

AI・ICT 技術を活用した 災害時交通マネジメント

馬場 僚司

関東地方整備局 道路部 道路計画第二課 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心 2-1)

近年では、CCTV カメラと人工知能 (AI) を活用した交通計測や ETC2.0 プローブによる利用経路の把握等 ICT 技術による交通実態の把握が実務において利用可能となっており、災害時における利活用が期待されている。

本論では、AI 等の新たな技術を活用した災害時交通マネジメントの高度化を念頭に、関東地方整備局管内で発生した災害時の交通マネジメントをケーススタディとして、課題点や改善点の把握、今後のあり方を述べる。

キーワード 災害、交通マネジメント、交通渋滞、AI、ETC2.0

1. はじめに

近年、集中豪雨による河川の氾濫や土砂崩れ等の災害により道路が寸断され、迂回交通の集中が市街地で交通渋滞を引き起こしている。

災害による交通渋滞は、円滑な災害支援や復旧の障害となり、人々の生活に大きな影響を及ぼすことから、迅速な渋滞緩和のための取組が不可欠である。

しかしながら、災害時の交通状況は、時々刻々と変化し、その把握にあたって被災地域へ調査員を大量に動員して、実態を把握することは極めて困難である。

一方で、CCTV、AI カメラと人工知能 (AI) を活用した交通計測、ETC2.0 プローブデータによる渋滞状況や利用経路等、ICT 技術を活用した交通実態の把握が実務的に利用可能となっており、災害時においてもこれらの新たな技術の活用が期待されている。

本論では、AI・ICT 等の新たな技術を活用した災害時の交通マネジメントの高度化を念頭に、栃木県足利市で発生した林野火災における交通マネジメントをケーススタディとして、AI・ICT 技術の活用方法や課題点等を整理し、災害時の交通マネジメントのあり方を述べる。

2. 林野火災による北関東自動車道の通行止めと災害時交通マネジメント検討会

(1) 災害時交通マネジメント検討会の立ち上げ

令和 3 年 2 月 21 日 (日) に栃木県足利市西宮町で起きた林野火災は、発災箇所が北関東自動車道に隣接し、発生から 3 日後の 2 月 24 日 (水) に北関東自動車道の太田桐生 IC から足利 IC の区間が通行止めとなった 3 月 1 日 (月) の鎮火まで 6 日間におよび通行止めが続いた。北関東自動車道が通行止めとなった翌日には、IC 間を乗り継ぐ迂回交通が足利市街地周辺の道路に集中し、著しい交通渋滞が発生した (図-1)。

これを受けて、国、栃木県及び群馬県の道路管理者並びに栃木県警及び群馬県警が協力し、最初に迂回路の設定、迂回路上の工事抑制、通行止めの状況や迂回協力の情報発信を道路情報板、ホームページ及び SNS 等を用いて行った (図-2)。

さらに、災害時の交通集中に起因した渋滞に関係機関が連携し対応するため、学識経験者、関東地方整備局、栃木県、群馬県、足利市、太田市、栃木県警、群馬県警、



足利市で発生した林野火災の状況

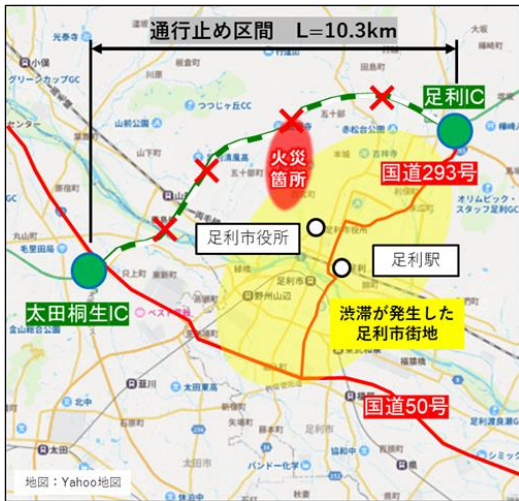


図-1 火災発生箇所と北関東自動車道の通行止め状況

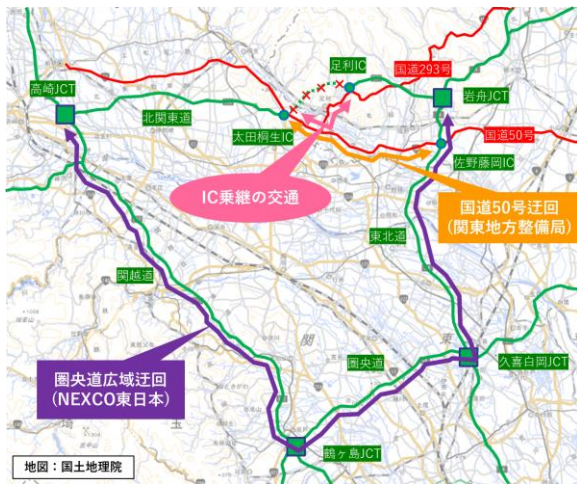


図-2 国・NEXCO 東日本が設定した迂回ルート

NEXCO 東日本及び日本道路交通情報センターで構成される「国道 50 号等災害時交通マネジメント検討会」を立ち上げ、災害時の機動的な対応を図った。検討会の立ち上げ当初は、指定した迂回路上の工事抑制の徹底、道路情報板、ホームページ、SNS、ラジオ及びテレビによる通行止め情報の発信と迂回の呼びかけを関係各機関が協力して行うことを決定し、交通総量の抑制と足利市街地への交通集中を避けるための取組を優先した。

(2) 災害時交通マネジメント検討会での課題

当初、検討会において集中的に実施した通行止め情報の発信と迂回の呼びかけをした一方で、北関東自動車道の通行止めによる一般道の交通量の変化を即時的かつ定量的に捉えることができず、交通が集中しボトルネックとなっている箇所特定、渋滞発生要因分析、交通状況の変化をリアルタイムに把握することが必要であるとの議論が検討会でなされた。

また、迂回を呼びかけたことの効果と交通実態との関わりが検証できておらず、交通状況調査等を即座かつ網

羅的に行う必要性が生じた。

この難題に対応すべく、関東地方整備局では、保有する ETC2.0 プローブデータや AI 解析技術を活用し、足利市街地周辺の道路の特定、交通渋滞の要因分析、交通実態の把握、迂回呼びかけ効果の検証を即効的に試みた。

3. AI・ICT 技術を活用した交通実態の把握

(1) ETC2.0 プローブデータによる渋滞箇所の特定

足利市街地周辺の道路における交通渋滞の状況、発生箇所及び時間帯を把握するために、ETC2.0 プローブデータの速報値を用い、車両毎の DRM リンク単位で時間当たりの車両の平均速度を分別した速度図を速やかに作成し、検討会において情報を共有した(図-3)。

この車両の速度図で発災前後の同箇所・同時刻のデータによる車両の速度差を比較し、特に渋滞の著しい時間帯を分析した結果、夕方の時間帯に、足利 IC 周辺の国道 293 号及び県道で著しく車両の速度が低下し、交通が集中する主要交差点がボトルネックとなり、渋滞が発生していることを特定した。

(2) AI カメラ設置と交通解析

ETC2.0 プローブデータにより特定されたボトルネック箇所の交通量を計測するため、国道 293 号及び県道の計 5 箇所に AI カメラを設置した(図-4)。AI カメラは、関東地方整備局が保有している機材のひとつであり、24 時間連続稼働させるため、既存の道路照明灯に設置、電源を常時確保し、短時間かつ容易に設置できる。

また、低光量な環境下でも調光補正により、昼夜を問わず、鮮明な画質で撮影できることから、カメラ映像をサーバーを介し、車両走行画像を解析することで、上下別、車種別(大型車、小型車、その他)の交通量及び車両速度のデータを取得できるようにしている(図-5)。

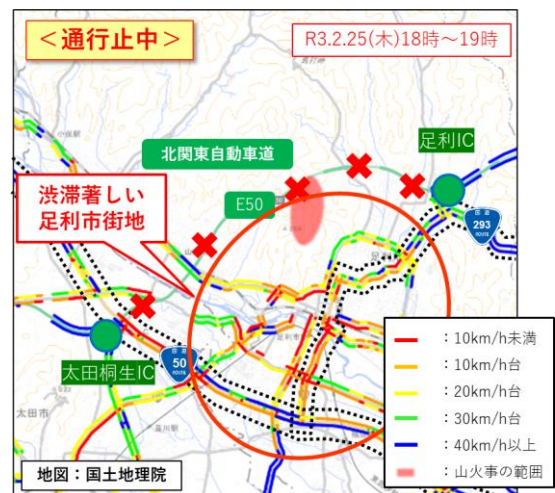


図-3 ETC2.0 プローブデータによる車両の速度図



図-4 AIカメラ設置箇所

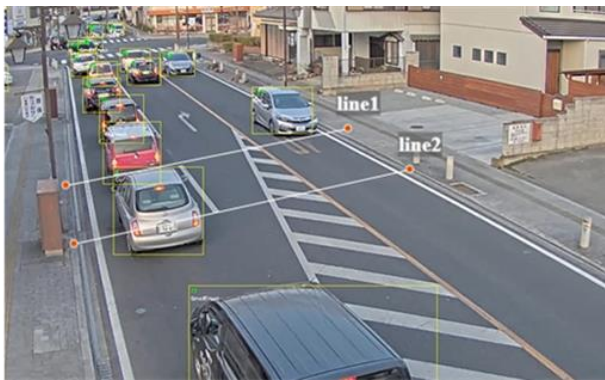


図-5 AIによる画像解析と交通調査

AIカメラから取得した交通量及び車両速度のデータを分析し、時系列で変化を比較したところ、北関東自動車道の交通止めの影響による足利市街地道路への交通量の増加(図-6)がみられ、速度の低下とともに交差点での滞留車両の増加も確認され、特に朝夕の時間帯に集中していることが判明した。

また、これらの交通状況を関係者で共有するため、カメラ映像をクラウドに展開し、PCやスマートフォン等から映像を自由に閲覧できるように設定した。

これにより、必要に応じて現場の映像を適宜確認し、問題が発生した際には、即座に対応が可能となる体制を構築したほか、情報の共有による意思形成の円滑化など、災害時における関係各機関の調整、意志決定が短時間でできる体制を整えることができた。

(3) 車両走行履歴のアニメーション化

ボトルネック箇所が特定され、その原因が交通集中であることが明らかになったが、その集中する車両がどこから来て、どのような経路選択がなされているかの特定

が次の課題となった。これは、ETC2.0プローブデータの車両走行履歴を、秘匿化された車両ID、時間毎の緯度・経度の4つの情報を地図上でマッチングさせ、時間経過による車両の動きを可視化することで解決し、経路選択状況を一目で確認できるアニメーションを作成した(図-7)。

このアニメーションは、車両の座標位置を時系列で追っていくことで車両の走行経路を可視化しており、データが整えば短時間で対応可能なものと考えている。

さらに、太田桐生ICと足利ICを利用した車両に限定しデータを絞り込むことで、ボトルネック箇所と経路選択との相関を明らかにすることができ、その結果、両ICを出入りする車両が足利市街地を通過し、乗り継いでいる状況を確認するとともに、国道293号及び県道の渋滞にIC間の迂回(乗り継ぎ)による交通が大きく影響していることを特定した。災害による交通渋滞の発生状況や、要因を可視化できたことは、今後の災害渋滞要因の解析手法として、極めて有益であると考えている。

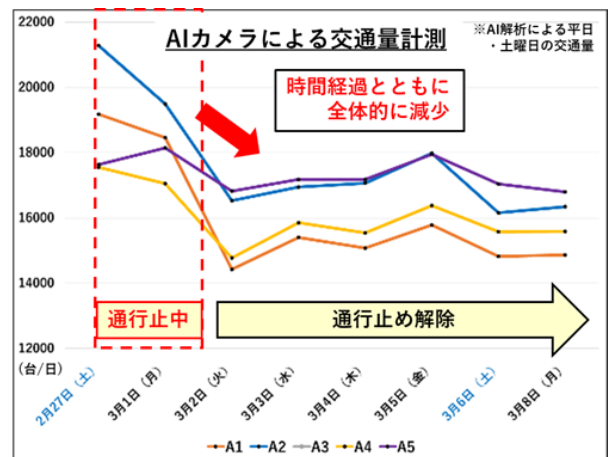


図-6 AIカメラ計測による交通量の変化

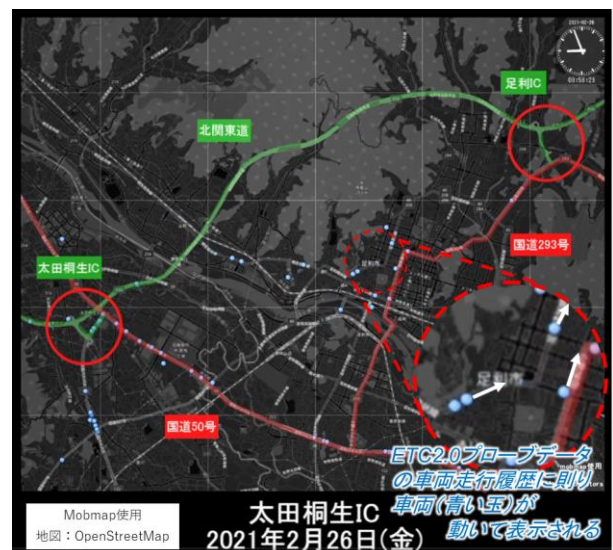


図-7 ETC2.0データによるアニメーション

4. 災害時における AI・ICT 技術活用の利点

今回の災害時の交通マネジメントにおける AI・ICT 技術の活用が、関係各機関との連携のあり方、迂回交通の監視と対策、そして面的な交通状況の把握に係る現地調査の労力等の低減に波及していることにも触れておく。

(1) 災害時交通マネジメント検討会を通じた連携促進

日々変化する災害時の交通状況を的確に捉えるためには、即時的なデータの収集と現場の映像を関係者で共有することが重要である。特に道路は、管理主体が国、都道府県、市町村と分かれ、都道府県毎に交通管理者も異なることから、迂回路の管理にあたっては、関係者間で情報を共有できる体制と仕組みを構築する必要がある。

この体制により、災害時における関係各機関の調整、意志決定が短時間で行われ、被災地域への速やかな支援に結びつくことの意義は高く、AI・ICT 技術が短時間かつ即時的な観点から有効であることを検討会を通じ、関係者が実感した。

(2) AI・ICT 技術による設定迂回路の効果検証

北関東自動車道が通行止めに伴う迂回路は、各道路管理者が設定(図-2)し、関係者の協力のもと通行止め情報の発信と迂回の呼びかけを繰り返し展開した。今回設定した迂回路への交通の転換量(時間別)と走行速度の把握は、常設トラフィックカウンター、ETC2.0 プローブデータ、AI カメラによる交通解析データを活用し、時系列で整理することで、通常時と災害時の比較を容易に行った。迂回路の交通量の増加に伴う走行速度の低下等の懸念に対しては、実交通量と車両速度データ(速報値)を注意深く監視し、評価、対応する PDCA サイクルをタイムラインに沿って実施した。

北関東自動車道の通行止めに伴う国道 50 号、圏央道への迂回交通量は、約 19,000 台/日となり、通常期の約 2 割の交通量の増加となったが、走行速度の著しい低下等の問題が生じることはなかった。足利市街地の渋滞が両 IC を乗り継いだ約 5,500 台/日が大きく影響したことを鑑みれば、迂回交通の上積みが可能だったのではないかと考えもあり、交通行動の変容を促す災害時の交通マネジメントの難しさを実感した(図-8)。

(3) 現地調査に伴う労力等の低減

従来、渋滞のボトルネック、交通状況の把握は、道路パトロール、市民等からの通報を受け現地を確認することが基本である。それが災害等で面的に広がる場合には、多くの人手と時間をかけ実態を明らかにしなければならない。さらにそれらを継続的に把握することになれば、人手と時間、経費がかさむのは明白である。何よ



図-8 迂回交通の増減と通常時の比較

りも災害地域で多くの人手を確保するには大きな困難が伴うことは言うまでもない。

これらを AI・ICT 技術により労力を省力化し、リアルタイムでの映像の共有、画像解析による交通データのデジタル化と蓄積、ETC2.0 プローブデータ(速報値)を分析することにより、短時間に面的な渋滞状況を時系列で可視化できたことの意義は高い。

5. 今後の災害時交通マネジメントのあり方

災害時に AI・ICT 技術を活用し、労力、時間、コストを省力化しつつも調査の継続性を担保する取組に加え、常設トラフィックカウンターや CCTV 等から得られるデータの活用を併せて行い、相乗的にデータ解析を行っていくことは、効率性からも重要である。

一方で、これらの取組がある一定程度のノウハウ、AI・ICT 技術の習得、マネジメント力が伴わなければ成立しないことも事実である。これらの課題は、知見、人的機動力、資機材を有する国土交通省と地方自治体との連携により技術的課題の解消が図られると考えている。

今後も、AI・ICT 技術が災害時にも数多く活用されていくことが期待され、これらの新たな技術を即座に活用するためにも、災害時に備えた、学識経験者、道路管理者、交通管理者等の連携強化の構築や災害を想定した準備、訓練が必要である。

謝辞：今回の交通マネジメントは、国道 50 号等災害時交通マネジメント検討会委員各位のご意見・ご協力を賜り実施できたもので、この場をお借りして、感謝の意を表したい

垂水ジャンクション交通事故多発地点における 事故対策に関する一考察

藤井 彩佳

本州四国連絡高速道路株式会社 神戸管理センター 計画グループ

(〒655-0852 兵庫県神戸市垂水区名谷町549番地)

垂水ジャンクションは、明石海峡大橋の本州側に位置する神戸淡路鳴門自動車道・阪神高速道路5号湾岸（垂水）線（以下、湾岸線という）・第二神明道路北線の結節点であり、日本最大級かつ日本一複雑な形状のジャンクションとも呼ばれており、AランプからJランプまで10のランプがある。中でも湾岸線から明石海峡大橋に向かうCランプは、交通量1万台/日の2車線ランプで約380度方向を転回する構造であり、交通事故が多発していたことから、様々な事故対策を実施してきている。本稿では垂水ジャンクションCランプにおける事故要因の把握を試み、各種交通事故対策の概要と効果について考察を行うものである。

キーワード 高速道路，ランプ，交通事故多発地点，事故対策

1. はじめに

垂水ジャンクション（写真-1）Cランプ（図-1）では、2011年度から2020年度までの10年間で179件の交通事故が発生している。



写真-1 垂水ジャンクション周辺模型

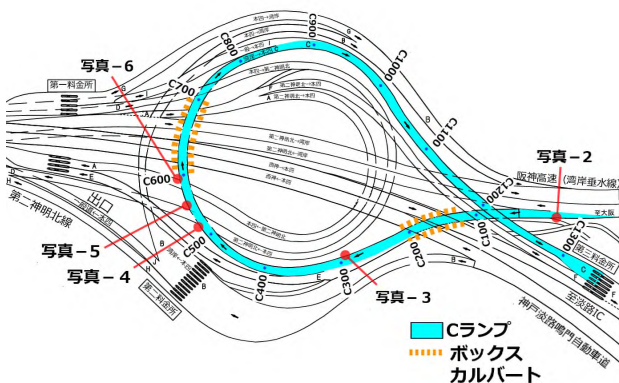


図-1 垂水ジャンクション概略図

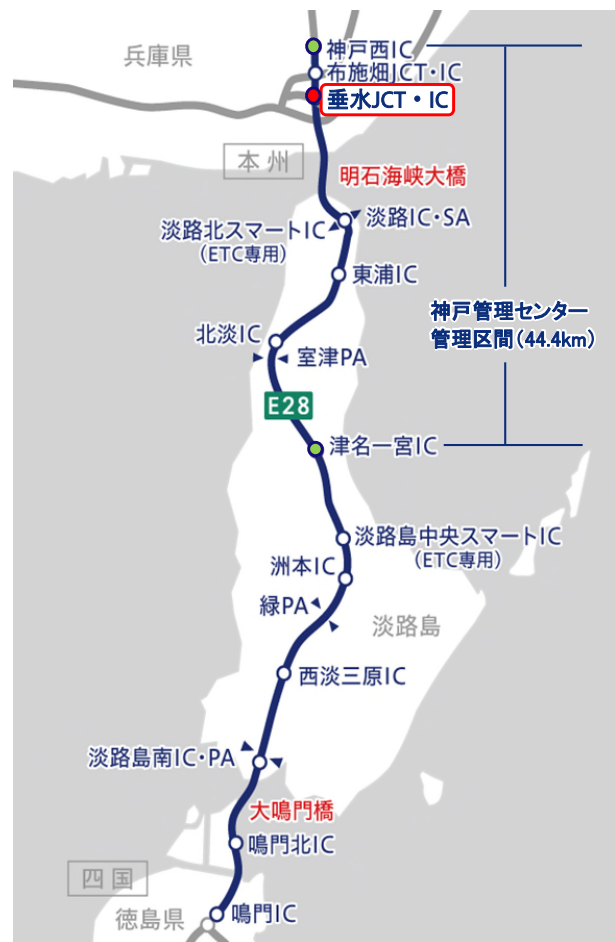


図-2 垂水ジャンクション位置図

これは過去10年間に本四高速（株）神戸管理センター管理区間（図-2）のジャンクション（以下、JCTという）・インターチェンジ（以下、ICという）のランプで発生した交通事故総件数（483件）のうち約4割であり、表-1に示すCランプの延長割合と比較しても事故件数が多いことが分かる。各JCT・ICのランプ別に事故件数を集計した結果を図-3に示す。本稿は垂水ジャンクションCランプにおける事故要因及び各種交通事故対策について考察を行い、近年実施した安全対策について報告するものである。

2. 垂水ジャンクションCランプの概要

当該ランプは、1方向2車線ランプ（ランプ規格A）であり、基本構成については表-2、幅員構成は図-4のとおりとなっている。ランプと神戸淡路鳴門自動車道・第二神明北線交差部付近は、右カーブ155mの単円で下り坂勾配2.8%、上り坂勾配3.5%のサグ部はボックスカルバート構造となっている。

3. Cランプにおける交通事故の概要

これまでにCランプで発生した事故状況を把握するた

表-1 ランプの管理延長

	延長(km)
全ランプ	約35.7
Cランプ	約2.6(7.2%)

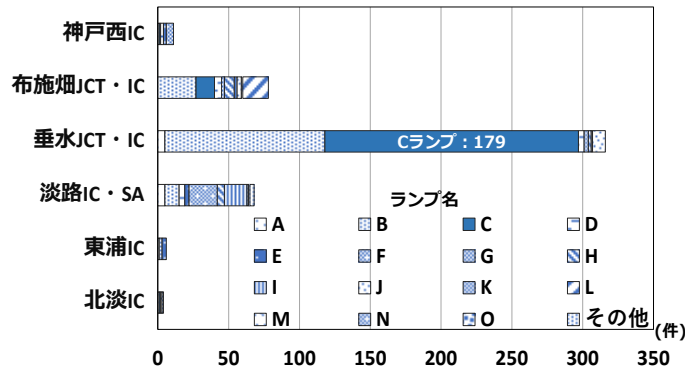


図-3 各JCT・ICランプ別の事故件数

表-2 Cランプ基本構成

延長	1358m
設計速度	50km/h
最小曲線半径	R=155m
曲線部	2.8%下り, 3.5%上り
最急縦断勾配	
横断勾配	8.0%
幅員構成	8.50m(路肩0.75+車線3.5×2+路肩0.75)

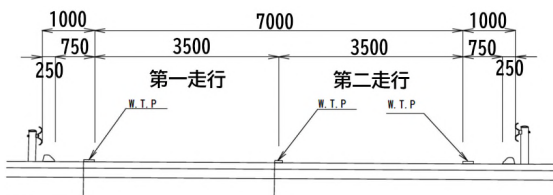


図-4 幅員構成

め、2011年度から2020年度までの10年間の事故調書について、路面状況等の項目別に分類集計を行った。

(1) 年度別事故件数

これまでの事故件数を年度別に集計すると図-5のようになる。2015年度が43件と最も発生件数が多く、各種対策を行った2016年度以降は年間10件程度に推移している。2015年度は前方の事故を回避しようとするなど、副次的に発生した事故5件を除いても38件発生しており事故件数が他年度より多くなっている。なお、年度別事故件数のみ2021年度の事故件数についても集計を行った。

(2) 各項目別事故件数

a) 路面状況

「湿潤A（降雨有り・路面が湿潤状態）」状況下での事故は139件（77.7%）、「湿潤B（降雨無し・路面が湿潤状態）」状況下での事故は21件（11.7%）となり、Cランプで発生した事故の約9割が「湿潤」状況で発生している（図-6）。

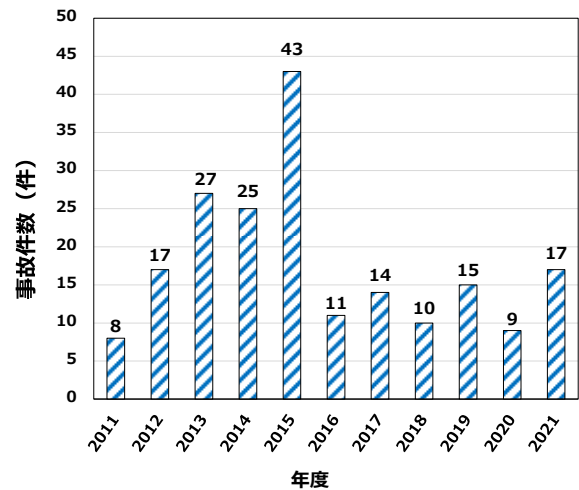


図-5 年度別事故件数

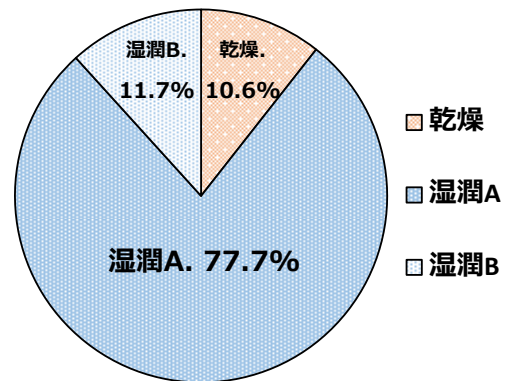


図-6 路面状況別事故件数の割合

b) 類型

類型別事故件数を図-7に示す。「車両単独」での事故が最多で154件（86.0%）、次いで「車両相互」22件（12.3%）である。

c) 違反種別からみる事故原因

次に違反種別ごとに整理した結果は図-8のとおりである。事故原因の半数以上が、「ハンドル操作不適」119件（66.5%）、「速度違反」が22件（12.3%）で約8割である。

(3) 事故前走行位置

先述のとおりCランプは第一走行車線と第二走行車線の2車線ランプであるため事故前の走行位置及び、第一接触位置についても集計を行った。分類は表-3の4分類とし、全事故件数179件のうち、aからdまでの4分類に振り分けることができたのは151件であった。そのうち最も多い組み合わせは、c.第二走行×右路肩で61件（40.4%）、次いでd.第二走行×左路肩47件（31.1%）と事故前に第二走行車線を走行中に発生している車両が7割であり、第一走行車線を走行している車両より事故率が高い傾向がみられた（図-9）。

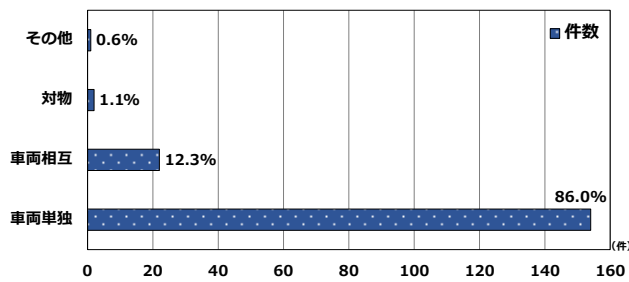


図-7 類型別事故件数

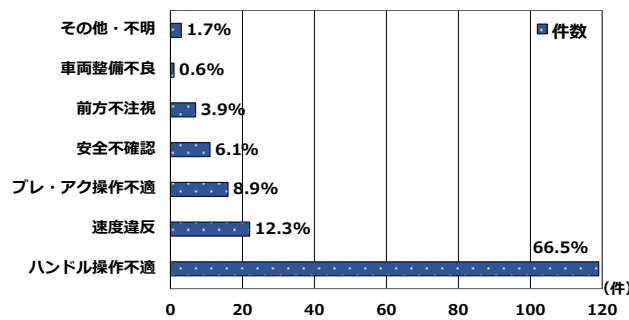


図-8 違反種別別事故件数

表-3 事故前走行位置の分類

		走行車線	
		第一走行	第二走行
接触位置	右路肩	a	c
	左路肩	b	d

(4) まとめ

以上の集計結果から、Cランプで発生する事故の多くは、「路面湿潤」時に「車両単独」で発生していたことが分かった。また事故発生前に第一走行車線よりも第二走行車線を走行している車両の事故率が高いことが分かった。これはCランプの分流・合流箇所や線形が影響していると考えられる。

4. 安全対策とその効果

一般的に交通安全対策は、ハード対策（直接的効果）とソフト対策（間接的効果）に分けられる。高速道路会社が重点的に取り組んでいる安全対策の内容からそれぞれ具体的な内容について整理したものを表-4に示す。

(1) 安全対策の実施状況

2019年度までに実施した安全対策を施工順に整理したものを表-5に示す。Cランプでは、注意喚起を目的に線形誘導標や視線誘導標などの設置を行い、速度抑制対策として大型標識と路面標示を取り入れている。また降雨時の走行改善は2007年度に広範囲に高機能舗装を施工した箇所の劣化を補修した舗装補修年月について記した。

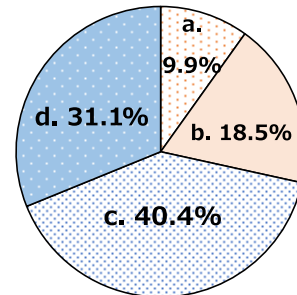


図-9 事故前走行・事故位置別事故件数の割合

表-4 安全対策の分類

安全対策の分類		
ハード対策	○降雨時の走行改善	・高機能舗装
	○注意喚起	・高輝度レーンマーク ・ランブルストリップス ・反射シート・テープ ・大型注意喚起標識 ・自発光式視線誘導標 ・矢羽根板
	○速度抑制対策	・大型注意喚起標識 ・導流レーンマーク ・薄層舗装
ソフト対策	○交通情報提供	・広域情報板、休憩施設情報板 ・ハイウェイラジオ
	○ITS技術を利用した安全対策	・逆走防止システム ・ITSスポットサービス ・アイハイウェイ ・メディア放送の活用 ・プローブデータの活用

a) 累計事故件数と安全対策

累計事故件数について整理したものを図-10に示す。この累計事故件数のグラフに、施工内容に対応している表-5の対策No.を重ねている。①から⑤までの曲線部の注意喚起や大型標識のハード対策の目立った効果が見られず2015年度前後に事故が増加している。一原因として2007年度に施工した舗装の経年劣化が考えられた。その後、第一・第二走行ともに高機能舗装の補修(⑥・⑦)が実施された。

2011年度から2015年度上半期頃までと、2015年度下半期から2020年度まででグラフの傾きが大きく変化していることが分かる。このときの変化点に⑥・⑦の「高機能舗装の補修工事」と、⑧「路面標示(減速車線マークの付加, 速度落せ)」がある(写真-2)。降雨時の走行改善(高機能舗装の機能回復)と速度抑制(路面標示)を目的として実施した対策が事故抑制に寄与したと考えられる。これはCランプで発生している事故の約9割が「路面湿潤時」に発生し、原因が「速度超過」であることに合致した対策となっていたことが大きく影響していると考えられる。

b) 区間別事故件数の推移と事故対策

次にC300からC1050までの区間において、路面状況が湿潤A・Bに該当する際に発生した事故の発生位置について、事故発生傾向が変化した、2015年度までとそれ以降を上下に分けて記載したグラフを図-11に示す。

さらに、事故発生件数と事故対策区間との関係を示すために、グラフの上部・下部に表-5の対策No.と対策範囲を記載した。なお、高機能舗装補修については矢印で、それ以外は横棒で示している。

事故が増加し始めた2013年度から注意喚起を目的として事故多発地点であったC400からC600の区間に集中して対策が実施された(表-5)、(図-11)。2016年度以降は、それまでの事故多発地点であったC400からC600の区間(以下、第1期事故多発区間という)では事故はほとんど発生しておらず、全体的な事故発生件数も前半の5年間と比較すると減少傾向であったが、新たにC600からC800までの区間が事故多発地点となった(以下、第2期事故多発区間という)。この区間においても対策は実施しているものの、C400からC600の区間とは対策件数や内容は異なっている。

表-5 安全対策の経過と内容

No.	年月	分類	施工内容	位置・区間
①	2013.3	○その他	防護柵の接続部端部処理	C600ボックスカルバート部入口
			防護柵追加設置	C520右側路肩
②	2013.8	○注意喚起	線形誘導標(300×400mm)	C340-C800
③	2013.8	○その他	車線分離標(合流部)	C840-C880
④	2013.8	○速度抑制対策	大型注意喚起標識「急カーブ速度落せ」(2000×3000mm)	C300
⑤	2014.12	○注意喚起	自発光式視線誘導標×7基	C340-C500
⑥	2015.8	○降雨時の走行改善	高機能舗装(第一走行)補修	C316-C590, C700-C860
⑦	2015.9	○降雨時の走行改善	高機能舗装(第二走行)補修	C316-C590, C770-C1007
⑧	2015.9	○速度抑制対策	路面標示(減速車線マーク)	一部を除く全区間
			路面標示「速度落せ」	C20
⑨	2016.3	○注意喚起	路面標示(矢印), 高輝度矢印板	C840-C880
⑩	2019.1	○その他	ボックスカルバート内LED照明更新	C120-C200, C590-C700
⑪	2020.3	○注意喚起	行先補助標識	C60ボックスカルバート部入口, ランプ分岐

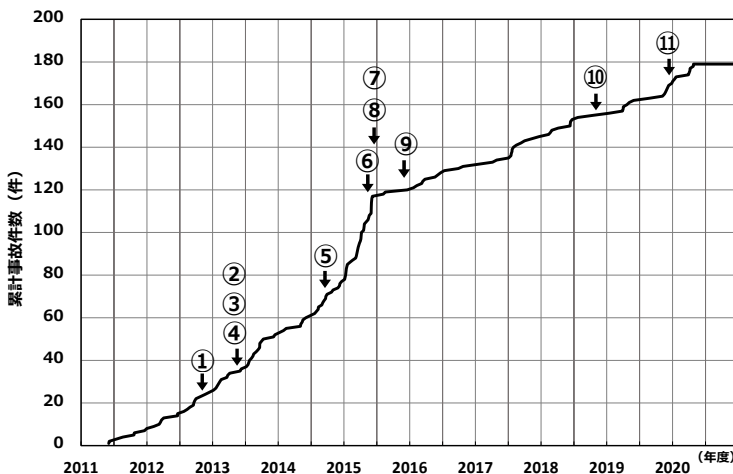


図-10 過去10年間の累計事故件数

写真-2 湾岸線分岐付近 路面標示(減速車線マーク)・「速度落せ」



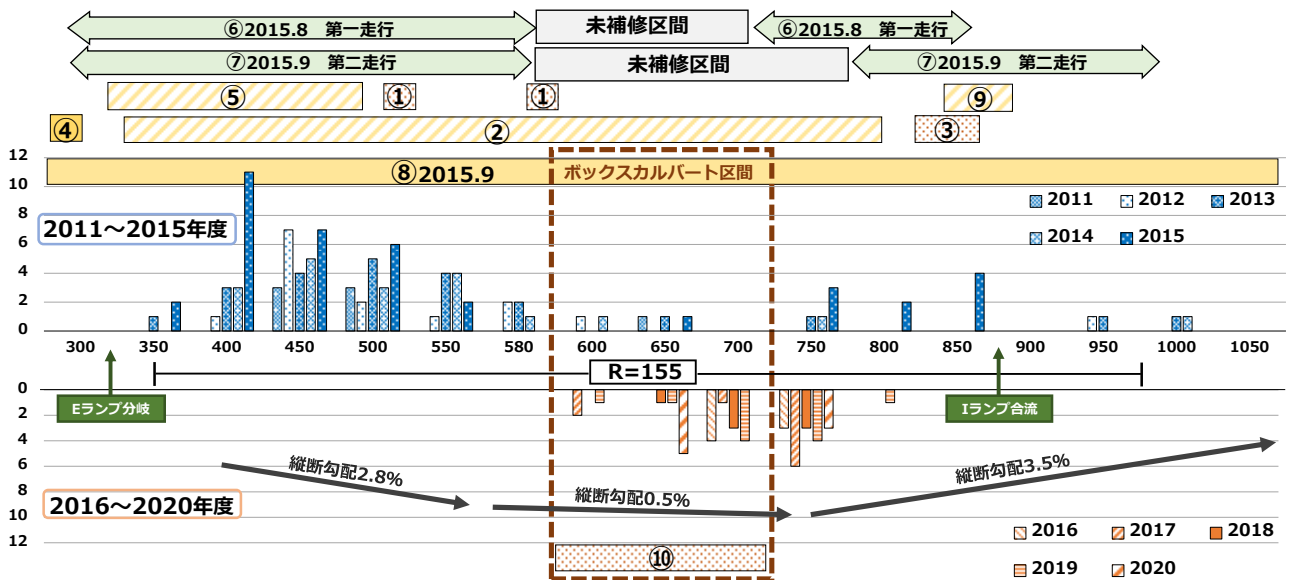


図-11 区間別事故件数と各種対策

特に、⑥・⑦の舗装補修工事以降、実施していない区間に事故が集中していることから、舗装補修工事が事故対策に有効であったと考えられる。また、第2期事故多発区間はボックスカルバート区間でもあることから追加で事故対策の実施を計画した。

c) 横すべり速度の計算

図-11より、舗装補修がなされていない区間での事故が増加傾向であり舗装の機能低下が事故原因の一因と考えられたため事故多発区間のすべり抵抗値等の調査を実施した。

文献²⁾を参考に式(1)にて第二走行車線走行時の条件とすべり抵抗値の実測値から横すべり速度を算出した(表-6)。

$$V = \sqrt{R(127(i+f))} \quad (1)$$

ここでVは速度(kmh)、Rは曲線半径(m)、iは路面の片勾配、fは路面とタイヤの摩擦係数(すべり抵抗値)である。表-6の結果から横すべり速度は規制速度の50kmhを満足していることが確認できた。

表-6 C600とC800における横すべり速度の試算

区間	R(m)	i(%)	f(実測値)	V(km/h)
C600	153.25	8.00	0.269	82.4
C800	153.25	8.00	0.326	88.9

d) 調査検討結果と対策の検討

Cランプは阪神高速本線の第一走行車線から分岐したランプであるため、本線の走行速度が維持された状態で走行速度が速くなっている可能性があることや、R=155mの右カーブと下り坂の線形及び勾配が事故に影響していると考えられる。また、第二走行車線を走行し

ている車両の方が、事故発生前に分流・合流がある第一走行車線よりも速度が出やすいことが事故率が高い原因と考えられる。なお、第1期事故多発区間の事例から舗装の機能劣化が考えられたが前項の「横すべり速度」の計算結果及び路面性状調査の結果は各補修基準を下回っていなかった。

以上のことから2020年度の安全対策は第2期事故多発区間の手前であるC550付近から速度抑制を働きかけることとボックスカルバート区間の線形明示を追加対策⁴⁾として選定した。

(3) 2020年度に実施した対策と効果

過去に発生した事故の傾向などから以下の安全対策①②③を11月に、④を2月に実施した。

①全区間にわたり、減速路面標示が薄くなっていたため再施工を行った。

②「ハンドル操作不適」や「スピード違反」が原因となり事故に発展する車両へのアプローチとして、運転者への道路構造・カーブ線形予告のため、既設の曲線予告大型警戒標識にカーブ延長を追加表示した(写真-3)。カーブ付近には、曲線区間の強調と「速度落せ」の表記を加えた警戒標識の設置を行った(写真-4)。

③第2期事故多発区間手前C580と第2期事故多発区間であるC700の前後区間に、路面湿潤時に走行する車両への注意喚起として「スリップ注意」の警戒標識を設置した(写真-5)。

④C590からC700の区間のボックスカルバート内での事故が近年増加傾向にあることから、壁面貼付式の線形誘導標を設置した(写真-6)。



写真3 C300付近 大型警戒標識



写真4 曲線入口部大型警戒標識



写真5 ボックスカルバート手前下り坂
スリップ注意 (C520からC570)



写真6 ボックスカルバート内 線形誘導標

各種対策を行った結果、2020年度8月から3月末までは事故0件を継続し、減少傾向が見られたが、2021年度は17件事故が発生した。そのうち16件が降雨時に起きた事故であり、第2期事故多発区間での事故が約8割（12件）を占めていることから、更なる安全対策（未補修区間の舗装補修、減速路面標示、ソフト対策）の実施に向けて計画を進めることとした。

5. おわりに

垂水ジャンクションCランプでは、過去に事故が多く発生していたが、2012年度から2020年度まで「高機能舗装の補修」や「大型警戒標識・線形誘導標の設置」など様々な安全対策が実施され、年平均10件程度まで減少してきた。2021年度に17件の事故が発生したことにより、これまでの事故傾向や対策の検討結果から、ボックスカルバート区間を含む第2期事故多発区間の舗装補修工事を2022年度に実施することが決定した。本区間の施工は

2022年9月下旬に完了しており、経過観察を行っているところである。

またCランプでの実績をもとに、その他のランプについても分析を行い事故の傾向に合わせた安全対策の実施を進めていく計画である。

今後も本四道路を利用されるお客様に安全・安心・快適な道路環境を提供するために必要な安全対策の実施を進めたい。

参考文献

- 1) 公益財団法人高速道路調査会 高速道路クオリティ研究部会：高速道路における自動運転に関する研究，pp.23-31，2019.3
- 2) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，pp.314-323，2015.6
- 3) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，pp.68-69，1982.7
- 4) 石田眞二，松田泰明：カーブ区間における線形誘導標示板がドライバーの視線挙動に与える影響，交通工学論文集，第6巻，第1号：第6巻，第1号，pp.1-10，2020.1

愛知県豊山町「志水小学校地区」 包括的交通安全対策の取り組み

竹内 秋広¹・辻元 脩策²

¹中部地方整備局 名古屋国道事務所（〒467-0833 名古屋市瑞穂区鍵田町2-30）

²中部地方整備局 名古屋国道事務所 交通対策課（〒467-0833 名古屋市瑞穂区鍵田町2-30）

近年、幹線道路における死傷事故件数は大きく減少している一方、生活道路における死傷事故件数は横ばい傾向となっており、生活道路の交通安全確保は重点的に対応すべき課題となっている。名古屋国道事務所では、ETC2.0プローブデータ等の交通ビッグデータを活用した技術支援を行うとともに、学識者や地方自治体等の関係機関と連携した「合同交通安全対策検討懇話会」を設立して包括的交通安全対策の検討に取り組んでいる。本稿では、愛知県豊山町「志水小学校地区」において、生活道路の安全性・幹線道路の円滑性を包括的に検討・実施して、効果を検証した実事例について報告する。

キーワード：包括的交通安全対策，生活道路交通安全対策，幹線道路円滑対策，ETC2.0プローブデータ，物理的デバイス

1. はじめに

愛知県は2003年（平成15年）から2018年（平成30年）にかけて交通事故死者数全国ワースト1位と不名誉な記録が続き、2021年（令和3年）には117人と全国ワースト7位となったものの、高齢者事故・歩行者事故など交通弱者の関係する交通死亡事故の割合は増加しており、直轄国道（幹線道路）に留めず生活道路における交通安全の確保も喫緊の課題とされている。

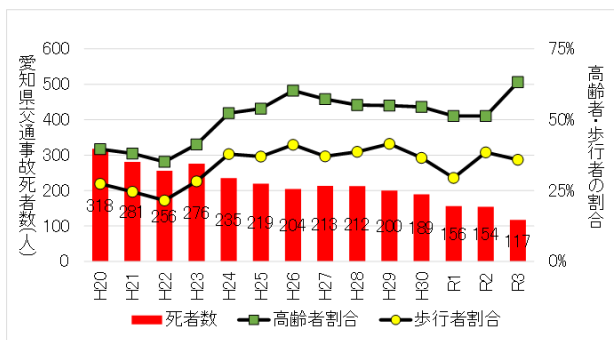


図-1 愛知県内の交通事故死者数の推移¹⁾

2. 生活道路における交通安全施策

交通戦争と言われた昭和40年代から様々な生活道路における交通安全施策が打ち出されており、生活道路等における人優先の安全・安心な歩行空間の整備を推進している。近年では、2012年（平成24年）4月京都市亀岡

市・2019年（令和元年）5月滋賀県大津市・2021年（令和3年）6月千葉県八街市における通学児童や園児が関係する凄惨な交通死亡事故を受けて、「コミュニティゾーン形成」「安心歩行エリア」「ゾーン30プラス」など関係省庁とも連携した様々な施策を展開しているところがある。

こうした中、名古屋国道事務所では、幹線道路混雑時の抜け道利用に伴う生活道路の安全性低下など交通課題が残されていることに着目し、自動車の走行性を重視する幹線道路と、地域の人々が通勤・通学などで利用する生活道路の区別をより明確にした上で、安全性や円滑性を考慮した面的な交通事故対策を包括的に実施する取り組みを推進している。

本稿では、愛知県豊山町「志水小学校地区」において包括的（面的）に対策を検討し、その効果を検証した結果について報告するものである。

3. 志水小学校地区の概要

志水小学校地区は、名古屋市に隣接して幹線道路（国道41号・主要地方道春日井稲沢線・一般県道名古屋豊山稲沢線）に囲まれた住居地域が主体のエリアで、その中心部に町立志水小学校や保育園、近接して県立北高校が位置している。通学路指定区間や主要渋滞箇所が存在しており、その中でも志水小学校西側で南北方向を結ぶ町道では、朝の通勤・通学時間帯に歩道未整備区間へ通過交

通が多く流入しており、2019年（令和元年）11月に自転車とトラックの交通死亡事故が発生するなど、地域としても対策の必要性を強く感じている区間とされていた。



図-2 志水小学校西側町道の交通状況（朝ピーク時）

課題が山積する当該地区の検討にあたり、地元行政機関である豊山町に加えて、道路管理者・公安委員会・学識者で構成する「合同交通安全対策検討懇話会」を開催した。

4. 現状課題の把握【Plan】

(1) 交通ビッグデータの活用による課題抽出

事故データや交通ビッグデータであるETC2.0プローブデータなどの解析により、志水小学校地区の安全性や円滑性に関する交通課題を客観的に抽出している。

a) 生活道路における死傷事故・急挙動の発生状況

志水小学校西側・北側の町道を中心に、生活道路同士の小規模交差点や交差点付近で死傷事故や急減速（急ブレーキ）が多発していることが明らかとなった。

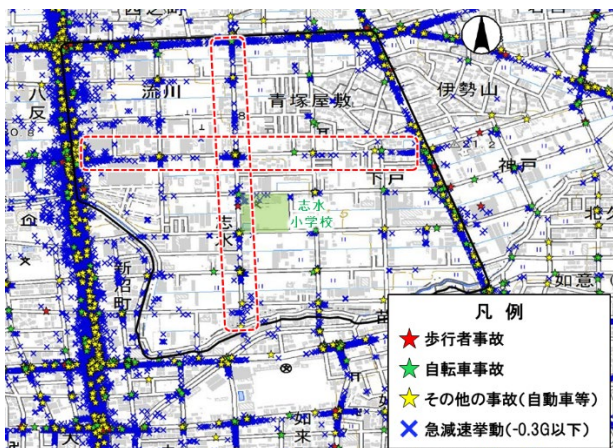


図-3 死傷事故・急挙動発生状況

b) 走行速度の状況

区間単位（DRMリンク単位）の集計で平均走行速度が30km/hを超える区間が存在することを確認するとともに、志水小学校西側の着目区間については物理的デバイスの設置等を念頭に速度分布など詳細状況を確認した。

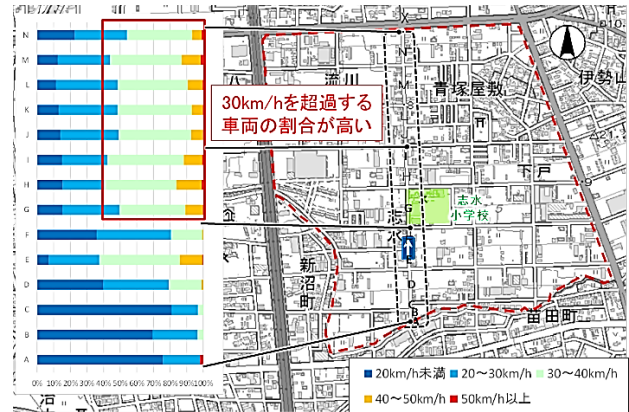


図-4 着目した生活道路の速度分布集計

幹線道路については、時間帯別の走行速度を把握するとともに、ETC2.0プローブデータの地点速度データを活用した速度コンター図を作成し、渋滞の程度・範囲を詳細に把握した。その他、幹線道路利用・抜け道利用の走行経路に応じた平均所要時間の集計等を実施して、交通特性を明らかにしている。

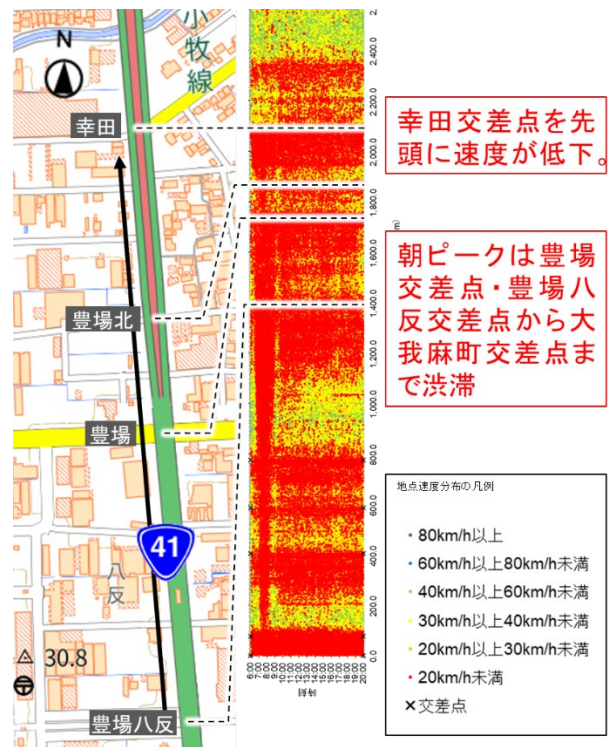


図-5 幹線道路の速度分析（速度コンター図（北行き））

c) 通過交通の状況

通過交通（抜け道利用）の状況を把握するにあたり、ETC2.0プローブデータの走行履歴データを連続表示（アニメーション表示）することで、国道41号の豊場交差点や県道名古屋豊山稲沢線の伊勢山交差点の混雑を回避した車両が、志水小学校西側の町道を抜け道として利用していることを明らかにした。

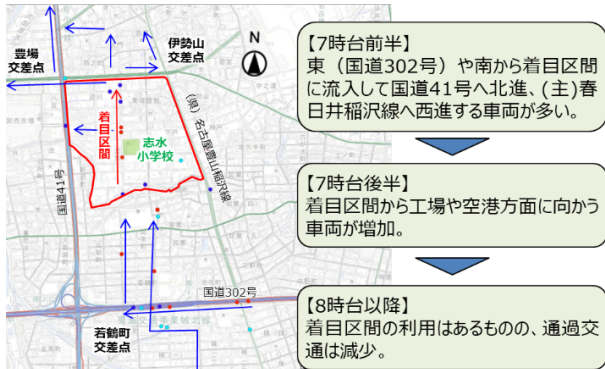


図-6 抜け道利用状況のアニメーション表示

(2) 交通実態調査

ETC2.0プローブデータは対応車載器を搭載した限定的な車両情報となっているとともに、歩行者・自転車に関する情報を取得できない点に留意が必要である。このことから、データを補完するため、交通実態調査を実施した。

表-1 交通実態調査内容

対象箇所	調査内容
着目町道の代表交差点	一時停止規制の遵守状況 方向別交通量
着目町道の代表断面	自転車の進行方向 通行位置
豊場交差点（国道41号）周辺	滞留長・渋滞長 通過時間・信号現示
伊勢山交差点（県道名古屋豊山稲沢線）周辺	交通量・滞留長 渋滞長・信号現示

交通実態調査では、生活道路における一時停止遵守率が低い点、国道41号豊場交差点と北側に位置する幸田交差点の信号オフセットの関係で先詰まり渋滞が発生している点、県道名古屋豊山稲沢線の伊勢山交差点では隣接する伊勢山東交差点との関係で北行きに十分な信号青時間が確保できていない点など結果を得ることができた。

5. 対策の検討・実施【Plan・Do】

現状課題の把握を踏まえ、生活道路の安全性・幹線道路の円滑性を地域全体で包括的に捉え、各々の対策が有機的に作用することを意識して検討を進めている。

(1) 道路機能の明確化

現況の地域特性や道路利用特性を考慮して、生活道路と幹線道路の機能を分化した道路ネットワークの“あるべき姿”を定義した。

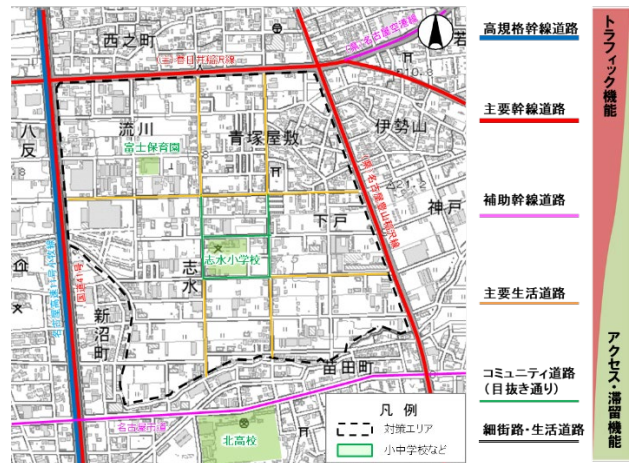


図-7 道路機能の明確化

(2) 生活道路対策

生活道路において交通安全対策は、通過交通の利用が多く交通課題が集積する志水小学校西側の町道を先行して検討した。

a) 交通規制

志水小学校西側の町道は朝の通勤・通学時間帯に通過交通が多く流入していることから、区間南側の流入部で一方通行規制や時間規制などの対策案が出された。しかし、一部の住宅で車によるアクセスが不可能となること、別区間に通過交通が流入する懸念があることが指摘され、当面は実施を見合わせるものとした。

b) 物理的デバイス

物理的デバイスの設置には道路幅員や沿道施設出入りなど各種制約が考えられることから、交通事故・急挙動・走行速度の状況や道路幅員・施工性を複合的に条件整理するとともに、「合同交通安全対策検討懇話会」による合同現地調査を実施して、早期対策箇所を選定した。

以上の検討プロセスを経て、2021年（令和3年）秋に志水小学校西側の町道で一方通行区間の出口部に狭窄、その南側の死亡事故発生交差点にランプを施工した。



図-8 物理的デバイスの設置状況

(3) 幹線道路対策

生活道路へ通過交通が流入する主要因は幹線道路の渋滞であり、当該地区においては国道41号・県道名古屋豊山稲沢線の北行きの渋滞が重点的に対処すべき課題であることが明らかであった。幹線道路における交差点改良等による改善は困難であることを鑑み、早期に実現可能で効果が見込まれる信号現示の調整により交通の円滑化を図る方針で検討を進めた。

a) 信号オフセットの調整検討（国道41号）

志水小学校地区の西側に位置する国道41号は交通需要が極めて多中、北向きのボトルネック交差点となっている幸田交差点と豊場交差点のオフセットにより発進遅れが生じていることが確認されている。このため、豊場交差点と幸田交差点のオフセット（現行15秒）を調整した際に、上下方向で生じる損失時間を算出して改善の可能性を検証した。

この結果、オフセットの調整によるメリット・デメリットを確認することができた。

b) 信号現示の調整検討（県道名古屋豊山稲沢線）

志水小学校地区の西側に位置する県道名古屋稲沢線は伊勢山交差点がボトルネックとなり北行きの渋滞が課題となっているが、隣接する伊勢山東交差点との連動も考慮した複雑な交通運用を検討することが必要とされた。このため、マイクロ交通シミュレーションを適用して信号現示の最適化を検討した。

伊勢山交差点における北行きの渋滞が課題となることから、東西方向の信号青時間を南北方向に配分したケースで試算している。この結果、東西方向から南北方向へ10秒配分（ケース①）すると、南北方向で渋滞が解消、東西方向で渋滞が生じるものの大きな影響が出ない結果が得られた。同様に20秒配分（ケース②）すると、南北方向は渋滞が解消するものの、伊勢山東交差点も関係する西側で渋滞が発生することが明らかとなった。

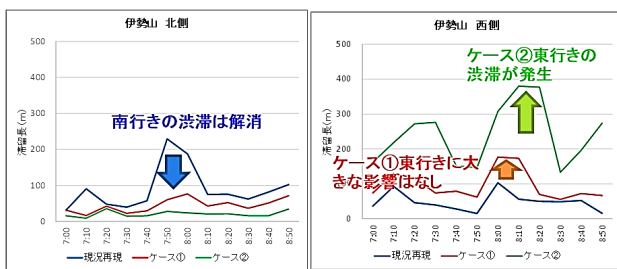


図-9 オフセット調整による滞留長の試算結果

信号オフセットや信号現示の単純な調整では通過交通を排除できる顕著な効果が見込めない中、愛知県警察本部において国道41号の豊場交差点、県道名古屋豊山稲沢線の伊勢山交差点の周辺区間に車両感知器を設置し、交通状況に応じて信号現示を調整する制御システムを導入することとなり、2021年（令和3年）2月より運用が開

始された。

6. 効果の検証【Check】

ETC2.0プローブデータや交通実態調査結果に基づき、短期対策として実施した対策について効果検証した。

(1) 物理的デバイスによる効果

a) 生活道路の走行速度

ETC2.0プローブデータによる狭窄設置区間の走行速度は、一時停止規制があるため狭窄直近では変化が無いものの、その手前30m～40m区間で顕著な速度低下が発現しており、安全な速度での交差点進入が確認できた。同様に、交差点ランプを設置した区間においても、30km/hを超過する車両の割合が減少していることを確認している。

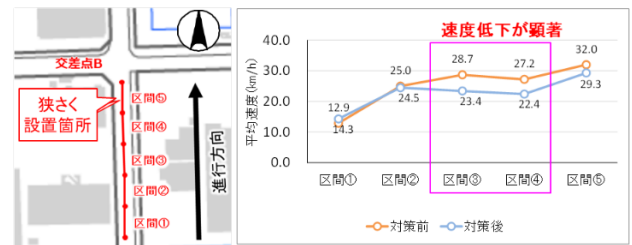
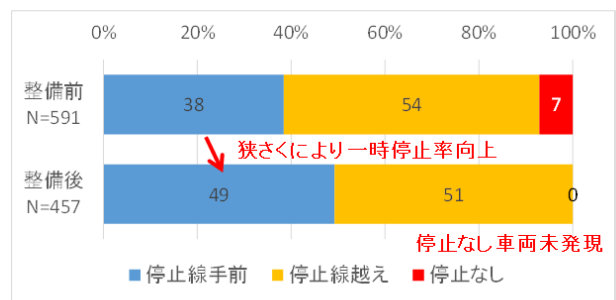


図-10 狭窄部の走行速度 (10m間隔) 変化

b) 生活道路の一時停止遵守状況

狭窄設置箇所では従来から止まれ強調路面表示や交差点カラー舗装が施されていたが、物理的デバイスの設置により安全意識が高まり、一時停止率が上昇したものと考えられる。また、交差点内部に凸部を整備した交差点ランプでは、流入部における一時停止状況に顕著な変化は見られなかった。



【出典】交通実態調査(対策前:R2.2.28、対策後:R4.1.12 ※7～9時)

図-11 狭窄部の一時停止遵守状況変化

(2) 幹線道路の円滑化による効果

a) 幹線道路の走行速度

信号現示を調整する制御システムを導入した幹線道路についてETC2.0プローブデータを活用して、コロナ禍前の2019年（令和元年）・対策前の2020年（令和2年）・対策後の2021年（令和3年）の9月における国道41号の時

間帯別走行速度を集計すると、交通需要が特に多い朝ピーク時に顕著な速度上昇を示している。

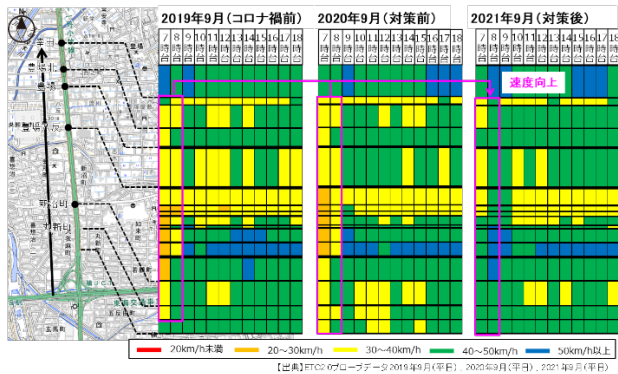


図-12 国道41号北行きの走行速度変化

同様に、一般県道名古屋豊山稲沢線の伊勢山交差点においても、課題となっていた北行きの走行速度は朝ピーク時に顕著な上昇を示している。コロナ禍によるテレワークや時差出勤による交通量減少の影響も考えられたが、近隣のトラフィックカウンターで交通量の著しい減少は見られないことから、信号現示の調整が有効に機能して幹線道路の走行性が向上したものと考えられる。

b) 幹線道路と生活道路（抜け道）の所要時間

国道302号池花町交差点から国道41号幸田交差点までの幹線道路と生活道路（抜け道）を利用した際の所要時間の変化について、ETC2.0プローブデータの走行履歴データより比較した。

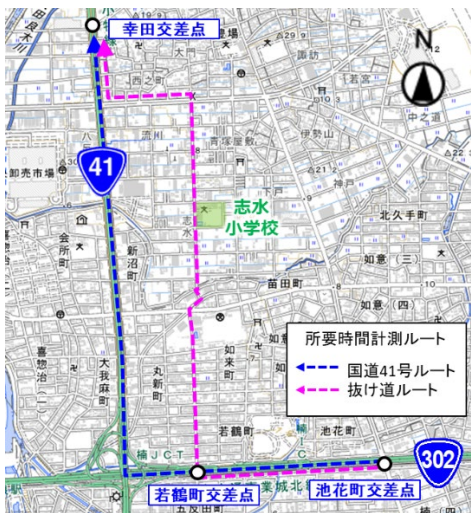


図-13 所要時間の比較ルート

この結果、幹線道路ルートは平均所要時間が14.7分から10.7分と4分短縮するとともに、所要時間の分布が小さくなっていることから定時制も大きく向上したと捉えることができる。

また、生活道路（抜け道）ルートでは対策前後で平均

所要時間が10.7分から9.6分と大きな変化はなく、対策後は幹線道路ルートとの差も僅かなものとなっている。

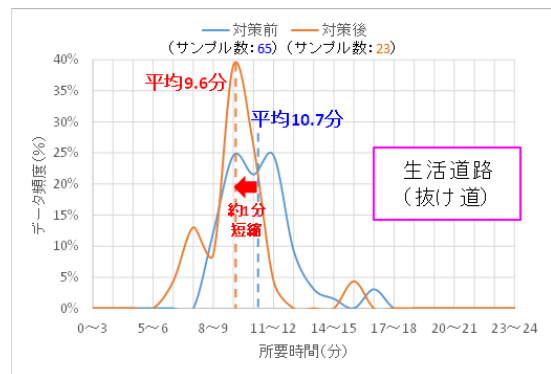
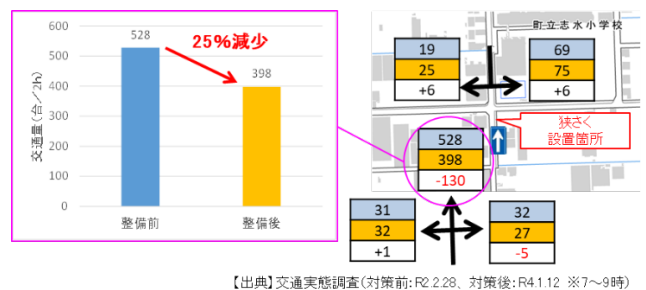


図-14 利用ルート別の所要時間変化

c) 生活道路の交通量・通過交通割合

着目した志水小学校西側町道における交通量の実態調査を行い対策前後で比較すると、問題視していた北行きの交通量が約25%減少していることが明らかとなった。北行き以外の交通量に大きな変化が見られないことから、生活道路における通過交通の抑制効果が定量的に示されていると考えられる。



【出典】交通実態調査(対策前:R2.2.28、対策後:R4.1.12 ※7~9時)

図-15 生活道路の交通量変化（狭窄設置箇所・7:00~9:00）

また、ETC2.0プローブデータの走行履歴データから着目区間を通行する車両の通過交通割合（志水小学校地区内に発着地を有さない車両の割合）を集計すると、69.4%から60.7%と約1割減少しているという結果も得られている。

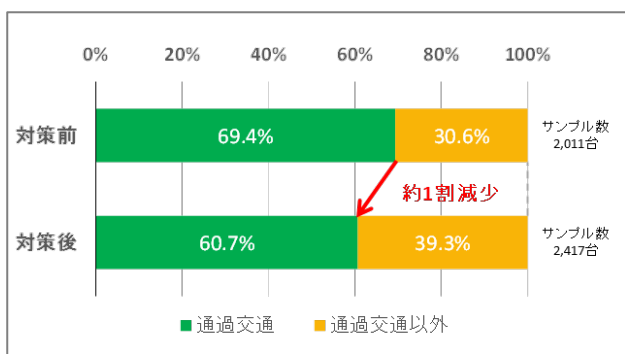


図-16 通過交通割合の変化 (7:00~9:00)

以上より、信号現示の調整を高度化することによる幹線道路の円滑化と、物理的デバイスによる生活道路の走行性低下が作用することにより、生活道路を利用していた通過交通の一部が幹線道路へ転換して「道路の使われ方の適正化（道路機能分化）」が一定レベルで図れたものと捉えることができる。

また、交通転換により幹線道路の交通量が増えて走行性が低下することも懸念されたが、一日25,000台近くの交通を処理する国道41号北行き交通への影響はごく僅かであり、実際に幹線道路で速度は低下していないことから副作用等も発現していないものと考えている。

7. まとめ・今後の課題【Action】

今回の豊山町「志水小学校地区」における包括的交通安全対策の検討では、早期に実現できる対策メニューを実施して効果検証に至る一連の“PDCAサイクル”による検討を実践することができた。生活道路における車両の走行速度低下や通過交通の排除を実現しつつ、幹線道路の円滑性を確保・向上できた点は、包括的交通安全対策としての検討が有益であることを実証する成果になったと考えられ、同様の交通課題を抱える他の地区で検討する際の一助となることに期待する。

一方で、志水小学校西側の町道北側区間に位置する交差点で、走行速度が高く急挙動など多発しているにも関わらず沿道施設等の影響で対策が実施できていない現状があるとともに、朝ピーク時間帯を中心に通過交通の流入が依然として見受けられることから、事故発生状況や交通状況を継続的にモニタリングし、必要に応じて追加対策等を検討・実施することが必要と考えている。

謝辞：包括的交通安全対策の検討にあたり、課題抽出や対策検討に貴重なご意見を頂きました合同交通安全対策検討懇話会のメンバーである名古屋大学の中村英樹教授・井料美帆准教授、名古屋工業大学の鈴木弘司准教授をはじめ、道路管理者・警察の行政関係者の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 愛知県内の交通事故死者数（愛知県警察本部）

国道3号鞘ヶ谷橋の損傷及び補修報告について

小川 拓海¹・松坂 千寛²
金ヶ江 悠太郎²・

¹九州地方整備局 北九州国道事務所 八幡維持出張所（〒806-0049 福岡県北九州市八幡西区穴生4-12-1）

²九州地方整備局 北九州国道事務所 管理第二課（〒802-0803 福岡県北九州市小倉南区春ヶ丘10-10）

国道3号鞘ヶ谷橋の支承の損傷が見つかった。本論文は、この損傷に関して、コンサルタント・有識者と共に詳細調査、損傷原因の究明及び補修方針を検討した内容を報告するものである。

Key Words : 橋梁点検, 橋梁補修, 支承損傷, 磁粉探傷試験

1. はじめに

笹子トンネル天井板落下事故を踏まえ、国土交通省においては、平成25年を「メンテナンス元年」と位置付け、道路分野においても、急遽、緊急点検・集中点検を実施し、第三者被害防止の観点から最低限の安全性を確認したところである。

さらに、「社会資本整備審議会・交通政策審議会 技術分科会 技術部会 社会資本メンテナンス戦略小委員会」や「社会資本整備審議会 道路分科会 道路メンテナンス技術小委員会」での議論も踏まえ、メンテナンスサイクルを回すために様々な取り組みが本格的に始まった。

取り組みの1つとして、平成25年度の道路法改正等を受け、道路管理者は全ての橋梁、トンネル、道路付属物等について、5年に1度の近接しての点検が義務付けられた。平成30年度に1巡目の点検が完了し、平成31年から2巡目点検が実施されている。

鞘ヶ谷橋は、国道3号の北九州市にある橋梁（写真-1、図-1）で、昭和38年に架設し、現在までに59年経過している。



写真-1 橋梁全景（右がA1橋台-起点側）

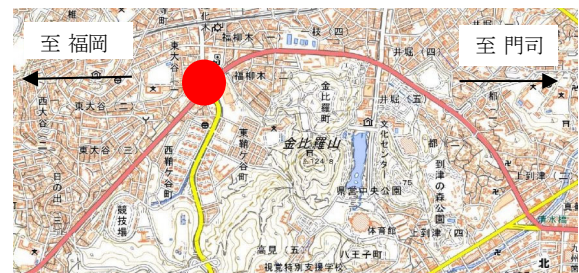


図-1 位置図

本橋梁は、令和2年度の橋梁点検で、支承部の機能障害がA1側で確認された。症状は、支承ローラー部のずれや腐食及び下フランジの変形が生じている。（写真-2）また、バラベットと上部工とが接触し水平変位が拘束され反力の伝達に重大な障害が確認された。構造上の安全性の観点から速やかに補修を行う必要があるが、その前段として原因の究明が必要であるため、支承の損傷をS1判定（※注1）とし、橋梁全体をⅢ判定（※注2）と

した。



写真-2 支承損傷状況

また、この損傷については、令和4年3月に開催した「直轄症例検討会」で「KABSE（九州橋梁・構造工学研究会）」との意見交換会を実施した際に、直轄の損傷事例としてとり挙げた。そこで損傷状況及び調査結果を報告し、今後の原因究明と効果的な補修対策の検討をするために、有識者及び専門技術者の意見を伺った。さらに、令和4年5月に九州工業大学の山口教授（TEC-Doctor）にご協力いただき、合同で現地調査や損傷原因の究明、補修対策の検討を行った。

本稿では、支承の損傷について、有識者及び専門技術者より伺った意見を基に行った調査の結果と損傷の原因、今後の補修方針について報告するものである。

※注1 詳細調査の必要がある。

※注2 道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に処置を講ずるべき状態。

2. 橋梁の概要

橋梁諸元を表-1、側面図を図-2に示す。

表-1 橋梁諸元

所在地	:	北九州市戸畑区鞆ヶ谷
橋長	:	42.60m
幅員	:	全幅員 14.3m
上部工形式	:	鋼単純合成鈹桁橋
下部工形式	:	控え壁式橋台 2基
基礎形式	:	場所打ち杭 φ1200~1000
架設年次	:	昭和 38 年（1963 年）

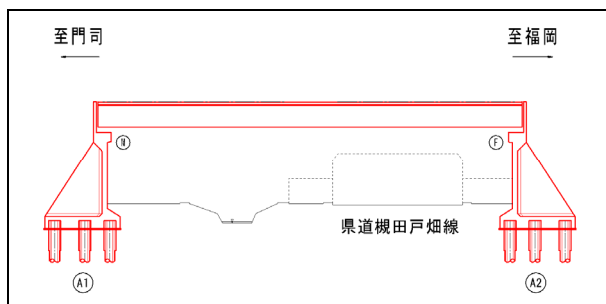


図-2 側面図

3. 損傷詳細調査

損傷診断を踏まえて、より詳細な調査を実施した。

(1) A1橋台側

本橋梁は主桁が5本あり、ローラー支承が用いられている。すべての桁端で同様の症状が確認された。

a) 支承ローラー部

支承がパラペット側に移動して底板とずれ、下杓とパラペットが接触している。接触箇所では、パラペットのコンクリートが欠損している（写真-3）。



写真-3 接触・欠損状況

b) 桁遊間

主桁とパラペットの遊間異常が確認され、G2、G3桁では遊間が0mmとなっている（表-2）。

表-2 主桁の遊間状況

主桁番号	当初 (mm)	上段 (mm)	下段 (mm)
G1	150	25	28
G2	150	0	0
G3	150	0	0
G4	150	15	37
G5	150	25	30

c) 腐食及び下フランジの変形

著しい腐食と下フランジの変形が確認されている（写真-4）。なお、この橋にはソールプレートがなく、上杓と下フランジがボルトで接合されている。



写真-4 下フランジの変形

d) その他

漏水の原因として、伸縮装置以外にも排水施設の腐食、欠損等が確認された。

(2) A2橋台側

ピン支承が用いられており、桁と下沓のパラペットへの接触は見られなかったものの、A1橋台側と同様に下フランジの変形が確認された。

また、A1橋台側ではなかった下フランジの亀裂がG1及びG5主桁で生じていた。

a) G1主桁

主桁ウェブと下フランジの溶接線に沿って、亀裂が生じている（写真-5）。



写真-5 主桁亀裂：支承中心より胸壁側

下フランジ下面からも亀裂が確認されることから、亀裂は下フランジを貫通していることが分かる（写真-6）。



写真-6 主桁亀裂：下フランジ下面

b) G5主桁

亀裂は2方向に発生しており、亀裂①は下フランジの断面方向に発生し、下フランジには段差が生じている。亀裂②は主桁ウェブと下フランジの溶接線に沿って生じている。2つの亀裂は交差部で止まっており、ウェブ方向には延びていない（写真-7）。



写真-7 亀裂①、②の状況

亀裂②は下フランジ下面でも確認されることから、亀裂①、②ともに下フランジを貫通していることが分かる。

c) その他

A1橋台側と同様に漏水の原因として、伸縮装置以外にも排水施設の腐食、欠損等が確認された。

(3) 下部工

検討の中で橋台の移動・傾斜が疑われたため、3Dスキャナーによる形状計測を実施した。

既存資料より、橋台堅壁前面は垂直に計画されていると判断されるが、計測の結果、A1橋台で0.242°、A2橋台で0.114°程度橋台が前面側に傾斜していることを確認し

た。

4. 合同現地調査

令和4年5月に診断精度の向上や、維持・管理性の向上を目的とし、九州工業大学の山口教授と合同で現地調査を行い意見を伺った（写真-8）。

いただいた意見を基に、追加で行った調査とその結果を下記に示す。



写真-8 合同現地調査状況

(1) 磁粉探傷試験

下フランジの亀裂の周辺で塗膜割れが確認されたため、亀裂までに至っているか確認するために、磁粉探傷試験を行った。調査の結果、塗膜割れの箇所でも複数のひび割れが新たに確認された（図-3）。ひび割れの発生箇所ほとんどが主桁ウェブと下フランジの溶接部だった。

(2) パラペット間の距離計測

橋台の動きを把握するために橋台パラペット間の距離の計測をG1、G3、G5主桁にて行った（表-3）。計測の結果、建設計画時よりも50mm～100mm短くなっていることが確認された。また、A1橋台側の可動支承は60mm～85mmずれている状態で確認されていることから、パラペット間の距離の変化は可動支承のずれの距離と概ね合致している。よって、下部工の傾斜と支承のずれが関連していることが分かる。

表-3 橋台パラペット間計測結果

主桁番号	建設時 (mm)	計測結果 (mm)	誤差 (mm)	支承の移動距離 (mm)
G1	42600	42550	50	60
G2				73
G3	42600	42500	100	85
G4				71
G5	42600	42520	80	64

5. 損傷原因

以上の調査結果を踏まえて、次のとおり損傷原因を推測する。

(1) 支承ローラーのずれ及び桁遊間の異常

支承ローラーのずれについては、3D計測結果及びA1支承ローラーのずれ方向、桁と橋台パラペット遊間が狭くなっていることから、両橋台が前面に傾斜したことにより生じたと推測される。

また、G2、G3主桁の遊間の異常については、パラペット前面形状を計測した結果、中央部付近が膨らんだ形状となっているために生じたと推測する。

(2) 桁の変形

桁の変形は、A2橋台でも見られることから、A1下沓とパラペットの接触による支承の機能障害ではなく、支承と主桁下フランジ間に発生した腐食膨張によるものが原因に挙げられる。上沓上の下フランジは、上沓の拘束がある分、ほかの箇所より変形し難いと思われる。そのため、錆により板厚が膨張したためと推測する。

(3) 支承本体の腐食

支承の腐食は、伸縮装置や排水施設からの漏水が橋座に滞水したことが原因と推測する。なお、支承に沓座がなく滞水が直接支承にかかる状態になっているため、腐食が進行しやすい環境となっている。

(4) 主桁の亀裂

下フランジと上沓を接合しているボルトと上沓縁端までの距離が、規定の上限を超過していた。道路橋示方書より最大縁端距離はフランジ厚の8倍とある。本橋のフランジ厚は10mmであるため、縁端距離は80mmとなっているはずだが計測の結果、90mmとなっており規定より10mm超過していた(写真-9)。

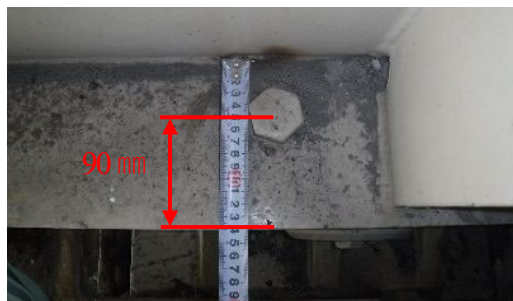


写真-9 縁端距離計測結果

そのため、下フランジと上沓の密着性が低く水が浸入し腐食が発生しやすい状態となっている。

また、本来設置されるべきであるソールプレートも設置されていない(写真-10)。



写真-10 ソールプレート未設置状況

よって、下フランジと上沓との密着性が低く水が浸入したことにより板厚減少を伴う腐食が発生し、そこに繰り返し荷重が載荷され亀裂が発生したと推測する。

6. 今後の対策・課題

今後の対策・課題として、応急的と恒久的に分けて処置・検討を行った。

(1) 応急対策

亀裂発生箇所にて応急対策を実施した。本橋は、大規模地震時に支承等が破損しても路面に段差が生じないように段差防止が設置されているため、これを仮支持点として対策を行った。段差防止と主桁下フランジには20cm程度の隙間があるため、隙間に緩衝ゴムを設置に対処した(写真-11)。(令和4年5月完了)



写真-11 緩衝ゴム設置

(2) 恒久対策

A1支承本体はローラーがずれて機能障害が生じているため、支承取替えを行う。この際、現状の位置では下沓とパラペットの遊間が確保できないため、支承位置の変更を行う。これに合わせて、桁端の遊間を確保するために桁端部を切断し、主桁の補強も行っていく。

しかし有識者より、桁をパラペットから離す事により桁からの反力がなくなり、橋台がさらに動くのではという意見が出ているため、この意見を踏まえて慎重に対応していく。

(3) 課題

橋台傾斜への対応について、現在傾斜が進行しているか収束しているか確認できていないため、定期的に計測

を行い進行性を把握する必要がある。今回は計測方法、位置について計画し追跡調査が可能な状態にする。追跡調査の結果、収束していなければ橋台の傾斜を抑える対策が必要であるため、これらについては今後の課題とする。

7. おわりに

今回の論文の作成に当たり、過去のデータの必要性を強く感じた。橋梁の補修検討を行うにあたり、損傷の発生時期を把握することはとても重要なことである。しかし、本橋では、過去の点検データや修繕の記録を十分にそろえることができなかつたため、損傷の発生時期を正確に押さえることができなかった

目先の維持管理ではなく、将来に向けて必要な記録・情報を整理し残しておくことで、より効果的で精度の高い維持管理につながると考える。

謝辞：対策方針の決定に向けて調査・検討に立ち会っていただいた山口教授や橋梁点検コンサルタントの方々、「直轄症例検討会」にて活発な議論を頂いた有識者及び専門技術者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 道路橋支承便覧，社団法人日本道路協会，平成3年7月
- 2) 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，社会資本整備審議会 道路分科会，平成26年4月
- 3) 道路橋点検必携～橋梁点検に関する参考資料～，公益社団法人日本道路協会，平成27年4月
- 4) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，公益社団法人 日本道路協会，平成29年11月

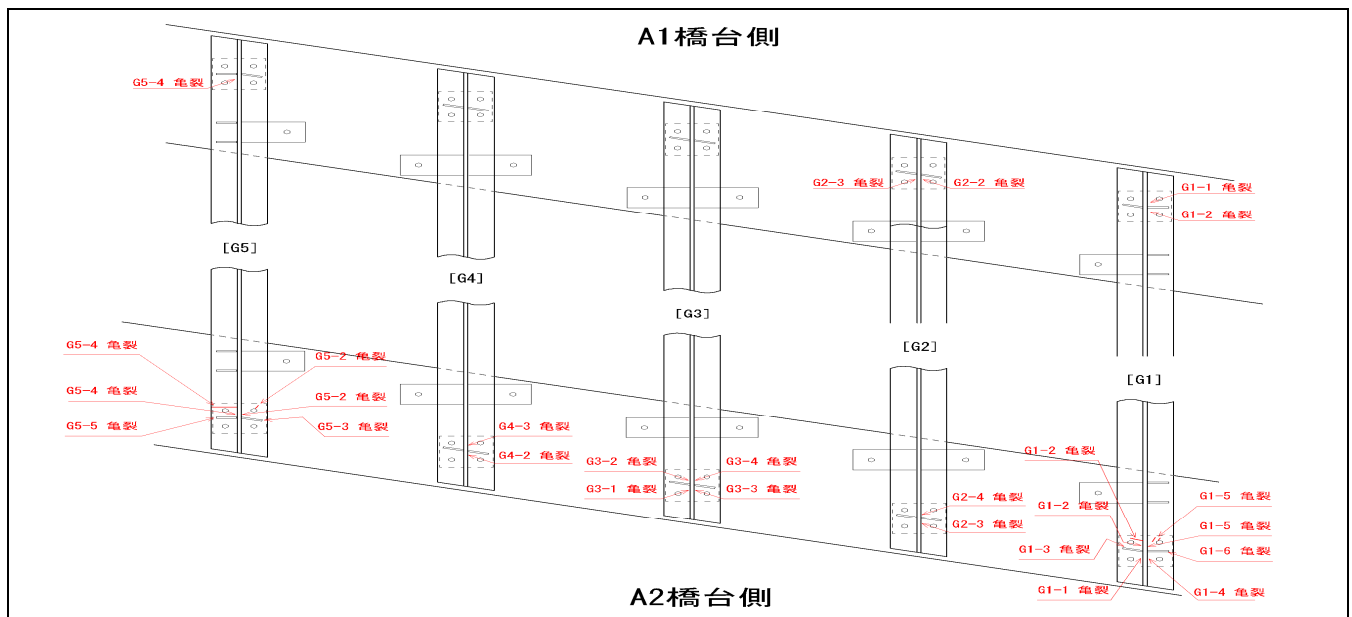


図-3 磁粉探傷試験結果

落橋防止構造等の取付部に用いる アンカーボルトの定着性能に関する実験的検討

廣江 亜紀子¹・菅原 達也¹・中尾 尚史²・大住 道生¹

¹国立研究開発法人土木研究所 橋梁構造研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²元 国立研究開発法人土木研究所 橋梁構造研究グループ、現 国立舞鶴工業高等専門学校
(〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234番地)。

落橋防止構造は、道路橋示方書において設計水平力に対して弾性範囲に留まることが求められているものの、取付部の具体的な照査方法が示されていない。落橋防止構造は複数本のアンカーボルトを用いて設置することが多いが、既往の研究には実際に落橋防止構造の取り付けの条件と合致する検討が少ない。本研究では、実際の落橋防止構造をRC橋台前面等に取り付ける場合に用いられる径のアンカーボルト複数本による定着性能について、引き抜き実験により破壊モードと抵抗特性の確認を行い、一定の前提条件の下、落橋防止構造全体の挙動として弾性範囲になるよう設計する方法を提案した。

キーワード 落橋防止構造, アンカーボルト, 抵抗特性, 群効果, コーン破壊

1. はじめに

落橋防止構造は、上部構造と下部構造または上部構造同士をケーブル等で接続するなどして、橋の上部構造が下部構造から容易には落下しないようにするための構造である。道路橋の性能には、耐荷性能、耐久性能の他に、橋の使用目的との適合性の観点から必要な性能（その他性能）があり、落橋防止構造はその他性能を満足するための構造である。落橋防止構造は取付部を含めて設計水平力に対して弾性域に留まるようにすることが、現行の道路橋示方書V編²⁾に規定されている。ここで弾性域に留めるとされているのは、落橋防止構造全体として作用力に抵抗するだけでなく、落橋防止構造全体の変形が大きくなるようにするためであるが、それを実現するための取付部の具体的な照査方法は定められていない。落橋防止構造の取付部については、過去の地震においても鉄筋コンクリート（以下「RC」という。）製の橋台の前面に取り付けられた落橋防止構造の取付部のアンカーボルトが引き抜ける被害が確認されている（写真-1）。

落橋防止構造は複数本のアンカーボルトを用いて設置することが多いが、既往の研究³⁾は比較的小さな荷重用の埋込長が短い場合の検討や細径のアンカーボルトについての検討が多く、実際に落橋防止構造の取り付けの条件と合致する検討が少ない。そこで本研究では、落橋防止構造全体の挙動として弾性範囲になるよう設計する方法を提案するために、太径のアンカーボルト複数本による定着性能について、アンカーボルトの破断・付着破



写真-1 縁端付近に取り付けられた落橋防止構造の取付部の損傷（アンカーの引き抜き）⁵⁾

壊・コーン破壊を破壊モードとして想定し、引き抜き実験により破壊モードと抵抗特性の確認を行った⁶⁾⁷⁾。

2. 落橋防止構造の取付部に類似の構造に対する既存の設計方法と課題

RC橋台の前面等に落橋防止構造をあと施工のアンカーボルトで取り付ける場合に想定される破壊モードを表-1に示す。取付部全体としての破壊は、これらの破壊モードのうち最初に発生したもので決まると考えられる。道路橋示方書III編⁸⁾（以下「道示III」という。）において直径25mm～51mmの先付けのアンカーボルトを対象とした評価式が、土木学会のコンクリートのあと施工アン

表-1 想定される破壊モード

アンカーボルトの破断	アンカーボルトに引張力が作用したときに、アンカーボルト自体の耐力を超過して破断
コーン破壊	アンカーボルトに引張力が作用したときに、母材であるコンクリートが円錐状（コーン状）に破壊
付着破壊	アンカーボルトに引張力が作用したときに、母材であるコンクリートと接着剤の界面または接着剤とアンカーボルトの界面で破壊

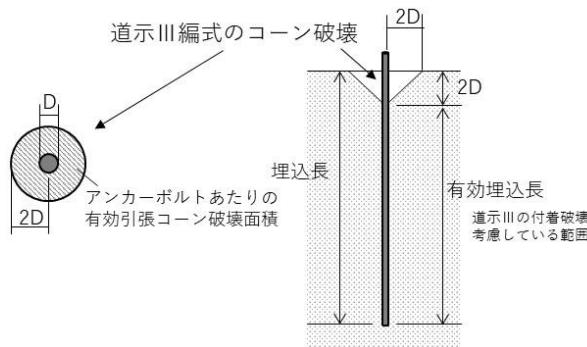


図-1 道示式によるコーン破壊の考え方⁶⁾

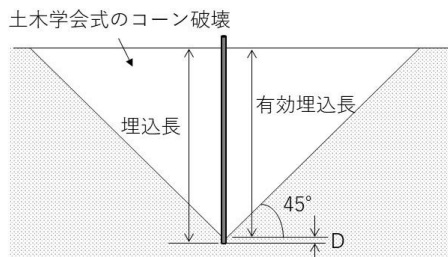


図-2 土木学会式によるコーン破壊の考え方⁷⁾

カー工法の設計・施工指針（案）⁹⁾では直径25mmまでのあと施工アンカーを対象とした評価式がそれぞれ提案されている（以下、それぞれの文献によるコーン破壊・付着破壊の評価式を道示式，土木学会式と称する）。

これらの文献においてコーン破壊の形状はそれぞれ異なる想定がされている。道示式は図-1のようにコンクリート表面が深さ2D（D：アンカーボルトの直径(mm)）のコーン状に破壊することを想定しており，式(1)が規定されている。

$$T_{cc} = \sigma_{ctr} A_c \quad (1)$$

ここで T_{cc} はコンクリートのコーン破壊に対するアンカーボルトの引張耐力の特性値(N)， σ_{ctr} はコンクリートの引張強度の特性値(N/mm²)であり，設計基準強度 $\sigma_{ck} \leq 60\text{N/mm}^2$ のときに $\sigma_{ctr} = 0.23\sigma_{ck}^{2/3}$ である。 A_c はアンカーボルトあたりの有効コーン破壊面積(mm²)であり，アンカーボルトのピッチ d が4D以上か未満かにより式(2)または式(3)で表される。 n は1列あたりのアンカーボルトの本数(本)である。

$$A_c = 4\pi D^2 \quad (d \geq 4D) \quad (2)$$

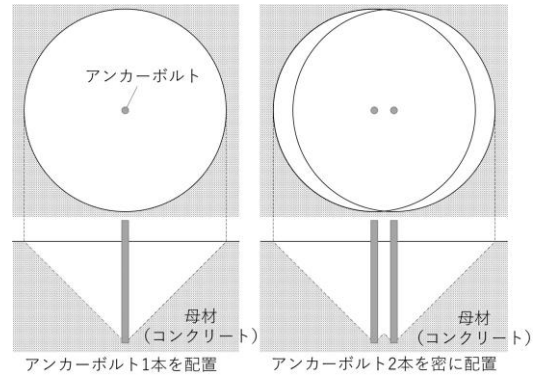


図-3 コーン破壊の抵抗範囲の違い

$$A_c = \frac{4D(\pi D + (n-1)d)}{n} \quad (d < 4D) \quad (3)$$

一方，土木学会式では図-2のように埋め込んだアンカーボルトの先端（以下「埋込先端部」という。）からコーン状に破壊が発生することを想定しており，式(4)が規定されている。

$$T_{cc} = K_t \alpha A'_c \sqrt{\sigma_{ck}} / \gamma_b \quad (4)$$

ここで， K_t は使用期限の長さの影響を表す係数であり，短期間の場合1.0，長期間の場合は0.5とされているが，落橋防止構造に荷重が作用するのは短期間であるため1.0を使用できると考えられる。 α はあと施工アンカーの種類を表す係数で，接着系の場合は0.23が用いられる。 γ_b は一般に1.6とされている。 A'_c はコーン破壊の有効投影面積(mm²)であり，式(5)で表される。

$$A'_c = \pi l_e (l_e + D) \quad (5)$$

ここで l_e は図-2の有効埋込長(mm)である。隣り合うアンカーボルトの有効投影面積が重複する場合は，重複する領域を累加しないように A'_c を求める。

このような既存の設計方法を落橋防止構造の取付部に適用することができるか，また，適用する際の適用範囲，既存の設計方法にて弾性域に留まることを推定できるのかを確認するため，以下の実験を実施した。

3. 実験概要

(1) 実験計画の検討

表-1の各破壊モードに対して，落橋防止構造の取付部がどの破壊モードとなるか，また，どのような状態であれば作用力に対して弾性域に留まると言えるかを確認することを目的とする。

また，落橋防止構造の取付部には複数本のアンカーボルトが密に配置されることが多いが，そのような場合は，隣り合うアンカーボルト同士で抵抗範囲が重複することによる耐力の低減（群効果）を考慮する必要がある。例えば，図-3のように2本のアンカーボルトを接近させ

表-2 引抜き実験の実験ケース

	鋼材 記号	鉄筋 径	本数	異形棒鋼 間の距離	埋込 長	縁端 距離
Case-1	SD345	D32	1本	-	15D	480mm
Case-2	SD490	D32	1本	-	15D	200mm
Case-3	SD490	D32	3本	96mm(3D)	15D	200mm
Case-4	SD490	D32	4本	96mm(3D)	15D	200mm

て配置した場合、隣り合うアンカーボルト同士で抵抗範囲が重複するため、土木学会式で想定するような埋込先端部からのコーン破壊に抵抗する母材コンクリートの範囲は1本のときと2本のときの差がわずかになると考えられる。そのため、アンカーボルトを2本配置したとしても2倍のコーン破壊に対する抵抗力を見込むことはできない。アンカーボルトを密に配置した場合は群効果が与える影響をコーン破壊の形状と合わせて検討する必要がある。

これらを踏まえて、あと施工のアンカーボルトを対象に、群効果の影響を確認するためにアンカーボルトの本数をパラメータとし、引き抜き方向に荷重したときの破壊モードの確認と作用力に対して弾性域と考えられる状態の検討を行うこととした。

(2) 実験ケース

引抜き実験の実験ケースを表-2に示す。全ケース共通の実験条件として、実際の落橋防止構造の設計で用いられる直径32mm (D32と表記) の異形棒鋼を、アンカーボルトとしてRCブロックに埋込長15D¹⁰⁾で取付けるものとした。また、縁端距離は、RC構造の抵抗機構を考慮して橋台等の最外縁鉄筋より内側に設置することを想定した200mmと、最外縁鉄筋より内側かつ土木学会式の想定するコーン破壊の抵抗範囲を確保した縁端距離15D (480mm) 以上の2ケースとした。異形棒鋼を複数本配置するときの間隔は道示Ⅲを参考に異形棒鋼の直径の3倍 (異形棒鋼中心間の距離96mm) とした。詳細は後述するが、SD345を用いたCase-1では異形棒鋼の破断により終局を迎えた。しかし、実施工において想定される密な配置で生じる群効果や縁端距離の影響を受けやすい付着破壊やコーン破壊について、抵抗特性を確認する必要があるため、Case-2~4では強度の高いSD490を用いることとした。

RCブロックの設計基準強度は24N/mm²とし、材齢27日

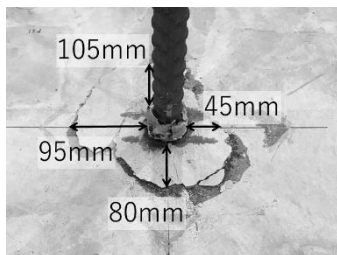
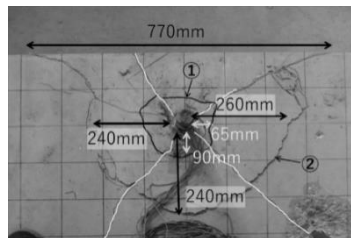


写真-3 コンクリート表面のひび割れ (Case-1)



※白線は最初に発生した十字のひび割れ
写真-4 コンクリート表面のひび割れ (Case-2)

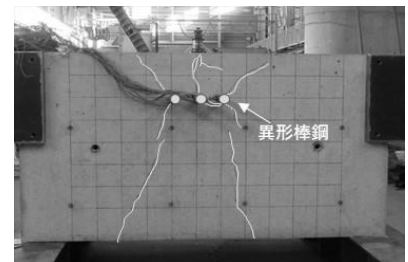


写真-5 コンクリート表面のひび割れ (Case-3側面)

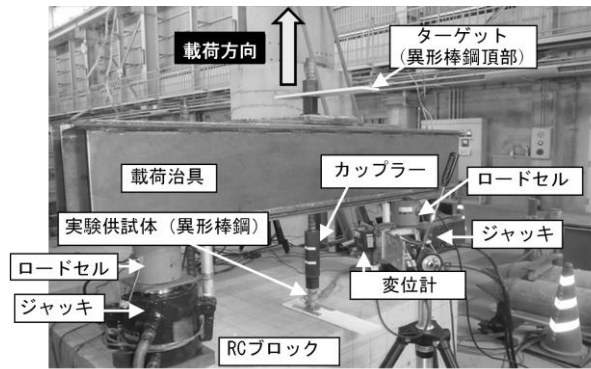


写真-2 引抜き実験装置 (Case-2)

の圧縮強度は30N/mm²であった。RCブロックの配筋はRC橋台を想定して行った。

RCブロックにφ40mmの削孔を行い、ブラシ掛けなどにより孔内を清掃した後、孔内に異形棒鋼を設置してエポキシ樹脂で定着した。使用したエポキシ樹脂の引張せん断接着強さはカタログ値10N/mm²以上である。

(3) 荷重方法

実験装置はジャッキを使って異形棒鋼を引き抜く構造である。Case-1は異形棒鋼をジャッキ1台で、Case-2~4はカップラーを用いてRCブロックに固定した異形棒鋼を荷重治具と接続してジャッキ2台の荷重が均等になるように調整しながら、一方向に漸増荷重を行った。例としてCase-2に対する実験装置を写真-2に示す。異形棒鋼の頂部にターゲットを設置し、実験中のその点の変位を計測した。

4. 実験結果

(1) ひび割れ

引抜き実験の結果、Case-1は異形棒鋼の破断、Case-2はジャッキのストローク限界、Case-4は荷重の低下を確認し、荷重を終了した。Case-3はひび割れ発生後にひび割れの増加を確認した後、破壊に至る前に荷重を停止して除荷した。

実験後のひび割れ状況を写真-3~7に示す。Case-1は写真-3のように、異形棒鋼を中心とした円形のひび割れが

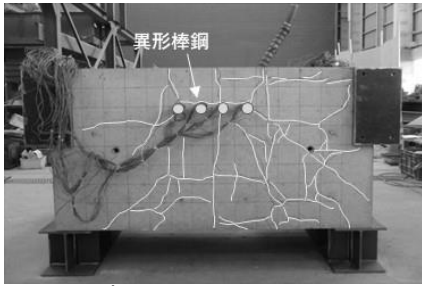


写真-6 コンクリート表面のひび割れ (Case-4側面)

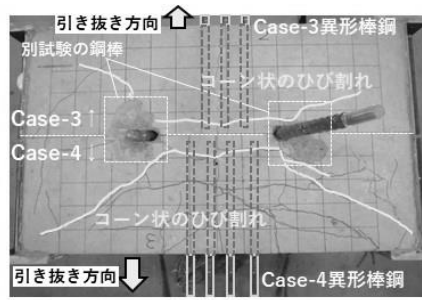


写真-7 コンクリート表面のひび割れ (Case-3,4(写真-5,6の供試体を上から撮影))

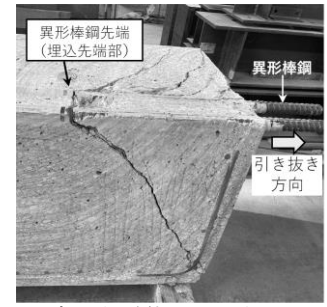


写真-8 供試体切断で確認した内部ひび割れ (Case-4)

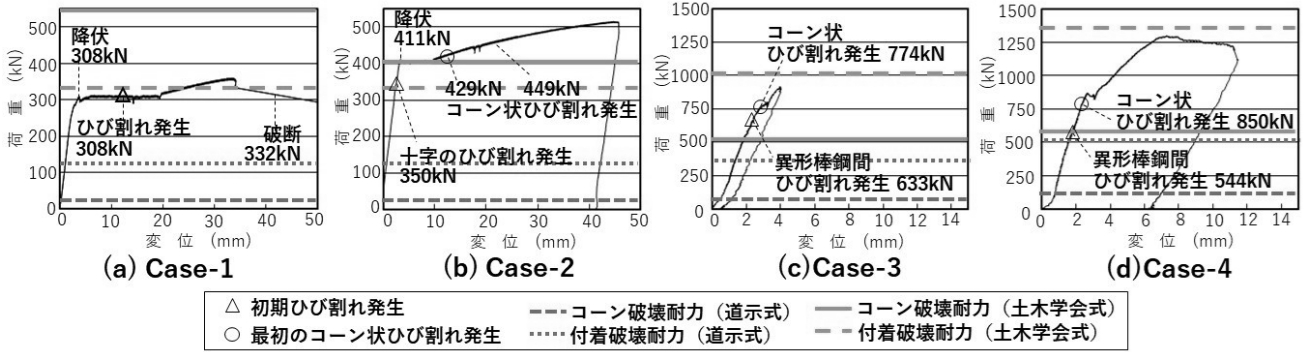


図4 荷重-変位関係

発生した。Case-2は異形棒鋼を中心に十字にひび割れが発生(写真-4の白線部)し、その後、コンクリート表面に異形棒鋼を中心とした小規模な円形のひび割れ(写真-4の①)が発生、更に荷重を続けるとその外側にもひび割れ(写真-4の②)が生じた。Case-1, 2ともに実験後にはつたところ、異形棒鋼を中心としてコンクリート表面がコーン状にひび割れていることが確認された。

一方、Case-3, 4では異形棒鋼を中心とした円形のひび割れは確認されず(写真-5, 6)、異形棒鋼の埋込先端部付近においてコーン状のひび割れが発生した(写真-7の白線部)。さらに、実験後Case-3, 4の供試体を切断して内部を確認したところ、写真-8のように、埋込先端部を中心にコーン状のひび割れが進展していたことが確認できた。

(2) 荷重-変位関係

荷重と異形棒鋼頂部における変位の関係とひび割れ発生荷重を図-4に示す。図-4には参考として道示式、土木学会式により材料実測値を用いて算出したコーン破壊耐力と付着耐力も併せて示している。なお、道示式と土木学会式の適用条件は本実験と一致しないが、ここではそのまま準用した。また算出に当たってはコンクリートの設計基準強度ではなく本供試体の材齢27日のときの圧縮強度 30N/mm^2 を用いている。

Case-1はひび割れ発生の前、Case-2は初期ひび割れが発生した後に荷重が一定になった。そのときの荷重は材料試験結果から導いた異形棒鋼の降伏耐力(SD345は 306kN 、SD490は 415kN)とよく一致した。埋込先端部か

らのコーン破壊や付着破壊の兆候が見られなかったことから、異形棒鋼が降伏したものと考えられ、それまでは取付部全体として弾性域であったと考えられる。降伏時の荷重は道示式によるコーン破壊、付着破壊の耐力の推定値を大きく上回った。

Case-3と4は、異形棒鋼をカップラーで接続しているため、荷重初期の荷重-変位関係はカップラーのかみ合わせにより見かけ上剛性が低いが、その影響を除外すれば、荷重-変位関係はコーン状のひび割れが発生するまでは比例関係にあると推察される。Case-3で除荷後の残留変位はわずかであったことと合わせ、コーン状のひび割れ発生までは落橋防止構造の取付部全体として弾性域と考えられる。コーン状ひび割れ発生時点の荷重は、道示式、土木学会式による推定値を上回り、土木学会式により近い結果となった。

道示式の推定値と実験値が大きく乖離したのは、道示式が先付けアンカーを対象としていることと、コンクリート表面のコーン破壊を想定しており、Case-1と2のひび割れは道示式の想定するコーン破壊の形状が類似するが、Case-3と4で確認されたひび割れ形状は道示式の想定と異なったことが、原因と考えられる。一方、Case-3と4のひび割れ形状は土木学会式で想定するコーン破壊の形状と同様であったため、コーン破壊についての実験値と土木学会式による推定値が道示式と比べれば近い値となったと考えられる。

5. 結論

本実験から、以下のことが明らかになった。

- 1) 異形棒鋼が1本の場合のコンクリートのひび割れ形状は道示式の想定するコーン破壊の形状と類似したが、複数本の場合は埋込先端部からのコーン破壊のモードを示した。
- 2) 異形棒鋼1本の場合、異形棒鋼の降伏までは荷重と変位が比例関係にあり、取付部全体として弾性域であったと考えられる。
- 3) 異形棒鋼の3本、4本の場合、異形棒鋼が降伏に至っていない状態では、コーン状のひび割れ発生までは荷重と変位が比例関係にあり、残留変位もわずかであったことから、取付部全体として弾性域と考えられる。なお、異形棒鋼が複数本のときコーン状のひび割れ発生荷重は道示式、土木学会式による推定値を上回り、土木学会式により近い結果となった。
- 4) 本実験条件においては、落橋防止構造の設計水平力を、土木学会式によって照査すれば、落橋防止構造の取付部全体として弾性域であるとみなせるといえる。

上記の結果がすべての落橋防止構造の取付部に適用できるわけではなく、本実験とは異なる条件の場合は、弾性域と考えられる範囲や破壊モードが異なる可能性がある。今後、本実験で得られた知見をもとに、ここで提案する照査手法の適用範囲を検討していく。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編、2017
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2017
- 3) 三倉寛明, 田所敏弥, 岡本大, 笠裕一郎：耐荷機構に基づくあと施工アンカーの引抜耐力に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.505-510, 2015
- 4) 三倉寛明, 田所敏弥, 岡本大, 笠裕一郎：あと施工アンカーの引抜耐力におよぼすへりあき寸法とアンカー間隔の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.463-468, 2017
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料814号, 2014
- 6) 廣江亜紀子, 中尾尚史, 大住道生：落橋防止構造および横変位拘束構造の取付部の付着性能に関する実験的検討, 第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.27~32, 2021
- 7) 廣江亜紀子, 菅原達也, 中尾尚史, 大住道生：落橋防止構造の取付部を想定したアンカーボルトの群効果と縁端距離の影響の実験的検討, 第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.149~156, 2022
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説III編、コンクリート橋・コンクリート部材編, 2017
- 9) 土木学会コンクリート委員会あと施工アンカー小委員会編：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー141号, 2014
- 10) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株)：設計要領第二集橋梁保全編, 2019

福德岡ノ場火山の噴火で発生した軽石のコンクリート用骨材としての適用性に関する検討

小池 賢太郎¹・中村 董¹・川端 雄一郎¹・

¹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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) .

福德岡ノ場火山で発生した軽石の基礎物性とコンクリート用骨材に用いた場合のフレッシュ性状、強度特性を検討した。その結果、粗骨材・細骨材に対する軽石の置換率が40%以下であれば港湾用途としてのコンクリートブロックの目標性能を満足することが確認された。また、軽石はアルカリシリカ反応性を示すものの、軽石の空隙に反応ゲルが吸収され膨張に至らない可能性が示唆された。

キーワード 軽石、コンクリート用骨材、ワーカビリティ、単位容積質量、圧縮強度

1. はじめに

2021年8月に発生した福德岡ノ場火山での海底火山噴火を発端に、同年10月頃より大量の軽石が南西諸島へ漂着し、各地の海上輸送および漁業に深刻な被害をもたらしている。以降、各地で軽石の回収が進められているが、沖縄県では県内全域の軽石回収量が推定10万2千m³（2022年2月17日時点）にも及び、今後、回収された軽石の仮置き場が不足することが懸念されるため、早急な処分方法あるいは利用方法の提案が求められている。

現在、土木・建築分野では、軽石をコンクリート用骨材として利用する方法が検討されているが、課題として軽石自体が脆くコンクリート強度の低下が懸念される点や、鉄筋コンクリートを想定した場合に軽石の除塩作業が必要となる点が挙げられている。

上記の課題に対して、著者らは港湾で用いられる消波ブロック等のコンクリートブロックに着目した。コンクリートブロックであれば高い強度は要求されず、無筋のため骨材の除塩も不要であることから、軽石をコンクリート用骨材として活用できる可能性がある。

本稿では、軽石のコンクリート用骨材としての適用性検討の一環で実施した、沖縄県で回収された軽石の基礎物性、および軽石を用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度特性の調査結果を報告する。

2. 軽石のコンクリート用骨材としての物性評価



写真-1 採取した軽石（分級前）

表-1 実施した骨材試験一覧

試験項目	試験規格
ふるい分け試験	JIS A 1102
密度・吸水率試験	JIS A 1109, JIS A 1110
単位容積質量及び実積率試験	JIS A 1104
軽石の偏光顕微鏡観察	—
SEM-EDS分析	—
アルカリシリカ反応性試験	JIS A 1145, ASTM C1260

表-2 軽石の粒径別百分率

	20mm -	5 - 20mm	- 5mm	合計
粒径別百分率(%)	3	41	56	100

(1) 試験概要

沖縄県にて回収された軽石を写真-1に示す。大小様々な粒径の軽石が混在しており、いずれもポーラス質で軽量、また、手で握りつぶすことが可能なほど脆弱な物質

であった。本検討では、この軽石に対して、表-1に示す各種骨材試験を行い軽石の各種物性を評価した。また、写真-1および表-2に示すように、軽石の約3%が粒径20mmを超えていたことから、軽石を細骨材（粒径5mm以下）と粗骨材（粒径5-20mm）に分級したものでそれぞれ検討を行った。

(2) 試験結果および考察

a) 軽石の各種物性値

軽石の粗骨材および細骨材の粒度分布を図-1に示す。また、図中にはJIS規格の天然軽量骨材の粒度範囲も併せて示している。軽石の粗骨材分についてはJIS規格の天然軽量骨材の粒度範囲を概ね満足したが、細骨材は同規格から大きく外れており特に粒径2mm以下の細粒分が不足していることが明らかとなった。そのため、コンクリート用骨材、特に細骨材として使用する際には、材料分離抵抗性などのワーカビリティが著しく低下することが懸念される。

次に軽石の粗骨材および細骨材の各種物性値を表-3に示す。軽石がポーラス質かつ軽量であることから、粗骨材、細骨材ともに表乾密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を下回り、また、吸水率も一般的なコンクリート用骨材に比べて極めて高いことが明らかとなった。

b) 軽石の組織観察および鉱物分析

軽石の偏光顕微鏡写真を写真-2および写真-3に示す。軽石は気泡を多量に含み発泡度の高い多孔質無色のガラスからなる石基中に、斜長石、単斜輝石、かんらん石および不透明鉱物の斑晶あるいは集斑晶を含む他、少量成分としてアパタイトを含んでいることが明らかとなった。また、気泡の形状は円形に近いものから引き伸ばされた楕円形まで様々であった。

次に、軽石の電子顕微鏡による反射電子像を写真-4に示す。写真は偏光顕微鏡観察により発泡度の高い多孔質無色のガラスが確認された箇所を分析したものであり、

偏光顕微鏡で確認できた比較的大きな気泡以外にも、数 μm オーダーの微小な気泡も存在していることが確認された。また、写真中の★で示す箇所にてEDSによる化学成分分析を行ったところ、ガラス中には SiO_2 が60~64%、 Na_2O が3.6~3.8%、 K_2O が4.5~5.3%含まれていることが確認された。この他、ClやFなどの存在も確認された。

特に、 SiO_2 に対してアルカリ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)の含有率が高いことから、コンクリート用骨材として使用する場合には、軽石中のガラスが反応しASRに影響する可能性も考えられる。

c) 軽石のアルカリシリカ反応性

軽石のアルカリシリカ反応性を化学法により評価したところ、アルカリ濃度減少量 $R_c=40\text{mmol}/\text{L}$ に対して、溶融シリカ量 $S_c=54\text{mmol}/\text{L}$ であったことから「無害でない」という判定結果が得られた。

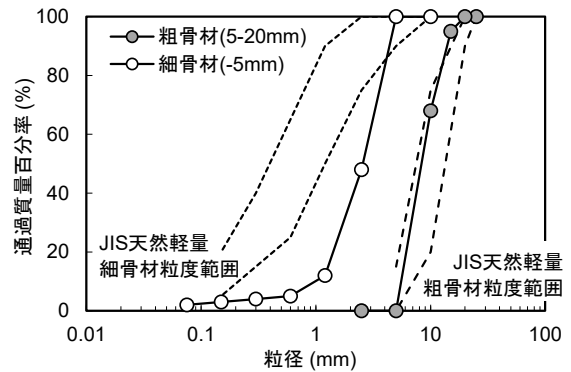


図-1 軽石の粒度分布

表-3 軽石の粒径別物性値

	絶乾密度 (g/cm^3)	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
5-20mm	0.67	0.81	20.70	61.1	6.32
-5mm	0.72	0.92	28.80	59.5	4.28

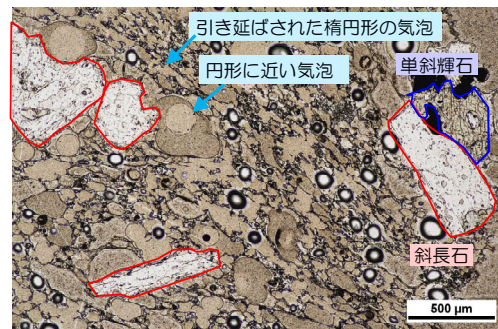


写真-2 軽石の偏光顕微鏡写真 (その1・単ニコル)

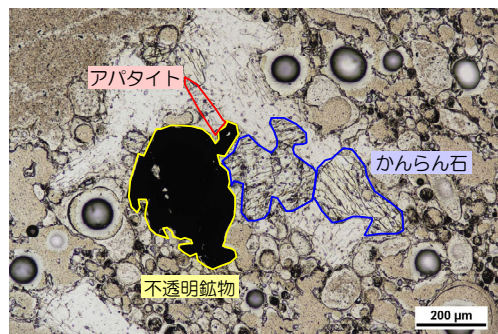


写真-3 軽石の偏光顕微鏡写真 (その2・単ニコル)

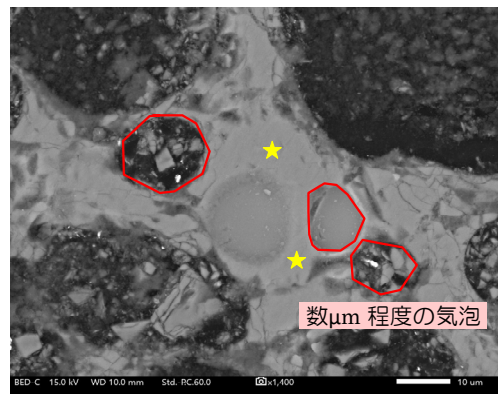


写真-4 軽石の反射電子像 (ガラス部)

次にモルタルバーを用いた促進膨張試験の結果を示す。検討ケースは下記および表-4に示すとおりである。

- ①：軽石の骨材置換率を体積で30%とし、残りの骨材には非反応性の石灰岩を使用。
- ②：軽石の骨材置換率を体積で30%とし、残りの骨材には反応性の安山岩を使用。
- ③：軽石の骨材置換率を体積で30%とし、残りの骨材には反応性の安山岩を使用し、セメントの15%をフライアッシュで質量置換したものを使用。
- ④：非反応性の石灰岩の骨材置換率を体積で30%とし、残りの骨材には反応性の安山岩を使用。

促進14日までの試験体の膨張率の経時変化を図-2に示す。軽石と非反応性である石灰岩を併用した①では「無害」判定となった一方で、軽石と反応性である安山岩を併用した②、③では「潜在的に有害」判定となった。ただし、セメントの一部をフライアッシュで置換していた③は、普通セメントのみを使用した②に比べて膨張を抑制していた。また、②と反応性である安山岩と非反応性である石灰岩を併用した④を比較すると、概ね同程度の膨張である。写真-5は促進膨張試験後におけるケース①の軽石周りの観察写真であるが、近接写真から明らかなように、軽石周りに反応リムが形成されており、SEM-EDSでも軽石のゲル化が確認されている。

この結果から、軽石自体はアルカリシリカ反応を示すものの膨張には至らず、安山岩が有害な形で膨張を示したと推察される。この要因として、軽石のポーラス質に反応ゲルが吸収されたことが挙げられるものの、明確な根拠が得られていないことから、本メカニズムについて今後も検討が必要である。

4. 軽石を用いたコンクリートの最適配合の検討

(1) 試験概要

a) 軽石を用いたコンクリートの目標性能の設定

港湾用途のコンクリートブロックを想定した場合、波力などの様々な外力に耐えうる質量と強度を有する必要がある。本検討では、軽石を用いたコンクリートの目標性能として、港湾基準⁹⁾をベースに圧縮強度18N/mm²以上と設定した。

b) 配合選定

表-5に軽石を用いたコンクリートの配合を示す。普通骨材を使用した水セメント比65%の普通コンクリートをベースに、粗・細骨材の20、40%を軽石で体積置換した合計6種類の配合で検討した。

c) 検討項目

軽石を用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性を確認するために、以下の項目を確認した。

- ・フレッシュ性状：スランプ、空気量
- ・強度特性：単位容積質量、圧縮強度(水中養生7、28日)

表-4 促進膨張試験に用いた配合表

水準	W/B	W	C	FA	軽石	安山岩	石灰岩	Total
①	47%	207	440	0	130.9	0.0	693.0	1470.9
②	47%	207	440	0	133.9	693.0	0.0	1473.9
③	47%	207	374	66	133.9	693.0	0.0	1473.9
④	47%	207	440	0	0.0	693.0	303.8	1643.8

単位:(g)

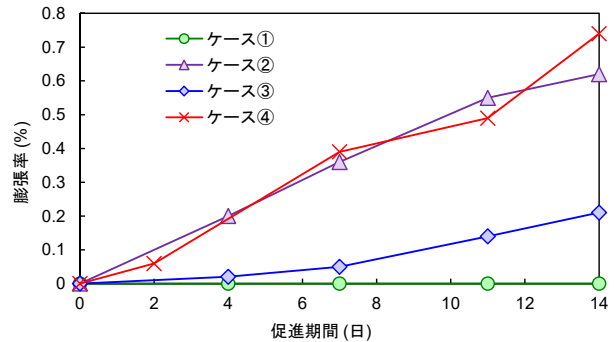


図-2 促進膨張試験の結果

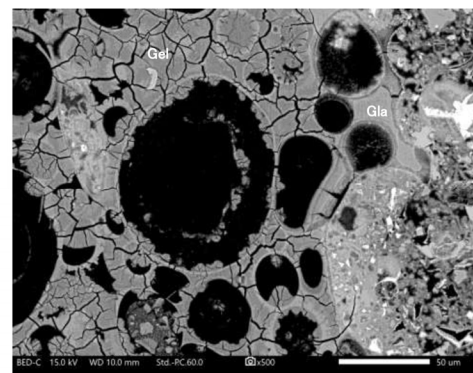
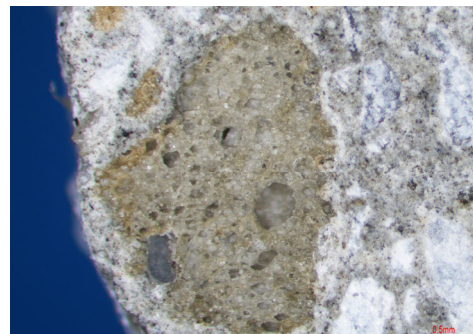


写真-5 促進膨張試験後の軽石周りの観察 (ケース① 上：近接写真，下：電子反射像)

(2) 試験結果および考察

a) フレッシュ性状

表-6に各配合のスランプおよび空気量の結果を示す。いずれの配合においても空気量の目標値を満足したが、スランプに関しては細骨材の40%を軽石で置換した“40-0”のみ目標値を満足できず、写真-6に示すようにスランプコーン引き上げ後に崩れる状況が確認された。これは図-1で示したように、軽石の細骨材は粒径2-5mmに偏っており、細粒分が不足したことでワーカビリティが著

表-5 示方配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	骨材の組合せ(%)				単位量(kg/m ³)				混和剤			
			細骨材		粗骨材		W	C	細骨材		粗骨材		AE 減水剤	AE 剤 (C×%)
			陸砂	軽石	砕石	軽石			陸砂	軽石	砕石	軽石		
0 - 0			100	0	100	0			884	—	980	—		
20 - 0			80	20	100	0			707	63	980	—		
40 - 0			60	40	100	0			530	126	980	—		
0 - 20	65	47	100	0	80	20	164	253	884	—	784	60	250ml/ C=100kg	0.0035
0 - 40			100	0	60	40			884	—	588	120		
20 - 20			80	20	80	20			707	63	784	60		

しく低下したと考えられる。

b) 強度特性

図-3、図-4に硬化後の単位容積質量および圧縮強度の結果を示す。なお、単位容積質量に関しては、示方配合で計算された値も併せて示す。

軽量で脆弱な軽石を粗・細骨材に置換していることから、軽石未使用の配合に比べて軽石置換率の増加に伴って単位容積質量および圧縮強度が低下する傾向が確認された。単位容積質量の低下はブロックの安定性を低下させるが、仮に単位容積質量の下限値を2000kg/m³とすれば、最大40%までの置換率であればこれを満足した。また、示方配合で計算される単位容積質量と比較すると、硬化後の値との誤差はいずれも1.5~2.5%程度と小さいため、示方配合をベースに単位容積質量の決定が可能であることが確認された。

圧縮強度に関しては、材齢7日では一部の配合で目標強度18N/mm²に到達していないものの、材齢28日では全ての配合で目標強度を満足することが確認された。

5. まとめ

本研究では、福徳岡ノ場火山で大量に発生した軽石の有効利用を目的に、軽石をコンクリート用骨材に用いた場合のフレッシュ性状および強度特性を検討した。

その結果、粗骨材・細骨材に対する軽石の置換率が40%以下であれば、港湾用途としてのコンクリートブロックの目標性能を満足することが確認された。また、軽石の細骨材は細粒分が少ないことから、細骨材として大量に使用すると著しくワーカビリティが低下するが、粗・細骨材ともに20%程度の置換であればフレッシュ性状として問題ないことが確認された。

謝辞：軽石の収集にあたっては、沖縄総合事務局に多大な協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【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(2019)

表-6 コンクリートのフレッシュ特性

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)
0 - 0	12.0	3.2
20 - 0	13.0	3.5
40 - 0	15.5	4.6
0 - 20	11.5	4.5
0 - 40	12.5	3.9
20 - 20	13.0	4.2
目標値	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5



写真-6 細骨材の40%を軽石で体積置換した配合のスランブ試験後の状況

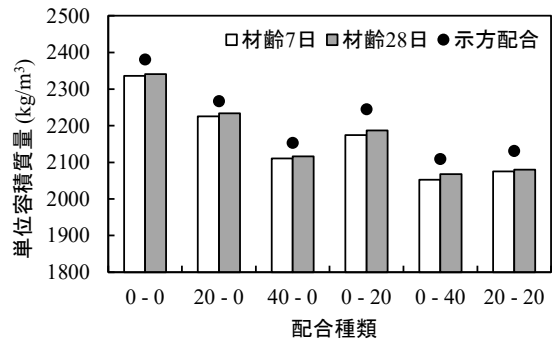


図-3 各配合の単位容積質量の比較

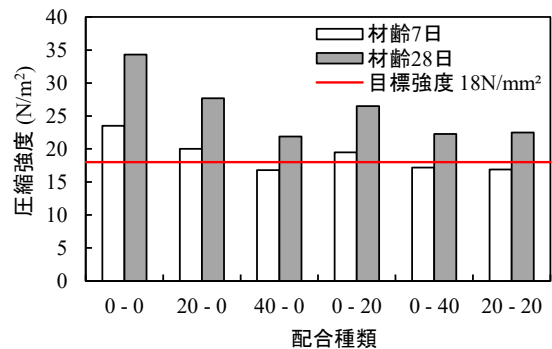


図-4 各配合の圧縮強度の比較

養浜により形成された砂浜における 維持管理基準の設定について

清水 利浩¹・清水 美代¹・眞井 里菜¹

¹新潟港湾・空港整備事務所 第四建設管理官室 (〒951-8011 新潟市中央区入船町4-3778)

海岸の侵食対策として養浜を実施している事例は多いが、養浜後の砂浜の維持管理の方法について、統一的な基準や指標は存在しない。新潟港海岸（西海岸地区）の侵食対策は、離岸堤（潜堤）、突堤及び砂浜を配置して面的に海岸を防護する工法（面的防護工法）を用いて海岸の長期的安定を図るものであり、砂浜を維持管理する指標の設定が不可欠であった。このため、同海岸の長期にわたる地形変化の観測データやその分析結果から得られた知見を踏まえ、砂浜の健全度指標を設定した。本論文では、全国で初めて砂浜の健全度指標を設定し、絶えず変化する砂浜の浜幅に着目して簡易に管理できる指標を設定した結果について報告する。

キーワード 砂浜, 維持管理, 健全度指標, 海岸保全施設

1. はじめに

海岸法の改正(1999年)により、砂浜を海岸保全施設として指定することが可能になったものの、改正後20年経過した現在も指定事例は少ない。指定された事例が少ない一因として、砂浜は、コンクリート構造物と異なり常に変形することから、その変形特性等を十分に把握した上で、維持管理を行う必要があるものの、砂浜の健全度を把握するための指標や維持管理基準の設定方法が確立していないためと考える。

新潟港海岸では、潜堤、突堤、養浜による面的防護工法により砂浜の回復に成功している。面的防護工法とは、沖合の幅広天端の潜堤及び砂浜等により波のエネルギーを徐々に減衰させる方式であり、潜堤前面の海底面を含め、海岸地形を安定的に維持することが可能である。突堤先端は、年数回波に対する移動限界水深まで延伸していることから、海底土砂移動は岸沖方向の流出入を考えれば良い海岸である。養浜の初期変形（波浪等外力により養浜初期地形が平衡地形に応答する変形）は、概ね収束しているものの、地盤沈下が継続しているため、養浜地形は僅かながら変形し続けている。このようななか、新潟港海岸では砂浜を海岸保全施設に指定する準備を進めている。

本研究は、沿岸漂砂による海底土砂の収支を考慮しなくて良い新潟港海岸の養浜地形変化特性を踏まえ、砂浜の点検が容易な汀線位置を指標として、砂浜の維持管理のための健全度を検討する。

2. 新潟港海岸の諸条件

(1) 防護ライン

新潟港海岸は、新潟西港の西側に隣接する約2.6 kmの海岸である。養浜整備は、第1区画が2000年に完成(約52万 m^3)し、その後、2009年に第4区画(約22万 m^3)、2015年に第2区画が完成(約40万 m^3)した(図-2参照)。養浜整備と並行して、養浜の後浜天端高とほぼ同じ高さで、直背後に海岸道路(市道中央3-176号線)が建設され2005年に開通した。このため、新潟港海岸では、海岸道路と養浜の境界を防護ラインとして波のうちあげを低減させる機能が要求されるようになった。

(2) 地盤沈下

図-1に示すように地盤沈下が約7mm/年の速度で継続しており、砂浜維持管理の重要な条件となっている。

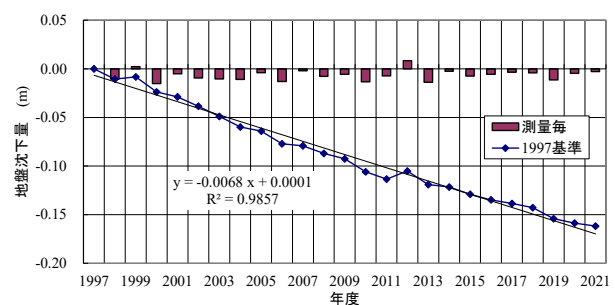


図-1 地盤沈下の経年変化

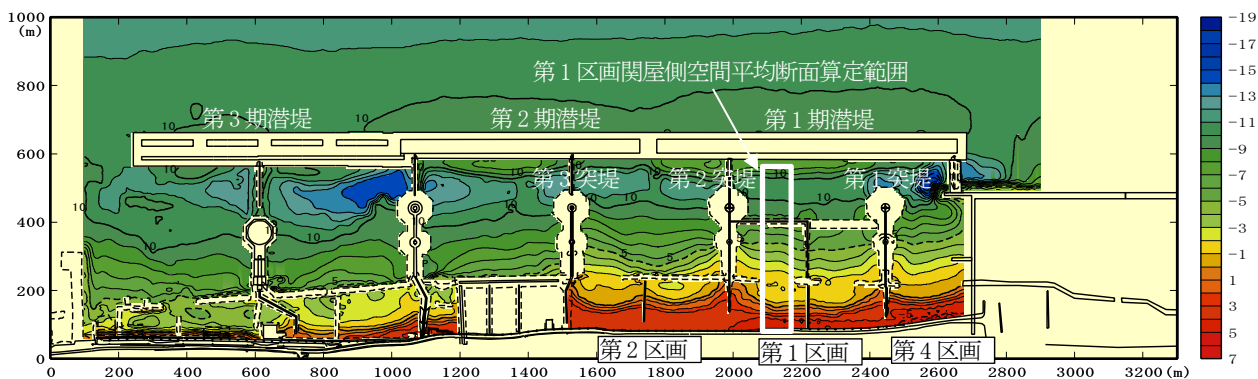


図-2 新潟港海岸の地形，海岸保全施設の平面配置

3. 地形変化特性と養浜設計断面

第1区画では，養浜地形の安定性を監視するために，2001年7月から現在まで年2回の頻度で深浅測量を実施している。図-2の□枠囲みの空間平均断面は，2013年頃までに養浜地形が波浪等外力に反応して，概ね平衡地形に達している（以下，この変形を養浜初期変形と記す。）。図-3は2013年以降の空間平均断面地形を示したものである。2013年以降の断面地形変化は小さい。地形変化を詳細に見ると，C.D.L.+2.0 mより高い領域では飛砂により僅かに堆積傾向となっている。また，C.D.L.±0.0 mより陸側の海底勾配（前浜勾配）は約1/12.5，海側の勾配（外浜勾配）は約1/30となっており，汀線を境界に陸側と海側で異なった地形勾配が形成されていて，かつ，それぞれ平衡状態となっている。

岸沖方向距離600 m付近に設置した潜堤背後の養浜断面は，C.D.L.+3.5～4.0 m，およびC.D.L.-8.0 m付近で断面地形変化が少なく，断面地形はこの2点をNode点としてその範囲内で変化していることがわかる。陸側のNode点C.D.L.+3.5～4.0 mは，波の最大遡上高と概ね一致し，沖側のNode点C.D.L.-8.0 mは，NOWPHAS新潟沖で設定された年数回発生波（ $H_{1/3}=4.5\text{m}$ ， $T_{1/3}=9.0\text{s}$ ）の潜堤通過後の換算沖波波高に対する移動限界水深と一致している。

以上の特徴は，潜堤設置水深・断面諸元，養浜粒径が同じ他の区画でも同様である。そこで，波浪等外力に対して平衡となる養浜設計断面を設定し（図-3破線），養浜の目的達成性能（波のうちあげ高）を改良仮想勾配法を用いて照査する。

4. 維持管理指標と断面変化のモデル化

(1) 砂浜維持管理のための指標

砂浜の目的達成性能は，改良仮想勾配法を用いて算定の健全度の指標は，碎波点から波のうちあげ高までの断

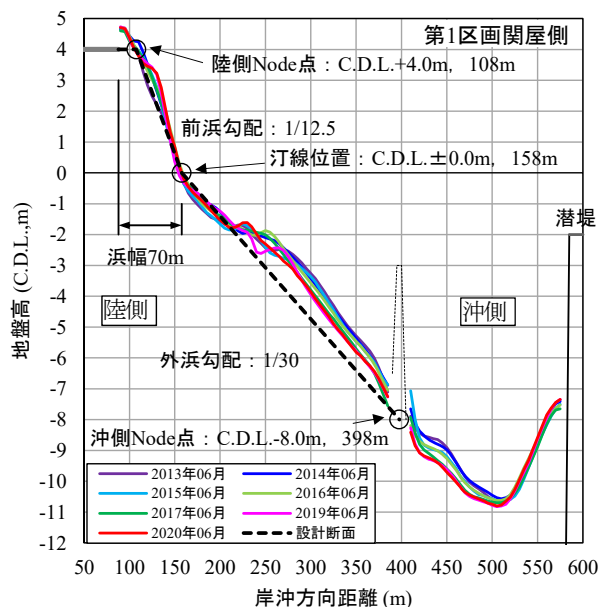


図-3 第1区画関屋側の空間平均断面，設計断面

面積とすればよい。しかし，日常の施設点検で水中部の地形を把握することは，海岸管理者の負担が大きく困難である。

図-4は，養浜直後の2001年を基準として，養浜初期変形期間を含む2021年までのデータを用いて汀線後退量と土量変化の関係を示したものである。養浜断面積（養浜土量）と汀線変化量に高い相関関係（2008年～2016年）を示し，汀線位置を監視指標とすることが可能と考え，監視のしやすさから砂浜幅（汀線位置）を監視指標とすることにした。

(2) 汀線位置と断面変化のグラフ

第1区画における2013年以降の汀線後退速度は，0.34 m/年となっており，ほぼ一様に汀線が後退（浜幅が減少）している。同期間の空間平均断面算定範囲の断面土量変化は，1.95 m³/m/年の速度で減少している。汀線後退1 m当りの断面土量変化は5.7 m³/mとなる。

上記の関係と断面地形のNode点をもとに，汀線位置

と断面地形変化（断面積変化）の関係をモデル化する。陸側Node点はC.D.L.+4.0 m、沖側Node点はC.D.L.-8.0 mであり、この点が変わらずに、汀線位置が変化する場合の断面変化は、図-5のようになる。このモデルでは、汀線が1 m後退した場合の断面積変化は6.0 m³/mとなり、実測値と概ね一致する。このことから、汀線位置から断面土量変化が推定できることを示しており、汀線位置を維持管理指標とすることの妥当性が確認される。

図-5に示す断面変化モデルにおいて、汀線位置が陸側Node位置まで後退した状況でも、波のうちあげ高が道路高（C.D.L.+4.0 m）に到達しない場合には、汀線位置と陸側Node点が陸側に移動すると仮定して、波のうちあげ高を照査する。

5. 健全度評価の設定

(1) 砂浜維持管理のための健全度

海岸保全施設維持管理マニュアルでは、「健全度評価は、土木構造物における一定区間を突堤間で区切られた区画とし、区画毎に防護機能（健全度）をA, B, C, Dランクで評価する。」とある。砂浜も海岸保全施設に指定する場合、直感的な理解のし易さから、他施設と同様にランク分けを行った。そこで、砂浜の健全度を表-1のように定義し、各段階の汀線位置を検討する。

(2) 設計断面と断面変化モデル

新潟港海岸の各区画は、沖合潜堤の設置水深、断面諸元、養浜粒径が同じであることから、最終的には第1区画の平衡断面に近づくと考えられる。そこで、養浜後10年以上が経過し、養浜初期変形が収束している第1区画および第4区画において、現況断面から設計断面を設定した（図-6）。

(3) 外力条件

外力条件は、砂浜が設計波浪・潮位に対して砂浜背後域に波がうちあがる状態となる設計断面からの汀線後退量を決定する。

設計波は、NOWPHAS新潟沖の観測地点で $H_{1/3} = 9.3$ m, $T_{1/3} = 14.3$ s, $\theta = N23W$ である。波のうちあげ高を改良仮想勾配法により算定するため、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算から潜堤沖側の換算沖波波高を算定し、高山ら¹⁾の提案式により潜堤透過後の換算沖波波高を算定する。また、潜堤背後では平均水位が上昇するため、高山ら¹⁾の提案式より潜堤背後の平均水位上昇量を算定し、波のうちあげ高算定に考慮する。ただし、人工リーフの設計の手引き(改訂版)に、「現地海岸での水位上昇

表-1 砂浜の健全度の定義

健全度	定義
Aランク	措置段階 砂浜が設計波浪・潮位に対して砂浜背後域に波が打ち上がる状態となっている段階。
Bランク	予防保全段階 短期的な海浜変形（侵食）により容易に要事後保全段階に移行する可能性が高い段階。
Cランク	監視段階 想定された変形が継続すると、砂浜が供用期間末までに予防保全段階（Bランク）になると想定される段階。
Dランク	問題なし Cランクよりも海側に汀線位置がある段階。

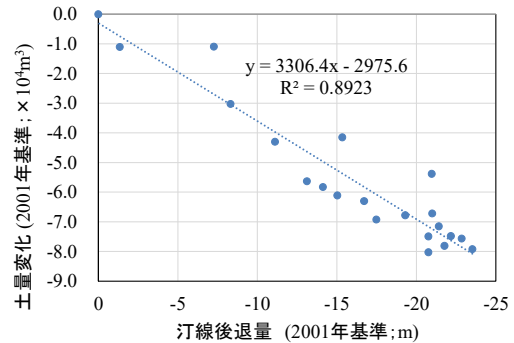


図-4 汀線後退量と土量変化の関係（第1区画閉屋側）

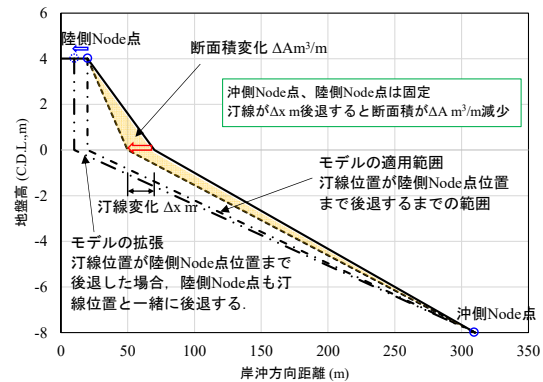


図-5 汀線後退量と土量変化のモデル

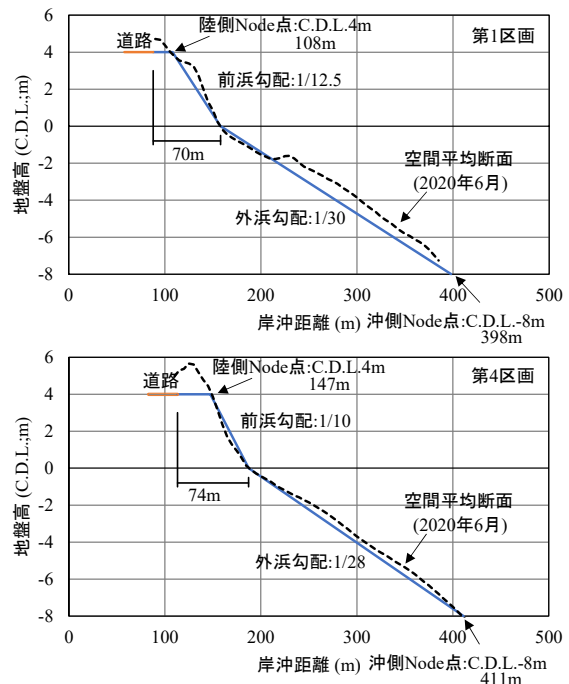


図-6 各区画の設計断面と2020年6月の空間平均断面

は断面実験結果の1/2以下になることが多い。」と記されていること、2012年11月26日～2013年2月1日の期間に、潜堤背後で観測した平均水位上昇量は、高山らの提案式に比べて1/3～1/2程度であったことから、平均水位上昇量は、高山らの提案式の1/2とする。設計潮位は、既往最大潮位であるH.H.W.L=C.D.L.+0.88mである。

(4) 各段階の検討

a) 措置段階

図-6に示す各区画の設計断面に対して、図-5に示す断面モデルを用いて、汀線後退量と波のうちあげ高の関係を算定し、波のうちあげ高が海岸道路高となる場合を措置段階の汀線位置とする。汀線が陸側Node点まで後退しても波が道路高まで到達しない場合には、図-5に示すように、汀線後退とともに陸側Node点も陸側に移動すると仮定する。

図-7は、各区画の措置段階となる汀線後退量と波のうちあげ高の関係を示したものである。設計断面地形が異なるため、汀線後退0 m（設計断面）における波のうちあげ高が異なる。第1区画では、汀線後退量が35.7 mになると、波のうちあげ高がC.D.L.+4.0 mとなり措置段階となる。

第4区画は、陸側Node点から道路までの後浜幅が広く、遡上波が道路まで到達し難い断面となっている。そこで、片野ら²⁾を参考に後浜天端幅(34 m)の2%を天端高に加算した仮想天端高(陸側Node点高+34 m×2% = C.D.L.+4.68m)と設定する。汀線が陸側Node点まで後退(汀線後退量40 m)した後は、汀線後退とともに陸側Node点も陸側に移動すると考えるため後浜幅が徐々に狭くなり、その分仮想天端高が低下する。汀線が陸側Node点まで後退すると、外浜勾配が緩くなる分断面面積が増加し、波のうちあげ高が低下する。このため、汀線が陸側Node点まで後退した後は、波のうちあげ高を一定として検討している。

以上の結果をまとめると表-2のようになる。限界浜幅は30.2 m～34.3 mとなり、海岸管理、安全側を考慮して5 m単位でまとめると全区画で措置段階となる浜幅は35mとなる。

b) 予防保全段階

新潟港海岸の汀線は、冬季に後退し春季に前進する変形を繰り返しながら、徐々に後退する傾向を示している。そこで、冬季の汀線後退量を考慮して予防保全段階となる汀線位置を設定する。

図-8は、第1区画における2001年6月を基準とした汀線変動量（実線）と前の測量からの変動量（棒グラフ）を示したものである。2006年12月から2007年1月にかけて約10日間に10年確率波、20年確率波が連続して来襲しても汀線後退量は5m程度にとどまっている。高波浪が来襲して汀線が後退した状況で、さらに高波浪が来襲してもさらなる汀線後退が生じ難いことを示唆している。2014年12月の爆弾低気圧による汀線後退量も5m程度となっている。また、2016年12月25日から2017年1月12日に第1区画関屋側で汀線位置をビデオ観測を行っており、時化時における汀線後退量は5m程度であることを確認している。養浜初期変形が収束する2013年以前は養浜初期変形の影響が含まれるため5mを超える変化も確認されるものの、冬季の汀線後退量は冬季前の汀線位置から5m程度となっている。予防保全段階の汀線位置は、措置段階となる汀線の位置より海側5mとする。

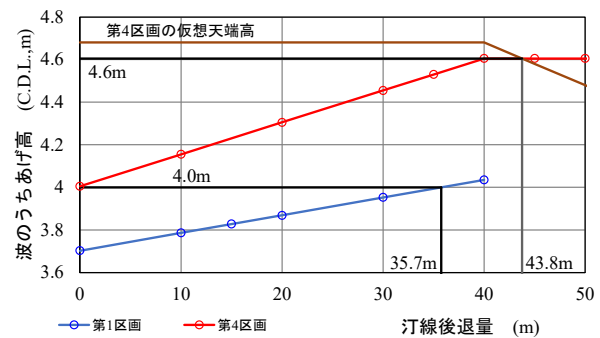


図-7 各区画の措置段階となる汀線後退量と波のうちあげ高

表-2 各区画の措置段階の浜幅

	設計浜幅	後浜幅	限界汀線後退量	限界浜幅	措置段階浜幅
第1区画	70m	-	35.7m	34.3m	35m
第4区画	74m	34m	43.8m	30.2m	35m

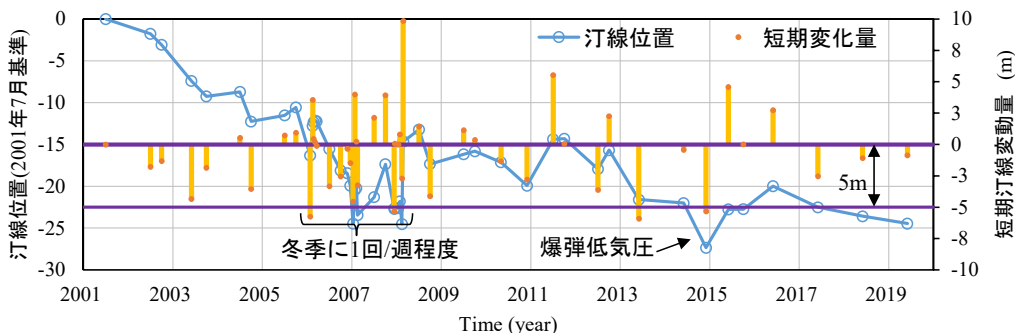


図-8 第1区画における過去20年間の汀線位置の経時変化

c) 監視段階

監視段階は、砂浜の供用期間（50年）に後退すると予測される浜幅とする。汀線変化予測モデルは、Kuriyamaら³⁾が提案した岸沖漂砂による汀線変動推定モデルに地盤沈下と海面上昇の影響を加えたものである。モデルの変数は、沖波のエネルギーフラックスと汀線位置、地盤沈下と海面上昇に伴う汀線移動量、平衡断面の位置であり、次式で表される。(1a)

$$y_{s,i} = y_{s,0} + \sum_{j=1}^i \left(\frac{dy_s}{dt} \right)_j \Delta t \quad (1a)$$

$$\left(\frac{dy_s}{dt} \right)_j = a_{01} + a_{02} + a_1 E_j^2 + a_2 E_j + a_3 (y_{s,j-1} - y_{eq,j-1})$$

ここで、 y_s は汀線位置（海方向が正の方向）、 t は時間、 Δt は時間間隔、 E は潜堤による波浪減衰を考慮した沖波のエネルギーフラックス（ $=\rho g H_{1/3}^2/16$ ； $H_{1/3}$ は有義波高、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度）、 a_{01} は地盤沈下と海面上昇による汀線変化速度（地盤沈下速度+海面上昇量）と海浜勾配の逆数との積）、 a_{02} 、 a_1 、 a_2 、 a_3 はそれ以外の係数、 y_{eq} は地盤沈下と海面上昇による平衡断面の移動量（地盤沈下と海面上昇による汀線移動量の累積値 $\sum a_{01}$ 、海方向が正の方向）である。

なお、モデルの仮定は以下の通りである。

- ① 汀線は、地盤沈下 (7mm/年) および海面上昇 (IPCC2019, RCP2.6) が生ずると、幾何学的に後退する。その量は、地盤沈下量と海面上昇量との和（地盤沈下量+海面上昇量）と海浜勾配との積で表される。
- ② 汀線は波浪の影響を受けて平衡断面に近づこうとする。一般的には、波浪が大きいほど平衡断面は岸側から侵食傾向となる。したがって、同じ侵食性の波浪が作用しても、あらかじめ侵食が生じていた断面では、堆積気味の断面に比べて汀線の後退量は小さくなる。
- ③ 平衡断面は地盤沈下と海面上昇によって陸側に移動する。その移動量は、地盤沈下と海面上昇による汀線移動量の累積値に等しい。

図-9は汀線位置の実測値と計算値の誤差が最小となるようにSCE-UA法 (Duanら⁴⁾) により係数を決定した再現計算結果を示したものである。計算値は実測値と良好に一致している。図-10は再現計算で設定した係数を用いて、供用期間50年の汀線位置を予測した結果である。供用期間50年間の汀線後退量は、5 m刻みでまとめると20 m（汀線後退速度：20 m/50年：0.4 m/年）となる。

d) 砂浜維持管理のための各段階の浜幅

以上の結果をまとめると表-3のようになる。措置段階の汀線位置に高波浪時の汀線後退量5 mを加えた汀線位

置より汀線が沖側にあれば、背後域の安全性は確保されていることになる。新潟港海岸では汀線後退が継続しており、供用期間50年に対する平均的な汀線後退速度は0.4m/年と推定される。監視段階の浜幅（汀線位置）は、砂浜の供用年数と汀線後退速度から設定する考え方を提案している。この考え方は、供用期間残年数が50年の場合と、例えば残り10年となった場合の監視段階となる汀線位置は異なる。残供用年数が少なければ、汀線後退リスクも低下することを考慮したものである。以上のように、監視段階の浜幅は、供用期間残数に応じて変化する考え方を導入した。

6. 巡視点検項目

砂浜の巡視点検時項目は、海岸の安全な利用、景観等を維持する視点も必要であることから、以下の項目が必要と考える。それぞれの項目については、発生要因を分析したうえで、適切に対応する必要がある。

- ① 各区画の汀線形状：突堤間の弧状汀線が保たれていない場合には、その要因を分析して対策する。
- ② 汀線位置：表-3と照らして健全度を判断する。
- ③ 遡上痕跡：遡上高が後浜天端高に達している場合には、2次点検を実施する。

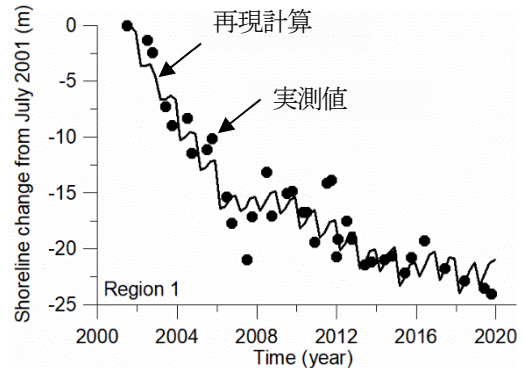


図-9 第1区画の汀線位置の再現計算

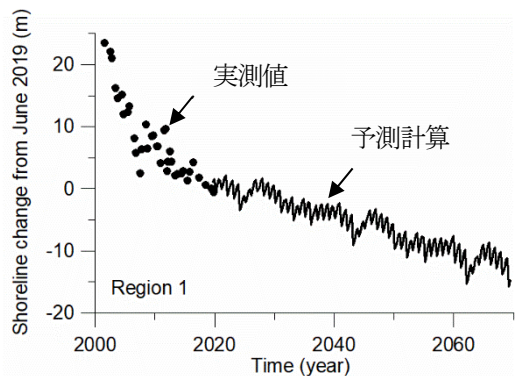


図-10 第1区画の供用期間の汀線位置の予測計算

表-3 経過年数と各段階の浜幅

経過年数	A(措置段階)	B(予防保全段階)	C(監視段階)	D(問題なし)
	波のうちあげ高 > 道路高 もしくは後浜天端高となる 浜幅 a (m)	一次的な汀線後退量 b (m)を考慮 (b=5m)	供用期間中に変化する浜幅 c (m) c:供用期間×汀線後退速度	a+b+c ≤ 浜幅
2021年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	40m ≤ 浜幅 < 60m	浜幅60m以上
10年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	40m ≤ 浜幅 < 56m	浜幅56m以上
20年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	40m ≤ 浜幅 < 52m	浜幅52m以上
30年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	40m ≤ 浜幅 < 48m	浜幅48m以上
40年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	40m ≤ 浜幅 < 44m	浜幅44m以上
50年	浜幅 35 m未満	35m ≤ 浜幅 < 40m	浜幅 40m	浜幅40m以上

- ④ 浜崖：段差が大きく、安全性に問題がある場合は、立ち入り禁止措置等の緊急対応を実施する。
- ⑤ 洗掘：構造物の安定性に問題があると判断される場合には、適切に対応する。
- ⑥ 陥没：予見は難しいものの、陥没が小規模でも確認できた場合には、ただちに立ち入り禁止措置等の緊急対応を実施する。
- ⑦ 漂着物：海岸利用等に影響すると考えられるゴミ、流木等がうちあげられている場合には撤去する。
- ⑧ 飛砂：飛砂対策工の制御効果が低下すると考えられる場合には、対策工回りの飛砂を除砂して海岸に戻す。

7. まとめ

本研究における主要な結論は以下のとおりである。

- a) 巡視時に容易に把握可能な汀線位置を砂浜の健全度を評価するための指標とする妥当性を確認した。
- b) 砂浜の維持管理も予防保全の考え方を踏襲し、砂浜の健全度を定義した。

- c) 地球温暖化による海面上昇、地盤沈下の影響を考慮した汀線変化予測モデルにより供用期間50年間の汀線位置を予測した。
- d) 供用残期間に応じて(C)監視段階、(D)問題なしの浜幅を定義する考え方を示した。

本研究における維持管理基準は沿岸漂砂による地形変化を考慮しなくて良い新潟港海岸をケーススタディとしており、他海岸で適用する場合には、次のことに留意する必要がある。海底地形のモニタリングを行った結果に基づく断面地形の変化予測を適切に行い、各海岸の特性を十分に把握して管理基準を設定する。

謝辞：新潟西海岸技術委員会からの助言を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高山知司, 池田直太, 永井紀彦, 高山優：広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 587-591., 1988.
- 2) 片野明良, 清水利浩, 千田奈津子, 眞井里菜, 宇野喜之, 菊地野生：平坦な後浜天端幅を考慮した波のうちあげ高の算定方法について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 78, 投稿中
- 3) Kuriyama, Y., M. Banno and T. Suzuki : Linkages among interannual variations of shoreline, wave and climate at Hasaki, Japan, Geophysical Research Letters, 39, L06604, doi:10.1029/2011GL050704., 2012.
- 4) Duan, Q. Y., V. K. Gupta and S. Sorooshian : Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, J. Optimization Theory and Applications, Vol. 73, No. 3, pp.501-521., 1993.

肱川流域における防災教育の取り組み

益岡 あゆ¹・宮田 晃¹

¹四国地方整備局 大洲河川国道事務所 工務第一課 (〒795-8512 愛媛県大洲市中村210) .

平成27年に通知された「防災・河川環境教育の充実に係る取組の強化について」(国土交通省水管理・国土保全局防災課長、河川環境課長通知)により、教育委員会、学校等と連携し、新たな学習指導要領に基づく防災教育を実施してきたが、平成30年7月豪雨を受け、更なる「防災教育」の充実が必要となった。しかし、地域特性に特化した教材の不足・教師の防災知識の向上が課題となっていた。

本論文では、この課題を解消するため肱川オリジナル単元として「風水害」をテーマに作成した教材提供、支援学習の実施及び防災センターの活用について報告する。

キーワード 平成30年7月豪雨、防災教育、風水害、防災センター

1. はじめに

当事務所では、平成27年に通知された「防災・河川環境教育の充実に係る取組の強化について」(国土交通省水管理・国土保全局防災課長、河川環境課長通知)により、教育委員会、学校等と連携し、平成28年度に改訂された新たな学習指導要領に基づく防災教育を実施してきたが、平成30年7月豪雨を契機に住民の防災意識向上に向けた対策に取り組んでいく必要が生じ、更なる「防災教育」の充実にも取り組んでいくことが必要となった。

しかし、一般的な教科書は肱川の特性に特化しておらず、肱川での風水害を学ぶ教材の不足や、教師が防災教育を実施するうえで必要となる防災知識の向上が課題となったため、その課題解消に向けて取り組んだものである。

2. 防災教育の実施内容

(1) 防災教育の目的

肱川流域は、風水害が起りやすい地域であり、災害が起こることで住民の命や生活、産業等に大きな影響を与えてきたことから、大洲市では、頻発する自然災害を踏まえ、小学生の学習において防災教育の充実に取り組んでいる。

しかし、一般的な教科書では他地域を題材にしているものが多く、「地震」が主な学習対象になっており、児童に身近な地域の情報が不足している。

そこで、当事務所では、小学4年生を対象に行う防災教育について、風水害に関する肱川オリジナル単元として「自然災害から暮らしを守る」をテーマに10時間の教材集を作成し提供した。(表一)

この防災教育を実施する目的は風水害から命や暮らしを守るためであることから、肱川で過去に

発生した風水害を題材にし、地域の特性を学ぶとともに、災害から人々を守る活動を国・県・市等の関係機関と住民が協力して行っている活動内容について学んでもらうものとした。また、自分達にできることは何なのか考え・判断ができ、児童と教師が共に自分の命や大切な人を守ることにについて考える力を防災教育で身につけてもらうものとした。

表一 1 単元時間構成

一般的な教科書	肱川オリジナル教科書
(1)オリエンテーション	(1)オリエンテーション 「愛媛県のさまざまな自然災害」
(2)地震が起きたら	(2)風水害が起きたら
(3)地震とわたしたちの生活	(3)風水害とわたしたちの暮らし
(4)家庭でそなえていること	(4)家庭でそなえているもの
(5)学校や通学路でそなえているもの	(5)学校や通学路でそなえているもの
(6)市の取り組み	(6)風水害が起きたときのさまざまな人たちの仕事
(7)市と住民の協力	(7)市と住民の協力
(8)住民どうしの協力	(8)住民どうしの協力
(9)地震から暮らしを守る取り組みをまとめる	(9)風水害から暮らしを守る取り組みをまとめる
(10)ひなん所シミュレーション	(10)ひなん所シミュレーション

(2) 防災教育の教材について

令和2年度において、大洲市で使用する教科書に沿った形で、肱川を題材にした防災教育教材を当事務所で作成し提供した。

ここで、肱川の地域特性に特化した教材の作成に力を入れ、教師が防災教育を実施するために必要な、防災の知識向上に努めた。そのため、授業が円滑に進むよう補助として教師用資料「指導計画」・「板書・発問計画」・「教師用解説書」を作成した。教師用資料とは、各時間の理解力を高めるために、授業で使用する写真を用いた解説資料や、板書するにあたっての板書計画案、指導上の留意点をまとめた参考資料である。(図一)

なお、授業で使用・参照する災害事例は国土交通省等が保有する資料を防災教育に役立てて頂くため、大洲市内の災害事例の写真を多用し、児童に身近でつかみやすい内容になるように作成した。(図-2)

この教師用資料や洪水時の状況写真、資料等とともに、授業の展開例を作成し、DVDと紙媒体でまとめたファイル一式を、教育委員会と連携し令和3年5月に大洲市の全12校19クラスへ配布した。配布時には、小学校での風水害をテーマとした防災教育の実施の呼びかけを行うとともに、国土交通省と大洲市危機管理課・教育委員会から、支援学習が実施できることを小学校に伝えた。



図-1 教師用資料



図-2 板書用写真・図

(3) 支援学習について

令和3年度では、小学校3校（大洲小学校・長浜小学校・新谷小学校）より4年生を対象とする支援学習の依頼があり、肱川の学習内容に沿った支援学習を行った。

支援内容は、10時間のうち、小学校へ出前講座を実施するものと、出前講座は行わず、教師への資料提供や補助のみを行う形で実施した。

大洲小学校では、コロナ感染対策のため出前講座は実施せず、資料提供のみ実施した。長浜・新谷では、小学校で出前講座（支援学習）を実施した。

支援学習を実施するうえで、先生方と打合せを行い、先生のニーズを踏まえた防災教育教材の改良を行った。その改良は、授業を行う際、「肱川版の児童用の資料があると授業を実施しやすい」というご意見から、児童用資料(教科書・ワークシート・テスト)を新たに作成した。(図-3)



図-3 児童用資料

令和3年度では、教師用資料と新たな児童用資料を活用し、長浜小学校、新谷小学校で支援学習を実施した。以下、2小学校での支援学習について紹介する。

a) 新谷小学校

新谷小学校では打合せの中で、国交省・大洲市・消防団の活動内容に該当する時間割について支援学習を実施してほしいとの依頼を受け、大洲市危機管理課に協力していただき、国交省・大洲市危機管理課・消防団の方々と3日間かけて支援学習を実施した。(図-4)



図-4 新谷小学校支援学習

当事務所は、「(6)風水害が起きたときのさまざまな人たちの仕事」の授業を実施した。風水害の発生前後では、図-5のように、国・県・市や他の関係機関が協力し住民の命を守るためにどのような活動を実施しているか学び、必死に住民の命を守ろうと働いている人が周りにいることを知る授業とした。



図-5 風水害が起きた時に働く人々

「(7)市と住民との協力」の授業では、大洲市危機管理課と消防団が講師として、消防団と消防士の違いや、消防団がどのような仕事をしている

かを、座学と実際の活動服試着や放水体験を通じた体験学習により実施した。

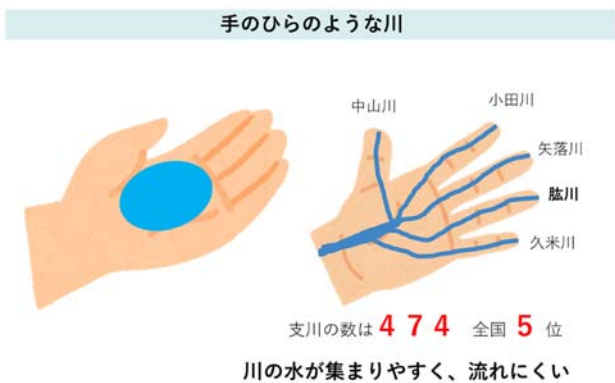
「(8)住民どうしの協力」の授業では、大洲市危機管理課が講師として、自助・共助・公助、自主防災組織、地区防災計画、避難所など、市と住民の協力内容について授業を行った。この授業では、自分たちの命は自分たちで守り、お互い協力し支え合っていくことが大切ということを児童に学んでもらい、児童の防災意識を高めるものとなった。

b) 長浜小学校

当事務所は、「(2)風水害が起きたら」の授業を実施した。この授業では、大洲市で起こった過去の風水害や、肱川で風水害が起こりやすい地形等の特徴を学習した。

なお、児童により理解してもらえる様、図—6に示すイラストや写真を一緒に確認しながら授業を行い、肱川で洪水が起こりやすい特徴の理解を向上させる工夫を行った。

この授業を通し、肱川の特徴や今後もし起きるかもしれない災害を理解して、自分たちがどういった行動をとるべきか学習をした。



図—6 長浜小学校支援学習の使用資料

3. 防災教育活動結果

大洲市の全12校で防災教育終了後の11月末に、防災教育教材集の改良を図るため、先生方にアンケートに協力していただいた。そのアンケート結果を報告する。

(1) 防災教育の今後の改善に向けた課題について

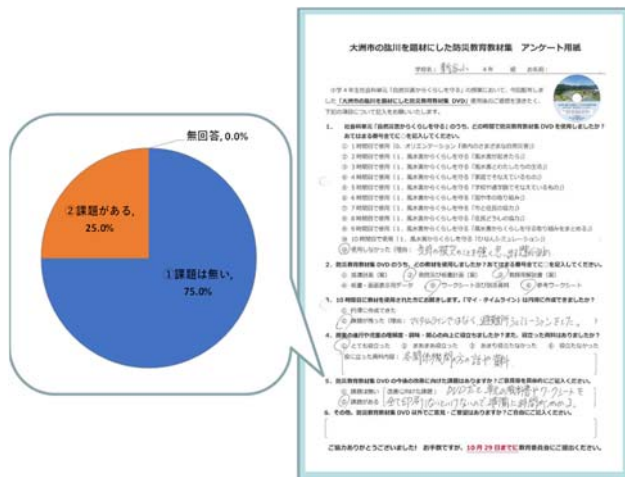
今回、配布した教師用資料の評価として、「課題がない」との意見が75%、「課題がある」との意見が25%との結果になった。(図—7)

「課題がない」の意見として、どの授業においても大洲市の資料があり、児童が興味を持って授業を実施できた等の意見があった。

「課題がある」の意見として、支援学習をしていない学校からは、4年生には難しい内容があり情報が多いため厳選してほしいとの意見があった。

また、平成30年7月豪雨を経験した児童の中に

は、心の傷が残りトラウマになっている児童もいるため教材に災害時の過激な写真は使用しないでほしいとの意見があった。



図—7 アンケート結果

(2) 防災教育教材の改良について

支援学習や先生方のアンケート結果を参考に防災教育教材の改良を行った。

4年生には難しい内容が含まれているという点では、実際に支援学習をしている中で児童の理解度にばらつきが見えたため、児童用教科書・ワークシートにある専門用語や聞き馴染みのない単語を減らし、表現の仕方を変更した。

トラウマになっている児童に対しては、児童用教科書の写真も被害の描写が過激すぎない内容に変更し、教師で資料使用が判断できるように過激な写真は別データとしてまとめた。

支援学習をしていない学校からは、情報量が多いという意見があり、支援学習を実施している学校からは、授業を実施する上で教科書・ワークシートがあることで十分な教育資料が整い、テストで児童の理解度を確認できるという意見があった。そのため、今回は児童用教科書の配布を支援学習実施校のみに限定していたため、今後は教師が授業を円滑に実施できるよう、全校に配布できるよう準備を行った。

(3) インタビュー動画の作成

令和3年度の支援学習ではコロナの関係により大洲小学校は資料提供のみとなったため、出前講座ができない場合でも支援できるようにインタビュー動画を作成した。

インタビュー動画では大洲市危機管理課にも協力していただき「水害時に備えた働きについて」・「水害時の働きについて」として、大洲市内で働く防災関係者のインタビュー動画の作成を行った。

これら、防災教育教材の指導用資料・児童用資料・インタビュー動画・指導事例を一括整理し、

令和4年4月に再度配布を行っている。(図一8)



図一8 令和4年度配布教材(令和3年度改良)

4. 大洲市防災センターの利活用

防災教育の一環として、大洲市と連携し、大洲市防災センター(肱川防災ステーション)を活用した防災教育を、防災センター長と大洲市危機管理課の方々により実施した。

令和3年度では、平小学校・粟津小学校・新谷小学校・久米小学校の4校が大洲市防災センターで見学会を実施した。

見学会では、大洲市防災センターの施設・肱川の概要・排水ポンプ車等の説明を行っている。

なお、座学になると児童達の集中力は切れ、退屈に思われることから、児童に楽しんでもらえるよう、肱川について説明する時、クイズ形式や肱川に住んでいる動物を紹介するなど身近に感じる写真等を使用している。また、排水ポンプ車・照明車の説明では、実際に児童にホース等を持ち上げてもらう等、身体を使って楽しんでもらいながら理解を深めてもらうプログラムを実施した。

また、見学会で児童に楽しく学んでもらうために、大洲市防災センターの施設内の床に8m×8mの肱川流域の空撮の床地図を設置した。(図一9)

新谷小学校の見学会では、この床地図を使用し、児童がゲーム感覚で肱川について学べる体験型プログラム「つみきリレー」を実施した。

「つみきリレー」とは、つみきを川の水に見立て、源流から下流に流れる間に支川が合流し、雨が降った場合につみきがどれだけ増え、手から溢れるのか、肱川がどのような川なのか体験しながら学ぶプログラムを考案し、実施した。(図一10)



図一9 肱川流域空撮の床地図



児童は積み木を持って支川の源流に配置 運ぶ量が多くなりすぎると積み木が手から溢れてしまう

図一10 つみきリレー

5. おわりに

本稿では、大洲市教育委員会・危機管理課と連携した防災教育の取組みを報告した。今回の支援学習を通し、先生方のアンケート等を参考に防災教育教材の更新をするとともに、新たな教材を作成することができた。

大洲市では、頻発する自然災害を踏まえ、防災教育の充実が図られてきており、今後も国・県・市等の関係機関と連携し防災教育を実施していくことが重要である。

しかし、防災教育は国・県・市等の関係機関が学校に出向き授業をするだけでは続かない。学校の授業の一環として防災教育を持続させることが必要であり、教師自らが自主性を持ち授業を実施することが大切になってくる。

当事務所では、今後も教師の防災に対する知識向上や持続可能な防災教育ができるよう、大洲市のさまざまな組織・団体と連携し体制を構築し、引き続き取り組みを進めていく。

謝辞

本稿の作成にあたり、関係者の皆様に多大なるご協力およびご助言をいただき心より感謝申し上げます。



多機関が連携した 流域タイムラインの作成について

松永 匠¹

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

避難情報着目型タイムラインはほとんどの河川で整備され、災害時に一定の成果が上がっているが、多数の市町村にまたがる河川では、市町村毎にタイムラインが分かれているため、事務所長が十分に活用できない等の課題がある。2021年10月の国土交通省防災業務計画の修正により、従来の避難情報に着目した水害対応タイムラインを複数の市区町村を対象とした流域タイムラインに見直すこととされ、近畿地方整備局管内のモデル河川として由良川で流域タイムラインの作成が試行された。本論文では、由良川において試行された流域タイムラインの作成について報告する。

キーワード 多機関連携、水害対応タイムライン、流域タイムライン、WEBホットライン、災害対策基本法

1. はじめに

(1) 流域タイムライン作成の経緯

洪水、高潮等によって生じる被害を最小限にするためには、市区町村長による避難情報の適切な発令をはじめ、関係機関が適時的確な防災行動を判断・実施する必要がある。

そのためには、河川の氾濫や高潮の発生を前提に、河川管理を担う国等の事務所（以下、「河川事務所」という。）と市区町村等が連携して、災害時の状況を予め想定し共有した上で、「いつ」、「誰が」、「何をするか」に着目して、基本的な防災行動とその実施主体を時系列で整理する「水害対応タイムライン」の作成・活用が有効である。

避難情報着目型タイムラインは全ての国管理河川で整備され、都道府県管理河川でも95%近く整備されるなど、一般の認知度も上がり、災害時においても一定の成果が上げられている。一方、多数の市町村にまたがる河川では、市町村毎にタイムラインが分かれているため、事務所長が十分に活用できず、新任担当者の習熟にも時間がかかり、ふりかえりにも生かされない等の課題がある。これらの課題に対しては、河川事務所から流域自治体等へのトリガー情報に着目した、引継ぎやふりかえりが容易でシンプルな流域タイムラインの作成が有効である。

2021年9月に決定した総力戦で挑む防災・減災プロジェクト第2弾の重点推進施策の1つに「一人でも多くの方が、円滑に避難できるように～住民避難～」があり、住

民等に対して市町村が適切に避難情報を発令できるように、流域でのタイムラインの作成や、WEBホットラインの導入により流域市町村への河川・気象情報の伝達や危機感の共有を円滑化し、的確な避難情報の発令など市町村の防災業務を支援することとされている。

また、2021年10月の国土交通省防災業務計画の修正により、避難情報に着目した水害対応タイムラインを複数の市区町村を対象とした流域タイムラインに見直すこととされた。

(2) 災害対策基本法の改正

2018年7月豪雨、2019年東日本台風、2020年7月豪雨等の近年の豪雨災害において、本来避難すべき避難勧告のタイミングで避難せず、逃げ遅れにより被災する者が多数発生し、避難勧告と避難指示の違いも十分理解されていないことや、いまだ多くの高齢者が被害をうけており、避難行動要支援者の避難の実効性の確保には避難を支援する人が決まっていない等の課題があること、災害発生前に国が対策本部を設置できず、災害が発生するおそれの段階で、地方公共団体が避難先・避難手段の調整を行う手段が無い等の課題が浮き彫りとなった。これらの課題に対応するため2021年5月に災害対策基本法が改正された。

この改正により、避難勧告と避難指示を一本化する等避難情報のあり方の包括的な見直しや、市町村に対する個別避難計画の作成の義務化、災害発生のおそれの段階での国の災害対策本部の設置と住民等を広域避難させる

に当たって必要となる市町村間の協議を可能とするための規定等の設置等が行われた。

(3) 国土交通省防災業務計画の修正

国土交通省防災業務計画は、災害対策基本法第36条に基づき、国土交通省が防災に関してとるべき措置等を定めた計画で、国土交通省が自然災害や重大事故において、予防、応急対策、復旧・復興の各段階でとるべき諸施策を規定しており、直近では2021年10月に修正された。

この修正では、災害対策基本法の改正や流域治水関連法案の制定を踏まえた修正や、2020年度に発生した災害への対応の教訓を踏まえた修正が行われた他、自然災害リスクコミュニケーションの推進を目的として、住民等への的確な情報発信、市町村支援の充実や、防災行動計画（タイムライン）の普及・策定推進等が追加された。

表-1 水害対応タイムラインと法定計画の関係

タイムライン	領域	目的	法定計画 (作成主体)
流域タイムライン	流域	流域単位の市区町村を対象として、河川事務所等の防災行動を確認する	国土交通省防災計画等（地方整備局、事務所等）
市区町村タイムライン	市区町村	市区町村が自らの発令する避難情報などのタイミングを明らかにする	地域防災計画（市区町村）
コミュニティタイムライン	地区	自治会や自主防災組織などの行動を明らかにする	地区防災計画（自治会、自主防災組織）
マイタイムライン	個人、事業者等	施設毎や個人が自らの行動を明らかにする	避難確保計画（要配慮者利用施設）、個別避難計画（要配慮者）

2. 流域タイムラインの概要

(1) 水害対応タイムライン

災害対策基本法に基づき、国土交通省や各地方整備局等においては防災業務計画を、地方公共団体においては地域防災計画を策定し、災害時の行動について定めることとなっており、水害対応タイムラインについてもこれら計画と整合し、定められた基本的な防災行動を時系列で整理したものである必要がある。

このため、水害対応タイムラインについては、実施主体毎に自らの基本的な防災行動を確認できるものにし、河川事務所等の行動を中心に整理する流域単位のタイムライン（流域タイムライン）と、市区町村の行動を中心に整理する市区町村単位のタイムライン（市区町村タイムライン）のほか、マイ・タイムラインなどの世帯や地区毎に任意で作成されるタイムラインなどが、階層的かつ相互に連携し、作成・活用されることが重要である。

なお、既に多機関連携型タイムラインが作成されている場合は、これらが前述のいずれに該当するのかを確認した上で、これまでの経緯等を尊重しつつ活用、改善に努めることとする。

これらの各タイムラインにおける実施主体毎の行動の認識共有の場としては、大規模氾濫減災協議会やその部会等を活用することが考えられる。

(2) 水害対応タイムラインの活用等

作成した水害対応タイムラインについては、毎年、出水期前を基本として市区町村等の関係機関と合同で確認を行うとともに、洪水等の対応に関する演習・訓練等の際にも活用する。また、災害対応やその振り返り、演習・訓練等の際に明らかとなった課題を踏まえて、随時見直し等を行う。

また、これまで実施してきたホットラインのほか、数日前から前日までなどに行うWEB 会議ツールによる危機感共有の場などにおいて、気象警報や洪水予報等について効果的・効率的に伝えるよう努める。

(3) 流域タイムラインの概要

流域タイムラインは、河川事務所等が、その管理する河川の流域を対象に、河川・気象情報をもとに発表する洪水予報など、自らの基本的な防災行動を時系列で確認するとともに、災害後の振り返りに用いることを目的とするものである。

同一の洪水予報の予報区域や、洪水時に特に参考にする水位観測所が同一であるなど、流域単位の市区町村を対象として、河川事務所等の防災行動を確認するための「流域タイムライン」を市区町村等の関係機関と連携して作成・運用する。

なお、これまで活用してきた避難情報着目型タイムラインは、市区町村タイムラインの作成の参考になることに留意する。

a) 対象

国管理区間を対象とする。延長が長い場合などについては、複数のブロック（基準地点受け持ち区間）などに適宜分割する。

b) 段階

基準地点の過去の水位変化の実績をもとに、以下の段階毎の行動を整理する。

- ・数日前（台風接近）
- ・3日前（流域平均雨量の見通し）
- ・洪水予報・予測水位の発表時点

c) 規定すべき事項

表-2に示す規定すべき事項等のうち【必須】かつ【基本】の項目を軸に、地域の特性等に応じて、条件を満た

す場合に必須とする項目を適宜記載する。

また、【必須】かつ【基本】をもとに作成した後も、引き続き関係者との調整を進め、【推奨】とした事項等の記載について検討していくことが重要である。実効性のあるタイムラインとするため、表-2に記載されていない事項等も含め、随時必要な行動等を記載することが望ましい。

一方で、記載事項が膨大になるとかえって活用が困難となる場合があることに留意が必要である。

(4) WEB会議ツールによる危機感の共有

2021年9月に決定した総力戦で挑む防災・減災プロジェクト第2弾の重点推進施策の1つとして、大雨・洪水が想定される数日前～前日において、河川事務所等、气象台、都道府県、市区町村等の対応可能な防災担当者がWEB会議ツールにより一同に会し、危機感や対応の見通しなどの共有により、連絡体制や各組織の災害体制の構築等を促進する。

表-2 流域タイムラインに規定すべき事項

①河川事務所等として規定すべき行動

	基本	条件を満たす場合 (括弧内に条件を付記)
必須	<ul style="list-style-type: none"> 数日前からのWEB会議ツールによる危機感の共有 当日の洪水予報・水位到達情報、水防警報の発表・伝達 氾濫のおそれ、氾濫発生・切迫に関する情報伝達（ホットライン） 	<ul style="list-style-type: none"> 河川管理施設の操作により、支川氾濫や内水により明らかに浸水が発生することが見込まれる情報やその伝達 個別対応区域の避難のための情報（洪水予報の予報区域内に個別に対応する区域があり、河川事務所等がホットライン等を行うこととしている場合） ダムの放流等の情報（本川ダムなど著しい影響のある場合） その他、河川からの氾濫のおそれにより、避難が必要な地域の避難指示や避難行動に関わる連絡（必要に応じて） 流域警戒ステージ（仮称）（警戒レベルや相当情報とは別に、危機感について段階を定めるもの）あるいはこれに類するもの（すでに流域警戒ステージ等を設定している場合）
推奨	<ul style="list-style-type: none"> 流域警戒ステージ（仮称）あるいはこれに類するもの ※警戒レベルや相当情報とは別に、危機感について段階を定めるもの 排水ポンプ車の配備等 	<ul style="list-style-type: none"> 個別対応区域の避難のための情報（洪水予報の予報区域内に個別に対応する区域があり、市区町村や自治会等が自ら判断することとしている場合） 【必要に応じて】 水門等の操作員への出動・退避指示 維持業者・流観業者等への出動・退避指示 災害協定業者（建設業協会、測量協会等）への連絡

②作成にあたり調整の相手方とする関係者

	基本	条件を満たす場合 (括弧内に条件を付記)
必須	<ul style="list-style-type: none"> 气象台 都道府県（建設事務所等） ※本庁河川部局あるいは氾濫域が共通の河川を担当する建設・土木事務所のいずれか、特に氾濫域を共有する河川を担当する部局 氾濫域の市区町村 	<ul style="list-style-type: none"> 都道府県危機管理部局（市区町村界を超える広域避難が必要な地域、その他すでに大規模氾濫減災協議会に参画している場合） 都道府県砂防部局（河川氾濫と同時に土砂災害について特に警戒を促す必要のある地域） 道路管理者（避難経路上に雨量規制区間や土砂災害のおそれがある場合） 公共交通機関（避難行動に公共交通の運行状況が大きく影響する場合） 学識者・タイムラインのコーディネートを務める方など（流域タイムラインの作成・振り返り等のために参加することとしている場合） 警察・消防（避難誘導等の主体として期待される地域）
推奨	<ul style="list-style-type: none"> 都道府県危機管理部局 都道府県砂防部局 道路管理者 公共交通機関 学識者等・タイムラインのコーディネートを務める方など 警察・消防 	<ul style="list-style-type: none"> 【必要に応じて】 ライフライン企業（電力、ガス、通信等） 報道機関（テレビ、ケーブルテレビ、ラジオ、新聞等） その他主な許可工物の設置者等（道路管理者（橋梁、堤防道路）、水道・下水道事業者（水道橋）ほか）

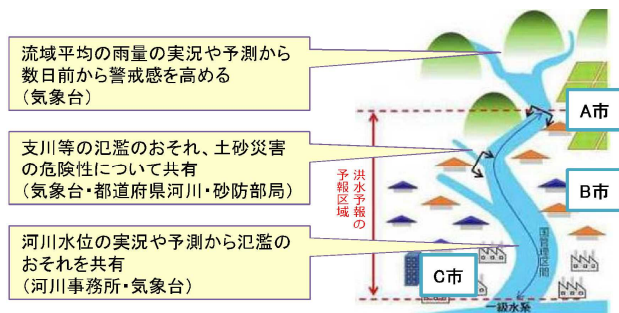


図-1 流域タイムラインのイメージ

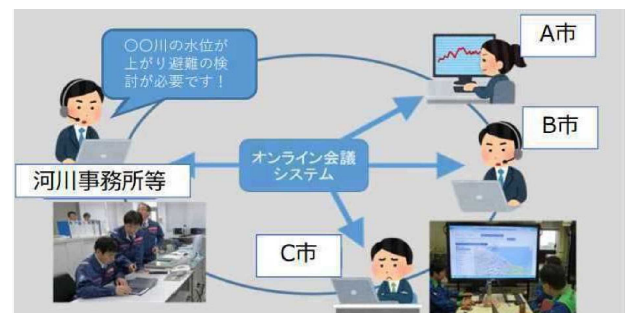


図-2 WEB会議ツールによる危機感の共有のイメージ

3. 由良川における流域タイムラインの作成

(1) 既存のタイムライン

由良川の国管理区間の沿川自治体は、福知山市、綾部市、舞鶴市、宮津市である。これらの市では、河川事務所、京都地方気象台、京都府、警察、消防、自衛隊、ライフライン機関、住民等との洪水発生時の情報伝達等の連携を整理した多機関連携型タイムラインが作成されており、氾濫発生時の48時間前から氾濫発生後までの行動が整理されている。

なお、これらのタイムラインは災害対策基本法の改正前に作成されたものであり、避難指示と勧告の一本化等、避難情報のあり方の包括的な見直しは未反映である。

(2) 流域タイムラインの作成

各市が作成していた多機関連携型タイムラインから、市と河川管理者と京都地方気象台に関する箇所を抽出し、近年の大出水である2013年台風第18号洪水の時間軸に合わせて行動のタイミングを調整して合成し、河川事務所と京都地方気象台と沿川4市の行動を整理したタイムラインを作成した。このとき、避難勧告と避難指示の一本化等、災害対策基本法の改正による避難情報のあり方の包括的な見直しを踏まえた修正も行った。

さらに、流域タイムラインに規定すべき事項を踏まえて以下の内容を追加した。

a) WEBホットライン

防災担当者間が危機感や対応の見直し等を共有するためのWEBホットラインのタイミングを追記した。(表-3)

b) 個別対応区域の避難のための情報

由良川は下流部では土地利用一体型水防災事業により宅地嵩上げが実施されていたり、中流部でも堤防未整備区域が残されていたりする等、早期に氾濫が発生する区域が存在し、これらの区域は個別対応区域とされている。

これら個別対応区域については地区別に避難のための情報を連絡するタイミングを記載している。

ただし、福知山市及び舞鶴市については、早期氾濫発生区域が存在することを踏まえて、住民説明会等で早めの避難を呼びかけるとともに、全市に対する避難情報を早めに発令しており、個別対応区域を対象とした避難情報の発令は行っていないことから、個別対応区域毎の避難のための情報は記載していない。

c) ダム放流等の情報

由良川本川には大野ダム(治水、発電)と和知ダム(発電)が存在している。これらのダムについて、事前放流開始、洪水調節開始、緊急放流通知(情報提供、事前通知、開始通知、終了通知)の情報伝達や所定の放流量に達した時の放流連絡のタイミングを追記した。また、沿川4市以外で情報の受け手となる市町があったため、その市町も対象機関に追加した。

表-3 WEBホットラインのタイミングと内容

タイミング	段階	内容	参加者
発災の72時間前	準備のお知らせ	流域平均雨量の実況や予測の情報共有	担当者レベル
発災の24時間前	準備	流域平均雨量の実況や予測の情報共有	担当者レベル
水防団待機水位超過時	準備	水防団待機水位超過・氾濫注意水位到達見込み	担当者レベル
氾濫注意水位超過	警戒レベル2	氾濫注意水位超過・避難判断水位到達見込み	所長、首長
避難判断水位超過	警戒レベル3	避難判断水位超過・氾濫危険水位到達見込み	所長、首長
氾濫危険水位超過時	警戒レベル4	氾濫危険水位超過・氾濫開始相当水位到達見込み	所長、首長
計画高水位超過時	計画高水位超過	計画高水位超過・氾濫開始相当水位到達見込み	所長、首長
氾濫発生時	警戒レベル5	有堤区間での氾濫発生	所長、首長

d) 道路通行規制の情報

由良川下流部では土地利用一体型水防災事業が行われたため、家屋は洪水から防御されているものの、道路は多くの区間が洪水時に浸水する。このため、京都府は京都府警察と連携して、洪水時の道路通行規制を実施している。これらの通行規制のタイミングを追記した。

e) 洪水危機レベル(流域警戒レベル)の情報

警戒レベルや相当情報とは別に、危機感について流域全体での段階を定めるものとして、洪水危機レベル(流域警戒レベル)を新たに設定して追記した。(表-4)

表-4 洪水危機レベルの定義

レベル	定義
0	発災3日前
1	大雨・洪水警報(大雨警報)発令
2	いずれかの基準観測所で氾濫注意水位超過
3	いずれかの基準観測所で避難判断水位超過
4	いずれかの基準観測所で氾濫危険水位超過
5	有堤区間での氾濫発生

(3) 関係機関への意見照会

流域タイムラインは、関係機関への意見照会によりブラッシュアップを行った。この意見照会により、市によっては個別対応区域毎の避難のための情報を記載しないことや、避難所開設のタイミング、災害対策本部への切り替えのタイミング、ダム事前放流のタイミング、住民への注意喚起のタイミング、学校の休校措置のタイミング、消防団によるパトロール開始のタイミング等の修正、追記を行ったほか、以下の意見が出された。

- ・警戒レベルのトリガーについて、各市の基準が気象情報と水位の両方を考慮したり、水位のみを考慮したり等バラバラであるため、考え方を統一したほうが良い。
- ・新たに設定された洪水危機レベルと京都地方気象台が土砂災害、中小河川の洪水、浸水害を対象として発表する警戒レベルが合っていないため、現場が混乱するのではないか。

- ・WEBホットラインは常時接続しておくのか、危機対応中にWEBホットライン用端末の待機で人員を割くことはできない。

4. 令和4年出水期の活用について

令和4年の出水期では、台風第14号への備え及び由良川沿川の市役所との訓練において、気象情報や河川状況、各機関の対応状況等の情報共有を行った。活用した後の振り返りとして、以下の意見が出された。

- ・共有したい情報や、教えて欲しい情報を、あらかじめ決めておけば円滑な情報共有の場となる。
- ・共有した情報を議事録として共有すれば、見直しが可能となる。
- ・流域タイムラインの明確な開始条件を決めておくべき。

5. 終わりに

作成した流域タイムラインについては、毎年、出水期前を基本として市区町村等の関係機関と確認を行うとともに、洪水等の対応に関する演習・訓練等の際に活用することで、常に関係する職員が流域タイムラインの内容

を把握できる環境におき、確認された課題については、その課題に関する関係者と認識共有をしつつ随時見直しをする必要がある。

また、災害時に活用するとともに、災害後の振り返りや見直しを行うものとし、各タイムラインの主体毎の行動との整合及び認識共有を図る必要がある。その際、市区町村等の関係機関との認識共有が重要であるため、大規模氾濫減災協議会等にて議論し、認識を共有するものとする。

今回作成した由良川の流域タイムラインには以下の課題が考えられるため、由良川減災対策協議会の担当者会議等を活用し、ブラッシュアップを進めて行く予定である。

- ・共有した情報や、教えて欲しい情報を、あらかじめ決めておく。
- ・共有した情報を議事録として共有する。
- ・流域タイムラインの明確な開始条件を決めておく。
- ・警戒レベルのトリガーの考え方や洪水危機レベルの考え方について、関係機関による意見交換を行い、統一を図る。
- ・流域タイムラインと市区町村タイムライン（既存の他機関連携型タイムライン）の相互の整合を図る。
- ・洪水等の対応に関する演習・訓練等の際に活用し、関係職員に内容を把握させる。
- ・災害時に活用し、災害後の振り返りや見直しを行う。

2年連続となる一庫ダム冬季渇水への対応

川上 貴宏¹・内藤 信二²

¹水資源機構 関西・吉野川支社 淀川本部 施設管理課（〒540-0005 大阪府大阪市中央区上町A番12号）

²水資源機構 一庫ダム管理所 所長代理（〒666-0153 兵庫県川西市一庫字唐松4-1）。

一庫ダムがある猪名川流域では、2020年度は12月21日から、2021年度は2月17日より取水制限が開始され、2年連続の冬季渇水となった。2箇年とも段階的に取水制限が20%に強化され、特に2020年度は取水制限期間が106日間に達し、管理開始以降3位の長さとなった。

渇水期間中、一庫ダムでは水道事業者等に貯水池情報を適宜提供したほか、きめ細やかな低水管理操作や年度途中での利水基準点のH-Q曲線の見直し等、関係者との連携により貯水量を温存させた。さらに、2021年度は前年の経験を活かし、淀川水系渇水対応タイムラインに基づく自主節水を水道事業者と緊密に連携することで早期に実現させ、取水制限開始時期を3ヶ月程度先延ばしすることができた。

本稿ではこれらの渇水対応について報告する。

キーワード 冬季渇水、取水制限、確保流量、自主節水、渇水対応タイムライン

1. 2020年・2021年冬季渇水の概況

2020年・21年ともに一庫ダム流域の年間降水量は平年値1,505mmを上回ったものの、時期に偏りが見られ、各年とも夏季に集中的に降雨が観測された一方、8月又は9月以降少雨傾向となり、秋季～冬季の雨量が平年の約0.7倍と非常に少なく、これが2年連続の冬季渇水の原因となった。

ダム下流で必要量を安定して取水するためには、一定の河川水量を維持する必要がある。少雨により河川流量が減少した場合、一庫ダムから不足分を補給するため、貯水量が減少していく。図-1に主な渇水年の一庫ダム貯水位を示す。降雨による一時的な貯水量回復はあるものの、2020年は8月以降、2021年は10月以降、利水補給が続き、冬季に貯水率が30%（洪水期換算60%）を下回った。

2020年度は12月21日10時から農業用水・水道用水ともに取水制限10%を開始、同日に一庫ダム渇水対策本部を設置した。取水制限は2014年以来6年ぶり、冬季に取水制限が実施されたのは2002～03年以来であり、翌年1月8日には取水制限20%に強化された。その後、1月23日に貯水率20.9%と底を打った後（写真-1）は、取水制限の効果と、その後の周期的な降雨によって貯水量が回復し、4月5日に取水制限は解除された。取水制限期間は、2020年度は106日間、2021年度は96日間に達し、それぞれ管理開始以降3番目、4番目の長さとなった。



写真-1 貯水率21.3%の一庫ダム（2021年1月21日）

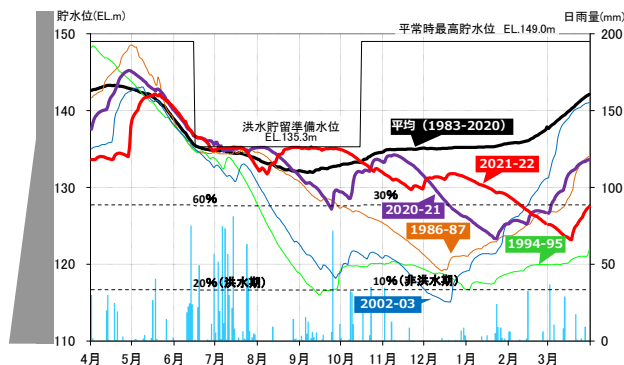


図-1 主な渇水年の一庫ダム貯水位曲線
（日雨量は2020年度）

2. 一庫ダムの低水管理の特徴

(1) 一庫ダムの利水

一庫ダムは、阪神都市圏を抱える都市型ダムであり、兵庫県（尼崎市・西宮市・伊丹市・宝塚市・川西市・猪名川町、神戸市の6市1町）、池田市、川西市、豊能町（大阪広域水道企業団）の水道用水として供給されている（図-2）。また、一庫ダムの不特定用水の補給は、既得農業用水に加えて、既得の水道用水（川西市、池田市、伊丹市、豊中市）の補給も行っており、水道用水は新規・既得含めおよそ45万人が一庫ダムの恩恵を受けている。特に、池田市・川西市・猪名川町は一庫ダムへの依存度が80%を超えており（図-3）、過去より渇水を少しでも軽減できるダム運用を行ってきたところである。

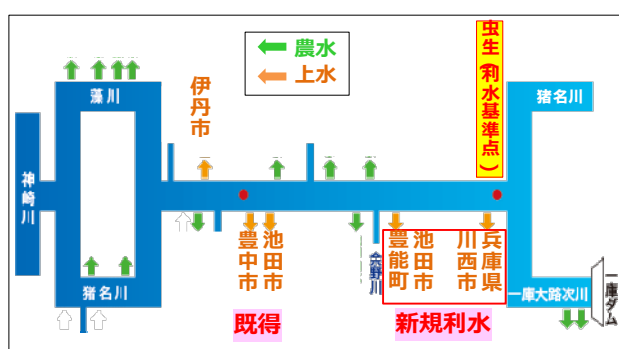


図-2 猪名川流域取水口位置図
(猪名川河川事務所HPより。一部加筆)

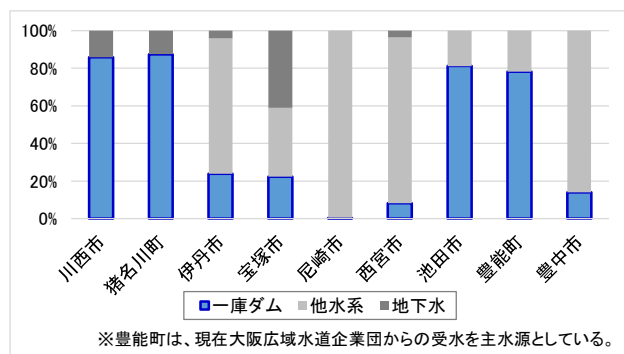


図-3 水道水源の一庫ダムの依存度（2016年）

		(m ³ /s)						
虫生地点確保流量 (直近下位水位流量)		2.795 (2.76)	3.125 (2.96)	4.419 (4.26)	3.972 (3.80)	3.244 (3.16)	2.795 (2.76)	
流水の正常な機能 の維持		1.100	1.430	2.724	2.277	1.549	1.100	
新規 利水	兵庫県...1.117 川西市...0.116 池田市...0.365 豊能町...0.097	1.695						
		4/1~	6/1~	6/21~	7/16~	8/16~	10/1~	

図-4 利水基準点（虫生）取水計画量（2020年度）

一庫ダムでは、上記の水利用に対し、下流の利水基準点（虫生地点）にて新規利水と機能維持を加えた水量（確保流量）を満足するよう補給を行う。なお、流水の正常な機能の維持のための確保量は、期別変化があり、新規利水の確保量は一定として合計した水量が確保量となる（図-4）。

新規利水の開発水量2.5 m³/sに対し、2020年度の取水計画量は1.695 m³/sであり、これに既得の農業用水等を加えた2.795 m³/sが取水制限前（2020年12月時点）の虫生地点の確保流量である。

(2) 利水基準点の確保量を満足させる操作

通常時の基本運用としては、ダム下流の利水基準点（虫生地点）の流量を24時間365日常時監視し、確保量を下回ったら補給量を増、上がったら補給量減という操作を行い、できるだけきめ細やかなダム操作を行っている。基準点の流量は、H-Qより決定されるため、1cm単位の水位変動により、操作を実施することとなる。

また、運用上の確保量は、H-Q式において、直近下位となる水位としている。これは、2002年渇水を受けて、ダム貯水量を少しでも温存できるように、全利水者及び河川管理者の了解を得て、2003年度より実施しているものである。

低水管理操作体制について、勤務時間内（平日）は主に低水管理当番職員が対応し、休日夜間はダム職員2名の当番制（管理職1，一般職員1）にて対応している。

3. 2020年渇水における一庫ダムの対応

冬季渇水は、夏季のように前線や台風による大雨が望めず、長期にわたり継続することが懸念されたことから、関係機関や利水者と緊密な情報共有を図るとともに、少しでも貯水量を温存させる方策を検討し、実行した。

(1) 関係機関、利水者との渇水調整

貯水率が40%（洪水期換算80%）を下回った11月29日以降、ダム所長より利水者幹部（水道事業管理者、部長級）に適宜情報提供を行った。その時点で、取水制限前に少しでも貯水量の温存を図るべく、水道事業者が自主節水の調整に乗りだしたものの、日程的に困難であり実施できなかった。

並行して、河川管理者より猪名川渇水調整協議会開催に向けた調整がなされた。事務局である猪名川河川事務所による水道事業者への聞き取りで、一部団体から貯水量温存のために第1次取水制限を制限率20%で開始して欲しいとの意見があったが、調整の結果、貯水率の低下に応じて段階的に強化していくことで10%制限から開始することとなった。

また、協議会にて20%制限の開始時期も明記されたが、その間に降雨があり貯水量の減少が緩やかになったため、事務局から取水制限20%の開始延期の意見聴取を行ったところ、今後の貯水位回復の見込みが立たないことから、貯水量の温存のために、当初予定通りに取水制限20%を開始するべきとの意見が多く寄せられ、延期の調整は実施しないこととなった。特に、一庫ダムの水道依存度が高い2市1町からは、少しでも長くダムの貯水量を温存して欲しいという切実な声が聞かれた。

(2) 取水制限の基礎となる水量の精査

取水制限を行うにあたり、水道用水（新規，既得）に関しては、各取水団体の11月1日～12月20日の最高取水実績（日）を採用し、2,484 m³/s（計画量との差△0.311 m³/s）を「基礎となる水量」と定め、その水量から10%及び20%の制限をかけている（図-5）。つまり、取水制限10%、20%時の取水制限前からの削減水量は、計画量

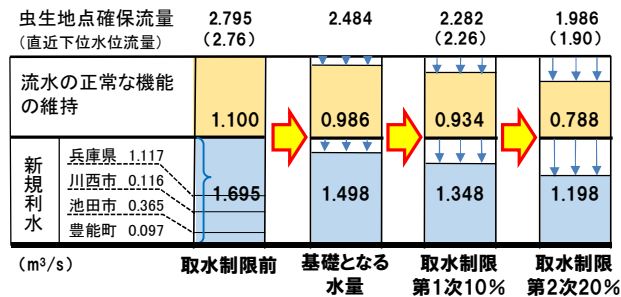


図-5 取水制限時の確保流量

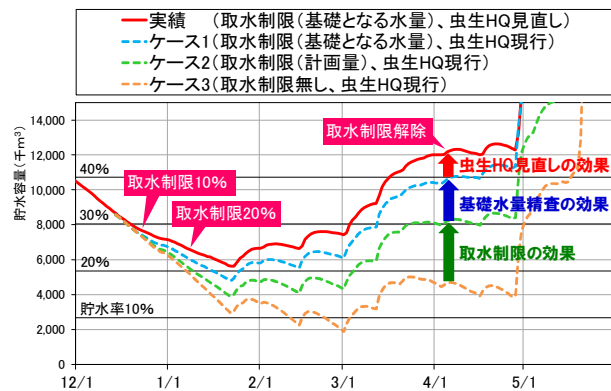


図-6 貯水量温存策の効果の試算結果 (2020年度)

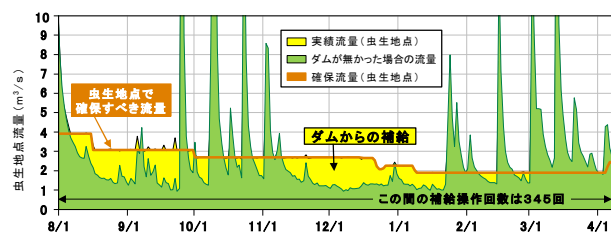


図-7 利水基準点の河川流量とダムからの補給状況

に対しそれぞれ18.4%、28.9%に達し、貯水量温存効果が格段に高まることとなった。本方式（図-6のケース1）と取水制限が計画量ベースで行われた場合の貯水量（同ケース2）を比較した結果、取水制限が解除された4月5日時点で2,381千m³（利水容量の8.9%）の温存効果があったと試算された。

(3) きめ細かな低水管理操作

利水基準点の確保水量を満足させるため、2020年8月から2021年4月5日の取水制限解除までの間に計345回（前年の1.7倍）の補給操作を行うなど、きめ細やかなダム操作に努めた。この間のダムからの補給日数は159日に及び、総補給量（図-7の黄色部分）は京セラドーム大阪12杯分に相当する14,356千m³に達した。

(4) 利水基準点（虫生地点）のH-Q式見直し

2020年11月中旬以降、同様の流況であった前年よりも利水補給が多く、貯水位の下がり方が急であったため、流域流況データを整理分析したところ、虫生地点のH-Qの誤差の可能性が考えられた。この状況を水位局を管理している河川管理者に速やかに伝えて協議を行い、年度途中ではあるが、12月15日にH-Q式の変更を行った。その結果、0.3 m³/s程度の補給量低減効果が認められ、その分ダム放流量が少なくなり、取水制限期間中の貯水量温存量（図-6の実績とケース1の差分）は1,564千m³（利水容量の5.8%）と試算された。

(5) 広報活動

取水制限の実施においては、市民生活に直ちに重大な影響が及ぶものではないことから、統一的な節水キャンペーンは実施せず、各取水者の判断により行うこととされた。一庫ダムでは、ダムの役割を理解していただく貴重な機会と捉え、積極的なツイッターへの投稿や、職員手作りのバーチャルダム見学のYouTube動画にダムの利水の役割と渇水情報を盛り込み、自治体やケーブルテレビ等に情報提供して拡散に努めた。また、今回の渇水の振り返り動画（図-8）は、情報の鮮度を重視し取水制限解除から2週間で作成し公開した。これらの動画は関係利水者や報道関係者からも「説明が分かりやすい」「メッセージ性のあるシナリオが良い」等大変好評であった。



図-8 渇水対応をとりまとめたYouTube動画 (QRコードは動画へのリンク)

4. 2020年渇水の反省と2021年渇水対応の改善点

2020年の冬季渇水は、一庫ダムでの久しぶりの渇水だったこともあり、慣れない渇水対応の中、できる限り先手を打って貯水量の温存につながるような対応をしてきた。渇水期間中、関係利水者への迅速な情報提供やきめ細やかな放流操作を行うことで、大きな問題なく渇水を乗り切ることができた。これらの取り組みが評価され、ダムファンの投票で選定される2021年ダムアワードの低水管理賞を受賞した。

一方で、取水制限前の利水者間の自主節水が実現に至らなかったことや、利水基準点のH-Q見直し調整に2週間を要しその間も過大な利水補給を行っていたこと等、事前準備が不足していた部分もあった。これらの反省を踏まえ、2021年度に改善した事項を以下に示す。

(1) 渇水対応タイムラインに基づく対応

2021年4月に、ダム貯水率の状況に応じて関係機関が行う行動計画（渇水への対策とその時期）を示した「淀川水系渇水対応タイムライン」が試行運用された。同タイムラインにおいて、一庫ダムの貯水率が80%（非洪水期40%）を下回った段階で自主節水を行っている状況と明記された（図-9）。2020年は貯水率40%（非洪水期）を下回ってから情報提供や水道事業者間調整が行われたが、タイムラインでは時機を逸していたことになる。

この反省を踏まえ、2021年も8月上旬及び10月下旬に貯水位が低下傾向にあったことから、タイムラインに則り早くから関係利水者に働きかけたことで調整が進み、それぞれ貯水率80%（10月は非洪水期のため40%）の段階で自主節水が実現した。

なお、2021年の渇水の経験を踏まえ、自主節水期の取り扱いについてより迅速かつ的確な対応を行うためにルール化が必要であるとの認識を関係機関と共有することができ、2022年3月に、猪名川流域の水道事業管理者と一庫ダム間で自主節水期の手続き等を明確化した「渇水対応タイムラインに係る自主節水期対応に関する覚書」を締結した。

非洪水期貯水率	洪水期貯水率	状況
▽40%	▽80%	渇水発生前
貯水率が低下傾向にあり、 水利用を自主的に制限している状況 ▽30%	▽60%	自主節水期
貯水率の低下が進行し、 段階的に水利用の制限を強化している状況 ▽10%	▽20%	渇水調整期

図-9 渇水対応タイムライン（一部抜粋）

(2) 利水基準点のH-Qに関する協議ルール整備

虫生地点での1cm単位の水位から補給量を算出するため、低水部分、特に2~5 m³/sのH-Q精度が非常に重要となるが、自然河床であるため、出水等により断面形状が変化しやすく、式と実況に乖離が生じることがある。H-Q式に疑義を感じた場合は、河川管理者と一庫ダムとで速やかに流量観測データを共有し精査するルールを2020年12月に整備した。2021年は8月上旬及び10月下旬の2回、現況と比較し補給量が多いと感じたため河川管理者と調整を図った結果、それぞれ2日で暫定H-Q式に見直すことができ、早期の無効放流回避につながった。

今回の自主節水実現及びH-Q見直しにより、貯水率30%に達する時期を3ヶ月弱延期する効果があったと試算された（図-10）。

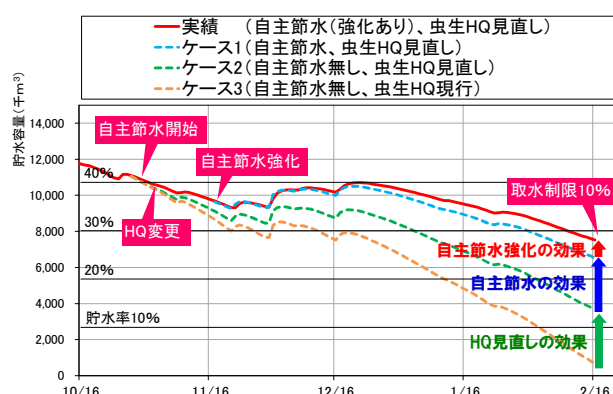


図-10 貯水量温存策の効果の試算結果（2021年度）

5. おわりに

一庫ダム管理開始以降初めて2年連続の冬季渇水となったが、少しでも貯水量を温存できるよう、早くから関係機関や利水者と緊密に連携しながら方策を実行してきた。2年目となる2021年度は前年の反省を生かし、また渇水対応タイムラインにより行動計画が示されたこともあり、より迅速に関係機関との調整を図ることができた。

近年、気候変動等の影響により、異常降雨や異常渇水といった極端現象の顕在化が懸念されている。相反する現象に対し、限りある洪水調節容量や利水容量を効率的に活用するために、関係者間の連携強化や地域が一体となった対応がますます重要となってくる。自主節水期対応に関する覚書は、まさに関係機関との危機意識が共有できた結果締結できたものである。猪名川水系の取水制限を伴う渇水は5年に1回程度であるため、経験した職員の異動により対応に困らないよう今回の渇水で得た知見をとりまとめきちんと引き継いでいくとともに、関係機関と日頃から良好な関係を構築することで、渇水に限らず早期の問題共有、対応が可能になると考える。

ダム管理におけるUAVを活用したDX推進の取り組みについて

具志堅 善郎¹・砂川 尚也²

¹沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理課 課長 (〒905-0019 沖縄県名護市大北3-19-8)

²沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理課 管理係員 (〒905-0019 沖縄県名護市大北3-19-8) .

福地ダムをはじめとする9つの国管理ダムは、沖縄本島内の水道用水の約8割を供給するとともに、風水害から地域を守る役割を担っている。ダムのような施設の維持管理においては、点検結果に基づく予防保全型の維持管理手法が有効であり、点検作業を安全かつ効率的に行うために、新技術の活用が期待されている。今回は、福地ダムの上流洪水吐きシュート部でUAVの自律飛行を行い、撮影したデータの画像診断を行うことで、コンクリートの劣化・損傷等の状況を把握することとした。本調査の結果から、UAVを用いた手法が従来のロープアクセスによる目視点検の代替えとなるか、また、他ダムへの適用の可能性について検討結果を報告する。

キーワード 劣化調査, 定期点検, UAV, 画像診断

1. ダム管理におけるDX推進の背景

ダムの施設管理では、定期的な点検によって積み上げられたデータに基づく診断結果から、予防保全型の維持管理を行うことが有効とされている。

従来、高所のコンクリート構造物の劣化点検は、調査技術者がロープアクセスによって目視で変状を確認しているが、長年の知識と熟練した技術が必要であること、点検範囲が広く足場の悪い高所作業が多く危険が伴うことなどが課題として挙げられていた。

そのため、DXによるインフラメンテナンスの安全化・効率化が求められているなか、ダムの維持管理においても短時間で安全に広範囲の調査・解析が行える手法への転換が望まれており、当事務所でも自律飛行型のUAV（ドローン）を用いて撮影した画像からコンクリートの劣化状況調査を実施し、今後の実用性について検証を行った。

た。沖縄県には9つの国管理ダムがあり、島内で利用される水の8割を供給している。その中でも福地ダムは昭和49年12月から管理を開始している県内最大のダムであり、全国で唯一、貯水池の上流端からも洪水を直接海へ放流できる構造の洪水吐きを備えている。(図-1)



図-1 福地ダム上流洪水吐き

2. 調査概要

(1) 調査対象

本調査は福地ダムの上流洪水吐きシュート部にて行っ

(2) GNSSの受信精度とUAV自律航法の選定

現在、UAVの自律航法はUAVに搭載したセンサーでGNSS測位情報を受信して利用する技術が広く普及している。

しかし、高さのある構造物付近では電波回折によって、複数の電波を受信してしまうマルチパスの影響が大きくなり、測位精度が低くなるとされている。福地ダム上流洪水吐きにおいてもUAV本体が受信したGNSS測位情報を確認したところ、想定ルートから大きく外れる結果となっていた。

そのため、本調査ではプリズム自動追尾式のトータルステーションを用いた自律航法を活用することとした。

この航法はプリズムを装着したUAVの飛行位置をトータルステーションで自動計測し、その測定結果をUAVにフィードバックすることで、事前設定した飛行ルートからのズレを修正しながら飛行する。

事前に設定した飛行位置からほぼ誤差なく計測できるため、対象物への正対撮影と隔離距離を一定に保持したままの連続撮影が可能であり、写真合成時の歪みも小くなるためより適正な評価を行える。(図-2)

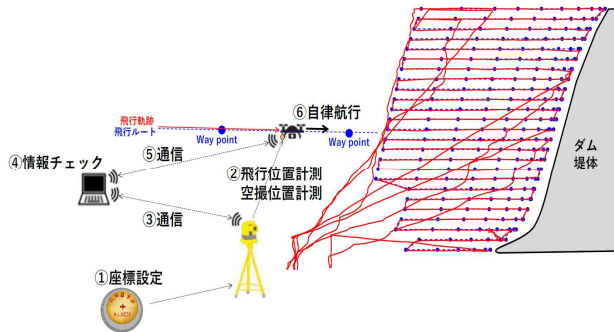


図-2 トータルステーション用いたUAV自律航法のイメージ

(3) 使用機材及び飛行・撮影条件

使用したUAV及び主要な機材を示す。(表-1)

作業地点(UAV離発着地点)は、洪水吐きの上流側と下流側の2箇所とし、それぞれの作業地点から目視可能範囲を飛行した。(表-2)

また、シュート部下流側の飛行ルートとUAVの空撮状況について示す。(表-3)(図-3)

表-1 使用した主な機材

機材	機材詳細	使用用途
UAV (ドローン)	イームズロボティクス社 E-6106FLMP (113.9×106.0×55.0)	PCから位置情報データを取得しながら空撮
撮影用カメラ・レンズ	SONY α7 (有効画素数 6,000万画素)、短焦点レンズ (50、35、16mm)	検査対象の構造物を撮影
トータルステーション	TOPCON GT-1005 (自動追尾式、光波有効到達距離300m)	UAVの位置情報、空撮位置を計測
プリズム	LeicaGeosystems GRZ101	UAV本体に取り付け、トータルステーションからの通信を反射
PC		フライトコントロール、画像データ再生
風速計		飛行判断



表-2 飛行・撮影条件

【飛行条件】	
○飛行範囲	トータルステーションの追従範囲内: 約150m
○設定高度	離陸地点から+高度飛行時: 150m (航空法による) 離陸地点から-高度飛行時: 約-30m
○飛行速度	4m/sec以下 (撮影ラップ率との関係による)
○飛行可能風力	最大3m/sec (メーカー基準は10m/sだが安全を考慮)
【撮影条件】	
・ 作成した飛行ルートを自律航行させ、空撮作業を実施	
・ 撮影距離は7m以下とし、0.5mm以上のクラック幅を検出できるように、目標解像度を1mm/pixelとする。	
・ オーバーラップ率60%・サイドラップ率60%とする	
・ 撮影解像度はカメラの有効画素数とする	
・ オートフォーカス・シャッタースピード・ISO値、ズーム等のカメラ設定は、当日の天候等を考慮し、画質を確認しながら現地で調整する	
・ 空撮位置座標の記録を行う	

表-3 UAVの航行ルート (抜粋: 下流側)

撮影箇所	点名	経度	緯度	高度 (m)	撮影方向
シュート部	①	26.636506	128.239971	11	斜め
	②	26.636777	128.239058	84	
	③	26.636797	128.239069	84	垂直
	④	26.636528	128.239980	11	
	⑤	26.636550	128.239988	11	斜め
	⑥	26.636817	128.239080	84	

※高度は離着陸位置を基準に算出

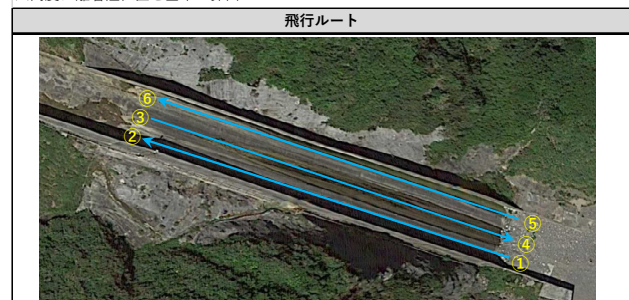


図-3 UAV空撮状況

(4) 空撮画像の解析方法

(表-2) の条件で撮影した画像をもとに、真上から見た傾きのない画像となるようにオルソ変換してつなぎ合わせ、正確な位置や実寸の大きさを計測する。

また、撮影画像から各構造物のひび割れ・漏水・遊離石灰・剥離剥落・植生等の変状を抽出し、点検調書を作成する。

3. 調査結果

(1) オルソ画像の作成

(表-2) の条件で撮影した連続画像をもとに、シュート部床板・左岸導流壁・右岸導流壁におけるオルソ画像から、各変状のサイズ測定を行った。

シュート部床板のオルソ画像を抜粋し示す。(図-4)



図-4 作成したオルソ画像 (抜粋：シュート部床板)


(2) 点検調書の作成

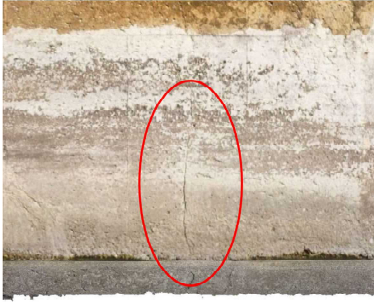
床板・左岸導流壁・右岸導流壁における、打設目地ごとの変状状況を記載した点検調書を作成した。

(図-5)

本調査においても問題なくコンクリートの劣化状況が把握できた。

また、0.5mm幅のクラックも抽出できたことから、従来のロープアクセス点検と比較しても同等な精度であることがわかった。

写真番号	1	径間番号	11	損傷の範囲・面積
損傷の種類	クラック	撮影年月日	令和3年12月14日	クラック幅: 1.0mm~2.0mm 長さ:0.97m 損傷進行あり
				

写真番号	2	径間番号	4	損傷の範囲・面積
損傷の種類	クラック	撮影年月日	令和3年11月16日	クラック幅: 0.5mm~1.0mm 長さ:0.59m 新規損傷
				

写真番号	1	径間番号	6	損傷の範囲・面積
損傷の種類	遊離石灰	撮影年月日	令和3年12月14日	面積:0.26㎡ 損傷進行なし
				

図-5 作成した点検調書 (抜粋)

4. ロープアクセス点検との比較

従来手法であるロープアクセスでの目視点検とUAVを用いた点検について、比較（作業期間・コスト・安全性等）を行った。（表4）

作業期間は、ロープアクセスでの目視点検と比べ、UAVを用いた点検のほうが3日間短縮することができた。高所作業が必要ないことから、安全性は格段に向上しており、コストの比較においてもUAVを用いた手法のほうが、約150万円のコストを削減することができる。

表4 ロープアクセス点検との比較表

	ロープアクセス点検	UAVを用いた点検
準備期間	10日（クライミング計画、調査図作成）	2日（飛行ルート設定、現地位置出し）
現地作業期間	6日	1日
データ整理期間	10日（データ整理、図化）	20日（画像処理、変状抽出）
安全性	低い	高い
コスト	約900万	約750万
特徴	特殊作業員の確保を要する。	点検の実施は天候（風）に左右される。

5. 課題

(1) 強風下でのUAVの運用について

UAVの飛行は風の影響を受けやすく、実際に本調査でも強風のために作業を延期することがあった。

災害等で緊急の点検が必要となった場合、天候の回復を待つことなく強風下でも迅速な状況把握が求められる。そこで現在開発が進められている全天候型のUAVを活用することで解決できる可能性がある。

（表5）

表5 全天候型UAVの一例

項目	内容
重量	10kg（バッテリー、プロペラ含む）
機体寸法	110×110×60cm
搭載重量	9kg
最大飛行速度	40km/h程度
最大飛行時間	20分程度（搭載物なし）
飛行可能風速	17～18km/s程度（現場実証にて確認）
飛行可能高度	2,500m程度
飛行制御システム	IMU/GNSSにより自律飛行が可能

全天候型UAVは風速20m/s以下の安定した飛行が可能で防水防塵への対応も目指されているため、悪天候条件下での運用についても今後検討していきたい。

(2) AIによる変状箇所の自動検出について

本調査の画像解析における変状箇所の検出は技術者の目視によって行われたが、変状箇所の検出手法としては、より省人化・短期間化が可能となるAIを用いた自動抽出手法が取り入れられ始めている。

AIを用いた維持管理では、ダムの変状を撮影した画像から変状を検出するAIモデルを構築し、そのモデルによって定期的に撮影した画像から健全度を評価することが想定されるため、今後は適切に画像を撮影する技術と、画像から変状を精度よく検出する技術を確立していくことが求められる。

6. まとめ

本調査ではトータルステーションを用いたUAVの自律航法により、非GNSS環境下でもUAVを用いた点検が可能であり、コンクリートの劣化等の点検手法として有効であるとの結果が得られた。また、ロープアクセス点検と比べて、作業期間の短縮や安全性の確保、コストの低減などのメリットがあり、精度についても0.5mmの変状検出が可能ということが確認できた。

そのため、他ダムで実施しているロープアクセスでの目視点検についても、今後はUAVを用いた点検へと切り替えていきたいと考えている。また、小型船舶から目視で行っている水質や斜面の異常に関する貯水池巡視点検についても、同様に転換が期待できる。

UAVの自律航行を用いた点検手法は、効率的且つ均質な画像データを継続的に取得することが可能であり、ダム管理においてはこのデータを用いて適時適切な判断が行えるよう、データベース化等のDX推進も今後は併せて行っていきたい。

参考文献

- 1) 石井明,天方匡純,菅原宏明,藤井純一郎,小篠耕平（八千代エンジニアリング株式会社）：ダム堤体画像データ取得の再現性向上を目指した UAV の自律飛行,第 20 回建設コンサルタント業務研究発表会(2020)
- 2) 国土交通省 近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター：UAV の自律飛行による砂防関係施設の自動巡視・点検に関する手引き(2021)
- 3) 水管理・国土保全局 革新的河川管理プロジェクト（第1弾）全天候型ドローン
https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/innovative_project/project1.html
- 4) 吉田龍人, 藤井純一郎, 大久保順一, 天方匡純（八千代エンジニアリング株式会社）：画像特性の変化に頑健な護岸のひび割れ検出モデル作成方法の検討(2021)

地すべり対策事業におけるCIMモデルの活用について

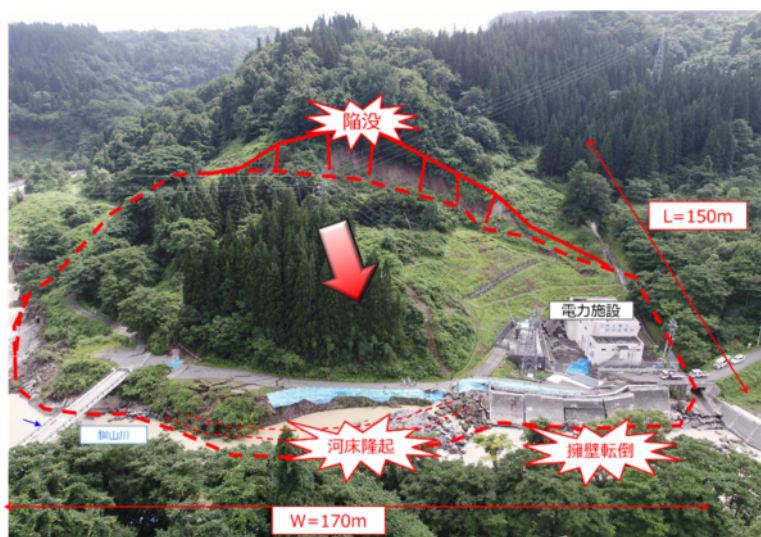
山形県最上総合支庁建設部河川砂防課

主査 東海林 藤一郎

1 はじめに

令和2年7月、山形県最上郡大蔵村において、大雨の影響により複数箇所地すべりが発生した。このうち、柳淵地区で発生した地すべりは、銅山川沿いの斜面が長さ100m・幅170mに渡り崩壊し、村道や電力施設に被害が生じた。更に崩壊が進めば、銅山川に土砂ダムが形成され、ダムが決壊した場合は下流域へ甚大な被害を及ぼすことから、山形県が災害関連緊急地すべり対策事業にて対策を進めることとなった。

当該地すべりにおいて、「発災直後の地すべり全体像を迅速に把握すること」及び「複雑な地形へ最適な恒久対策工を設計すること」を目的として、CIMモデルを活用することとなった。



2 業務の目的・成果

2.1 発災直後のCIMモデル活用

発災直後のCIMモデルは、緊急時の対応を検討するために迅速性を優先し作成されるものであり、短期間で現地を図化できるという特徴がある。柳淵地すべりでは本モデルを、TEC-FORCEとして土木研究所が現地調査を行う場面で役立った。土木研究所は、UAV空中写真撮影データより作成したCIMモデルを「バーチャル現場」として事前分析を行い、

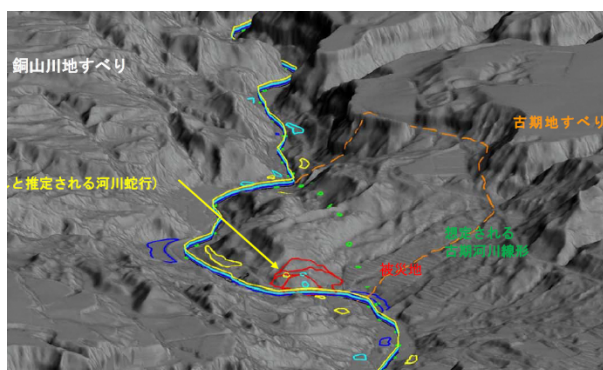
当日に現地で確認する事項を絞っておくことで、調査をスムーズに進行することができた（写真-1）。



(写真-1)

また、本モデルを用い作成した図面と、既存の被災前 LP データから作成した図面を比較することで、地すべりによる地形の変化（沈下、隆起）を把握することができた。

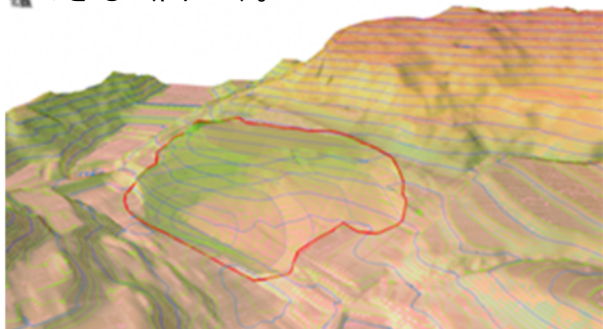
柳淵地区は、大規模な地すべり地形（図-1）を有していたことから、今回発生した地すべりに効果的な盛土・排土などの応急対策であっても、背後地すべりの活動を助長してしまう場合があったが、上記により、地すべり全体像を正しく把握することができ、適切な応急対策工を選定することができた。



(図-1)

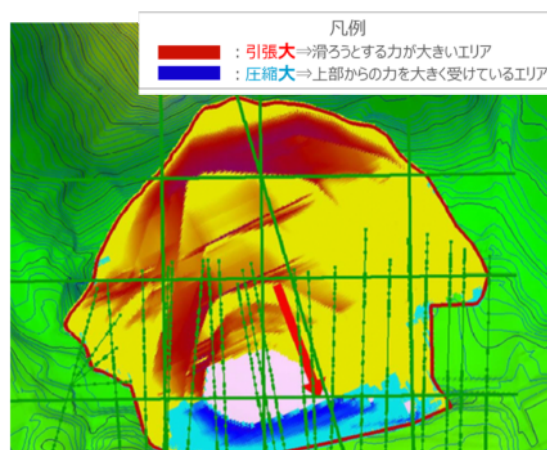
2. 2 恒久対策工設計時の活用

発災直後のモデルに、測量による地形情報や現地調査による地質等情報を付与することで、地すべり機構解析の C I M モデルが出来上がる。本モデルでは、地質構造や地下水の分布を 3 次元化することで視覚的にわかりやすく表現することができる（図-2）。



(図-2)

また、斜面の安定解析においては、断面単位で行う 2 次元解析に対し、地すべりブロック全体に作用する力の方向や大きさがわかりやすく表現することができる（図-3）。

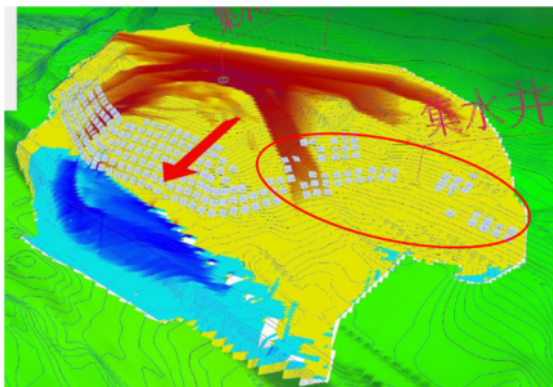


(図-3)

機構解析モデルに地すべり対策工の情報を付与することで、地すべり防止施設設計の C I M モデルが出来上がる。本モデルにより、すべり面や地下水、対策工の位置関係や、対策施設同士の干渉状況が把握できる。柳淵地すべりでは、次の 2 つの時点で活用された。

1 つ目は抑止工の設計時である。通常の 2 次元解析では、主側線において安定解析を行い、必要となる対策工を決定し、決定した対策を地すべりの全

断面に配置することとなる。しかし、柳淵は、主側線に対し左右非対称の地形のため、地すべりの厚さが薄いエリアにも同様の配置を行うこととなってしまう、過大な計画となる。それに対し、3次元解析では、地すべりブロックに対して必要な抑止力を算出し、各位置の力の大きさや方向を考慮した、より効果的な配置計画を立てることができる。図-4に、主側線部に対し側部の抑止工を減らした今回の配置計画を示す。柳淵地すべりでは、抑止工としてアンカー工を選定しているが、3次元解析によって算出したアンカー工の必要本数は、2次元と比較し35%減らすことができた。



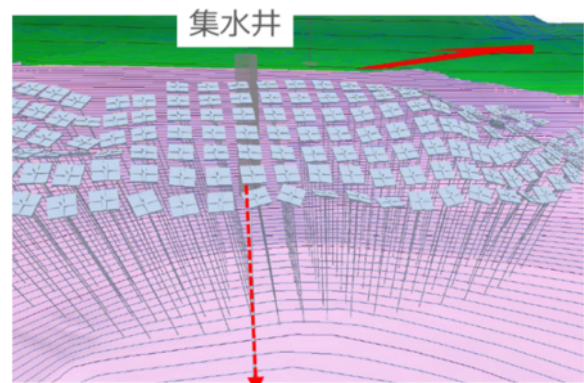
(図-4)

2つ目は施設の干渉状況の確認である。対策工としてアンカー工のほかに集水井工を計画したが、井戸から川への排水ボーリングの配置を検討する際、集水井と河川の高低差や東北電力の施設、対策予定のアンカー工と近接するなど、多くの制約があり、結果として、アンカー工を密に配置する予定のエリア(図-5)に配置せざるを得なくなった。平面・断面図のみで検討すると、アンカー工との干渉を避けられないと判断してしまうが、3次元モデルによ

って干渉状況を確認することができたため、配置計画を立てることができた(図-6)。



(図-5)



(図-6)

2. 3 工事施工時の活用

地形から施設配置まで3次元モデルを作成したことにより、設計時だけでなく工事施工時にも活用することができた。活用場面としては、施設配置における干渉状況の再検証である。

設計上は、各施設の配置は座標で管理されており、問題の無い配置計画であっても、現場条件等により設置位置が変われば、干渉する可能性が出てくる。しかし、設置完了後の座標をモデルに反映し、確認することで変更後の位置でも干渉を回避することが可能となる。

今回の現場において、アンカー工と集水井工の排水ボーリングの干渉状況の再検証が事例として挙げられる。表土によ

る不可視部分に巨礫が複数存在したことなどを理由に、アンカー工施工位置を修正した。また、排水ボーリングも地中の状況によって、掘り進める方向に若干のズレが生じるため、計画通りの位置に設置するのは困難であった。施工順序としては、集水井工排水ボーリングが先になるため、排水ボーリングの設置後の起点・終点の座標をモデルに反映し、アンカー工の施工位置を再検証することで干渉を回避することができた。

3. まとめ

今回の事業に携わり、地すべり対策事業にCIMモデルを活用することのメリットを多く感じることができた。特に、今回の事例となる柳淵地すべりのように規模が大きく、複数ブロックで構成される複雑な地形を有する地すべりでは、コストを大きく縮減することができた。また、アンカー工のように、地中を掘り進める工事を実施する場合は、設計時のみではなく、施工時も随時干渉状況を確認することができるため、安心して工事を進められるという点でメリットは大きい。

現状のデメリットとしては、通常の2次元での設計と比較して、調査・解析に多くの費用と時間を要することである。単一のブロックで形成される地すべりや、小規模な地すべりでは、工事のコスト縮減が期待できないことから、全体事業費としては増える可能性が高い。

今後多くの現場でCIMモデルが活用され、3次元化にかかる費用や時間が縮減することにより、デメリットの面が解消されることを期待したい。