

自動運転サービスの社会実装に向けた取組 — 中山間地域における実証実験と技術基準の検討 —

中田 諒¹・藤村 亮太¹・中川 敏正¹・関谷 浩孝¹

¹国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 高度道路交通システム研究室
(〒305-0804 つくば市旭1番地)

自動運転サービスの社会実装に向けた取組として、全国各地で実施された実証実験において自動走行の阻害要因を特定し、対策の提案と効果検証を行った。具体的には、総走行距離2,200kmに及ぶ走行データ（運行記録やドライブレコーダ等）を分析し、自動走行の阻害要因を特定した：路上駐車（17%）、GPS等の不具合（12%）、対向車とのすれ違い（7%）等。さらに、これらの対策として路面標示の設置等を提案した。対策後2週間の走行データを対策前のもものと比較した結果、路上駐車の影響による走行阻害の発生を6割以上低減できる可能性を示した。本稿は、実証実験を通じて示唆された重点項目である道路側から自動運転を支援する施設（自動運行補助施設及び専用空間）に関する取組についても示す。

キーワード 自動運転、実証実験、阻害要因特定、自動運行補助施設、専用空間

1. はじめに

国土交通省では、超高齢化等が進む中山間地域において、自動運転車の活用による地域活性化を目的とした「道の駅等を拠点とする自動運転サービスの実証実験」を全国各地で実施してきた。政府は、2030年までにレベル4自動運転（特定条件下での完全自動運転）による当該サービスの社会実装を、全国100箇所に展開することを目標としており、実現のためには自動走行の阻害要因を把握し、それらを解消する方策が必要である。

国土技術政策総合研究所（国総研）では、実証実験で得られた総走行距離2,200kmに及ぶ走行データ（運行記録やドライブレコーダ等）を分析し、自動走行の阻害要因を特定した。さらに、対策の提案と効果検証を行った。本稿は、これらの内容を示すとともに、実証実験を通じて示唆された重点項目である道路から自動運転を支援する施設（自動運行補助施設及び専用空間）に関する取組についても示す。

2. 実証実験の概要と実験用車両

図-1に自動運転サービスのイメージを示す。道の駅等を拠点とし、集落や各施設間の移動を自動運転車により提供するものである。実証実験は、内閣府のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム²⁾）の枠組みにおいて

実施され、道路局が全体とりまとめやビジネスモデルの検討、地方整備局が実証実験の運営、国総研が技術的検証を担当した。図-2に実証実験の様子を示す。

実証実験は、2017年度に開始され、2020年10月現在で、図-3に示す18箇所の地域で行われている。



図-1 自動運転サービスのイメージ



図-2 実証実験の様子



図-3 実験箇所

実験用車両は、既存又は研究開発済みの技術でレベル4自動運転が可能な車両を公募し、4タイプの車両を選定した。表-1に一覧を示す。自動走行技術は2タイプあり、車両に搭載されたGPSやIMU（慣性計測装置）、LiDAR（レーザー光によるセンサ）等で得られる自車位置情報と、事前に組み込まれた高精度3次元地図等の情報を組み合わせて規定ルートを走行する「車両自立型」と、舗

表-1 実験用車両

車両外観 提供者	1. 車体タイプ（定員） 2. 自動走行技術タイプ 3. 走行速度
 (株) ディー・エヌ・エー	1. バス（6～10名） 2. 車両自立型 点群データを事前取得し、GPS、IMUにより自車位置を特定しながら規定ルートを走行 3. 約10km/h
 ヤマハ発動機（株）	1. 乗用車（6名） 2. 路車連携型 舗装に設置された電磁誘導線の磁力を検知しながら規定ルートを走行 3. 約12km/h
 先進モビリティ（株）	1. バス（20名） 2. 路車連携型 GPSと磁気マーカ及びジャイロセンサにより自車位置を特定しながら規定ルートを走行 3. 約35km/h
 アイサンテクノロジー（株）	1. 乗用車（4名） 2. 車両自立型 事前に組み込んだ高精度3次元地図を用い、LiDARで周囲を検知しながら規定ルートを走行 3. 約40km/h

装に設置された電磁誘導線や磁気マーカ等の道標となる施設を車両に搭載された読み取りセンサが検知しながら規定ルートを走行する「路車連携型」がある。

3. 自動走行の阻害要因の特定とその対策

(1) 分析方法

実証実験で取得した走行データを分析し、自動走行の阻害要因を特定した。走行データは、図-4に示すように、乗車した調査員が自動走行の阻害されたタイミングでボタンを押すことで正確な発生時刻を記録する「イベントロガー」と、不具合が発生した時間や場所、状況等を事前に定めたフォーマットに記入する「運行記録」、車両の加減速等の挙動情報が記録された「ログデータ」に加えて「ドライブレコーダ映像」を用いた。実証実験で得られた総走行距離2,200kmに及ぶ走行データ（自動走行の阻害1,046回）を分析した。

(2) 分析結果

図-5及び表-2に自動走行の阻害要因の分析結果を示す。要因別では、路上駐車が17%、GPS等の自車位置特定不具合が12%、対向車が7%と特に多いことが分かった。場所別では、単路が56%と半数以上を占めており、交差点と道の駅（駐車場等）がそれぞれ5%、残り34%は、車両のチューニング等に起因するものであった。

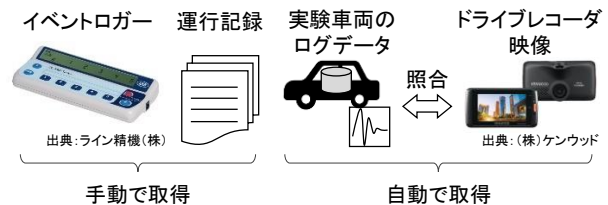
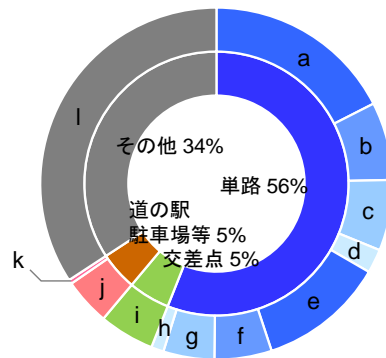


図-4 要因特定に用いる走行データ

(N=1,046 / 内側：場所 / 外側：要因)



(a~lは表-2と対応)

図-5 自動走行の阻害要因の内訳

表-2 自動走行の阻害要因の内訳

(a~lは図-5, 6と対応)

	場所	要因	比率 (回)
a	単路	路上駐車	17% (183)
b	単路	対向車	7% (75)
c	単路	自転車・歩行者	7% (68)
d	単路	後続車による追い越し	2% (23)
e	単路	GPS等の自転車位置特定不具合	12% (121)
f	単路	除雪した路側の雪	5% (55)
g	単路	雑草等	5% (49)
h	単路	雪, 霧, 雨によるセンサ不良	1% (12)
i	交差点	右折待ち, 道譲り	5% (53)
j	道の駅	駐車車両	4% (45)
k	道の駅	歩行者	0.4% (4)
l	その他	チューニング等	34% (358)



(a~fは表-2と対応)

図-6 要因のイメージの一例

(3) 対策の提案

自動走行の阻害要因の分析結果を踏まえ、対策を提案した(表-3)。対策は大きく2タイプあり、ひとつは、自動運転車が付近を走行することを周知するもの(周知型)、もうひとつは、自動運転車と一般車両や歩行者等が交錯しないような分離措置を講ずるもの(分離型)である。それぞれにおいて、複数提案した。

表-3 提案した対策の例

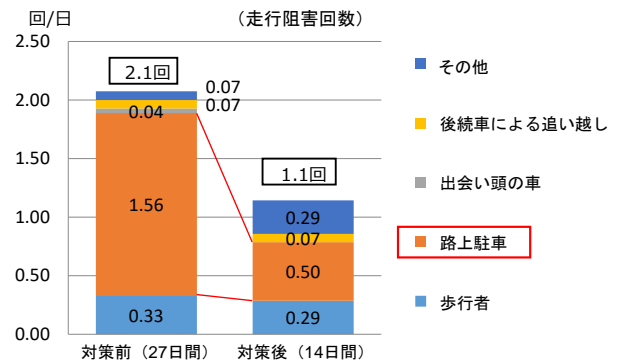


図-7 路面標示による対策効果

(4) 対策の効果検証

図-7に、一例として路上駐車の防止を狙った路面標示による対策効果を示す。対策後2週間の走行データに対策前のもっと比較した結果、1日あたり1.56回発生していた路上駐車による走行阻害の発生が、0.07回に減少したことを確認した(67%減)。その他の対策も、各地の実証実験において順次、効果検証を行っている。

4. 実証実験を踏まえた取組

(1) 今後の重点項目

実証実験の中間とりまとめ³⁾において、前述した技術的検証も踏まえた、今後の重点項目が示された。本章では、その内、道路側から自動運転を支援する施設(自動運行補助施設及び専用空間)に関する現在の取組を示す。



図-8 自動運行補助施設の例

(2) 自動運行補助施設

図-8に示す電磁誘導線や磁気マーカ等、自動運転車の自車位置特定を補助する自動運行補助施設の有効性が実証実験で確認された。2020年5月には道路法の一部改正により、これらの施設は道路附属物に位置付けられ、技術基準の作成が進められている。

これまで、このような施設が舗装に連続的に設置される事例は少なく、国総研では、実証実験で施設が設置された箇所周辺の舗装状態をモニタリングすること等により、舗装に与える影響の調査研究を行っている。

(3) 専用空間

他交通との交錯防止措置として、第3章4節で示した路面標示による優先空間の明示の他に、自動走行のための専用空間を設けることの有効性も実証実験で確認された。

国総研では、専用空間に必要な幅員を検証するために、電磁誘導線を辿るタイプの自動運転車が自動走行時にどれだけ電磁誘導線からズレるか調査した。曲線半径や速度、乗員等を変化させた様々な条件の下でズレの計測実験を行った(図-9)。表-4に実験結果の一例を示す。曲線半径が小さく(R=5m)、乗員が多い(6人)場合にズレは大きくなる傾向があり、牽引車と荷物を加えた場合に最大(8.1cm)となることが分かった。

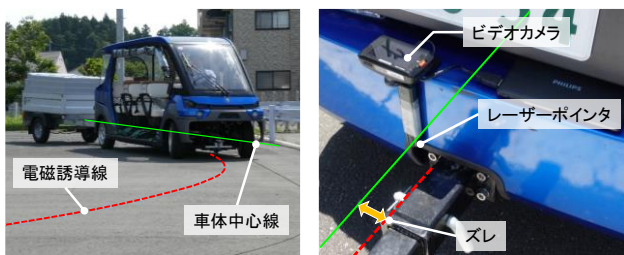


図-9 ズレの計測実験

表-4 ズレの計測実験結果(精査中)

曲線半径	速度	乗員	牽引車	荷物	電磁誘導線からのズレ(cm)※	
					最大値	99%値
∞ 直線	12km/h	6人	有	有	3.3	3.4
		片側3人	有	有	2.8	3.1
R=50m	12km/h	6人	有	有	4.4	4.8
		片側3人	有	有	4.4	4.3
R=10m	6km/h	6人	有	有	4.4	4.4
		片側3人	有	有	4.0	4.1
R=5m	6km/h	6人	有	有	7.4	<u>8.1</u>
		片側3人	有	有	5.4	5.5
		6人	有	無	7.2	7.7
		片側3人	有	無	5.4	5.5
		6人	無	無	7.2	7.6
		片側3人	無	無	5.7	5.9

※車体中心線の電磁誘導線からのズレ(曲線においては外側方向)
最大値は観測値、99%値は累積分布から推定した値

5. おわりに

自動運転サービスの社会実装に向けた取組として、自動走行の阻害要因を特定し、対策の提案と効果検証を行った。得られた主な成果は次のとおりである。

- 要因は、路上駐車が17%、GPS等の自車位置特定不具合が12%、対向車が7%と特に多く、半数以上(56%)は単路で発生している。
- 対策として路面標示を設置したところ、路上駐車による走行阻害の発生を6割以上低減できる可能性が示された。

また、実証実験を通じて自動運行補助施設や専用空間等が今後の重点項目として示唆されたことから、前者については、技術基準の整備や舗装に与える影響のモニタリングを、後者については、専用空間に係る幅員の検証等を進めている。

今後も技術支援により自動運転サービスの社会実装を後押しして参りたい。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス，2020年10月14日閲覧
<https://www.mlit.go.jp/road/TIS/j-html/automated-driving-FOT/index.html>
- 2) 内閣府政策統括官：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)概要，2020年10月14日閲覧
<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sipgaiyou.pdf>
- 3) 国土交通省道路局：自動運転に対応した道路空間に関する検討会中間とりまとめ，2019年11月26日
https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_space/pdf/chu-matome.pdf

UAV写真測量における最適撮影手法の検討

片山 理佐子¹・関口 泰徳²・笹川 啓¹

¹国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

²国土地理院 企画部 測量指導課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

近年、無人航空機で撮影した空中写真を用いた3次元形状復元技術による写真測量が注目を集めている。本研究では、3次元点群生成における高精度化・効率化を目指し、一定程度の面積に対して、鉛直直下写真に斜め方向写真を加えることで、必要精度を満たしつつ標定点数を最小化する最適な無人航空機の撮影手法を検討した。その結果、約0.04km²のサイトにおいて撮影した鉛直直下写真224枚に斜め方向写真を2~4枚追加することで3次元モデルの位置精度向上と標定点数低減が可能であることがわかった。

キーワード 写真測量, 三次元形状復元技術, 高精度化, 標定点数低減

1.はじめに

近年、無人航空機(以下「UAV」という。)で撮影した空中写真を用いた3次元形状復元技術による写真測量が新たな手法として注目を集めており、2020年3月には測量法第34条に基づく作業規程の準則(以下「作業規程の準則」という。)が改正され、「UAV写真点群測量」として新たに規定された。一方、学术界等から、3次元形状復元技術による写真測量において、標準的に撮影される鉛直写真に加えて斜め写真を標定に用いると3次元モデルの位置精度が改善されるという報告がされているが、追加する斜め写真の枚数や角度、標定点数と位置精度の関係に対する知見は多くない。

そこで本研究では、3次元点群生成における高精度化・効率化を目指し、作業規程の準則に規定される「位置精度0.05m以内」を確保したうえで、一定程度の面積に対する標定点数及び追加斜め写真の枚数を最小化する最適な無人航空機の撮影手法を検討したので報告する。

2.空中写真を用いた3次元形状復元技術とは

UAVを用いた写真測量に用いられる3次元形状復元技術は、SfM(Structure from Motion)とMVS(Multi-View Stereo)である。SfMは、重複して撮影された複数の写真から自動抽出した多数の特徴点を用いて、カメラの内部標定要素及び外部標定要素、特徴点の3次元座標を一度に求める手法である¹⁾。MVSは、SfMによって求められた3次元情報を基に、複数の写真間でのマッチングを行うことで高密度の3次元点群やメッシュモデルを作成する手法である²⁾。本稿では、この2つの技術を併せてSfM

と総称することとする。

3.検証方法

(1) 鉛直直下及び斜め方向の写真撮影

本検証は、人工被覆や橋梁等を含む「加藤学園御殿場キャンパス」(静岡県御殿場市)にて、約200×200mのサイトを対象フィールドとした(図-1)。

写真撮影は、GNSS単独測位のDJI社製「Phantom 4 Pro」を用いて、鉛直直下撮影(高度37m(地上画素寸法1cm)、オーバーラップ80%、サイドラップ60%)及び斜め方向撮影を行った。斜め方向撮影は、高度を37m(以下「低高度」という。)と74m(以下「高高度」という。)、カメラの傾きを15・30・45°の計6つのパターンにおいて、図-2のように、撮影範囲の中心から撮影範囲の外側に向けて8方向撮影した。なお、斜め方向撮影におけるカメラの傾きは、鉛直直下を0°、地面に平行な方向を90°として表現している。

次に、標定点及び検証点を設置した。これは、作業規程の準則に従い、GNSS測量(スタティック法)により2級相当の基準点を3点設置(図-1)し、トータルステーションを用いて基準点から標定点及び検証点の座標を計測した。



図-1 撮影範囲，標定点及び検証点配置図

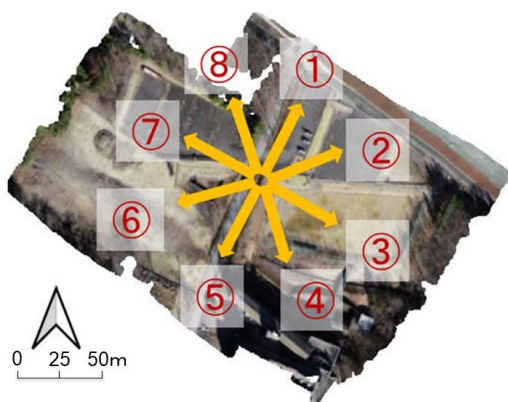


図-2 斜め方向撮影のカメラ向き

(2) SfMソフトウェアによる解析

最適な斜め方向撮影の手法を明らかにするため、鉛直直下撮影と斜め方向撮影の組合せや標定点の配置数を変更し、SfMソフトウェアを用いて解析を行い、解析結果（3次元モデル）の検証点位置と現地測量から得られた座標値との較差を比較・検証した。また、作業規程の準則に規定される精度を確保しつつどこまで標定点配置の省力化及び追加斜め写真の枚数削減が可能かを検討した。標定点の配置図を図-3に示す。なお、使用したSfMソフトウェアはAgisoft社製「Metashape Professional (ver.1.6.1)」である。また、使用した鉛直直下写真枚数は224枚である。

検証内容は以下のとおりである。

検証1) 斜め方向写真の有無による精度検証

検証2) 鉛直直下写真に追加する斜め方向写真を低減した場合の精度検証

検証3) 使用する標定点を低減した場合の精度検証

検証1では、鉛直直下写真に撮影範囲の中心位置から撮影した斜め方向写真を加えることの有効性を確かめるため、鉛直直下写真のみの場合と鉛直直下写真に斜め方向写真を追加した場合についてSfM解析と検証を行った。

追加する斜め方向写真は全方位8枚とし、高高度・低高度それぞれにおいてカメラの傾きを $15 \cdot 30 \cdot 45^\circ$ とした6パターンを検証した。解析に使用した標定点は、作業規程の準則に基づき9点とした。

検証2については、作業規定の準則に規定される「位置精度0.05m以内」を満たしたうえで、SfM解析の際に使用する斜め方向写真をどこまで最小化できるかを検証するため、鉛直直下写真に斜め方向写真を $8 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1$ 枚を加えてSfM解析を行った。斜め方向写真の組合せを表-1に示す。表-1に記載した丸数字は、図-2における斜め方向撮影のカメラ向きである。なお、解析に使用した標定点は、検証1と同様に9点とした。

検証3については、SfM解析に使用する標定点をどれだけ低減できるかを検証した。使用した標定点数は3~9点とし、標定点の組合せを表-2に示す。表-2のローマ数字は、図-3に示す標定点番号である。なお、標定点数を減らしてもなるべく撮影範囲の四方四隅と中心を押さえるように、標定点の組合せを選んだ。また、使用した斜め方向写真は、 $8 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2$ 枚とし、その組合せは表-1のとおり検証2と同様に行った。

表-1 検証2) 検証3)における斜め方向写真の組合せ
※高高度・低高度の写真それぞれにこの組合せを実施

使用斜め方向写真枚数	斜め方向撮影のカメラ向き
8枚	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧
4枚	①, ③, ⑤, ⑦
3枚	①, ④, ⑥
2枚	①, ⑤
1枚	⑤

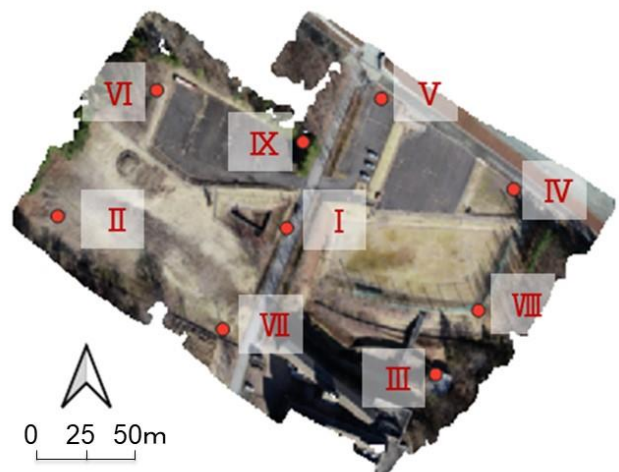


図-3 検証で用いた標定点位置

表-2 検証3における標定点の組合せ

標定点数	使用した標定点
9点 作業規程の準則 どおり	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX
8点	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII
7点	I, II, III, IV, V, VI, VII
6点	I, II, III, IV, V, VI
5点	I, II, III, IV, V
4点	I, II, III, IV
3点	I, II, III

4.精度検証結果

(1) 検証1) 斜め方向写真の有無による精度検証

検証結果を表-3に示す。なお、値は較差の最大値（絶対値）とし、単位はmである。鉛直直下写真のみを用いてSfM解析を行った場合、水平方向の較差は作業規程の準則に規定される位置精度0.05m以内を満たすものの、高さ方向は制限を超えた検証点があった。一方、斜め方向写真を8枚加えてSfM解析を行った場合、いずれの条件においても水平方向はもちろん高さ方向の較差も位置精度を満たす結果となった。これは、SfM解析の際に多方向からの視点が追加されたことが位置精度向上の要因と考えられる¹⁾²⁾³⁾。このことから、SfM解析の際に撮影範囲において中央から撮影した斜め方向写真を加えて標定すると、3次元モデルの位置精度が向上することが確認された。

表-3 検証1の結果

		dx	dy	dz
鉛直直下写真のみ		0.0186	0.0294	0.6725
高高度	15°	0.0134	0.0124	0.0338
	30°	0.0120	0.0090	0.0338
	45°	0.0170	0.0125	0.0335
低高度	15°	0.0174	0.0119	0.0479
	30°	0.0149	0.0148	0.0363
	45°	0.0161	0.0122	0.0356

(2) 検証2) 鉛直直下写真に追加する斜め方向写真を低減した場合の精度検証

高さ方向の較差の最大値（絶対値）と追加斜め方向写真枚数についての検証結果を図-4及び図-5に示す。なお、高さ方向の較差が位置精度0.05m以内を満たすとき、水平方向の較差も位置精度を満たしていた。

高高度で撮影した斜め方向写真については、追加した斜め方向写真のカメラの傾きが15°の場合に4枚、30°の場合に2枚、45°の場合に1枚まで追加斜め方向写真枚数を低減すると、作業規程の準則に規定される位置精度

0.05mを超えた（図-4）。このように、高高度で撮影した場合は、カメラの傾きがつくほど追加する斜め方向写真を減らしても位置精度を満たすことがわかった。これは、カメラの傾きがつくほど斜め方向写真の撮影面積が広がることから、他の鉛直直下写真や斜め方向写真との結びつきが増え、SfM解析の際に推定される内部標定要素等によって位置精度向上に貢献したのではないかと推測する。

一方、低高度で撮影した場合においては、追加した斜め方向写真のカメラの傾きが15°の場合に4枚、30°の場合に1枚、45°の場合に3枚まで追加斜め方向写真枚数を低減すると位置精度を超える結果となり（図-5）、30°で撮影した場合が追加斜め方向写真枚数を最も低減できた。低高度で撮影した写真は高高度で撮影した写真と比べて撮影面積が1/4程度狭まる（図-6）。そのため、低高度の場合にはかえってカメラの傾きをつけすぎると、他の写真と重なる面積が減ることで、作業規定の準則に規定の位置精度に収まるほどの位置精度向上はみられなかったのではないかと考える。

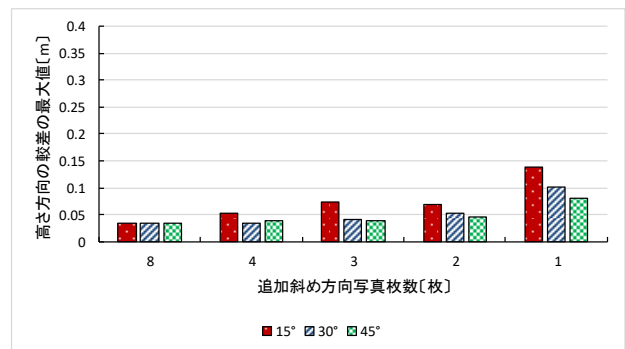


図-4 検証2において高高度で撮影した斜め方向写真を使用した結果

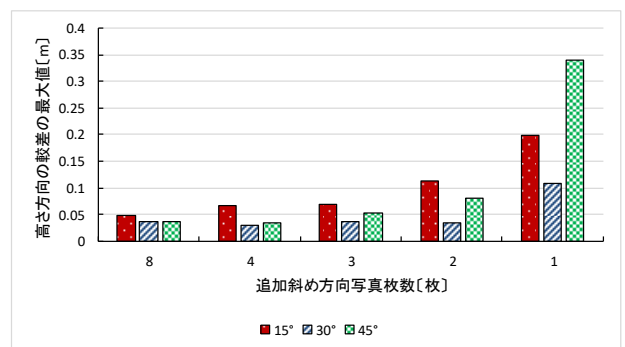


図-5 検証2において低高度で撮影した斜め方向写真を使用した結果

表-4 検証3の結果

下線斜体太字：位置精度0.05m以内に収まらない較差

追加斜め 方向写真 枚数			標定点数						
			9点	8点	7点	6点	5点	4点	3点
8枚	高高度	15°	0.0338	0.0337	0.0425	0.0421	0.0436	<u>0.0541</u>	<u>0.3179</u>
		30°	0.0338	0.0336	0.0425	0.0419	<u>0.0579</u>	<u>0.0675</u>	<u>0.3847</u>
		45°	0.0335	0.0330	0.0404	0.0411	<u>0.0578</u>	<u>0.0665</u>	<u>0.5190</u>
	低高度	15°	0.0479	0.0480	<u>0.0676</u>	<u>0.0830</u>	<u>0.0962</u>	<u>0.0649</u>	<u>1.6335</u>
		30°	0.0363	0.0359	0.0395	0.0407	<u>0.0652</u>	<u>0.0742</u>	<u>0.8827</u>
		45°	0.0356	0.0353	0.0402	0.0423	<u>0.0683</u>	<u>0.0541</u>	<u>1.0024</u>
4枚	高高度	15°	<u>0.0524</u>	<u>0.0533</u>	<u>0.0665</u>	<u>0.0758</u>	<u>0.0758</u>	<u>0.0879</u>	<u>0.5833</u>
		30°	0.0340	0.0342	0.0383	0.0478	<u>0.0549</u>	<u>0.0576</u>	<u>1.1334</u>
		45°	0.0394	0.0397	0.0442	<u>0.0518</u>	<u>0.0577</u>	<u>0.0689</u>	<u>1.8790</u>
	低高度	15°	<u>0.0664</u>	<u>0.0674</u>	<u>0.0676</u>	<u>0.0830</u>	<u>0.0962</u>	<u>0.1121</u>	<u>2.3228</u>
		30°	0.0293	0.0295	0.0313	0.0444	0.0488	0.0496	<u>1.6268</u>
		45°	0.0347	0.0347	0.0392	0.0470	<u>0.0521</u>	<u>0.0666</u>	<u>2.4220</u>
3枚	高高度	15°	<u>0.0735</u>	<u>0.0744</u>	<u>0.0766</u>	<u>0.0901</u>	<u>0.1035</u>	<u>0.1201</u>	<u>0.9883</u>
		30°	0.0415	0.0421	0.0430	<u>0.0557</u>	<u>0.0666</u>	<u>0.0784</u>	<u>1.3682</u>
		45°	0.0382	0.0384	0.0395	<u>0.0532</u>	<u>0.0565</u>	<u>0.0685</u>	<u>2.0336</u>
	低高度	15°	<u>0.0682</u>	<u>0.0689</u>	<u>0.0687</u>	<u>0.0799</u>	<u>0.0932</u>	<u>0.1147</u>	<u>2.9150</u>
		30°	0.0358	0.0359	0.0375	0.0463	<u>0.0652</u>	<u>0.0851</u>	<u>2.0756</u>
		45°	<u>0.0536</u>	<u>0.0538</u>	<u>0.0545</u>	<u>0.0628</u>	<u>0.0650</u>	<u>0.0851</u>	<u>1.0038</u>
2枚	高高度	15°	<u>0.0682</u>	<u>0.0695</u>	<u>0.0689</u>	<u>0.0697</u>	<u>0.0943</u>	<u>0.1097</u>	<u>1.0074</u>
		30°	<u>0.0520</u>	<u>0.0531</u>	<u>0.0543</u>	<u>0.0697</u>	<u>0.0847</u>	<u>0.1044</u>	<u>2.0835</u>
		45°	0.0467	0.0475	0.0482	<u>0.0566</u>	<u>0.0690</u>	<u>0.0878</u>	<u>2.2879</u>
	低高度	15°	<u>0.1132</u>	<u>0.1165</u>	<u>0.1182</u>	<u>0.1318</u>	<u>0.1706</u>	<u>0.2186</u>	<u>1.1706</u>
		30°	0.0341	0.0345	0.0387	0.0493	<u>0.0607</u>	<u>0.0701</u>	<u>3.3850</u>
		45°	<u>0.0807</u>	<u>0.0831</u>	<u>0.0836</u>	<u>0.0988</u>	<u>0.1371</u>	<u>0.1642</u>	<u>1.1279</u>



図-6 高高度及び低高度で撮影した斜め方向写真
(左) 高高度・45° (右) 低高度・45°

(3) 検証3) 使用する標定点を低減した場合の精度検証

検証結果を表-4に示す。表-4の値は高さ方向の較差の最大値（絶対値）とし、単位はmである。また、高さ方向が位置精度0.05mを満たすとき、水平方向の較差も全て位置精度を満たす結果であったので、表-4は高さ方向の較差の最大値（絶対値）のみを記載している。

本検証地においては、斜め方向写真を高高度で撮影した時、標定点数を最も低減できたのは追加斜め写真枚数を8枚・カメラの傾きを15°とした場合であり、その場合標定点数は5点であった。低高度の場合は、追加斜め方向写真枚数を4枚・カメラの傾きを30°とした場合に、標定点数を4点まで低減できた。

追加斜め方向写真枚数と標定点数の条件が同じであれば、斜め方向写真を高高度で撮影した場合にはカメラの傾きを45°に、低高度で撮影した場合にはカメラの傾きを30°とすると最も精度の高くなる傾向がみられる。また、斜め方向撮影の高度とカメラの傾きの条件を同じとした場合については、追加斜め方向写真を低減させると必要となる標定点数が増えることがわかった。さらに、カメラの傾きを15°として撮影した斜め方向写真を追加してSfM解析する場合は、高高度・低高度にかかわらず、追加する斜め方向写真枚数及び標定点数がある程度必要となることが確認された。

このように、鉛直直下写真に斜め方向写真を追加して標定することによる標定点数低減の可能性が示唆された。

5.まとめ

UAVによる空中写真を用いた3次元点群作成における高精度化・効率化を目的として以下の3つの検証を行い、最適な撮影手法を検討した。

検証1) SfM解析の際に、撮影範囲の中央から撮影した斜め方向写真を加えて標定すると、3次元モデルの位置精度が向上することが確認された。

検証2) 標定点を作業規程の準則どおり9点配置した場合、高高度・45°及び低高度・30°で撮影した斜め方向写真を用いると、追加斜め方向写真枚数を2枚まで低減できた。

検証3) 最も標定点数を低減できたのは、低高度・追加斜め方向写真枚数を4枚・カメラの傾きを30°とした場合であり、標定点数は4点であった。

これらのことからSfM解析の際の斜め方向写真追加の有効性が確認され、本検証地の条件においては、約0.04m²の面積で撮影した鉛直直下写真224枚に斜め方向写真を2~4枚追加することで3次元モデルの位置精度向上と標定点数を低減しつつ、精度を満たす可能性のあることがわかった。

今後異なる検証地においても同様の検証を行い、UAVによる空中写真を用いた3次元点群作成において高

精度化・効率化を達成するような最適な撮影手法を引き続き検討していきたい。

なお、本検証は、2019年度に国土地理院が実施した「測量の生産性を向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の一環として行った検討の中で撮影・測量した写真及び標定点・検証点座標を使用した。

参考文献

- 1) 菅井秀翔, 宮地邦英, 中村孝之, 南秀和, 橋克巳 (2017) : UAV を活用した写真測量の精度検証, 国土地理院時報, 129, 147-157.
- 2) 神野有生, 宮崎真弘, 八田滉平, 福元和馬 (2018) : UAV 写真測量のSfMにおける斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション, 日本写真測量学会平成 30 年度秋季学術講演会発表論文集, 32-33.
- 3) 澤可那子, 阪上雅之, 菅井秀翔, 野口真弓, 笹川啓 (2019) : SfM/MVS 技術を用いた写真測量における斜め撮影追加の有効性検証, 日本写真測量学会令和元年度年次学術講演会発表論文集, 14.

港湾施設被害度診断システムの開発と運用

六ツ名 俊輝¹・村上 裕幸¹

¹名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課（〒457-0083 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57-3）

港湾施設被害度診断システムは、大規模地震発生後の海上輸送の早期再開に向けた岸壁の現地調査や応急復旧活動の効率化を目的として、名古屋港湾空港技術調査事務所が開発し、2016年度より運用を開始している。本論文は、システムの開発経緯及び岸壁の診断方法について詳述するとともに、システムによる想定地震発生時の岸壁被害規模の推定、システムの稼働実績及び訓練の状況などの運用状況について具体的に述べる。

キーワード：港湾施設被害度診断システム、供用可否診断、FLIP

1. はじめに

中部地方では、今後30年以内の発生確率が極めて高い南海トラフを震源とする巨大地震による甚大な被害が懸念されている。このような大規模な地震被害が発生した場合、港湾は、被災地への緊急物資や燃料の受け入れ拠点、或いは救援・復興活動の拠点として、速やかに役割を果たすことが求められる。

中部の港湾では、港湾背後圏の経済活動をいち早く回復させることを目的とする港湾BCP（港湾機能継続計画）が策定されており、経済活動再開までに一定の港湾機能を確実に復旧させるため、各港湾において計画のブラッシュアップが続けられている。

この経済活動の復旧に向けた海上輸送早期再開を実現するためには、陸上輸送と海上輸送の結節点となる岸壁の供用可否の確認が最も重要な課題の一つになる。

しかし、東北地方太平洋沖地震では、港湾施設にも多大な被害が生じたが、地震発生から津波警報等が解除されるまでの約51時間²⁾にわたり、被害状況についての現地調査や応急復旧に着手することができなかった。

この教訓を踏まえ、名古屋港湾空港技術調査事務所（以下「名古屋技調」と表記）では、大規模地震発生後の岸壁の現地調査や応急復旧活動の効率化を目的として、津波警報等により現地調査ができない時間帯に、観測地震動データにより岸壁の供用可否を診断し、現地調査着手の優先順位決定をサポートする「港湾施設被害度診断システム」（以下「診断システム」と表記）を開発し、2016年度より運用を開始している。

診断システムは、巨大地震後の陸上輸送路と海上輸送

路をどこで結ぶのかを災害対策本部等が検討する際に、岸壁の早期供用の観点から現地調査の優先順位の決定をサポートすることにより、緊急物資輸送や海上輸送の早期再開に貢献できる。

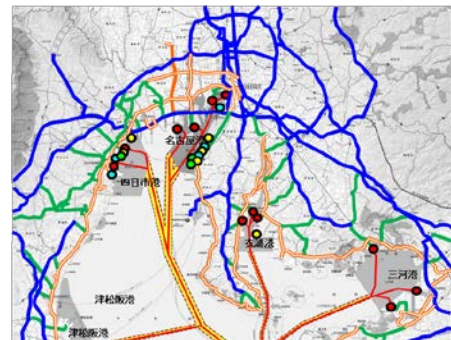


図-1 道路啓開と航路啓開のオペレーション計画

2. 診断システムの開発

(1) 開発の経緯

地震災害後において、港湾施設の被災状況を把握するための現地調査を行う場合、次のような3つの大きな課題がある。一つ目は、先に述べたように、津波警報等が発令されている間は調査に着手できないことである。二つ目は、鋼材を主部材とする岸壁（栈橋式岸壁や矢板式岸壁）は、水中部や地中部の被災程度の把握が非常に困難であることである。三つ目は、名古屋港のような大規模港湾における現地調査には、多くの時間とマンパワーが必要になることである。

名古屋技調では、2010年頃より上記の課題解決に向けた検討を進めていた。また、長年にわたり二次元地震応

答解析（以下、「FLIP解析」と表記）を用いた設計を実施しており、このFLIP解析モデルを地震被災後の係留施設の供用可否判定に活用する手法を模索していた。

このような背景から、本システムの開発が計画され、蓄積された成果を踏まえて2014年から本格的に本システムの開発に着手し、2016年より本運用を開始している。

(2) 診断システムの概要

診断システムは、国立研究開発法人港湾空港技術研究所が運用している「地震動情報即時伝達システム」から地震情報メールを受け取ると、自動的に観測された地震動データ（＝地震加速度の時刻歴波形）を用いた診断を開始する。まず、登録されている岸壁毎に、地震動データについて工学的基盤への引き戻しと岸壁法線直角方向への方位変換の補正を行い、補正後の地震動データを用いて岸壁各部の変位や各部材の応力状態（以下、「判定指標」と表記）（表-2）を算出すると共に、判定指標を基に地震後の岸壁の供用可否を判断し、診断結果を関係部署に配信するものである。

表-2 岸壁の構造形式別の判定指標

岸壁の構造形式		判定指標
重力式	残留水平変位	
	残留傾斜角	
矢板式	残留水平変位	
	矢板の最大曲率比(地震中の応力状態) 矢板の設計耐力比(船舶接岸時の接岸力、牽引力作用時)	
橋樑式	橋樑部	残留水平変位
		橋樑杭の最大曲率比(地震中の応力状態)
		橋樑杭の設計耐力比(船舶接岸時の接岸力、牽引力作用時)
	土留部	重力式または矢板式と同じ

最大曲率比：(発生曲率/限界曲率)の最大値
設計耐力比：(発生応力/設計耐力)の最大値

診断システムは、2種類の診断を行う仕様になっている。

最初に、地震動データから算出した「速度のPSI値」

（港湾構造物の地震時変形量との相関が高い指標）と評価線（図-2）を用いて短時間で判定指標を算出し、岸壁の供用可否を診断する「簡易診断」が実行される。

評価線は、事前に大小様々な確率地震動や各種レベル2地震動によるFLIP解析を実施して、速度のPSI値と様々な判定指標との関係を整理したものである。地震動データから速度のPSI値が算出されれば、評価線から判定指標の値を即時に求めることができる。

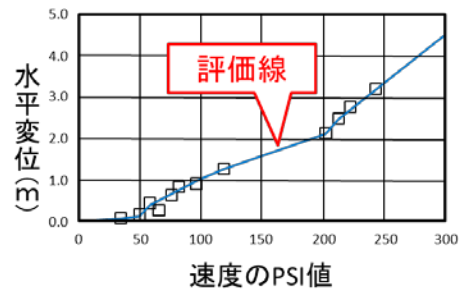


図-2 評価線の例（残留水平変位の場合）

次に、地震動データによるFLIP解析により判定指標を数時間かけて精緻に算出し、岸壁の供用可否を診断する「詳細診断」が実行される。なお、現在の診断システムに組み込まれているFLIPプログラムは、平成30年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準」（以下「H30基準」と表記）に対応した最新バージョンに更新されている。

簡易診断及び詳細診断の各診断結果は、それぞれ各港湾の診断マップ（図-3）にまとめられ、関係部署にその都度メール配信される。なお、これらの処理は人の手を介すことなく、地震動データの入力から診断結果のメール配信まで全て自動で行われる。

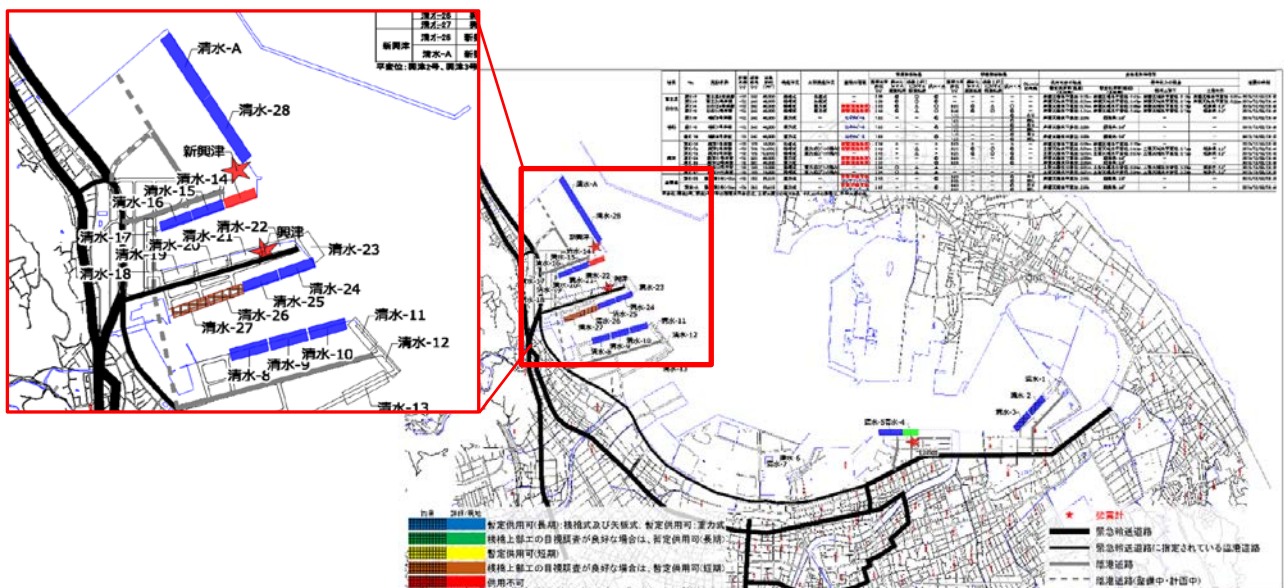


図-3 診断マップの例（清水港）

(3) 岸壁の供用可否判定方法

診断システムの供用可否判定方法は、簡易診断及び詳細診断とも同じである。ただし、岸壁の構造形式毎に判定指標が異なるため、判定方法も異なる。本稿では、矢板式岸壁の判定方法を例として述べる。

図-4のフローに示すように、まず鋼矢板や鋼管矢板或いは控え杭といった鋼部材の最大曲率比により残存耐力の有無の判定を行う。次に残存水平変位による判定、さらに船舶接岸時及び牽引時の鋼部材の設計耐力比による判定を経て「暫定供用可（長期）」、「暫定供用可（短期）」及び「暫定供用不可」の3種類の判定を行う。

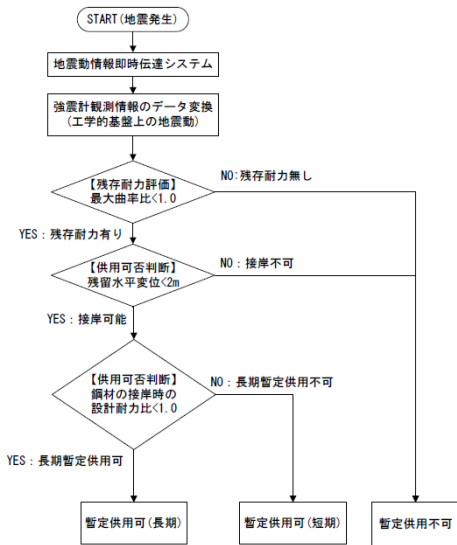


図-4 矢板式の判定フロー

なお、「暫定供用可（短期）」とは、緊急物資輸送などの短期の使用を想定し、岸壁構造上に問題があるものの水平変位の進展がないことを確認しながらであれば供用可能だと判断し、設定したものである。

このように、岸壁の構造形式毎に適切な判定指標と判定フローによる判定方法を採用することにより、単純な暫定供用の可否だけではなく、緊急物資輸送に必要な短期的供用の可否判断も可能にしている。

(4) 診断システム開発の効果

本システムを活用することで以下の効果がある。

- ① 目視調査ができない栈橋式岸壁や矢板式岸壁の土中部、水中部の部材の損傷程度の算定。
- ② 津波警報等で現地調査ができない時間帯に、簡易診断や詳細診断を行うことによる、タイムロスの縮減。
- ③ 早期供用の観点から現地調査着手の優先順位決定をサポートすることによる、現地調査の効率化、時間短縮及び省力化。
- ④ 津波警報等解除後の現地調査結果（残留水平変異）の手動入力による、担当者の技術経験やスキルに係わらない供用可否最終判定の実現。

診断システムにより、暫定供用が可能な岸壁の特定に要する時間が短縮され、緊急物資輸送等の海上輸送の早期再開を実現することができる。（図-5）

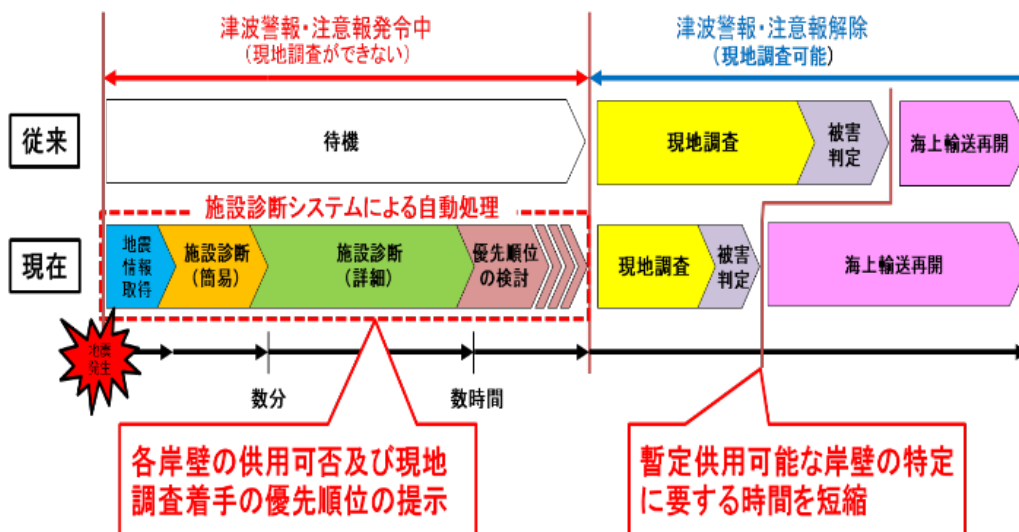


図-5 診断システム開発の効果のイメージ

3. 診断システムの運用

(1) 防災計画における運用

診断システムは、任意の地震動を入力することにより港湾毎に岸壁の供用可否を診断するデモンストレーション機能（以下「デモ機能」と表記）を有している。

名古屋技調では、災害対応の検討に役立てるため、デモ機能を用いて、中部地域の地域防災計画の想定地震が発生した場合の岸壁被害規模を推定した。

対象は、診断システムに登録されている53岸壁とし、詳細診断の結果、供用不可と推定される岸壁の割合と傾向について検討を行った。

a) 診断対象岸壁及び入力地震動の概要

診断対象の53岸壁は、全て水深-10m以深の直轄岸壁であり、昭和40年度～平成26年度に設計されたものである。また、53岸壁のうち20岸壁は耐震強化岸壁（以下、「耐震岸壁」と表記）であり、33岸壁は、通常岸壁である。診断対象岸壁の構造形式の内訳を表-3に示す。

表-3 登録岸壁の構造形式の内訳

構造形式	通常岸壁	耐震岸壁	計
矢板式	13	3	16
栈橋式	15	6	21
ジャケット式	0	4	4
重力式	3	7	10
セル式	2	0	2
計	33	20	53

入力地震動は、各港湾において設計用に算定されたレベル1地震動（発生確率75年）、東海・東南海地震動（旧レベル2地震）、宝永地震動（過去最大）、及び南海トラフ巨大地震動（SPGA50%）の4種類である。

b) 地震動による診断結果

各想定地震動における診断結果を以下に示す。

なお、分析対象岸壁のうち供用不可と診断された岸壁の割合を「供用不可率」と定義する。

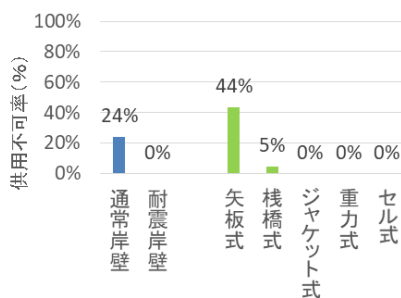


図-6 レベル1地震動発生時の供用不可率

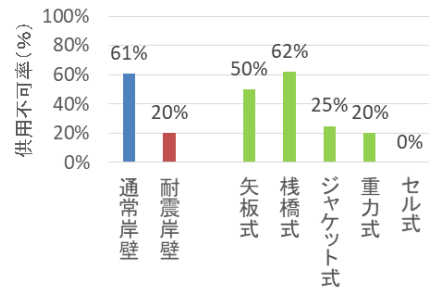


図-7 東海・東南海地震動発生時の供用不可率

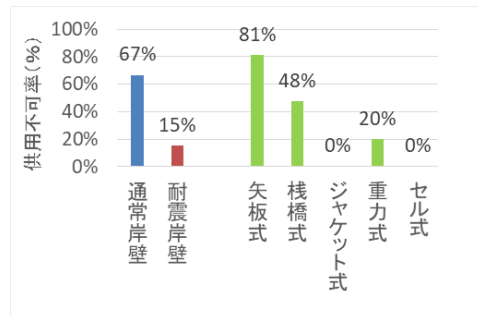


図-8 宝永地震動発生時の供用不可率

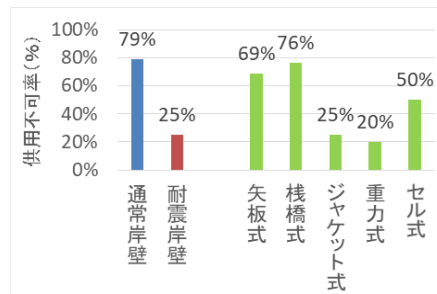


図-9 南海トラフ巨大地震動発生時の供用不可率

c) 診断結果の考察

レベル1地震動での全岸壁の供用不可率が1割程度に収まり、さらに供用不可となった耐震岸壁が皆無と診断された。また、東海・東南海地震動、宝永地震動、南海トラフ地震動での全岸壁の供用不可率は4割～6割と診断されており、各想定地震動の岸壁被害規模が明らかとなった。

表-4 岸壁種類別の供用不可率

岸壁種類別	レベル1	東海・東南海地震動	宝永地震動	南海トラフ巨大地震動
通常岸壁	24%	61%	67%	79%
耐震岸壁	0%	20%	15%	25%
全岸壁	15%	45%	47%	58%

各想定地震動の地震波は港湾毎に異なるが、各想定地震動のエネルギーの大きさと供用不可率の関係を比較するため、名古屋港の工学的基盤における速度のPSI値と供用不可率を図-10に例示する。

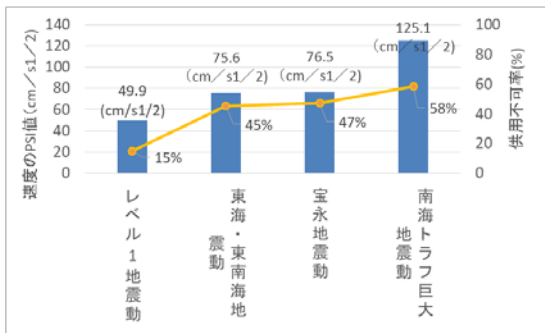


図-10 地震動別の供用不可率（全岸壁）

(※グラフ内の数字は名古屋港の工学的基盤における速度のPSI値を示す)

速度のPSI値が大きいくほど供用不可率が大きくなっており、地震動のエネルギーの大きさが岸壁の供用不可率に関係していることが判明した。

また、中部地方整備局管内の直轄岸壁における各構造形式別の供用不可率は、矢板式・栈橋式が大きく、セル式・ジャケット式・重力式が小さい結果となった。

表-5 構造形式別の供用不可率

構造形式	レベル1	東海・東南海地震動	宝永地震動	南海トラフ巨大地震動
矢板式	44%	50%	81%	69%
栈橋式	5%	62%	48%	76%
ジャケット式	0%	25%	0%	25%
重力式	0%	20%	20%	20%
セル式	0%	0%	0%	50%

これらの供用不可と診断された岸壁は、その他の岸壁と比較して設計年度が古い傾向にある。図-11に各地震動別に供用不可と診断された矢板式・栈橋式岸壁数を設計基準年毎にまとめたグラフを示す。

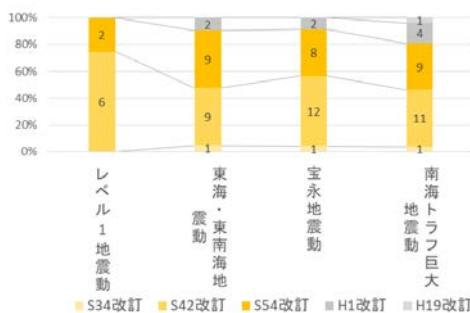


図-11 供用不可と診断された矢板式・栈橋式岸壁の設計年度

供用不可矢板式・栈橋式岸壁がその他の岸壁と比較して供用不可率が大きくなっているのは、供用不可と診断された矢板式・栈橋式の多くが、液状化予測手法が充実した平成元年の設計基準改定前に設計されており、背後地盤の液状化による土圧の増加が主な要因として考えられる。

(2) 診断システムの稼働及び訓練の状況

診断システムは、運用開始以降100回以上稼働してい

るが、東海地方を中心とした大規模な地震が発生していないこともあり、供用不可と診断された岸壁及び実際に供用不可となった岸壁は皆無である。

具体的な稼働事例として、平成30年6月18日に発生した大阪府北部地震の診断状況を示す。本地震においては、図-12に示す6港湾の内、四日市港（8施設）、名古屋港（31施設）、衣浦港（6施設）、三河港（3施設）の計4港48施設で供用可否を判定している。

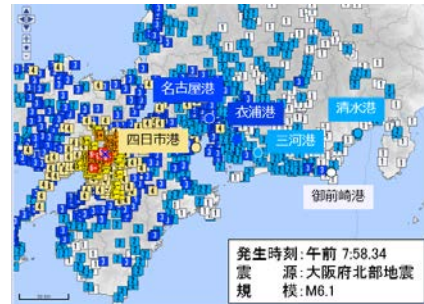


図-12 大阪北部地震の震度マップ（気象庁より引用）

図-13にその時の診断システムの稼働状況を示す。地震発生45分後には、簡易判定診断マップの配信が完了し、地震発生8時間29分後には詳細判定診断マップの配信が完了した。

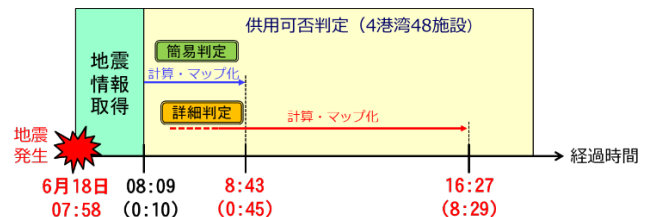


図-13 大阪北部地震における診断システムの稼働状況

判定の結果は、全施設「供用可」であり、施設の現地調査確認の結果、いずれの施設にも変状がないことが確認されている。図-14に、最も震源に近い四日市港の簡易判定マップを例示する。

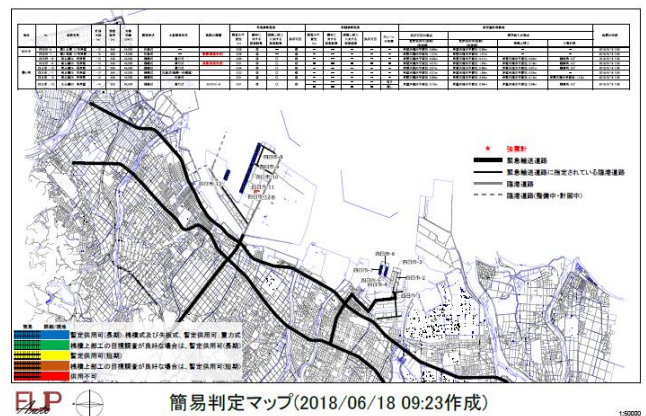


図-14 大阪北部地震の診断マップ（四日市港）

※全ての岸壁が青表示（供用可）

その他の稼働実績についても、開発当初の想定時間通りに、簡易判定は概ね数十分、詳細判定は概ね十数時間までに診断マップの配信が完了している。この結果より、東北地方太平洋沖地震のように、津波警報等の解除に時間がかかり、現地調査に着手できない場合にも、診断システムが津波警報等発令中に岸壁の供用可否を診断し、現地調査の効率化に貢献することができると考えられる。

名古屋技調では、地震災害発生時に診断システムを確実に運用するために、診断システムの操作の習熟のための講習会や、防災訓練等における診断システムの稼働訓練などを実施している。



図-15 防災訓練での診断システム操作と講習会の様子

訓練の結果、災害対策本部には各港湾の診断マップだけではなく、全岸壁の診断結果を集約した一覧表で報告する必要があることが判明したため、令和元年度に診断システムに集約機能を追加した。

(3) 今後の課題

診断システムの日々の運用は、現在、名古屋技調職員が実施しているが、以下の課題がある。

- ① システムを構成する機器の点検方法やデータを蓄積するハードディスクの整理・メンテナンス方法についてのマニュアル類が整備されていない。
- ② 巨大地震発生時を想定した場合、港湾管理者や民間企業への診断システムの普及により、初動体制確立の迅速化や支援部隊・物資受け入れ等の効率化が期待できる。しかし、診断システムの導入には、機器及びソフトウェアの購入費用及びFLIP解析費用など、多くのイニシャルコストが必要である。

これらの課題の解決に向け、今年度は、保守マニュアルの作成、維持管理計画の検討を行っている。また、港湾管理者へ診断システムの紹介及び民間企業への普及促進に向けたイニシャルコスト低減の検討を行っている。

4. おわりに

診断システムは、港湾地域強震計観測網と地震動情報即時伝達システム、これまでに蓄積されてきた港湾施設の被災記録、港湾施設の損傷程度を精度よく再現できる二次元地震応答解析プログラム (FLIP)、港湾施設被害に関する最新の研究成果など、現在の最高レベルの港湾技術を結集して構築した最先端のシステムである。H30基準にも「大規模地震直後の津波警報発生時や夜間等の現地調査ができない状況において被災状況の概略把握を行うための手法としては最も効果的な方法の一つである。」と紹介されている。

また、大規模地震災害時における初動体制の支援の他、各地域の防災計画における想定地震発生時の岸壁被害規模の推定等、防災・減災活動等に活用できる新しい技術として注目を集めており、国土交通省港湾局でも全国展開が検討されている。

名古屋技調は、診断システムの診断精度と機能向上に努めると共に、様々な機会に診断システムの有効性を発信し、導入を検討している他機関からの問い合わせに対して積極的に対応するなど、診断システムの導入促進に努めていく所存である。

謝辞：本論文の執筆に当たり、ご指導・ご協力を頂いた株式会社ニュージェックの曾根照人様、山本龍様をはじめとする関係者の方々に深く感謝し、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: 東日本大震災における港湾の被災から復興まで～震災の記録と今後の課題・改善点～, 交通政策審議会 第48回港湾分科会資料 4, 第54巻, pp.3-14, 2012.
- 2) 気象庁: 東北地方太平洋沖地震への気象庁の対応について(報告), 気象業務の評価に関する懇談会資料, p.9, 2011.
- 3) 山本龍, 宇野健司, 大塚尚志, 淵ノ上篤史, 曾根照人: 強震計観測情報を用いた係留施設の供用可否判定システムの開発, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, pp.655-656, 2016.
- 4) 若井淳, 野津厚, 菅野高弘, 長坂陽介: 港湾地域地震観測におけるデータ伝送方法の改良—地震動情報即時伝達システムの開発—, 港湾空港技術研究所資料, No.1310, pp.4-18, 2015
- 5) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.
- 6) 西園勝秀: 港湾技術の変遷と技術基準の主な改正点, 港湾2月号, 公益社団法人日本港湾協会, pp.10-15, 2018.

CCTV画像のAI画像処理技術の導入について

大西 偉允¹・手嶋 英之²

¹中日本高速道路（株）技術・建設本部 環境技術・企画部 技術企画・開発課

（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-18-19）

²中日本高速道路（株）技術・建設本部 技術支援部 （〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-18-19）

中日本高速道路株式会社（以下、NEXCO中日本）が管理する高速道路延長は2,151km（2020.4.1時点）あり、交通流はCCTV（closed-circuit television）カメラを用いて監視している。

CCTVカメラ台数の増加に伴い、効率的に監視し、渋滞・事故・落下物等を迅速に発見する必要性が高まっている。近年AI（artificial intelligence）技術を用いた画像処理、顔・物体認証技術などのサービスが普及してきている。その技術を応用し、CCTVカメラ画像をAIにて画像処理を行い、渋滞・事故・落下物等の異常事象の検出が可能か検証すると共に現地導入へ向けたプロセスを報告する。

キーワード AI, 画像処理, CCTV, 交通流監視

1. はじめに

NEXCO中日本では2,151km(図-1)(2020.4.1現在)利用台数198万台/日の高速道路を管理している。交通流やトンネル非常用、休憩施設など様々な用途でCCTVカメラが整備されており、総数は4,649台（2019.3.31時点）にのぼる。その台数を東京・八王子・名古屋・金沢の各支社に配置されている道路管制センターにて管制員がCCTVカメラ画像の監視を行っているものの、人の目では全てのCCTVカメラ画像を常時監視する事は不可能である。

CCTVカメラは『発生した事象の監視』が主体であり、『事象の発見』での活用度が低いのが現状である。

また、NEXCO中日本では、『次世代技術を活用した革新的な高速道路保全マネジメント(i-MOVEMENT)』を掲げ、全線監視を目指し、CCTVカメラの増設を計画している。

これらの背景を踏まえ、人の目を補完し、常時監視が可能な『AIによる画像処理技術』の導入の検討を行った。

▶ 事業エリア



図-1 NEXCO中日本 事業エリア（2020年4月）



写真-1 NEXCO中日本 道路管制センター

2. これまでの画像処理技術

これまでも長大トンネル内には非常用設備として200mピッチで固定式(一定の画角)のCCTVカメラを整備し、『背景差分方式』の画像処理技術を用いてきた。明り部(トンネル以外の区間)においても東名・新東名などの一部区間において、画像処理専用の固定式(一定の画角)CCTVカメラを整備し、『背景差分方式』の画像処理技術が導入した。

この『背景差分方式』は太陽光による影を検知したり、道路照明が無い区間で夜間の車両検知精度が低く、明り部区間における検知精度に課題があり、トンネル内の外乱影響を受けない区間にのみ、活用が限定されていた。

また、明り部区間では、画像処理専用の固定式CCTVカメラを整備する必要があり、コスト面も課題となった。

これらのことから明り部区間においては、『背景差分方式』ではなく、整備済みの旋回・ズーム式(画角が一定

ではない) CCTVカメラで画像処理が可能な技術の導入が必要となった。そこで注目したのが顔認証などに用いられるAI (Deep Learning (属性認識)) を活用し物体認証を行う、画像処理技術(以下、『AI画像処理技術』)に着目し、導入に向けての検討を行った。

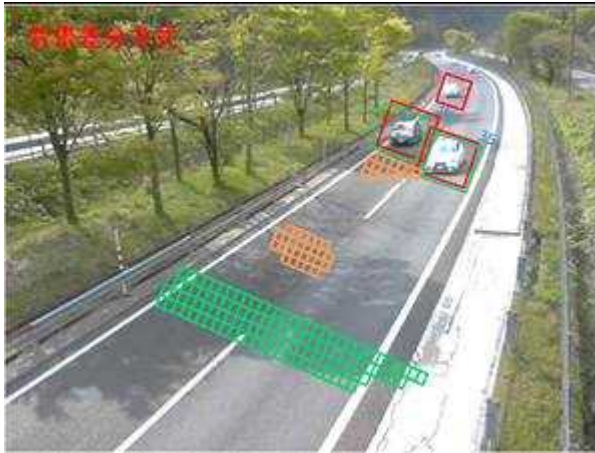


写真-2 明り部CCTVでの誤検知状況

3. 導入に向けての技術公募の実施

(1) 技術公募の流れ

2019年2月に『CCTVカメラを用いた交通映像解析技術に関する技術公募』をNEXCO 中日本のHPで実施し、1ヵ月間の公募期間で7社の応募があった。この7社の技術を評価し、本格導入に向けての試行導入(実証実験)を実施する技術を選定した。(図-2)

評価にあたり、応募のあった各社の技術は開発中であるため、7社と秘密保持契約を締結し、NEXCO中日本が提供するCCTVカメラの録画映像を基に各社の画像処理技術の精度確認及びNEXCO中日本が求める機能の開発を行う意思があるかの確認を行い、各社と共同研究契約を締結し、画像処理技術の共同研究を実施した。

7社との共同研究の進め方は、NEXCO中日本が用意した録画映像を基に各社が開発中の画像処理技術で公募要件の事象を検知可能か検証を行うと共に道路管理者が求めるニーズを伝えて技術精度の向上を目指した。

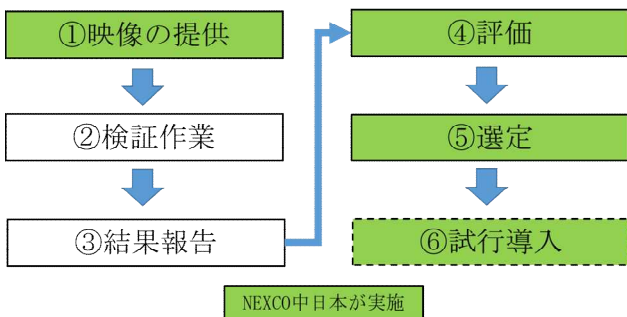


図-2 技術公募の選定フロー

(2) 公募要件

公募の中で求めた『AI画像処理技術』の基本要件につ

いては、以下の①～⑭である。

- ① 既存の旋回・ズーム式CCTVカメラ映像を用いる。
- ② 決められた画角等を自動で認識し、画像処理を開始する。
- ③ トンネル部を除く、CCTVカメラを対象とする。
- ④ CCTVカメラの監視する車線数は2車線とする。
- ⑤ 監視範囲は200mとする。
- ⑥ 異常事象を検知した際の画像と信号を外部送信する。
- ⑦ 検知データを蓄積できること。
- ⑧ 検知対象は渋滞、事故(停車)及び逆走車とする。
- ⑨ 落下物(タイヤ程度の形状)の検知ができること。
- ⑩ 異常検知～信号出力に要する時間は5秒程度とする。
- ⑪ システムはCCTVカメラに機能を組み込むか、CCTVカメラと別の機器のどちらでもよい。
- ⑫ 照明が設置されていない夜間でも検知ができること。
- ⑬ 維持管理が容易であること。
- ⑭ 異常事象の検知率が95%以上であること。

基本要件に加え、加点項目として、価格が安価であることや気象条件への対応、将来性などの項目を合わせ計25項目での検証作業及び評価を実施した。

4. 技術力の検証作業で見えてきたこと

(1) 提供したCCTVカメラ映像の画質

NEXCO中日本が提供した画像は、CCTVカメラの整備年度の違いからSD～FHD(写真-3)の録画映像の提供を行った。近年においては、8Kカメラなどの販売されているが、価格・製品化・映像伝送容量等の課題から現時点での高速道路上のCCTVカメラ仕様においては、FHDが最高画質である。画像処理には高画質(解像度が高い)の方が適しているものの、SD画質のCCTVカメラも未だ多く使用されているためSD画質も対象とした。

表-1 映像画質比較

名称	意味	解像度	備考
SD	Standard definition television	720×480	アナログ放送
HD	High definition video	1280×720	地デジ放送
FHD	Full High definition video	1920×1080	Blu-ray
4K	UHD(Ultra High definition)	3840×2160	FHDの4倍
8K	SHV(Super High-Vision)	7680×4320	4Kの4倍

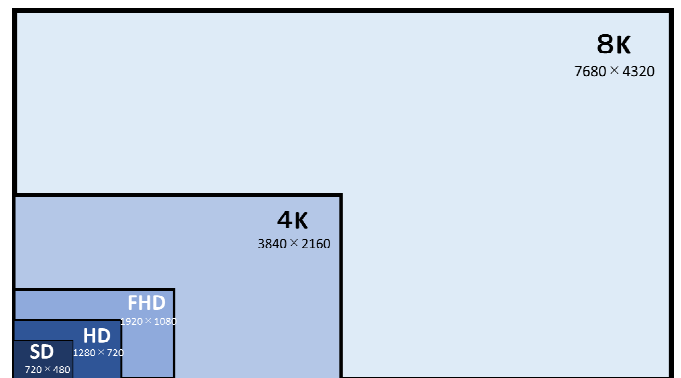


図-3 画像解像度の比較イメージ



写真-3 SD・FHD画質比較

(2) 画質による画像処理への影響

『AI画像処理技術』においては、事前に車両の教師データを用いて学習した車両データを検出を行っている。FHD画像とSD画像で6倍の解像度があるため、車両としての認識できる検出精度には差が発生する。また、夜間画像においては、CCTVカメラの性能(ダイナミックレンジ)により、車両のヘッドライトの影響を受け車両としての認識が困難な場合があり、約20%程度の検出精度の劣化が確認できた。

表-2 画質による検出精度の影響

	測定対象	高画質			計測値			未検知	過検知	検知率	
		小型	大型	バイク	合計	小型	大型				バイク
FHD	新名神 9.5KP 昼_1	11	13	0	24	12	0	24	0	100.0%	
	新名神 9.5KP 夜_1	11	23	0	34	10	0	34	0	100.0%	
	新名神 10.4KP 昼_1	6	14	0	20	7	14	0	1	95.0%	
	新名神 10.4KP 夜_1	15	25	0	40	14	25	0	1	97.5%	
	新名神 13.7KP 昼_1	34	21	1	56	35	20	1	56	0	100.0%
SD	新名神 13.7KP 夜_1	33	35	0	68	23	35	0	58	1	96.6%
	北陸道 39.0KP 昼_1	269	82	0	351	281	79	0	360	0	97.4%
	北陸道 39.0KP 夜_1	217	63	0	280	231	63	0	294	0	95.0%
	北陸道 37.6KP 昼_1	158	66	0	224	155	73	0	228	2	96.4%
	北陸道 37.6KP 夜_1	-	-	-	67	-	-	-	64	7	83.6%
	北陸道 37.6KP 昼 降雪_1	462	54	1	517	478	49	1	528	0	97.9%
	舞鶴若狭道 15.3KP 昼(順方向車線)	158	63	0	221	184	58	0	222	0	99.5%
	舞鶴若狭道 15.3KP 昼(逆方向車線)	82	53	0	135	102	33	0	135	0	100.0%
	舞鶴若狭道 15.3KP 夜(順方向車線)	24	39	0	63	27	39	0	65	0	96.0%
	舞鶴若狭道 15.3KP 夜(逆方向車線)	17	6	0	23	6	0	28	0	78.3%	

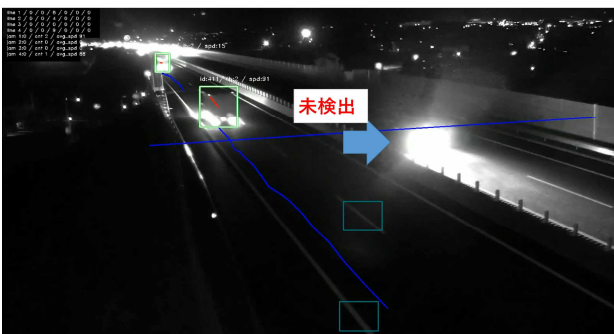


写真-4 ヘッドライトによる影響 (未検出)

(3) AI画像処理が可能な範囲と大きさ

『AI画像処理技術』では、AIが車両を認識するため、CCTVカメラ映像の画角全ての範囲で検出可能ではなく、画像上一定の大きさが必要である。直線部に整備されているCCTVカメラでは旋回・ズームする事で約1kmの監視が可能であるが、今回の技術公募においては、一定画角(プリセット位置)で200m以上の範囲を検出できる事を求めた。旋回・ズーム中においては画角が常に変化しており画像処理が困難なため一定画角(プリセット位置)での画像処理とした。

各社の報告によれば、検出できる映像の大きさは(表-3)の通りとなった。

普通車サイズであれば、200m先で50×50pixとなるため7社とも技術的要件は満足していた。

なお、200m先の確認は、高速道路上の区画線(車線境界線)の間隔が20m(8m+12m)のため10本先まで車両を検出できている事を確認した。(写真-5)

表-3 各社の検出可能な画素数

	A社	B社	C社	D社	E社	F社	G社	平均値
検知可能サイズ	25×25	22×22	25×20	20×16	50×50	48×51	40×40	-
画素数	625	484	500	320	2,500	2,448	1,600	1,211

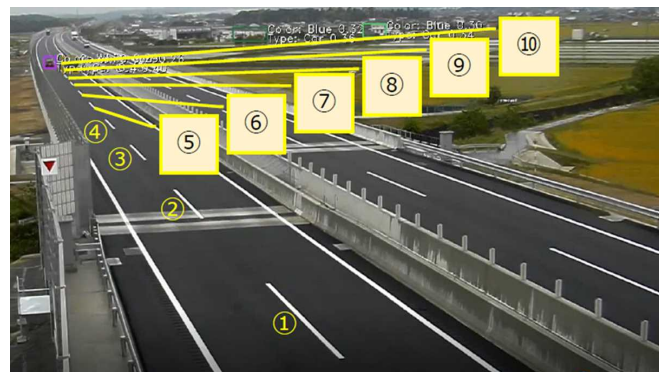


写真-5 200m先の検出状況

(4) 画像処理を開始する画角の判定

旋回・ズーム式CCTVカメラを用いるため、画像処理を実施する必要がある画角か旋回・ズームの画角かを判定する必要がある。この判定方法について、公募参加7社のうち、CCTVカメラを製造している社か否かで手法が異なる事が分かった。CCTVカメラを製造している社は、CCTVカメラを制御する制御卓からの信号(プリセット信号)を基に画像処理を開始する。CCTVカメラを製造していない社は、CCTVカメラ画像から画像処理を開始する画角か否かをAIが判断し画像処理を開始する。AIが画像処理を開始するか否かの判定方法については、以下の手法が用いられ、それぞれの社の技術の特色が表れていた。

- ・画像の特徴点からの移動量を計測し判断する手法(写真-6)
- ・白線の占有率から画角を判定する手法(写真-7)
- ・車両の軌跡から画像処理範囲を判定する手法(写真-8)

の技術をいくつか紹介させて頂く。これらが技術的に運用可能なレベルまで到達すれば、更なる道路管理の高度化が見込まれる。

(1) 夜間のヘッドライトのハレーションに関する技術

FHD画像で比較的ダイナミックレンジの大きなCCTVカメラを用いても夜間における車両のヘッドライト光源によるハレーションは車両検出を妨げる要因となっており、夜間における検出精度が課題となっている。そのハレーションを学習しハレーションで車両を検出しようとするアイデア(写真-13)やハレーションを抑える技術の検討がなされている。(写真-14)



写真-13 ハレーションによる車両検出



写真-14 ハレーションを抑える技術

(2) 交通規制を検出技術

交通規制のために等間隔で設置されるラバーコーンを検出し、交通規制区間を道路管理者に通知する事を検討している。ラバーコーン1本であれば、落下物と認識されるところであるが、等間隔の規則性を学習させることにより交通規制と認識できるようになる。(写真-15)



写真-15 工事規制を検出する技術

(3) ポットホールを検出する技術

ポットホールの大きさにもよるが、4. (3)で紹介した画素数以上の大きさであれば、ポットホール検出も可能であると考えられる。検証の中では、マンホールをター

ゲットとしたが、同様にポットホールの検出が可能となれば、CCTVカメラを定期的に旋回・ズームさせることで、CCTVカメラが設置されている周辺の路面を定期的に自動点検できるようになる。(写真-16)



写真-16 ポットホールを検出する技術

(4) 路面状況を判定する技術

雨や降雪などによる路面状況をAIで判定させる技術が検討されている。同様の技術は気象会社等でも検討が進んでいるが、このような判定技術が確立すれば、雨や雪のスリップ注意の情報提供高度化や雪氷作業の効率化が図れると期待される。(写真-17)



写真-17 路面状況を判定する技術

6. 『AI画像処理技術』の本格導入に向けて

技術公募については、CCTVカメラの録画映像での検証であったため、本格導入に向けては実環境下（雨・雪などの気象条件や太陽光・夜間などの光源）での影響により検出精度の低下がないかの確認が必要である。このため応募のあった7社のうち技術力やコストが優れていた4社を選定し、実際のCCTVカメラネットワークに接続し、試行導入（実証実験）を実施していく。なお、この取り組みは2021年1月～2021年12月にかけてNEXCO東日本と共同で実施していく。

謝辞：『CCTVカメラを用いた交通映像解析技術に関する技術公募』に参加し、共同研究を実施して頂き、貴重なAI技術に関する意見交換をさせて頂いた、7社の関係者様にこの場を借りて、改めて御礼申し上げます。

橋梁詳細設計業務等における CIMモデルの活用に関する考察

伊原 岳宏¹

¹近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 調査課 (〒620-0875 福知山市字堀小字今岡2459-14)

CIM (Construction Information Modeling/Management) は、計画・調査・設計段階から構造物の属性情報を付与した3次元モデルを導入することで、建設生産システムの効率化・高度化を図ることを目的としている。紀南河川国道事務所では、一般国道42号すさみ串本道路の橋梁詳細設計において、鉄筋干渉の照査等にCIMモデルを活用している。しかし、国土交通省のCIM導入ガイドライン(案)において、詳細な仕様の規定は検討段階にあるため、CIMモデルを十分に活用できない場合がある。本稿では、橋梁詳細設計業務におけるCIMモデルの活用状況を整理し、日常業務や安全管理でより一層活用されるために必要な制度や活用方法を考察する。

キーワード CIM, i-Construction, 安全管理, GIS

1. はじめに

国土交通省では、建設生産システムの効率化・高度化を目的として、CIM (Construction Information Modeling/Management) の導入を推進している。2020年10月現在、紀南河川国道事務所では、一般国道42号すさみ串本道路の建設が進められており、設計段階においてCIM導入ガイドライン(案)(以下、「ガイドライン」とする。)に基づき21橋にCIMが導入されている(図1)。ガイドラインでは、CIMモデルの活用例は紹介しているものの、事務所作業における動作環境や使用方法まで言及していない。また、設計業務の次の段階である工事発注において、ソフトウェアの互換性の問題等により、発注者および工事受発注者がCIMモデルを十分に活用できない場合がある。そこで本稿では、橋梁詳細設計業務におけるCIMモデルの活用状況を整理し、日常業務や施工中・供用後の安全管理でより一層活用されるために必要な制度や活用方法を考察する。

一般国道42号すさみ串本道路(図2)は、近畿自動車道紀勢線の一部として、和歌山県西牟婁郡すさみ町と東牟婁郡串本町との間を結ぶ延長19.2kmの自動車専用道路であり、2014年度に事業化された。現在紀伊半島南部にある幹線道路は現道の国道42号のみであり、線形が厳しいことに加えて台風や豪雨などの異常気象発生時には度々通行止めとなっている。そのため、すさみ串本道路は、本地域における災害時の信頼性・安全性の確保、救急医療活動の支援、観光活性化等を目的に整備が行われている。また、近い将来高確率で発生が懸念されている

南海トラフの巨大地震に伴う大津波により、現道の大部分は浸水区間内に入ると想定されており、浸水区間を回避する高さに計画されているすさみ串本道路は、「命の



図1 すさみ串本道路の橋梁一覧
(橋梁名は2020年10月時点の仮称である。)



図2 すさみ串本道路の概要

道」として早期供用が期待されている。すさみ串本道路は、供用済みとなっている近畿自動車道紀勢線の区間に加えて事業中の串本太地道路（2018年度事業化）・新宮道路（2019年度事業化）・新宮紀宝道路（2015年度事業化）と合わせて紀伊半島を1周する高規格幹線道路となる予定である。このように、急峻な地形に計画され、供用が急がれるすさみ串本道路事業は、CIM導入による施工の効率化等のメリットは大きいと考えられる。

2. CIMの利活用の制度と成果品の現状

2017年3月に国土交通省 CIM 導入推進委員会が「CIM導入ガイドライン（案）」を策定しており、CIMモデルの活用方針等が示されている。CIMの活用の方針として、設計照査の効率化や安全管理等がテーマとして挙げられている。設計照査の効率化に関して、橋脚基礎等の配筋が密となる箇所における鉄筋の干渉照査にCIMモデルが活用される事例があり、すさみ串本道路の橋梁においてもCIMによる鉄筋の干渉照査が実施されている。安全管理に関して、工事現場では様々な建設機械や作業員の動線が交錯しており、事故が生じやすく、事故が発生した場合の死亡率も高い。事故予防の先進的な取り組みとして、屋内でも危険予知活動を可能とするシステム等が検討されている。

しかし、ガイドラインは、CIMモデルの活用例やデータベースの構築例は紹介しているものの、事務所作業における動作環境や使用方法まで言及していない。そのため、すさみ串本道路の橋梁CIMの業務成果毎に詳細度や使用ソフトウェアが異なり、路線統一的なCIMモデルの構築が困難である（表1）。また、近畿地方整備局で導入しているソフトウェアと異なるもので作成されたCIMモデルは直接読み込むことはできず、共通仕様のIFCファイルに変換して取り込むか3DPDFに変換して閲覧する必要がある。このIFCファイルや3DPDFでは、テキスト抜け等が生じる場合があり、互換性に課題がある。

この現状を踏まえ、特記仕様書等で主桁等を再現する上部工は詳細度300とする等、詳細度を成果品の目的・構造別に指定し、なおかつCADソフトに左右されない3DPDFの納品を指定することで実業務において活用しやすいデータを整備する必要があると考えられる（表2）。

表1 すさみ串本道路のCIM成果品における使用ソフトウェアのベンダ

Autodesk		川田テクノシステム(株)	Allplan
江住川橋	有田川橋	小河谷川橋	安指川橋
星野西池川橋	大山口川橋		江田川橋
小河瀬谷川橋	東雨川第一橋		貝岡川橋
熊谷川第一橋	東雨川第二橋		二色川橋
熊谷川第二橋	釜郷原川橋		
和深川橋	高富川橋		
田子川橋	鬮野川橋		
田並川橋	サンゴ台高架橋		
16橋		1橋	4橋

※名称は全て仮称

表2 CIMモデルの詳細度の定義²⁾

詳細度	共通定義	【参考】工種別の定義例	
		構造物（山岳トンネル）のモデル化	サンプル
100	対象を記号や線、単純な形状でその位置を示したモデル。	対象構造物の位置を示すモデル（トンネル）トンネルの配置が分かる程度の矩形形状もしくは線状のモデル	
200	対象の構造形式が分かる程度のモデル。標準横断で切土・盛土を表現、または各構造物一級図に示される標準横断面を対象範囲でスイープさせて作成する程度の表現。	構造形式が確認できる程度の形状を有したモデル（トンネル）計画道路の中心線形とトンネル標準横断面でモデル化。坑口はモデル化せず位置を示す。	
300	附帯工等の細部構造、接続部構造を除き、対象の外形状を正確に表現したモデル。	主構造の形状が正確なモデル（トンネル）避難通路などの拡張部の形状をモデル化する。検討結果を基に適用支保パターンを範囲を記号等で、補助工法は対象工法をパターン化し、記号等で必要範囲をモデル化する。坑口部は外形寸法を正確にモデル化する。舗装構成や排水工等の内空設備をモデル化する。橋抜き位置は形状をパターン化し、記号等で設置範囲を示す。	
400	詳細度 300 に加えて、附帯工、接続構造などの細部構造および配筋も含めて、正確にモデル化する。	詳細度 300 に加えてロックボルトや配筋を含む全てをモデル化（トンネル）トンネル本体や坑口部、箱抜き部の配筋、内装版、支保パターン、補助工法の形状の正確なモデル化。	
500	対象の現実の形状を正確に表現したモデル	-	-

3. 橋梁詳細設計業務におけるCIMの活用状況

新たなCIMの活用方法を検討する前段として、すさみ串本道路事業における橋梁詳細設計業務での活用状況を整理した結果のうち、多くの橋梁で見られた鉄筋干渉照査および施工ステップの可視化への活用方法を述べる。

(1) 鉄筋干渉照査

橋台や橋脚は鉄筋が複雑に交錯しており、要所毎に配筋を記した二次元図面では、鉄筋同士の干渉の発見が困難な場合がある。干渉が生じた場合、工事発注後に手戻りが生じるため、未然に防ぐことが重要である。課題としては、CIMを用いた干渉照査には、詳細度400以上のCIMモデルが必要であり、CIMモデルの作成に多大な労力を要することが挙げられる。ここで、桁端部におけるPCケーブルと支承アンカー等の配筋干渉の確認イメージを図3、橋脚基部の柱主鉄筋と大口径深礎杭の配筋干渉の確認イメージを図4に示す。

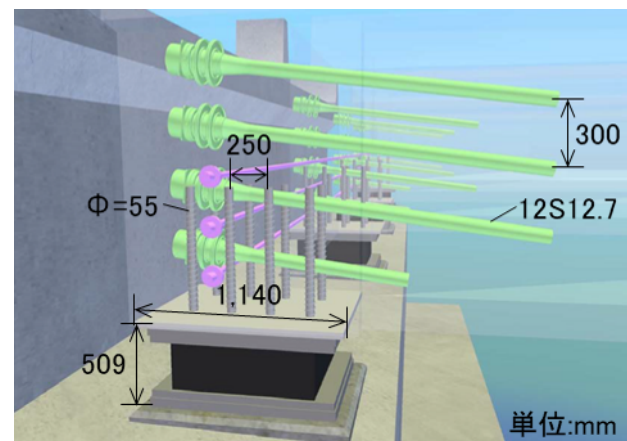


図3 PCケーブルと支承アンカーの配筋干渉の確認例（熊谷川第一橋（仮称））

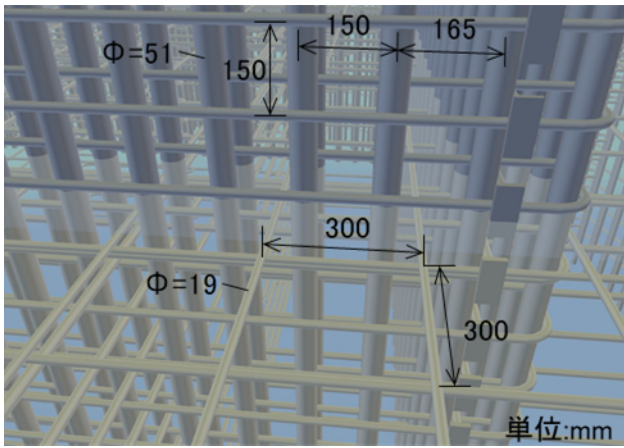


図4 柱主鉄筋と深礎杭の配筋干渉の確認例
(熊谷川第一橋(仮称))

(2) 施工ステップの可視化

橋梁の詳細設計では、構造物そのものの設計のみならず、施工に要する日数、難易度や費用等を総合的に考慮し、施工計画を立案する必要がある。その際、施工手順が複雑になるにつれ、二次元図面では表現が困難となり、施工計画の妥当性の評価に苦慮することとなる。ここで、CIMモデルを活用する顕著なメリットは2つあると考えられる。1つは、三次元空間上で施工計画を立案することにより、構造物や建機との干渉を容易に発見できる点である。これにより、工事着手後の計画変更や事故を未然に防ぐための一助となると考えられる。もう1つは、CIMモデルに時間要素を付与し、アニメーションによる施工フローの把握が可能となる点である。これにより、効率的な建設機械の動線や施工手順を設定できると考えられる(図5)。

(3) その他の活用方法

その他の活用方法として、安全性の検証にCIMモデルを活用した例を挙げる。田並川橋(仮称)では、下部工検査路が橋脚側面及び上面に計画されており、双方を行き来可能な梯子も設置される予定である(図6)。ここで、手摺りの高さに着目すると、梯子の昇降時に掴むには不十分と判明した。併せてCIMモデルでの再現により、様々な角度から手摺りの高さの妥当性を検証することが可能であり、点検時の動線や視界をシミュレーションすることで、安全管理にも活用できると考えられる。

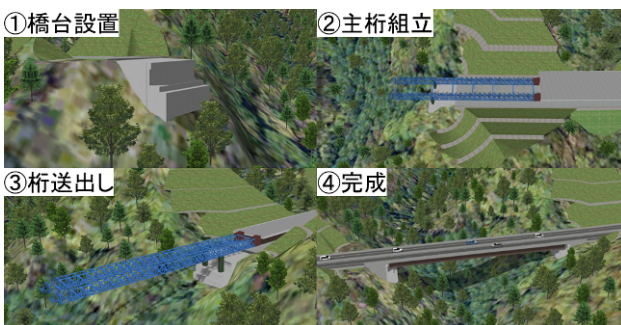


図5 貝岡川橋(仮称)の施工ステップ図

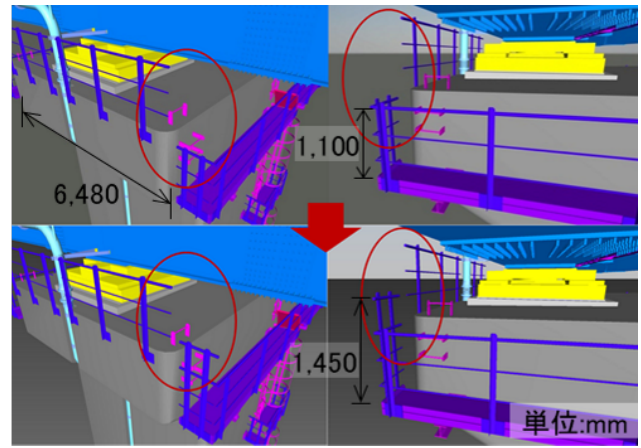


図6 検査用通路の改良例(田並川橋(仮称))

上記3例の特徴を踏まえると、CIMモデルには作成手間は掛かるものの、工費縮減や工期短縮に効果的である。一方で、単純な三次元モデルでも同様の検証は可能であり、CIMモデルの特徴である付与された属性データに関して更なる活用の余地があると考えられる。

4. 橋梁CIMの新たな活用方法と制度の検討

2章で述べたとおり、すさみ串本道路は防災面での整備効果が期待されていることから、設計段階において二色川橋(仮称)および江田川橋(仮称)では津波避難路としての活用を検討した。特に二色川橋では、橋梁の構造図と防災マップとの組み合わせにより避難経路を検討した(図7)。ここでは、付近に津波浸水高より高所に避難所があるため避難スペースの詳細な検討は実施しなかったが、バリアフリーの検討等に、CIMモデルの活用が期待される。3.(3)の例では、検査用通路の梯子から橋台上面の検査用通路に登る箇所において、安全面から手摺りを追加した。この事例を応用して、避難時の想定ルートをVR等の3次元で検証することにより、図8のような二次元図面のみでは把握しづらい改善が必要な箇所を発見できると考えられる。特に、避難経路の起伏を加味した危険性の評価や高齢者の避難の際に支障となる箇所の把握が容易になることが考えられる。

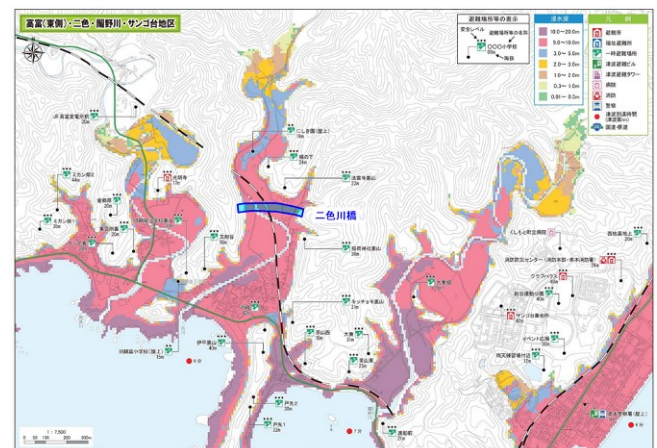


図7 二色川橋(仮称)の津波時の浸水想定³⁾

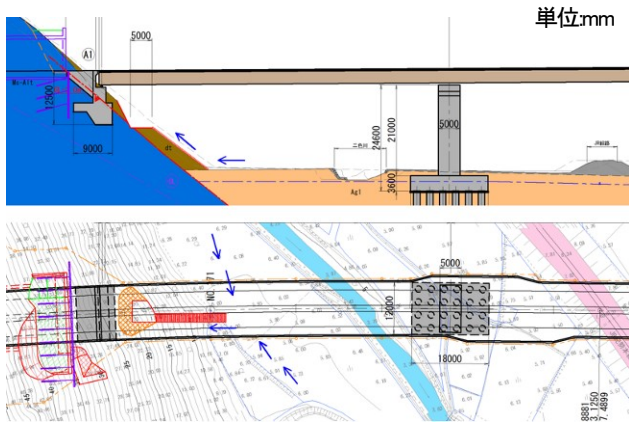


図8 二色川橋(仮称)の津波時の避難経路の検証

属性情報を活用する方法としては、部材情報や品質管理基準情報を用いて、打合せ時の検討内容をリアルタイムに反映するシステムの導入が挙げられる。従来の打合せでは、設計コンサルタントが提示した案に対して修正を指示し、その修正案を次回の打合せにて協議する場合が多く、意思決定に約1ヶ月を要する場合もあった。そこで、地形データに詳細度200程度のCIMモデルを構築し、打合せ時にリアルタイムで編集可能な環境を整備することにより、構造物同士の干渉照査、切盛土量の算出や概算工事費の算出が可能となり、意思決定に要する時間を短縮できる可能性があると考えられる(図9)。

さらに、地質モデルと組み合わせることにより、地質条件も考慮した概算工費を算出できることが期待される。

今後の展望として、さらなる活用方法を検討するために、著者自身がCIMデータを活用できる環境を整備し、打合せ等に活用することを予定している。発注者と受注者の双方がCIMの活用環境を整備することにより、従来以上に業務を効率化することが期待される。

一方、CIMモデルのみの整備で業務の効率化が図られるわけではない。橋梁設計には、地質条件、気候、周辺環境への影響、用地範囲やスケジュール等を総合的に判断して設計する必要がある。したがって、これらを統合的に扱えるプラットフォームの整備が必要であるといえる。事務所・出張所等においては、ノートパソコンやタ

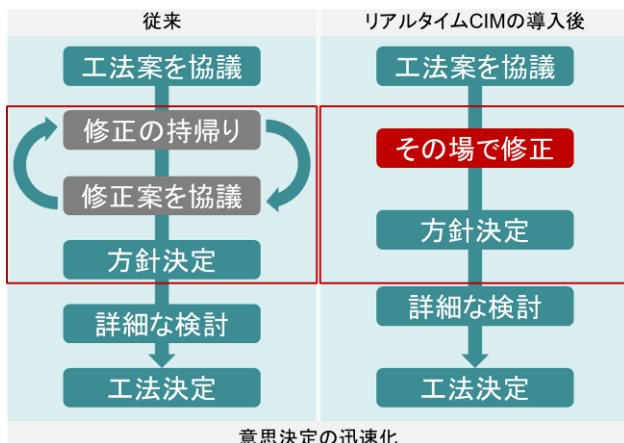


図9 リアルタイムCIM導入により想定される効果

表3 3DCADソフトウェアの動作要件と官用PCのスペックとの比較

	V-nasClair	官用PC(ノート)
CPU	Intel Core i7相当	Intel Core i5 8265U
記憶装置	SSD 10GB以上	SSD 512GB
モニタ	1280×1024以上	1366×768
メモリ	16GB以上(64bitOS)	8GB
OS	Windows7以降	Windows10 64bit



図10 GISプラットフォームによる管理イメージ

タブレット端末を用いてこれら情報を一元的に管理し、打合せ等に臨める環境が理想である。しかし、3DCADソフトウェア(V-NasClair, Navisworks等)は動作要件が高く、打合せで活用できるような環境構築に適していない(表3)。そこで比較的動作要件の低いGISソフト(Q-GIS等)による管理が適していると考えられる。また、GISソフトは多数のレイヤーを構築することが容易であり、用地買収状況や地質状況を表したレイヤーを速やかに切り替えて検討できる利点がある(図10)。

5. まとめ

4章までの検討を総括すると、CIMを日常業務や施工中・供用後の安全管理で一層活用するためには、CIMを構築するプラットフォームの整備・統一化が必要であると考えられる。したがって、プラットフォームの整備に必要な仕様や要件を確定させるため、CIMモデルの活用事例を収集・分析することが必要であると考えられる。

※本稿は著者が紀南河川国道事務所工務第三課所属時の業務内容である。

謝辞：本稿の執筆にすさみ申本道路事業の橋梁詳細設計業務に携わった設計コンサルタントの方々には多大なるご協力をいただいた。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省, CIM導入ガイドライン(2017年3月)
- 2) 国土交通省, CIM事業における成果品作成の手引き(2017年3月)
- 3) 串本町, 津波ハザードマップ【高富(東側)・二色・鬮野川・サンゴ台地区】、<https://www.town.kushimoto.wakayama.jp/bousai/tsunami/files/tsunami-1718_201907.pdf>(2020.10.12閲覧)

港湾施設の点検診断における 点検ロボットの実用性検討について

中澤 祐飛¹・西森 忍²・岡 智哉²

¹四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 技術開発課（〒760-0064 香川県高松市朝日新町1-30）

²四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課（〒760-0064 香川県高松市朝日新町1-30）

港湾施設は高度経済成長期頃に集中的に整備されたものが多く、老朽化が進行した施設が増加しており、定期的な点検診断による維持管理が重要となっている。点検診断を必要とする施設が増加する一方で、少子高齢化による労働者の減少に伴い潜水士等の人員不足が懸念されている。港湾施設の栈橋上部工や海中部分の部材の点検診断は危険かつ施設の利用に支障をきたすことから安全で効率的な点検方法の現場導入が求められている。本稿では港湾施設の栈橋上部工や海中部分の部材の点検診断に点検ロボットを導入する際の適用性について室内実験及び実海域実験を行い確認された適用可能条件や課題等について報告する。

キーワード 施設点検, 維持管理, 点検ロボット

1. はじめに

港湾施設では老朽化によって利用制限をかけ、利用に支障が発生している施設がある。今後、このような施設は増加する傾向にあり、これに伴う点検診断も増加することが予想される。しかし、港湾施設の栈橋上部工や海中部分の部材の点検診断は有人調査による目視点検が一般的であるが、点検現場は暗く狭い海上・海中であるため危険である。また、点検中に施設の供用を一時制限するなど利用面での問題もあり、施設の点検診断の迅速化、安全性向上に資する点検手法の確立が求められている。

本実験では、今回、四国の港湾を対象に四国地方整備局が国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所（以下、港湾空港技術研究所とする。）へ委託し実証実験を行い、港湾施設の栈橋上部工や海中部分の部材の点検診断において点検ロボットの画像取得能力や動作能力等の確認を行った。実験より確認された適用可能条件や課題等について報告する。

2. 点検ロボットの概要

本実験では港湾空港技術研究所が開発し所有する栈橋上部工点検用ROV（以下、点検用ROVとする。）と市販品である水中ドローンの2種のROVを使用する。本稿ではそ

れぞれ点検用ROVと水中ドローンとして呼称する。

(1) 点検用ROV

点検用ROVは、栈橋下部の海面上から栈橋上部工下面の劣化度判定に資する写真を取得することを目的とした遠隔操作型の無人調査ロボットである。¹⁾

GPSの利用できない栈橋下においてセンサーを利用した測位機能を有するほか、障害物に対する自動衝突回避機能などの遠隔操作支援機能を具備しており、当該作業を安全かつ確実に効率よく実施することが可能である。



図-1 点検用ROV

(2) 水中ドローン

当該水中ドローンは、水中部の部材の撮影を目的とした遠隔操作型の無人調査ロボットである。撮影機器やセ

ンサ等の増設が可能のため、本機には小型カメラ1台とレーザマーカ4基を増設している。レーザマーカは水中ドローンと撮影対象物との離隔距離の確認や撮影対象物の概寸測定に活用することが可能である。



図-2 水中ドローン

3. 室内実験による性能確認

(1) 実験内容

港湾空港技術研究所内にある「水中作業環境再現水槽」内に設置した模擬栈橋を用いて、点検用ROV及び水中ドローンの動作性能及び撮影能力の実海域適用性を確認する。以下に実験ケースを示す。

ケース1：波浪及び流れによる外乱のない環境
(波浪なし、潮流なし)

ケース2：実海域程度の波浪及び潮流
(波高0.2m、潮流0.02m/s～0.03m/s)

ケース3：水槽で再現可能な最大の波浪及び潮流
(波高0.5m、潮流1.0m/s程度)

a) 点検用ROVの実験内容

点検用ROVでは、表-1に示すように栈橋下面の撮影状況を模した水槽実験を実施する。実験は5mの等間隔で正方形に設置された鋼管杭4本からなる栈橋模型の上部工下面の撮影を実施する。なお、写真は約2秒毎の自動撮影（インターバル撮影）で取得する。

b) 水中ドローンの実験内容

水中ドローンでは、表-1に示すようにケーソン式や矢

板式等を想定した水槽壁面と長さ5.5mの鋼管杭表面の撮影を実施する。また、ケース1-Bにおいて水中ドローンの操作方法を法線平行方向と法線鉛直方向の2方向で行い撮影時間の比較を行う。

(2) 実験結果

a) 点検用ROVの実験結果

実験結果を表-2に示す。

表-2 点検用ROVの実験結果

実験条件	撮影時間	撮影枚数
ケース1	73秒	33枚
ケース2	85秒	40枚

ケース2の所要時間はケース1の16.4%増、撮影枚数はケース1の21.2%増であった。これらの要因としては、波浪による測位の乱れが考えられる。外乱によって所要時間や撮影枚数の増加が認められたものの、撮影漏れなく所定の撮影を完遂することが出来た。また、ケース2の流況条件では操作をする上でほとんど影響を感じることはなかった。このことから実海域程度の条件下で適用可能であることが確認できた。

b) 水中ドローンの実験結果

実験結果を表-3及び表-4に示す。

表-3 水中ドローンの実験結果（実験内容B）

実験条件	撮影時間	操作方向
ケース1	219秒	法線鉛直方向
ケース1	179秒	法線平行方向
ケース2	158秒	法線平行方向
ケース3	撮影不可	法線平行方向

表-4 水中ドローンの実験結果（実験内容C）

実験条件	撮影時間（1面）	移動時間
ケース1	22秒	43秒
ケース2	21秒	37秒
ケース3	撮影不可	移動不可

表-3よりケーソンや鋼矢板式岸壁などの壁面形状の部材を撮影する場合、法線平行方向に操作した方が効率よく撮影できる結果となった。操作方向が法線鉛直方向は3方向であるのに対して法線平行方向は2方向である。1方向少なくなることで操作の効率が良くなっていると考えられる。これより水中ドローンの移動方向は、撮影する部材形状に合わせて操作が極力少なくなる向きを設定した方が良いと考えられる。

表-1 実験条件及び内容

実験内容			実験条件		
			ケース1	ケース2	ケース3
点検用 ROV	A	水槽内に設置した模擬栈橋での動作及び撮影能力の確認	○	○	—
水中ドローン	B	水槽底面～水面における動作及び撮影能力の確認（ケーソン式や矢板式等を想定）	○	○	○
	C	水槽内に設置した模擬栈橋の鋼管杭での動作及び撮影能力の確認（栈橋鋼管杭を想定）	○	○	○

また、ケース1とケース2ではほぼ同程度の撮影時間となり実海域程度の条件下で適用可能であることが確認できた。ケース3では水面付近は波浪によって水中ドローンが著しく動揺し、操縦者が意図しない方向へ移動させられたため、水槽壁面や鋼管杭の状態を把握できる画像は取得できなかったが、水深4m以深では操作や撮影に支障となる動揺はなくなった。このことから実海域実験を行う際に航跡波など一時的に高い波浪が発生する場合は、水中ドローンを可能な限り深く潜航させて、波浪が収まるまで待機するよう対応を行う。

4. 実海域実験による性能確認

(1) 実験内容

点検ロボットの画像取得能力、動作能力等を実海域において確認し、現場導入する際の課題を明らかにすることを目的とし実施する。

a) 点検用ROVの実験内容

点検用ROVは、**図-3**に示すNo.1栈橋及びNo.2物揚場の栈橋上部工を対象に実験を実施する。

b) 水中ドローンの実験内容

水中ドローンは、**図-3**に示すNo.2物揚場（鋼管杭、鋼矢板）、No.3栈橋（係留索）、No.4護岸（ケーソン）で実験を実施する。鋼矢板、ケーソンについては法線平行方向に水面から海底まで撮影を行う。係留索については、潜航しながら係留索に沿って着底水深まで撮影を行う。



図-3 実験対象となる港湾施設位置

(2) 点検用ROVの実験結果

本実験の動作能力は**表-5**のとおりであった。1日の稼働時間を6時間とした場合、能力は総じて積算基準（有人調査）を上回る結果となった。

表-5 点検用ROVの動作能力

項目	1時間当り	1日6時間当り
No.1 栈橋	529.10 m ² /h	3,174.6 m ² /日 (2.6)
1日目	436.36 m ² /h	2,618.2 m ² /日 (2.1)
2日目	616.43 m ² /h	3,698.6 m ² /日 (3.0)
No.2 物揚場	858.00 m ² /h	5,148.0 m ² /日 (4.2)

※()書きは参考値（1,240 m²/日）の積算基準²⁾との比率

a) No.1栈橋の実験結果

図-4に栈橋の撮影結果を用いた写真の合成結果を示す。

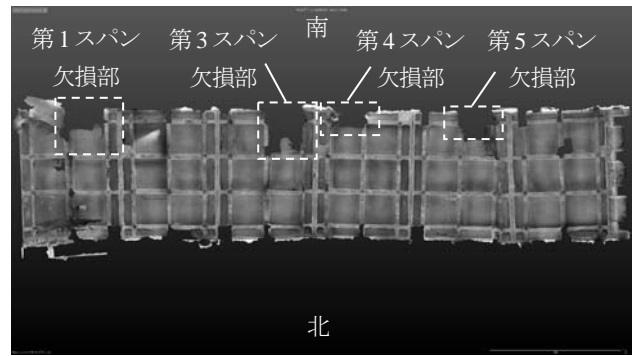


図-4 No.1栈橋の合成結果

第1スパン、第3～5スパンの栈橋南側の一部で大きな欠損部が確認できる。これらの箇所は逆光で写真が不鮮明となっていることや塗装や太陽光の水面反射により床版下面のコントラストが著しく低下している。合成画像の歪みが主に欠損部位の周辺で生じていることから欠損部位を減らすことで、合成画像の歪みも低減できる可能性があると考えられる。

逆光やコントラストの低下を防ぐため、太陽光の入射方向や時間帯に配慮し、環境光に影響されないよう調査を実施することで対策が可能であると考えられる。



図-5 第1スパン南側の欠損部の写真

b) No.2物揚場の実験結果

物揚場では撮影を2回実施した。各回の撮影結果の合成結果を**図-6**に示す。

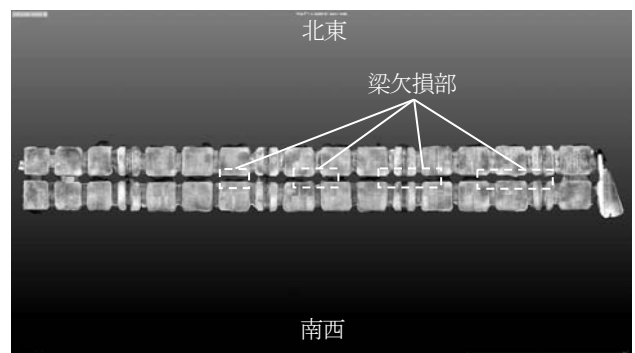


図-6 No.2物揚場1回目と2回目の合成結果

図-6では大きな異常・欠損箇所は見られない結果となった。各回の撮影結果ではそれぞれ異常・欠損箇所があったが、合成することで各回の欠損部位を相互に補完したものと考えられる。しかし、梁部分の部分欠損が見受けられる。これは合成に必要な写真の重複（オーバーラップ）が得られなかったものと考えられる。

対策として潮位の下がる時間帯を選んで写真の撮影範囲を拡大したり、インターバル撮影の間隔を短縮して撮影頻度を増加し、写真のオーバーラップ率を向上させることで合成の成功率が上がるものと考えられる。

(3) 水中ドローンの実験結果

本実験における動作能力は表-6のとおりであった。1日の稼働時間を6時間とした場合、ケーソンや鋼矢板について積算基準（有人調査）を上回る結果となった。なお、表-6の作業能力は撮影対象間の移動時間を含む（No.2鋼矢板とNo.3係留索は撮影時間のみ）。表-7に室内実験ケース2の動作能力と実海域（撮影時間のみ）の動作能力を示す。

表-6 水中ドローンの動作能力

項目	1時間当り	1日6時間当たり
No.2 鋼管杭（栈橋）	108 m/h	648 m/日
No.2 鋼矢板（栈橋護岸）	288 m ² /h	1,728 m ² /日 (1.4)
No.3 係留索（浮栈橋）	180 m/h	1,080 m/日
No.4 ケーソン（護岸）	360 m ² /h	2,160 m ² /日 (1.8)

※()書きは参考値（1,200 m²/日）の積算基準²⁾との比率

表-7 実海域と室内実験の水中ドローンの動作能力

項目	実海域	室内実験
No.2 鋼管杭（栈橋）	396 m/h	1,872 m/h
No.2 鋼矢板（栈橋護岸）	288 m ² /h	612 m ² /h
No.3 係留索（浮栈橋）	180 m/h	
No.4 ケーソン（護岸）	648 m ² /h	612 m ² /h

a) No.2物揚場（鋼管杭、鋼矢板）の実験結果

物揚場（鋼管杭、鋼矢板）では室内実験と比べ動作能力は低下する結果となった。実海域での栈橋下は暗く濁りや浮遊物があり、鋼管杭や鋼矢板を視認することが困難な場合があった。これにより、外観の確認や鋼管杭間の移動に時間を要したことから、動作能力が低下したと考えられる。

b) No.3栈橋（係留索）の実験結果

栈橋（係留索）は他の施設と比べて最も低い動作能力となった。ケーソンや鋼管杭の撮影では水中ドローンを一直線上に操作するのに対して、係留索では前進と潜航の繰り返し操作が必要となり水中ドローンの移動に時間を要したことから、低い動作能力になったと考えられる。

c) No.4護岸（ケーソン）の実験結果

護岸（ケーソン）での動作能力は室内実験と同程度の

結果となった。実験箇所の水域は静穏であり透明度が高かったためと考えられる。

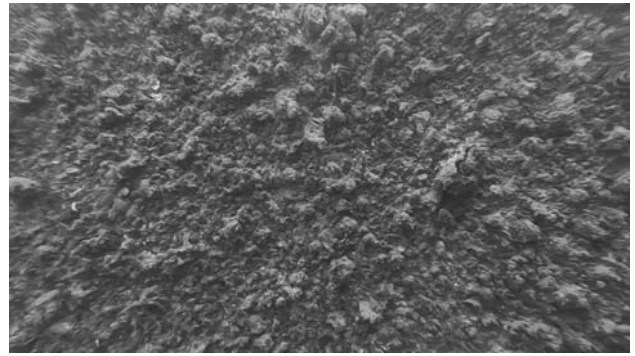


図-7 護岸（ケーソン）の撮影画像（水深3m地点）

これらの結果から点検対象の形状、水中環境により動作能力が左右されるが水中での視認性が悪い場合でも近距離まで近づくことで施設の部材を捉えることが可能であることを確認した。また、水中ドローンは有線であるため本実験中に複数回ケーブルが引っ掛かることがあった。そのため必要に応じ潜水士を配備しておくなど引っかかり対策を講じておく必要があることを確認した。

5. まとめ

実海域実験より点検対象の形状や水中環境に左右されるが概ね点検対象の画像を取得することが可能であることが確認できた。また、ほとんどの施設で積算基準²⁾を上回る動作能力であることから点検ロボットが十分に活躍できる環境を見極めることで、効率化を図ることができると考えられる。加えて、点検ロボットの導入により潜水士等を省人化でき、安全性向上を図ることができると考えられる。

現在は点検ロボットの実用性が十分に認知されていないため点検ロボットが使用された例はほとんどない。本実験の結果から実海域での点検ロボットの実用性を確認することができたが、次のステップとして今回の実験結果を広く認知させ、点検ロボットを導入できる環境を整えることが必要であると考えられる。本実験を実施することで得た知見が点検ロボット導入までの与力になれば幸いである。

参考文献

- 1) 野上周嗣、加藤絵万、田中敏成：栈橋上部工点検用ROVおよび点検診断支援ソフトによる点検作業の効率化、第74回土木学会年次学術講演会講演概要集
- 2) 国土交通省港湾局 HP：維持管理計画策定のための現地調査積算基準、https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000019.html (2020年6月17日アクセス)

超音波による単床ブロック護岸の現況調査

小林 勇一¹・永長 哲也¹・石井 克己²

¹国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地機械技術チーム
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌河川事務所 第1工務課
(〒005-0032 札幌市南区南32条西8丁目2-1) .

茨戸川の伏古別地区（北海道石狩市）には、石狩川治水事務所の初代所長である岡崎文吉により考案された、岡崎式単床ブロックによる護岸が現存している。この護岸は施工後100年以上が経過しており、経年劣化による崩れや欠落等が懸念されているが、水の濁りや土砂の堆積により、目視など人力による水中部の調査が困難である。そこで、護岸の現況を簡易に確認するため、超音波のパラメトリックソナーによる河床計測試験を実施し、教師あり学習による護岸ブロック有無の判別を試行した。

キーワード 河床護岸調査, 超音波, ソナー, 教師あり学習

1. はじめに

茨戸川の伏古別地区（北海道石狩市）には、岡崎式単床ブロックによる護岸が現存している（写真-1）。

岡崎式単床ブロックとは、明治42年に石狩川初の本格的な治水計画「石狩川治水計画調査報文」をまとめ、明治43年に石狩川治水事務所の初代所長に就任した、岡崎文吉により考案された鉄筋コンクリートブロックである。岡崎文吉は、岡崎式単床ブロックによる護岸工法を開発し、石狩川治水事務所在任中の明治43年から大正6年にかけて、石狩川（現在の茨戸川）で施工した。その一部は現存しており、平成27年度に土木学会推奨土木遺産に認定されている。

茨戸川の伏古別地区に現存する護岸は、大正5年から大正6年にかけて施工されたもので、100年以上が経過し

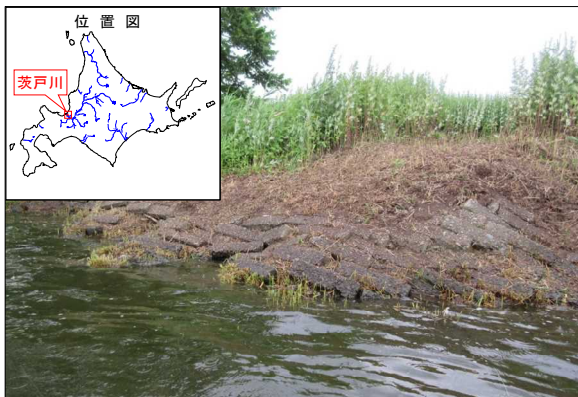


写真-1 現存する岡崎式単床ブロック護岸

ている。そのため、経年劣化による崩れや欠落等が懸念されているが、水の濁りや土砂の堆積により、目視など人力による水中部の調査が困難であることから、水中部の護岸の現況を確認できる調査技術が求められている。

寒地機械技術チームでは、超音波のパラメトリックソナーを活用し、コンクリート構造物の水中部の圧縮強度の推定に向けた計測試験を実施している¹⁾。河床護岸の調査においても、パラメトリックソナーにより護岸の有無が判別できれば、現況確認に活用できる可能性がある。

そこで、護岸の現況を簡易に確認するため、パラメトリックソナーによる河床計測試験を実施した。

2. 岡崎式単床ブロックの概要

岡崎式単床ブロックを写真-2に示す。大きさは製造年により、高さ約8～15cm、幅約9～15cm、長さ約50～90cmで変遷している。写真は現地から採取したもので、大きさから大正3～6年に製造されたものと考えられる。



写真-2 岡崎式単床ブロック護岸

ブロックには連結孔が2箇所あり、亜鉛メッキの鉄線に通して、上下のブロックが互い違いになるように施工される（写真-3）。

岡崎式単床ブロックによる護岸工法は、経済性、強度、耐久性、施工性に優れるほか、河床の変形や急勾配にも適応し、当時としては画期的な治水技術であった。そのため、石狩川のほか天塩川、十勝川などの護岸工法として昭和50年代まで施工が行われ、さらに利根川、鬼怒川など全国の河川に広まったほか、アメリカのミシシッピ一川でも導入された。



写真-3 岡崎式単床ブロックの施工状況

3. パラメトリックソナーの概要

使用したパラメトリックソナーを写真-4に示す。

パラメトリックソナーとは、1つの送受波器から、わずかに周波数の異なる2つの高周波（以下、「1次波」という。）を同時に同軸方向に高圧で送信することで、非線形相互作用により低周波（以下、「2次波」という。）を生成するものである²⁾。一般的に、音波は周波数が高いほど、指向性は良いが透過性は低く、周波数が低いほど、指向性は悪いが透過性は高いという性質を持つ。この両者の長所を持つものがパラメトリック送信技術であり、指向性の良い1次波によって透過性の高い2次波を生成することで、1次波と同等の指向性を2次波にも保つことができる。この2次波の周波数は、海底に浸透するのに十分なほど低く、海底地層探査技術として利用されている³⁾。



送受波器(トランスデューサ)



パワーアンプ

写真-4 パラメトリックソナー外観

4. 室内計測試験

パラメトリックソナーにより照射した超音波による、護岸ブロックからの反射波を確認するため、室内の水槽で計測試験を実施した。

(1) 計測試験方法

パラメトリックソナーにより、水槽内に設置した岡崎式単床ブロック（以下、「護岸ブロック」という。）へ下向きに超音波を照射し、反射波を計測した（図-1）。

現場の護岸ブロックは土が堆積している可能性があることから、計測条件は、護岸ブロックが露出している場合、土中10cmに埋没している場合、および土のみの場合の3条件とした（図-1①、②および③）。

パラメトリックソナーの計測条件は、1次波の中心周波数は100kHz、2次波の周波数は10kHz、超音波の送信間隔は0.2秒、サンプリング間隔は1μsである。

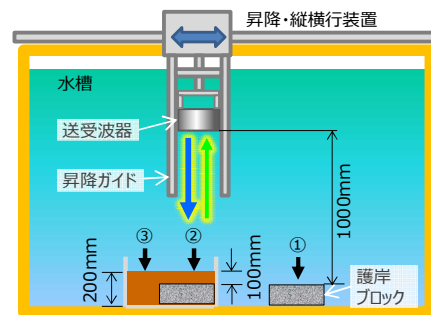


図-1 護岸ブロックの試験方法

(2) 計測結果

パラメトリックソナーにより受信する反射波は、1次波と2次波が含まれた複合波となる。そのため、バンドパスフィルター処理により、1次波（100kHz帯）と2次波（10kHz帯）に分離し、それぞれの波形を確認した。

a) 1次波

1次波の反射波を図-2に示す。縦軸は波形の振幅、横軸は送受波器との距離である。

まず、条件①の場合、距離1.0m付近に片振幅が約3.0Vの反射波を確認した。これは、露出した護岸ブロック表面からの反射波と見られる。

次に、条件②の場合、距離0.9m付近に片振幅が約1.2Vの反射波、および1.0m付近に約1.8Vの反射波を確認した。これは、土表面および土中の護岸ブロック表面からの反射波と見られる。

最後に、条件③の場合、距離0.9m付近に片振幅が約1.4Vの反射波を確認した。これは、土表面からの反射波と見られる。

以上より、各条件とも護岸ブロックおよび土からの反射波を確認することができた。

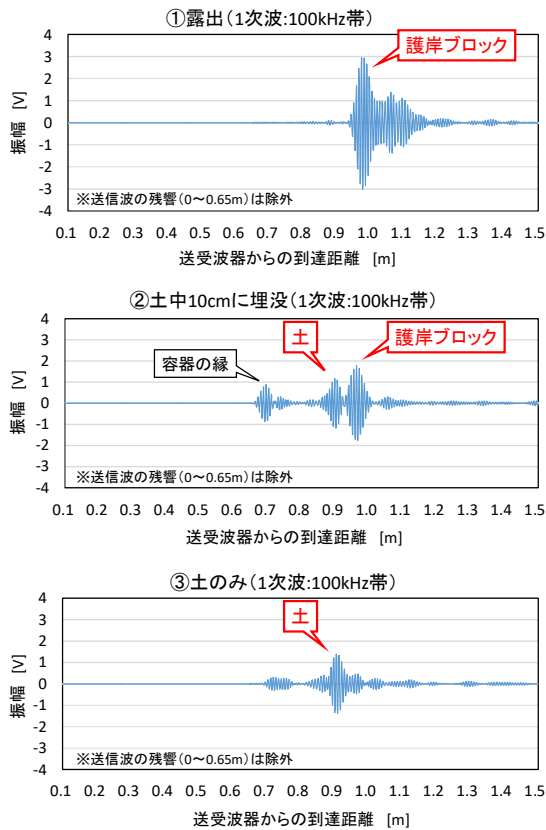


図-2 反射波 (1次波)

b) 2次波

2次波の波形を図-3に示す。

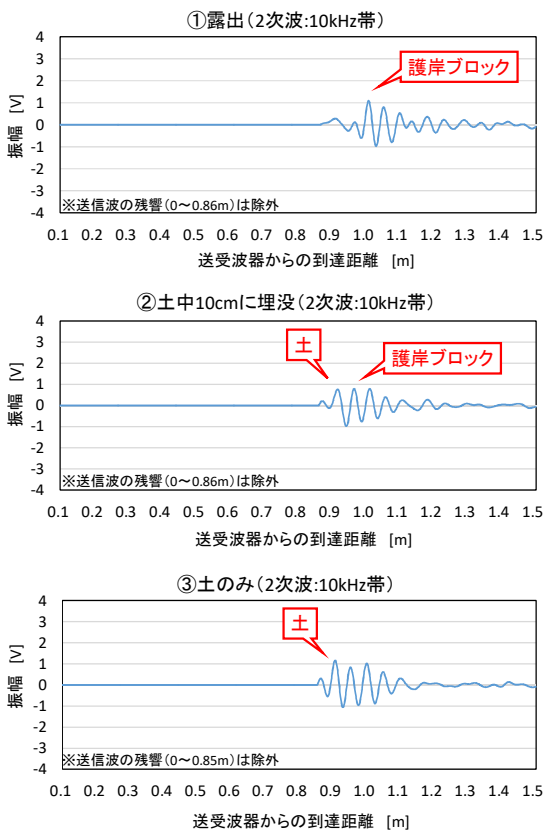


図-3 反射波 (2次波)

各条件とも反射波は確認できたが、片振幅の大きさは0.8~1.2V程度であり、大きな違いは見られなかった。また、条件②の場合、土と護岸ブロックからの反射波の区別は困難であった。

以上より、2次波からは護岸ブロックの判別は難しいため、1次波による判別を行うこととした。

(3) 反射波の判別

a) 判別方法

反射波による護岸ブロックの判別にあたっては、水中のコンクリートの圧縮強度を推定するために作成したニューラルネットワークによる判別を試行した。このニューラルネットワークは、圧縮強度の異なる4種類のコンクリート供試体により教師あり学習を行ったもので、反射波を4種類 (N50, N60, N70およびN80) に判別するものである¹⁾ (写真-5,図-4)。

また、護岸ブロックの圧縮強度を確認するため、JIS A 1108に基づく圧縮強度試験を実施した。圧縮強度は、平均で20.0N/mm²となった (表-1)。

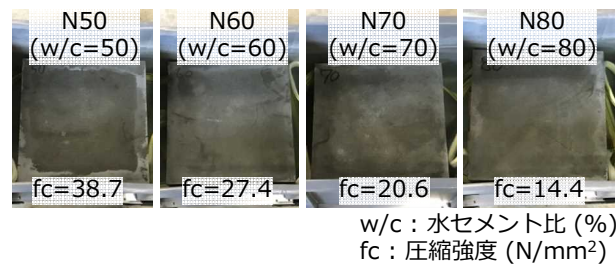


写真-5 4種類のコンクリート供試体

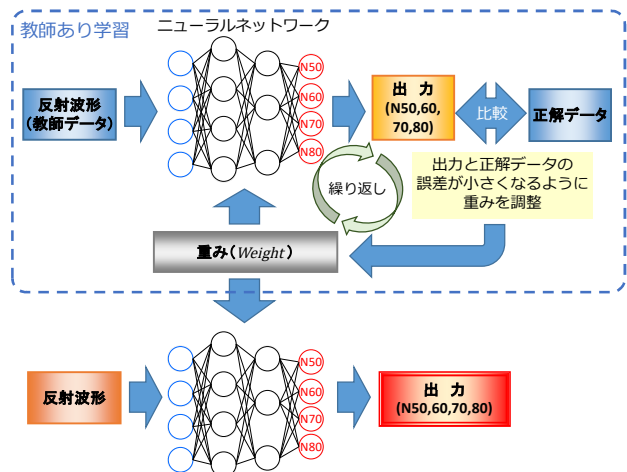


図-4 教師あり学習のイメージ図

表-1 護岸ブロックの圧縮強度試験結果

供試体	大きさ (mm)		圧縮強度 (N/mm ²)	
	直径	高さ		平均
1本目	58.6	129.4	17.5	20.0
2本目	58.6	128.1	23.1	
3本目	58.6	127.3	19.4	

b) 判別試験

室内計測試験で取得した図-2の反射波（1次波）について、ニューラルネットワークによる判別を行った。判別結果を表-2に示す。

判別の結果、条件①ではN70、条件②ではN80、条件③ではN50と判別した。なお、条件②は護岸ブロックの反射波のみを抽出している。

護岸ブロックの圧縮強度はN70に近い値であるので、条件①については、正しく判別したと考えられる。しかし、条件②はN80、条件③ではN50と判別しており、これは、ニューラルネットワークの教師データに土中に埋没したコンクリート、および土のデータが入っていないことが原因と考えられる。

そこで、条件②をN70、条件③を「土」として教師データに加えたうえで、再度、教師あり学習を実施し、ニューラルネットワークの重みを修正した。

重み修正後の判別結果を表-3に示す。条件①と②をN70、条件③を「土」と判別した。

以上より、修正後の重みにより反射波の判別を行い、N70を護岸ブロックとして判別することとした。

表-2 反射波（1次波）の判別結果

条件	判別結果
① 露出	N70
② 土中10cmに埋没	N80
③ 土のみ	N50

表-3 反射波（1次波）の判別結果（重み修正後）

条件	判別結果
④ 露出	N70
⑤ 土中10cmに埋没	N70
⑥ 土のみ	土

5. 現地計測試験

(1) 試験実施箇所

現地計測試験の実施箇所を図-5に示す。茨戸川伏古別地区の護岸工事終点標付近の延長約1,300mで実施した。

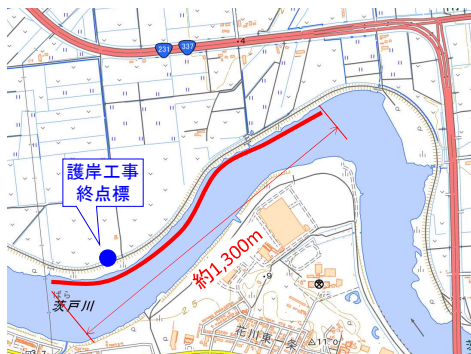


図-5 現地計測試験 実施箇所
国土地理院ウェブサイト⁴⁾に加筆

(2) 計測方法

計測は、双胴フロートに計測機器を取り付け、船外機付ボートにより曳航し実施した（写真-6、写真-7）。送受波器は、河床を計測するため送受波面を下向きとした。また、測位のためGNSSアンテナを使用した。

ボートには、パワーアンプ、バッテリー、解析用PC等の機材を積み込み、側面に双胴フロートを固定した。

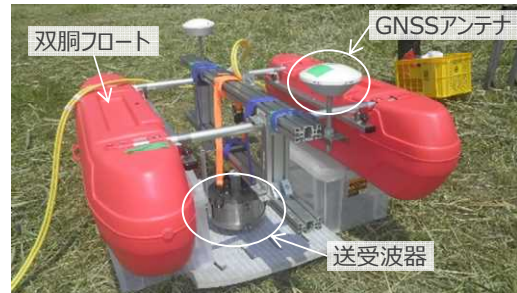


写真-6 双胴フロートへの計測機器取付状況



写真-7 現地計測試験状況

(3) 計測結果

a) 計測軌跡

GNSSにより測位した計測軌跡を図-6に示す。今回の計測では、約50,000点の波形データを取得した。なお、超音波の送信間隔は0.2秒、サンプリング間隔は1μsである。

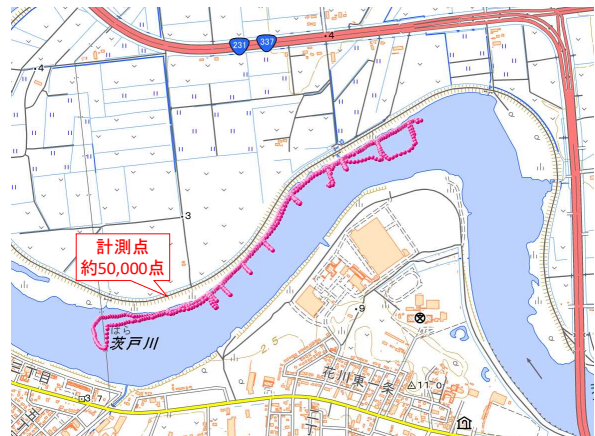


図-6 現地計測試験 計測軌跡
国土地理院ウェブサイト⁴⁾に加筆

b) 計測波形

計測した生波形の一例を図-7に示す。河床からの反射波が正常に取得できていることを確認した。

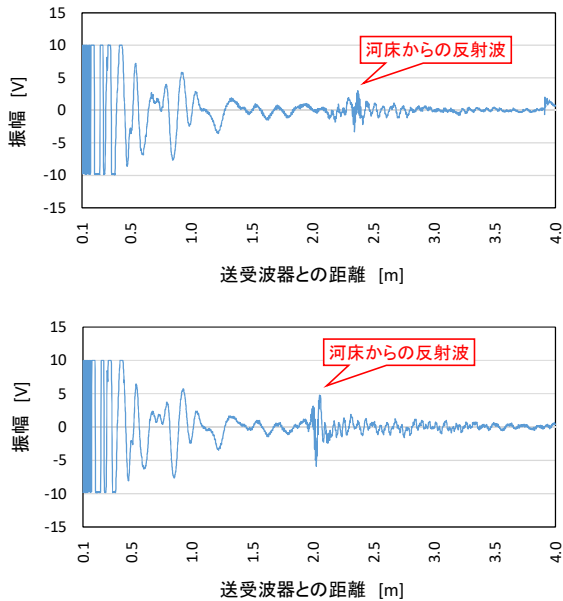


図-7 計測結果の一例 (現地計測試験)

(4) 護岸ブロックの判別結果

現地計測により得られた河床からの反射波について、バンドパスフィルターにより1次波を抽出し、ニューラルネットワークに入力することで、護岸ブロック有無の判別を行った。そのうち、護岸ブロックがあると判別した箇所を図-8に示す。

6. まとめ

老朽化した河床護岸ブロックの現況を簡易的に確認するため、パラメトリックソナーによる河床計測を実施した。

室内計測試験の結果、パラメトリックソナーで計測した複合波から分離した1次波が、護岸ブロック有無の判別に有効であることがわかった。そのため、現地計測試験で得られた波形について、1次波による判別を実施した。

護岸ブロックの判別にあたっては、コンクリート構造物水中部の圧縮強度を推定するために作成したニューラルネットワークによる手法が有効であることを確認した。



図-8 護岸ブロックがあると判別した箇所

国土地理院ウェブサイト⁴⁾に加筆

現地計測試験の解析結果については、護岸ブロック有無の境界付近を水中カメラロボット等により調査することで、さらに判別精度を向上できる可能性がある。

また、ニューラルネットワークによるコンクリート構造物水中部の圧縮強度の推定技術については、反射波データの収集を行うとともに、教師データの追加やデータの前処理方法の見直しなどにより、判別精度の向上についての検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 小林勇一，澤口重夫，岸寛人：コンクリート水中部の超音波による非接触劣化度調査について，平成 30 年度国土交通省国土技術研究会，pp.2-17-2-22，2018.
- 2) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用，成山堂書店，pp.277-279，2004.
- 3) F. Madricardo, S. Buogo, P. Calicchia, G. B. Cannelli, S. Donnici, A. Lezziero. : Acoustical Prospecting in Extremely Shallow Water in The Venice Lagoon, Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 2006.
- 4) 国土地理院ウェブサイト：<https://www.gsi.go.jp>

太田川における次世代流量観測機器の 精度検証評価に関する取り組み

鈴木 航平¹ 岩本 晋治¹

¹中国地方整備局 太田川河川事務所 調査設計課 (〒730-0013 広島市中区八丁堀3-20)

国土交通省は、革新的河川技術プロジェクト（第4弾）として、無人化・省力化に向けた「流量観測機器」の開発を進めている。太田川河川事務所では、取組対象となる3河川のうち1河川として本プロジェクトに携わり、現地での電波流速計・画像流量観測機器を用いた計測精度の検証・評価を行った。その結果、快晴時においては、両手法とも浮子・ADCPから得られた結果に概ね一致しており、良好な観測精度を示す一方、画像流量観測機器は、夜間降雨時には流量観測精度が低下することが分かった。また、電波流速計は環境依存性が低く、昼夜問わず安定した精度を保ちながら計測でき、設置場所がある場合に有効な手法であることを示した。

キーワード 高水流量観測、流量観測機、電波流速計、画像流量観測、省力化

1. 序論

従来の人員による高水流量観測において、観測体制の確保や浮子観測自体が持つ精度の不安定さは喫緊の課題である。また、作業基地から上流まで長距離を有する河川では、上流域の観測所の流量ピークに間に合わない等、河川ごとに様々な問題点も見られている。このような問題の解決には、無人流速計測機器の導入が有効であると考えられるが、現地の適用例が少なく、計測精度の検証も十分になされていないことから、一般的な手法として確立されていない。このため次世代の流量観測機器の精度検証を行い、計測手法の確立を図るものである。

国土交通省は、革新的河川技術プロジェクト（第4弾）として、このような課題解決（無人化・省力化）に向けた流量観測機器の開発を進めている。太田川河川事務所では、取組対象となる3河川のうち1河川として本プロジェクトに携わり、先駆的な取り組みを行ってきた。本稿では、従来から行ってきた画像流量観測に加え、他の流速計測機器を用いた場合の精度検証・評価について報告を行う。

2. 各流量観測手法の概要

流量を測る一般的な方法として、河川のある地点の流水断面積と流速を測り、これに乗じることで流量を算出している。断面積は洪水前観測横断面データを用い、水位は水位計等でリアルタイムで分かるものとする。流量を知るための未知数は流速のみとなる。本文では、一般的な流量観測所における横断的な水位差が大きくない場合を想定し、流速計測精度の高度化について述べる。

無人流速観測機器による計測手法は、水に接した

状態で流速の測定を行う接触型と水に触れずに水面から離れた位置で計測する非接触型に大別される。接触型は計測の特性上、流木・ゴミの浮遊により計測が困難になる可能性があり、常時観測可能であるとは言いがたい。そのため、本文では非接触型（電波流速計・画像流量観測機器(図-1)）に着目し、検討を行



図-1 電波流速計，画像流量観測機器

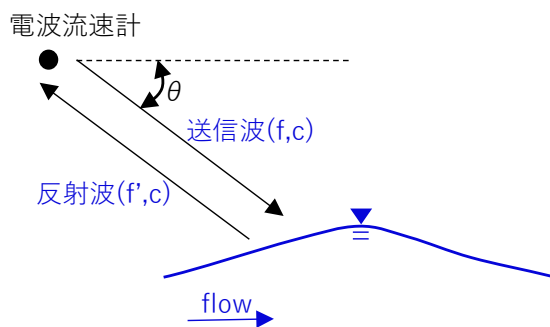


図-2 電波流速計による流速計測手法

った。以下では本検討で使用した各流速計測手法の概要について説明する。

(1)電波流速計

電波流速計による非接触機器を用いた流速の計測手法は、図-2のように空中から水表面に向かって斜め上方から電波を放射し、水表面に形成されている波などの凹凸からの反射電波を計測し、そのドップラー効果を利用して表面流速を計測するものである。元々、設置型として開発されていたが、最近では、可搬型タイプも製品化され、より簡便な流速計測が可能となっている。1観測所あたりのコストは、25,000千円-30,000千円と比較的高価である。前述のように、電波流速計は波などの凹凸からの反射を利用して流速を測定するため、潮位などによりバックウォーターが生じ、水面勾配がなくなることで鏡面反射してしまう箇所や、橋梁等の設置場所がない場合には流速の計測が難しいという点が挙げられる。

(2)画像流量観測機器

画像流量観測とは、洪水中に観測された画像データから、処理ソフトを用いて横断流速分布を算出する流量観測手法である。本検討では、STIV(Space Time Velocimetry)法を用いて流量計測を試みている。これは、図-3に示すように、基準となる検査線を河川映像に配置し、川の表面に発生する波紋や浮遊物が通過した時間から検査線上の表面流速を求める事が可能なソフトである。この手法は川の波紋等を捉えるだけで良く、画像が粗くても計測が可能であることから、既設のCCTV(closed circuit television)カメラを用いて計測を行えるのも大きな利点の1つである。値段は5,000千円-7,000千円であり、電波流速計に比べ安価である。また、橋梁等がない箇所でも簡単に設置でき、場所によらない計測を行うことができる。本検討では、既設のCCTVカメラに加えて、夜間でも撮影ができるよう赤外線カメラを設置し観測を行った。

3. 検討場所・手法

検討場所は図-4に示すように、飯室箇所とした。また、画像流量観測については、図中青点の場所においても別途検証を行っている。図-5は、飯室観測地点の平面図と各流量観測手法の観測位置図であり、以下にその詳細を示す。

飯室観測地点は上流に湾曲部が存在するが、概ね直線区間に位置しており、流量箇所としては理想的な線形をしている。また、飯室観測地点には左岸に既存のCCTVカメラが設置しているのに加え、下流に橋梁があり、電波流速計の設置が可能である。そのため、本観測所では、新たに設置した赤外線カメラと電波流速計を用いて検証を行った。電波流速計は、

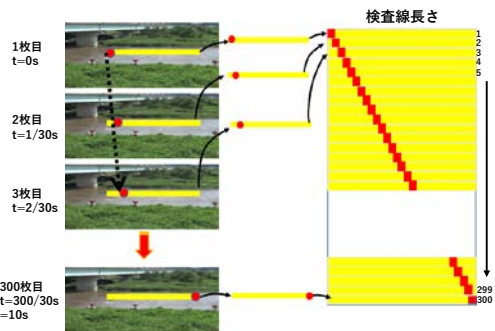


図-3 STIVによる流速算定方法¹⁾

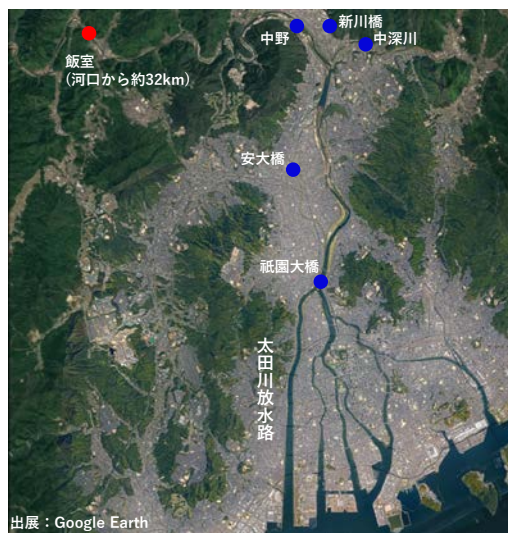


図-4 検討場所



図-5 飯室観測箇所平面図・流量観測位置図



図-6 ADCP概要図

図-5に示すように、壬辰橋下流側に常時2基を固定設置している。洪水時には、可搬機器を移動させることで、浮子観測の際に用いる標準法と同様の13側線の計測を行った。

飯室観測地点での照査用データとして、表面浮子・ADCPによる計測結果を用いた。ADCPとは、電波流速計と同様ドップラー効果を利用した流速計であり、本検討では、ADCPを搭載した橋場操作船を操縦して計測を実施する(図-6)。水面に接して測るために、鉛直方向の流速分布を算出することが出来るほか、風速や降雨強度などの環境に依存せず観測出来ることが利点として挙げられる。計測断面は、壬辰橋下流約10m-20mとしている。

図-7, 8は、飯室観測所での観測水位ハイドロ・ハイトグラフを示している。電波流速計、浮子観測、ADCPは氾濫注意水位越えの洪水(1, 2波目)以降で計測を実施している。また、画像流量観測については、水防団待機水位程度の出水(洪水3波目)にて計測した。また、両洪水とも風は微弱であったため、風による影響は少ないと考えられる。

4. 計測結果

図-9は、飯室流量観測地点における氾濫注意水位付近の橋梁直下の流況に浮子の流下軌跡を重ねたものである。右岸側橋脚下流では、水面の乱れが認められるが、第1見通し断面と第2見通し断面の間は安定した流況が見られる。また、浮子流下軌跡からも、概ねまっすぐ流下していることが確認出来る。

図-10, 11は、電波流速計を用いた際の、各洪水水位ピーク付近の検証横断面表面流速分布を示している。どの洪水においても、ADCPと電波流速計の全体的なトレンドは概ね一致しており、氾濫注意水位程度の洪水であれば、電波流速計を用いて流量観測を行うことが可能であると考えられる。また、空間変動の大きいADCPに対して、電波流速計は安定的な値を取っている。これはADCPがほぼ瞬間値であるのに対して、電波流速計は1分間平均値を取っているためだと考えられる。浮子観測による流速値と比較すると、電波流速計と概ね一致しているが、やや過大評価となる傾向にある。

図-12, 13は、赤外線カメラを用いた際の、検証横断面表面流速分布を示している。遠赤外線カメラ画像からの画像流量解析においても、横断面全体の流速分布を概ね良好に再現できていることから、中昼時の水防団待機水位程度の洪水であれば、自動計測が可能であることが分かった。しかし、植生部分で過大値を算出する場合があります。植生伐採等の事前の対応が必要となる可能性がある。一方、日中・降雨

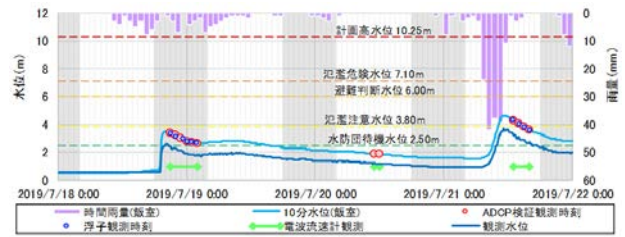


図-7 飯室観測所における

水位ハイドロ・ハイトグラフ(1,2波目)

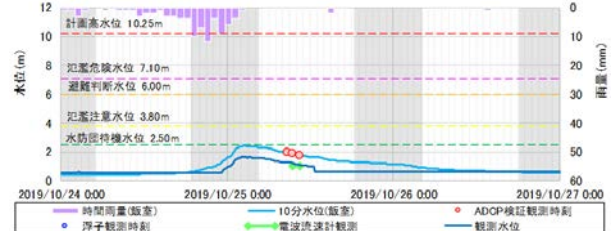


図-8 飯室観測所における

水位ハイドロ・ハイトグラフ(3波目)



図-9 飯室観測地点下流の流況

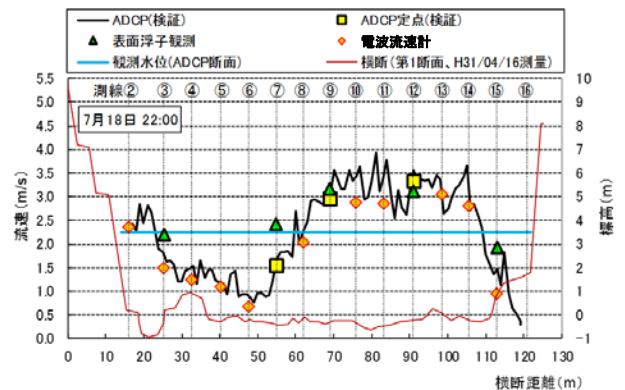


図-10 横断流速分布(7月18日22:00時点)

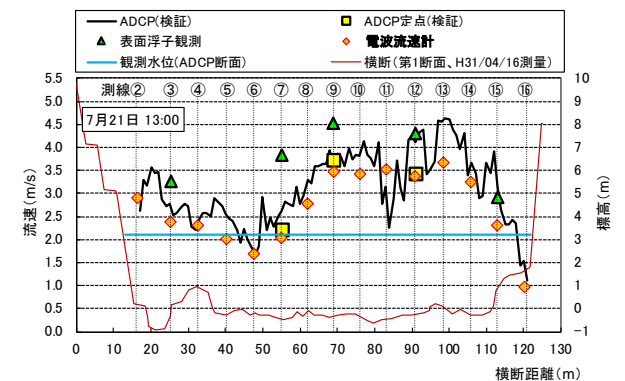


図-11 横断流速分布(7月21日13:00時点)

時や夜間・降雨時のやや低水寄りの環境では、流速検出が出来なかった。図-14は時系列的に撮影された赤外線カメラ画像を示す。日中晴天時は、良好な波紋移流が視認できている。深夜において、ADCP比較時より水位が高いが、指紋視認性が著しく低下していることがわかる。0時と23時を比較すると23時の方が水位が低い一方、映像が鮮明であることから、温度を感知して可視化する赤外線カメラが、降雨によって観測に必要な熱エネルギーを十分得られなかったためだと考えられる。夜間の降雨後に視認性が低下するのは他観測地点でも生じており、夜間時の画像による流量解析には課題が見られた。

5. まとめと今後の課題

快晴時においては、両手法とも浮子・ADCPから得られた結果に概ね一致しており、良好な計測精度を示すことが分かった。また、電波流速計は環境依存性が低く、昼夜問わず安定した精度を保ちながら観測を行うことが出来た。一方、橋梁などの設置場所を要するほか、コスト面で懸念があり、低価格の電波流速計の使用・計測測線数を減らした際の精度検証等、簡易に流速計測を行うための取組を今後実施する必要がある。赤外線カメラは降雨時並びに降雨後に画像が不鮮明となり、夜間の降雨時には本計測手法の適用に課題が見られた。今後、CCTVカメラの更新にあわせて鮮明度が格段に向上するため、画像流量観測も有効な手法となりえる。

本検討により、それぞれの無人流速計測手法には適用限界があり一つの計測機器を用いて流量算出を行うのは難しいことが分かった。電波流速計は橋梁があり鏡面反射が生じない場所(飯室観測所)、画像流量観測は橋梁がない場所(中野観測所(図-4の青点))で主に使用する、などのようにそれぞれの計測機器の利点

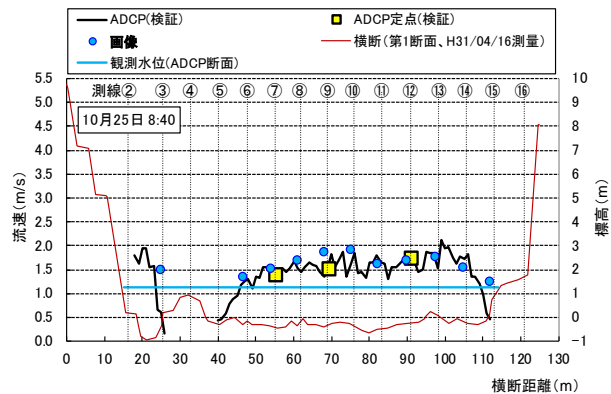


図-12 横断流速分布(10月 25日 8:40時点)

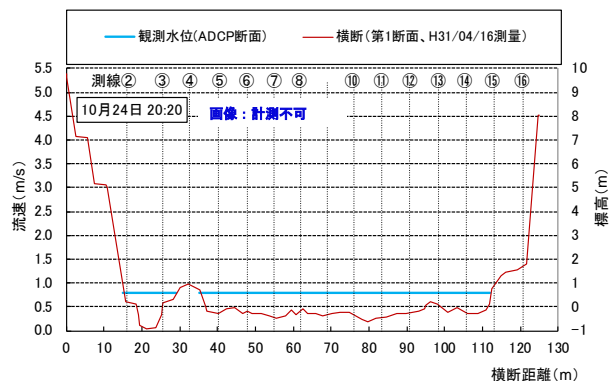


図-13 横断流速分布(10月 24日 20:20時点)

を見極めて流量観測を行っていくことが重要である。そのためには氾濫注意水位を超過するような洪水や特異な環境での精度検証を行い、更に計測機器の特徴を確認していく必要がある。

参考文献

- 1) 流量画像解析手法, 河川情報取扱技術研修河川情報センター資料, 藤田一郎, 一部加筆。

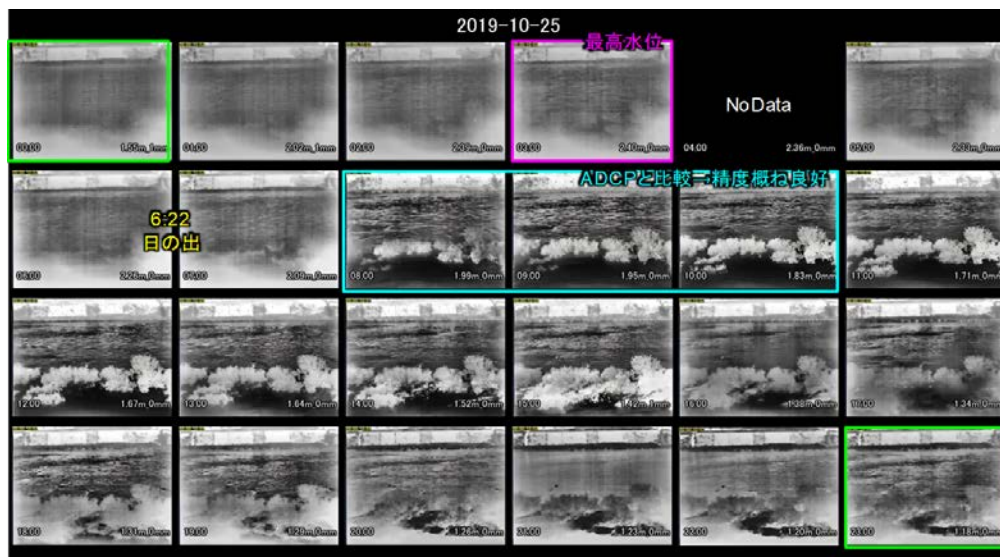


図-14 赤外線カメラ時系列図

業務ASP活用報告

大池 賢一¹・中正 裕史²・鈴木 崇之³

¹東北地方整備局 鳴瀬川総合開発工事事務所 工務課長(〒989-6117宮城県大崎市古川旭三丁目8-18)

²東北地方整備局 鳴瀬川総合開発工事事務所 工務課 専門員(〒989-6117宮城県大崎市古川旭三丁目8-18)

³東北地方整備局 鳴瀬川総合開発工事事務所 工務課 係長(〒989-6117宮城県大崎市古川旭三丁目8-18)

鳴瀬川総合開発工事事務所は、ダムの新規建設と既設ダムの再開発を行う2ダム1事業を実施しており、全国に10事務所ある「i-Constructionモデル事務所」の1つである。

2019年度に実施した業務において、工事で実績のある情報共有システム(ASP)や情報化施工の取り組みにヒントを得て、「調査・設計業務を対象とした情報共有システム(ASP)の活用」を試行した。

その結果、「生産性の向上」と「合意形成の迅速化」に対し有効である事が確認できたので、ここに報告する。

キーワード 業務間情報共有, クラウド, Webカメラによる検尺

1. はじめに

現在、当事務所では基本計画及び用地調査に関する事のほか、ダム貯水池に沈む国道347号について、道路付替に関する道路管理者との基本協定締結に向け、業務を遂行中である。

この付替道路に関する業務については、2019年度に地質調査・道路設計・橋梁設計の各業務を発注し、複数の受注者により同時に進捗させることとしたが、交わされる膨大な情報を効率的に処理する方法が必要となり、「調査・設計業務を対象とした情報共有システム(ASP)の活用」を試行した。実施にあたっては、「Web会議機能を地質調査で実施する遠隔臨場のツールとして利用」「Web会議機能とクラウド機能を情報共有のツールとして利用」する手法をとった。

本試行により認められた「生産性の向上」と「合意形成の迅速化」に対する有効性を、活用事例を併せて報告する。

2. 業務への情報共有システム(ASP)活用の背景

2019年度の付替道路に関する業務は、9件で「75孔の地質調査」「約5.4kmの道路詳細設計」「9橋の橋梁予備設計」を実施した。その業務ボリュームから、地質調査では位置確認や検尺など立会への臨場に、道路と橋梁の設計業務では規格・構成・機能・地形・地質等の条件などの確認と適用判断に、多くの時間と労力がかかるものと想定された。

よって、「情報共有により効率的な業務履行と成果の品質確保を目指す」との観点に立ち、工事で実績のある情報共有システム(ASP)活用の試行を考案した。

工事における情報共有システム(ASP)利用は、受発注者の間に限定して、契約図書等で定められた各書類の提出等の他、出来形や材料確認をWebカメラによる遠隔臨場で実施している。本試行は、これを一歩進めて「受発注者全員での情報共有を行う」「地質調査から設計業務まで一連で取り組む」という点を加えて実施している。



図-1 業務概略図

3. 情報共有システム（ASP）活用の事例と効果

(1) 生産性向上の試み

当事務所から地質調査地までは車で片道 60 分と、徒歩（又はモノレール）で約 20 分を要する。さらに検尺で約 30 分/孔を要するため、検尺 1 孔当たり約 190 分/孔の時間が必要となる。当該年度の地質調査ボーリング全 75 孔を 1 日 1 孔のペースで臨場による検尺を行った場合、移動にかかる時間だけで 25.8 日（7:45/日換算）も要する試算となった。



写真-1 急崖地ボーリングの状況

このことから、生産性向上（移動時間の省力化）を目的として、情報共有システム（ASP）のWeb会議機能を活用した「Webカメラによる検尺」を試行した。その方法は、Web会議を実施できる環境を現場へ持ち出し、現場から配信されるリアルタイム動画を受信し、臨場に替わり検尺を行うものである。

a) Webカメラによる検尺

現場からの動画配信では、ウェアラブルカメラの使用を検討したが、当該現場のほとんどが足場の悪い山岳傾斜地であることから、安全確保を最優先し、固定カメラによる撮影とした。



写真-2 Webカメラによる検尺の手順書

実施に先立ち、受注者との間で撮影の対象や範囲、現場作業員の動きなどについて確認し、実際の撮影で生じた不具合等についても改善改良を重ね、実践的な手順書を作成した。



繰り返す

- 確認内容
- ・位置情報（簡易 GPS）
 - ・ロッド長と本数
 - ・地形傾斜角度

図-2 Webカメラによる検尺の概略手順

本試行では、地質調査ボーリング全 75 孔の内、動画配信環境（電波状況）の良い区域にある 29 孔で「Webカメラによる検尺」を実施した。これにより、約 10 日分（勤務 7:45/日換算）に相当する移動時間の省力化を図ることに成功し、生産性向上に大きく寄与した。また、動画であっても臨場と同等に検尺する事が可能であることも確認でき、十分な成果を得た。

受注者からも「日程調整すべき時間は、検尺に要する時間のみでよい。」「現場作業従事者の待機時間が短縮される。」など有意義であったとの意見が得られ、受発注者双方に大きな利点がある事が確認できた。

地質調査ボーリング箇所によっては、1.0km を超える

モノレール移動を伴う場合もあり、「Webカメラによる検尺」への期待は大きい。

その他、現地に不慣れな者でも安全に確認できる事、身障者雇用創出の可能性がある事、といった点も本手法の利点として挙げておく。

表-1 Webカメラによる立会の効果

	臨場立会	Webカメラ立会
自動車移動	60分(片道)×往復	0分
現場内移動	20分(片道)×往復	0分
合計	160分	0分

実施 29孔 × 160分 / 60分 / 7:45(勤務時間)

⇨ 10日分の時間を省力化

(2) 合意形成の迅速化の試み

付替道路の設計にあたり、業務着手後すぐに地質調査・道路設計・橋梁設計の各受注者及び発注者による合同打合せを実施し、条件やスケジュールの確認の他、関連する他業務への要望などについて意見を交わした。



写真-3 合同会議の状況

さらに、土工・擁壁等構造類・橋梁・トンネルなど各構造に共通する「設計統一事項(案)」を作成し展開することで、山岳特有の地形・地質の変化に富んだ条件下においても効率的に業務進捗が図られるよう取り組んだ。

このような中、調査業務と設計業務、道路設計と橋梁設計といった関係し合う業務間でも情報共有を図る事が、効率的な業務履行と合意形成の迅速化に有効と考え、情報共有システム(ASP)のWeb会議機能とクラウド機能の活用を試みた。

a) Web会議

前述した合同打合せは、対象業務9件で参加者が30名にのぼる。業務の進捗に合わせ、関係する業務間で重要事項の相談と問題解決が不可欠となってくるが、こうした合同打合せを何度も実施することは現実的ではない。

そこで、関係する複数業務と発注者とが多数参加できる「Web会議」を実施することにした。

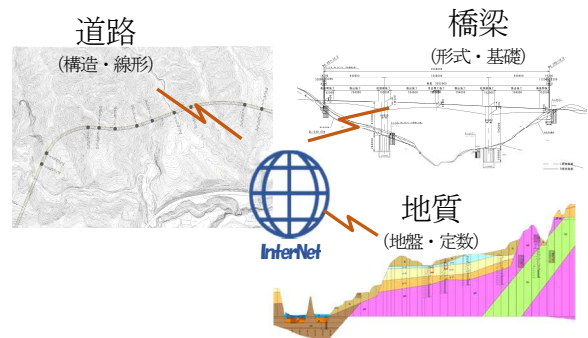


図-3 業務間の関わりイメージ

これにより、調査業務と設計業務の双方から提供される情報に対し、確認・考察・意見・要望などを交えて打合せの事が可能となり、早い段階での問題解決が図られるなど、通常の合同会議と遜色のない成果が得られた。

また、Web会議には、本社または自宅から参加する者あり、新型コロナウイルス感染が始まる前の当時としては、相当に画期的であった。今日では、発注者自らも自宅からWeb会議に参加するなど、既に珍しく無い光景となっている。

受注者の反応は「移動時間に要する時間を他に割り当てられる」「遠方からでも参加できる」など肯定的であり、関係する業務間のみでのWeb会議は、2019年度3回、2020年度5回実施された。



図-4 Web会議の状況

b) クラウド

情報共有を行う場合、ほとんどの場合はメールの送受信で済むが、さらなる効率化と簡素化を求め、データの圧縮解凍・パスワード設定などが不要で、誤送信リスクを確実に回避できる点などを期待してクラウド機能を活用した。

各業務より共有された情報は、PDFデータやCADデータを中心に全部で238ファイルあり、内訳は受発注者間で133ファイル(56%)、受注者間で105ファイル

(44%) となった。

業務間での共有されたファイル数が4割を超えており、合意形成を図る上で有効な手段として活用された事が確認でき、設計成果の品質確保に有益であったと感じている。

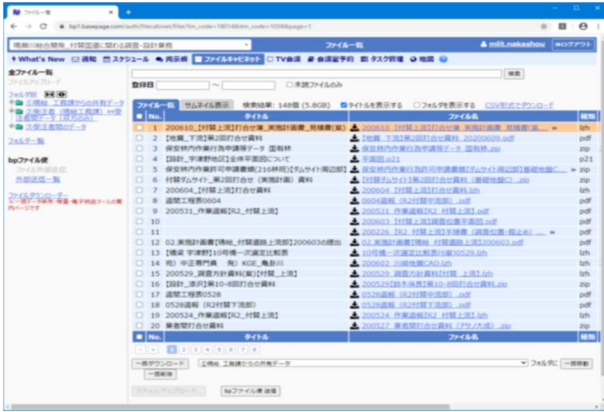


図5 クラウド画面のイメージ

このWeb会議機能とクラウド機能の活用を通して、受注者からも「共通の情報共有システム（ASP）利用で操作性が良い」「情報共有がスムーズ」「資料散在なし」など好意的な意見を得ることができた。

また「能動的に使わないと効果が小さい」ことも解った。

4. その他の情報共有システム（ASP）活用事例

本事業がダム建設という性格上、比較的狭い範囲に多数の受注者が出入りし、当該年度の現場作業従事者は年間500人を超えた。現地に不慣れな作業員に向けて、クマハチ出没箇所やケータイ電波感度情報、通行の注意箇所、希少種への配慮事項や注意箇所などを地図情報で周知する事を試みた。

これは、発注者から情報に加え、受注者自らが得た情報も情報共有システム（ASP）の地図機能に登録する方法をとっている。

結果、受注者による情報更新が積極的に行われたことにより、充実した地図情報が得られ、安全行動や環境配慮に役立つものとなった。

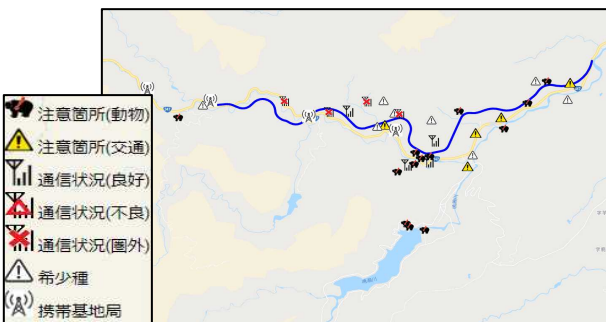


図6 地図での情報共有

クマ出没箇所（200930）

状況	注意箇所(動物)
報告日時	2024-10-01 09:03:00
報告者	野村 貴大
住所	〒981-4367 宮城県加美郡加美町字門沢間坂3-9 3
メモ	10/1(水)の作業員が道路を横断している熊を目撃 (3/30(水)17:30頃) 11/2(金)第6回 業者間連絡会にて周知

(クマ出没情報の例)

希少種に注意

状況	希少種
報告日時	2024-05-12 11:45:00
報告者	中正 裕史
住所	〒981-4 368 宮城県加美郡加美町字門沢間坂3-9 3
メモ	対象：植物 注意：踏み荒らし掘削

(希少種への配慮事項の例)

図7 地図情報共有の例

5. まとめ

「Webカメラによる検尺」は、移動時間や待機時間の省力化し、受発注者双方に新たな時間を生み出すことに成功し、生産性向上に大きく寄与した。

また、地質調査及び設計業務との間、または設計業務と設計業務との間での情報共有は、電話やメールでのやり取り比べ、「Web会議」と「クラウド」の利用が、即時性・一覧性・セキュリティ対策など点で効率的である事が解った。

これらは、工事で実績のある情報共有システム（ASP）を業務間の情報共有ツールとして活用した結果であるが、いかに情報共有の重要性が高いかを改めて示すことが出来たものと考えている。

また、業務間での情報共有や連絡調整が、自発的に行われた事は、目的達成の為の合意形成に有効性を示したものと思われ、情報共有システム（ASP）の有効な利用方法の一形態となる可能性を内在している事は発見であった。

本報が、今後のBIM/CIM実施及びi-Construction推進の一助となれば幸甚である。

謝辞：本報の取り組みにあたり、ご協力頂いた関係業務受注者の皆様と、執筆を後押し頂いた皆様に、深く感謝申し上げます。

要求される性能に基づいた 経済的な土留潜堤の設計手法の検討

鯨田 宏樹¹・升本 裕子¹・松村 洸南¹

¹中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒734-0011 広島市南区宇品海岸3-10-28)

人工干潟の土留めを目的とした潜堤は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の対象とする港湾の施設に含まれていないため、要求性能と性能規定に関する記述はなく、類似施設の要求性能・性能規定を準用すると、いずれも過大な設定となる。

本稿では、人工干潟の土留潜堤の要求性能と性能規定を整理し、それに基づく経済的かつ前例のない新たな設計手法を検討するとともに、軟弱地盤上に設けた潜堤の沈下挙動を精度良く再現する試みについて述べる。

キーワード 人工干潟, 土留潜堤, 要求性能, 軟弱地盤, 沈下

1. はじめに

環境創造を目的とした人工的な干潟の造成を行う場合、波浪や潮流による土砂の流出を防ぐために土留潜堤が設けられる。人工干潟の土留潜堤は、港湾法第56条の2の2に定められている「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(以下、「技術基準」という)の対象とする港湾の施設(技術基準対象施設)には含まれていないため、要求性能と性能規定に関する明確な記述はない。また、軟弱な地盤上に潜堤が設けられる際は沈下を抑制するため、潜堤の下に地盤改良が施されてきた。しかしながら、地盤改良は事業費の増加につながり、人工干潟を整備する上での課題の一つとなっている。

このため、潜堤の基礎部を工夫することによって地盤改良を施さずに潜堤の沈下を抑制し、コスト縮減と安定的な潜堤を築造することを目的として実験及び解析を行った。

2. 人工干潟の土留潜堤の要求性能と性能規定

(1) 土留潜堤に特化した要求性能等を定める目的

人工干潟の土留めを目的とした潜堤に求められる性能は背後の土砂が流出しないように堤体高の維持ができれば良く、護岸等の技術基準対象施設と比較すると、求められる安全性や沈下の許容度の面で過大な設定となる。

人工干潟の土留潜堤の要求性能を整理し、性能規定に対する照査項目と限界値について検討することにより、コストの縮減に寄与する設計手法を確立する。

(2) 土留潜堤に特化した要求性能

背後の人工干潟の土砂の流出を防げば良いため、潜堤築造時の即時沈下は許容し、人工干潟造成後は自重によ

って背後の土砂が流出しない堤体高を維持することを要求性能とした。また、高波浪、地震動等の作用によって損傷した場合は、修復によって機能を維持できることを要求性能として整理した。

(3) 土留潜堤に特化した性能規定

軟弱地盤上に築造する土留潜堤では捨石材投入直後から即時沈下が始まり、土留潜堤の作用力と基礎地盤支持力のバランスで沈下が収束して土留潜堤としての機能を発揮する。このため、主たる作用が自重である永続状態に対しては、背後の人工干潟の土砂が永続的に流出しない天端高の限界値以上であることを性能規定とした。

主たる作用が高波浪または地震動である変動状態に対しては、土留潜堤の要求性能が修復性であることを考慮し、数年に1回程度来襲する高波浪または地震動によって干潟としての機能を果たさなくなる変形量未達であることを性能規定とした。なお、高波浪に対する照査は一般的に捨石材の安定重量であり、技術基準に示されるハドソン式によって捨石材の安定重量を照査することができる。また、地震動に対する照査は、一般的に円弧すべりによって照査されるが、これを適用すると永続状態に対する照査に比べてかなり高い安全性を求めることとなるため、修復性に対する照査方法は、永続状態に対する照査方法と同様とした。

(4) 沈下を許容する土留潜堤の天端高の設定

先述(2)のとおり、潜堤築造時の即時沈下は許容し、背後の土砂が流出しない堤体高を維持できれば良いことから、沈下を見込んだ余盛施工を行うことが必要となり、設計時の考え方を見直す必要がある。

図-1に、施工直後堤体が沈下することを予測し、所定の高さより高く設定した堤体断面を示す。なお、潜堤か

らの作用荷重を分散させるため、堤体の下にジオテキスタイルならびに浮き基礎（木製沈床）を施すこととした。

図-2に、施工段階ごとに即時沈下が発生し、その後沈下速度が減少して安定する沈下曲線のイメージを示す。最終段階の施工後（計画した捨石量をすべて投入した後）、沈下速度がほぼ0になった時点（安定と呼ぶ）で、沈下した堤体の天端が所定の堤体高以上の位置にあれば竣工とみなすことにした。

沈下量の経時変化が安定し、堤体の天端高さが所定の堤体高以上におさまっていることが即時沈下の照査項目となる。これを、室内実験で照査する。

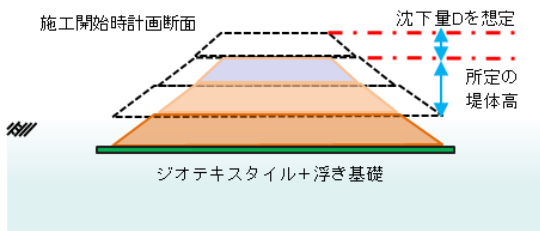


図-1 即時沈下と段階的な施工を考慮した堤体の断面

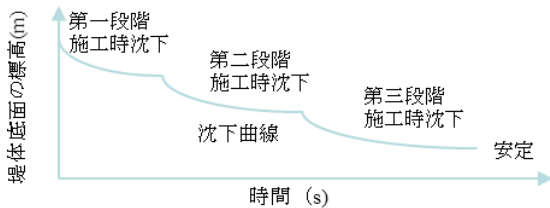


図-2 施工段階毎の沈下曲線のイメージ

3. 数値解析による断面の安定性の検討

(1) 自然条件

モデルケースとして人工干潟を造成することを想定し、検討を行った。表-1に土層の物性値を示す。

(2) 検討対象断面の選定

表-2に検討対象断面として、3つの案を示す。

表-1 各土層の地盤物性値

土質名		地盤定数
浚渫土 (粘性土)	浚渫前	$\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 4.5 \text{ kN/m}^3$) $C_u = 2.50 + 1.75 \cdot Z \text{ kN/m}^2$ ($Z_0 = \text{地表面}$)
	浚渫後	$\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 4.5 \text{ kN/m}^3$) $C_u = 1.17 \text{ kN/m}^2$
覆砂土 (砂質土)		$\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 10.0 \text{ kN/m}^3$) $\phi = 25^\circ$

表-2 検討対象断面

案1	捨石傾斜堤 +SCP改良 (一般的な断面)	
案2	捨石傾斜堤 +ジオテキスタイル +浮き基礎 (潜堤の荷重を分散させる構造)	
案3	ジオテキスタイル +カルシア改質土 (カルシア改質土が面として作用し、応力分散を期待した構造)	

(3) 軟弱地盤上の潜堤の検討に適用可能な解析手法

図-3に示すように、軟弱地盤上の潜堤の検討に適用可能な解析手法として、有限要素法（FEM）、粒子法（例えばSPH）、個別要素法（DEM）が考えられる。捨石と軟弱地盤をそれぞれの手法でモデル化した場合、図-3に示すように、捨石の軟弱地盤への沈下形状に差異が生じることが考えられる。そのため、本検討ではFEMよりSPHやDEMが有利であるといえる。本検討では、軟弱地盤の沈下機構を評価できる手法として、マウンドのモデル化で実績のあるDEMを用いることとする。

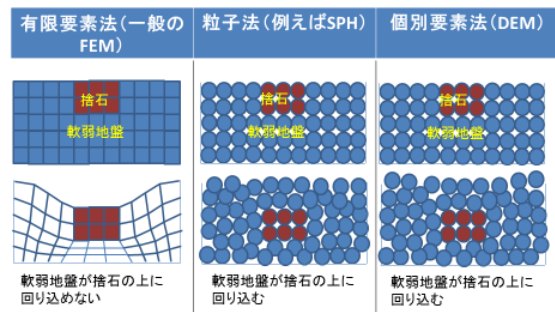


図-3 解析手法

(4) モデル化の方針を定めるための試算

a) 浚渫土と捨石のモデル化

浚渫土と捨石をモデル化する際、特に浚渫土をばねとして表現するための工夫を行った。

基本ケースは、浚渫土のばね係数を $1.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ （通常 10^7 程度）と極めて柔らかいものとし、減衰係数は0.3、摩擦係数は0とした。試算用モデルを図-4に示す。

浚渫土モデルに捨石モデルを重力落下させたところ、捨石の密度が2倍では沈降しなかったため、5倍、7.5倍、10倍と変化させた（密度の大きさは盛土高を表す）。また、捨石の密度を浚渫土の5倍、ばね係数を（さらに柔らかい） $1.0 \times 10^3 \text{ N/m}$ としたケースも実施した。

検討の結果、ばね係数の感度が高く、ばね係数が小さ

いケースでは粘土の中にゆっくりと沈降する様子が再現できた。このことを踏まえ、浚渫土の塑性と液性の中間的な挙動のコントロールをばね係数で行い、捨石との相対速度に対する抵抗は粘性係数、塑性の微調整は摩擦係数で行う方針とした。

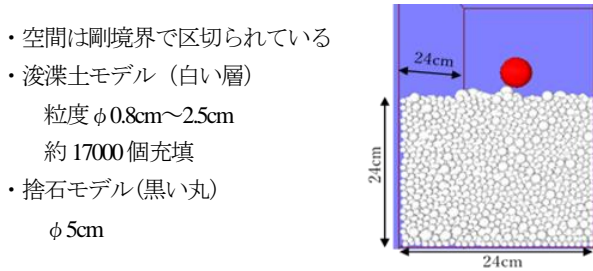


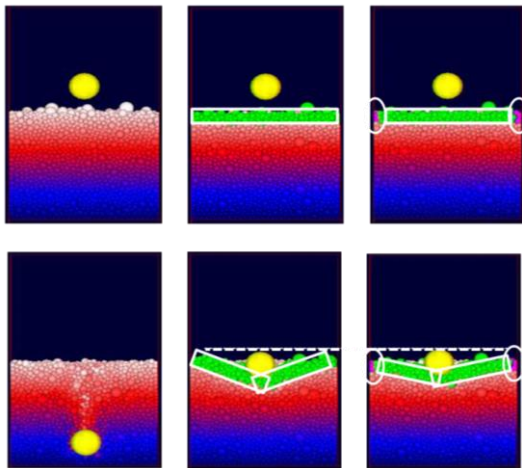
図-4 試計算用モデル

- 空間は剛境界で区切られている
- 浚渫土モデル (白い層)
粒度 $\phi 0.8\text{cm} \sim 2.5\text{cm}$
約 17000 個充填
- 捨石モデル (黒い丸)
 $\phi 5\text{cm}$

b) ジオテキスタイル、浮き基礎部(木材)のモデル化

ジオテキスタイルは全体で引張りに抵抗すること、浮き基礎部分は水平変位を拘束することでモデル化した。シミュレーション結果を図-5に示す。

図-5に示すように、ジオテキスタイルの存在により捨石の沈降が抑えられ、浮き基礎部にジオテキスタイルの端部を接続することでさらにその効果が増大しており、基本的な挙動は表現できると考えられる。浮き基礎部(木材沈床工)については、浮き基礎全体が剛体的に挙動するモデルとブロックごとに剛体的に挙動するモデルを考えることとする。



(a)基本ケース (b)ジオテキスタイルあり (c)ジオテキスタイル+浮き基礎(丸部分)

(手前部分の浚渫土を取り除いて描画)

図-5 シミュレーション結果

(5) 解析パラメータの検討

本解析で設定した解析パラメータを検証するため、図-6、写真-1に示す予備試験を行った。ロッドの先は堤体底面を模擬した試験体(球形の磨かない御影石)を取り付けて浚渫土で満たしたドラム缶に浸潤させ、貫入される曲面に対する浚渫土のせん断強度特性を浚渫土から

受ける抵抗力の計測により把握した。なお、試験体は3種類の直径(25cm, 18cm, 12.5cm)とし、初期浸潤位置は深度20cm, 37.5cm, 55cmとした。

図-7に試験結果の一例(試験体中心深度20cm, 試験体直径12.5cm)を示す。実験では、試験体を押し下げると荷重が増加し、試験体を停止すると荷重が低下してあるレベルに収束する傾向を示した。実験と解析は良好に対応していると考えられる。

なお、実験より解析結果の荷重が大きくなっているが、これは、個別要素法では境界の寸法に対して十分小さい粒子を用いる必要があるのに対し、解析で用いた試験体寸法が予備試験の境界の寸法(ドラム缶 $\phi 0.6\text{m}$)に対して十分小さいものでなかったことが原因と考えられる。ただし、解析では境界が大きく(幅1.8m)、複数の実験結果とも整合しているため、設定した解析パラメータには問題ないと判断した。



図-6 装置全体概念図



写真-1 試験装置

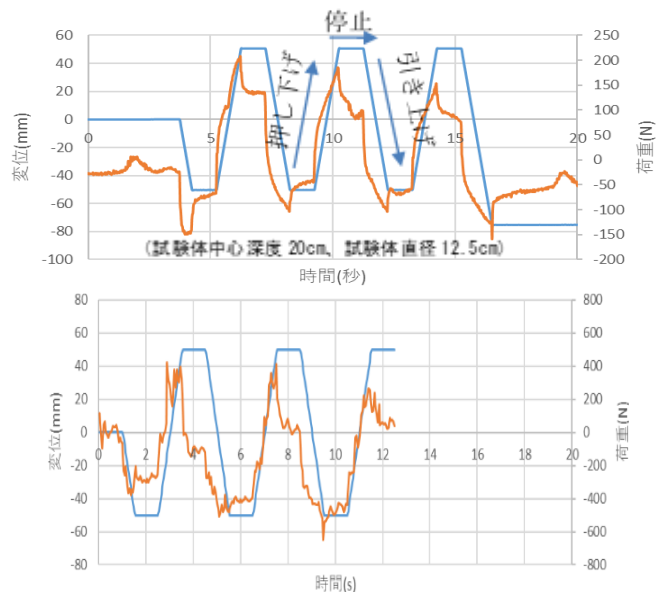


図-7 実験(上)と解析(下)の結果(規則線は変位, 不規則線は荷重を表す)

(6) 解析モデルの検討

a) 解析モデル

解析モデルは後述する模型実験に合わせ、縮尺 1/60 とした。図-8 (I) がジオテキスタイル、(II) が浮き基礎を表す。ジオテキスタイルは粒径 3.5mm の粒子を直径の間隔で格子状に配置した。浮き基礎は粒径 5.0mm の粒子を木材の配置位置に対応する場所に平面的に配置してモデル化した。

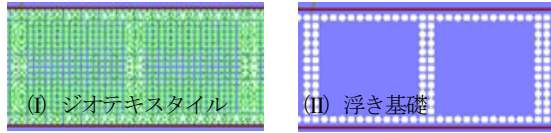


図-8 解析モデル

b) 解析パラメータ

模型実験の結果と整合するよう解析パラメータを設定した。

表-3 解析パラメータ

ばね係数(N/m)	2×10 ³ (実験に用いた粘性土の値)
粘性減衰係数 (Ns/m)	0.973 (経験上定めた値)
密度(kg/m ³)	2000 (粘性土) 2250 (伊勢砂利のみ) 7820 (伊勢砂利を鉛弾で調整) 1000 (浮き基礎)
要素間摩擦係数	3° (粘性土) 30° (捨石：内部摩擦角 35°程度)
要素間転がり摩擦係数	0.1

表-4 解析条件

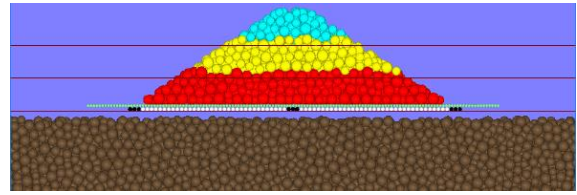
時間間隔(s)	1×10 ⁻⁵
载荷速度(m/s) (堤体支持版の降下速度)	0.05
堤体支持版と粒子との関係	粘性土とは無関係、他粒子と接する場合回転拘束

c) 解析ケース

3種類のモデルについて表-5 に示す。また紙面の都合上、bの解析モデルを図-9 に示す。

表-5 解析ケース

モデル	備考
a	ジオテキスタイルのみ 伊勢砂利の重量
a'	ジオテキスタイルのみ 伊勢砂利+鉛弾の重量
b	ジオテキスタイル+浮き基礎 伊勢砂利+鉛弾の重量 浮き基礎のブロックごとに剛体とし回転を考慮する
c	ジオテキスタイル+カルシア改質土 伊勢砂利+鉛弾の重量 浮き基礎全体を剛体とし回転を考慮しない



aはジオテキスタイルのみ

bの浮き基礎はブロック毎に剛体とし回転を考慮する。

cのカルシア改質土は面として軟弱地盤に作用し、回転は考慮しない

図-9 bの解析モデル

d) 粘性土粒子の変位ベクトルの比較

表-6 に解析結果による堤体底部の沈下量を示す。また、図-10 に解析ケース b における粘性土粒子の変位ベクトルを示す。堤体下部には、堤体とともに変位するくさび状の剛体部 (変位量 1cm 程度の領域) が存在する。これは図-11 に示すテルツァギの基礎底部の剛体領域のモデルの三角形部分と対応しており、古典的モデルには一定の合理性が認められる。

表-6 堤体底部の沈下量(mm)

モデル	中央解析	右端解析	
			a
a'	ジオテキスタイルのみ	43.7	24.6
b	ジオテキスタイル+浮き基礎	40.3	12.4
c	ジオテキスタイル+カルシア改質土	29.5	29.5

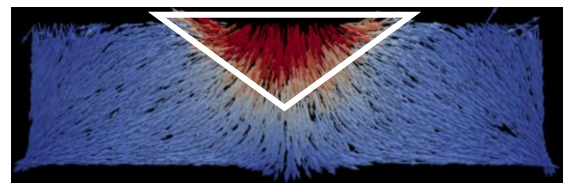


図-10 解析ケース bの粘性土粒子の変位ベクトル

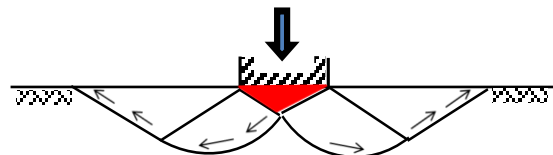


図-11 Terzaghiの極限つり合い状態

(7) 沈下量の予測式

解析結果を基に堤体の沈下量を算定する方法を考える。なお、堤体はある程度沈下した後静止し、沈下量は堤体死荷重とこれに対する抵抗力の釣り合いにより求まる。予測式では、堤体死荷重に対する抵抗力として、く

さび形状の境界面に作用するせん断抵抗力と堤体底面に作用する浮力による支持力を考慮する。

「水平粘土地盤中の帯基礎の支持力 q_d をすべり面法によって求める方法」に関する記述が文献²⁾にある。

文献²⁾の 4.74 式によれば、基礎の支持力 q_d は、式(1)で与えられるとしている。

$$q_d = (\pi + 2)C_u + \gamma D \quad (1)$$

q_d : 基礎の支持力(kN/m²), C_u : 浚渫土せん断強度(kN/m²), γ : 浚渫土密度(kN/m³), D : 根入れ長さ(m)

q_d が図-12 のせん断抵抗力と浮力の和に対応すると考えると、第一項がせん断抵抗力、第二項が浮力に相当する。式(1)の C_u に深度方向 z にせん断強度が増加する地盤定数を考え、 z を D と置くこと次式(1)が得られる。

$$q_d = (\pi + 2)(c_0 + c_1 D) + \gamma D \quad (1)'$$

c_0, c_1 : 係数

これは潜堤底面に作用するせん断強度として深度 D のそれを用いることと等価である。ここで D を堤体の沈下量と考え、式(1)'を D について整理すると式(2)が得られる。

$$D = (q_d - c_0(\pi + 2)) / (c_1(\pi + 2) + \gamma) \quad (2)$$

この予測式は、実験および解析を通して、図-13 に示すように堤体の形状が保持されたまま沈下することが明らかになったことに基づいている。つまり、式(2)における特徴は、潜堤の設置圧は変化せず沈下し、その深度における浮力とせん断抵抗を用いて支持力を算定するところにある。

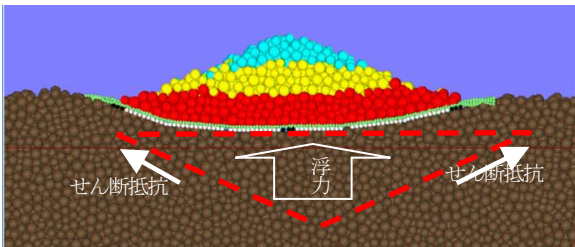


図-12 堤体の沈下に対する反力のイメージ

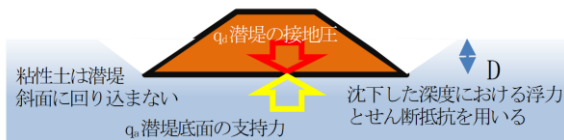


図-13 支持力の考え方

4. 模型実験による性能照査

(1) 模型実験の概要

施工後の要求性能と性能規定を確認するために模型実験を行う。実験により、堤体の沈下が安定していること、沈下量が予測値以下であることを確認する。

実験模型は縮尺が 1/60 で、実験室内の土槽内に海底

地盤を模擬した軟弱粘性土を投入し、その上に石材で潜堤模型を構築した(図-14 参照)。軟弱粘性土は現地で採取した浚渫土を用い、潜堤模型は実際の潜堤の築造過程を考慮して段階的に構築した。

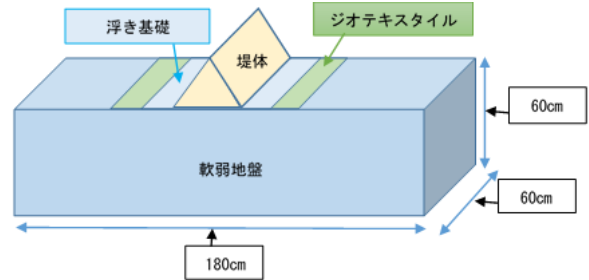


図-14 実験模型の概要図

(2) 使用材料

軟弱粘性土は徳山下松港の浚渫土を用いた。捨石は花崗岩質である伊勢砂利を用い、模型の縮尺 1/60 に合わせて 1~1.5cm とした。乾燥密度が 1339kg/m³ であり、潜堤の重量を増やすために鉛弾を袋詰めにした材料を用いた。

(3) 実験方法および計測方法

図-15 に示すように、土槽内部に色砂およびマーカをセットして浚渫土を投入し、実験ケースに応じてジオテキスタイル、浮き基礎を設置した。その上に石材を投入し、沈下量を計測した。

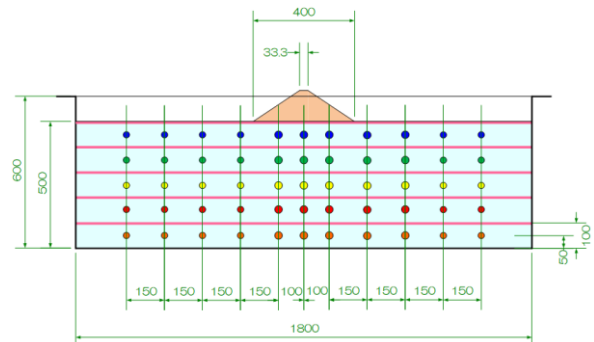


図-15 色砂およびターゲットの配置

(4) 実験ケースおよび諸条件

実験ケースを表-7 に示す。堤体を伊勢砂利のみで作成すると、堤体底面中央部の沈下量が小さく、浮き基礎の効果が出にくいことが懸念されたため、堤体深部に鉛弾を積み増すことにより堤体底面に作用する圧力を 3.0 倍とし、沈下量を大きくして両者の差が明確になるモデルを設定した。

表-7 実験ケース

No	解析	内容
1	b	ジオテキスタイル+浮き基礎 堤体重量3倍
2	a	ジオテキスタイルのみ
3-1	b	(ジオテキスタイル+浮き基礎)部 堤体重量3倍
3-2	a'	ジオテキスタイル部 堤体重量3倍

(5) 実験結果

表-8 に堤体底面中央および右端（法先）の沈下量を示す。いずれも 48 時間後の沈下量である。また、実験ケース 1, 2 の堤体中央及び法先の沈下曲線を図-16 に示す。

表-8 堤体底部の沈下量の比較(mm)

ケース名		モデル	中央		右端	
実験	解析		実験	解析	実験	解析
2	a	ジオテキスタイルのみ	13.3	13.9	5.8	10.2
3-2	a'	ジオテキスタイルのみ	52.2	43.7	23.9	24.6
1	b	ジオテキスタイル+浮き基礎	40.7	40.3	22.8	12.4
3-1			41.2		19.8	
	c	ジオテキスタイル+カルシア	なし	29.5	なし	29.5

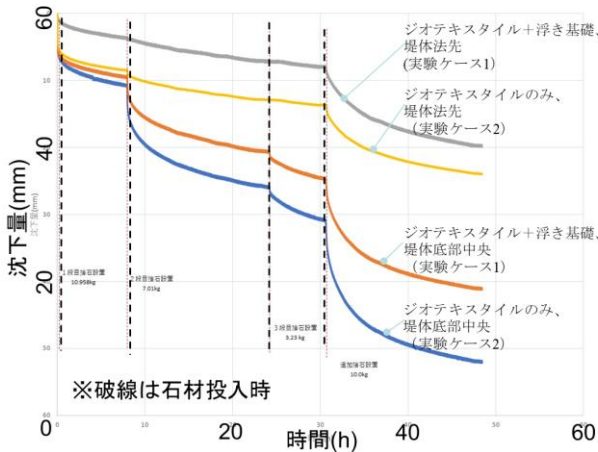


図-16 実験ケース 1, 2 の堤体中央及び法先の沈下曲線

(6) 実験と解析の比較

図-17 に、例として解析ケース b の粘性地盤の地中の変位分布と、実験ケース 1 の堤体を取り除いた後の地中の変位分布を比較した。両者の形状は良好に対応している。

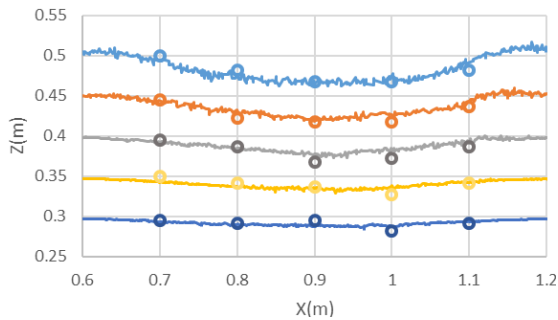


図-17 解析ケース b(実線)と実験ケース 1(プロット)の比較

(7) 竣工時の性能照査

3章(7)の沈下量の予測式(2)を用いて模型実験ケース 1 の沈下量予測を行った結果、堤体の沈下量 $D=121\text{mm}$ が得られた。

浮き基礎潜堤の模型実験ケース 1 では築造 48 時間後も形状が安定しており、堤体中央の沈下量は予測値 121mm を下回る 41mm であったので、所定の堤体高さを確保できたと考えられる。よって、実験に用いた断面は竣工時の性能規定を満足できていると言える。

5. まとめ

本稿では、人工干潟の土留潜堤の要求性能と性能規定を整理し、沈下を許容した新たな設計手法を検討した。具体的には、コスト縮減と安定的な潜堤の築造を目的とし実験及び解析を行った。

今回の検討では、縮尺 1/60 の解析モデルによる解析と模型実験の比較を行い、2 つの結果が良好に対応することを確認した。また、解析結果を基に堤体の沈下量を算定する予測式を提案し、模型実験から得られた沈下量と比較を行うことで、実験に用いた断面が竣工時の性能規定を満たすことを確認した。

今後検討すべき課題として、3 章で検討を行った式(1)および式(2)と類似の沈下量予測式が、技術基準に記載されているため、実大規模での地盤の挙動を考える上で、どちらの式に妥当性があるのかを検証する必要がある。また、ばらつきを考慮し安全側の定式化に留意する必要がある。精度の良い沈下量予測を試み、予測値の精度を向上させることで潜堤断面の大きさを削減でき、より経済的な設計となると考える。

また、本実験では 1/60 模型に現地浚渫土をそのまま用いたが、今後は実大実験及び縮尺を上げての解析を実施することで、粘着力等の相似を考慮した性能規定の照査を進める必要がある。

さらに、解析ではカルシア改質土を曲げ破壊が生じないモデルとして考えたが、実際にはひび割れや割裂が生じる可能性がある。これを考慮した検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp6-9, 238, 678-679, 2018.
- 2) 土木工学会：土の強さと地盤の破壊入門，土質工学会入門シリーズ 13, pp. 218-219, 2000