

# 新しい標高体系の構築に向けた 精密重力ジオイドの開発

松尾 功二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

日本の標高は、水準測量により維持管理されているが、全国規模の水準測量には膨大な時間と費用を要する。そこで、国土地理院では衛星測位技術と重力ジオイド・モデルによる効率的な標高の維持管理手法への移行を検討している。本研究ではそのために必要な精密重力ジオイド・モデルの開発を行った。重力データの更新と解析手法の高度化の結果、現行のモデルと比べ、約40%の精度向上が達成された。しかし、現在と同等の精度で実用的な標高値を維持管理するためには重力データの量と精度が不十分である。このため、航空重力測定を実施して重力データの拡充と精度向上を図り、重力ジオイド・モデルを高精度化することが不可欠である。

キーワード 標高, 衛星測位, 重力, ジオイド, 航空重力測定

## 1. 日本の標高体系について -現状と課題-

標高とは、地球の平均海面から重力の方向に沿って測った高さのことである。我が国における位置の表現は測量法（昭和24年法律第188号）第十一条（測量の基準）で「位置は、地理学的経緯度及び平均海面からの高さで表示する。」と規定されている。経緯度は単純にものさしを当てるように幾何的に表現されるものであるが、標高は、幾何的な手法だけでは直接計測することはできない。

冒頭の標高の定義は、より正確には、標高は、地球の重力ポテンシャルが等しい面（つまりその面上では水の流れは生じないような面）を基準とした重力ポテンシャル差を高さとして計測した値であり、基準面として便宜的に平均海面と一致する面をとる、とも定義される。この平均海面に最も一致する重力の等ポテンシャル面をジオイドと呼ぶ。ここで言う平均海面とは一般的に地球全体の平均海面を指すが、実用上の都合から、標高体系の定義はそれぞれの国によって異なっており、多くの場合、その国に隣接する湾や海域の平均海面と一致する重力等ポテンシャル面を、地域的なジオイドと定めている。日本の場合、東京湾の平均海面を地域的なジオイドと定め、標高0mの基準としている。

明治時代に我が国の近代測量が始まってから現在に至るまで、標高は水準測量によって計測されてきた。水準測量とは、2点に標尺を垂直に立て、その中間に標尺の目盛を読み込むための装置（水準儀）を置き、2点間の

高さの差（比高）を計測する技術である。水準測量の最大の長所は、ミリメートル精度の比高を比較的簡単に取得できることである。特に、短距離であれば極めて高い計測精度が簡単に得られる。また、水準測量は海岸に設置された験潮場を起点に、気泡管水準器を用いて水平面と鉛直に（重力の方向に沿って）比高を計測することから、標高をほぼ直接的に得ることができる。一方、水準測量の最大の短所は、基準となる場所から離れるに従って多大な労力と時間、そして費用を要することである。これは、1日で測定できる距離が4km程度であることと、1班の作業員が4名以上（安全管理者を含めると5名）必要であることに起因する。また、計測する距離が長くなるに従って計測誤差の累積（累積誤差）によって精度が低下するという性質も持つ。

国土地理院はこれまで、全国をいくつかのブロックに分けて水準測量を実施し、約10年間をかけて全国の標高改測を繰り返し実施してきた。しかしながら、予算や人員が縮小する中、今後もこれまでと同様な標高体系の維持管理を続けていくことは困難になりつつある。加えて、全国改測のような長距離路線の測定では、累積誤差の影響が特に大きく、広域で見た場合、標高にゆがみが生じやすいという手法上の課題も依然存在し続けている。そのため、現在、水準測量に代わる新たな標高体系の整備および維持管理手法が求められている。

## 2. 人工衛星を用いた標高決定手法

近年、人工衛星を用いた宇宙からの地球計測技術が目覚ましい進展を遂げている。特に、人工衛星から地表の位置を計測する衛星測位技術（Global Navigation Satellite System, GNSSと略される）の発展・普及は際立っている。現在では、測地測量分野に留まらず、スマートフォンやカーナビといった日常生活でもごく当たり前になり測位デバイスが組み込まれており、誰もが正確な位置を短時間で容易に得ることが可能となった。その利便性の高さは広く認知されており、現在では、アメリカのGPSに加えて、ロシアのGLONASS、ヨーロッパのGalileo、中国のBeidou（北斗）、そして日本の準天頂衛星システム（QZSS、衛星名は「みちびき」）等、多くの国が独自の衛星測位システムを所有している。

衛星測位で得られる位置は、地球を仮想的に単純な回転楕円体に近似した地球準拠楕円体を基準とする幾何的な位置である。経緯度は、地球準拠楕円体を基準とする純粋な幾何的情報であるため、衛星測位で直接測ることができる。一方、標高は、ジオイドを基準とし、地球重力の影響が反映されているため、衛星測位では直接測ることができない。

衛星測位で得られる高さは、一般的に楕円体高と呼ばれる。地球準拠楕円体面とジオイドとの間には、最大で100mの乖離があるため、楕円体高ではジオイドからの高さを表現することができない。その上、楕円体高には地球重力の影響が反映されていないため、楕円体高を標高として実生活に利用すると、水が標高の低いところから高いところに流れるという現実的な感覚とは相反する事態が起こりうる。楕円体高を実用的な標高に変換するには、基準面をジオイドに投影し直すとともに、地球重力の影響を考慮する必要がある。それを可能とする物理量が、ジオイド高である。

前述のとおり、ジオイドとは、平均海面に最も一致する地球重力の等ポテンシャル面である。ジオイドは、地球の不均質な質量分布・密度構造に起因する複雑な重力分布を反映して、緩やかながらも凸凹している。その起伏の大きさは、地球準拠楕円体を基準として、地球全体で見ると-100mから+80mであり、日本全体（海域含む）で見ると+10mから+50mである。つまり、衛星測位で得られる楕円体高をそのまま標高と読み替えた場合、場所によっては数十mの誤差が現れてしまう。

ジオイドは、地球の海面を仮想的に陸地の内部へと延長したときの海面の形状を表すもので、その勾配は、重力の強さと方向を表す。したがって、ジオイドを高さの基準とすることで、平均海面に準拠させるとともに、重力の影響を反映させることができる。そこで、予め地球準拠楕円体を基準としたジオイドの起伏（ジオイド高）を与えておけば、楕円体高からジオイド高を差し引くこ

とで、衛星測位の結果から直接標高を得ることができる。図-1に、標高、楕円体高、ジオイド高の関係を示す。

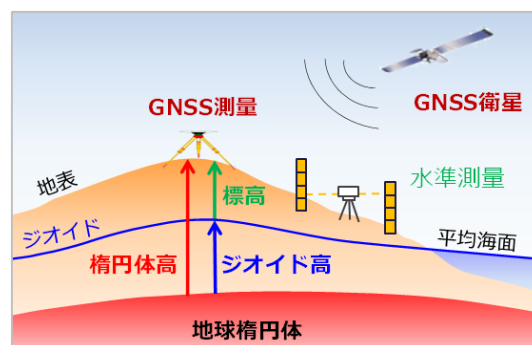


図-1 標高、楕円体高、ジオイド高の概念図

## 3. 衛星測位とジオイドに基づく新たな標高体系

前章において、標高が、楕円体高とジオイド高の差分で得られることを示した。楕円体高は、衛星測位によって短時間で容易に得ることができる。また、ジオイド高は、後に詳しく述べるとおり、重力データから予め計算することができる。これらを組み合わせることで、水準測量よりも簡便に標高を得ることができる。すなわち、衛星測位とジオイドを用いて標高を計測することで、水準測量が抱える技術的な弱点（多大な労力と時間、そして費用を要すること、計測する距離に連動して累積する誤差が発生すること）を回避し、日本の標高体系を効率的かつ均質に整備し維持管理することが可能となる。

衛星測位とジオイドに基づく新たな標高体系（以下「GNSSジオイド」という。）の利点として、主に以下の4つが挙げられる。

1) 全国を衛星測位で監視するためのインフラが既に整備済みである

国土院は、1990年代初頭からGNSS連続観測局である電子基準点の整備を全国に展開しており、2017年現在、日本列島上に約20km間隔で約1300点の観測局を設置している。このGNSS連続観測網をGEONET（GNSS Earth Observation NETWORK）と呼び、日本の精密な経緯度の決定や、地震活動等に伴う地殻変動の監視、GNSSを用いた測量作業の効率化・高精度化を実現している。GEONETは楕円体高も計測しているため、この施設をそのまま標高体系の維持管理に活用することができる。

2) 地殻変動を迅速に把握することができる

これはGEONETを活用することで得られる利点である。GEONETは常時観測を行っており、地震等に伴う地殻変動を瞬時に捉えることができる。例えば、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の際には、最大約1.2mの地面の上下変位が生じた。地殻変動の全体像を把握するため、

水準測量による再測には約7か月を要したが、GEONETは僅か数日ではほぼ全ての観測点の上下変動を把握することができた。また、2016年に発生した熊本地震の場合でも、水準測量による再測には約4か月を要したが、GEONETは僅か数日で計測結果を得ることができた。

なお、地震に伴う地殻変動ではジオイドの形状も変化するが、ジオイド高の変化は楕円体高の変化に比べて僅かである。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震の場合、楕円体高の変化が最大で約1.2mであったが、ジオイド高の変化は僅か1cm程度であった<sup>1)</sup>。衛星測位で計測される高さの変化は標高ではなく楕円体高であるが、地殻変動を把握する目的であれば楕円体高の変化のみを考慮して問題ない。

### 3) 精度が距離に依存しない

水準測量は、起点から終点までの計測距離に応じて誤差が累積し、全国路線のような長距離では大きな誤差が生じる。一方、GNSSジオイドについては、そもそも累積誤差の問題は生じない上、日本の場合、約20km間隔で電子基準点が利用可能であることから、最寄りの電子基準点を参照して測位を行うことで、誤差を小さく保つことができる。そのため、国家規模の標高体系といった広範的な高さを扱う場合においては優位性を持つ。

### 4) 利便性が高い

GNSSは今や、スマートフォンやカーナビといった一般的なデバイスにも搭載され、測量分野に留まらず幅広いユーザーを擁している。標高体系をジオイド基盤とすることで、いつでも・どこでも・誰でも標高を計測・利用することが可能である。

このように、GNSSジオイドは様々な利点を有するが、現状での課題としては、GNSSジオイドによる標高決定精度が、水準測量と比べるとやや不十分である点が挙げられる。水準測量による標高体系の誤差は、基準である東京湾から遠く離れた北海道で約4.5cmであるが、全国平均で見ると約2.5cmである<sup>2)</sup>。一方、GNSSジオイドによる標高の精度は、GNSS測量による楕円体高の精度とジオイド・モデルによるジオイド高の精度に依存する。前者は、様々な解析戦略の高度化の結果、現在では1cmを達成しているのに対し、後者の精度は全国平均で約8.4cmであり、両者を合わせると現状のGNSSジオイドの標高誤差は約10cmに達する。

一見して明らかなように、GNSSの楕円体高に比べ、ジオイドの誤差が圧倒的に大きい。そのため、現状ではGNSSジオイドの標高誤差は、主にジオイド・モデルに帰するもので、GNSSジオイドをもとに水準測量と同等の標高体系を構築するには、ジオイド・モデルの高精度化が必要不可欠となる。

## 4. 日本のジオイド・モデルについて - 現状と課題 -

ジオイド・モデルは、地上重力測定や衛星重力観測で取得した重力データを元に数値計算を行うことで構築することができる。この手法で得られたジオイド・モデルを重力ジオイド・モデルと呼ぶ。現行の重力ジオイド・モデルである「JGEOID2008」<sup>3)</sup>は、約27万点の地上重力データと2002年に打ち上げられた重力観測衛星GRACEの衛星重力データ、そして約58万点の船上重力観測および海面高度観測による海上重力データが使用されている。

現行のモデルには、以下の3つの技術的な課題がある。

### 1) 地上重力データの基準系が古い

地上の重力測定には、絶対重力測定と相対重力測定があり、絶対重力測定は全国約30箇所で行われ、これらを起点に相対重力測定で相対的な重力値が計測される。絶対重力測定で計測された観測点を基準重力点、これをもとに精密な相対重力測定で計測された観測点を一等重力点と呼び、国土地理院によって1952年から観測網の整備が行われている。現行のモデルで使用されている重力データは、JGSN75 (the Japan Gravity Standardization Net 1975) という40年以上も前に整備された基準系に準拠している<sup>4)</sup>。重力値は、地殻変動や地表・地下質量の再分配によって時々刻々と変化するため、これを基準とする重力データには40年以上の重力較差が内包されていることになる。国土地理院は、1990年代から絶対重力値の更新作業を進め、2017年3月に新しい重力基準系JGSN2016を公開した<sup>5)</sup>。既存の地上重力データを新しい基準に変換することで、約40年間の重力値の乖離を解消することができる。ただし、地上の重力測定ができない山間部や沿岸域が重力データの空白域となり、モデルの精度を著しく落とす要因となっている。

### 2) 衛星重力データが古い

現行のモデルでは、2002年にアメリカとドイツが共同で打ち上げた重力観測衛星GRACEのデータが使用されている。GRACE衛星は、打ち上げ当時は、従来の衛星重力観測の常識を覆す革新的な衛星であったが、2009年になると、その性能を更に上回る重力観測衛星GOCEが欧州宇宙連合によって打ち上げられた。GOCE衛星の精度は、地球重力場の静的な状態の観測においては、GRACE衛星を圧倒するものであり、GRACE衛星は空間分解能約100kmまでの帯域でジオイド高に換算して約20cmの誤差が生じるが、GOCE衛星の場合、空間分解能約100kmまでの帯域ならば約2cm程度の誤差である<sup>6)</sup>。図-2に、GRACE衛星とGOCE衛星から計測した日本周辺の重力分布図を示す。GRACE衛星は、縦縞ノイズと呼ばれる計測システムの設計に依存した特有の誤差の影響を強く受け、縞状の誤差が重なっているが、GOCE衛星は、これを改善するための特別なセンサー（3軸直交型の加

速度計)を搭載しており、その結果、より精緻な重力分布図を描き出すことに成功している。GOCEデータを導入することで、重力ジオイドの長波長帯域の成分に大きな改善が期待される。

### 3) 重力データの処理手法に改善の余地がある

重力データからジオイド高を算出するには、地上で測った重力値をジオイド上の重力値に変換するという処理が必要となる。これを重力化成と呼び、重力ジオイドを計算するうえで最も重要な処理の1つである<sup>7)</sup>。現行モデルでは、ヘルマート第二凝縮化成と呼ばれる手法で重力化成が施されている。この処理を施すには、地形の起伏を表す数値標高モデル (Digital Elevation Model, 以下「DEM」という。)が必要不可欠となり、現行モデルでは、250mメッシュのDEMが使用されている。国土地理院は2008年4月に、より詳細な10mメッシュのDEMを公開している。これを用いることで、より厳密な重力化成処理を施すことができ、重力ジオイドの高精度化が期待できる。さらに、詳細なDEMを利用すれば、地形の引力で生じる短波長の重力成分をモデル計算によって推定することができる。これを残差地形モデルと呼び、このモデルを導入することで重力ジオイドの空間分解能と精度を高めることができる<sup>8)</sup>。

また、重力データの結合処理も重要な計算過程の1つである。重力データには、地上で測られたものと衛星から測られたものがあり、それぞれ得意とする空間帯域と精度が異なる。そのため、精密な重力ジオイドを計算するには、異なる方法で計測された重力データを、それぞれの特徴を考慮しながら最適に結合する必要がある。現行モデルでは、単純な結合手法<sup>9)</sup>が用いられているが、現在、より厳密な物理測地理論に基づく結合手法<sup>10)</sup>が提案されている。重力データの結合手法の改良により、重力ジオイドの高精度化が期待できる。

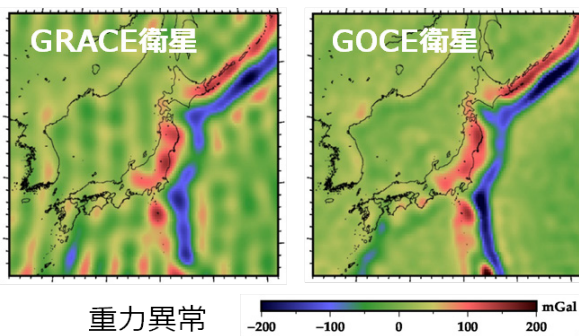


図2 GRACE衛星とGOCE衛星で計測した日本とその周辺の重力異常のマップ

## 5. 新たな重力ジオイド・モデルの開発

本研究では、前章で挙げた技術的な課題に取り組み、日本の重力ジオイド・モデルの更なる高精度化に臨んだ。地上重力データの基準系については、古い基準系 (JGSN75) から最新の基準系 (JGSN2016) へと更新した。衛星データについては、GOCE衛星を含む最新の衛星重力データおよび海上重力場モデルを導入した。重力データの処理手法については、10mメッシュのDEMを用いた重力化成処理の高度化と残差地形モデルの導入、そして重力データの結合処理の高度化を行った。以上の改良により新たに構築した日本の重力ジオイド・モデルを図-3に示す。また、表-1に新旧のモデル間のデータ・解析手法の違いをまとめる。なお、ジオイド計算の際に使用した各種計算式については、Matsuo et al. (2016)<sup>11)</sup>を参照されたい。

新たな重力ジオイド・モデルの精度評価を行うために、まず、971点の水準点において、GNSS計測により楕円体高を算出し、楕円体高と標高との差をとることでジオイド高を求めた。このようにして求めたジオイド高を実測ジオイドと呼ぶ。実測ジオイドは、計測に水準測量を伴うことから観測点数は限られてしまうが、現状では重力ジオイドよりも精度が良い。そのため、実測ジオイドを重力ジオイドの精度検証の基準として用いることは妥当である。次に、重力ジオイドと実測ジオイドとの比較検定を行った。重力ジオイドと実測ジオイドの差分をとり (図-4)、その標準偏差を計算する。新旧の重力ジオイドと実測ジオイドとの標準偏差を表-2に示す。この標準偏差が、一般的に重力ジオイドの精度を表すものである。その結果、旧モデルでは8.44cmであったのに対し、新モデルは5.21cmとなった。すなわち、重力データの更新と解析戦略の高度化によって3.23cmの精度向上が達成された。これはおおよそ40%の精度向上とも言える。各改良と精度向上の大まかな内訳は、重力データの更新によって約2cmの向上、解析戦略の更新によって約1cmの向上であった。

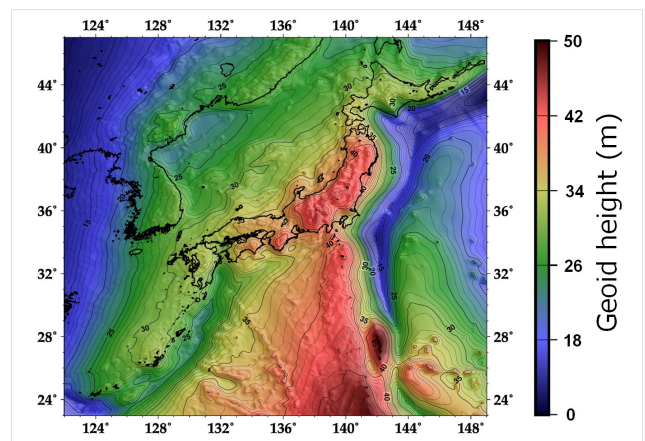


図3 新たに構築した重力ジオイド・モデル

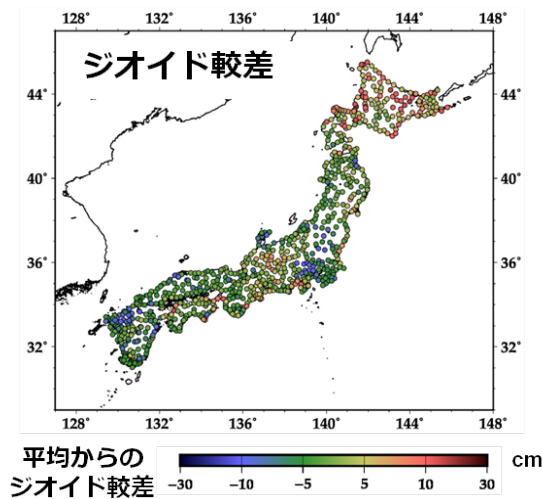


図4 重力ジオイドと実測ジオイドの差

表-1 新旧の重力ジオイド・モデルのデータと解析手法の比較

	JGEOID2008	本研究
地上重力基準系	JGSN75	JGSN2016
衛星重力データ	GRACE衛星	GOCE衛星
海上重力データ	KMS02モデル	DTU15モデル
数値標高モデル	250m	10m
重力化成	ヘルマート第二凝縮化成	ヘルマート第二凝縮化成
重力結合	Meissl 法	FEO法
残差地形モデル	未使用	使用

表-2 新旧の重力ジオイド・モデルの精度の比較

	JGEOID2008	本研究
標準偏差	8.44 cm	5.21 cm

## 6. 航空重力測定の必要性

本研究により、重力ジオイドの精度を大きく向上させることに成功した。しかしながら、まだ十分な精度とは言えない。新たな重力ジオイドをもとに標高体系を構築した場合、GNSS楕円体高の誤差を合わせて、おおよそ6cmの精度を持つ標高体系を築くことができるものの、現在の水準測量による標高体系の精度が、約2.5cmであることから、これと同等とするには、重力ジオイドの精度を更に2-3cm向上させる必要がある。現在の利用可能な重力データのみでは、これ以上大きな精度向上を達成することは難しいだろう。解析戦略の高度化には未だ余地があるが、それでも期待できる精度向上は精々1cm程度と推測される。つまり、今以上の精度向上を達成するためには、重力データの拡充と精度向上が必要不可欠である。

ある。

図4によると、北海道の石狩・空知・網走・十勝地方、東海地方の富士山周辺、中央アルプス等において、重力ジオイドと実測ジオイドの差（ジオイド較差）が特に大きいことが分かる。すなわち、特にこれらの地域において、地上重力データの欠如により重力ジオイドの精度が悪い。図-5に、3km<sup>2</sup>に含まれる重力データの測点数の分布図を示す。この図からわかるように、北海道で空白域が広く、ジオイド較差も10cmを超える場所が多い。これらの領域における重力データの空白を埋めることが、新たな標高体系に移行するための必須の課題となる。重力測定は機動性の高い観測手法であるが、これらの空白域は深い植生に囲まれていたり標高が高いため、地上からではデータを広範的に取得することは極めて難しい。

また本研究では、約28万点の地上重力データを使用しているが、そのうち国土地理院が計測したものは約1万6千点で、残りの約26万点は大学や企業から提供を受けたものである。国土地理院による重力測定は、重力基準網の構築が目的で、念入りの品質検定によって高い精度が確保されている。一方、大学や企業による重力測定は、断層調査や資源探査が主な目的で、データの質よりも量が重視されたため、十分な品質検定が行われていない。そのため、多くの地上重力データは、計測誤差によって十分な精度を有していない可能性がある。

加えて、使用した地上重力データの大部分は、主に1990年代以前に計測されたものである。当時はGNSS測量を容易に行えるものではなく、観測点の位置は一般的に、目視による地図の読み取りによって決められていた。観測点の位置情報は、地上重力データの処理に必要な不可欠となるもので、この情報の不正確さが重力ジオイドの誤差となっている可能性もある。

これらの問題を解決する有効な手法が、航空機を用いた重力測定である。これは航空機に重力計と位置を測るGNSS受信機を搭載し、陸域とその周囲を等間隔に飛行することで重力を計測する手法である。航空重力測定は、世界の様々な国で既に実施され、目覚ましい成果を挙げている。インドネシア、モンゴル、ネパール、マレーシア、フィリピンなど元来重力データが乏しい国から、アメリカ、ニュージーランド、デンマーク（グリーンランド）といった測地学の先進国でも航空重力測定が実施され、GNSSとジオイドを基盤とする標高体系への移行が着々と進められている。

航空重力測定は、地球上あらゆる地域の重力データを、短時間で高密度かつ均質に取得することができる。また、GNSSによってセンチメートル精度で観測位置を計測する。つまり、航空重力測定によって、重力データの拡充と精度向上を同時に図ることができる。

日本は、四方を衝突し合う大陸・海洋プレートに囲まれ、世界でもとりわけ複雑な重力ジオイド構造を有する国である。精度3cmの重力ジオイドを達成するには、航

空重力測定の実施が不可欠である。

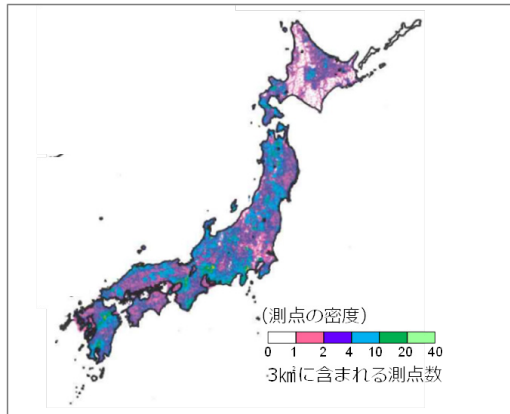


図-5 重力データ測点数の分布

## 7. まとめ

明治以来の仕組みである水準測量による標高体系は、日本の正確な標高を与える重要な社会インフラであるが、水準測量による全国規模の測定には多大な労力と時間、そして費用を要する。そのため、活発な地殻活動で定期的な改測を必要とする我が国にとって、標高体系の維持管理が困難になりつつある。国土地理院では、標高体系の効率的かつ長期的な維持管理を可能とするために、衛星測位とジオイドを基盤とする新たな標高体系への移行を検討している。国土地理院が全国に展開する電子基準点を活用することで、災害後もすぐに標高を算出し、迅速な復旧・復興作業が可能となる標高体系が構築される。しかしながら、衛星測位とジオイドによって水準測量と同等の精度を持つ標高体系を構築するには、ジオイド・モデルの高精度化が解決すべき必須の課題となる。本研究は、重力データの更新と解析戦略の高度化により、日本の重力ジオイド・モデルの高精度化に臨んだ。その結果、現行のモデルである「JGEOID2008」と比べ、約3cmの精度向上を達成し、約5cmの精度を持つ新たな重力ジオイド・モデルを構築することに成功した。しかし、水準測量により構築された現在の標高体系と同等の精度で

標高値を得るためには、この重力ジオイド・モデルの精度を更に2-3cm向上させる必要がある。新たな重力ジオイド・モデルの誤差の要因は、主に重力データの欠如に帰するため、更なる高精度化には重力データの拡充と精度向上が必要不可欠となる。このためには、航空重力測定を速やかに実施し、これに基づく新たな標高体系の移行に向けた適切な準備を進めることが不可欠である。

謝辞：重力ジオイドの構築には、産業総合研究所や名古屋大学、金沢大学、北海道大学、旧金属工業事業団（現JOGMEC）等から提供を受けた地上重力データと、欧州宇宙連合が提供するGOCE衛星重力データ、デンマーク工科大学が提供する衛星海面重力データを使用している。ここに記してお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) Matsuo & Heki (2011) : Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 38 (7), L00G12.
- 2) Imakiire & Hakoiva (2004) : JGD2000 (vertical) -The New Height System of Japan-, *Bulletin of the GSI*, vol.51.
- 3) Kuroishi (2009) : Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, *Earth Planet Space*, 61, 807-
- 4) 山本宏章ほか：国土地理院の重力測量の歴史-観測技術と重力基準の変遷-, 国土地理院時報, 投稿中.
- 5) 吉田賢司ほか：日本重力基準網 2016 の構築, 国土地理院時報, 投稿中.
- 6) 宮原伐折羅ほか：国土地理院の重力測量の展望- 測定技術と重力基準の将来像-, 国土地理院時報, 投稿中.
- 7) Heiskanen & Moriz (1967) : *Physical Geodesy*, San Francisco W. H. Freeman and Company.
- 8) Forsberg (1984) : A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling. OSU Report, Dept. of Geodetic Science and Surveying, Ohio State U., Columbus, USA..
- 9) Featherstone WE, Evans JD, Olliver JG (1998) : A Meissl-modified Vanicek and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric geoid computations. *Journal of Geodesy* 72(3), 154-160.
- 10) Meissl, P. (1971) : Preparations for the numerical evaluation of second-order Molodenskii-type formulas. Report 163, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, OH, 72pp.
- 11) Matsuo et al. (2016) : Development of a New Gravitational Geoid Model for Japan, proceedings of FIG Working Week 2016.

# 大型遠隔操縦式草刈機の効率化について

間野 哲浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 中国技術事務所 施工調査・技術活用課（〒736-0082 広島県広島市安芸区船越南2-8-1）

河川除草では、大型遠隔操縦式草刈機（以下、大型遠隔）導入による除草費用削減が進められてきた。しかし近年、植生の変化や除草回数減少等による草丈の変化から、除草作業に支障を来す現場が発生している。一方で、大型遠隔では構造物周りや法尻・天端部分は除草できず、人力による補助刈りが必要である事や、前方安全確認（障害物、不陸等）が遠隔では困難である事等、大型遠隔のメリットを生かせていない状況があり、飛び石等の安全に関する問題も顕在した状態にある。現場作業における問題点を解消する事により、除草作業の効率化を図り、更なる除草費削減に資する事を目標に、大型遠隔の改良検討を行ったので報告を行う。

キーワード 堤防除草、コスト削減、草刈機、遠隔操縦

## 1. はじめに

直轄河川においては、堤防点検と堤体の保全のために毎年出水期前及び台風期前に堤防除草を実施している。

堤防除草作業においては、大型遠隔の導入による効率的な除草作業を行う事で、維持管理費のコスト削減が進められてきた。しかし、近年現場条件の変化により、効率的な除草作業が進められなくなった現場が発生している。又、大型遠隔では構造物周りや法尻・天端部分は除草できず、人力による補助刈りが必要である事等大型遠隔のメリットを生かせていない状況がある。維持費削減に向けて、大型遠隔の更なる効率化を進める事を目的に、大型遠隔の改良検討を行うものである。



写真-1 大型遠隔操縦式草刈機

表-1 除草方式別の面積(全国・H25)

除草方式	面積(百万㎡)	割合(%)
人力	4	1
肩掛け式	85	16
大型遠隔操縦式	107	20
ハンドガイド	284	53
その他	61	11
合計	540	100

表-2 主要諸元

機械質量	kg	2,800(モア装着時)
機械寸法	全長	mm 4,360(モア装着時)
	全幅	mm 2,040(モア装着時)
	全高	mm 1,260(アンテナ除く)
エンジン	定格出力	kW (PS)/rpm 49.3(67.0)/2600
走行速度	最高/最低	km/h 0~6.5
刈り取り部	草刈り幅	mm 1,885
	型式	フレールモア(ハンマナイフ)
	駆動方式	油圧ポンプ+油圧モータ

## 2. 主要諸元

大型遠隔は平成11年度に北陸地方整備局で開発され、それ以降全国で現在約200台順次導入され、中国地方整備局では34台が配備されている。大型遠隔の主要諸元は次のとおりである。

## 3. 現状の課題と改良方針

大型遠隔操縦式草刈機の改良検討を行う上で、既存の大型遠隔操縦式草刈機の課題や要望を確認するために現場ニーズの調査を行った。合わせてシーズ調査を実施し、

改良の必要性や改造規模、改良後の効果などによる改良検討項目の選択を行う事とした。

**(1) 現場ニーズ調査**

現状の堤防除草作業における問題点や改善要望について、大型遠隔を使用している全地整の管理者と受注者にアンケートを実施し、堤防除草についてのニーズ調査を行った結果、下記の様な結果が得られた。

【堤防除草作業の効率化についてニーズ】

- ①イタドリ、ツル類が1回刈りで出来ずに作業効率が落ちている。
- ②竹の除草が1回刈りで出来ずに作業効率が落ちている。
- ③濡れた草にも対応可能な除草機械が望まれる。
- ④倒れた草にも対応可能な除草機械が望まれる。
- ⑤上記以外の理由で刈り残しが多く、2回刈り等で作業効率が落ちている。



写真-2 イタドリ

写真-3 付属構造物

【堤防除草機械の構造についてニーズ】

- ⑥素掘りの堤内排水や付属構造物が多いため人力除草を行っており、コスト削減のための機械施工が望まれる。
- ⑦堤防を傷める恐れがあり、軽量化した除草機械が望まれる。(軽量化については、除草の効率化とは相反するため検討外とした)
- ⑧飛び石の無い除草機械が望まれる。
- ⑨刈り幅の広い除草機械が望まれる。
- ⑩1. 4割未満への対応拡大が望まれる。
- ⑪モアが横にスライドする除草機械が望まれる。
- ⑫モアのタイヤに倒された草が刈りにくい
- ⑬モア外装の強度が不足しており変形しやすい。
- ⑭モア内部に絡みついたツル類を簡単に除去できる構造が望まれる。
- ⑮草刈性能や耐久性に優れた刈刃が望まれる。

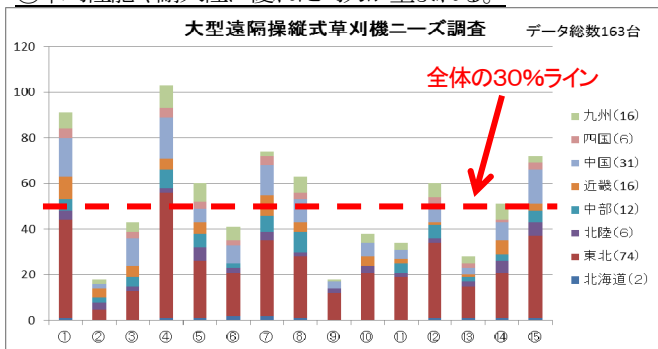


図-1 大型遠隔操縦式草刈機ニーズ調査結果

特に下線を引いた7項目については、全体数の30%を超える要望項目であり、特に重要なニーズが確認できた。

**(2) シーズ調査**

シーズ調査は、草刈り関連機械を基本に、新製品や新技術に加え、大型遠隔に導入可能な要素技術等を対象とした調査を実施し、改造や改良対応の可能な仕様の整理を行った。特に改良費用については、本体購入価格との対比や、改良後のコスト削減および安全性向上効果などを整理し、改良検討項目への採否や優先順位の判断要素とした。

**4. 改良検討項目の選定と改良検討**

大型遠隔の改良検討を行うため、①現場ニーズ調査結果、②シーズ調査結果に加え、③改良費用、④改良後の効果を踏まえて、改良検討項目の選定を行った。選定した各改良検討項目について、試験機による試験施工や比較試験を行い、改良効果の確認を行った。各改良検討項目の検討結果は以下のとおりである。

**(1) 草刈性能向上、除草の効率化を目的としたモア部の改良検討**

**a) 刈刃の形状変更**

標準の刈刃形状は、左右2枚を1組として、への字型に加工された刈刃がドラムに取り付けられており、ドラムの断面に90°ごと4方向に配置されている。モア内部の刈刃取付状況を写真-4に、標準の刈刃の形状と配置イメージを図-2に示す。



写真-4 モア内部の刈刃取付状況

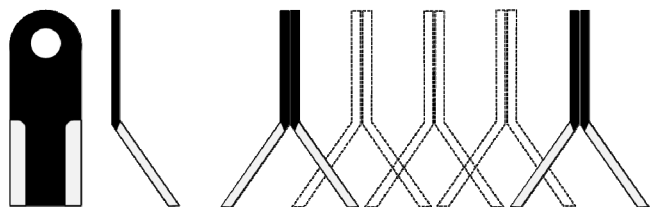


図-2 標準の刈刃の形状と配置イメージ

雑草の太さや硬さ、草丈、繁茂量などに対応するため、草刈性能の向上を目的とした刈刃の形状や曲げ角度の変更の改良検討を行った。



### ①刈刃の刃先形状加工

他の草刈機メーカーでは刃先にギザギザ加工されたオプション部品があり、鋭角で薄いハンマーナイフ式の刃先にギザギザの溝形状を追加することで、雑草の切断性能が向上するものと考えられるので、試作品を製作し、試験施工を行った。



写真-5 刈刃の刃先の形状改良部品

刈刃の左半分を標準刃、右半分を形状加工刃として試験施工を行った結果、標準刈刃とギザギザ溝加工刃の形状による草刈性能の違いは見られなかった。試験施工の状況を写真-6に示す。



写真-6 刃先形状加工時の試験施工状況

除草性能について現地試験では標準仕様と同等と判断されるため、改良効果や必要性は少ない。

### ②刈刃の刃先幅広形状変更（1）

大型遠隔操縦式草刈機の本体は、H11年当初の開発・製造から15年以上経過している中で、細部には改良や変更が行われており、H23年製の草刈機から取り付けられている刈刃部品は標準仕様から幅広形状に変更されている。

従来の標準仕様（幅50mm）と幅広形状（幅60mm）の刈刃部品について、外形図を図-3に示す。

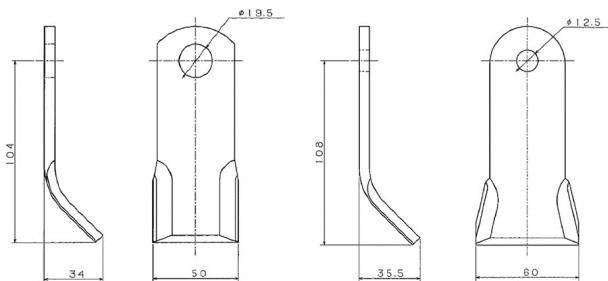


図-3 刈刃の従来仕様（左側）と幅広仕様（右側）

従来仕様と幅広形状仕様の除草性能を比較する為、確認試験を行った。



写真-7 比較試験状況(青:従来仕様、赤:幅広形状)

試験は、草刈機を段差の端部に配置して、ドラムと刈刃の回転状況を目視しながら、試験対象の板材料を直接当てる方法にて実施した。幅広形状と重量の増加が要因となり、従来の仕様とは切削力や打撃力に差があるものと確認できた。部品交換のみで対応できるため、従来仕様機への活用が見込まれる。

### ③刈刃の刃先幅広形状変更（2）

ハンマーナイフ式草刈機は、その名称のように回転させた刈刃を連続的に打撃することで雑草を切断・粉碎しているため、その形状や重量を変更することで草刈性能を強化させる形状が考えられる。

標準仕様の刈刃は、固定している上部から刃先端までが直線状であるが、他の草刈機に採用されている刈刃には、先端の幅が広く加工された末広型の形状もあるため、寸法形状を検討して刃先を幅広形状に変更した刈刃を試作し、試験施工を行った。試作する刈刃形状は、取付穴から縦の長さや板厚は標準仕様と同様とするため、刃先の横幅を50mmから80mmまで広げて計画した。刃先形状の幅広型検討図を図-4に示す。

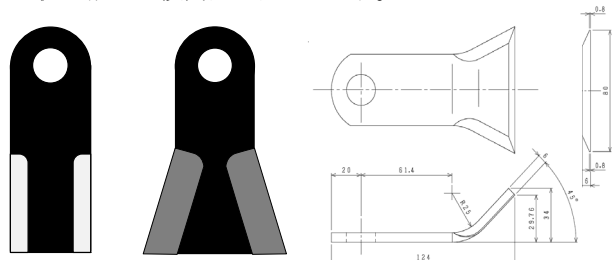


図-4 刃先形状変更の幅広型検討図（左側は標準仕様）

刈刃の左半分を標準刃、右半分を幅広形状刃として試験施工を行った結果、標準刈刃と幅広刃の形状による草刈性能の違いは見られなかった。除草性能について標準仕様と同等と判断されるため、改良効果や必要性は少ない。

### ④刈刃の刃先曲げ角度変更

標準仕様の刈刃は、刃先位置が約45° 曲げられているへの字型であるが、垂直に生えている雑草に傾斜した状態で切り込むこととなるため、曲げ角度を変更した場合の草刈性能について比較検証を目的とした改良部品を製作した。刃先の曲げ角度を45° から70° に変更した刈刃の検討図を図-5に示す。

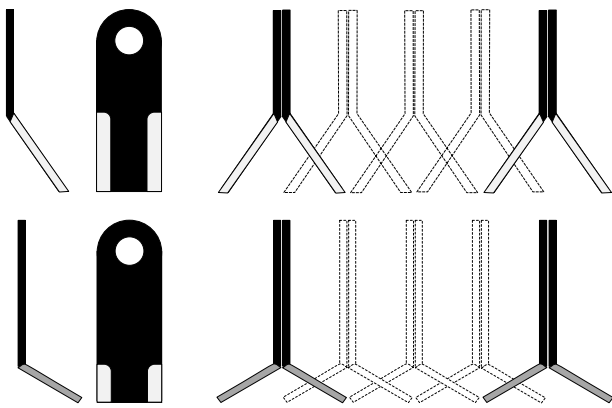


図-5 刃先の曲げ角度を変更した刈刃検討図  
(上段は標準仕様)

刈刃の左半分を標準仕様、右半分を曲げ角度70° 刃として試験施工を行った結果、標準刈刃と加工刃の形状による草刈性能の違いは見られなかったが、加工刃で草刈り後の草が刈刃に固着する現象が見られた。試験施工後の刈刃状況を写真-8に示す。



写真-8 刈刃状況(左:従来仕様、右:曲げ角70°仕様)

除草性能について現地試験では標準仕様と同等である上、刈草の固着による作業性の悪化が認められるため、改良効果や必要性はないと判断した。

## b) つる性植物巻き込みへの対応

ニーズ調査にて要望の多い項目として、つる性植物の巻き込み対応がある。除草作業中につる性植物がドラムに巻き付き、草刈性能の低下やドラムの回転不良が発生する。つる性植物がドラム軸に巻き付いた場合、モア装置を持ち上げて下面から確認するが、堤防斜面内では草刈機本体が不安定で視認性も悪いいため、法肩や天端まで移動しての対応が行われているが、作業性が悪く時間を要している。そのため、つる性植物の巻き付き防止対策と巻き付いたつる性植物の除去対策を検討する。巻き付いたつる性植物の除去対策としては、

- ①巻き付いたドラムから簡単に切断する構造
  - ②モア部のカバーを簡単に開閉する構造
- を対象として検討するものとした。

### ①巻き付いたドラムから簡単に切断する構造の検討

巻き付いたつる性植物の除去対策としては、ドラムの軸方向にあらかじめ凹凸形状に加工することで、つる性植物がきつく巻き付いた場合でも簡単に切断しやすくする

構造を検討する。巻き付いたつる性植物の除去対策のイメージを図-6に示す。

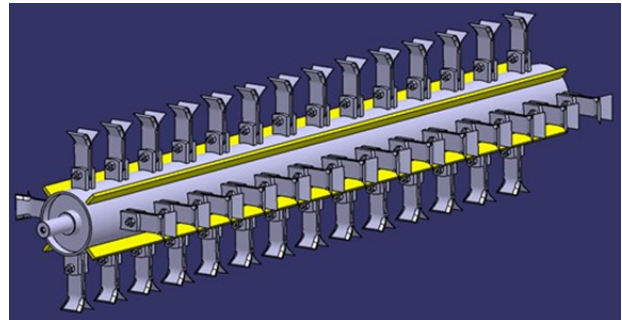


図-6 巻き付いたつる性植物の除去対策のイメージ

回転ドラムには、刈刃を固定するフランジが90°ごと4箇所配置されているため、追加する凹凸も回転時のバランスを考慮して4箇所とし、ドラム軸の全長分(刈幅)に配置する。また、追加する凹凸は刈刃の動作範囲に干渉することのないよう、フランジ高さよりも低い形状とする。

現地試験では、つる性植物を模擬してナイロンロープを絡ませたところ、剪定バサミが入る隙間を確認でき、実際のつる性植物除去作業が容易になるものと思われる。



写真-9 点検窓を使用したつる草除去状況

### ②モア部のカバーを簡単に開閉する構造の検討

モアケースの上面に開閉可能な点検窓があれば、モア装置内部の確認が容易となるため、点検窓を追加配置する改良検討を実施した。点検窓の寸法は、既製品の規格とモアケースの形状、実際の手作業等を考慮して200×300mmの長方形とし、蓋の形状や金網など3種類を試行するものとした。

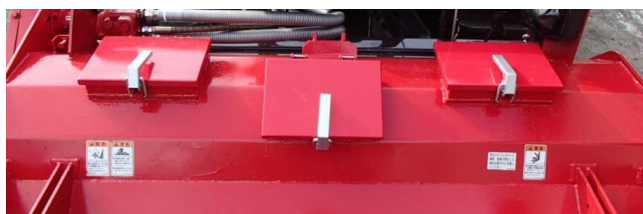


写真-10 モアケースへの点検窓3箇所配置状況

試験機に設置した点検窓を試験施工時に使用し、使用状況の確認を行った。現地での確認状況を写真-10に示す。

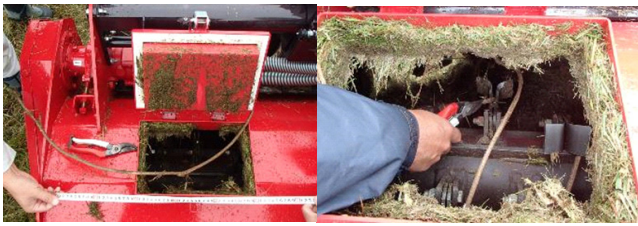


写真-10 点検窓を使用したつる草除去状況

追加した点検窓は200mm×300mmの大きさで、剪定バサミを使った作業が可能であり、①の回転ドラムの凸凹構造追加と合わせてつる草の除去作業が容易となる事が確認できた。ただし、改良仕様として採用する場合には寸法形状を考慮した専用の点検口を配置することが望ましい。

### c) 車輪の踏み跡対策

#### ①車輪の取付位置変更

モア部前面にある車輪の位置は、凹凸などの不陸に対応するため、左右の2箇所もしくは中央を含む3箇所配置されている。今回車輪が草刈前の雑草を踏み、刈りにくくしてしまうことを懸念して、草刈り幅1850mmの外側(77.5mm)に配置して状況確認を実施した。

除草後の仕上がりは良好な状態であるが、大型遠隔操縦式草刈機は車体幅が大きく、運搬時には4tトラックの荷台幅とギリギリであるため、今回の車輪を外側に移設した状態では運搬不可能となる。作業時と運搬時で車輪の位置を切り替えることが必要となる。



写真-11 標準仕様の車輪の取付位置



写真-12 変更後の車輪の取付位置

#### ②車輪を取り外しソリ方式に変更

車輪の踏み跡が残ること、地形への追従に車輪取付位置が影響されることがあるため、モア部前方の車輪を取り外し、ソリ部のみで受ける案を検討する。

前述のニーズ調査にて回答の多い内容に、ソリ部の補

強対策が挙げられており、車輪を配置していてもソリ部が受ける重量や地面との摩擦が確認される。そのため、ソリ部の摩耗に対する補強対策と、接地圧の低減や地形条件への追従を考慮したソリ部形状の見直しを組み合わせ検討した。本検討では、車輪を取り外すことを考慮したソリ部品の高さ変更と、モア装置の安定保持への対応として底板の幅を50mmから70mmに広げた形状とした。



写真-13 ソリ形状の変更部品

(上段：標準部品+車輪、下段：改良部品+ソリのみ)

試験施工の結果、モア装置の安定保持と車輪の踏跡解消は確認できたが、従来から問題でもあるソリ部品の底板に除草後の刈り草が集積する状況が認められた。又、ソリ部品の接地面積が大きく、方向転換時にはモア装置を持ち上げる必要があり、作業性にも問題がある。

### (2) 施工効率を考慮した飛石の改善検討

飛石防止の改善検討策として、ゴム板の除草作業時に開閉する隙間の縮小と、破損・欠損対策として、切り込み幅の変更とゴム板厚さの変更を行うものとした。前方への飛石低減対策としては、大きく開閉しないよう切り込み幅を狭くすることで、発生する隙間を縮小させる形状とした。標準仕様は幅130～135mm、改良仕様は幅82～86mmである。ゴム板の補強対策としては、標準仕様の4mm厚(1プライ)を6mm厚(2プライ)とすることで、厚さの増加とゴムの間にある芯材も2重となり、耐久性を向上させるものとした。

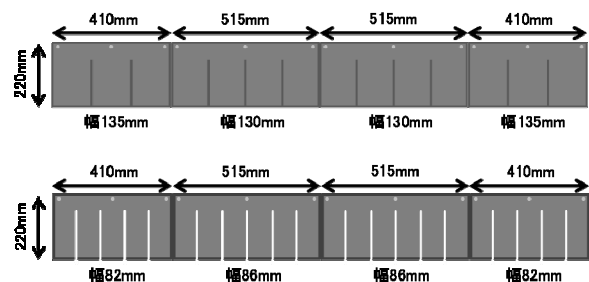


図-6 ゴムカバーの切り込み幅検討図

(上段：標準仕様、下段：改良品)

又、飛石低減策として、チェーンの追加を検討する。モア部の前面に配置するチェーンは、雑草の隙間などに入りやすく、前述のゴム板のように全体が曲げられることは少ないため、飛石防止効果が期待できる。さらにゴムカバーをチェーンの前後に2段配置とすることで更なる飛石低減効果の向上を目指し、効果の検証を行った。



写真-14 チェーンとゴムカバーの2段配置状況

試験施工の結果、切り込み幅の変更とゴム板の増厚、チェーンとの組み合わせで良好な低減効果があり、改良も容易で安価である。ただし、ゴムカバーの2段配置については、車輪との位置関係が厳しく除草前の雑草を強く押し倒す為除草効率の低下が見られ、飛石数はチェーンとゴムカバー1段と同程度であることから、導入効果は少ない。

### (3) 法尻、天端、構造物周り等の除草可能な方策検討

#### a) 草刈位置の変更

法尻、天端、構造物周り等の除草方法として、ハンドガイド式草刈機は、草刈幅1.55mに対して片側へ500mmのスライド機能を有しており、電動スライド装置により草刈位置が調整可能となっている。詳細検討の結果、ハンドガイド式草刈機のスライド機構を流用し、大型遠隔へのスライド機能の追加が可能となる事から、試作機への導入を行った。モア装置のスライド機能は、標準モア装置の重量350kgに130kgの増加となるが、左側へ350mmスライド可能な状態となった。試験機への導入状況と試験施工実施状況を写真-15, 16に示す。



写真-15 試験機に導入したモア装置のスライド機能



写真-16 スライド機能を使用した天端での除草状況

試験施工の結果、モア装置の左側側方の除草作業が可能となる事で、法尻、天端、構造物周り等の除草に対応できる事が確認できた。除草作業幅1850mmに対して、

量が350mmはやや少ないが、草刈機の側方まで除草可能となることの効果は大きいと判断する。

### (4) 安全確認方法等の簡素化による作業効率の向上や負担軽減の検討

#### a) 草刈作業中の周辺状況確認

堤防除草作業は、その作業中除草範囲内にある構造物や標識、不法投棄ゴミなどを確認しつつ行っているが、遠隔操縦であるにも係わらず、大型遠隔周辺の状況確認を行うため運転操作をしながら常に草刈機の周辺に帯同している状況であり、操縦者の負担となっている。

その対策として、ワイヤレスカメラ機器類の追加により、遠方でも周辺状況確認が行えるよう検討を行った。



写真-15 ワイヤレスカメラのイメージと大型遠隔設置状況

大型遠隔の前後方用2箇所カメラを設置し、現場試験を行った結果、通信距離100m程度であれば、画質は良好でモニタ画面も見やすい事が確認出来た。作業効率の向上や操縦者の負担軽減に効果を発揮すると思われる。

## 7. 改良検討のまとめ

上述の改良検討の結果を基に、改良効果と導入費用を含めて実機に導入する改良項目の採否を行った結果、下記の項目を採用する事とした。

- ①刈刃の刃先幅広形状(H23以前購入機対象)：草刈能力の改善・向上
- ②モアケースに点検窓追加：メンテ作業の効率化
- ③回転ドラムに凹凸部材の追加：メンテ作業の効率化
- ④飛石防止チェーンの追加：飛石防止対策の強化
- ⑤ゴムカバーの切込幅変更：飛石防止対策の強化
- ⑥モア装置のスライド機構追加：除草作業範囲の拡大
- ⑦カメラ機器類の追加：安全確認の効率化

採用した改良項目は、既存の草刈機を対象とした改良仕様書(案)と新規購入を対象とした購入仕様書(案)に分けて取りまとめた。

## 8. 今後の課題

現在大型遠隔はメーカーで第4次排ガス対策基準対応の為の大幅な仕様変更が進められており、上述の改良仕様の導入について対応中であることから、その進行状況を確認しつつ、早期に改良仕様の普及促進を図ってきたい。

# 余部管内の河川維持管理におけるコスト縮減の取組みの紹介

平山 岳弥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 淀川河川事務所 調査課 (〒573-1191大阪府枚方市新町2-2-10)

近年、河川の維持管理関係費の削減が続いており、発注段階のみならず現場レベル（施工段階）でもコスト縮減に積極的に取り組み、限られた予算の有効な執行に努める必要がある。

揖保川下流部の余部出張所管内では、先行事例や各種文献、あるいは施工業者との対話・打合せの中で見つけた、河川の維持管理に係る「コスト縮減の種」を拾い上げ、試行錯誤を繰り返しながらコスト縮減策を実行してきた。本稿では、これら取り組みの結果、成果を得られたもの・得られなかったものを含め、その一部について紹介するものである。

キーワード コスト縮減、除草、伐採

## 1. はじめに

### (1) 余部出張所管内の概要

姫路河川国道事務所 余部出張所は、揖保川下流部（8.4km）、林田川（6.6km）、中川（3.7km）、元川（1.2km）の計約20kmを管理している（図1）。



図1 余部出張所管内図

管内は、高潮区間や上流の一部区間に畳堤を含む暫定堤や無堤区間が残っていることもあり、沿川住民の防災意識が高いこと、下流域は住家連坦地であり、祭りが盛んな地域であること、林田川は皮革工場連坦地であること、近年は大きな出水が少なく、河道内の樹林化が進行しているなどの特徴があり、それゆえに除草や伐採に関する苦情や要望が比較的多いなどの特徴がある。

### (2) 河川管理上の課題

河川を管理する出張所では、主に河川維持作業（以下、維持作業）にて堤防や高水敷の除草や河道内樹木の伐採、河川管理施設の軽微な維持補修等を行っている。図-2は、平成26年度の余部管内維持作業の費用内訳である。

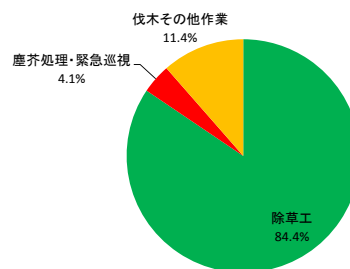


図2 平成26年度維持作業費用内訳（直接工事費ベース）

年度によって予算状況や発注規模に差があることや、維持作業の他に伐採作業や維持掘削等の工事が発注されることもあるが、年2回の除草に8割以上の予算を費やしていることが分かる。この状況が続けば、護岸等の河川管理施設の変状や河道内の樹林化が進行し、苦情対応はおろか予防保全的な維持管理がままならない事態となる。

そのため、限られた予算を有効に執行するためには、発注された工事をそのままこなすのみでなく、より安く・施工量を多く・効果的なものとなるよう現場レベル（施工段階）においてもコスト縮減の取組みが不可欠である。

## 2. コスト縮減のターゲット

前段で述べた「予算を有効に執行する」ということは何なのか、余部管内の特色をふまえて具体的に掘り下げると、次の2点である。

- ① 除草以外にも予算の用途を増やし、予防保全的維持管理を可能とすること

- ② 少しでも多くの面積で伐採を行い、河道の樹林化を解消すること

これらを踏まえ、除草と伐採をコスト削減のターゲットとし、既往文献や先行事例、施行業者との対話から得られた知見を元に、その具体策を試行的に実施することとした。

各手法の内容、コスト削減効果及び成果と課題について下記に述べる。

### 3. 除草工のコスト削減（刈り放し）

#### (1) 概要

刈り放しは、除草後の刈草を集めず現地に存置することにより、集草・運搬・処分に係る費用を削減するものであり、余部管内では過年度より取り組んでいるコスト削減手法である。当該手法についてのコスト削減効果及び課題について再評価を行うこととした。

実施時期は、年2回の除草のうち、草丈の比較的短い2回目除草（8月下旬～11月上旬）の時期である。範囲については、沿川の苦情発生状況やタバコのポイ捨てによる延焼の可能性を考慮し、住家や工場連坦地・兼用道路区間を避けた川表法面と高水敷とし、管内除草面積約54万m<sup>2</sup>の1/5に相当する約11万m<sup>2</sup>を対象とした。

#### (2) 成果と課題

堤防除草は、堤体の保全の他、堤防法面に変状がないか点検するために行うものであるが、刈り放しした場合でも十分に堤防点検できることを確認した（図-3）。



図-3 刈り放し後の堤防法面

また、刈り放しを行わない場合（集草・運搬・処分を行う場合）と比べ、概ね260万円<sup>※</sup>のコスト削減効果を確認した。

一方で、刈り放しを行った一部区間において、刈草が風で飛散して民家の庭に苦情が発生したことから、刈り放し区間の更なる吟味が必要と考えられる。また、予算に余裕があれば、刈り放しが困難な区間において、植生転換（草丈が低く雑草にも強い芝への張り替え）を行い、刈草処分量や除草回数そのものを削減することも検討すべきである。

### 4. 除草工のコスト削減（堆肥化・無償配布）

#### (1) 概要

当該手法は、堤防刈草を発酵させて堆肥化し、一般の方に無償配布することで、刈草の運搬・処分に係る費用を削減するものである。姫路河川国道事務所では、揖保川上流を管理する龍野出張所と加古川を管理する小野出張所にて、過年度から堆肥化の取り組みを行っており、実績・ノウハウが蓄積されている。<sup>1) 2)</sup> これに倣って、余部管内においても堆肥化を行うこととした。

堆肥製作は、揖保川の2種側帯（約900m<sup>2</sup>）を製作ヤードとし、たつの市域の1回目除草で発生した刈草のうち約13.5万m<sup>2</sup>分（管内除草面積の約1/4）を対象とした。1回目除草の終わる時期（8月）から製作をスタートし、12月頃に概ね完成した（完成体積：約50m<sup>3</sup>）。無償配布は、畑づくりの始まる3月に行うこととした。



図-4 刈草堆肥

堆肥製作の手順は下記のとおり。

- ① 刈草からできるだけゴミを取り除き、新鮮な状態で製作ヤードに搬入。
- ② 散水車にて散水、ミニバックホウ（0.13m<sup>3</sup>級）にて刈草を攪拌し、刈草の発酵に必要な水と空気を供給。攪拌後、2m程度の高さに山積み。
- ③ 堆肥用温度計で温度管理（1回/2週程度）。まんべんなく発酵させるため、内部温度がピーク（60～70℃）を超え、下がり始めたなら再度②を繰り返す。
- ④ ②③を3回程度繰り返し、黒く、土っぽくなれば完成。図-4の右側の状態になるまで約5ヶ月要した。

堆肥の無償配布は、事前申込み制とし、事務所HPの他、近隣自治体の広報誌や自治会へのビラ配布等により周知を行った。配布当日は、軽トラ等への積み込みを希望する大口の受け取り希望者に対してはミニバックホウによる積み込み補助、肥料袋等での受け取り希望者に対しては職員による袋詰め補助を行った。



図-5 堆肥の無償配布（左：軽トラ受取り 右：肥料袋受取り）

## (2) 成果と課題

堆肥の配布量は、製作量の概ね7割程度にとどまったことから、広報手法の工夫（周知対象の拡大や媒体の選択など）が必要と感じた。上流の龍野出張所管内では、実際に堆肥を使用した「リピーター」による複数回の受け取り希望が多く、堆肥の大量配布に繋がっていることから、今後はリピーターにも期待しつつ、需要を見ながら製作量を拡大していきたい。

また、堆肥化を行わない場合と比べ、概ね30万円（約27%）<sup>注</sup>のコスト縮減ができたとともに、図-6に示すように、刈草の有料処分の割合を9割以上から8割未満に低減することができた。

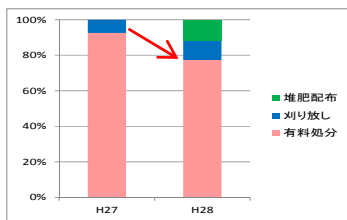


図-6 H27,28年度発生刈草処理の内訳（重量ベース割合）

一方で、余部管内の姫路市域においては、堆肥製作が可能なヤードが無く、また、廃掃法の制限（一般廃棄物である刈草の行政界の越境禁止）により、たつの市域への刈草の持ち込みができないことから、同取り組みの展開が困難である。そのため、堆肥化以外のコスト縮減に資する方法を検討するとともに、刈草を「有価物」として整理できないか、自治体と協議を継続する必要がある。

## 5. 伐木・伐竹工のコスト縮減（破碎機による伐採）

### (1) 概要

従来の伐木・伐竹は、チェーンソー等を用いた人力伐採の後、伐採木を重機で集積し、場外搬出・有料処分としていた。今回用いた手法は、バックホウ（0.45m<sup>3</sup>級）に破碎機（アタッチメント）を装着し、高水敷に繁茂した雑木や竹を現地で破碎するものである（図-7）。更に、破碎片についてはマルチング材として現地に存置することで、遮光による再繁茂防止効果を期待するとともに、集積・運搬・処分費の縮減を図ることとした。施工場所、施工時期、施工規模は下記のとおり。

- ・施工場所：揖保川高水敷
- ・施工規模：約20,100m<sup>2</sup>
- ・施工時期：平成28年3月
- ・効果計測：平成29年3月



図-7 破碎機による伐採

## (2) 成果と課題

従来の人力伐採と比較して、概ね240万円（約36%）<sup>注</sup>のコスト縮減に寄与できたとともに、日あたり施工量も1,000m<sup>2</sup>程度と人力伐採の倍程度であった。

また、適用可能な幹径が15cm以下であること、破碎片の飛散による第三者被害のおそれのない場所での使用に限定されることなど、当該工法の適用条件について把握することができた。一方で、特殊機械のため、機械調達に半年程度時間を要したこと、破碎片のマルチング材としての効果が薄く、雑木・竹ともに施工後1年で萌芽・再繁茂が確認されたことが問題点として抽出された（図-8）。これら問題点を受け、迅速な機械調達、再繁茂防止策の検討が今後の課題である。



図-8 竹林の再繁茂（左：施工直後 右：施工後約1年）

## 6. 雑木の再繁茂防止対策（根の残置・薬剤塗布）

### (1) 概要

雑木（主にヤナギ）伐採後の再繁茂防止対策としては、従来、根の除去（除根）が行われてきたが、除根及び根の処分に費用がかかる。今回用いた手法は、除根を行わず、伐採後の切り株にグリホサート系の植物生長調整剤（以下、薬剤という）の原液を刷毛塗りすることにより、根の枯死・再繁茂防止を狙うものである。併せて、除根・根の処分費をかけないことによるコスト縮減効果を期待した。施工場所、施工時期、施工規模については下記のとおり。

- ・施工場所：林田川高水敷
- ・施工規模：約10,100m<sup>2</sup>
- ・施工時期：平成28年8月
- ・効果計測：平成29年2月

なお、河川内での薬剤使用については、平成2年事務連絡「農薬の使用に関する河川の維持管理について」において、「除草剤については、上水道取水口より上流区域は原則として使用を取りやめ…」とされている。しかしながら、本事務連絡は主に河川敷のゴルフ場における広範囲な除草剤の「散布」を対象としている一方、今回の手法は極めて局所的な「塗布」による使用であること、余部管内には上水道取水口が存在しないことから、学識経験者に相談しつつ試行的に薬剤を使用することとした。

### (2) 成果と課題

除根及び根の処分を行わないことにより、概ね120万円（約42%）<sup>注</sup>のコスト縮減を図ることができた。

施工後約半年経過した時点では、切口からの萌芽はないものの、約9割の切り株において主に側面から枝の萌芽が確認された(図-9)。そのため、萌芽抑制効果は薄いと考えられるが、これらの萌芽した枝が再繁茂に至るまで成長するか、今後も生育状況等のモニタリングを継続する必要がある。また、必要に応じて萌芽した枝の切り取りについても検討すべきと考えられる。



図-9 雑木の萌芽再生 (左: 施工時 右: 施工後約半年)

## 7. 竹の再繁茂防止対策 (1m刈り残し)

### (1) 概要

竹の再繁茂防止対策についても雑木同様、従来は除根が行われてきたが、竹根(地下茎)は地中を縦横無尽に走っており、かなりの土が噛み込んでいる。施工業者にヒアリングを行った結果、除根した地下茎の受け入れ先(処分場)から土の除去についてかなり厳しく条件付けされることが多く、これに対応するための費用と手間が大きいことが分かった。

そこで、「河道内樹木の再繁茂抑制方法」<sup>3)</sup>を参考に、竹の幹を地上から約1mの高さで刈り残し、地下茎の養分を残った幹の維持に使わせ、枯死を狙うこととした。併せて、除根・根の処分費をかけないことによるコスト削減効果を期待した。施工場所、施工時期、施工規模は下記のとおり。

- ・施工場所: 揖保川高水敷
- ・施工規模: 約320m<sup>2</sup>
- ・施工時期: 平成28年8月
- ・効果計測: 平成29年2月

### (2) 成果と課題

従来と比べ、概ね4.5万円(約21%)<sup>注)</sup>のコスト削減を図ることができた。しかし、地上から1m刈り残すことで作業効率が落ち、伐竹手間のみを見れば従来より高額となった。施工から約半年後の状況を確認したところ、幹の再繁茂は無いものの、目算で概ね5割程度の範囲で枝葉の萌芽再生を確認した(図-10)。これらが元通り再繁茂するか、モニタリングを継続する必要がある。



図-10 竹の萌芽再生 (左: 施工直後 右: 施工後約半年)

## 8. 竹の再繁茂防止対策 (破碎機の伐竹・天地返し)

### (1) 概要

5.で述べたとおり、破碎機による竹の伐採は、施工後約1年の間に竹林が再繁茂してしまうことから、再繁茂防止対策として破碎機による伐採後に「天地返し」を行うこととした。天地返しとは、図-11に示すとおり、地下茎の層と更に下の層を入れ替え、遮光することにより地下茎の枯死を狙うものである。地下茎の場外搬出及び処分を伴わないことから、これらに係る費用についてコスト削減効果を期待した。



図-11 天地返し

施工場所、施工時期、施工規模は下記のとおり。

- ・施工場所: 林田川高水敷
- ・施工規模: 約3,500m<sup>2</sup>
- ・施工時期: 平成29年2月
- ※効果計測は未実施

### (2) 成果と課題

根の処分を行わないことにより、概ね50万円(約22%)<sup>注)</sup>のコスト削減を図ることができた。効果計測まで至っていないことから、他手法と同様、今後もモニタリングを継続し、再繁茂防止効果を検証する必要がある。

また、破碎機によって雑木を伐採した場合についても、別途再繁茂防止策を検討していくべきである。具体的には、切り株の土砂被覆や、枝の切断等の手法が考えられる。



図-12 施工状況 (左: 掻き起こした地下茎 右: 施工直後)

## 9. 雑木の再繁茂防止対策 (巻き枯らし)

### (1) 概要

当該手法は、樹木の生長を意図的に阻害する樹木管理手法で、主に防風林や山間部で用いられている。樹皮を地上から約1m程度の高さの位置で50cm程度の幅にて鉋等で環状に剥ぎ、栄養の通り道である師部を破壊することで栄養の供給を遮断し、根の枯死を狙うものである(図-13)。

本取り組みでは、上記を基本に下記3ケースを試行し、樹木の枯死効果について検証することとした。なお、③については、樹木の生長に伴いロープが食い込み、師部



の破壊・根の枯死に至るかを確認するため実施した。

- ①環状剥皮のみ 10本
- ②環状剥皮箇所薬剤（グリホサート系）塗布 10本
- ③環状剥皮の代わりにトラロープ巻き 10本



図-13 巻き枯らし（写真右からケース①,②,③）

なお、施工には4人・日を要し、費用は概ね6万円<sup>注</sup>程度であった。施工場所、施工時期、施工規模は下記のとおり。

- ・施工場所：林田川中洲
- ・施工規模：30本
- ・施工時期：平成27年12月
- ・効果計測：平成29年3月

## (2) 成果と課題

①については、10本中9本で剥皮箇所直下で枝の萌芽が見られた（図-14）。根に蓄えられた栄養が上部の枝まで届かず、剥皮箇所直下で遮断されていたことが窺える。萌芽した枝のうち5本は新鮮で、再繁茂に繋がる可能性がある。

②については、10本全て再萌芽を抑制できていた。剥皮箇所は黒く変色し、全体的に樹皮が剥けて朽ちている印象を受けた（図-15）。枯死に成功したと考えられる。

③については、トラロープの幹への食い込みが10本中2本見られたが、枝・幹は全て健全であった（図-16）。そのため、トラロープ巻きは栄養の遮断効果はなく、枯死には繋がらなかったものと考えられる。



図-14 ①環状剥皮のみ



図-15 ②環状剥皮箇所薬剤塗布



図-16 ③トラロープ巻き

## 10. まとめ

### (1) 除草工のコスト縮減について

刈り放し・堆肥化の双方で一定のコスト縮減効果を確認できた。刈り放しについては、苦情の発生を踏まえ、更に対象区間を吟味する必要がある。堆肥化については、広報手法の工夫の他、製作困難地域でのコスト縮減策の検討が課題として抽出された。

### (2) 伐採工のコスト縮減について

いずれの手法についても一定のコスト縮減効果を確認できた。破碎機を用いた伐採については、適用条件を確認できた一方で、機械調達や再繁茂防止策の検討などが課題である。竹・雑木の再繁茂防止策については、いずれも引き続きモニタリングを行い、効果検証が必要である。巻き枯らしについては、薬剤塗布を組み合わせた手法において雑木の枯死効果が確認された。

なお、本稿は従前の所属である姫路河川国道事務所余部出張所の所掌業務の内容である。

謝辞：本稿をとりまとめるにあたり、ご助言・ご指導・ご協力頂いた全ての方々に深く御礼申し上げます。

### 注釈

- 1) 本稿中の概算金額は、直接工事費ベースの金額を指す。また、コスト縮減効果を示すパーセンテージは、 $\text{コスト縮減額} \div \text{コスト縮減前の費用} \times 100 (\%)$  によって求めたものである。

### 参考文献

- 1) 山田陽・安井潤：河川維持管理における堆肥化・チップ化への取り組みについて
- 2) 衣斐 俊貴・安井潤：加古川・揖保川での河川維持管理における堆肥化の取り組みに関する報告
- 3) 土木研究所：河道内樹木の再繁茂抑制方法

# 多摩大橋周辺における 治水と環境の調和した川づくり

志賀 久枝

関東地方整備局 京浜河川事務所 河川環境課 (〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

多摩川中流域に位置する多摩大橋周辺では、滯筋（低水路）が固定化し、それに伴い河床低下や局所的な洗掘が生じるとともに、高水敷の樹林化が進む河川の二極化が生じている。これにより、治水面では堤防・護岸や横断工作物の安全性の低下と流下能力の低下が課題となっている。また、環境面においても、多摩川中流域の特性である礫河原環境が減少し、樹林化した高水敷にハリエンジュなどの外来種が繁茂し、植物の多様性の減少が課題となっている。治水・環境に共通する二極化を解消する対策実施後の環境面でのモニタリング状況について報告する。

キーワード 治水と環境の調和, 河川の二極化, 高水敷の樹林化, 礫河原の再生

## 1. はじめに

はじめに、多摩川は山梨県の笠取山を源に、東京都と神奈川県の間を流れ東京湾にそそぐ、延長138km、流域面積1240km<sup>2</sup>、流域内人口約380万人の一級河川である。流域面積の1/3を占める中・下流部に流域内人口が集中し、首都圏における社会、経済、文化等の基盤をなすとともに、多摩大橋地区は都市地域における貴重な自然空間を有している。(図-1)



図-1 位置図

- ①滯筋が固定化するとともに、土丹が露出(図-2)し、その浸食が進行したため、堤防際(水衝部)に洪水流が集中し、堤防・河岸の不安定化が懸念される。
- ②土丹層の浸食が進行したため、横断工作物の安定性が低下している。(図-3)
- ③滯筋の固定化及び砂州の樹林化により、洪水の流下能力が低下している。(図-4、5)



図-2 土丹層の露出状況

図-3 護床工の沈下状況

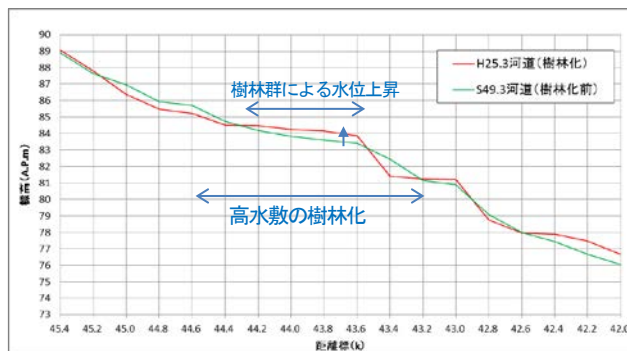


図-4 計画高水流量4,700m<sup>3</sup>/s 流下時  
準二次元不等流計算水位

## 2. 多摩大橋周辺の治水と環境の課題

### (1) 治水上の課題

## (2) 環境上の課題

- ④河床低下，土丹層の露出により，多摩川中流域の特性である礫河原環境が減少している。（図-2）
- ⑤高水敷の陸化の進行により，ハリエンジュ等の樹木群が繁茂し，植物の多様性が減少している。（図-5）
- ⑥湿潤環境を創出する湧出池の減少により，水生生物や水生植物群落の生息・生育場が減少している。



図-5 昭和50年と平成21年の多摩大橋周辺

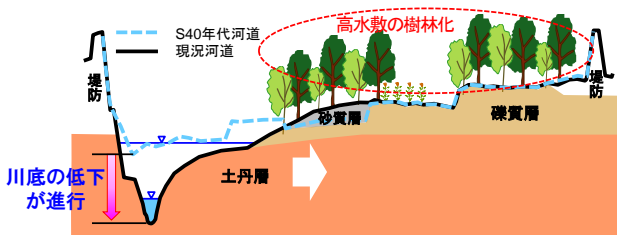


図-6 二極化した河道の横断イメージ図

これらの治水と環境の課題は，河道の二極化が過度に進んでいるため，自然の営力による河床高の回復や河川環境の復元は期待できない。（図-6）

そこで，治水・環境の共通課題である滞筋の固定化と深掘れを解消し，「治水と環境の調和」した川づくりを実施している。

## 3. 課題に対する目標と対策

### (1) 治水の目標と対策

- ①堤防や護岸，横断工作物の安全性を確保するため，河床を土砂や石で埋め，右岸側の高水敷を切り下げることで，二極化を是正し幅広く浅い流れにする。（図-7）
- ②埋め戻した河床の維持を目指し，帯工を設置し，河床を安定させる。（図-8）
- ③樹木群を伐採，抜根することにより洪水の安全な流下を図る。（図-7）

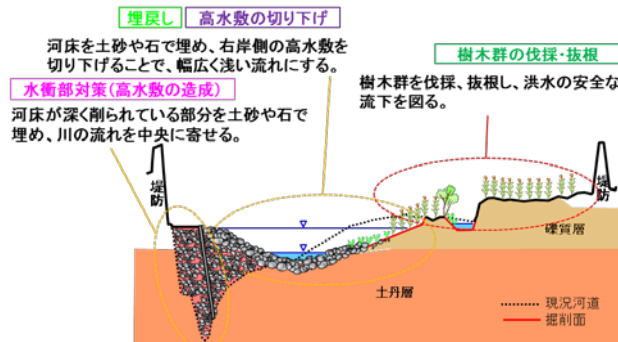


図-7 対策後の河道横断イメージ図

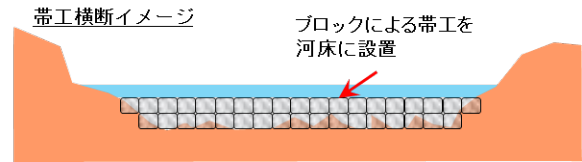


図-8 帯工設置イメージ図

### (2) 環境の目標と対策

- ④滞筋の固定化を解消し，冠水頻度を上げ，礫河原の拡大を図るため，高水敷を切り下げ礫河原を再生する。（図-7,9）
- ⑤拡大したハリエンジュ等の樹林を伐採し，オギなどを主体とした本来の多摩川らしい草地環境を再生する。（図-7,10）
- ⑥湧出池を保全・再生し，水生生物や水生植物群落の生息・生育場となる湿潤環境を創出するため，池の再生とせせらぎ水路（工事中の魚道の役割）による地下水の涵養等により湿潤環境の保全・再生を図る。（図-11）

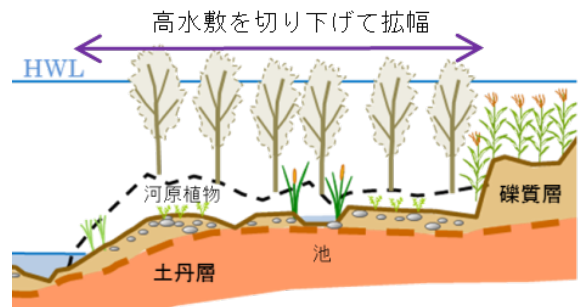


図-9 礫河原再生イメージ図

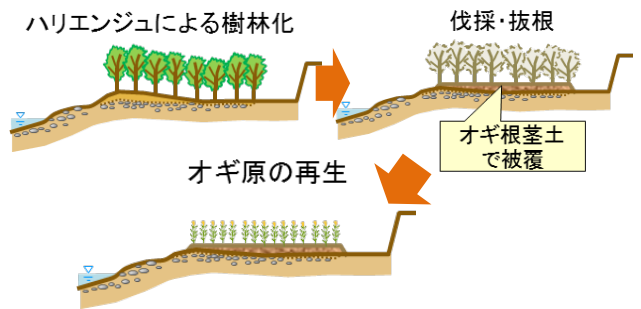


図-10 多摩川らしい草地環境の再生イメージ図

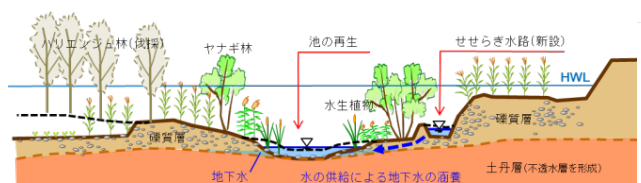


図-11 湿潤環境の再生イメージ図

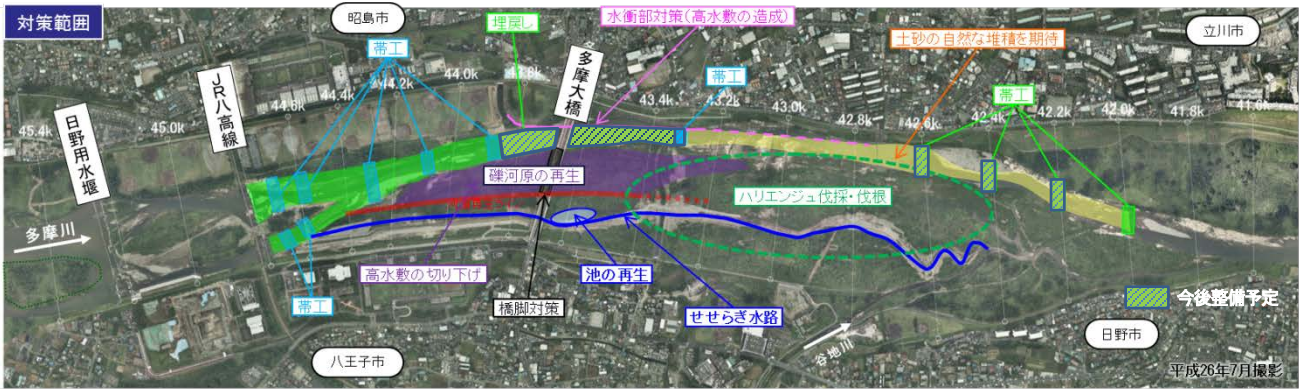


図-12 多摩大橋周辺での各種対策状況

#### 4. モニタリング調査の概要

前項までの対策に対して、様々なモニタリングを実施している。今回は、表-1に示す環境面におけるモニタリングについて報告する。

表-1 モニタリング項目

モニタリングの目的	モニタリング項目	データの用途(確認項目)
①礫河原の再生	多様な礫河原環境の再生 ・航空写真撮影 ・植生調査	・中流域らしい河川地形や植生の復元状況
②川らしい植生域の形成	植生変化 ・航空写真撮影 ・植生調査	・経年変化の確認 ・昔の河原状況との比較
③湿潤環境の保全・再生	水際植生の变化 ・水際植生の生育調査	・従来の貴重種の維持 ・新たな種の確認
④せせらぎ水路の機能維持	工事期間中の魚類遡上状況の把握 ・遡上調査	・魚道機能の確認

##### (1) 礫河原の再生 (航空写真撮影, 植生調査)

図-13は樹木伐採, 高水敷の切り下げ前後の定点写真である。ハリエンジュが繁茂した高水敷から砂礫地へと復元した。三度の出水を経て現在も河原を維持している。



図-13 礫河原再生前後の写真

##### (2) 川らしい植生域の形成 (航空写真撮影, 植生調査)

平成25年10月の施工前の植生状況は、緑色のハリエンジュが広範囲に点在していたが、平成26年10月の施工直後は、薄紫色のオオブタクサ群落に遷移し、平成27年10月の施工後2年目は、紫色のオギ群落に遷移した。しかし、ハリエンジュ伐採地点で根茎からの再繁茂も確認されている。平成28年11月の施工後3年目は、ハリエンジュの再生範囲(薄緑色)が若干拡大したが、昨年同様にオギ群落が優占しており、多摩川らしい草地環境が維持されている。

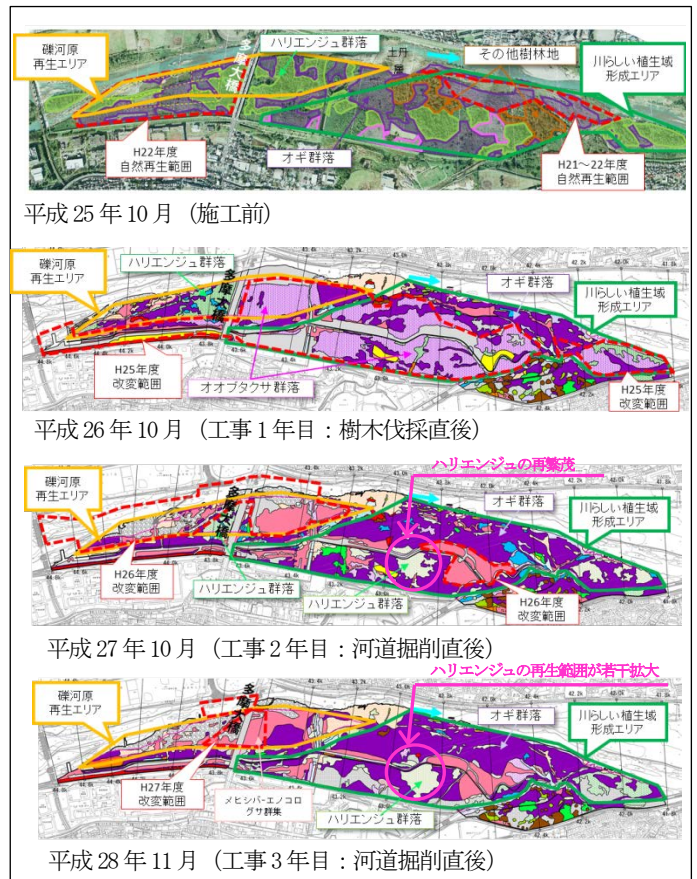


図-14 樹木伐採後の植生群落の分布

### (3) 湿潤環境の保全・再生（水際植生の生育状況）

昭和40年代に流路となっていたところでは、平成27年9月の出水において、せせらぎ水路から越流水の池沼付近への流入も確認されており(図-15)、ヨシやヒメガマといった湿地性の植物が中心に生育し、湿潤な環境が維持されている(図-16)。また、平成28年8月には旧流路に残るヨシ原にツバメの集団ねぐらの形成が確認された。

また、周辺にはタコノアシ、ミゾコウジュ等の生育が確認されている(図-17)ことから、今後の希少種の生育拡大を期待したい。



図-15 せせらぎ水路からの供給



図-16 湖沼付近に生育 水生植物



図-17 湿生環境を好む希少種

### (4) せせらぎ水路の機能維持（魚類遡上状況）

工事期間中の魚道の役割を果たすせせらぎ水路では、施工後2年目（平成27年）には、水際に植生が生育し、土丹の上に砂礫が堆積し始め(図-18)、様々な魚類等の生息環境として定着し始めている。施工後3年目（平成28年）の春季(6月)、夏季(8月)調査では、アユやオイカワなどの合計8種、206個体の魚類が確認された。

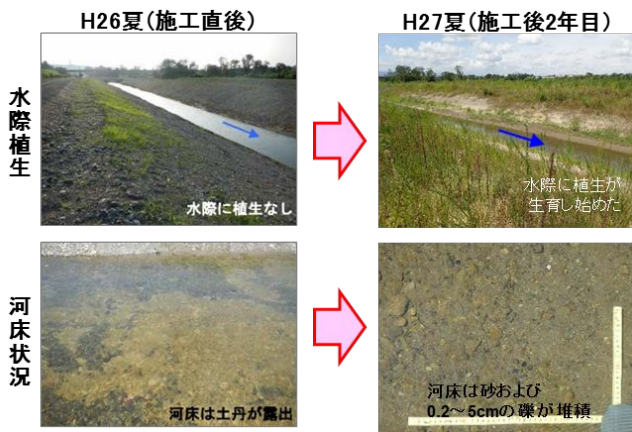


図-18 せせらぎ水路の様子

## 5. その他の取り組み

### (1) 市民参加によるオギ再生試験

ハリエンジュの伐採、抜根箇所におぎの根茎土の敷きならしを実施しているが、その一部箇所において、地域

住民の参画として、河川管理者、自治体、地域住民、市民団体、大学、工事関係者などにより、オギ根茎土の敷ならし作業を実施した。作業は、表土を30cm程度除去した試験地に人力でオギ根茎土から根茎を採取し、概ね均一に試験地に撒き出す(図-19)。撒き出し後、残った根茎土を投入し、踏み固めた(図-20)。



図-19 オギ根茎の採取撒き出し



図-20 根茎土の運搬・敷設

### (2) ハリエンジュの巻枯らし試験

伐採後に再萌芽したハリエンジュ林を対象に、地表付近の樹皮をはぎ取る「巻枯らし」手法によるハリエンジュ抑制対策を実施した。巻き枯らしとは、樹皮を冠状に剥ぎ取って師部を破壊するもので、葉から根への栄養供給を断つことによって樹木を枯死させる手法である。

巻き枯らしは樹木が成長している夏季、平成26年7月、8月の各1日で計2日で実施した。

9か月後に行った追跡調査では、全体の91%が衰弱し、74%が枯死した。しかし、試験の1年5か月後にハリエンジュの根系を掘り起こし、枯死、再生状況と根系の状態の関係を確認したところ、前回調査において、枯死、衰弱、健全と判断したハリエンジュ各3本の計9本の樹皮の再生状況は、1個体を除き、残存根系から再生した個体で、その根はすべて生きていた。衰弱と判定した個体は樹皮が完全に再生し、機能がもとに戻っていた。ハリエンジュの再生能力は想定以上に大きく、その再生力は地下に残っている根茎の大きさに依拠するものと考えられた。伐採時に根茎を完全に取り去ることが、極めて重要とわかった。

## 6. まとめ

治水・環境の共通課題である滞筋の固定化と深掘れを解消する対策を実施中であるが、環境面におけるモニタリング結果では、施工後3年を経ても概ね砂礫地が維持されており、今後河原系植物の生育も期待できる。また、植生は概ねオギ群落が復元しているが、一部箇所ではハリエンジュの再繁茂が確認されており、今後対策が必要と考える。対策を実施する際は、地域住民が参画できる仕組みを検討し協働での作業を実施したい。

### 参考文献

- 1) 土木学会：多摩川上流部における治水と環境が調和した総合的な河道管理（2013.6）

# 河川縦横断測量におけるALBの活用について

小川 善史<sup>1</sup>・福岡 浩史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 福井河川国道事務所 河川管理第一課 (〒918-8015福井市花堂南2-14-7)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 福井河川国道事務所 品質確保課 (〒918-8015福井市花堂南2-14-7)

全国の一級河川においては河川管理や河川改修計画を目的とした、定期横断測量を実施している。しかし、測量間隔においては200m毎とされており、横断測量を実施する箇所以外の地形情報については得られない。また従来手法の作業性として、水部の計測手法は、船舶による作業であるため、急流河川においては作業に危険が伴うことや、計測器が測線上に位置しているかを絶えず確認しながらの慎重な作業となり、一測線の計測に時間を要するといった課題もある。

本論文は前述のような現状と課題に対し、グリーンレーザによる定期横断測量を九頭竜川(福井県)において試み、その成果の一部を紹介し、さらにその活用の方向性について述べるものである。

キーワード ALB(Airborne Laser Bathymetry), 河川測量, 河川管理

## 1. はじめに

全国の一級河川では河川管理や河川改修計画を目的とした実測による定期横断測量が実施されている。しかし、河川定期横断測量は、縦断方向に200m毎に一測線程度の情報量であり、護岸前面の局所的な洗掘や、瀬・淵の詳細な地形など、河川管理が求める情報が十分得られないという現状がある。また、水部の計測手法は、主に音響測深機による計測が行われているが、船舶により河道内で作業を行うため、急流河川においては作業に危険が伴うとともに、計測器が測線上に位置しているかを絶えず確認しながらの慎重な作業となり、一測線の計測に時間を要するといった課題もある。

前述のような現状と課題に対し、陸部の河川測量においては航空レーザ計測で取得された点群データを利用した、横断図作成の事例研究が行われ、精度検証や横断図作成までの手順等が作成され実用化に向けた動きが見られる<sup>1)</sup>。

一方、水部においては、近年の計測技術として、水中を透過するグリーンレーザを用いた航空レーザ測深(以下:ALB)が開発され、ALBによる河川測量への適用の研究が実施されている<sup>2)</sup>が、精度検証の報告が少なく点群データからの横断図作成の手順等がない現状である。以上のことを踏まえ、今回は深淺測量において、近年、水部の計測が行えるALB(Airborne Laser Bathymetry)を用いた点群データからの横断図作成を目的に、実測との精度検証を行った。また、航空レーザ計測の成果を活用した河川管理への応用を考察した。

## 2. 九頭竜川の特徴

今回の計測対象区間は、河床勾配は1/280~1/1,500と変化に富んでいる。水質は、日野川合流点の上流でA類型を満足するなど、比較的きれいな河川である。河川環境は、河道内に木本類や草本類の繁茂が顕著になり、砂州河原が減少していることから、礫河原の再生事業などが実施されている。特に魚類では、サクラマスやアユ等が生息し、九頭竜川中流域はカマキリ(アラレガコ)の生息地として国の天然記念物に地域指定されている。(図-1)

## 3. 従来手法による河川定期横断測量

河川定期横断測量は、一級河川の直轄管理区間を対象として、5年毎に実施している。

横断測量は、200m毎に配置された距離標を基に、左右岸を直線で結び、その測線上の地形の高低差を水準測量により測り、断面を作成する作業である。さらに水深が1m以上の区間では、小型の船舶を用いながらスタッフ(ロッド)もしくは音響測深機などの機材により測深する作業である<sup>3)</sup>。

また水部においては、急流河川においては危険が伴うとともに、計測器が測線上に位置しているかを絶えず確認しながらの慎重な作業である。



図-1 航空写真図：九頭竜川中流域

#### 4. ALBの特徴

計測で用いるALB機器は、水部用と陸部用の2つのレーザを搭載し同時に運用するタイプである。このうち水部用のレーザは、可視域のレーザ光（緑色）を用いることで、河床の地形も計測が可能となる。なお測深性能は、透明度や水質に大きく依存するが、今回使用したChiroptera IIのカタログによると透明度の1.5倍とされ、最大15mまで測深でき、その精度は $\pm 0.15\text{m}$ である。計測イメージを図-2に、仕様を表-1に示す。

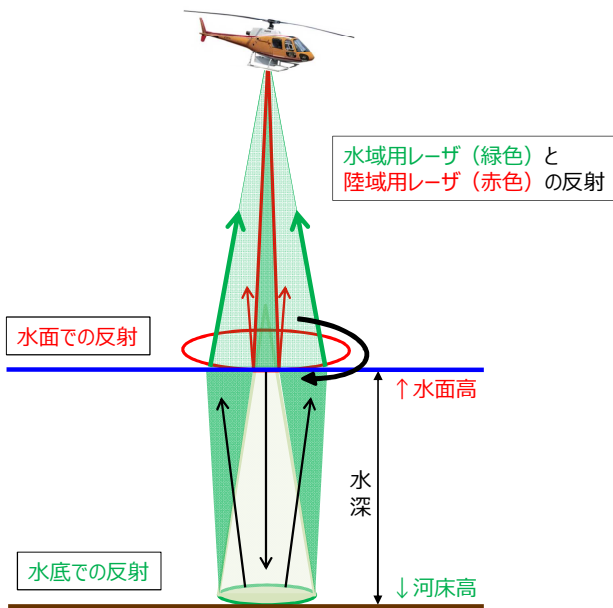


図-2 ALB機材による測深イメージ

表-1 使用する機器の仕様

項目	機器仕様	
水部用レーザ	35kHz(波長515nm)、波形記録方式	
陸部用レーザ	最大500kHz(波長1064nm)、波形記録方式	
運用対地高度	水部：500m、陸部：～1,600m	
スキャン方式	楕円方式（オプリークスキャン）	
計測密度（対地500m）	水部：約1点/m <sup>2</sup> 陸部：約10点/m <sup>2</sup>	
水部の測深精度	0.15m (2 $\sigma$ ：95%)	
測深性能	～15m程度（～1.5×セッキ水深）	
デジタルカメラ	撮影バンド数	4バンド（RGB-近赤外）同時取得（機械式FMC装備）
	画素数	8000万（10,320×7,752）

#### (2) 計測諸元

ALBの計測延長は、距離標18.0k～29.0kの約10.8km、計測幅は約500m、計測面積は5.32 km<sup>2</sup>（陸部4.42 km<sup>2</sup>、水部0.92 km<sup>2</sup>）を対象とした(図-1)。

使用する機体は、回転翼とし飛行速度を遅くすることで水部での計測密度を約3点/m<sup>2</sup>確保するように計画した(表-2)。

#### (3) 計測実施

計測日は、水部での未測を防止するため、河川の濁りが少ないことや、水位が低いことが必須条件となる。そこで鳴鹿雨量観測所における降雨状況と中角水位観測所における流量状況を確認した。対象期間では大雨はないものの、2～4mm/hr程度の雨が繰り返し観測された。計測日前後の雨量・水位グラフを図-3に示す。こうした中で、ALBの計測は、無降雨の状態が比較的長く続き川の濁りが落ち着いた、平成28年12月4日の午前中に実施し、8:46～10:24の1時間38分で計測を完了した。

表-2 計測諸元

項目	計測諸元	
	水部	陸部
使用機器	回転翼	
飛行速度	72km/時（20m/秒）	
対地高度	483m～596m	
飛行高度	600m	
レーザ発射頻度	35,000発/秒	430,000発/秒
レーザスキャン角	前後 ±14度、左/右 ±20度	
レーザスキャン頻度	約24回転/秒	約70回転/秒
サイドラップ率	50%	
計測密度	約3点/m <sup>2</sup>	約44点/m <sup>2</sup>
デジタル地上解像度	6cm/pixel程度	
コース数	10コース	

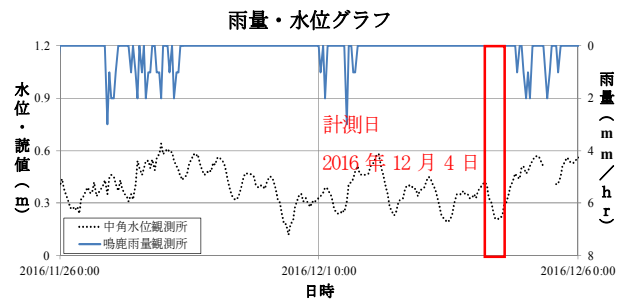


図-3 計測日前後の雨量・水位グラフ

#### 4. 実測値との精度検証及び精度向上の検討

##### (1) 検証断面の設定

検証断面は、様々な水深で評価できるよう、断面を選定したほか、陸部での地表面の被覆状況の違いによる地盤高到達率なども考慮して選定した。対象断面の選定理由は表-3に示す。

表-3 断面の選定箇所

距離標	最大水深	選定理由
18.8k	1.5m	河道内の被覆状況がグラウンド
23.4k	3.5m	河道内の被覆状況が樹林
26.6k	2.0m	河道内の被覆状況が草地

##### (2) 精度検証 (較差による比較)

ALBによる計測結果の精度を検証するため、実測による横断成果との標高較差を確認した。

ALBによる横断は、フィルタリング処理したALBの点群データを基に、TIN法により内挿補完した0.5mメッシュサイズのDEMデータを作成した上で、横断図を切り出した。ALBの標高は、実測点の水平位置を基準に垂線を延ばし、ALB横断図との交点標高を読み取った。この時の実測点とALBとの標高の差を較差とし、横断図を構成する全ての実測点について求めた。九頭竜川26.6kにおける重ね合わせ横断図を図-4に示すが、横断形状で大きな差異は見られなかった。

次に、各断面における較差を、水部と陸部に区分したのちに平均値と標準偏差で整理した。この結果、水部では平均値と標準偏差で10cm以下となり、河川定期縦横断の実施要領<sup>5)</sup>などの基準(±15cm)を満たしていた(表-4)。一方、陸部では基準の±15cmを超える箇所があったが、これは堤脚水路部の側溝等でALBデータによる地形の再現が難しい箇所や、護岸やブロック積等の勾急な箇所を中心に、局所的に較差が大きくなったためと考えられる。したがって、横断図調製段階では過年度成果を基に修正することが望ましい。

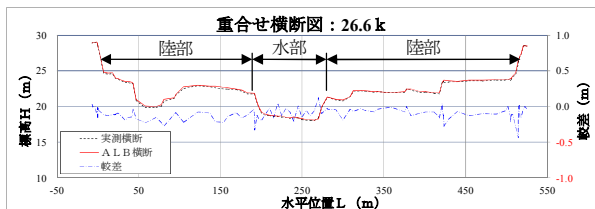


図-4 重ね合わせ横断図による断面形状の確認

表-4 各断面における較差の整理 (単位: m)

	水部			陸部		
	平均	標準偏差	点数	平均	標準偏差	点数
18.8k	-0.01	0.07	23	-0.03	0.12	103
23.4k	0.00	0.09	10	-0.07	0.17	156
26.6k	-0.08	0.09	15	-0.11	0.08	88

##### (3) 精度検証 (河積断面による比較)

ALBによる計測結果を客観的に評価するため、河積を確認した。河積は、計画高水位(H.W.L.)より低い箇所を対象として断面積を計測した。この結果、ALBから作成した河積は実測値と比較して98%以上を確保しており、差異は僅かであった(図-5)(表-5)。

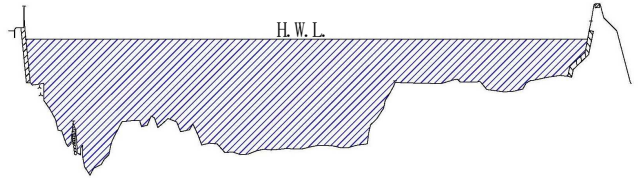


図-5 河積面積の算定イメージ

表-5 河積による面積比較 (単位: m<sup>2</sup>)

距離標	実測値	ALB	比率
18.8k	2,095	2,084	99%
23.4k	3,478	3,427	99%
26.6k	2,280	2,224	98%

#### 5. 河川管理への適用の考察

本計測では、河川の横断図作成を目的に計測しているが、ALBは面的に計測できることで、今後の河川管理への応用が期待できる。ここでは、いくつかの事例について考察及び試行を行ったので以下に報告する。

##### (1) 河川管理施設点検への適用

河川管理においては、堤防等の施設の健全性を把握するため、日常的な河川巡視や出水期前の点検を行い、変状の状況によりランク付けを行っている<sup>6)</sup>。堤防および樋門等の目視できる変状においては、変状規模や施設に与える影響について定量的に計測できるが、水部などの護岸基礎部の洗掘や河岸の浸食については、水部内の状況が確認できないことから、目視できる範囲でランク付けを行っているのが現状である。このような水部の変状の状況について、ALBで計測した成果を活用した変状把握を試みた。

九頭竜川左岸の23.4kと23.6k付近は、河岸の洗掘が認められ要監視状況の箇所となっていた。そこでALBで計測した成果を活用した水深分布図を基に推測を行った(図-6)。

水深分布図では定期横断測量では把握ができていなかった測量箇所以外の箇所でも約6m洗掘していることを確認できた。また深さとその範囲等により対策の必要性についても確認できた。

さらにこれまでは対策工の具体的な立案においては対象区間での現地測量が必要となっていたが、ALBで計測した成果により、検討対象区間において任意の箇所でも横



断面作成が可能であったため、対策工の検討を速やかに行うことができた(図-7)。

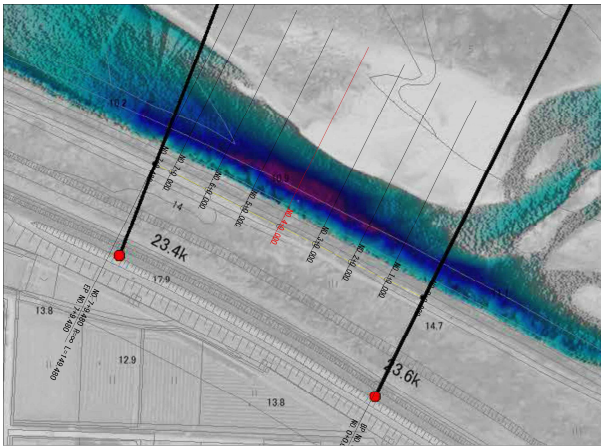


図-6 水深分布図  
NO. 4+0.000

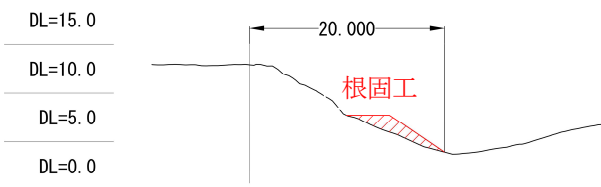


図-7 対策工横断面

### (2) 許可工作物の占用状況の確認

河川構造物の点検のうち、橋脚部の洗掘状況の確認は、基礎がむき出しとなり、場合によっては根入れ長が不足し橋梁本体に影響を及ぼすこともあるため重要である。しかし定期縦横断の測線にかからない場合には、洗掘の状況を把握することはできず、見逃す可能性も高い。

今回用いるALB機器では、水部の地形が計測できることや、レーザを楕円状に発射できる特性を生かして、橋梁下の地形もある程度計測できるため、橋梁部における洗掘状況を確認した。

ALBで計測した成果から、橋脚周辺の洗掘状況が明瞭に把握することができた。橋梁直下については、橋梁が影となるため一定区間の欠測が生じているものと思われるが、橋梁前後で取得した地形データから内挿することにより、良好に補完できている(図-8)。

### (3) 樹木分布図及び樹木横断面図の作成

レーザ計測での測量成果の特徴として、樹木の分布状況やその高さを面的に把握することが可能である。そこで、今回作成した横断面図に、DSMデータから作成した横断面図を重ねあわせて樹木横断面図を作成した(図-9)。

この樹木分布図及び樹木横断面図を用いることにより、樹高とH.W.L.との比較やその幅などを確認することができるため、今後の河道計算における死水域設定などへの利用が期待される。

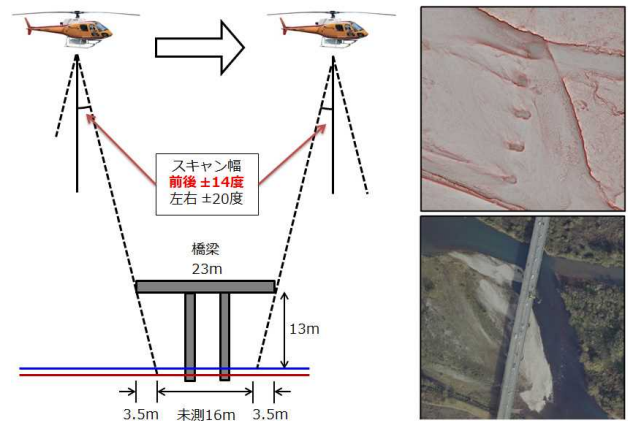


図-8 福井大橋直下における測深イメージ

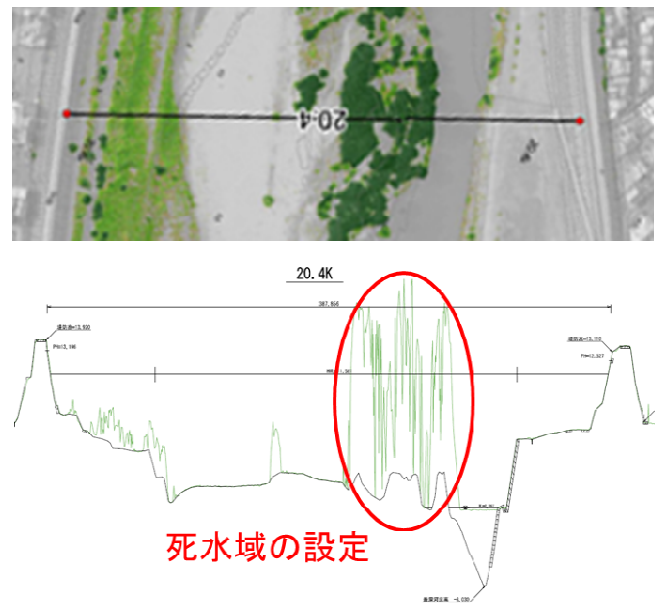


図-9 河道内樹木の把握と死水域設定のイメージ

### (4) i-Constructionとの連携

計測の対象範囲である、20.6k～21.4kの河道内において、礫河原再生事業に伴う河道内の掘削工事がALB計測後に実施されている。

この工事は、ICT土工の対象工事として施工され、3次元設計データ交換標準(案)に基づきLandXML1.2形式で成果品が納品されている<sup>7)</sup>。LandXMLの記述では、測地原子の基準名、水平座標系の基準名を記述することとなっており、インポート時の座標、標高の変換の必要が無く、ALB計測データとの連携が可能であり、施工後の維持管理業務などへの利活用が図られる。

工事完成後に納品されたLandXMLデータとALB計測データとを重ね合わせ、工事前後の面的変化を確認し(図-10)、定期横断測量で納品された工事前の横断成果を、工事の完成データを基に置き換え、工事後の横断測量データとして更新を行った(図-11)。

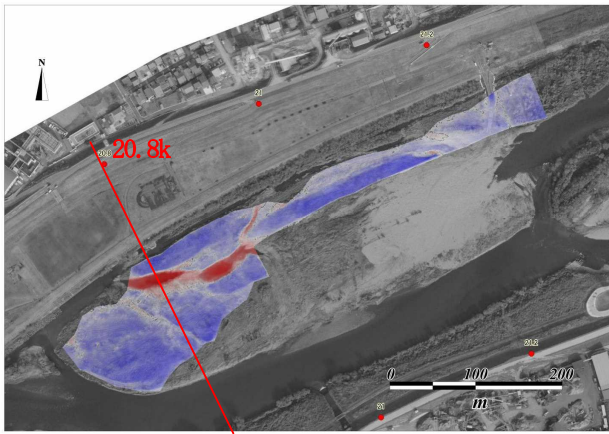


図-10 LandXML データと ALB 計測データとの重ね合わせ

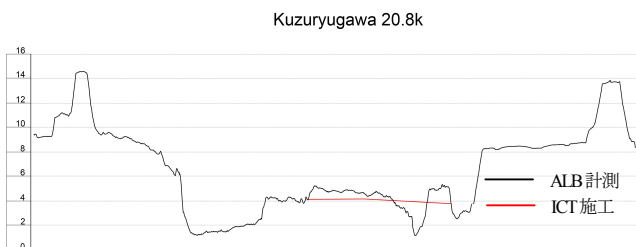


図-11 工事掘削に伴う地盤高の面的変化把握

### (5) 堤防点検へ活用

従来の横断測量は、観測点1点ごとの精度は高いものの計測間隔には限りがあるため、堤防天端や法面の形状などが良好に再現されていない場合もある。なお作業規定では、勾配変化点や変化が見られない場合には10m間隔程度で測量することになっている。

一方、国土技術政策総合研究所が別途、1m間隔の実測横断測量を実施しており、その成果とALB計測による横断面図との重ね合わせ図を作成し、再現性を検証した(図-12)。

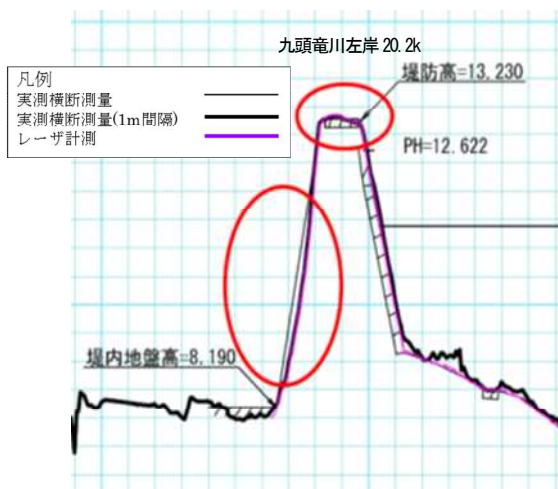


図-12 レーザ計測により作成した横断面図の堤防再現性

この結果、従来の横断測量では把握が難しかった堤防天端のかまぼこ形状や法面の寺勾配などの形状などが、レーザ計測で作成した横断面図では良好に再現されていることを確認した。

このことから、今後の定期点検や災害時における堤防の変状確認などの活用が期待される。

## 7. おわりに

一級河川九頭竜川の直轄管理区間のうち18.0k~29.0kを対象としてALB計測を行い、その点群データから横断面図を作成して精度検証を行った。

計測に際しては、前後の降雨や水位の状況を考慮して実施日を決めたほか、計測の結果、橋梁下や白波が広がっている箇所の一部欠測がみられたものの、ほぼ全域において、大きな欠測なく作業を完了した。

水部の精度検証は、3断面を選定した上で、実測点との標高較差からその精度を評価した。その結果、①重ね合わせ横断面図による形状比較では、大きな差異がみられなかったこと、②水部では、標高較差の平均値や標準偏差が10cm以下と河川測量の基準値を満足していたこと、③H.W.L以下の河積計測では、実測値と比較して98%以上確保されていたことなどから、ALB成果を横断面図作成に適用することが有効であることを確認した。

最後にALB機器を用いて面的に河道内のデータを取得できることで、今後の河川管理への応用について考察した。

河川管理施設点検への応用では、水深分布図を作成することで、定期横断測量では確認できなかった箇所が最も洗掘していることを確認したほか、対策工の必要性まで推測する手がかりを導いた。

また河道内樹林評価では、樹木の高さや樹冠形状を定量的に評価する手法を用いることで、水理計算の死水域設定などに活用できる可能性を示した。

さらに橋梁部の洗掘状況の把握では、ALBが楕円状にレーザを発射する特性を生かして、橋脚周辺の洗掘状況も確認できることを確認した。

今後、様々な河川でALBでの実績を増やし、面的なデータを経年的に整備していくことで、効率的かつ効果的な河川管理に役立てていくことが期待される。

## 参考文献

- 1)田中成典ら：LPデータと過年度の河川定期横断測量成果を用いた横断面生成手法に関する研究，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol.70，No.2，pp.1\_283-1\_292，2014.
- 2)今井龍一ら：河川定期横断測量へのレーザプロファイラの適用可能性と今後の展望，土木技術資料，57-7，pp.26-29，2015.
- 3)岡部貴之ら：ALBの河川縦横断測量への適用性の研究，河川技術論文集，第20巻，pp.55-60，2014.
- 4)山本一浩ら：グリーンレーザ(ALB)を用いた河川測量の試み
- 5)河川定期縦横断測量業務 実施要領・同解説
- 6)国土交通省：堤防等河川管理施設の点検結果評価要領（案），2016.
- 7)LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準（案）Ver.1.0 国土交通省国土技術政策総合研究所 2016.3

# タブレット端末を用いたダム機械設備 管理支援システムの構築

吉田 高広<sup>1</sup>・松本 之宏<sup>2</sup>・佐々木 浩司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人水資源機構 関西・吉野川支社 吉野川本部 (〒760-0018 香川県高松市天神前10-1)

<sup>2</sup>独立行政法人水資源機構 池田総合管理所 機械課 (〒778-0040 徳島県三好市池田町西山谷尻4235-1)

<sup>3</sup>独立行政法人水資源機構 川上ダム建設所 機械課 (〒518-0294 三重県伊賀市阿保251)

ダム管理における機械設備の維持管理業務は、整備計画立案、点検作業及び障害対応等と多岐に渡り、これらの業務を遂行するには、機械に関する専門知識と経験が必要となる。

しかし、水資源機構池田総合管理所で所管するダムでは、1名の機械設備担当者と総管との連携で対応しているものの、遠隔地の総合管理所等との連携は、距離等の制約もあり効率的とはいえない。

そこで、IoT 技術を活用し、点検作業の効率化や各ダムへの支援強化を目的として、タブレット端末と WEB アプリを使用した「ダム機械設備管理支援システム」を平成28年度に早明浦ダムと池田総合管理所間に構築したため、機能及び活用方法について報告するものである。

キーワード IoT, タブレット端末, WEBアプリ, 効率化, 支援強化

## 1. はじめに

IoTとは、「Internet of Things」の略称で、あらゆるものがインターネットにより繋がることを意味している。

定義が抽象的であるが、センサー、コンピュータ、通信機能等をインターネットで接続し、家電、自動車、店舗、工場などあらゆるものに新しい仕組みを創造しようとするものが一例であり、近年、センサー、端末の価格低下、インターネット環境の充実により普及し始めている。一例を挙げると、住宅家電を離れた場所からのスマホによる監視・操作や工場の生産ラインの状態監視をセンサーにより遠隔地でオンライン集中監視を行う等、多方面でIoT技術が活用されている。土木業界でもブルドーザーの自動運転に活用される等、範囲が広がっており、ダム管理においても、現状ではドローンを活用している例はあるが、IoT技術導入の余地はまだ大きいと考えられる。

## 2. 池田総合管理所機械設備管理の現状

### (1) 池田総管における機械設備

池田総合管理所(以下「総管」という)は、早明浦ダム、池田ダム、新宮ダム及び富郷ダムの4ダムの総合管理を行い、全ダムの機械設備数は、放流設備総数44門、堤内排水ポンプ等のその他設備が29基となっている。

各ダム担当は、池田ダムにある総合管理所に常駐している総管担当と連携して、管理所単位でこれらの機械設

備の維持管理を主担当として行っている。

### (2) 総管及び各ダム間の距離間による課題

総管と各ダムは、**図-1**のとおり30~70km程度離れており、また山間部でかつては国道が地すべりにより通行止めになった実績もあることから、設備機器異常等の障害対応時における総管からの支援や打合せ等は距離等の問題もあり充分支援できているとは言えない。

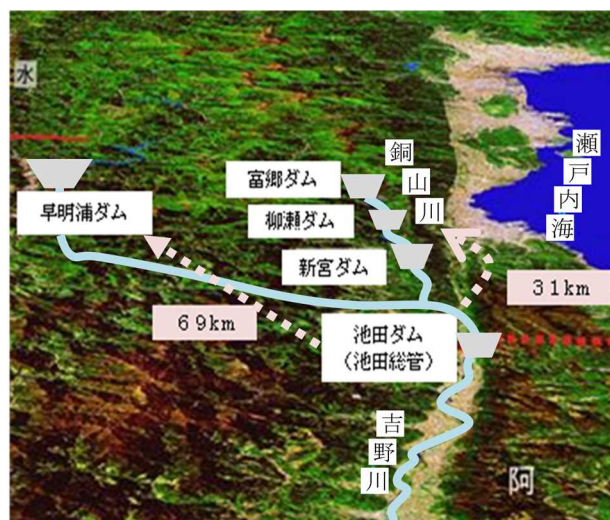


図-1 池田総合管理所で管理しているダム位置図

### (3) 障害対応時等の課題

各ダム担当は機器故障時の現地での障害対応(状況確認、直営復旧作業、復旧工事の監督等)の内、特に初動

対応は各ダム担当が1名で実施する場合が多く、経験の浅い職員では自ら原因究明や対応の判断は困難である。

また、障害発生現場から総管への状況報告も電話では状況が伝わりにくく、メールでは一度管理所執務室に戻らなければならない等正確性や迅速さに改善の余地があった。

更に状況確認用の設備図面、取扱説明書等の印刷資料は膨大で全て現場に持ち込むことは不可能であり、図面確認のためには現場と管理所間を往復しなければならないなど課題があった。

#### (4) 総管と各ダム間の情報共有の課題

点検の報告は、各ダムで点検実施後、後日報告書データを総管で確認を行っていた。

そのため、点検内容又は結果に指摘がある場合、後日改めて点検を行うため効率性に欠けていた。このように、情報が速やかに総管と各ダムで共有されないため、情報共有の迅速性に課題があった。

### 3. IoT技術の導入

#### (1) ダム機械設備管理支援システム

ダム機械設備管理支援システム（以下「本システム」という）は、点検作業の効率化、各ダム担当への総管からの支援強化を目的としたタブレット端末とWEBアプリを活用した支援システムである。

本システムで使用するWEBアプリは、エクセルで作成した点検表等の帳票等をタブレット端末などのインタ

ーネットブラウザ表示用に変換、表示し、また、表示のみではなくプルダウン操作や文字入力機能を有している。

また、テレビ電話機能、写真・ビデオ撮影、メール等の既存のタブレット端末機能を有効活用したシステムとしている。

#### (2) システム構成

本システムは、サーバー、タブレット端末、ルータ、管理用PC、インターネット光回線で構成し、アクアネットとは別の独立したシステムとしている。（図-2）

設置環境は、サーバーへのインターネット光回線及びタブレット端末の携帯電波が受信できる環境であれば、システム構築は可能である。

#### (3) 機械設備管理支援システムの特徴

##### a) 同時に閲覧、編集が可能

本システムで使用するWEBアプリは、タブレット端末にインターネットが接続できる環境であれば、タブレットやスマートフォン等に特別なソフトをインストールしなくてもインターネットのVPN回線を通してサーバーにアクセスして、WEBアプリの同時閲覧や編集が可能である。

また、WEBアプリの更新もサーバーで一元管理するため、個々の端末を更新する必要がなく、管理が容易である。

##### b) 帳票作成は汎用ソフト（エクセル）を使用

点検表等の帳票は、エクセルで作成したデータを取り込むシステムとなっている。（写真-1）

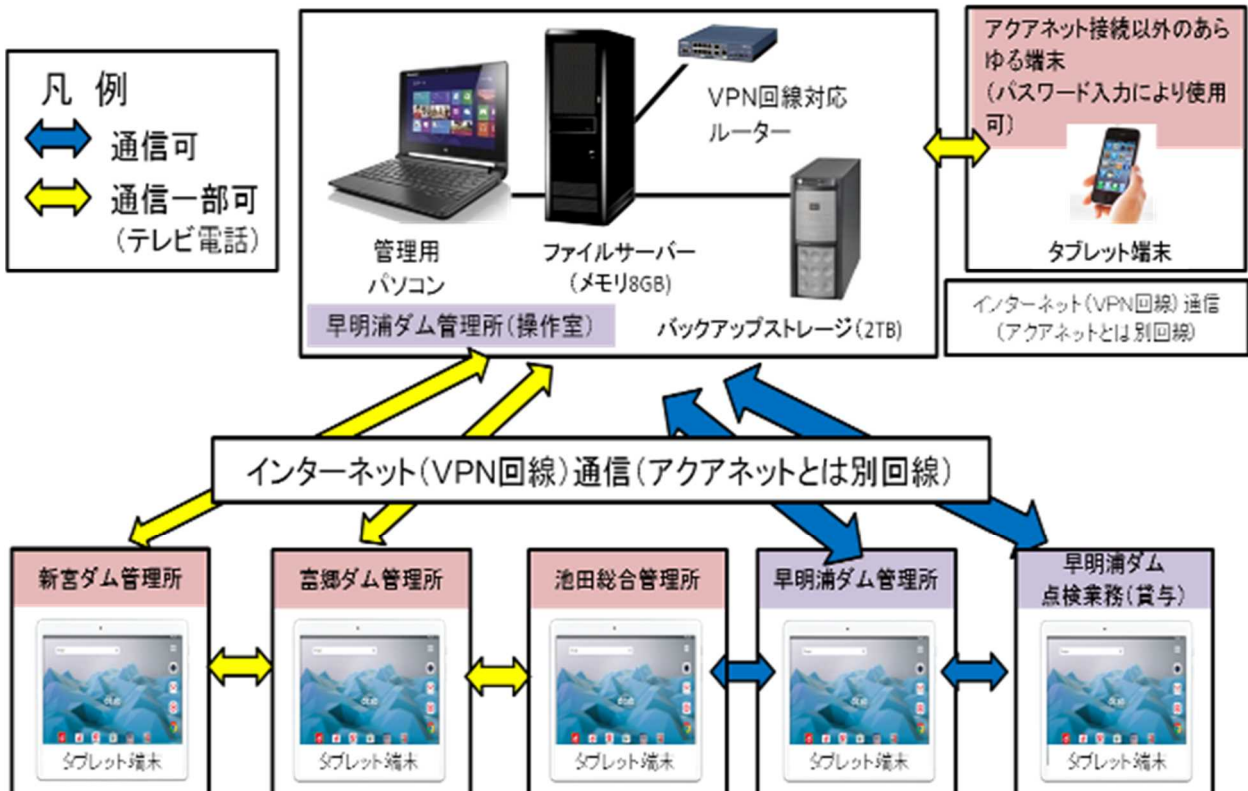


図-2 ダム機械設備管理支援システムの構成図

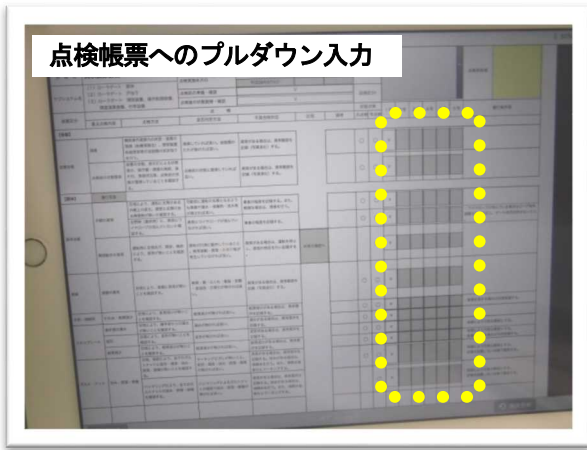


写真-1 WEB アプリ点検帳票による作業状況



写真-3 サイン、メモの手書き入力

エクセルを作成できる技術があれば作成可能なため、新たに帳票作成のためにシステム開発を行う必要がなく、職員でも簡易に帳票の加工や追加等を行える。

c) 帳票入力はオフラインでも使用可能

電波が届かない環境においても、サーバーの帳票データをタブレット端末に一時保存してデータ入力が可能であり、後で電波の届く環境で管理サーバーにデータ送信を行い、保存するシステムになっていることから、ダム の位置する山間部や堤体内といった環境でも使用可能である。

(4) ダム機械設備管理支援システムでの活用項目

a) WEB アプリを使用しタブレット間で同時にできること  
 タブレットに入力したデータは、入力次第複数のタブレット端末からも確認が可能となり、即時に情報共有される。

- ①月点検・年点検等の現地での入力・閲覧
- ②電流値等の点検計測データ良否判定 (写真-2)
- ③ダム定期検査資料の運転データの現地入力・閲覧
- ④異常発生報告等の現地での入力・閲覧
- ⑤完成図書・図面の PDF 閲覧
- ⑥点検結果等へのサイン、メモの手書き入力 (写真-3)
- ⑦写真自動保存、管理データ入力の自動グラフ化
- ⑧機械設備保全システム等へのデータ入力

 A photograph of a tablet displaying a table for current value input and judgment. The table has columns for '規定値' (Standard Value), '単位' (Unit), '測定開度' (Measurement Opening), and '良否' (Good/Bad) for different percentages (0%, 50%, 100%).
 

測定開度	0%		50%		100%	
	値	良否	値	良否	値	良否
2014/1/24	200.8	良	200.8	良	200.8	良
	200.5	良	200.5	良	200.5	良
2015/01/09	202.2	良	202.3	良	202.2	良
	203.0	良	202.0	良	202.0	良
2016/02/08	202.2	良	201.6	良	201.9	良
	20	良	20	良	20	良
	120	否	200	良	200	良
	100	否	210	良	215	良

写真-2 電流値等の点検計測時

b) タブレット機能を活かしてタブレット間でできること  
 タブレットの標準機能を使用し、タブレット間での確認が可能となり、即時に情報共有される。

- ①テレビ電話、メール
- ②写真撮影、ビデオ

4. ダム機械設備管理支援システムによる効果

(1) 各ダムへの支援強化、職種間のバリアフリー化

障害発生時の原因究明や対応の判断を遠隔地にいる総管担当が現地職員へテレビ電話機能を活用し、現地と総管間を画像と通話をリアルタイムでやりとりすることにより、経験年数、職種を問わず現地対応する職員に総管から適切な支援を行えるようになった。(写真-4)



写真-4 テレビ電話での現地と総管間の通話状況

併せて、点検時の計測データ良否判定機能により、異常値を即時に確認し、併せて確認漏れを防ぐことで障害発生 の未然防止の強化となった。

また、状況確認用の膨大な設備図面等を PDF データ化することで現地で簡単に閲覧できるようになり、現地確認作業の負担軽減となった。

## (2) 情報共有強化、迅速化

障害発生時、出水時や地震時の報告を迅速に対応できるように現地でタブレット端末から報告様式に入力可能となり、またその場で撮影した写真も、報告様式に自動添付できるようにした。更にこれらの情報はタブレット端末間で閲覧できることから、現場内及び現場と総管間のデータの迅速化、共有化が可能となった。(写真-5)



写真-5 現地での写真撮影状況

## (3) 作業時間短縮・ペーパーレス化

従来の点検報告は、現地点検中に紙様式にデータを記入後、管理所に戻り PC に入力し、メールを行っていたが、今後は、現地でタブレット端末にデータを直接入力し、報告も総管にあるタブレットでリアルタイムに閲覧できるため、入力ミスや2度手間省略、転記ミス及び報告時間の省略化、ペーパーレス化を図ることができた。

## (4) 吉野川本部管内OJT

総管のほか、吉野川本部管内の吉野川本部、旧吉野川河口堰管理所及び香川用水管理所に勤務する機械担当職員 12 名が点検 OJT で試行した結果、点検帳票の入力の簡易さによる効率性向上、情報報告の迅速化については効果があると評価を頂き、全体的に今後活用していけそうだとの実感を抱いた。(写真-6)



写真-6 吉野川本部管内OJTでの試行状況

## 5. 吉野川本部管内ネットワーク構築

「ダム機械設備管理支援システム」は、現在、総管のみの運用から、吉野川本部管内の吉野川本部、旧吉野川河口堰管理所及び香川用水管理所も併せた4事務所間で運用ができるように、サーバーを設置している池田総合管理所を拠点とした吉野川本部管内ネットワークに拡大して構築を行っているところである。

構築が完成すれば、吉野川本部管内ネットワークにより、管内全事務所の点検結果、障害発生・対応等の情報共有が迅速に行えることになる。

また、タブレット本来機能であるテレビ電話機能を使用した技術支援についても管内全事務所で行えることから、障害発生時の初期対応が的確に行える。

ネットワーク構築は、タブレットの機能を最大限活用できるように、拡張性を持った設計としている。

## 6. 更なる活用に向けて

本システムは独立行政法人水資源機構で推進している Smart Operation Smart maintenance の実現に向けた第一歩と考えている。これらのシステムを構築したことでタブレット端末、WEB アプリという既存システムを活用した土木設備保全、防災等への応用が期待できるとともに、経験年数や職種の壁をバリアフリー化し、誰でも現地対応できる体制を構築できると考えている。

IoT 技術は、今後も新たな技術が開発され更に発展していくと思われる。今後本システムまたはタブレット端末の機能を活かした機能が追加可能であるか、信頼性、操作性、費用等を勘案した上で機能の追加導入を検討したい。

また、ゲートの動作部（モータ、軸受等）へのセンサー設置やオンライン監視によるデータの常時監視が可能になれば点検作業の大幅な省力化ができるとともに、点検データでは確認できない放流時の運転データを記録できるため詳細な劣化診断の可能性も期待できる。計測センサーによる集中管理化に向けて、このようなセンサー技術がないか今後検討を進めていきたい。

担当職員数が限られている中、維持管理技術の質を落とさずに作業の効率化、障害発生時における迅速な対応等において誰もが使い慣れているタブレット端末を管理技術に活かした本技術を今後も進展・展開できるように努めていくこととしている。

# 築堤設計におけるCIMの活用について

野口 俊輔<sup>1</sup>・長坂 正敏<sup>1</sup>・河原 武志<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千曲川河川事務所 調査課 (〒380-0903 長野県長野市鶴賀字峰村74 )

本稿は、2014年よりCIMの試行を実施している屋島・福島築堤事業において、地上レーザー測量と従来測量であるTS測量を2.4km区間全体で比較検証した結果を報告するとともに、地元説明会における3次元モデルの活用について、過去の課題を踏まえて実施したVR・ARの活用結果から、発展的な活用方法の効果と課題を報告するものである。

キーワード CIM, ICT, 築堤, 地上レーザー計測, 地元説明会

## 1. はじめに

国土交通省では、2015年11月に、日々進化するICT（情報通信技術）などを積極的に活用し、建設現場における生産性の向上に向けて、①ICT技術の全面的な活用（土工）、②規格の標準化（コンクリート工）、③施工時期の平準化の3本を柱とした新たな施策『i-Construction』を打ち出している。また、2016年4月にi-Construction推進に向けたロードマップ（案）が策定され、2025年までに建設現場の生産性を2割向上するため、全ての建設生産プロセスにおいて今後益々ICTや3次元データ等の積極的な活用が期待されている。

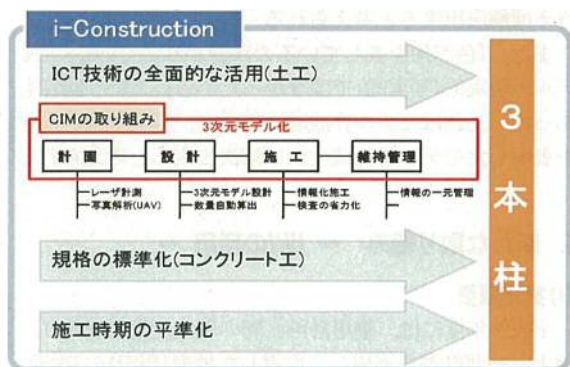


図-1 i-ConstructionとCIMの関係

また、千曲川河川事務所では、2012年度よりCIM（Construction Information Modeling / Management）の取り組みを実施しており、CIMモデル構築を通じた課題抽出とその対応策、有効性の検証等の検討を行っている。河川事業の試行として選定された「荻原築堤護岸他工事」は、当事務所のCIM試行事業であり、「新たな河川管理（築堤事業）の方向性」を個別目標として検討を

行っている。これに追従する形で、2014年度より屋島・福島築堤事業の築堤設計についてCIMの取り組みを実施しているところである。

本稿は、過去の検証結果を踏まえ、地上レーザー測量で取得した地形情報と従来型のTS測量で取得した地形情報をマクロな視点で比較検証した結果を報告する。さらに地上レーザー測量で取得した地形（現況）の3次元モデルを基に堤防の3次元モデルを作成し、前年度に実施した地元説明会の問題点を踏まえた応用的な活用結果の効果と新たな課題を報告する。

## 2. CIMの試行事業区間

千曲川河川事務所では、千曲川の村山橋～落合橋区間の左岸側、屋島・福島地区（左岸：長野市大字屋島地先、右岸：須坂市大字福島地先）の5.3km区間（図-2）の築堤設計をCIMにて試行している。

そのうち左岸側の屋島築堤区間では2015年に村山橋～屋島橋区間で地元説明会を開催している。本稿で述べる試行内容は、この上流側である屋島橋～落合橋区間で2016年に実施した検証、及び地元説明会を対象とする。



図-2 CIMの試行箇所

### 3. レーザー計測データの取り扱い方法

#### (1) 実施目的

これまでの検証では、近年活用が進んでいる3次元測量点群データの築堤設計での適用性を検証するため、従来のTS測量で作成した地形と地上レーザー測量で作成した地形情報の比較<sup>1)</sup>、さらにはUAVによる画像解析データから取得した地形情報との比較<sup>2)</sup>が行われている。これらの検証結果によると、後者は従来のTS測量や地上レーザー測量に比べると精度が落ち、堤防詳細設計への適用には課題が多いが、前者はフィルタリング作業によるノイズ除去を施すことで従来測量との差異が小さくなり、堤防詳細設計にも十分対応可能なデータであるとされている。

また、従来型のTS測量で作成した地形と地上レーザー測量やUAV撮影画像から取得した地形情報（以降“新たな手法による地形情報”と明記）を重ね合わせた場合、植生の繁茂する法尻部ではデータの差異が大きく、アスファルト部の天端では差異が小さくなることが確認されている。これは遮蔽要素となる植生がこれら新たな計測方法の精度や信頼性に大きく影響を与えることが示唆されることから、計測前に除草を行うと同時に、除草後期間を空けずに計測を実施することが望ましい。

一方で、植生の生育状況は植生種別や場所、機械の設置位置も場所によっても異なることから、現時点では除草後の経過日数と精度の相関性は確立されていない。また除草は法面部が主体であり、堤内側や堤外側の平地まで実施されない可能性が高いことから、全ての地上レーザー測量データを設計時に精度良く利用できる状態とは言いがたい。特に築堤・護岸詳細設計では、堤脚水路の設置や護岸基礎高の設定等、現況地形状況に左右されるケースが多いことから、使用する現況地形データの精度によっては現場施工時に影響が生じる可能性も考えられる。

そこで、異なる地被条件や土地利用条件に対してTS測量と新たな手法による地形情報の差異がどの程度生じるかをマクロな視点で確認し、今後におけるレーザー計測技術活用の留意点を抽出することを目的とした。

#### (2) 検証方法

今回は、UAV撮影画像から取得した情報よりも精度の高い地上レーザー測量を活用し、TS測量から取得した地形情報と各横断で重ね合わせを行った。さらにこれらの対比を2.4km区間全ての横断で実施することで縦断方向の特徴を捉えるものとした。

##### a) 横断区域の設定

堤防横断に着目すると、堤防天端や法面、高水敷部等ではアスファルトや雑草といった形で地被条件が各々異なることから、これらの特徴と場所の関係を整理するため、図-3に示すように地被条件の異なる場所毎に横断区域を設定した。

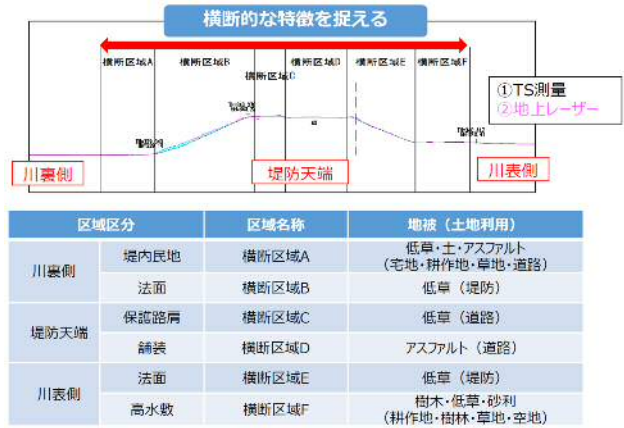


図-3 横断方向の区域

##### b) 差分量の算出

①TS測量で作成した地形データと、②地上レーザー測量で作成した地形データの差分量 $\Delta h(m)$ は、以下の通り算出した。（図-4）

**手順1** 図-4に示した②-①の差分面積 $a_i(m^2)$ の総和を(1a)式より算出する。

**手順2** 図-4に示した①の延長の総和を $b_i(m)$ の総和を(1b)式より算出する。

**手順3** 仮想平均差分高さ $\Delta h(m)$ を(1c)式より算出する。

$$A = a_1 + a_2 + a_3 \cdots \cdots + a_n = \sum_{i=1}^n a_i \quad (1a)$$

$$B = b_1 + b_2 + b_3 \cdots \cdots + b_n = \sum_{i=1}^n b_i \quad (1b)$$

$$\Delta h = \frac{A}{B} \quad (1c)$$

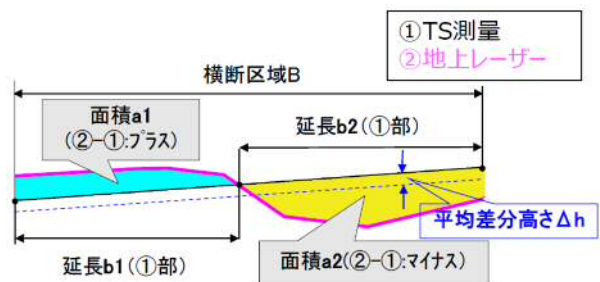


図-4 各横断区域における差分量 $\Delta h$ の算出方法

##### c) 差分量の評価

横断区域A~Fの差分量を約2.4km区間の全横断面で算出して縦断方向の連続的な傾向を把握する場合、断面母数が多いこと、横断区域AやFは地被条件や土地利用条件が場所により異なることから、横断区域D（アスファルト部）を除いた区域は地被条件に応じた差異の傾向が掴みづらい。そこで、差分量の区間平均値を算出し、地被条件や土地利用条件に応じた傾向の把握を行う。縦断方



向の区間設定は、地被条件や土地利用条件に応じて表-1の通り区分した。

表-1 縦断方向の区間設定と地被条件

区間	主要な地被 (土地利用) 条件			参照写真
	【川裏】横断区域A	【天端】横断区域C	【川表】横断区域F	
区間1	低木粗・低草・土・建物 (草地・耕作地・宅地)	低草 (保護路肩)	高木密・低草・土 (樹林・草地・耕作地)	写真1
区間2	低木粗・低草・土 (草地・耕作地)	低草 (保護路肩)	高木粗・砂利 (樹林・空地)	写真2
区間3	舗装・資材 (工場敷地・フィス)	低草 (保護路肩)	高木粗・中低木密・低草 (樹林・草地)	写真3
区間4	高木密・低草・舗装 (樹林・処理場敷地)	低草 (保護路肩)	高木密・中低木密・低草 (樹林・草地)	写真4
区間5	高木粗・低草 (樹林・処理場敷地)	高木粗・低草 (桜並木・保護路肩)	中低木粗・低草・土 (草地・耕作地)	写真5
区間6	舗装・車 (道路・駐車場・フィス)	低草 (保護路肩)	中低木粗・低草・土 (草地・耕作地)	写真6



図-5 UAV撮影写真 (区間1:下流→区間6:上流)

### (3) 検証結果

TS測量と地上レーザー測量の差分量 $\Delta h$ の区間平均値を算出しグラフ化したものを図-6に、バラツキ状況を確認するため、標準偏差のグラフを図-7に示す。全体の傾向として、アスファルト舗装部の横断区域Dを除き、ほぼ大部分の区間で $\Delta h$ がプラスとなっておりレーザー測量の方がTS測量よりも計測値が高くなっている。これは植生の影響により、地上レーザー測量では草の表面を捉えて計測し、レーザーが地表面まで届いていないことが示唆される。また、レーザーの横断測量に対する規定はまだないが、TSの規定を満たすためにはまだ課題が多いと考えられる。

#### a) 横断区域B, E (法面部)

川表法面部(E)では、上流側に比べて下流側は差異がやや大きくなっているが、川裏法面部(B)も含めて明確な傾向の違いは生じていない。法面部は計測時における

除草後の経過日数が場所により異なるため、植生の草丈や繁茂状況が異なっていると想定される。川表法面部(E)は区間3, 4で差異が最も大きく、同区間は樹木の繁茂密度が高い(図-5)ことが影響している可能性も想定されるが、計測時の草丈や繁茂状況が不明瞭であり明確な相関性は検証ができなかった。

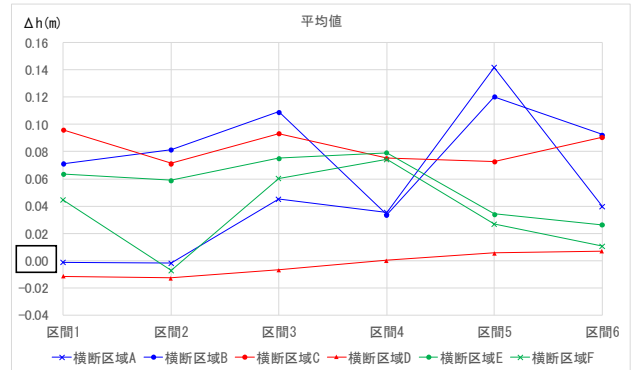


図-6 各区間における差分量の平均値

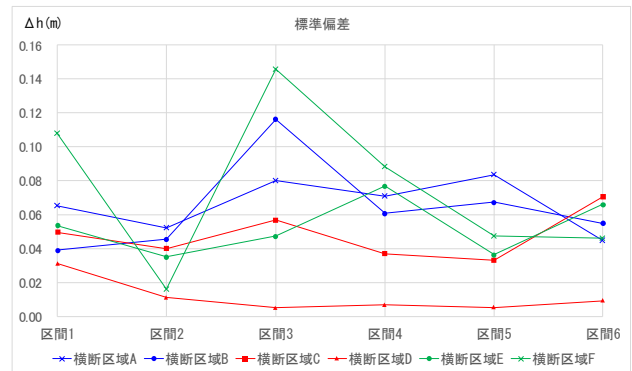


図-7 各区間における差分量の標準偏差

#### b) 横断区域F(高水敷部)

密な高木が少なく裸地部(砂利)が多い区間2は、差分量・バラツキ共に小さく、また樹木が少なく耕作地となっている区間5, 6も相対的に同様の傾向を示している。一方で、樹木の繁茂密度が高い区間1, 3, 4は、差分量・バラツキ共に相対的に大きくなっている。これは樹木繁茂密度が高い区間は当然遮蔽効果も高く、機械設置場所も限定されることから地表面にレーザーが届かない確率も高くなり、相対的に差異やバラツキが大きくなったと想定される。

#### c) 横断区域A(堤内民地部)

樹木が少なく耕作地や住宅地となっている区間1, 2は差異が殆ど生じていないのに対し、法尻部にフェンスが設置され雑草が繁茂している区間3, 6(図-7)は4cm程度の差異が生じている。堤脚水路の計画に際しては、法尻部における現況地形の再現精度が重要であるが、フェンスが設置されている法尻部(図-8)は除草が困難であることから注意が必要である。

また、区間5はバラツキは8cm程度であるが、差分量が14cmと最も大きくなっていることから、同区間の3次元測量点群データを確認するとデータが粗くなっているこ

とがわかる(図-9)。同箇所は管理区域外の公用地であり、近くに桜並木が存在することも合わせて計測しづらい条件であった。さらに計測時点で設計時の使用を想定していない可能性もあることから、このように立ち入りに許可が必要な場所は特に注意が必要である。



図-8 区間3川裏法尻部 図-9 区間5点群データ

#### 4. 地元説明会におけるVR・ARの活用

##### (1) 説明会手法の変遷

地元説明会で採用する説明手法は、従来はA1やA0サイズの大判図面や配布資料を用いる紙を主体とした手法であったが、現在はこれにパワーポイントを使用した方法(2次元)が主流となっている。さらに近年はCIM試行の影響もあり3次元モデルをの活用した説明が採用されつつある(図-10)。

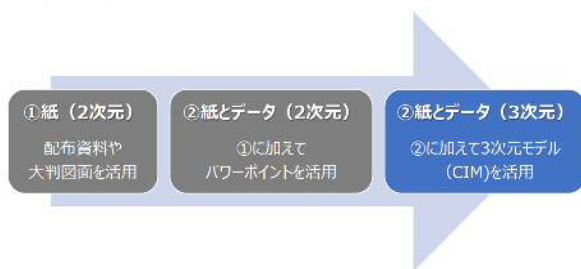


図-10 地元説明会手法の変遷

##### (2) 3次元モデルを活用した説明会の効果と問題

千曲川河川事務所では、2015年に千曲川左岸側の村山橋～屋島橋区間で地元説明会を実施し、3次元モデルを活用することで、「把握しやすい」「やや把握しやすい」が90%以上を示しており、「立体的に見えた」「直感的に理解できた」といった3次元モデルの効果が証明されている一方で、以下の問題点が挙げられている。

- ・問題点1：どこから見ているか分かりにくい
- ・問題点2：画面がくるくると動くので分かりにくい
- ・問題点3：見たいところに着目できない
- ・問題点4：色が何を表しているのかわかりにくい

##### (3) 地元説明会におけるVRの適用性

3次元モデルを活用することで、2次元図面や文章よりも現場状況を素早く立体的にイメージでき、理解の早さと理解の深さに繋げることができる。これが合意形成の円滑化や認識の共有化に繋がり、長い目で生産効率化に寄与するものとする。

一方で単純に3次元モデルを使用(infravworks等のソフト

で操作)するだけでは、事業に係っていない人間の理解を得るには不十分である。これらの問題に対応するため、近年様々な方面で実用が進んでいるVR技術を説明会で活用するものとした。

VR(Virtual Reality: 仮想現実)とは、コンピュータ上で人工的な3D環境を作り出し、あたかもそこにいるような感覚を体験できる技術である。地元説明会では、作成した3D映像をパソコンで操作してプロジェクターで見せる方法や、HMD(ヘッドマウントディスプレイ)により実際に3D体験をしてもらう方法が考えられる(表-3)。疑似空間への没入感は①→④に向けて大きくなるが、④は体験型となり大人数に対しては機器台数が限られるため体験機会と時間の問題があり地元説明会での適用性は低い。よって、本地元説明会では①～③の手法を活用し、前述の問題点に対する効果の有無を検証した。一方で、これらの手法は全て体験者は受動的な形態となり、先に挙げた問題点3に対しては効果が期待できない。そこで④の代替としてARという手法を今回新たに導入した。

表-3 地元説明会におけるVRの適用性

手法	形態	没入感	対象可能人数	地元説明会での適用性
①3D画像をプロジェクターで表現	受動的	最小	大人数	○
②3D動画をプロジェクターで表現	受動的	小	大人数	○
③体験動画をプロジェクターで表現	受動的	中	大人数	○
④HMDにより実際に3Dを体験	受動的+能動的	大	少人数	△



図-11 ③体験動画



図-12 ④HMD

##### (4) ARの活用

AR(Augmented Reality)とは、現実空間に付加情報を表示させ、現実世界を拡張する技術である。VRは現実世界とは切り離された仮想世界を再現する技術であるが、ARはあくまで現実世界が主体であり、VRと共に今後進展が期待されている技術である。

今回の地元説明会でARの可視化に使用した機器(スマートデバイス)は、ASUS ZenPad3 8.0(OS: Android 6.0.1, カメラ: 800万画素)を1台(図-13)、Galaxy S7(OS: Android 6.0.1, カメラ: 1220万画素)を2台(図-14)である。ARの作成方法を以降に示す。



図-13 ZenPad3 8.0



図-14 Galaxy S7

**手順1** Vuforia SDKにより地元説明会で使用する2次元図面（A1ロング図面）をマーカー画像に変換する。

**手順2** 可視化情報である堤防設計3次元モデルをInfraWorks 360(Autodesk)で作成する。

**手順3** 作成したマーカー画像と3次元モデルをUnityで取り込み、両者を連動させるためのアプリケーション設定を行う。

**手順4** ARアプリケーションソフトをUSBケーブルを通じてスマートデバイスへ移行し、可視化表示を行う。

### (5) 3次元モデルの応用的活用方法

2016年11月と12月、長野市南屋島と大豆島の2地区において、作成した改修計画の3次元モデルを用いて地元説明会を行った。説明方法は、先に述べた2015年のアンケート結果から問題点が生じる要因を分析し(図-15)、「全体像を最初に認識させる手法」「UAVで撮影した実際の風景と3次元モデルを比べる方法」「方向限定の静止画や動画(VR)を使用する方法」「自ら操作できる環境の提供(AR)」を採用した。また対比画像を活用した説明やARの活用方法を異なる地区に適用することで、適用の有無による効果の違いを検証した(表-4)。

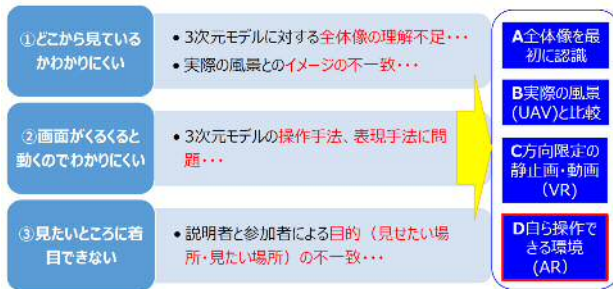


図-15 過去の問題点の分析と説明方法

表-4 具体的な説明方法と適用地区

対応項目	今回の説明方法	説明種別	適用地区
A 全体像の認識	最初に2次元の図面で全体の内容を説明	2次元(受動的)	南屋島 大豆島
A 全体像の認識	動画(計画→運転VR)で説明	3次元・VR(受動的)	南屋島 大豆島
C 方向限定	現況(UAV)と計画(3次元)を並べた静止画で説明	3次元・VR(受動的)	南屋島
B 実際との対比			
D 自ら操作できる環境	AR(Augmented Reality: 拡張現実)を活用	3次元・AR(能動的)	大豆島

### (6) 3次元モデルの活用効果と課題

#### a) わかりやすさの確認

地元説明会後に実施したアンケート結果(南屋島地区30名、大豆島地区10名)より、わかりやすさに関する質問に対しては、90%(36名/40名)の被験者が「わかりやすい」「ややわかりやすい」と回答しており、前年度とほぼ同様の結果を示した。

#### b) 対比画像・動画(VR)の効果

現況と完成後の対比画像を使用した南屋島地区では、3次元モデルによる説明で『良かった点』として「⑤現況と完成後を比べてみる事ができた」を挙げているのに対し、対比画像を使用しなかった大豆島地区では、同

回答は0であった(図-16)。他には「車を運転しているイメージがわいてわかりやすかった」が20%(8名/40名)、「動画がわかりやすかった」という回答が12%(5名/40名)であった。

また、3次元モデルによる説明で『悪かった点』として「①どこから見ているかわからなかった」という回答が両地区共に1人もいなかった(図-17)。

以上のアンケート結果より、現況との対比画像やVR動画の活用による一定の効果があること、また全体像を最初に認識させる手法を活用することで理解度の向上に繋がることがわかった。

Q:3次元モデルによる説明で良かった点は？(上:南屋島, 下大豆島)

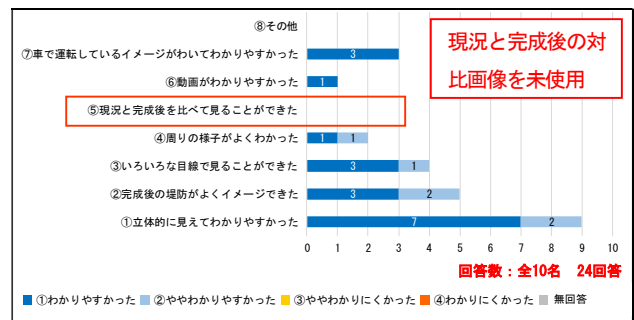
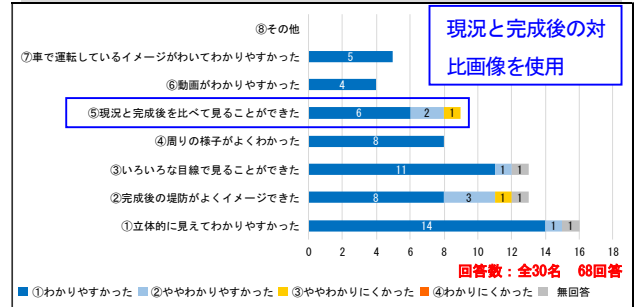


図-16 アンケート結果(良かった点)

Q:3次元モデルによる説明で悪かった点は？(南屋島・大豆島)

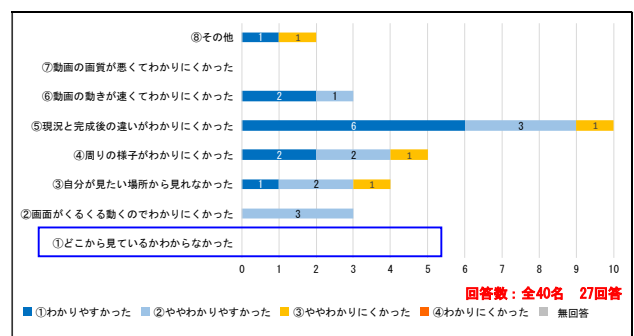


図-17 アンケート結果(悪かった点)

#### c) 3次元モデル活用の課題

図-17のアンケート結果より、「現況と完成後の違いがわかりにくかった」という回答が依然として多くあり、これは、「色が何を表しているのかわかりにくい」という前年度の問題点を踏まえてモデルの色合いを実際に近くなるよう配慮したことで、逆に現況との変化が捉えにくくなったと思われる。このことから、築堤事業は相対的に現況との違いがわかりにくいという特徴があること

から、色の違いや、それとも実際のイメージを表現するなど目的に応じたモデル作成が必要である。

また、前年度に実施した3次元モデルを活用した説明会（南屋島のみ）に参加した人に比べ、今回初めて参加した人（3次元モデル初体験）の方が、「現況と完成後の違いがわかりにくい」という回答が多かった（図-18）。この結果から、3次元モデルに対する「慣れ」が理解度の向上に影響していると考えられることから、説明会の継続実施により理解度を深める努力は必要不可欠である。

その他、「周りの様子がわかりにくい」という意見は2番目に多く（5名）、家屋や周辺施設の作りこみレベル、周辺地形や再現モデルの範囲等で課題が残った。一方で、これらをより詳細に表現するとコスト・時間・データ容量面で問題が生じることから、こういった情報の付与がより効率良く理解の向上に繋がるかについても検証が必要である。

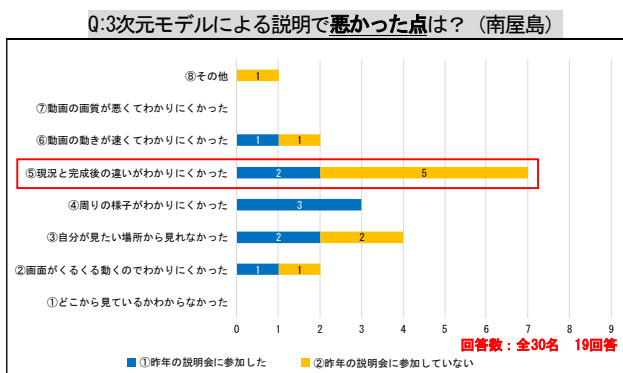


図-18 アンケート結果（前年度参加の有無）

## (7) ARの活用効果と課題

### a) 活用効果

ARを実施しない南屋島地区では、3次元モデルによる説明で『悪かった点』として「自分が見たい場所から見れなかった」と答えた人が4/19（21%）いたのに対し（図-18），ARを実施した大豆島地区では0/8（0%）であった。この結果から、被験者数は少ないがARを活用することにより「見たいところに着目できない」という問題点の改善につながった。（図-19）

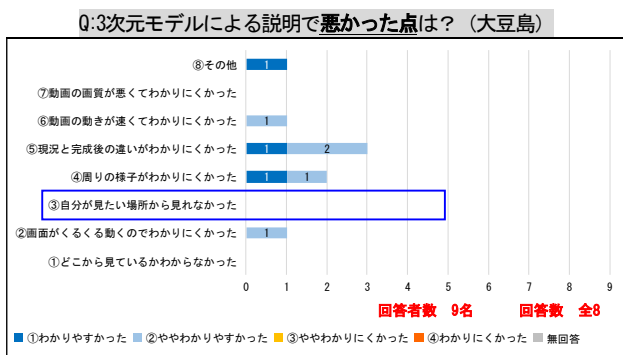


図-19 アンケート結果（AR活用の効果）

### b) 課題

『見たい場所から見れたか』という質問に対しては、「見えた」「やや見えた」が67%であり、視認性につい

ては不満の残る結果であった。（図-20）視認性に関する具体的な問題は以下の通りである。

- ・画面がぶれる
- ・スマートフォンは画面が小さい
- ・モデル化範囲が広いとスケールが小さくなる
- ・水平からの視点が安定しない

また今回はデータ容量が大きいことからAndroid 6.0.1の比較的スペックの高い端末を使用したが、動作の安定性を加味すると同程度のスペックは必要であり、汎用性という点では課題がある。また端末も含めて納品しないと業務完了後の説明会では利用できないため、継続的な説明会での運用に向けたサービスの提供方法という点でも課題が残った。今後は先に挙げた視認性の問題と合わせてこれら課題の解決に努めたい。

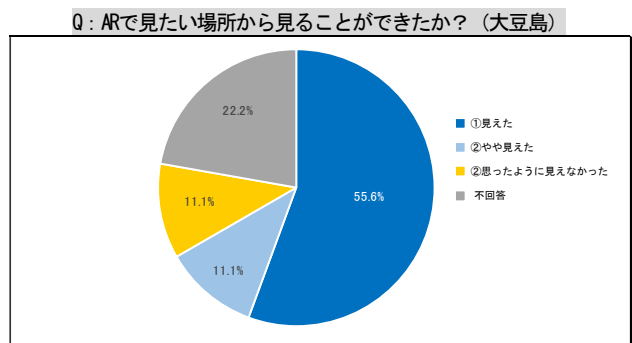


図-20 アンケート結果（AR活用の課題）

## 5. まとめ

今回実施した「平成28年度屋島・大豆島地区堤防設計等業務」においては、宅地等の影響もあり堤防法線の変更を行っているが、レーザー測量を利用した3次元モデル使用により迅速な変更が可能であった。しかし、レーザー測量で掌握出来ない構造物情報（舗装端部、擁壁等）はTS測量を基に補足し設計しているため、今後の課題である。また、As舗装部といった遮蔽要素の少ない箇所については信頼性が高いが、樹木繁茂が密な箇所については注意が必要である。

説明会については、一定の効果を得られたため継続して検証を続けたい。

現段階ではCIMの適用性は予備設計では高いが、3次元モデル作成に膨大な時間を要するため詳細設計ではあまり適用性は高くないと考えられる。今後、施工との関連についても検証し、CIMの効果を高めていきたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、ご協力いただいた関係各位に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) CIMにおける地上レーザー計測により取得した地形3次元データの活用について(2015年 千曲川河川事務所報告)
- 2) 築堤設計における3次元モデル化の効果及び新たな取り組みについて(2016年 千曲川河川事務所報告)

# サンゴ礫混じり土調査・設計マニュアルの改訂について

具志 良太<sup>1</sup>・江崎 荘太<sup>1</sup>

<sup>1</sup>内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 (〒900-0001 那覇市港町2-6-11)

沖縄県の港湾構造物は、設計を実施する地盤として「サンゴ礫混じり土」が対象となる場合が多く、土質工学上、一般的な砂質土及び粘性土とは異なった性質を示す。そのため、調査研究成果や既往調査データの整理を行ない、平成7年3月に「サンゴ礫混じり土調査・設計マニュアル(案)」を作成し内部資料として運用してきた。しかし、当マニュアル(案)発刊から約20年が経過し、サンゴ礫混じり土における基礎的研究が進み、また、土質調査に関する技術開発が発達してきたことから、それらを活用することでサンゴ礫混じり土に関する課題の幾つかを解決できるようになったため、当マニュアル(案)の改訂を行なった。本稿は従来マニュアル(案)の課題点を整理し、最新の知見を踏まえた改訂ポイントを示したものである。

キーワード サンゴ礫混じり土、マニュアル、サンプリング、土質区分、力学試験方法

## 1. はじめに

「サンゴ礫混じり土調査・設計マニュアル(案) H7年3月」は、これまで多くの港湾施設等の土質調査や設計に活用されてきた。しかしこのマニュアルは、サンゴ礫混じり土の乱れの少ない試料採取が困難なことなどから、総ての課題に対して解決されたものではなく、以降の調査・研究成果を踏まえたマニュアルの見直しを視野にあくまでも当時の技術水準で取りまとめられたものである。一方、近年ではサンプリング技術が向上し、サンゴ礫混じり土のサンプリングが可能となり(高品質サンプリング)、それに伴いこれまでの土質区分とせん断強度試験方法に土質工学上(透水性等)の不整合があること等が最新の研究成果から明らかになってきた。また、平成19年には港湾施設の技術上の基準・同解説が改訂され、簡易三軸CU試験など新たな試験方法が導入されると

もに、近々、さらに改訂の動向もある。そのため、発刊から約20年が経過した本マニュアル(案)についても、新基準との整合性などの見直しが迫られていた。

今回の改訂のポイントは、サンプリング手法として高品質サンプリングを採用したこと、サンゴ礫混じり土の土質区分(砂質土、中間土、粘性土)およびその土質区分に応じたせん断強度試験方法を規定したこと(変則UU試験を廃止し、簡易三軸CU試験方法を採用し、中間土を対象に新たに三軸CU試験を採用)である。

## 2. サンゴ礫混じり土の特徴

### (1) サンゴ礫混じり土の生成過程及び特徴

サンゴ礫混じり土は、港湾施設の建設に関わる海岸線に沿ったリーフ内側に見られる。この生成過程はまず、リーフの内側の礁湖と称する静穏な海域にサンゴ礁が形成される。その後、サンゴ礁が波によって浸食したサンゴと内陸の河川から運ばれてきた土砂とともに静かに堆

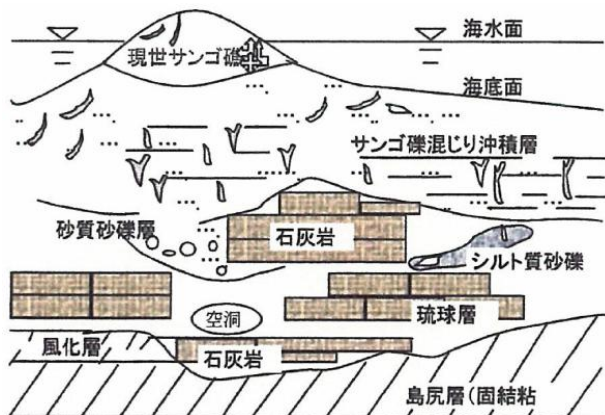


図-2.1 サンゴ礁海域の地盤構成模式図<sup>1)</sup>

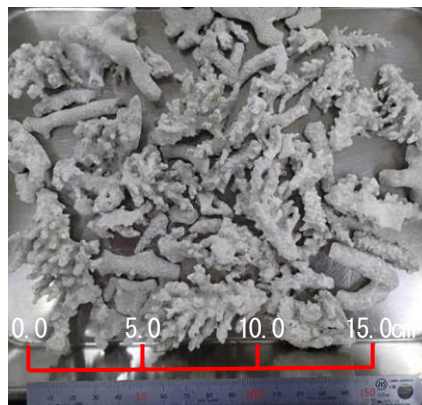


写真-2.1 サンゴ礫の写真

積する。さらにそこに生育した枝サンゴにサンゴ片等が沈降・堆積していくといった過程を繰り返して形成される。このため、写真-2.1に示す枝サンゴに代表されるサンゴ礫の間隙にサンゴ礫起源のシルトを主体とする細粒土がゆるく詰まった状態で存在している土である。サンゴ礁海域の地盤構成模式図は図-2.1に示す通りである。

(2) 乱れの少ない試料採取が困難  
 乱れの少ない試料を採取する場合、シンウォールサンプラーによる押し込み方法ではサンゴ礫が刃先に当たって押し込み不能となる、あるいは刃先が変形して試料を攪乱してしまう。トリプルチューブサンプラー等による回転式の方法ではサンゴ礫が動いて試料を乱してしまう、といった具合に乱れの少ない試料採取が非常に困難な地盤である。

(3) サンゴ礫混じり土の力学的挙動が不明  
 サンゴ礫混じり土は力学的に、サンゴ礫が少ない場合、シルトが支配的となり圧密沈下の問題がある地盤であり、逆にサンゴ礫の含有率が多くなるとサンゴ礫のかみ合わせによってその挙動もサンゴ礫が支配することになる。その境界値は細粒分含有率だけでなく、サンゴ礫の形状や大きさなど、様々な要因も含まれている。このため、圧密沈下の懸念もありながら、設計上は $\phi$ 評価(中間土など)として設計するなど、サンゴ礫混じり土の力学的挙動はいまだ明らかにされていない。

(4) 原位置試験の実施が困難  
 サンゴ礫混入の影響で、原位置試験(サウンディング)から得られる値(例えばN値)の評価が難しく、サウンディング結果より得られる設計定数が信頼性に乏しい。

### 3. 従来マニュアル(案)の特徴

従来マニュアル(案)は、2章で示したサンゴ礫混じり土の特徴を踏まえ、調査・設計上の課題を解決するための手引き書として作成されたものであり、作成時のポイントは以下の通りである。

- ① 土質区分、調査試験方法：表-3.1のように礫分含有率 $\beta$ 、細粒分含有率 $F_c$ (粘土分+シルト分)に基づいて調査方法、試験方法を選択するようにされていた。
- ② サウンディング方法：標準貫入試験又は電気式静的コーン貫入試験を標準とされていた。
- ③ サンプルング手法：固定式ピストン式シンウォールサンプラーを用いて行うことを標準とし、サンゴ礫の混入状況、密実さにより肉厚のバスケット型コアキャッチャー式固定式ピストン式シンウォールサンプラーを使用するものとされていた。
- ④ 力学試験方法：表-3.1のように礫分含有率 $\beta$ 、細粒分含有率 $F_c$ 、試料の乱れに基づき三軸CD試験、三軸UU試験、変則三軸UU試験、一軸圧縮試験を使い分ける。また、強度定数は、礫分の含有率 $\beta$ と細粒分含有率 $F_c$ から、表-3.2のように $\phi$ 評価もしくは $c$ 評価とする。

表-3.1 従来マニュアル(案)の力学試験方法

乱れの程度	細粒分の含有率		20%未満	20%以上 40%未満	40%以上
	礫分の含有率				
乱れている	50%未満		CD ( $\phi$ 評価)	変則UU	
	50%以上 80%未満			CD( $\phi$ 評価) or 変則UU( $c$ 評価)	変則UU ( $c$ 評価)
	80%以上			-	-
乱れていない (もしくは無視 できる)	50%未満		CD ( $\phi$ 評価)	UU ( $c$ 評価)	一軸圧縮 ( $c$ 評価)
	50%以上 80%未満			CD( $\phi$ 評価) or UU( $c$ 評価)	UU ( $c$ 評価)
	80%以上			-	-

表-3.2 従来マニュアル(案)の設計時の強度定数の設定

細粒分含有率 $F_c$ 礫分の含有率 $\beta$	20%未満	20%以上 40%未満	40%以上
	50%未満	$\phi$ 評価	$c$ 評価
50%以上 80%未満	$\phi$ 評価	$\phi$ or $c$ 評価※	$c$ 評価
80%以上	$\phi$ 評価	-	-

### 4. 従来マニュアル(案)の運用による課題

従来マニュアル(案)には、サンプルング手法、土質区分と土質試験方法等に以下の課題がある。

- (1) サンプルング手法  
 既往の試験データを集積し、サンプルング方式と試料の乱れを分析した結果、高品質サンプルング<トリプルサンプルング<シンウォールサンプルングの順に乱れが大きいことが分かった。このため、標準としている固定式ピストン式シンウォールサンプラーの使用を見直す必要性があった。

- (2) 土質区分と土質試験方法  
 従来マニュアル(案)では礫分 $\beta$ と細粒分含有率 $F_c$ を指標に土質区分、力学試験方法を決定している。ここで、従来マニュアル(案)では中間土は電気式静的コーン貫入試験を行い、間隙水圧の発生状況で $c$ 、 $\phi$ 評価の区分を判断するよう示されている。しかし、調査時に電気式静的コーン貫入試験は行っていないのが実情であり、中間土の $c$ 、 $\phi$ 評価の区分に苦慮している。また、サンプルング時の試料の乱れを考慮した従来マニュアル独自の試験法として、変則三軸UU試験を数多く実施されてきたが、設計時の強度定数設定方法が曖昧であり、変則三軸UU試験は国際基準に則った手法ではない。

### 5. 主なマニュアル改訂内容

近年、高品質サンプルングが可能となり、乱れの少ない試料の採取が可能となってきたことから、力学挙動の解明が進められ、いくつかの知見が得られている。今回の改訂では、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の改訂に伴う整合も行っており、ここでは、新たな知見に基づき改訂したサンプルング手法、土質区分、土質試験

方法、設計用地盤定数の設定について示す。

(1) サンプル手法：サンゴ礫混じり土のサンプリングは、バスケット型コアキャッチャー付固定ピストン式サンプラーまたはロータリー式三重管サンプラーを用いることを標準とした。ただし、重要構造物、大規模事業の場合は、高品質サンプリングも併用して行うこととした。これは、高品質サンプリングは試料の乱れが最も小さくなるものの調査費が高価となるためである。図-5.1に示すように高品質サンプリングでは多くのサンゴ礫が確認され、隙間がみられないことからサンプリング時に礫が動いた痕跡も見られず、乱れが少ないことが分かる。なお、従来の標準手法である固定式シンウォールサンプラーは乱れの影響が大きいいため、用いないこととした。

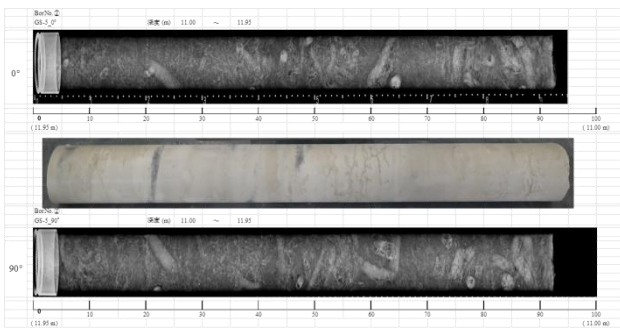


図-5.1 高品質サンプリングによるX線写真<sup>2)</sup>

(2) 土質区分：土質区分は表-5.1のように、粗粒分  $SG$  と粘土分  $C$ 、塑性指数  $I_p$  から区分することとした。これは、那覇港、中城湾港、平良港、石垣港の4港の既往調査データを収集整理した結果、透水性(圧密係数  $C_v$  及び透水係数  $k$ )と粘土分  $C$  及び塑性指数  $I_p$  との相関性が高かった<sup>3)</sup>ことから改訂した。この改訂に伴い、中城湾港、石垣港では従来マニュアル(案)で  $c$  評価であった地層が礫分  $\beta$  と細粒分含有率  $F_c$  を指標にした土質区分の改訂に伴い  $\phi$  評価に区分される場合もある。これは透水性に着目して土質区分( $c$  評価、 $\phi$  評価)の改訂を行ったためである。ここで、中城湾港のように細粒分含有率  $F_c$  が 50% を超えるような圧縮性の高いサンゴ礫混じり土は圧密時間は早いものの圧密沈下は生じる。したがって、細粒分含有率  $F_c \geq 50\%$  のサンゴ礫混じり土は一般的な粘性土地盤と同様に圧密試験、圧密検討を必ず行うこととした。

(3) 土質試験方法：土質試験方法は表-5.2の通りとした。ここで、変則三軸UU試験はサンゴ礫混入による乱れの影響を少なくするための方法であるが、学会基準、国際基準といった基準に則った試験ではない。また、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」との統一も踏まえ、基準に規定されており、ほぼ試験条件等が同じである簡易三軸CU試験に改めるものとした。ただし、試験時には間隙水圧を測定するものとした。また、一軸圧縮試験は、サンゴ礫混じり土では行わないこととした。なお、図-5.2に示すように、中間土では初めに1試料で簡易三軸CU試験を行って試料にあった排水条件を決定することとし

表-5.1 [改訂]サンゴ礫混じり土の土質区分

粗粒分 $SG$	粘土分 $C$	塑性指数 $I_p$	土質 区分	設計 定数
$SG \geq 80$	-	-	砂質土	$\phi$ 評価
$SG < 80$	$C < 30$	-	中間土	$\phi$ 評価
	$C \geq 30$	$I_p < 30$		$c$ (又は $\phi$ ) 評価
		$I_p \geq 30$	粘性土	$c$ 評価

※ $SG$ ：粗粒分(砂分+礫分)， $C$ ：粘土分， $I_p$ ：塑性指数

表-5.2 [改訂]土質区分ごとの三軸試験条件

物理 特性	粗粒分 $SG$ (砂分+礫分)	$SG \geq 80$	$SG < 80$		
	粘土分 $C$	-	$C < 30$	$C \geq 30$	
	塑性指数 $I_p$	-	-	$I_p < 30$	$I_p \geq 30$
土質 区分	土質区分	砂質土	中間土		粘性土
設計上 の土質 区分	設計定数	$\phi$ 評価	$\phi$ 評価	$c$ (又は $\phi$ ) 評価	$c$ 評価
強度 評価	乱れている (標準サンプリ ング)	CD	簡易 CU ↓ CDor CU	簡易 CU ↓ 簡易 CU or CD	簡易 CU
	乱れていない (高品質サンプ リング)	CD	簡易 CU ↓ CDor CU	簡易 CU ↓ 簡易 CU or CD	UU
	N 値	推定式	推定式	-	-

た。これは、サンゴ礫が多く膨張が著しい試料では大きな負圧が発生して強度を過大評価するケースがあるため、透水性に応じた三軸圧縮試験条件を選定できるようにしたものである。

(4) 設計用地盤定数の設定：設計用地盤定数は図-5.2に示すようにN値からの推定値または三軸圧縮試験値から設定することとした。ただし、三軸圧縮試験の内、簡易三軸CU試験値を設計定数として設定する際は、得られた非排水せん断強さの0.75倍を定数として設定する。これはサンゴ礫混じり土への適用性は確認されていないが、便宜上、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の一般の粘性土と同じとした。以上の改訂点を踏まえ、図-5.2にサンゴ礫混じり土の調査・試験・設計の概略フローをまとめた。詳細は改訂マニュアルを参照して頂くこととするが、サンゴ礫混じり土はサンゴ礫混入の影響により乱れの少ない試料の採取が難しいため、サンプリングが行われることは稀であり、N値による設計が主流となっている。一方で、高品質サンプリングを行い、三軸試験を行った結果、N値から推定されるせん断抵抗角  $\phi$  よりも高い値が得られ、動的三軸試験も同様にN値から推定される液状化強度よりも高い値が得られている。このように、結果的にN値による設計よりも経済的な設計ができることがマニュアル内でも示唆されている。このよう

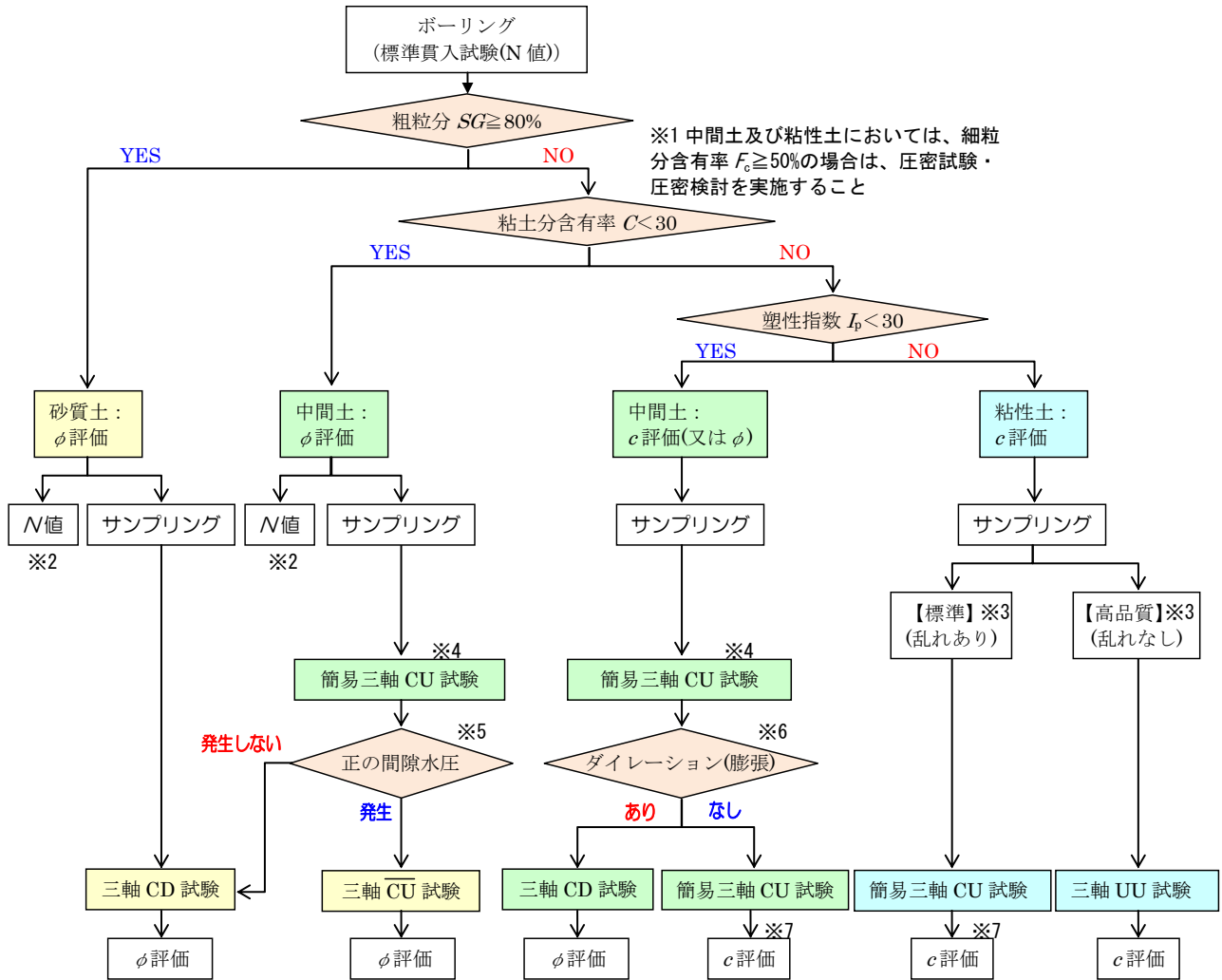


図-5.2 [改訂]サンゴ礫混じり土の調査・試験・設計の概略フロー

なことから重要構造物、大規模事業ではN値のみならず、高品質サンプリングを行い各種試験を行うことで合理的かつ経済的な設計が可能と考える。

## 6. 今後の課題

今後、標準サンプリングのみならず、高品質サンプリングを行って各種試験(物理試験、強度試験、圧密試験、液状化強度試験等)を実施し、データの蓄積を行っていく必要がある。また、サンゴ礫混じり土に対して簡易三軸 CU 試験値を 0.75 倍して設計定数とすることの妥当性確認も早々に行う必要がある。これにより、今後土質区分と土質試験方法の妥当性を検証する必要がある。

## 7. おわりに

最新の研究成果等を基にした今回の改訂が総ての課題に対する解答になっている訳ではなく、今後ともデータ

蓄積及び検討を重ねながら、マニュアルとしての充実を図っていく必要がある。サンゴ礫混じり土調査、土質試験、設計にあたっては、今後もデータの蓄積を行い、新しい知見が得られた場合は、このマニュアルを適宜改訂していくこととする。

本検討にあたっては「サンゴ礫混じり土土質特性検討会」の委員長である琉球大学の原久夫准教授をはじめ、山口大学の中田教授、北海道大学の渡部教授らにご協力頂きました。ここに記して関係各位に謝意を示します。

### 参考文献

- 1) しまたてい No.21 サンゴ礫混じり土の分類法と幾つかの工学的特性 親泊正孝
- 2) 港湾空港技術研究所報告2016.9月 サンゴ礫混じり土の力学特性 - 高品質試料のせん断特性に対する支配パラメータ - 渡部 要一ら
- 3) 港湾技術基準策定に係る設計法等検討業務 H27.6 一般財団法人 沿岸技術研究センター



# 東北以外で初！巨大津波から駿河海岸を守る ～「粘り強い構造の海岸堤防」の整備に向けた取組～

栗山康弘<sup>1</sup>・吉永匡宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中部地方整備局 静岡河川事務所 海岸課（〒420-0068 静岡市葵区田町3-108）

海岸堤防と背後の盛土が一体となり設計津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を行った。堤防の改良と設計津波の水位以下の盛土により東北モデルでの想定と同等の機能が確保できることを明らかにした。さらに、「L2津波が越流する形状の盛土」の場合、越流後でも現況堤防高以上の盛土高が確保される可能性が高いことを確認した。また、「越流しない形状の盛土」の場合、堤防の損壊や盛土機能への影響が生じる可能性は低く、海岸保全施設として改良する範囲が津波にさらされる天端保護工のみの整備で効果を発揮できることを確認した。

キーワード：津波、粘り強い構造の海岸堤防、駿河海岸、模型実験、背後盛土

## 1. はじめに

駿河湾は、図-1のように水深が2,500mに達する日本で一番深い海であり、海底勾配も急なため、波のエネルギーが減勢されず海岸線に襲来し、過去から甚大な被害を被ってきた。また、駿河海岸では、高潮被害防止を目的に、直轄工事施工として昭和39年より整備を進め、高潮の高さを満足する堤防整備は昭和60年頃に完了し、以降、離岸堤等の整備を進めていた折に、東日本大震災が発生した。

当海岸は、南海トラフ巨大地震による津波被害の発生が危惧されており、巨大地震が発生した場合には、10mを超える津波が2～4分で到達し甚大な被害の発生が想定されるなど、危険性が非常に高い地域であることから、東日本大震災被災地以外では直轄海岸で全国初となる、既設堤防を粘り強い構造へ改良するための整備を進めることとした。

また、静岡県では津波到達時間が短いという地域特有の課題<sup>1)</sup>に対し、避難などソフト対策だけでは住民の生命を守ることができないと想定される場合に、設計津波（以下、L1津波という）を超える津波を減衰させるための施設整備（「静岡モデル」と称している）が検討されており、駿河海岸においても図-2のように海岸堤防の背後に、市町・県・国が連携してL1津波の水位以上の盛土（以下、L1以上盛土という）を実施することとしている。一般的に「粘り強い構造の海岸堤防」とは、東日本大震災での甚大な津波被害を受け新たに設定されたもので

あり、L1津波を超える津波が襲来した場合でも、施設の効果が粘り強く発揮できるようにするための構造上の工夫である。そのため、現時点で構造細目を定める技術基準が策定されていない。

本検討では、東日本大震災被災地以外では直轄海岸で全国初となる、駿河海岸での堤防諸元・津波外力等による、海岸堤防と背後の盛土が一体となりL1津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を水理模型実験を用いて行う。

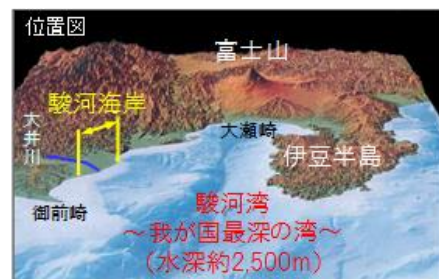


図-1 駿河海岸位置図

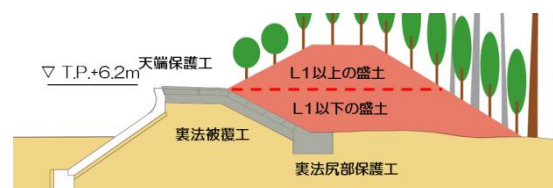


図-2 本検討で対象とする堤防形状のイメージ

## 2. 水理模型実験

### (1) 実験条件

実験模型は、国総研での既往実験結果<sup>2)3)</sup>との比較を行うため、同一の模型縮尺1/25とした。図-3に示す実験水路は、二次元水路 (B=1.0m, H=1.0m, L=20m) を用いることとした。海岸堤防地点における水位上昇速度となるように水路端部から給水し、海岸堤防を越流する津波を再現した。なお、水位ピーク到達後は水位一定とした。

#### a) 越流水深の設定

越流水深の設定は、図-4に示す市町の想定する盛土天端高に対する沿岸領域ごとの津波水位と堤防高の差分値を0.5m間隔で切り上げた数値を実験対象越流水深として、対象とする工区 (工区A: 1.5m, 工区B: 2.0m) ごとに設定した。

#### b) 盛土構成材の土砂条件

盛土と基礎地盤の土砂は、粘性の影響を受けない最小粒径程度となる中央粒径0.3mmの均一砂とし、基礎地盤については十分に転圧・締固めを行った状態 (単位体積質量1.62g/cm<sup>3</sup>)、盛土については所定の形状を形成するための最小限の締固めを行った状態 (単位体積質量1.41g/cm<sup>3</sup>) とした。また、盛土及び基礎地盤の含水比は、図-5に示す盛土を対象した予備実験により、最も崩壊の進行が進む飽和状態 (含水比20%) に設定した。

#### c) 対象堤防条件

堤防は2工区の断面形状を対象にした。基本構造の検討では、比高差の大きい工区Aの断面形状を対象にし、L1以上盛土の効果を踏えた堤防構造の設定では工区A、工区Bの断面形状を対象にした。堤防の被覆材は、表法

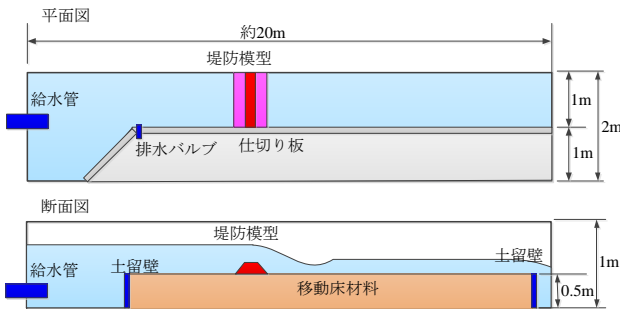


図-3 水路構造のイメージ

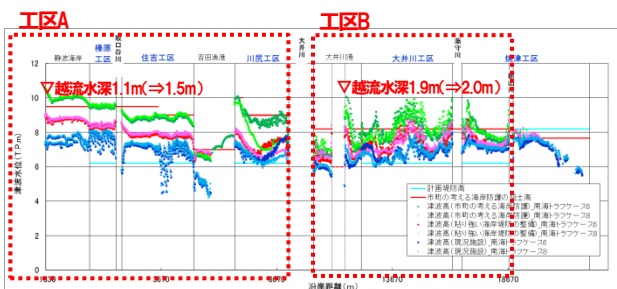


図-4 数値解析による沿岸領域ごとの津波高

面・天端・裏法被覆ブロック・裏法尻部保護工のパーツごとに比重を調整したモルタルにより製作した。

## 3. 海岸堤防の基本構造の検討

国土交通省が整備する海岸堤防と盛土 (L1津波の水位以下の部分) を対象として、仙台湾南部海岸の事業評価で想定されている破堤遅延時間 (越流開始から破堤に至るまでの時間) 3~5分<sup>4)</sup>が確保できる堤防の基本構造を検討した。時間や長さの諸元はFroude則により現地スケールに換算して示す。

### (1) 破堤基準の設定

実験の中で堤防模型の被災が生じた時点を破堤として扱うことが一般的である。しかし、この方法ではブロック模型のかみ合わせや不陸の状況によって、破堤時間にバラツキが生じる。そのため、本検討では堤防背後の洗掘深を閾値とした以下の2つの破堤基準を設定し、幅を持った堤防の破堤遅延時間として評価した。

#### a) 最小基準洗掘深の設定

基礎工の陸側地盤が洗掘されると受動土圧が低下し、基礎工が移動・流出するリスクが高まると想定して、基礎工底高までの洗掘を評価の基準とした。

#### b) 最大基準洗掘深の設定

堤防構造 (天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工) を対象に事前に実施した図-6に示す繰り返し実験の中で、堤防被災の生じた最も小さい洗掘深 (基礎工底高から1.7m) を基準とした。

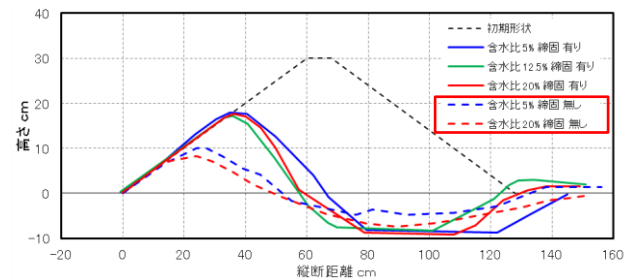


図-5 土砂性状ごとの盛土の変状 (予備実験)

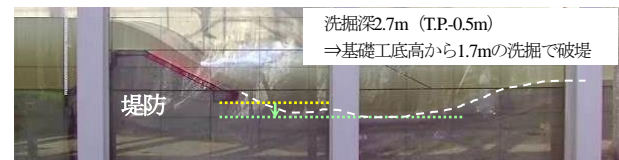


図-6 事前実験での堤防被災時の洗掘状況

(2) 実験ケース

粘り強い堤防のための構造補強の諸元は、図-7に示す東北モデルを基本とし、表-1に示すように、堤防構造の補強箇所が異なる5ケースの実験を行った。

(3) 海岸堤防構造ごとの破堤遅延時間

実験ケースごとの破堤基準に基づく破堤時間と堤防が損壊した時間の比較を表-2、破堤基準に基づく破堤時間における洗掘状況を図-8に示す。実験1-1-4を除き、洗掘深による破堤遅延時間だけを見れば、2.0~4.5分といずれのケースも同程度の破堤時間となっている。堤防が実際に損壊するまでの時間を見ると、本実験1-1-1~2'は破堤基準の洗掘深到達直後となっており、余力のない構造となっている。

この結果から、仙台湾南部海岸と同等の粘り強さが発揮され、余力のある構造である本実験1-1-3「天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工」が優位と判断した。

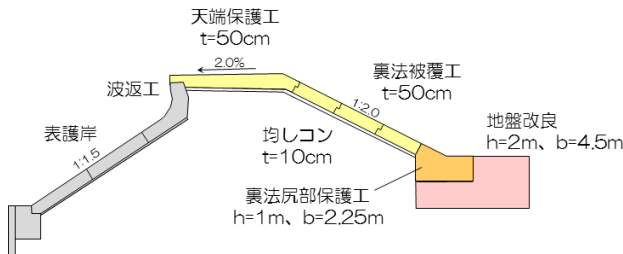


図-7 粘り強い堤防構造の基本諸元

表-1 基本構造検討の実験条件

ケース番号	堤防構造				盛土 (B4.0m)		越流水深 ※1
	天端保護工	裏法被覆工	裏法尻部保護工	地盤改良	高さ	土砂性状	
1-1-1	○				L1以下	基本条件	1.5m相当
1-1-2	○	○			堤防天端高 TP6.2m	D : 0.3mm W : 20% 締固め無	
1-1-2'	○	○	△※2				
1-1-3	○	○	○				
1-1-4	○	○	○	○			

※1:L1以上盛土時の越流水深

※2:図-7に示す裏法尻部保護工と同形状でh=1.0m,b=1.0mとした基礎工に変更

表-2 破堤基準に基づく破堤時間と堤防が損壊した時間の比較

◆: 模型上堤防が実際に破堤する時間

ケース名	堤防構造	破堤までの時間 (min)																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
東北モデル (目標値)	裏法被覆工 裏法尻部保護工 地盤改良工					3~5min														
盛土なし																				
本実験1-1-1	裏法被覆工 裏法尻部保護工 地盤改良工					2.0~2.5min														
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					2.5minで模型上の堤防損壊														
本実験1-1-2	裏法被覆工					2.5~3.5min														
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					4.0minで模型上の堤防損壊														
本実験1-1-2'	裏法被覆工 大型基礎					3.0~4.0min														
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					4.5minで模型上の堤防損壊														
本実験1-1-3	裏法被覆工 裏法尻部保護工					3.0~4.5min														
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工					15.0minで模型上の堤防損壊														
本実験1-1-4	裏法被覆工 裏法尻部保護工 地盤改良工																			10min以上
L1以下盛土 (基本条件)	裏法被覆工																			

4. L1以上盛土の効果を踏まえた構造の設定

前章の実験は、最大越流時間が約9分 (540秒) であるため、粘り強い構造の違いによる破堤遅延時間の変化に着目して検討した。しかし、L1以上盛土を整備した場合、図-9に示すように盛土天端高が高くなることにより最大越流時間が約1.4分 (81秒) と大幅に短くなり、前章の破堤基準まで至らないため、本章の実験では「L1以上盛土による効果」と「不等沈下を想定した場合の影響」の把握の検討を行った。

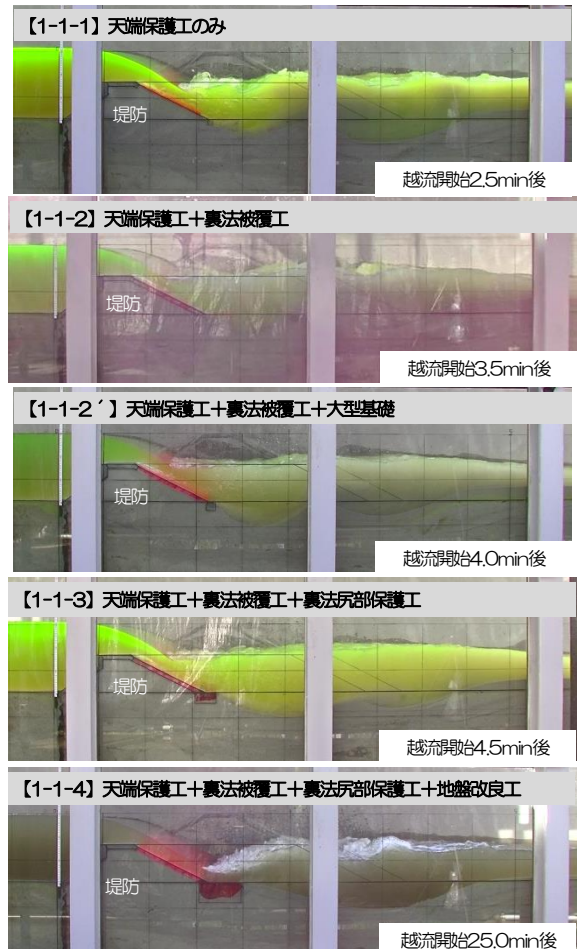


図-8 破堤基準 (b) に基づく破堤までの洗掘時間の比較

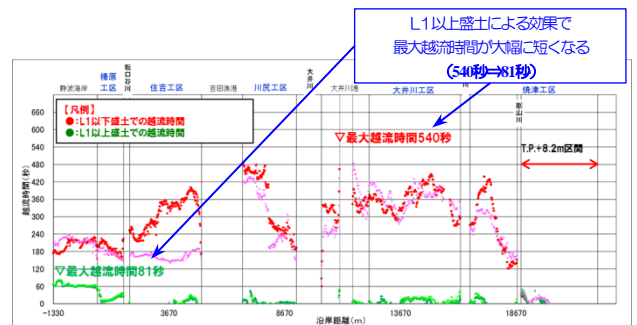


図-9 駿河海岸における最大クラスの津波による越流時間

(1) L1以上盛土による効果

L1以上盛土は駿河海岸の市町により計画されるため、工区ごとに設定されている高さが異なる。大きく分類すると、想定する津波高が盛土高以上となる「越流する盛土」と想定する津波高が盛土高以下となる「越流しない盛土」の種類の盛土となる。それぞれ懸念される現象が異なるため、別々にその効果を実験により把握した。

a) 越流する盛土の堤防防護効果

越流する盛土の実験では、表-3に示す3ケースの堤防構造及び盛土を対象に越流による盛土天端高の経時変化を評価した。ケースごとの盛土天端高の変化量を表-4に、越流開始1.4分後の盛土天端高の比較を図-10に示す。

実験の結果、全ケースで最大越流時間1.4分後に現況堤防高以上の盛土高を確保しており、流水からL1以上盛土が裏法尻部保護工や裏法被覆工を保護する効果が1.4分後まで持続することが確認できた。また、盛土天端幅8mの場合、洗掘に時間を要するため、越流後の盛土高は

表-3 越流する盛土の実験条件

ケース番号	堤防構造	盛土			越流水深	備考
		高さ	天端幅	土砂性状		
1-2-1	基本構造	L1以上	4.0m	基本条件 D: 0.3mm W: 20% 締固め無	1.5m	工区A
1-2-2		TP9.5m	8.0m			
2-1	天端保護工+裏法被覆工+裏法尻保護工	L1以上 TP8.2m	4.0m		2.0m	工区B

表-4 盛土形状ごとの盛土天端高の変化量

ケース	1-2-1	1-2-2	2-1	
工区	榛原・(住吉・川尻地区)		大井川・焼津工区	
盛土天端幅	4m	8m	4m	
越流水深	1.5m		2.0m	
盛土天端高 (T.P.m)	初期	+9.5	+9.5	+8.2
	1.4分後	+8.6	+9.0	+6.7
盛土天端低下量(m)	0.9	0.5	1.5	

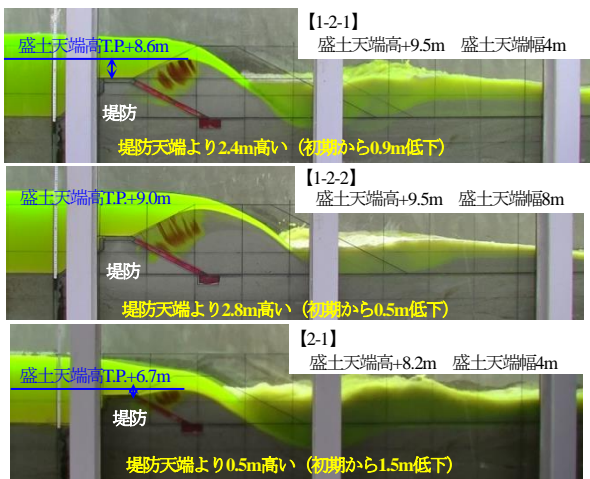


図-10 越流開始1.4分後の盛土天端高の比較

盛土天端幅4mの場合より高くなる傾向になった。

b) 越流しない盛土の効果

越流しない盛土の実験は、一般的に堤防被災の主要因と言われている越流<sup>5)</sup>が生じないため、越流する盛土の実験とは異なり、最高潮位から潮位が低下する「引き波」を想定し、盛土の堤防防護効果を検証した。

堤防模型は表-5、図-11のように設定し、津波波形は平面2次元津波氾濫計算の海岸堤防地点における波形を近似した図-12の波形を対象とした。

実験の結果、図-13に示すようにブロック間から若干の土砂の吸出しが生じたものの堤体の損壊はなく、盛土についても洗掘は確認できなかった。

この結果から、越流しない形状の盛土とした場合、堤防の損壊及び盛土の変形が生じる可能性は低い。そのため、引き波発生時に流水にさらされる「天端保護工」のみの施工が可能と判断した。

表-5 越流しない盛土の実験条件

堤防構造	盛土			越流水深	備考
	高さ	天端幅	土質条件		
基本構造※1	L1以上 T.P.+11.0m	4.0m	基本条件 D <sub>50</sub> : 0.3mm W: 20% 締固め無	0.0m ※2	引き波現象を再現
天端保護工+裏法被覆工+裏法尻保護工	越流なし				

※1: 浸透による影響を把握するため表法ブロックを透過性に変更  
※2: 盛土天端高 (T.P.+11.0m) まで水位を上昇・低下させる

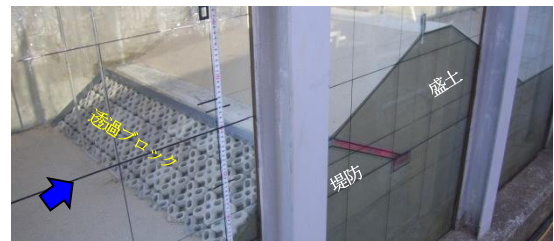


図-11 実験模型の全景

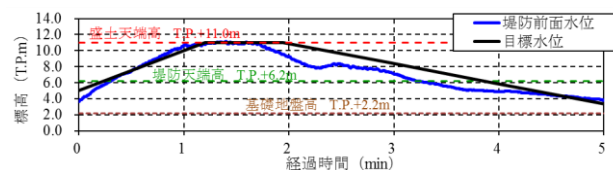


図-12 堤防前面水位の経時変化

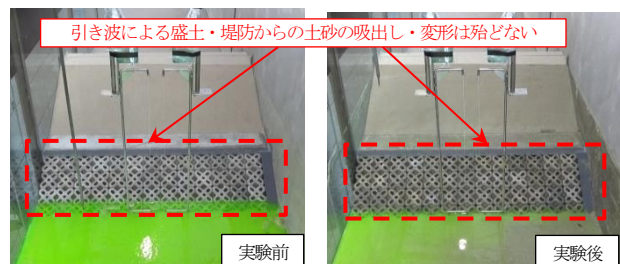


図-13 実験前後の堤防海側状況

(2) 不等沈下を想定した場合の影響

盛土は地震動により不等沈下が生じるなど不確実性が内在していることから、不等沈下が生じたと想定して、越流する流れが1箇所に集中した場合の盛土機能について検証した。不等沈下の幅や沈下量については、明確な設定根拠がなかったため、図-14のように幅10m、沈下量1.0mと仮定した。その他の実験条件は表-6のように設定した。

実験の結果、越流しない盛土は、最大越流時間（約1.4分後）において盛土裏法面の一部が洗掘されたが、天端高は殆ど低下しなかった（図-15上図参照）。一方、越流する盛土は切欠き部の洗掘が先行し、最大越流時間（約1.4分後）には盛土は堤防天端高まで洗掘され、裏法被覆工の一部が露出した（図-15下図参照）。

この結果から、越流しない盛土では不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮した場合も、盛土が流出し堤防が露出する可能性が小さく、越流する盛土では堤防の一部が露出する可能性があるかと判断した。

(3) L1以上盛土の効果を踏まえた粘り強い堤防構造

L1以上盛土の効果を踏まえて、粘り強い堤防構造を盛土形状ごとに図-16のように設定した。

越流しない盛土は、不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮しても、盛土の効果が失われる可能性が低いいため、基本構造のうち天端保護工のみの整備とする方針とした。一方、越流する盛土は、L1以上盛土により最大越流時間後も堤防天端高以上の盛土高を保持することが確認できたが、不等沈下など盛土に内在する不確実性を考慮すると裏法部の露出等の危険性があるため、裏法被覆工及び裏法尻部保護工の改良も行う方針とした。

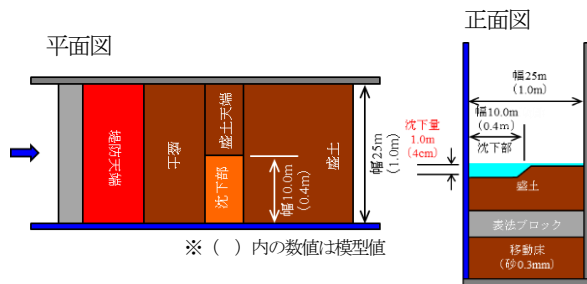


図-14 不等沈下を想定した実験の模型

表-6 不等沈下を想定した場合の実験条件

ケース番号	堤防構造	盛土		越流水深※	備考
		高さ	天端幅		
1-3	基本構造	L1以上 T.P.+11.0m	4.0m	基本条件 D <sub>50</sub> : 0.3mm	越流しない盛土
2-3	天端保護工+裏法被覆工+裏法尻部保護工	L1以上 T.P.+8.2m		W: 20% 締固め無	越流する盛土

※沈下していない盛土天端を基準とした水深

5. 被害軽減額の算出

実験で得られたレベル2津波越流時の盛土天端高の経時変化と堤防を粘り強い構造とすることによる破堤遅延時間を考慮した平面二次元津波浸水シミュレーションを実施し、盛土及び粘り強い構造の海岸堤防を整備した場合に期待できる被害軽減額を算出した。

シミュレーションの結果、表-7に示すように基本構造(1-1-3)において仙台湾南部海岸の構造と同程度の被害軽減効果となり、L1以上盛土を設置することにより、基本構造の約3倍の被害軽減効果を発揮することが明らかになった。

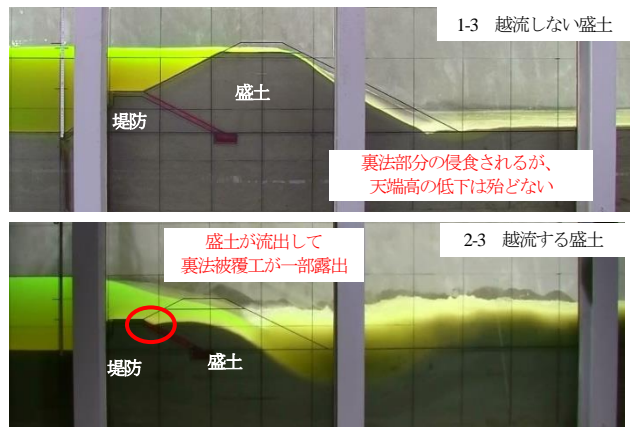


図-15 最大越流時間（越流開始1.4分後）の堤防断面形状

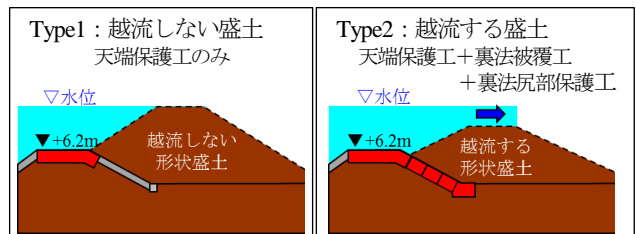


図-16 設定した粘り強い堤防構造

表-7 算定した堤防構造別の被害軽減効果の一覧

検証実験	堤防構造	破堤遅延時間	津波浸水シミュレーションによる浸水被害軽減額
	東北モデルの構造で駿河海岸を整備した場合	3~5分を想定【実験結果】10分以上	被害軽減額: 約1,065億円 現況被害額: 約3,180億円 対策後被害額: 約2,115億円
1-1-3 基本構造	+天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	3.0~4.5分	被害軽減額: 約1,030億円 現況被害額: 約3,180億円 対策後被害額: 約2,150億円
1-1-4	+天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工 +地盤改良	10分以上	被害軽減額: 約1,260億円 現況被害額: 約3,180億円 対策後被害額: 約1,920億円
1-2-1 磯原工区(住吉工区、川尻工区)	[L1以上盛土] +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	-	被害軽減額: 約2,080億円 現況被害額: 約3,180億円 対策後被害額: 約200億円 (L1以上盛土の高さを段階的に変化した条件での解析)
2-1 大井川工区(徳津工区)	[L1以上盛土] +天端保護工 +裏法被覆工 +裏法尻部保護工	-	
3 住吉工区(川尻工区)	[L2盛土] +天端保護工	-	

## 6. おわりに

本検討では、海岸堤防と背後の盛土が一体となりL1津波を超える津波に対して減災効果を発揮するために必要な海岸堤防の粘り強い構造及び整備効果の検討を水理模型実験により得られた主な結果を以下に示す。

駿河海岸の堤防及び津波越流条件では、「天端保護工＋裏法被覆工＋裏法尻部保護工」の組み合わせにおいて破堤遅延時間約3～4.5分を有し、仙台湾の事例と同等の粘り強さを確保することが確認された。この結果を踏まえ、駿河海岸においては地盤改良を実施しない本構造を粘り強い海岸堤防の基本構造とした。

基本構造に加えて市町が実施するL1津波を越える高さの盛土は、想定される最大越流時間（81秒）が作用した場合においても盛土天端高が堤防天端高以上を保持すること、天端幅が広がるに従って堤防天端低下量が減少することを模型実験で明らかにした。

実験での盛土天端高の経時変化を反映した津波浸水シミュレーションにより、陸側の浸水被害を大幅に軽減することを明らかにし、経済的な観点も踏まえて最終的な駿河海岸における粘り強い構造を設定した。

## 参考文献

- 1) 静岡県:津波浸水想定について（解説）,  
<https://www.pref.shizuoka.jp/bousai/4higaisoutei/documents/tsunami-sinsui-soutei-kaisetsu.pdf>,  
pp.12, 2015.
- 2) 加藤史訓, 鳩貝聡, 諏訪義雄: 津波の越流に対するコンクリート平張り海岸堤防の粘り強い構造, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_1021-I\_1025, 2013.
- 3) 加藤史訓, 諏訪義雄, 鳩貝聡, 藤田光一: 津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 1, 31-49, 2014.
- 4) 国土交通省東北地方整備局: 海岸事業再評価仙台湾南部海岸直轄海岸保全施設整備事業,  
<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/h13jhyouka/281129/shiryous2804/161129kaiganbc.pdf>
- 5) 吉川勝秀（編著）: 河川堤防学 新しい河川工学,  
pp.1-278 2008

# 直轄土砂処分場における減容化対策の検討

山中 恵里<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地方整備局 宇部港湾・空港整備事務所 工務課 (〒745-0045 山口県周南市徳山港町8475-17)

徳山下松港直轄土砂処分場（以下、土砂処分場という）は、航路・泊地浚渫で発生した土砂の受入れを行っている。平成30年度までに予定している浚渫土量と土砂処分場の残容量を考慮すると、約50万 $\text{m}^3$ 程度の土砂処分容量不足が見込まれたため、土砂処分場の減容化対策を行う必要があり、検討の結果、ドレーン工法（フロート台船式）を採用することとした。本報告は土砂処分場の延命化を目的とした沈下促進による減容化対策検討についてまとめたものである。

キーワード 土砂処分場、減容化、ドレーン工法、圧密促進

## 1. はじめに

徳山下松港は、1965年4月に特定重要港湾（国際拠点港湾）の指定を受け、主として「周南工業整備特別地域」の中核をなす周南地域（周南市、下松市、光市）の石油コンビナート、化学工業、機械製造業等の活発な企業活動を支える工業流通港として、地域の発展に寄与している。さらに、2011年には石炭の効率的な輸送を図るため国際バルク戦略港湾に選定された。近年においては、国際競争力の強化、物流の効率化並びに船舶の航行安全を確保することを目的に、船舶の大型化に適切に対応するため国際物流ターミナル整備を行っている。しかし整備を行う上で、浚渫工事により発生する浚渫土を受け入れる土砂処分場の確保が課題となっている。本報告は、国際物流ターミナル整備で発生した航路・泊地の浚渫土の受入れ先である、土砂処分場の延命化を目的とした減容化対策検討について報告するものである。

## 2. 土砂処分場の減容化

土砂処分場の地層断面図を図-1に示す。対象地の地盤は、CDL-7m程度の海底面下に、11m程度の沖積粘土層（Ac）が堆積する軟弱地盤である。浚渫土は、海底面CDL-7.0～+6.3mの範囲に投入する計画で、約290万 $\text{m}^3$ の容量が見込まれているが、現時点で予定している浚渫土量が土砂処分場の残容量を約50万 $\text{m}^3$ 上回っている。そのため、沖積粘土層と浚渫土砂（投入済）の圧密促進による土砂処分場の減容化対策を検討することとした。

減容化対策の検討にあたり、まず無対策における沖積

粘土層と浚渫土層の圧密沈下検討を行った。圧密沈下検討に使用した土質定数を表-1に示す。対象とする地層は、旧海底面CDL-7.5～-8.0m程度の直下に、層厚10～12m程度のAc層、層厚2.0～5.0m程度のAg層が堆積する。Ac層は軟弱な粘性土層であり、浚渫土の荷重に伴い圧密沈下の発生が想定される。また、浚渫土は主にAc層を浚渫したものであり、同様に軟弱である。

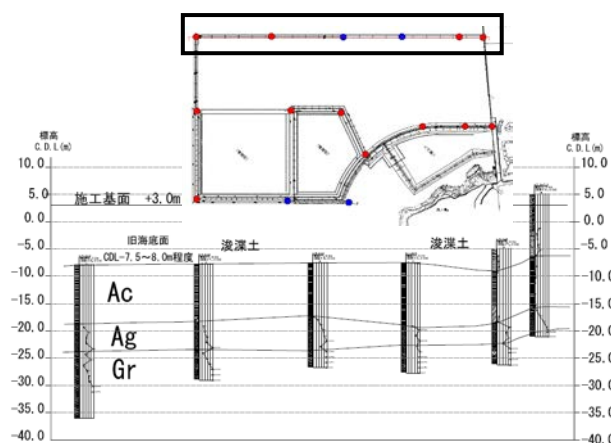


図-1 推定地層断面図

表-1 土質定数

地層名	単位体積重量		土粒子密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	粒度組成			含水比 w (%)	間隙比 <sup>es</sup>	圧縮指数 Cc	圧縮係数 Cv (cm/d)
	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )		砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)				
浚渫土	14.2	4.2	2.605	8.6	40.2	51.2	120	3.035	0.782	100
第1沖積粘土層 (Ac1)	14.1	4.1	2.643	2.1	48.4	49.5	120.7	3.179	1.446	50
第2沖積粘土層 (Ac2)	17.6	7.6	2.688	23.6	43.4	33.0	51.3	1.375	0.552	1,000

圧密沈下検討結果を表-2に示す。この沈下量から想定される増加容量は、計画高CDL+6.8mに達した段階で5万m<sup>3</sup>程度と算定された。想定必要容量を確保するために必要な圧密時間は、圧密度80%の場合100年程度と長期間になることを確認した。これでは、事業の完成目標が達成できないことから減容化対策検討を行う必要が生じた。

まず本施工においては、施工区間を図-2のように2工区（A工区、B工区）に分割し減容化対策を行うこととした。施工範囲は、仮設ヤードや護岸近傍を除いた面積14haとし、減容化対策は浚渫土砂投入後の地盤高として設定したCDL+3.0mに達した範囲から順次施工していくこととした。まず、A工区に浚渫土砂を投入し、地盤高がCDL+3.0mに達したところでA工区の施工を行う。その施工期間中に発生する浚渫土砂についてはB工区へ投入する。B工区の地盤高がCDL+3.0mに達した時には、すでに減容化対策が完了しているA工区に浚渫土砂を投入することができる。このように2工区に分割し施工を行うことで、浚渫工事と減容化対策を同時に行うことができるため効率的となる。

### 3. 減容化対策工法の検討

#### (1) 対策工法の抽出

短期間での減容化が可能であること、载荷盛土を必要としないこと、盛り土が生じないこと等から、減容化対策工法として、浚渫土及び在来粘性土にドレーンを打設し、受入れ浚渫土の重量を用いて沈下を促進させるプラスチックボードドレーン工法（以下、ドレーン工法という）と、排水ホース付気密キャップを取り付けたプラスチックドレーンを使用し、負圧作用によるドレーン内部の減圧作用により圧密促進を図るドレーン工法+真空圧密工法の2案を比較検討した。一次選定の段階においては、土砂処分場内を築堤することで容量増加を図る案も検討したが、施工性、経済性等を考慮した結果、圧密促進を原理とするドレーンを用いた2つの工法に絞り、比較検討を行うこととした。

#### (2) 対策工法の検討結果

減容化対策は、打設間隔（ドレーンピッチ）を密にすると圧密が促進されることから、一般に適用される打設間隔の範囲より1.0m、1.5m、2.0mの3ケースを適用し、目標増加容量に対する打設間隔をドレーン工法及びドレーン工法+真空圧密工法のそれぞれで求めた。工法別の増加容量算定結果を表-3に示す。ドレーン工法の場合には、増加容量は43～52万m<sup>3</sup>程度、ドレーンと真空圧密工法を併用した場合は、増加容量は50～61万m<sup>3</sup>程度と算定された。これより、ドレーン工法は打設間隔1.5m、

ドレーン+真空圧密工法は打設間隔2.0mによって、目標とする増加容量50万m<sup>3</sup>が見込めることを確認した。

#### (3) 減容化対策の概算施工費

ドレーン工法及びドレーン+真空圧密工法の概算工事費を表-4に示す。ドレーン工法（打設間隔1.5m）は1,078百万円、ドレーン+真空圧密工法（打設間隔2.0m）は1,400百万円となるため経済性の観点からドレーン工法（打設間隔1.5m）を採用することとした。

表-2 圧密沈下検討結果

工区	地盤高 CDL(m) (H27.8)	最終 沈下量 (m)	CDL+6.8m時点 の圧密度U <sub>ε</sub> (%)	期間 沈下量 <sup>※1)</sup> (m)	平均 沈下量 (m)	増加 容量 <sup>※2)</sup> (m <sup>3</sup> )
A	-2.63	4.627	9.0	0.24	0.24	50,400
B	-2.01	5.000	9.0	0.25		

※1) H27.8.3～CDL+6.8m時点の沈下量  
※2) 平均沈下量×処分場面積21ha

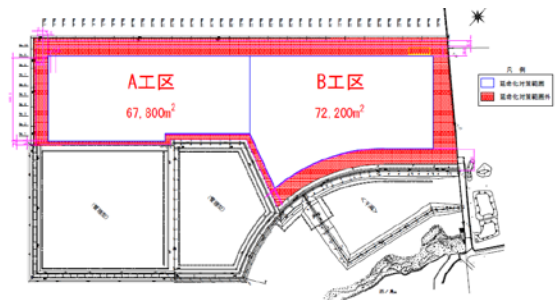


図-2 施工範囲の設定

表-3 工法別の土砂処分場全体での増加容量

工法	打設間隔 (m)	土砂処分場全体での 増加容量 (m <sup>3</sup> )
ドレーン工法	1.0	525,090
	1.5	500,851
	2.0	432,461
ドレーン + 真空圧密 工法	1.0	618,754
	1.5	587,253
	2.0	506,120

表-4 概算工事費

工法	検討 ケース	打設 間隔 (m)	施工面積 (m <sup>2</sup> )	施工本数 (本)	単価 (円/m <sup>2</sup> )	直接工事費 (百万円)
ドレーン工法	浚渫土 + 在来層	1.0	140000	140,000	16,400	2,506
		1.5		82,800	7,700	1,078
		2.0		62,200	4,600	644
ドレーン + 真空圧密 工法	1.0	140,000		39,000	4,298	
	1.5	82,800		17,800	2,492	
	2.0	62,200		10,000	1,400	



## 4. 施工方法の検討

### (1) 仮設工

#### a) 表層改良工

施工を行うにあたり、土砂処分場は外周護岸で囲まれており、また場外からの搬入路が構築されていない。そこで、ドレーン船や組立作業用ラフタークレーン等を処分場内に搬入する際には、写真-1に示すように外周護岸から海上搬入により行う必要がある。ラフタークレーン及びドレーン資材の運搬用走行路、また、ウィンチを設置するに当たっては、作業及び仮設スペースとして護岸背後に12m幅で表層固化改良を実施することとした。幅12mについては、ラフタークレーンのアウトリガー7.6m、敷鉄板1.5m、余裕幅2.5mを考慮して設定した。図-3に表層固化改良範囲の平面図を示す。表層固化処理厚さは、5tラフタークレーンを想定した支持力照査の結果、厚さ2.5mが必要であったが、実施工においては想定している粘着力が確保されているのかを確認するために、事前に電気式コーン貫入試験を行った。その結果、図-3に示す①の範囲において想定した粘着力以上の強度が得られた地点が少なかった。また、全体的にバラツキがあること、改良厚さの変化点ではひび割れや不安定化の誘因になる可能性も考えられること等を踏まえ、①の範囲は改良厚さを2.5mから3.0mに変更した。さらに、表層固化処理盤の幅についても改良厚さ3.0mで荷重の分散範囲が表層固化改良の範囲内で満足するように設定し幅15mと変更した。



写真-1 ドレーン船搬入

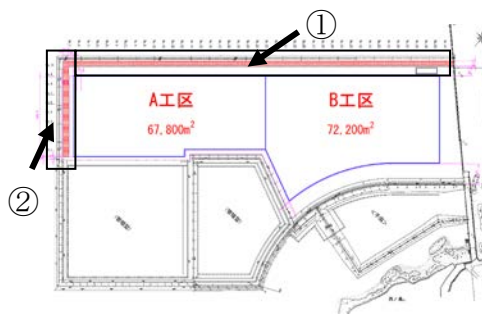


図-3 表層固化改良範囲

よって、実施工において①の範囲では、改良厚さ3.0m幅15m、②の範囲では、改良厚さ2.5m幅12mで施工を行っている。

### (2) 打設工

#### a) ドレーン工法について

ドレーン工法とは、地盤内にドレーンを打設し、間隙水を減少させることによって、沈下を促進させるものである。地盤内に打設する鉛直ドレーンは透水性が高いため、ドレーン内に入った間隙水は間隙水圧により自然に上方へと排水される。写真-2は、実際にドレーンを打設した様子である。

施工区域は、浚渫土砂を投入した非常に軟弱な地盤である。そのため施工機のトラフィカビリティーが悪く、通常のペーパードレーン施工機を使用する場合、施工足場を確保するために表面改良や土木安定シートの敷設、覆土等の前処理が必要となる。また、覆土を行う場合は最低でも0.5～1.0m程度必要となるため、その分浚渫土砂の処分容量が減少する。このような泥上の状態で地盤改良が可能な工法としてPDF(Plastic board Drain by Floating system)工法が開発された。

PDF工法は、PDF船を使用し改良地盤に設置したウィンチにて移動する。ケーシングを台船上で移動させたり、台船ごと連結フロート上で移動させて軟弱地盤にて前処理なしに効率よくプラスチックボードドレーンを打設する。今回の施工においては、写真-3のようにPDF船を同時に3機使用することで、より効率的に施工を行うこととした。



写真-2 ドレーン打設の様子

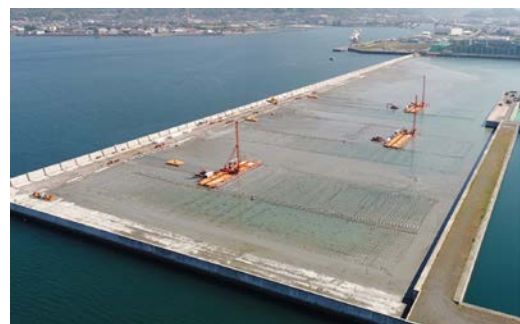


写真-3 施工状況

## b) 表層排水材について

またPDF工法は、表層排水材としてサンドマットの代わりに水平ドレーンを用いることが可能である。水平ドレーンを用いることで、土砂処分場の容量を減らすことなく排水を行うことができる。水平ドレーンの接続は、**図-4**のように行うこととした。

## (3) 排水工

### a) 排水計画

本土砂処分場の場合、水平ドレーンのみだと排水距離が長くなり、排水能力が低下することになる。よって補助排水として**図-5**のように暗渠工及び釜場排水工を施工した。釜場排水は浚渫土砂の投入高さに応じて管を継ぎ足し施工する。

### b) 暗渠工

暗渠工へ流入する水は、水平ドレーンからの圧密排水と排水工周囲の浚渫土からの浸透水が考えられるが、浚渫土の透水係数は極めて小さいことから浚渫土からの浸透水は無視できるとして、水平ドレーンからの圧密排水のみを考慮する。これより、暗渠工に求められる要求性能は、水平ドレーンから暗渠工に流入する圧密排水量に対して、暗渠材の透水量が上回るように計画する必要がある。

暗渠工の選定にあたっての要求性能として、以下の点が挙げられる。

- ①水平ドレーンからの排水が円滑に流入可能であること
- ②圧密による排水を円滑に流すことのできる透水能力をもつこと
- ③目詰まりの発生の危険性が少ないこと
- ④沈下変形に対して破損などの恐れがないこと
- ⑤上載荷重に対して破損などの恐れがないこと

上記①について考慮すると、管の周囲の開孔部が少ない場合、水平ドレーンからの排水が困難である。または、ペーパードレーンの差込み口を設けるなどの特別な加工を要することとなる。これらの点を考慮して、適用する暗渠材は全面開孔型の材料が適当である。また、「道路土工 排水工指針；(社)日本道路協会」によると地下排水工に使用する集水管は内径15~30cmを標準とし、内径10cm以下の管は、中に土砂が詰まりやすいので使用しない方が良くとされている。これより、当現場においても内径15cm以上の管が適当である。上記の点を考慮して全面開孔型で内径15cm以上の暗渠材を使用することとした。

### c) 釜場排水工

釜場は**写真-4**に示すものであり、排水工から流入してきた排水を排水ポンプにより浚渫土上面に排水することで、水平ドレーン設置部の間隙水圧上昇を防ぎ、圧密排水の遅れを防止するものである。釜場排水工は、浚渫土の沈下に対して排水工との連続性を確保し、目詰まりな

どにより集水性が低下しない構造であると共に、上部からポンプを出し入れすることができるよう鉛直方向に開口された構造とする必要がある。また、釜場排水は定期的なメンテナンスを行う必要がある。

釜場の形状は、新規の埋立土の投入時に転倒などの恐れがないよう安定性を確保できるような形状とする。また、地盤は掘削が困難であることから、掘削を必要としない形式であることが必要である。さらに、釜場の設置箇所へは人力で資材を運搬する必要があるため、可能となる形式を採用する必要がある。これらの点を考慮して、釜場形状を決定した。

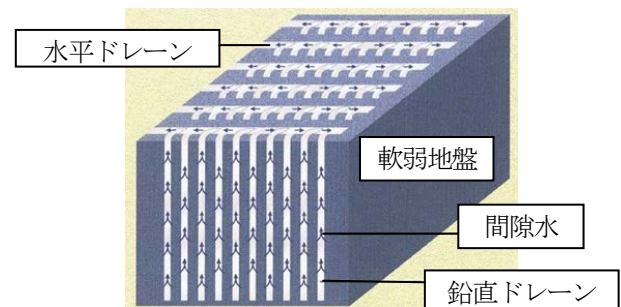


図-4 水平ドレーンの接続状態

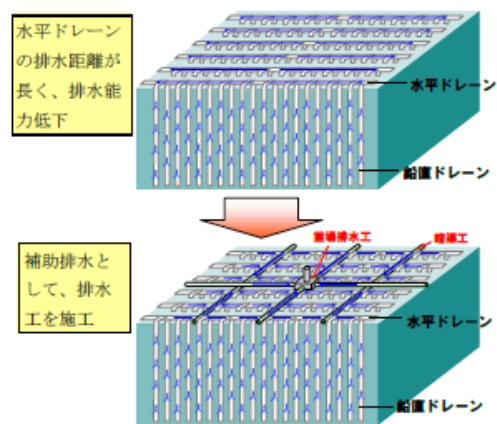


図-5 排水処理の概念図



写真-4 釜場

## 5. 減容化の計測管理

圧密の進行状況、減容化対策の効果の確認を目的として、ドレーン施工後には沈下計測管理を行うこととした。管理する項目は、沈下量と間隙水圧とし、計測方法、目的については表-5に示す。また、現在行っている沈下計測管理の計測機器設置箇所を図-6に示す。沈下計測については、ドレーン打設直後の地盤高（CDL+3.0m）を原点として計測を行うが、打設完了から沈下計設置までの期間は沈下量を計測することができない。そのため、打設完了後の地盤高と沈下計設置後の地盤高を測定し、その差分を補正值として沈下量に計上することとする。

2017年9月末時点でのドレーン打設後の沈下量は約半年間で最大1.5mであり、図-7の比較図に示すように計算沈下量に比べやや小さいことを確認している。しかし、これからさらに多くの浚渫土砂を投入していくことで沈下が促進されると予測しているため、現時点の沈下量は問題ない。今後も沈下傾向や減容化対策効果の確認を行っていくこととしている。

表-5 計測方法及び目的

計測・調査項目	計測機器・方法	目的
沈下	地表面沈下 側面目盛り	・総沈下量測定による減容化容量の検証 ・全体の平均圧密度の調査 ・泥面厚さ、地盤内水位の計測
間隙水圧	間隙水圧	・過剰間隙水圧の消散程度による圧密度の評価 ・深度方向の圧密進行状況の確認

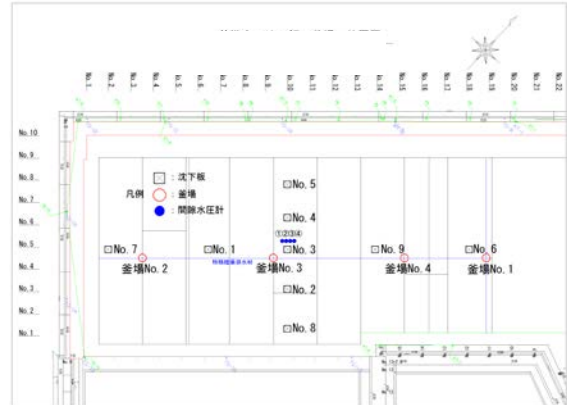


図-6 計器設置箇所

## 6. 現在の状況

現在の状況を図-8に示す。2017年9月末時点で約40%地盤改良の施工が完了しており、施工が完了した箇所においては沈下計測管理を行い、並行して浚渫土砂の受入も行っている。地盤改良の残り約60%については、2018年末までに完了施工予定である。

## 7. おわりに

新たな土砂処分場を確保するためには、多大な費用と時間を要することから減容化対策の検討を実施した。我が国の国際競争力強化にあたっては、航路・泊地浚渫に係る土砂処分場の確保が重要な課題となっている。このため、延命化を目的とする土砂処分場の確保については、経済性等を踏まえ計画段階から検討していく必要があると考える。

謝辞：論文作成において、東洋建設株式会社、りんかい日産建設株式会社及び復建調査設計株式会社より提供して頂いた資料を掲載させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

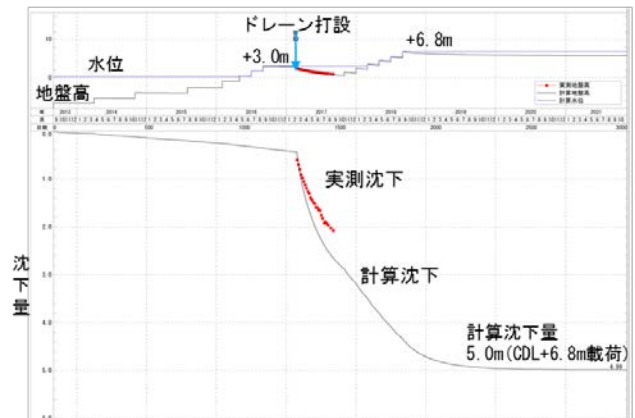


図-7 実測沈下と計算沈下の比較図



図-8 現在の状況

# 耐震強化岸壁へのカルシア改質土 適応のための検討

山崎元貴<sup>1</sup>・伊藤春樹<sup>1</sup>・西岡周平<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 設計班 (〒760-0017 香川県高松市番町 1-6-1)

循環型社会経済システムの構築に当たっては、「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン (2016年12月改訂・統合)」が整備され、利用可能なリサイクル材の用途が拡大し、利用実績が増加しつつある。その中で、軟弱浚渫土に転炉系製鋼スラグ(カルシア)を混合した材料が実用化されてきており、その活用に当たっての体系的な知見を取りまとめた「カルシア改質土利用技術マニュアル」<sup>1)</sup>も整備されている。東予港中央地区岸壁(-7.5m)(耐震)では裏埋材としてカルシア改質土を適用する計画がある。しかし、耐震強化岸壁の裏埋材としての使用は全国で初めての事例であり、レベル2地震動に対する照査を行うに際してのパラメータの設定をどのように設定するかという視点で検討を行ったので報告する。

キーワード カルシア改質土 耐震強化岸壁 浚渫土

## 1. はじめに

循環型社会経済システムの構築に当たって、港湾空港等整備におけるリサイクル材の適用範囲が拡大されている。瀬戸内海では軟弱な浚渫土の処理が問題になっていることを踏まえ、軟弱な浚渫土を有効活用できるリサイクル材(カルシア改質土)を適用することで、土捨場等への負担を減らすことができると考えている。今回は東予港中央地区岸壁(-7.5m)(耐震)の裏埋材として、図-1に示す範囲に使用することを想定して検討を行った。

カルシア改質土は軟弱土固化処理工法の一つで、粘土・シルト分の多い軟弱な浚渫土と転炉系製鋼スラグであるカルシア改質材を混合し、浚渫土の物理的・化学的性状を改質した材料で、強度増進・濁り抑制・海域の底質浄化などの効果を有している。

しかし、カルシア改質土は、使用する浚渫土の海域や場所、深度、浚渫工法によっては強度などの特性に大きな

影響を与えることや、耐震強化岸壁の裏埋材として使用する場合はレベル2地震動についての性能検討や液状化特性の確認をする必要があることから適応可能であるか検討が必要である。このことから、土質試験を行い性能検討や液状化特性の確認を実施した。

## 2. カルシア改質土を耐震強化岸壁の裏埋材として使用するに当たっての課題

耐震強化岸壁のレベル2地震に対する照査は、動的地震応答解析によって求められた水平変位量、沈下量などを照査基準値と比較して行われる。しかしながら、動的地震応答解析に際してカルシア改質土のパラメータをどのように決定するかについては、標準的な手法が存在しない。図-2に、カルシア改質土などの様々な様態の写真を示す。

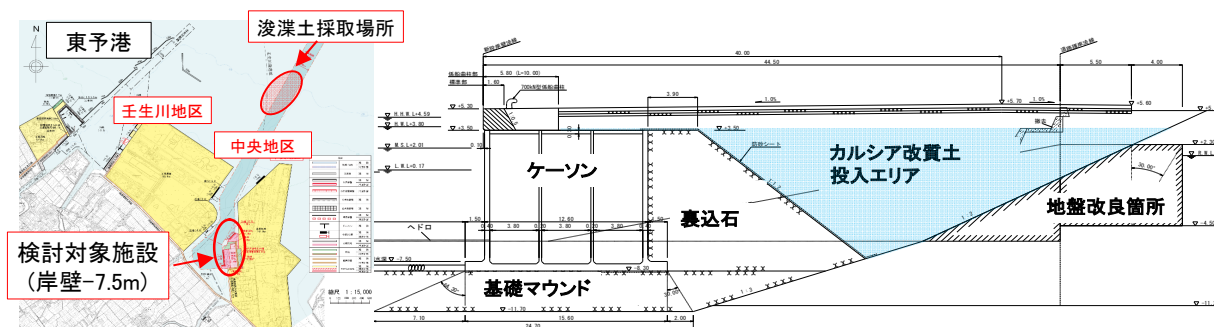


図-1 検討対象施設位置と断面図

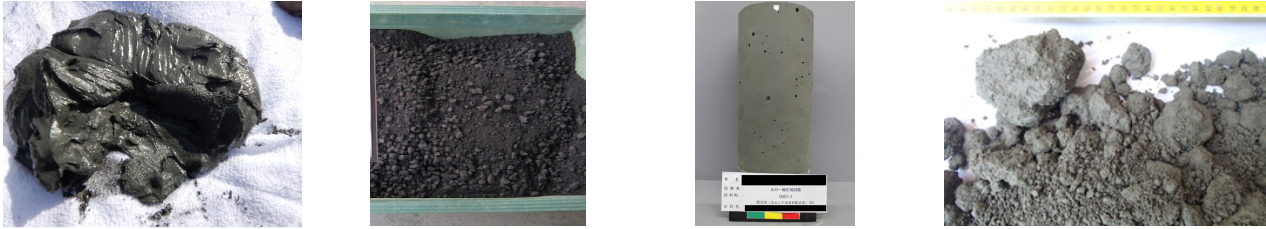


図-2 カルシア改質土の状況

カルシア改質土は図-2(a)の浚渫土に、(b)のカルシア改質材（調整した転炉系製鋼スラグ）を適当量混合攪拌することで作成される。カルシア改質材の吸水作用とカルシア改質材中のカルシウムと浚渫土のシリカやアルミナが水和物を生成し、カルシア改質土は(c)に示すように自立した一軸圧縮試験ができるまでに固化される。固化したカルシア改質土を砕くと(d)に示すように粒状材のような外見を示す。このような特徴から、動的地震応答解析にあたっては、カルシア改質材をどのような材料として取り扱うのが不明であり、その解決が課題であった。

### 3. カルシア改質土の土質試験結果と考察

#### (1)土質試験項目

カルシア改質土は浚渫土との混合物である。このため、浚渫土も含めて、カルシア改質材の土質試験を表-1の項目で実施した。カルシア改質土は、現地の浚渫土に対し、粒度調整したカルシア改質材を容積混合率(10%~40%)で混合したものを作成し、28日養生の後に試験を行った。

#### (2)土質試験結果

##### a)浚渫土

浚渫土は、表-2に示すとおり、細粒分（工学的分類としては粘土）が99%程度と多く、含水比は100%程度であった。

##### b)カルシア改質土

カルシア改質材の混合率が大きくなると、表-3に示すとおり、湿潤密度が大きくなり、含水比が小さくなる。混合後の含水比は29~68%と比較的高い。含水比は露天放置後も40%近くに保たれているようである。

図-3に示すように、カルシア改質材の容積混合率に対して一軸圧縮強は、直線的に増加する傾向にある。一軸圧縮強度と軸差ひずみの両振幅5%が液状化であると想定した場合の液状化強度比  $R_{20}$  の関係もほぼ直線的である。このことから、カルシア改質土の動的な強度も一

軸圧縮強度で代替的に評価できる可能性があるものと考えられる。また、最も容積混合率の小さい10%の供試体の  $R_{20}$  も0.4程度、20%以上では1.0以上であり、実質的には液状化しないものと考えられる。

図-4には、繰返三軸圧縮試験時における繰返し回数と軸ひずみの推移を示す。繰返しに伴って軸ひずみの増加が見られるが、急激なひずみの増加は引張り破壊時

表-1 土質試験一覧

土質試験名称		目的
浚渫土	物理試験	
	粒度試験	カルシア改質土の母材としての浚渫土の物性値を把握
	湿潤密度試験	
	含水比試験	
	液性限界・塑性限界	
	力学試験	
長期圧密後の三軸試験	カルシア改質土の母材としての浚渫土の力学特性の把握	
カルシア改質土	物理試験	
	湿潤密度試験	変動状態(L1地震時)及び偶発状態(L2地震時)の性能検討
	含水比試験	湿練時の含水比と強度特性(圧縮強度)の関係を整理する
	フロー試験	施工性や環境への影響の評価に用いる
	力学試験	
	圧密試験	カルシア改質土の圧密特性の把握
	一軸圧縮試験	カルシア改質土の圧縮強度の把握
	三軸圧縮試験	カルシア改質土の地震前の強度の把握
	繰返し三軸試験(動的変形特性試験)	カルシア改質土の動的変形特性の把握
	繰返し三軸試験(液状化試験)(液状化試験後の排水量計測)	カルシア改質土の液状化特性の把握
繰返し三軸試験(液状化試験)後の三軸圧縮試験	カルシア改質材の地震後の強度の把握	

表-2 浚渫土の物理試験結果

試料名	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	湿潤密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 w(%)	細粒分 F <sub>60</sub> (%)	液性限界 WL(%)	塑性限界 Wp(%)	塑性指数 Ip	工学的分類
浚渫土	1.472	2.783	101.1	99.1	74.5	30.3	44.2	粘土

表-3 カルシア改質土の物理試験結果

	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	単位体積重量 $\gamma$ (t(kN/m <sup>3</sup> ))	含水比 w(%)	フロー値 (mm)
容積混合率 10%	1.629	16.0	68.4	140.9
容積混合率 20%	1.808	17.7	49.8	140.6
容積混合率 30%	1.964	19.3	37.3	139.7
容積混合率 40%	2.128	20.9	29.1	132.9

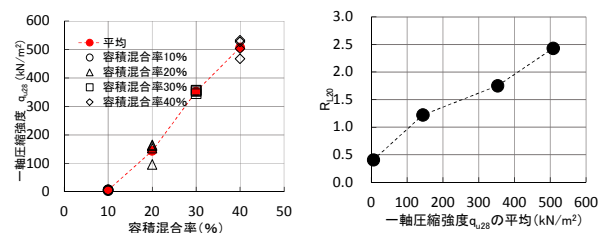


図-3 カルシア改質土の力学試験結果

を除いては見られない。このことから、カルシア改質材が液状化しない材料であることが確認できる。

図-5には、動的変形特性試験によって求めたカルシア改質土のせん断ひずみとせん断弾性係数の低下率の関係を示す。図-5を見ると、カルシア改質土もせん断ひずみの増加に伴ってせん断剛性の低下する材料であり、そのひずみ依存性は標準的な砂質土よりも粘性土に近いことがわかる。さらに粘性土よりもひずみ依存性が低く、粘性土よりも液状化強度が高いと判断できる。

カルシア改質材に対する地震の作用の影響を把握するため、繰返し三軸圧縮試験後にも三軸圧縮試験を実施し、液状化試験前の強度を比較を行った。その結果を図-6に示す。図-6より、カルシア改質材は、地震時の作用によって、強度低下を生じる材料ではないことがわかる。

風間・柳沢<sup>2)</sup>、原・天野ら<sup>3)</sup>は、まさ土や砂礫材料の液状化強度を式1で示される累積損失エネルギーで評価することを試みている。そこで、カルシア改質土の繰返し三軸試験における累積損失エネルギーを文献<sup>3)</sup>で示された砂礫とまさ土の累積損失エネルギーと比較すること

$$W(t) = \oint_f \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(t) \gamma'(t) dt \dots \dots \dots \text{式1}$$

$\tau$ : せん断応力  
 $\gamma$ : せん断ひずみ

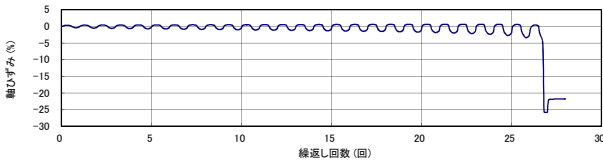


図4 繰返し三軸試験における軸ひずみの一例

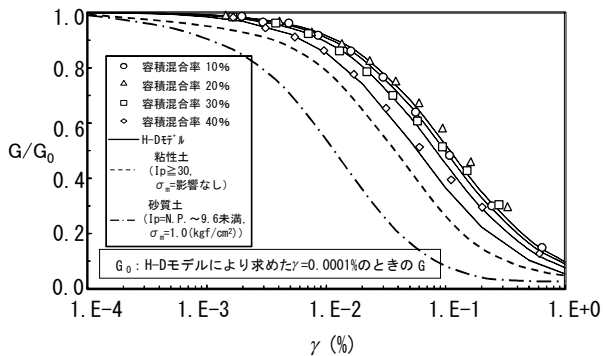


図5 動的変形特性試験の結果<sup>5)</sup>

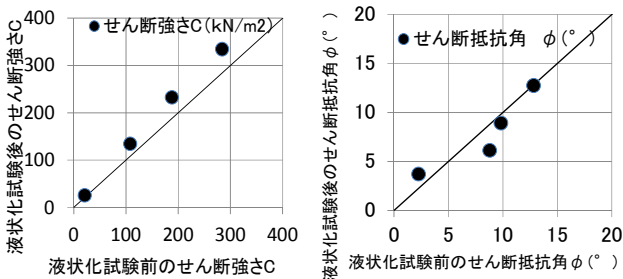


図6 カルシア改質土の地震作用の前後の強度比較

とした。その結果を表-4に示す。文献<sup>4)</sup>を見ると、ポートアイランドまさ土は液状化していなかったと考えられる。東灘まさ土の相対密度は、ポートアイランドまさ土と同程度である。表-4より、カルシア改質土は、砂礫や(液状化しなかった)まさ土よりも累積損失エネルギーが大きい(地震のエネルギーを良く吸収する)材料であることがわかる。

(3)カルシア改質土の特徴

これまでの検討から、東予港の浚渫土を用いたカルシア改質土の特徴について、次のようにまとめることができる。

- ・カルシア改質土は液状化しないと考えられる。
- ・カルシア改質土は、せん断ひずみが大きくなるにしたがってせん断剛性が低下する。その程度は、一般的な粘土と同じ程度である。
- ・しかしながら、地震の作用後の強度は地震の前とほぼ同じである。
- ・カルシア改質土の累積損失エネルギーは、砂礫やまさ土よりも大きいものと考えられる。

4.レベル2地震動に対する性能照査

これまでの検討で、概ねカルシア改質土の特徴が把握できたことから、カルシア改質土を裏埋材に用いた場合の性能照査を行った。その結果を以下に示す。

(1)動的変形解析におけるカルシア改質土のパラメータの決定方針

- ・カルシア改質土は液状化しないものとし、液状化パラメータは設定しない。
- ・カルシア改質土のせん断弾性係数の低下のモデル化は粘性土と同様とし、動的変形特性試験より得られるひずみ依存性を考慮する。
- ・カルシア改質土は軟弱土固化処理工法の一つであり、一般的に軟弱土固化処理工法はせん断弾性係数の拘束圧依存性を考慮しないことから、せん断弾性係数の拘束圧依存性は考慮しない。

(2)入力地震

入力地震は、当該施設に最も影響のある中央構造線断層帯地震とした。

表4 カルシア改質土の累積損失エネルギー

	カルシア改質土				大小関係	砂礫材料	まさ土 (ポートアイランド、東灘)	
	容積混合率10% qu=5.75kN/m <sup>2</sup>	容積混合率20% qu=143.7kN/m <sup>2</sup>	容積混合率30% qu=352.5kN/m <sup>2</sup>	容積混合率40% qu=507.5kN/m <sup>2</sup>				
正規化累積損失エネルギー	DA=2%到達時	0.00~0.24	0.05~0.12	0.01~0.78	0.02~0.74	>	0.01~0.02	0.02~0.03
	DA=5%到達時	0.03~0.61	0.29~0.39	0.06~2.49	0.13~2.27	>	0.03	0.04~0.07
	DA=10%到達時	0.09~0.88	0.39~0.58	0.19~2.95	0.20~2.59	>	0.06~0.09	0.10~0.15

### (3)解析ケース

#### ・路床に対する性能検討

解析に先立ち、路床として必要な最小限必要なカルシア改質土の必要強度を検討し、港湾基準から路床設計支持力係数 50N/cm<sup>3</sup> 以上を満足できる路床としての必要強度 70kN/m<sup>2</sup> 以上と設定した。

#### ・解析ケース

参考文献<sup>1)</sup>によるとカルシア改質土は長期的に強度特性が増加する。そのため、設定する強度は路床として最低限必要な 70kN/m<sup>2</sup> を基本とし、70, 100, 150, 300, 500 kN/m<sup>2</sup> に設定し地震応答解析を実施した。

### (4)照査基準

照査基準となる岸壁の水平変位量は、港湾基準・同解説<sup>4)</sup>及び兵庫県南部地震における被災後の岸壁の利用実績から 100cm、とした。鉛直変位は緊急物資の荷役作業性確保のため 50cm と設定した。傾斜角を港湾基準<sup>4)</sup>より 3° を残留変形量の限界値と設定した。

### (5)解析結果

解析結果を、表-5 に示す。解析メッシュは設計時のものと同じとしている。解析の結果、カルシア改質土の要求性能より定めた性能規定値は残留変形量、傾斜角ともに既設計と同程度であることが分かった。

なお、地震後に生じる背後の段差については、速やかに碎石等により修復し、使用性を確保するようにする。

### (6)カルシア改質土の設計基準強度の設定

参考文献<sup>3)</sup>によると、カルシア改質土の強度はバラツキが大きいということを考慮し、カルシア改質土の設計基準強度は路床としての必要強度より余裕を持たせ、設計基準強度  $q_u=100\text{kN/m}^2$  と設定した。

以上のことを踏まえ、室内試験結果より 100kN/m<sup>2</sup> を満たすことができる最小容積混合率は 30% となった。

表-5 偶発状態(レベル2地震時)の安定性照査結果

裏埋材	一軸 圧縮強度 (kN/m <sup>2</sup> )	残留変形量		傾斜角 (°)	段差量 躯体背後 (cm)
		水平 (cm)	鉛直 (cm)		
雑石 (既設計)	-	-59	-13	0.5	FLIP:55
カルシア 改質土	70	-63	-13	0.6	FLIP:22 排水沈下:17
	100	-61	-12	0.6	FLIP:25 排水沈下:13
	150	-63	-12	0.6	FLIP:29 排水沈下:6
	200	-64	-12	0.6	FLIP:31 排水沈下:6
	300	-64	-12	0.6	FLIP:31 排水沈下:5
	500	-64	-12	0.6	FLIP:28 排水沈下:5
性能規定値		<100cm	<50cm	<3°	-

### 6.まとめ

東予港における浚渫土、カルシア改質土の土質試験を実施し、カルシア改質土の物性を把握した。

その結果を踏まえ、東予港の耐震強化岸壁を対象として、裏埋材にカルシア改質土を使用した場合の耐震性能について検討した。その結果、設計時の裏込材として想定していた雑石に替えて、カルシア改質材を使用した場合であっても、レベル2地震に対する性能規定値を満足することがわかった。これにより、東予港の耐震強化岸壁においては、裏込材としてカルシア改質土を使用することができると判断された。さらに、東予港での使用に先立ち、カルシア改質材の最小容積混合率と設計基準強度を設定した。

ただし、他港への適用に当たっては、以下の点に留意する必要があると考えられる。

- ・浚渫土の物性とカルシア改質土の強度特性等の関係について把握することが望ましい。
- ・今回の検討では安全側として、軟弱土固化処理工法と同様に、せん断弾性係数の拘束圧依存性は無いものとした。今後適応するに当たっては、カルシア改質土のせん断弾性係数の拘束圧依存性を把握することが望ましい。
- ・施工方法の検討に必要となる浚渫土の調整含水比とカルシア改質土の流動性や一軸圧縮強度との関係を把握することが望ましい。
- ・参考文献<sup>1)</sup>にはカルシア改質土の長期(91日)強度については、28日強度の1.5~1.8倍程度になると示されており、強度を把握することが望ましい。
- ・以上の留意点を踏まえ、今後、浚渫土の物性の違い等によるカルシア改質土の強度特性、動的変形特性や液状化特性の変化を把握するためのモニタリングを実施することが望ましい。

### 参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル, 2017年2月
- 2) 風間基樹, 柳澤栄司, 増田昌昭：定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, 土と基礎, 第46巻, 第4号, pp. 21-24, 1998
- 3) 原忠, 天野真輔, 国生剛治, 大石富彦：三軸試験による砂礫材料の損失エネルギーの検討, 土木学会第55回年次学術講演会, III-A86, 2000
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007年7月
- 5) 沿岸技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 1997年8月