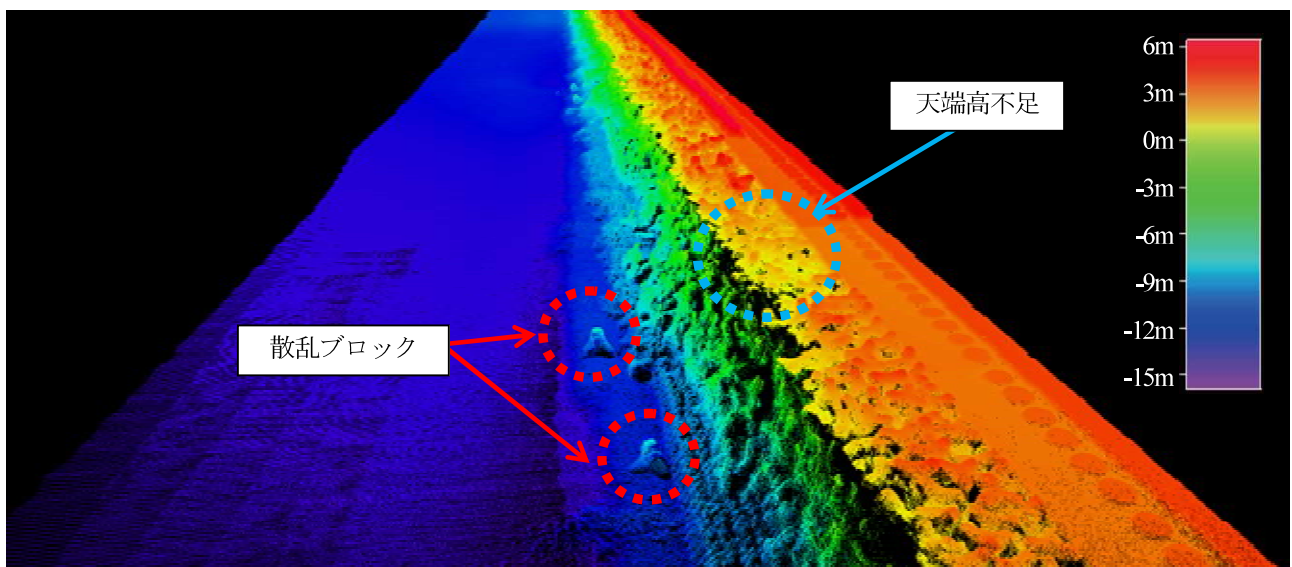


図-12 消波工の3次元形状図

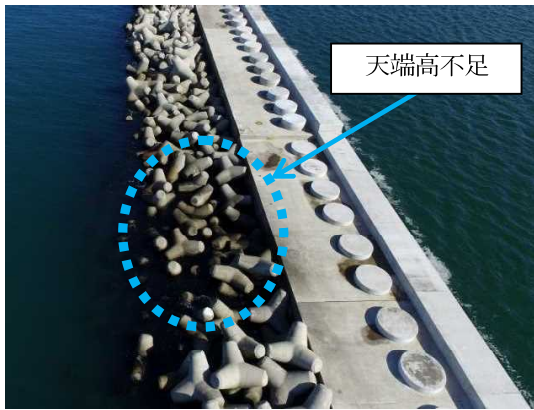


図-13 消波ブロックの天端高不足状況（図-11、12と同地点）

### c) 計測データの検証

ドローン計測による3次元地形データについて、リアルタイムで高精度に座標・標高を取得できるVRS-GNSS（図-14）による測定結果との単点比較を行った結果、標準偏差0.09mであり、消波工の現況把握においては十分な精度を有していた。



図-14 VRS-GNSS観測状況

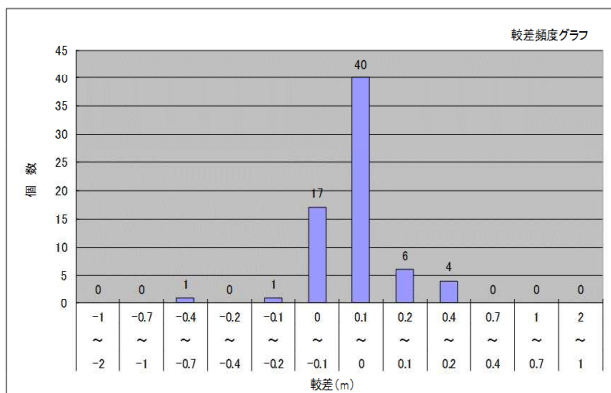


図-15 較差頻度グラフ

表-1 検証結果

|                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| 標準偏差            | 0.09 < 0.1 (地図情報レベル1000以下) |
| 最大較差            | 0.48                       |
| 平均較差            | 0.04                       |
| 較差10cm以内の割合 (%) | 82.6                       |
| 較差20cm以内の割合 (%) | 92.8                       |
| 比較データ数 (個)      | 69                         |

### 3. 調査のまとめ

#### (1) 成果の有益な点

- ・危険な場所に立ち入ること無く、安全な場所で作業が可能となった。
- ・作業の時間短縮と効率向上により、生産性が向上した。
- ・高密度に3次元座標でデータを取得できることから、任意間隔で断面形状が作成可能となった。
- ・3次元画像で立体的に現況を把握することが可能となった。
- ・水中部のナローマルチビーム測深を重ね合わせることで、消波工全体の形状を海上部と海中部を一体的に把握することが可能となった。
- ・データ密度が圧倒的に向上することで、複雑な形状の消波ブロックの不足量を容易に算出することが可能となった。

#### (2) 今後の課題

- ・防波堤上部工等のより精度の高い計測が求められる場合、ドローンによる標高算出精度の向上が求められる。
- ・本手法により現場作業は大幅にコスト縮減が可能となったが、一般化においては、計測機械損料や解析等の低コスト化が求められる。

### 4. 今後の展開

ドローン等の機器を使った3次元測量で情報化することは、防波堤消波工のように立ち入る際に危険が伴う現場において、詳細な現況把握が出来ることに加え、変状の追跡が容易になるなど、極めて有効であることが分かった。ICT技術を活用した測量・調査は、従来の方法に比べて省力化も図られることから生産性の向上が期待でき、今後、維持管理、補修工事への導入・活用が期待される。

### 5. 参考文献

- 1) 港湾の技術開発にかかる行動計画（H28.5策定）

# 高濃度浮泥の挙動特性を踏まえた 新たな航路管理の有効性に関する検討について

田代 益庸<sup>1</sup>・民部 久雄<sup>2</sup>・丸山 晴広<sup>3</sup>・上野 陸<sup>4</sup>・吉村 香菜美<sup>5</sup>

- <sup>1</sup>九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第一工務課 (〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)  
<sup>2</sup>九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第一工務課 (〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)  
<sup>3</sup>九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第一工務課 (〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)  
<sup>4</sup>九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第一工務課 (〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)  
<sup>5</sup>九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第二工務課 (〒801-0841 北九州市門司区西海岸 1-4-40)

北九州港（新門司地区）では、航行船舶の増加及び大型化に伴い、航路及び泊地の増深・拡幅工事を実施している。当該地区の航路及び泊地は、周辺海域からの浮泥の流入による埋没が懸念されているため、埋没メカニズムの解明と浮泥の沈降圧密に着目した維持管理の有効性について検討した結果を発表する。

キーワード 新たな航路管理 シルテーション 高濃度浮泥 埋没現象メカニズム 浮泥層の密度管理

## 1. はじめに

北九州港の東部に位置する新門司地区では、航行船舶の増加及び大型化への対応として、航路及び泊地の増深・拡幅工事を進めている。これに伴い、航路及び泊地では「シルテーション」による埋没が懸念されている。本論文は、埋没メカニズムの解明と浮泥の沈降圧密に着目した航路管理の有効性について、検討した結果を報告するものである。

## 2. 航路埋没対策検討の必要性

新門司地区は、九州自動車道の新門司 IC に近接し、陸・海の物流ネットワークの結節点としての地理的優位性を活かし、長距離フェリー、完成自動車等を輸送する自動車運搬船及び RORO 船が就航する重要な国内物流拠点の一つとなっている。（図-1）

当地区は、底質がシルト・粘土主体の周防灘海域に面しており、波・流れによってシルト・粘土が移



図-1 北九州港(新門司地区)位置図

動・堆積する「シルテーション」が発生しやすい環境にある。このため、航路及び泊地内に土砂が流入する埋没現象が生じている。（図-2・図-3）

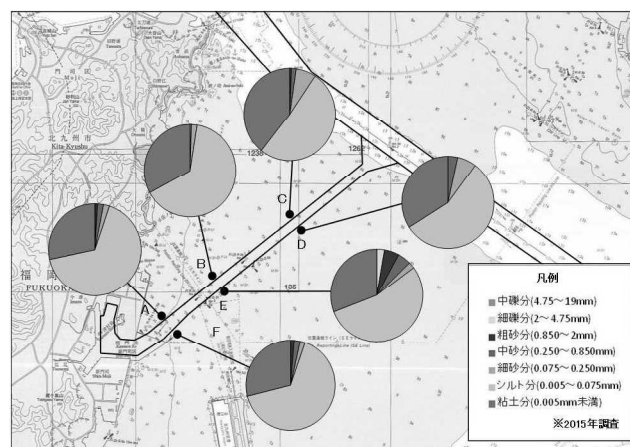


図-2 新門司地区の底質条件

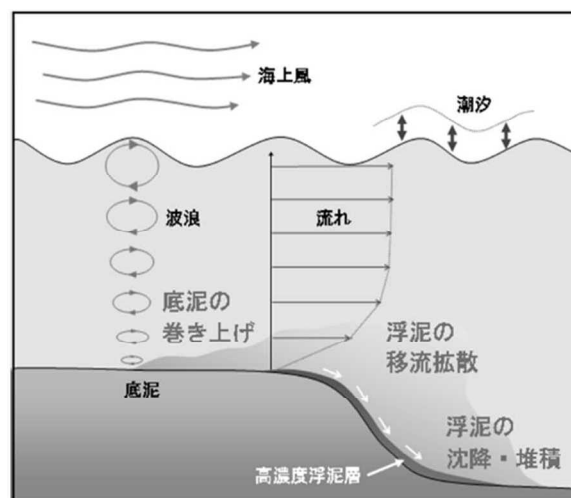


図-3 航路埋没現象のイメージ

埋没現象が生じると、船舶の航行障害及び港湾物流機能の低下を招く恐れがあることから、効果的な埋没対策が求められている。

### 3. 航路埋没特性を踏まえた維持管理

#### (1) 高濃度浮泥の挙動特性について

航路及び泊地の埋没対策を効果的に実施するためには、土砂が「いつ」・「どこから」・「どこに」・「どれくらいの量」移動しているかを面的に把握する必要がある。

特に、高波浪時における航路内の土砂移動（高濃度浮泥の挙動）を捉えることは、埋没現象のメカニズムを解明するうえで重要な要素である。

しかしながら、航路及び泊地内は船舶が常時航行しているため、計測器を継続的に設置して観測することは困難である。このため、全国的に供用中の航路及び泊地内において、海底面付近の高濃度浮泥の挙動が観測された事例は少ない。

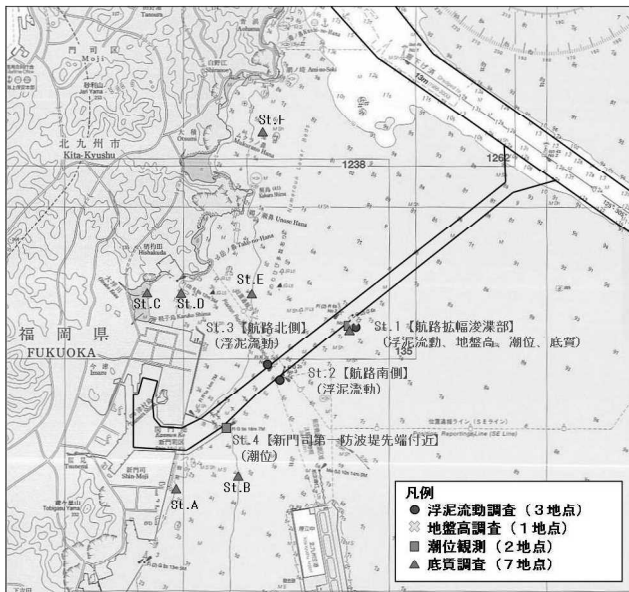


図-4 調査位置図

そこで、当地区では航路埋没対策の一環として、深掘（トレンチ）部を試験的に施工し、航路埋没対策の効果検証を図るとともに、台風期を含めた航路内外における海底土砂の挙動を把握するために現地調査を実施した。（図-4・図-5）

調査期間中に St. 1（航路内）において砂面計により取得された波高と地盤高変化の関係を示す。（図-6）砂面計による地盤高観測値は、台風 15 号来襲時（2015 年 8 月 25 日）の最大有義波高（波高＝約 3 m）発生時刻から 7 時間遅れて約 50cm 上昇し、その後 2 日間で約 15cm まで低下している。

これは、航路内への高濃度浮泥の堆積と、沈降による高濃度浮泥の境界面の低下を測定したものと考えられる。（図-7）

また、St. 1（航路内）の底泥の採泥・分析結果より、2015 年 9 月 15 日には 223% だった含水比が 2016 年 2 月 22 日には 163% に低下している。このことから、2015 年 9 月以降の半年間の緩やかな地盤高の低下は、航路からの浮泥の流出ではなく、圧密によるものと考えられる。（図-6）

前述した地盤高の変化要因を解明するために、航路外（St. 2・St. 3）における平常時と高波浪時の SS フラックス（SS 濃度×流速）を航路横断方向にて算

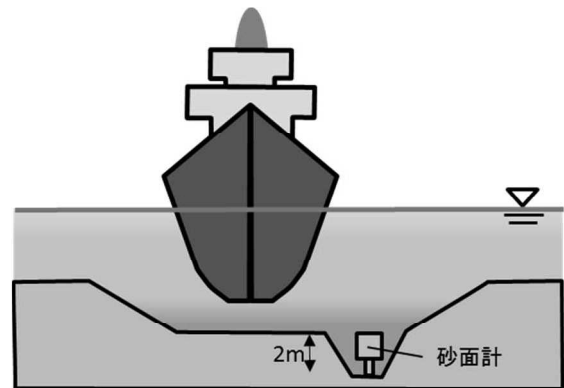


図-5 トレンチ部 (St. 1) の計測器

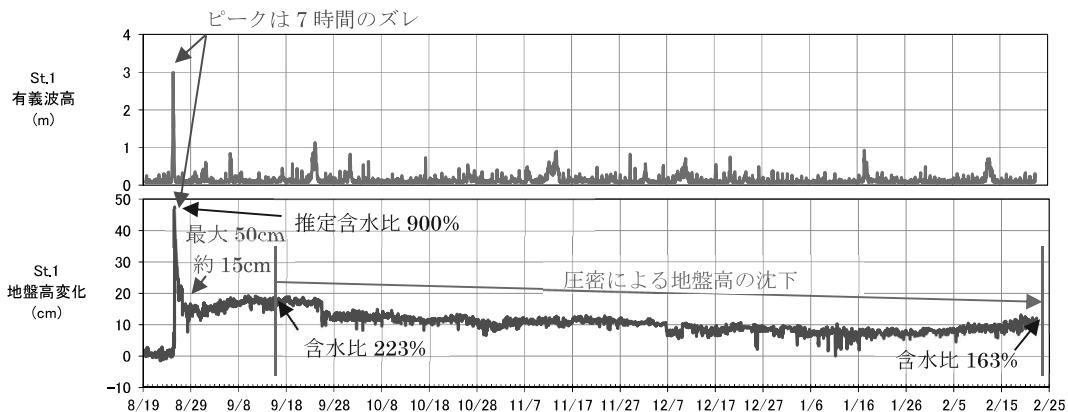


図-6 有義波高と地盤高変化の関係

出した結果を示す。(図-8)

St.2におけるSSフラックスは、高波浪時に底上0.1mで2,492kg/m<sup>2</sup>、底上1.0mで727kg/m<sup>2</sup>が航路方向にて確認された。これは全観測期間の約80%の量に相当する。

また、底上0.1mは底上1mの約3倍のSSフラックスが確認されたことから、高波浪時における海底面直上の高濃度浮泥が航路埋没へ大きく影響していると考えられる。

さらに、深浅測量から算定した面的な地盤変化についても、平常時はほとんど埋没が認められないのに対して、高波浪時には岸側(0-4,000m)で埋没が確認されており、高波浪時の埋没が顕著であることが確認された。(図-9)

新門司地区の深浅図と航跡図を示す。(図-10)  
4,000m~5,000m付近の航路南側海域において深場が確認された。これは、低密度の海底土砂が航行船舶の水流によって、船舶航行区域外へ移動したものと考えられる。よって、当海域の高濃度浮泥の挙動には、航行船舶の影響も比較的大きいことが分かった。

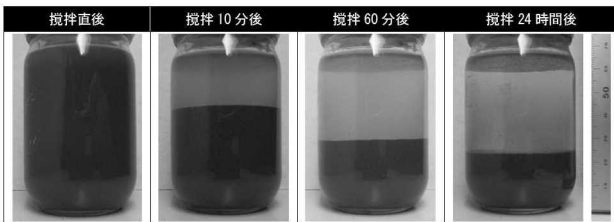


図-7 高濃度浮泥の境界面

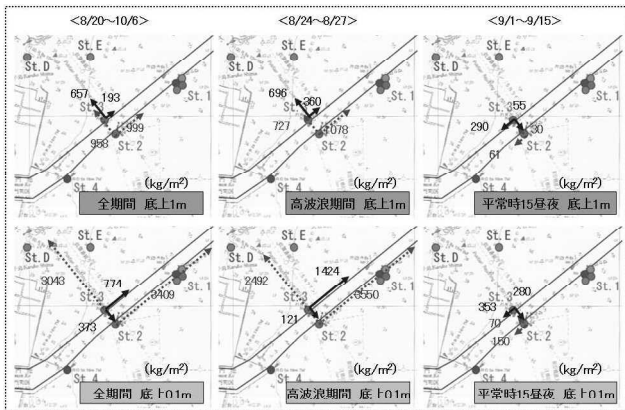


図-8 SSフラックスの分布図

(2) 底泥移動シミュレーション予測モデルの改良について

底泥移動シミュレーション予測モデルとは、対象港湾を含む周辺海域を格子状に細かく区分し、各計算格子における海水と泥の挙動を空間的・時間的に連続計算するものであり、埋没対策工の効果を検証するために有効なツールの一つである。(図-11)

今回の現地調査成果に基づき、底質条件(含水比・密度)、SSモデル(巻上・拡散・沈降)及び高濃度浮泥モデル(高濃度浮泥の濃度・沈降速度等)を調整し、台風15号来襲時の埋没現象を再現目標として、埋没予測計算を行った。

これまで、高濃度浮泥の直接的な現地観測成果はほとんど得られていなかった。このため、高濃度浮

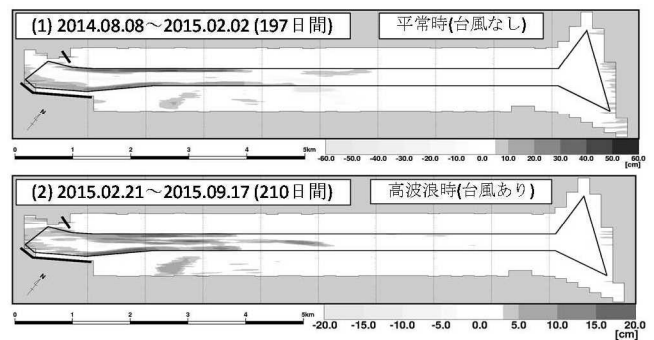


図-9 台風通過の有無による水深変化の違い

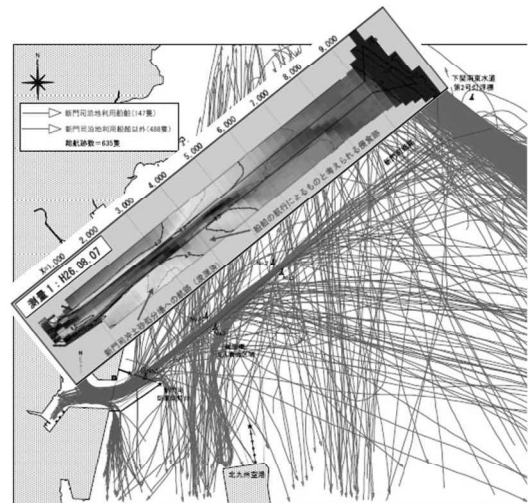


図-10 航行船舶の水流による海底地盤の擾乱

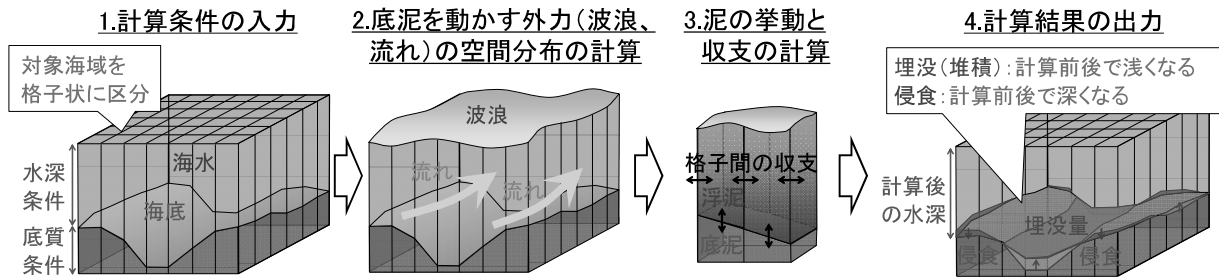


図-11 底泥移動シミュレーション予測モデル

泥の挙動のシミュレーションは、実験室での実験結果から構築されたモデルおよび各種パラメータについて現地にそのまま適用できると仮定して運用されてきた。今回、航路内の高濃度浮泥を観測できたことにより、モデルの裏付けを強化し、現地に合わせたパラメータを設定することが可能となった。

その結果、地盤高の変化時刻が高波浪のピークから7時間程度遅れる現象および地盤高の最終的な変化量（地盤高観測結果）と、面的な埋没パターン（深淺測量成果）を再現することができた。（図-12・図-13）

したがって、今回改良した数値シミュレーションについては、更なる改良の余地は残されているものの、埋没対策工の効果検証に用いることが可能と考えられる。

### (3) ライフサイクルコスト等を考慮した埋没抑制対策と航路管理の方向性について

埋没対策工法の選定にあたっては、対象地区における浮泥の発生源、移動経路及び堆積域等を把握したうえで、港湾施設の利用状況及び経済性等を総合的に勘案して実施する必要がある。

主に埋没対策工法は、①巻き上げの抑制、②浮泥流動の制御、③堆積場所の制御、④事後対策に大別される。（図-14）

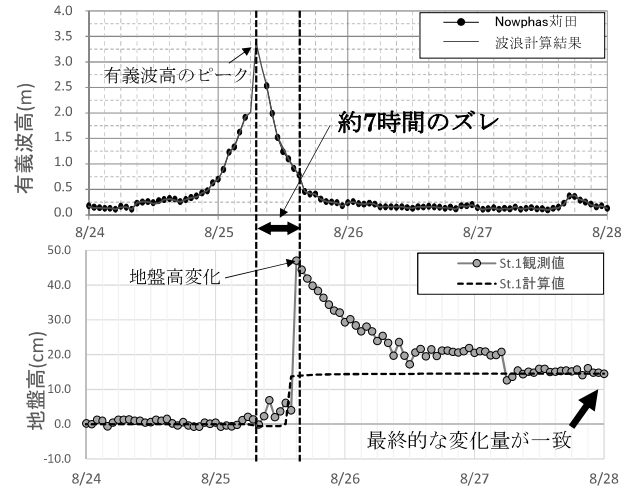


図-12 観測値と計算値の比較

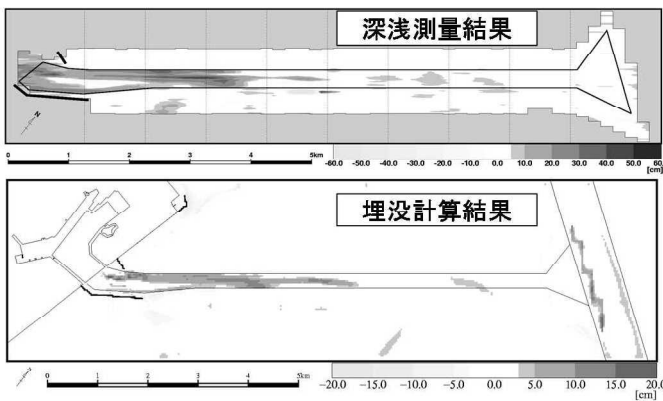
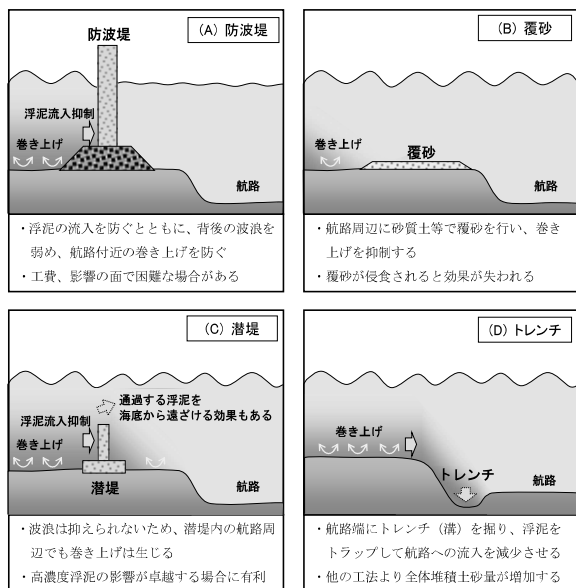
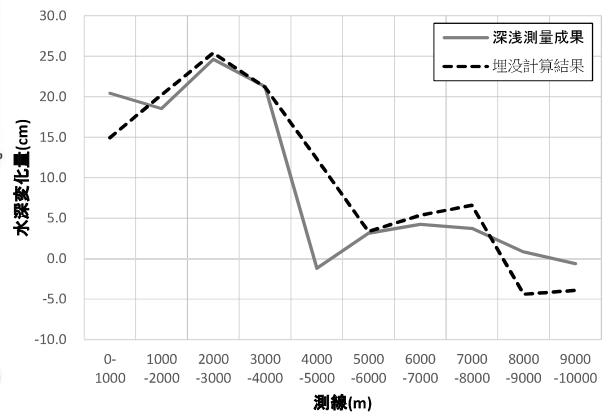


図-13 深淺測量結果と埋没計算結果の比較



| 目的       | ①       | ②       | ③       | ④    |   |
|----------|---------|---------|---------|------|---|
| 方法       | 巻き上げの抑制 | 浮泥流動の抑制 | 堆積場所の抑制 | 事後対策 | 特徴  |
| (A) 防波堤  | ○       | ○       |         |      | ・波浪を弱める<br>・工費、影響の面で困難な場合がある              |
| (B) 覆砂   | ○       |         |         |      | ・砂質土やスラグ混入土で浮泥にフタをする<br>・覆砂が侵食されると効果が失われる |
| (C) 潜堤*  |         | ◎       |         |      | ・浮泥の流入を防ぐ<br>・高濃度浮泥に高い効果<br>・熊本港などで実績あり   |
| (D) トレンチ |         |         | ◎       |      | ・浚渫効率の向上によりコストを削減する<br>・浚渫土砂の処分が課題        |
| (E) 維持浚渫 |         |         |         | ◎    | ・埋没量が少ない港湾では最も効率的な場合もある<br>・浚渫土砂の処分が課題    |

◎：実績の多い工法  
※ 干潮時に天端が海面上に出る潜堤は防砂堤、天端幅が広い潜堤は人工リーフと呼ばれる。

図-14 主な埋没対策工法

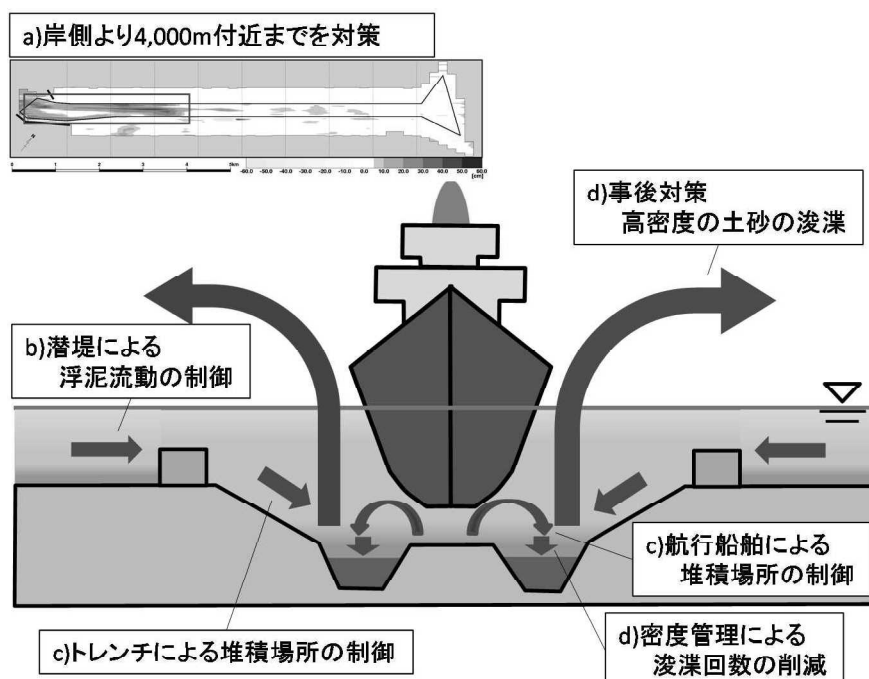


図-15 航路管理の考え方「イメージ」

新門司地区においては、埋没が顕著であった航路の岸側（0m～4,000m）付近を対象に、高波浪時における海底面直上付近（0.1m）の高濃度浮泥の流入防止とともに、航路内へ流入した土砂を効率的かつ効果的に航路外に除去する方策を複合的に検討する必要がある。

他方、海外の航路管理として、ヨーロッパのロッテルダム港において、浮泥層の密度管理によって維持浚渫費用を削減した事例がある。ロッテルダム港は、背後に大都市をもち工業排水や生活廃水が流入し、海底に有機系の浮泥が堆積するため、維持浚渫費用が増大する問題を抱えていた。そこで、航行船舶の利用実態と堆積浮泥層の密度分布を解析し、「船舶が航行可能な比重 1.2 以下の堆積土砂は浚渫不要」という新基準を設けて、コスト削減に成功している。

一連の検討結果を踏まえ、新門司地区を対象とした埋没対策の一つの方向性を以下のとおり整理した。（図-15）

- a) 埋没傾向が顕著な航路の岸側（0m～4,000m）付近を対象に対策工を検討する。
- b) 航路外の海底面直上付近（約 0.1m）にて発生する高濃度浮泥の流入防止策として、潜堤等を航路外に設置し、航路内への土砂流入を防ぐ。（①巻き上げの抑制・②浮泥流動の制御）
- c) 航行船舶により堆積土砂を浸食（攪乱）し、トレンチ（深掘）部に土砂を集積する。（③堆積場所の制御）
- d) トレンチ（深掘）部に集積された土砂の自然圧密（圧密管理）を行ったうえで、定期的に維持浚渫を行う。（④事後対策）

#### 4. おわりに

今回の調査により、観測が困難でこれまでほとんど観測事例がなかった航路内の高濃度浮泥を観測できた。また、この調査結果を埋没予測モデルに反映することにより、これまで多くの仮定に基づき計算していた現象を実態に近い形で再現することが可能となった。

さらに、航路管理の基本的なあり方について、航行船舶の安全性を踏まえ、海底土砂の堆積域、量及び密度に着目した対策工の可能性について整理した。

ただし、本調査で得られた知見は、航路内の一部で観測されたデータに基づく成果であるため、今後は多面的・継続的な観測を実施し、シミュレーションモデルの改良による再現性向上を通して、港湾全体の機能維持に資する対策検討を行いたいと考えている。

謝辞；本研究を進めるにあたり、いであ株式会社ならびに国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所の皆様には多大なるご協力を頂いた。記して、関係者各位には深甚の謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 平成 27 年度 北九州港(新門司地区)航路・泊地現況調査 報告書
- 2) 平成 27 年度 北九州港(新門司地区)航路・泊地埋没対策検討業務 報告書
- 3) 平成 27 年度 シルテーションによる埋没対策高度化検討業務 報告書

# 那覇空港滑走路増設における車載式レーザースキャナ測量を使用した埋立沈下管理手法の提案について

前里 尚<sup>1</sup>・田中 貴之<sup>1+</sup>

<sup>1</sup>那覇港湾・空港整備事務所 那覇空港新滑走路整備推進室 (〒901-0142 沖縄県那覇市鏡水344)

那覇空港増設滑走路は海上埋立空港であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。従来の管理においては一般的な水準測量、沈下板計測および、巡回点検により実施されているが、供用中の空港は計測作業に時間的制約を受け、非効率ばかりか局所的な沈下等の発見が困難であるなど課題を抱えている。

そこで MMS (Mobile Mapping System; 車載式レーザースキャナ) を用いて広大な新滑走路用地の短時間・高精度の 3 次元情報取得を試み、空港沈下管理計測への適用性を検討した。

本論文では、MMS の精度検証ならびに MMS を検討する中で取得した計測データの特性を活かした**空港 MMS** の利活用事例を示す。

キーワード 那覇空港滑走路増設, 埋立沈下管理, MMS, 空港維持管理システム, 空港空間3次元計測

## 1. 概要

那覇空港においては、将来の航空需要に適切に対応するとともに沖縄県の持続的振興発展に寄与するため、将来にわたり国内外航空ネットワークにおける拠点性が発揮できるよう現滑走路から1310m沖合に2本目の新滑走路(滑走路長2700m)の整備を行っている。

図-1に位置図を示す。

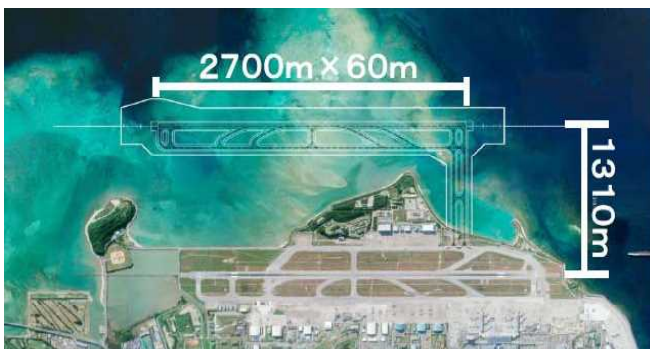


図-1 現滑走路と増設滑走路の位置図

那覇空港増設滑走路は海上埋立であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。そのため沈下に起因する空港舗装(滑走路、誘導路、エプロン)空港用地、航空保安施設用地、付帯施設に対する要求性能への影響を適切に管理する必要がある。

新技術として MMS が開発されている。MMS とは、レーザースキャナ・GNSS/IMU(位置姿勢計測装置)・デジタルカメラを車両に搭載し、走行しながら周辺 3 次元情報(地形・地形形状・画像)を取得するシステムで、MMS を適用することで広大な新滑走路用地の 3 次元情報(XYZ)を短時間かつ広範囲に取得することが可能となる。本試みで

は、那覇空港増設滑走路における沈下管理計測を効率的かつ効果的に実施するための適用性について、既存滑走路等の MMS による計測試験を実施し、取得したレーザ点群データと既往の定期点検測量との誤差等について精度検証を実施した。また MMS 技術を検証する中で、取得した計測データの特性により、今後の空港の維持管理等に新たに適用可能と思われる**空港 MMS** の利活用事例案を示す。

## 2. MMS の概要

MMS(モバイルマッピングシステム)とは、GPS(全球測位システム)により正確に自車両の位置を求めるとともに、IMU(慣性計測装置)を利用した姿勢計算と車両などに搭載したセンサーで計測したレーザデータ/カメラ画像から、車体の揺れや路面の傾斜に関わらず取得したレーザ点群データに高精度の 3 次元公共座標を与えるシステムである。そして 3 次元レーザ点群データと画像データの正確な融合を実現し、空港空間情報を的確に把握するものである(図-2、図-3)。



図-2 計測車両(三菱製 MMS-X500ZL)



### 3. 現状と課題

那覇空港増設滑走路の沈下検討の結果, 埋立に伴う沈

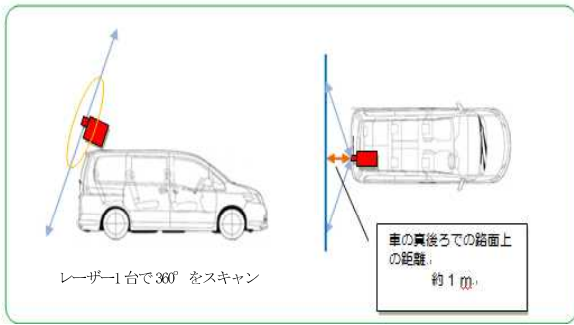


図-3 レーザー照射範囲

表-1 使用機材の諸元

|            |                       |
|------------|-----------------------|
| 名称         | MMS-X500ZL            |
| 計測車両メーカー   | 三菱電機 (株)              |
| レーザー機種     | Z+F 社 Profiler9012    |
| レーザー台数     | 1 台                   |
| レーザー搭載方法   | 鉛直 60°                |
| レーザースキャン頻度 | 200Hz                 |
| レーザー発射頻度   | 1,016KHz              |
| レーザー測定精度   | ±2mm                  |
| 点群密度       | 2000 点/m <sup>2</sup> |
| 計測距離       | 118m (実効)             |

下量は 70cm 程度であり, そのうち最大 30cm 程度は供用後の残留沈下として見込まれている. 沈下に起因して起こる問題としては基本施設及び空港用地における縦横断勾配の変化, 舗装のひび割れ, わだち掘れ等が挙げられる. その結果, 規定勾配の逸脱が生じれば航空機の運用が不能となることから, 定期的に管理する必要がある. 従来これらの管理は一般的な水準測量による縦横断測量, 沈下板による沈下計測と巡回点検からなる目視点検の組み合わせで実施されている. これまでの測量方法についての課題を以下に挙げる.

**課題①** 水準測量による管理では規定測線上の縦横断による 2 次元管理及び沈下板による点管理であり, 観測地点外の局所的な沈下等が発生した場合に発見が遅くなる可能性がある. また目視点検では僅少な勾配変化など定量的な判断が難しい.

**課題②** 那覇空港増設滑走路用地は約 153ha と広大であり, 制限が厳しい制限区域内において航空機の運用時間外で実施するため, 従来の測量作業では多くの計測日数と労力を要する.

### 4. MMS による沈下管理検討

供用開始以降の沈下管理に関して, MMS の活用の有効性とその適用性について現滑走路を対象として検討を実施した.

#### (1) 那覇空港 MMS データの取得

MMS 計測にて取得する 3 次元データと既往の定期点検測量データの精度を比較するため, 那覇空港において MMS データを取得した (図-4). 取得した点群データを図-5 に示す.

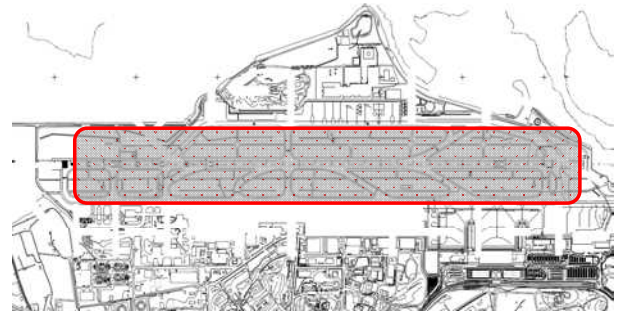


図-4 那覇空港 MMS データ取得範囲

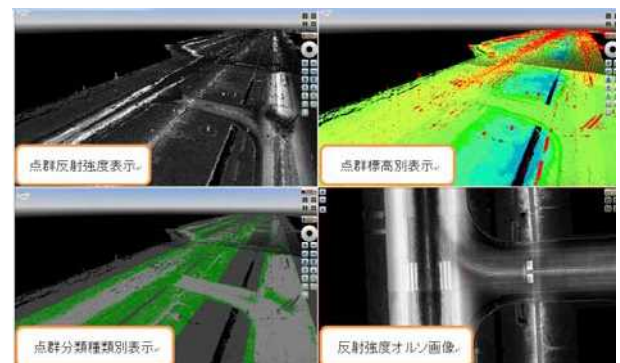


図-5 那覇空港 MMS 点群データ表示

#### (2) MMS による課題

那覇空港滑走路を対象に MMS 計測データと定期点検測量データを縦断図により比較した. その結果 MMS 単独による測量値が, 一般的に高さ方向の誤差が 5cm 程度となった (図-6). 供用後の残留沈下量 30cm に対してその割合は大きく, 3 級水準測量で設けた標定点を同時に計測・補正することで誤差消失を試みた.

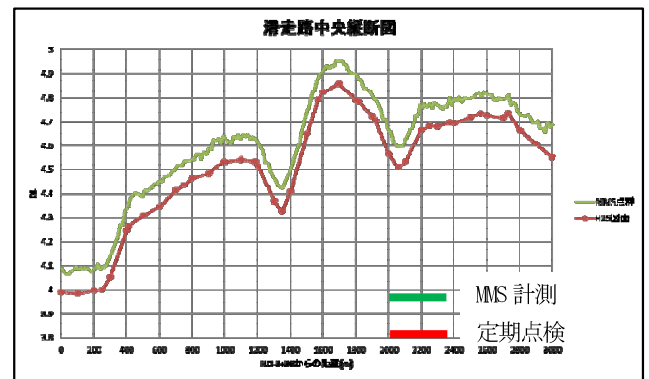


図-6 MMS 計測結果と定期点検測量の対比

#### (3) MMS の課題解決と精度確保の検討

MMS の精度を向上するための標定点の設置箇所数及び位置について検討した.

具体的検討内容は以下のとおりである.

##### ① 標定点の数量による誤差の比較

標定点の使用点数による検証のため, 滑走路を対象に

H25 年定期点検測量成果と MMS の差分及び RMS 誤差の比較を行った。使用した点数及び点番号は図-7 の通りである。なお最大差分は絶対値で算出した。

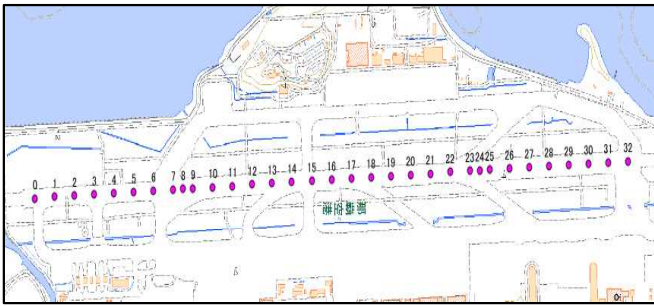


図-7 滑走路における標定点の位置

標定点数量検討の結果、図-8 に示すとおり 1 点使用することで RMS 誤差は大幅に小さくなるが、MMS と H25 年成果の差分の数値にばらつきがあるため、1 点のみの使用では誤差は押えられない。よって RMS 誤差が安定的に小さくなり、かつ可能な限り少ない点数という条件から、両端と中央の 3 点を使用すれば RMS 誤差を 1cm 程度に抑えることができると思う。

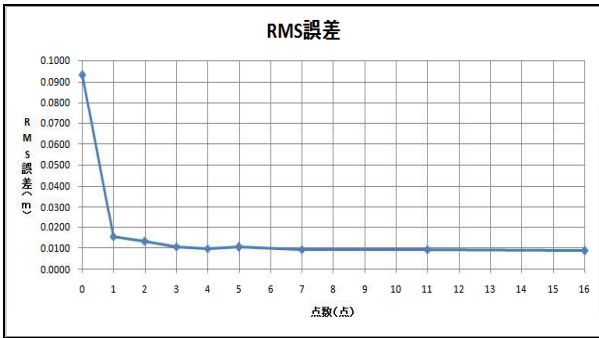


図-8 標定点数と RMS 誤差の関係

②滑走路縦断方向での MMS 補正

MMS データと定期点検測量を比較した結果、高さ方向の一定のズレが確認できたため、標定点の高さは同じと仮定して、MMS 計測データの補正を行った(図-9)。差分の最大値、最小値(ともに絶対値)及び、RMS 誤差は表-2 の通りとなった。RMS 誤差は H25 年成果を真値とする場合の誤差を示す。MMS-H25 年を  $\delta$ 、比較箇所数を  $n$  とすると、RMS 誤差は以下の式となる。

$$RMS \text{ 誤差} = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}$$

表-2 滑走路縦断 調整前後の比較

|     | 最大値 (m) | 最小値 (m) | RMS 誤差 (m) | 高さ移動量 (m) |
|-----|---------|---------|------------|-----------|
| 調整前 | 0.093   | 0.066   | 0.093      | -0.080    |
| 調整後 | 0.016   | 0.000   | 0.010      |           |

③滑走路横断方向での MMS 補正

滑走路横断方向については、RWY36 から RWY18 に向かう方向で起点から 3 箇所を抽出し検証した。MMS データと定期点検測量を比較した結果、滑走路同様高さ方向への一定のズレ及び回転が確認されたため、中央の高さは同

じと仮定して、MMS データを高さ方向及び回転の調整を行った。それぞれの調整後の結果を表-3 に示す。

滑走路における横断図を補正した結果、1,500 m 地点の横断位置で最大 2.1cm の RMS 誤差が生じた結果となった(図-10)。

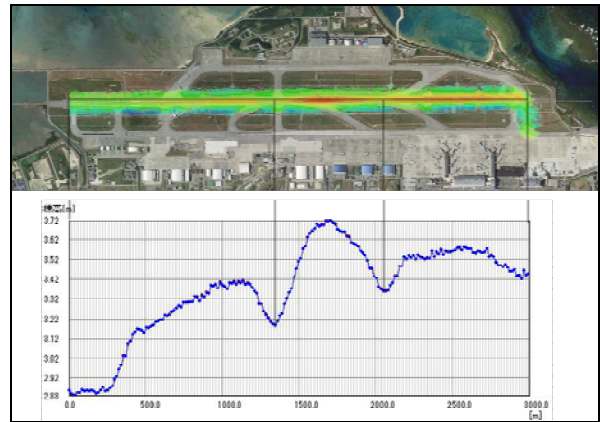


図-9 滑走路縦断補正後

表-3 滑走路横断 調整結果

| 箇所        | 調整前 RMS 誤差 (m) | 調整後 RMS 誤差 (m) | 高さ調整量 (m) | 回転調整量         |
|-----------|----------------|----------------|-----------|---------------|
| 0m 地点     | 0.063          | 0.011          | -0.031    | 0.190° 反時計まわり |
| 1,500m 地点 | 0.116          | 0.021          | -0.085    | 0.150° 反時計まわり |
| 3,000m 地点 | 0.095          | 0.014          | -0.064    | 0.204° 反時計まわり |

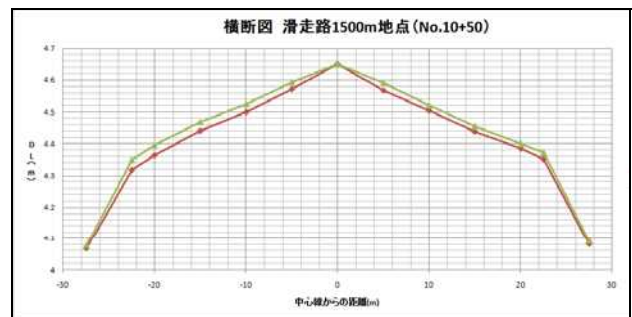


図-10 滑走路横断補正後

④MMS 精度検証結果

空港土木設計・測量・地質土質調査共通仕様書の「縦断測量の往復差及び閉合差」との比較を実施した。S を片道の観測距離(km)とすると、許容精度は以下の通りである(表-4)。

表-4 横断測量の精度

|         | 精度     | S=3km の場合の許容精度 (cm) |
|---------|--------|---------------------|
| 3 級水準測量 | 10mm√S | 1.73                |
| 4 級水準測量 | 20mm√S | 3.46                |

滑走路長が 3km とすると、4 級水準測量の許容精度は 3.46cm となる。MMS 検証による定期点検測量結果との RMS 誤差が最大差分 2.3cm であり 4 級水準程度の精度が確保

できる結果となった。

#### (4) MMS の優位性について

MMS の検証結果により、MMS による有意性は以下のとおりである。

##### ① 計測スピードの速さ

MMS は時速 40km で走行しながら半径約 150m の 3 次元計測が可能で、作業時間が限られる制限区域内で迅速かつ効率的に地形物の計測が可能である。

現空港での計測の実績より増設滑走路島全体 153ha の計測に要する時間は 2 時間程度である。

##### ② 点群データの密度

MMS で計測した点群データは最大で 1m<sup>2</sup> 当り 2000 点の取得が可能で、その点群データには全て XYZ 値が与えられており、通常の水準測量で取得できる線的数据に比べてデータ量が膨大である。

##### ③ 任意点の縦横断計測が可能

MMS 3 次元データにより、任意の点の縦横断計測及び面積、体積の算出が容易である。

##### ④ 計測環境が容易

MMS は雨天以外、昼夜間での計測が可能である。

##### ⑤ 計測データによる舗装状況の評価が可能

MMS は取得した 3 次元データより、わだち掘れ、平坦性を解析が可能である。

##### ⑥ 地表状況が即時確認可能

MMS データにより、空港における任意の必要点を机上で計測することが可能となり現場作業が不要となる。

##### ⑦ 計測データのアウトプット

MMS データを CAD データとしてアウトプットすることができ発注図等への提供が可能である。

#### (5) MMS による沈下管理への適用性について

MMS データと既往測量データによる精度検証の結果、ほぼ全体が 4 級水準測量を満たすに十分な精度を有することが証明された。一部では許容精度を超える結果となったが、その対策は今後の課題である、しかし MMS は 3 次元の膨大な点群データにより、従来の測量技術では不可能であった空港全体の 3 次元管理による空間把握を可能とする。MMS を主とし、従来の測量を従とした手法で空間形状の変化を高精度に計測することが可能となり、那覇空港増設滑走路における沈下計測の精度向上、及び『今後の効率的な維持管理に寄与できる』と考える。増設滑走路における計測結果イメージを図-11 に示す。

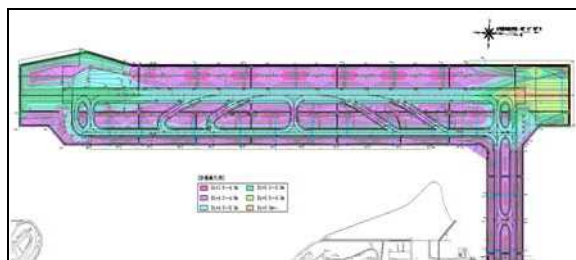


図-11 MMS 計測コンター図

#### 5. MMS 計測結果の利活用について

空港 MMS の適用を検討する中で、得られた 3 次元データを SIM 環境に取り込むなどから、従来の測量結果との整合性を保つことが可能となり、MMS 計測データの長所を活かした多様な利活用への可能性が明らかになってきた。以下に MMS 計測データの利活用事例を示す。

##### ① 空港 MMS を利用した空港安全管理

MMS の膨大な 3 次元データを SIM のデータベース化することで机上での任意の位置、任意の縦横断を計測することが可能になる。その結果空港制限区域内工事における工事車両等の制限表面への支障の有無、建築限界の支障の有無、見通し確認などが可能となり、航空機運航に関する安全性向上と省力化に期待できる。

##### ② MMS データの災害時の活用について

大規模災害発生時には那覇空港は救急救命活動や緊急物資等輸送の拠点として役割を求められており、発生後は早期復旧のため空港機能を回復する必要がある。したがって、地震や津波の後に空港施設（滑走路等基本施設、着陸帯等空港用地、付帯施設等護岸）の性能を確認し、異常箇所を早期発見することが重要である。増設滑走路新設時の空港施設全体の初期値は定期 MMS で得た 3 次元データを用いる。災害時には被災後に得た航空レーザー測量結果と MMS 結果の融合による広域 3 次元データと MMS 初期値との比較の中で異常箇所を抽出し、早期復旧のツールとして期待できる。

##### ③ 空港維持管理での活用

MMS 計測データの長所は空港維持管理において様々な利活用が可能と思われる、反射強度オルソ画像（図-12、13）による路面標識の劣化状況、滑走路におけるゴム付着範囲、点群データ解析によるわだち掘れや平坦性状況の把握、ダブルデッキ下面の点検などと巡回点検・PRI 調査・すべり摩擦抵抗調査と組み合わせることで効率的かつ効果的な点検に活用できると考える。

また、任意の点において縦横断計測や面積、体積の計測が容易であり、今まで事業毎に事業範囲のみ個別で発注していた計測作業など一元化ができ、省力化に期待できる。



図-12 反射強度オルソ画像（滑走路）

#### 6. おわりに

3 次元データを基図とした本システムを活用すること

で、従来は多大な労力を要し、煩雑になっていた写真管理、  
変状・補修箇所の数把握が高度化されるとともに各種



(図-13) 反射強度オルソ画像（滑走路）

情報の共有・一元管理が可能となり、沈下管理を含めた  
予防保全管理に資する継続的な維持管理を実現できるようになる。各空港における維持管理職員が縮小されるなか、空港 MMS による ICT 技術の全面的な活用で、測量・設計・施工・検査・維持管理までのプロセスの最適化が進み、省力化かつ作業効率向上に帰する事を期待しております。

# 撫養港海岸保全施設整備事業における 大型陸閘の自動化

山本 大樹

四国地方整備局 小松島港湾・空港整備事務所 工務課 (〒773-0001 小松島市小松島町字新港 9-14)

撫養港海岸桑島瀬戸地区では、今後発生が危惧されている東南海・南海地震とその津波から背後住民の生命と財産を守るため、平成 18 年度より海岸保全施設整備事業を行っている。

先の東日本大震災においては、手動式陸閘の閉鎖作業に赴いた多くの消防団員が津波に巻き込まれ殉職された。その教訓を踏まえ、当事業においては閉鎖作業に多くの労力と時間がかかる大型陸閘の自動化を図るための検討を進め、この度、陸上設置型浮体式防潮堤（フラップゲート式陸閘）全 4 基の設置が平成 28 年 5 月に完了したため、その技術的検討経緯を報告する。

キーワード 東日本大震災、港湾局初の取り組み、陸閘、自動化、確実な起立

## 1. はじめに

撫養港海岸桑島瀬戸地区は、徳島県の北東部に位置し、背後に鳴門市の中心市街地を擁する海岸である。この地域では、第 2 室戸台風（昭和 36 年）を契機に整備された既存堤防が老朽化しており、今後 30 年以内に約 70%の確率で発生が予想されている南海トラフ地震とその津波により 330ha の浸水被害が想定されている。（図-1 参照）



図-1 撫養港海岸桑島瀬戸地区

### (1) 撫養港海岸保全施設整備事業

上記の被害が予想される中、防護人口約 10,200 人の生命と財産を守ることを目的とした、海岸保全施設整備事業を平成 18 年度から 28 年度にかけて行っている。主な事業内容としては、堤防直下の地盤の液状化による堤防の沈下を抑えるための地盤改良と想定する津波高より越流を抑えるための堤防の嵩上げ及び陸閘・水門の新規設置・改良等である。

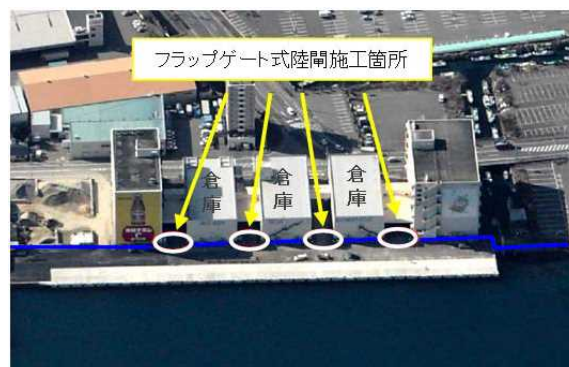


図-2 フラップゲート式陸閘施工箇所

### (2) 大型陸閘の整備

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、陸閘の閉鎖作業に向かった多くの消防団員が津波に巻き込まれて殉職された。その教訓を踏まえ、海岸関係省庁では陸閘等の自動化、遠隔化等を推進している。

上記の中、当事業では、新たに陸閘設置が必要となった箇所に、自動閉鎖する陸上設置型浮体式防潮堤（以下フラップゲート式陸閘）を採用し、全 4 基の設置が平成 28 年 5 月に完了した。（図-2, 3 参照）

本稿では、フラップゲート式陸閘の設置経緯及び自動閉鎖を確実にを行うための工夫について報告する。



図-3 完成したフラップゲート式陸閘

## 2. 現場条件と対応方針

### (1) 現場の制約条件

当事業における海岸管理者の陸閘整備方針、新規陸閘設置箇所の内容は以下のとおりである。

#### ① 管理者の方針

撫養港海岸での管理者である徳島県の方針は、「扉体面積 10m<sup>2</sup>以上の大型陸閘では開閉作業時間短縮のため、電動化又は自動化する。」また、地震発生後に陸閘の閉鎖に向かうのを防ぐため、「通行しないときは陸閘を閉鎖する。」である。

#### ② 新規陸閘設置箇所の条件

当計画の設置箇所は倉庫に挟まれた通路である。背後の倉庫業を営む企業と前面の公共岸壁にも挟まれ、車両の通行が頻繁に行われており、利用者や企業活動に影響を与えてはならない。(図-2 参照)

### (2) 対応可能な陸閘形式

今回設置する陸閘は扉体面積 10m<sup>2</sup>以上のため、設置可能な陸閘形式は自動化されたフラップゲート式陸閘と電動化した横引き式陸閘の2つが挙げられる。しかし、設置箇所は通行量が多く、管理者の方針に則ると頻繁な開閉が要求されるため、横引き式には遠隔化と無停電化設備を想定する。

図-4 にフラップゲート式と横引き式陸閘を示す。



図-4 左:フラップゲート式陸閘、右:横引き式陸閘

### (3) フラップゲート式陸閘の概要

フラップゲート式陸閘とは、陸上に設置された扉体が、高潮や津波による浸水時の浮力を利用して自動的に閉鎖することにより、背後の浸水を防ぐものである。これは、従来からある水の逆流を防ぐフラップゲート(水門)を応用して、平成 15 年より開発を始めた海底設置型のフラップゲートに端を発している。平成 21 年より海底設置型の開発過程で得られた知見を陸上に応用することで開発された。

図-5 にフラップゲート式陸閘の起立機構、図-6 にフラップゲート式陸閘の動作イメージを示す。

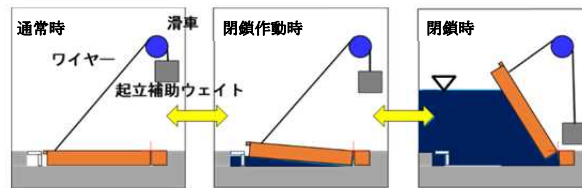


図-5 フラップゲート式陸閘の起立機構

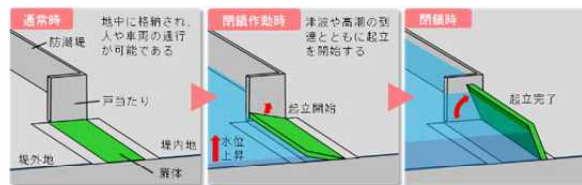


図-6 フラップゲート式陸閘の動作イメージ

### (4) フラップゲート式陸閘と横引き式陸閘の比較

現場制約条件の中、当該地域に適する陸閘形式はフラップゲート式陸閘(自動)と電動横引き式陸閘(無停電化+遠隔化)である。それらの特徴・コストを比較したものを表-1 に示す。

フラップゲート式陸閘(自動)と横引き式陸閘(無停電化+遠隔化)を比較した場合、車両の通行が頻繁に行われる今回の現場では、開閉作業を行う必要のない自動化が適しており、フラップゲート式陸閘の方が約 8%のコスト低減が可能であると試算された。これにより、フラップゲート式陸閘が最適であると考えられる。

表-1 フラップゲート式陸閘と横引き式陸閘の比較

|       | フラップゲート式陸閘(自動化)                      | 電動横引き式陸閘(遠隔化+無停電化)                 |
|-------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 地震発生時 | 電気機器を使用しないため停電時も自動で閉鎖可能。             | 無停電化のため閉鎖可能だが電気機器が損傷しないような構造が必要。   |
| 避難時   | 自動起立するため直ぐ避難可能。津波来襲直前まで避難路となる。       | 遠隔操作で閉鎖できるため直ぐ避難可能。閉鎖後は避難障害の可能性有り。 |
| 占有面積  | 前方の戸当たりの面積確保が必要。有効高さが高いほど占有面積が大きくなる。 | 横方の戸当たりの面積確保が必要。有効高さに占有面積が左右されない。  |
| 維持管理  | 部品点数が少なく比較的メンテナンスが容易。                | 電気機器等があるため比較的メンテナンス負荷が大きい。         |
| コスト比較 | 0.92                                 | 1.00                               |
| 総合評価  | ○                                    | △                                  |

## 3. 陸閘の計画および設計

### (1) フラップゲート式陸閘の採用へ向けて

計画当初、フラップゲート式陸閘の実績がなく不確定さが残っていた。陸閘を自動化することにおいて最も重要なことは「確実に自動起立を実現させる」という信頼性が必要である。そこで、平成 24 年より撫養港海岸への適用を視野に、早稲田大学の清宮教授を座長とした技術検討会が高松港湾空港技術調査

事務所により設置され、地震時、津波来襲時の面から検討が行われた。

(2) 自動起立をより確実にするための検討

フラップゲート式陸閘の確実な起立を実現させるため、技術検討会では起立を阻害する要因を明確にする方針となり、5分の1縮尺で水理模型実験を行い、主に次の結果が得られた。

① 地震による許容傾斜角度

陸閘本体を法線平行方向に3°傾斜させると扉体が起立しない場合があったため、地震発生時に本体の傾斜を3°未満に収める構造にする必要がある。

② 起立補助ウェイトの前方掛け回し

起立補助ウェイトは浮力による扉体起立を補助するための重りである。急激な水位上昇にも安全に扉体を閉鎖できる、「前方掛け回し」方式を採用した。

③ 前面導水溝の適切な管理

扉体前面に設置される導水溝が土砂等で完全閉塞すると扉体が起立しなかったことから、保守点検・維持管理が重要となる。

これらの条件を満たせば、フラップゲート式陸閘の信頼性が確保できると考えられ、採用となった。

図-7にフラップゲート式陸閘の起立機構の構造を示す。

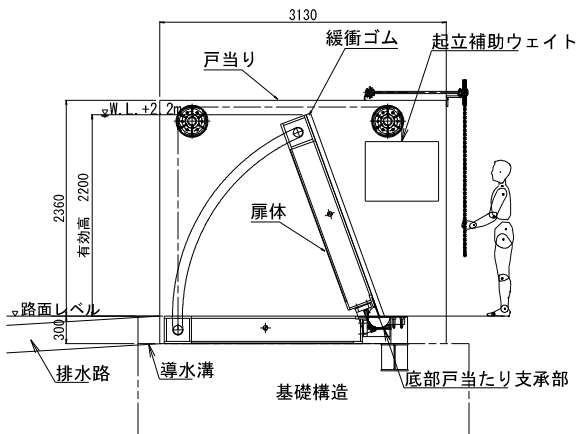


図-7 フラップゲート式陸閘の構造

(3) 基礎の設計

フラップゲート式陸閘に求められる性能は想定した地震動である東南海・南海地震(マグニチュード8.7)の発生後に来襲する津波に対し確実に閉鎖することである。

a) 設計条件

水理模型実験ではフラップゲート式陸閘の法線平行方向への許容傾斜が3°未満であると判明したた

め、地震後に本体の傾きが3°未満(沈下量0.4m以内)となる基礎を設計し、地震動に対する照査を行った。

b) 杭基礎でのFLIP解析

FLIP解析での検討の結果、杭基礎の2本杭にて解析を行うことで法線平行方向への傾斜が1°以内に収まるとされ、これを採用した。杭は支持杭とすることで車両の繰返し荷重に耐えることが可能な構造とした。また、法線直角方向と平行方向の杭自体の外力による破壊の照査もクリアした。

図-8に2本杭基礎の法線平行方向のFLIP解析、図-9に決定した杭基礎の断面図、図-10にフラップゲート式陸閘の基礎工平面図を示す。

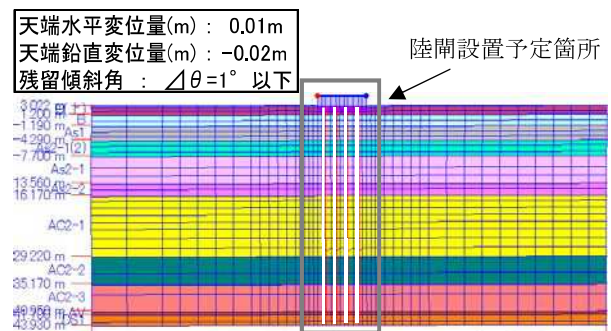


図-8 2本杭基礎の法線平行方向のFLIP解析

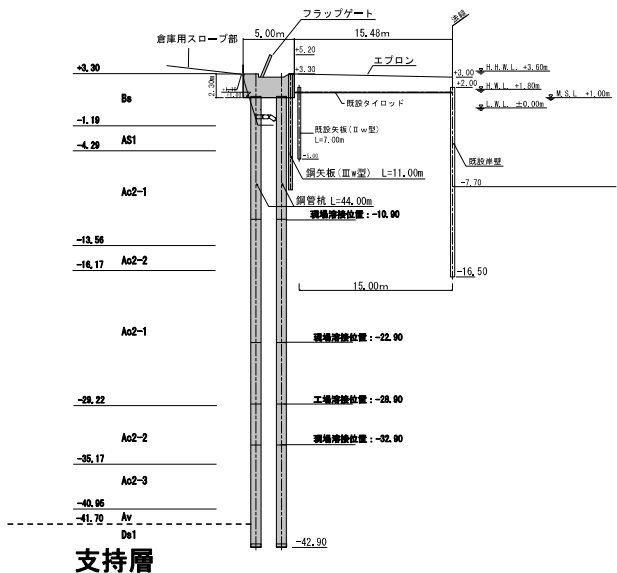


図-9 杭基礎の断面図

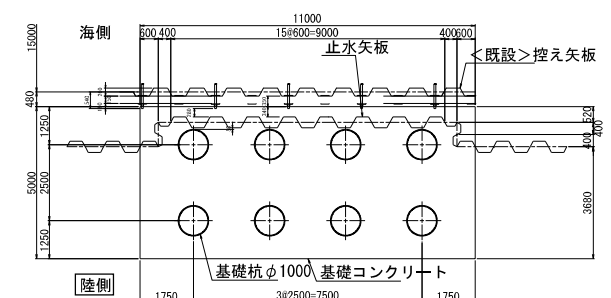


図-10 フラップゲート式陸閘基礎工平面図

4. 施工時に配慮した事項

施工は基礎工、下部工、陸閘設置、総合動作確認の流れで行った。本章では主に、フラップゲート式陸閘を確実に起立させるために留意した箇所について述べる。図-11 にフラップゲート式陸閘 2 基分の施工フローを示す。

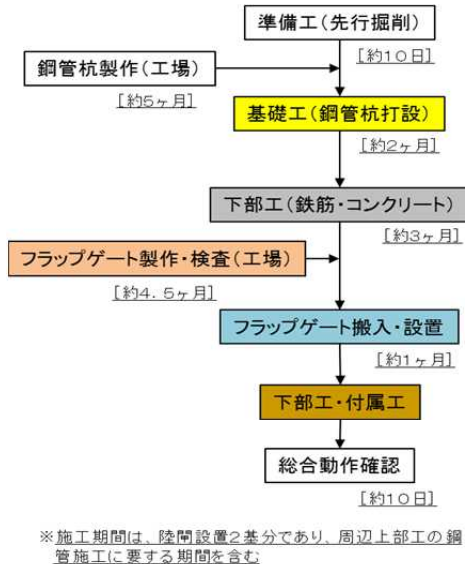


図-11 フラップゲート式陸閘 2 基分の施工フロー

(1) 基礎工 (鋼管杭)

施工場所は、営業活動中の倉庫が隣接しており、特に騒音や振動について配慮する必要があったため、中掘工法や回転杭工法などのうち、経済的に優位である中掘工法を選定して施工した。フラップゲート式陸閘を確実に起立させるため、現地施工においては、杭基礎が確実に支持層と一体化することが求められる。よって、下記について特に注意を払って実施した。

- ① 鋼管杭打設時の鉛直性確保
- ② 継手溶接管理
- ③ 設計支持層の確認
- ④ 先端根固処理の品質

中掘工法は、打撃工法のように動的な貫入抵抗が測定できない。そのため支持層の確認として、オーガモータの駆動電流値を用いた積算電流値と成層断面図との比較、掘削土砂と土質標本との性状比較を行い、設計支持層が所定の深度であることを確認した。その他にも、先端根固め処理の品質を確保するために、セメントミルクの注入量が目標値を 1 割超える量を注入する等慎重に施工管理を行った。

図-12 に杭の打設状況、図-13 にセメントミルクの

注入量、図-14 にボーリングサンプルの比較を示す。



図-12 杭打設状況

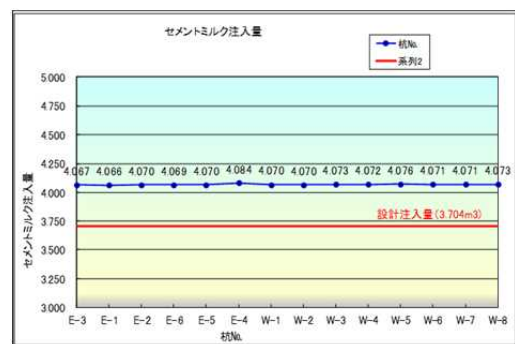


図-13 セメントミルクの注入量



図-14 ボーリングサンプルの比較

(2) 陸閘下部工

フラップゲート式陸閘の扉体を支える陸閘下部工は、起立性能保持と施設損傷防止の観点から平坦性が重要である。起立性能保持は扉体下への浸水を均一にし、扉体にかかる浮力のむらを排除するためであり、損傷防止はトラック等車両通行による扉体や回転軸のひずみを抑制し、健全な状態を保持するためである。

施工時は、工場製作時にあらかじめコンクリートの水平を明示したブラケットを取り付けておき、注意深くコンクリート均し管理を行う事により、平均



1.2mm の誤差で陸閘裏面コンクリートの平坦性を確保した。

図-15 にブラケットで水平を明示している様子を示す。

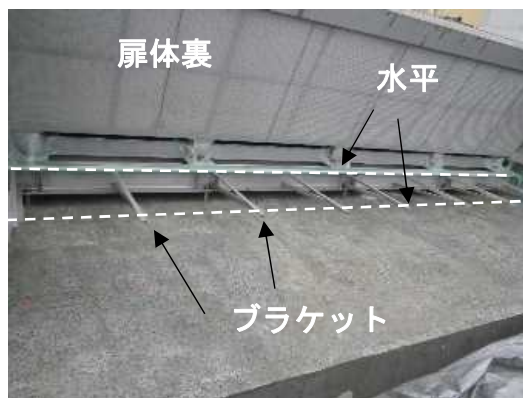


図-15 ブラケットで水平を明示している様子

### (3) 総合動作確認試験

総合動作確認試験は、模型実験や机上計算との差異を確認し設計手法の妥当性を検証するとともに、陸閘本体の作動における異常の有無についてチェック・確認するため、工事完成検査の一環として実施した。平成 27 年 10 月と平成 28 年 5 月に各 1 基、陸閘周囲を土嚢や L 型擁壁で囲い、ポンプで注水する事により次の項目を確認した。

- ① 扉体浮上開始する水深に問題がないか。
- ② 部材が干渉して異音、動きに問題がないか。
- ③ 水位上昇に追従してスムーズに作動しているか。
- ④ 異常な漏水がないか。
- ⑤ 水位低下時に起立保持されているか。

確認結果は異音などの異常もなく設計通りスムーズに起立していた。また、排水による水位低下時は扉体が起立保持できていることを確認した。

この試験状況は地元小学生、自主防災会メンバーや管理者及び陸閘操作関係者、背後企業従業員にも確認してもらい、フラップゲート式陸閘の特徴や信頼性について周知した。

特に、陸閘関係者や背後企業従業員に対して、実際に起立状況を見てもらうことにより、津波来襲時に陸閘を閉鎖することなく避難することが可能であると理解してもらえたと考えている。

図-16 にフラップゲート式陸閘の起立確認試験の様子、図-17 に車両を載せての起立確認試験の様子、図-18 に小学生と地域の方々が起立試験を見学する様子を示す。



図-16 フラップゲート式陸閘の起立確認試験



図-17 車両を載せての起立確認試験



図-18 小学生と地域の方々が試験を見学する様子

## 5. まとめ

フラップゲート式陸閘の設置は港湾局として初の取り組みであった。陸閘を自動化する上で最も重要である確実に起動することを達成するために、技術検討会での検討、入念な設計、施工を行った。フラップゲート式陸閘が機能することにより、「津波が迫る中、危険を冒してまで閉扉する必要なく、操作員の安全を最優先出来る。」ため、東日本大震災の教訓を克服する 1 つの手段が出来たと言える。

今後は、この技術が全国へと広まり、安全安心な社会に貢献できれば幸いである。