

中小河川を対象とした洪水予測システムの開発

伊藤弘之¹・菊森佳幹¹・望月貴文¹・柿沼大貴¹・中村要介¹

¹国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM)

(〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)

中小河川においては水位計の不足に加え、豪雨による水位上昇速度が大きいいため、避難が遅れる危険性が高い。このため、本研究開発では、近年整備が進んだ危機管理型水位計等のリアルタイム水位データを活用し、リードタイムを延伸するための水位予測技術の検討と、これを全国に速やかに普及するためのツールの開発を行っている。これまでに、流出・氾濫解析モデル (RRI) への粒子フィルターの適用、流量から水位への変換方法検討を行い、モデル河川での精度検証等を行った。さらに明らかとなった課題に対して、RRIモデルパラメータの最適化手法等の検討やユーザ・インターフェイスの整備を行うとともに、試験配信による現地実証実験等を進めている。

キーワード 水位予測, 中小河川, リードタイム, 安価・簡便, RRIモデル, 粒子フィルター法

1. はじめに

近年毎年のように大規模な洪水災害が発生しており、高齢者等を中心とした人的災害が発生している。特に、中小河川や中山間地においては水位計の不足に加え、豪雨による水位上昇速度が大きいため、避難が遅れる危険性が高い。このため、国土交通省の主導のもと洪水時の水位観測に特化し、機器の小型化や通信機器等のコストを低減した「危機管理型水位計」の設置が進められ、洪水の危険性把握ができる河川が飛躍的に増加したところである。中小河川流域においては豪雨の降り始めからの洪水到達時間が短い場合が多く(図-1参照)、安全な避難を確保するためには、少しでも先の水位状況を予測し意思決定や行動の前倒しを支援することが重要である。

現在一級水系においては、リスクラインの整備が進められているが、都道府県等が管理する二級河川は、一級水系よりもはるかに数が多く、リスクラインと同じ方法で水位の監視や予測を行うことは困難と考えられる。このため、本研究開発では、中小河川での避難行動のトリガー情報となるよう、水位上昇と氾濫の恐れがある水位の超過を2時間以上前に予測することに特化するとともに、中小河川に対応し、速やかに普及が可能な安価で汎用型の水位予測モデルを開発するものとする。

2. 技術開発項目

(1) 流出解析モデルの選定

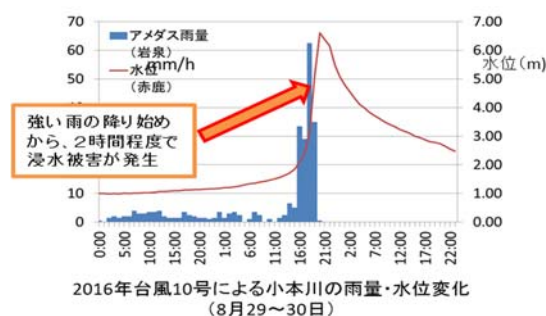


図-1 中小河川における急激な水位上昇

降雨条件から河川流量を計算するためには、流出解析モデルが必要となる。流出解析モデルには土研モデル(分布タンク型モデル)他多くのモデルが開発されている。本研究では、リアルタイムで配信されるレーダ雨量

計データや気象庁短時間降雨予報等より得られる時空間

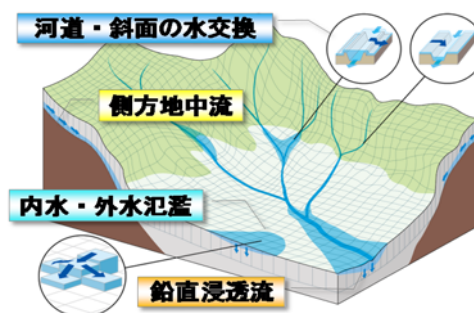


図-2 RRIモデルの概要

分布を反映できること、無料で利用が可能なこと、実流域への適用を支援するユーザ・インターフェイス等があることや調整すべきパラメータの数が少ないこと等、安価・簡便な点や、既往研究が多く信頼性が高いことに着目し、RRIモデル¹⁾を採用した。

(2) 河道水位計算方法の検討

流出解析では、降雨から流量が計算されるが、これを河川氾濫の危険性に直結する水位情報に換算する必要がある。一級河川のように主だった出水時に流量観測が行われH-Q式がされ、測量により河道データが充実している河川では、H-Q式を使用、もしくは不等流計算等を行い、流量から河道水位を算定することができるが、中小河川では河川測量や流量観測が行われていない場合が多く、H-Q式の利用や不等流計算モデルの構築は一般に困難である。このため、水位観測地点の断面データから等流を仮定したH-Q式を算出し、過去の洪水等からH-Q式を推定することとした。

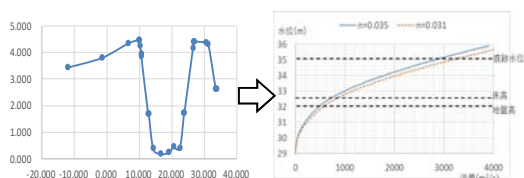


図-3 河道断面からのH-Q関係式の導出

(3) 水位観測データを使用したデータ同化の検討

本方式では平常時から洪水時までの河川水位の連続計算想定しているが、計算を長期間続けていると計算値と観測値の乖離が大きくなり、水位予測精度の低下が懸念される。このため、水位観測データを水位計算に逐次反映し、観測値に対する追従性を確保するための同化方法を適用することとした。水位観測データを同化（観測水位により水位予測モデルを逐次修正）する方法としては、非線形の水位予測モデルの（流量等の状態量やパラメータへの適用が可能であり、応用性の高い粒子フィルター法²⁾を選定した。RRIモデルの河道粗度係数、透水係数、

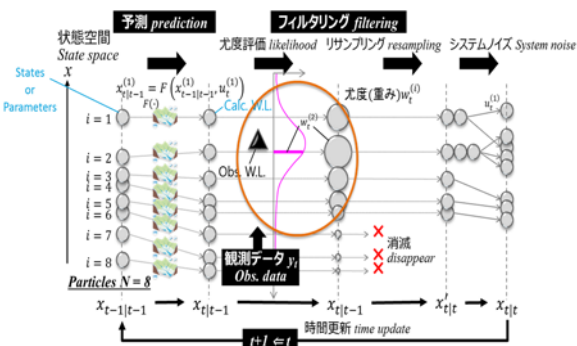


図-4 粒子フィルター法の基本原理

不透水層から水深にそれぞれ適用したところ、不透水層からの水深に対して適用するのが効果的と評価された。

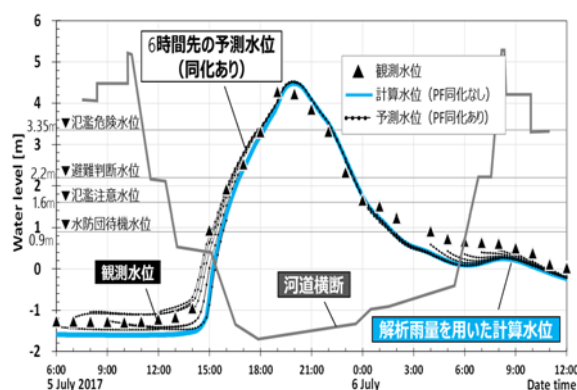


図-5 粒子フィルターの作用

(4) 水位予測精度の評価

(1)から(3)の方法を組み合わせて、水位予測モデルを構築し、モデル河川の過去洪水に適用することにより、その精度を評価した。流出解析モデルの構築に当たっては、山崎等³⁾により開発された日本域流表面流向マップ（図-6参照）を使用した。これはもので、通常のDEMから地形勾配で得られるものよりも、正確かつ詳細な河道ネットワークを表現することが確認されている。また、降雨データについては30分毎に配信される気象庁解析雨量

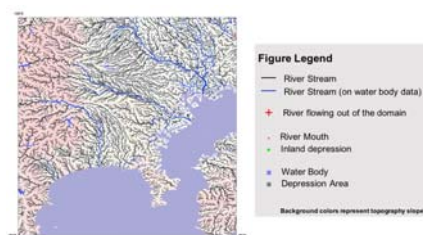


図-6 日本域流表面流向マップによる河道網

量及び降水短時間予報（6時間先まで）を使用した。

全国から10のモデル河川を選定し、過去の洪水イベントを対象とした水位予測結果の一覧を表-1に示す。概ね2時間以上のリードタイム（河川水位が氾濫危険水位を超過することを何時間前に予測できたか）が得られた一方で、特に、以下のような課題も明らかとなった。

a)気象庁解析雨量では、更新時間間隔が30分間であるため、突然の豪雨が発生しても30分間程度は予測計算に反映できないことがある。

b)洪水時の河川水位を計算するためには、H-Q式が必要となるが、洪水時の河床変動が顕在化する河川では、あ

表-1 モデル河川における評価結果

河川	洪水イベント	リードタイム
A川 (東北)	2016年8月台風第10号	5時間
B川 (九州)	2012年7月3、14日九州北部豪雨, 2017年7月九州北部豪雨	20分、1時間、2時間
C川 (東北)	2016年8月台風第7号・第10号	2時間、3時間50分
D川 (近畿)	2013年9月台風第18号	2時間30分
E川 (九州)	2016年9月台風第16号, 2017年9月台風22号	3時間、1時間
F川 (近畿)	2018年7月西日本豪雨	1時間
G川 (近畿)	2018年7月西日本豪雨	2時間
H川 (中国)	2013年7月山口・島根豪雨	3時間
I川 (四国)	2018年7月西日本豪雨	1時間
J川 (九州)	2012年7月13日、14日九州北部豪雨	2時間、5時間

らかじめ設定した水位・流量の関係が洪水中に変化し、水位を正しく算定できない他、河床掘削等による河道断面変化等により、H-Q式の精度が低下する場合がある。
c)水位上昇時における流出解析モデルの精度不足の原因として、RRIモデルのパラメータ調整が不十分であることが考えられた。

3. 課題と検討状況

(1) 豪雨等捕捉のための雨量データの組み合わせ方法

2.(4a)については、解析雨量、降水短時間予報に加え、更新時間間隔が10分間の速報版解析雨量、速報版予測降雨及び更新時間間隔が1分間のXrainのデータの組み合わせ方法について検討している。速報版解析雨量は2017年7月から、速報版降水短時間予報は2018年3月から配信されているためデータの蓄積が少ないが、豪雨イベントに着目し精度等データの特徴を把握した上で、使用方法について検討する。一事例として解析雨量と速報版解析雨量の同一流域におけるデータを比較したものを、図-7に示す。この事例においては、流域平均雨量、ピーク時の空間分布とも解析雨量と速報版解析雨量で同程度の精度があるように見られる。一方で、急激な降り始め等の捕捉能力は確認されていない。

なお、時間解像度の降雨データを使用することは、予測計算回数の増加や1回の予測計算時間の短縮が必要となるため、予測精度の向上と計算機資源等との兼ね合いの検討も必要となる。

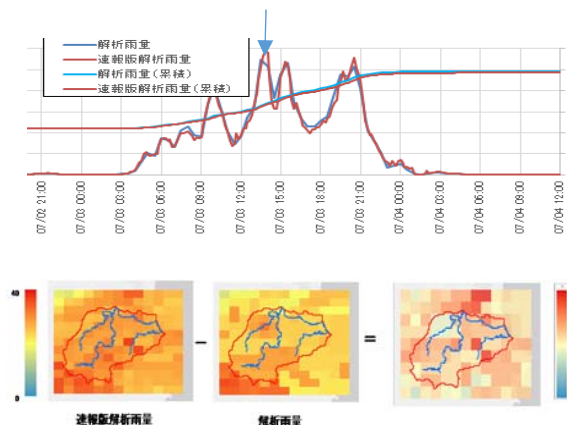


図-7 速報版解析雨量と解析雨量の比較
流域平均雨量(上)と雨量ピーク時の空間分布(下)

(2) 河床変動等への対応

2.(4b)の洪水中の河床変動については、河床高を粒子

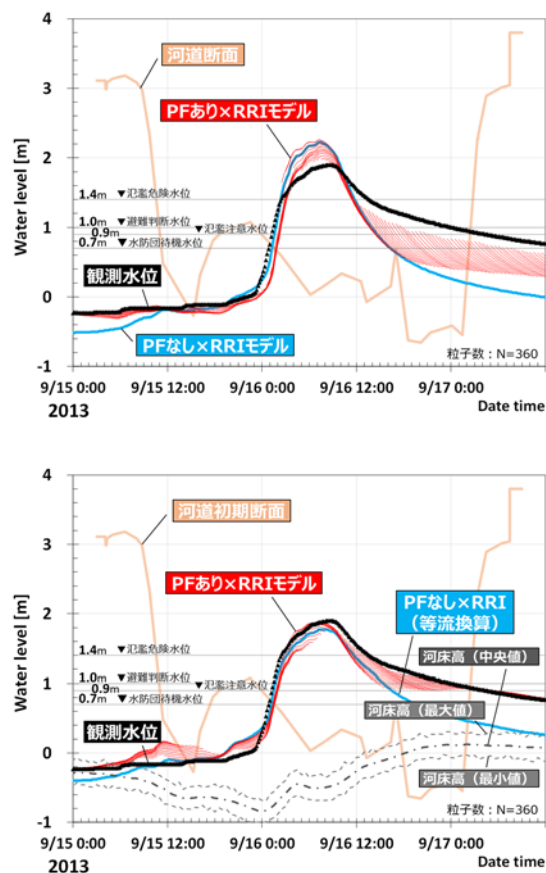


図-8 ピークの過大評価、下降時の乖離(上)
ピークから下降時の改善(下)

フィルターによって逐次推定する方法や簡易な河床変動モデルの適用について検討している。一例として、粒子フィルターの状態変数に河床高を導入することにより、H-Q式を逐次推定することが可能となり、結果として観測水位への追従性が高くなった(図-8参照)。一方で、この方法は粒子数が増加することにより計算負荷が増加するほか、他の河川への適用性等については検証が十分でないため、さらに事例を追加し検討を行う。

(3) RRIモデルのパラメータ最適化手法の検討

2.(4)c)については、モデル作成の担当者がRRIモデルの設定したパラメータ毎にその計算結果と観測値を比較し、把握等試行錯誤を繰り返しながらパラメータを調整するのが通常である。この方法では、担当者に一定の知見や技能を要することから、多数の河川への適用は困難と考えられる。このため、客観的かつ効率的なパラメータ調整が期待できる最適化アルゴリズムの適用について検討する。

ここでは、KIM等⁴⁾の作成したSCE-UA法を使用し、H-Q式による誤差の影響が含まれないダム流入量のデータを使用して、試行的に計算を行った結果を図-9に示す。SCE-UA法は、遺伝的アルゴリズムに類似した競争進化、集団混合の概念を組み合わせた最適化手法であり、複数のパラメータ候補をグループに分けて各グループ内での最適化と、結果に応じた新しいグループの分け直しを繰り返して最適パラメータを探す手法である。

本研究開発の趣旨である住民避難に資するという観点からは、避難氾濫水位に到達するまでの洪水の立ち上がりを精度よく再現することが重要である。本事例では、最適化期間を全期間(ケースB)から洪水の立ち上がり限定した期間(ケースC)に変えた結果、洪水のピークに到達する時間がより改善されることが確認された。今後は、目的関数の設定や予測降雨入力時の精度評価等、本水位予測システムの目的に応じた検討を行う

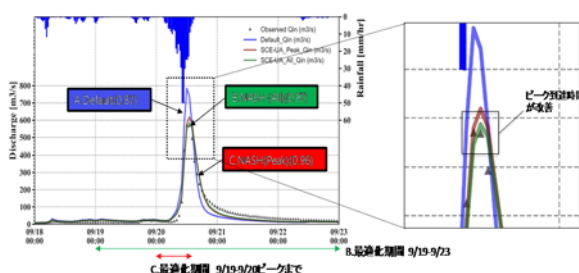


図-9 SCE-UA法の適用事例(2016年9月、Mダム流入量、目的関数：Nash-Sutcliffe(NS)係数)

〔最適化パラメータ〕 ①②河道・斜面の粗度係数、③土層厚、④飽和空隙率、⑤不飽和空隙率、⑥飽和透水係数

(4) 水位予測モデル構築支援ツールの整備

全国の中小河川への水位予測モデルの適用を支援する

ために、簡便・効率的に水位予測モデルを作成するためのグラフィック・ユーザ・インターフェイス(GUI)を試作した(図-10参照)。このGUIは、日本域表面流向マップからの流出解析モデルの作成、降雨データ(解析雨量バイナリーファイル)のフォーマット変換、河道断面座標からのH-Q式の作成、精度検証結果の表示等の一連の機能を有している。今後当該GUIを使用した水位予測モデルの試作や検証等を行うとともに、ユーザビリティの観点からの改良を行うこととしている。

(5) 自動演算システムの検討

予測手法の検討と併せて、東京大学のデータ統合・解析システムDIAS上に自動演算・配信システムを構築・稼働させることにより、予測計算結果を対象5河川の河川管理者にリアルタイムで試験配信している。これにより、出水時の計算負荷の増加に対するシステムの機能変化、水位予測手法の評価、現場での水位予測情報の利用状況等を踏まえて、当該研究開発にフィードバックすることとしている。

4. おわりに

当該研究開発は、従前の水位予測技術に対して、速やかな普及のための安価・簡便を開発目的に加えたもので

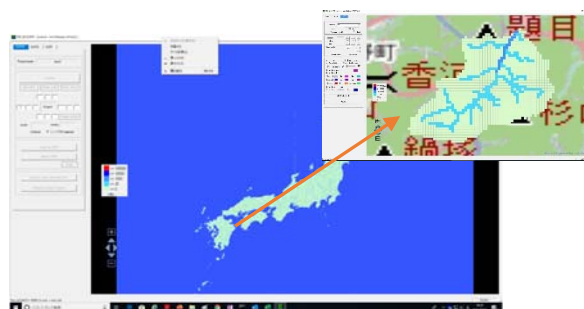


図-10 GUI機能の一例(全国の河川について地形・流向・土地利用データを有する流域モデルの自動作成が可能)

あり、その開発状況について述べた。従来技術を適切に組み合わせることにより、危機管理としての実用性と安価・簡便性の両立を目指している。

謝辞：本研究開発では東京大学池内幸司教授に適切な御指導を頂いている。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 佐山敬洋・岩見洋一：降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用, 土木技術資料56-6(2014)
- 2) 中村要介・小池俊雄・阿部紫織・中村和幸・佐山敬洋・池内幸司：粒子フィルタを適用したRRIモデルによる河川水位予測技術の開発, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.5, I_1381-I_1386, 2018.
- 3) 山崎大, 富樫研佳, 竹島滉, 佐山敬洋 (2018) 日本全域高解像度の

表面流向データ整備, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75 巻 5 号,
I_163-I_168

4)Yeon-su KIM, Yasuto TACHIKAWA, Sunmin KIM, Michiharu SHIIBA,
Kazuaki YOROZU, Seong Jin NOH :Short term prediction of water level

and discharge using a 2d dynamic wave model with particle filters, Journal
of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.
68, No. 4, I_25-I_30, 2012.

大垂壁付き伝統木造軸組架構の 静的加力実験と崩壊形推定式の提案

大村 早紀¹・杉野 未奈²・林 康裕²

¹建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

²京都大学大学院工学研究科 建築学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂) .

本研究は、建物の構造的な観点から、伝統木造建物の耐震安全性を評価・向上し、地震に対する人命保護および文化財保全を目指す。本論文では、伝統木造建物における大垂壁付き架構の静的加力実験を実施するとともに、実験結果に基づく架構の崩壊形推定式を提案した。本論文の研究成果は、伝統木造建物の変形性能向上のための耐震対策を検討可能とし、地震による建物の倒壊防止に大きく寄与するものである。

キーワード 伝統木造建物、倒壊、静的加力実験、耐震性能評価

1. はじめに

近年、1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震などによって、木造住宅の倒壊などの甚大な被害が報告されており、耐震補強を促進する動きが高まっている。一方、我が国には伝統木造建物が多数存在し、現在でも人々の生活の場とされているのみならず、文化的価値を有する街並みを形成している。このような伝統木造建物は力学的特性が未解明な部分も多く、合理的かつ実用的な耐震性能評価法・耐震補強法の構築が急務となっている。

伝統木造建物において、柱とせいの高い垂壁および差鴨居で構成される「大垂壁」を有する架構の存在が確認されている。既存建物における大垂壁付き架構の写真を図-1に、大垂壁付き架構を含む構造例を図-2に示す。このような大垂壁付き架構に着目した先行研究はなく、破壊メカニズムなどの力学的特性も未解明であった。そこで筆者らは文献1), 2)において、伝統木造建物における大垂壁付き架構に着目し、実大架構の静的加力実験によ

て地震時挙動の分析を行ってきた。大垂壁付き架構は、垂壁下端の差鴨居接合部において柱が折損し1層崩壊形となる場合、急激な耐力低下とともに崩壊することが実験において確認された。したがって、大垂壁付き架構の崩壊形を特定することは、建物が倒壊に至るまでの変形性能を評価する上で極めて重要である。しかし、垂壁付き架構に対する既往の耐震性能評価法^{3), 4)}では、架構全体の崩壊形判定は行っていない。

本研究は、建物の構造的な観点から、伝統木造建物の耐震安全性を評価・向上し、地震に対する人命の保護および文化財の保全を目指すものである。本論文では、まず、伝統木造建物における大垂壁付き架構について、倒壊に至るまでの地震時挙動の把握を目的として実施した、実大架構の静的加力実験を紹介する。さらに、実験結果に基づき、構面ごとに崩壊形を推定可能な崩壊形推定式を提案することで、建物の変形性能を把握可能とする。

なお、本論文は既発表の文献8)の内容を再構成したものである。



図-1 既存建物における大垂壁付き架構

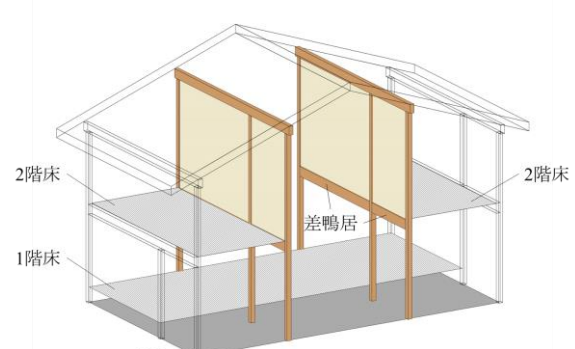


図-2 大垂壁付き架構を含む構造例

2. 静的加力実験

(1) 実験方法

a) 試験体

1層壁試験体の立面図を図-3に、接合部詳細を図-4に示す。壁幅や柱本数を実験変数として、大垂壁とともに1層に壁を有する4体の試験体を製作した。本論文では、差鴨居以上の部分を「2層」、差鴨居より下の部分を「1層」と定義する。また、本論文における「柱」は、1層および2層をまたぐ柱勝ちの柱を指す。試験体において1層・2層ともに壁を有する部分を「連層壁」と定義する。

試験体の軸組は柱・桁・土台・差鴨居からなり、桁と土台間の内法高さは3870mm、垂壁高さは1800mm、柱間の芯々での距離は1820mm(=2P)または910mm(=1P)である。すべての試験体において、柱および土台の断面寸法は120×120mm、桁は240×120mm、差鴨居は270×120mmである。各部材の材種は、柱および土台はスギ(機械等級区分E90)、桁および差鴨居はベイマツである。各試験体における柱の呼称は図-3に示すとおりである。いずれの試験体も柱頭および柱脚は短ほぞ差しで、加力時に柱の引き抜けを防止するため山形プレートVPを両面打ちとする。柱-差鴨居接合部は、側柱は鼻栓仕様、中柱は込栓仕様とし、栓の材種はカシである。なお、接合部の仕様は文献1), 2)と同様である。また前述の通り、壁材には乾式パネルを用い、貫仕様の片面張りで設置する⁹⁾。

柱の密度は、静的加力実験後の試験体を解体し、柱に対して計測した重量と寸法から算出した。また、柱の曲

げヤング係数 E および曲げ強度 F_b は、3点曲げ試験より得た値である。3点曲げ試験の支点間距離は柱径の12倍(1440mm)とした。

b) 加力・計測方法

加力・計測方法を図-5に示す。試験体の土台は十分に剛とみなせる鉄骨部材にアンカーボルトを用いて固定する。また、加力時に柱が土台から引き抜けないよう、表-1に示す上載重量 W を試験体の各柱の頂部に負荷する。また、連層壁が取り付く柱の柱頭および柱脚には、大きな引き抜き力が作用することを想定し、ホールダウン金物HD-B10を設置する(図-5参照)。なお、加力システムは文献6)と同様であり、試験体の鉛直変位を拘束しないように、加力フレームを介して桁端部を水平方向に加力する。加力点である桁の両端にロードセルを取り付け、試験体の水平抵抗力 P を計測する。

試験体の全体の変形角 R は、土台に対する桁の相対変位を桁と土台間の内法高さ(3870mm)で除すことで算出する。加力方向は同図に示すように紙面左方向を正側とし、正負交番漸増2回繰り返して加力とする。交番加力の目標とする変形角 R は、 $\pm 1/120, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20, 1/15, 1/10, 1/8, 1/6, 1/5\text{rad}$ とする。

また、柱の曲げモーメントの算定のため、図-5に示すように柱にひずみゲージを貼り付け、計測を行う。曲げモーメントの算出には、表-1の曲げヤング係数 E と背割を考慮した断面2次モーメント、ひずみゲージにより計測したひずみを用いる。そして、1層柱の曲げモーメントは線形分布と仮定して、差鴨居下端位置での曲げモー

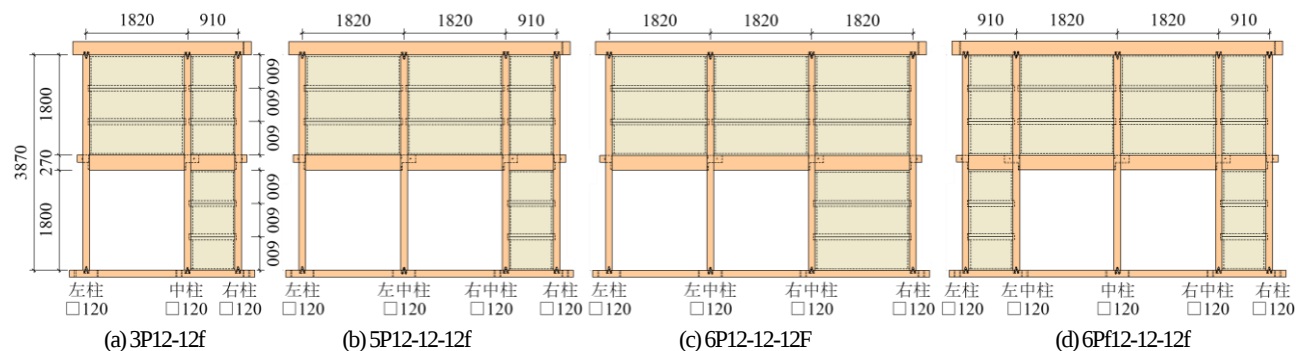


図-3 試験体立面図 (単位: mm)

表-1 試験体詳細

試験体	重量 (kN)		柱				
	試験体	上載重量 W	位置	断面寸法 (mm)	密度 (kg/m ³)	E (kN/mm ²)	F_b (N/mm ²)
3P12-12f	2.8	38.6	左柱	120×120	386	8.0	42.0
			中柱		468	8.8	40.8
			右柱		403	8.2	51.3
			右柱		416	8.4	57.3
5P12-12-12f	4.1	64.0	左中柱	120×120	451	9.6	65.4
			右中柱		423	7.3	52.4
			右柱		461	8.0	61.0
			左柱		397	7.9	48.9
6P12-12-12F	5.2	75.6	左中柱	120×120	462	8.9	59.6
			右中柱		435	7.8	48.9
			右柱		414	8.3	56.2
			左柱		415	8.5	49.3
6Pf12-12-12f	5.1	77.5	左中柱	120×120	432	8.7	49.9
			中柱		390	7.3	49.3
			右中柱		470	9.2	57.1
			右柱		469	9.5	58.4

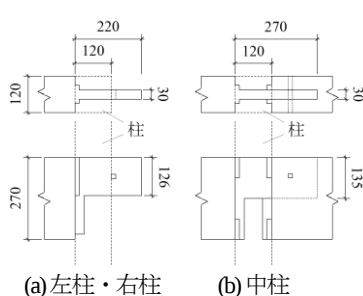


図-4 接合部詳細 (単位: mm)

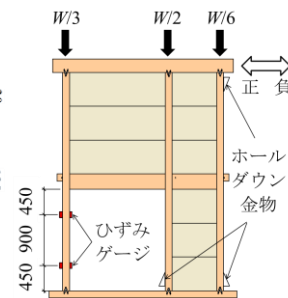


図-5 加力・計測方法

メントを算出する．なお，図-3に示す右柱のように1層に壁が取り付けいた柱では，曲げモーメントの線形分布を仮定できないため，曲げモーメントの算出は行っていない．

(2) 実験結果

1層壁試験体の水平抵抗力 P -変形角 R 関係（以下，荷重変形関係）を図-6に示す．各試験体において，加力方向の違いによって荷重変形関係に顕著な差は見られなかった．また，加力時に見られた主な損傷を図-7に，5P12-12fおよび3P12-12fの崩壊時の様子を図-8に示す．主な損傷として，差鴨居接合部付近での柱の折損と壁の破壊が確認された．

図-6の(b) 5P12-12f, (c) 6P12-12f, (d) 6Pf12-12fの3体では，すべての柱が折損し，1層の層崩壊により水平抵抗力 P を喪失した（以下，1層崩壊形）．柱の折損の順番は3体とも同じく，1/20radで1層に壁が取り付けしていない左中柱および中柱，1/15radで1層に壁が取り付けいた右中柱および左中柱，1/10radで側柱となった．なお，5P12-12fの左柱のみ，1/8radで折損した．1層崩壊形と

なった試験体では，まず1層の壁の損傷が進展し，1層への変形集中によってすべての柱の折損に至った（図-8(a)参照）．また，図-6(c)で見られるように，水平抵抗力 P の低下が始まった以降の変形角 R で柱の折損が生じたことから，1層の柱と壁の耐力の発現は同時ではなかった可能性が考えられる．一方，図-6の(a) 3P12-12fでは柱は折損せず，1層および2層の壁が破壊し，緩やかに水平抵抗力 P が低下した（以下，全体崩壊形）．

(3) 崩壊形に関する考察

本節では，大垂壁試験体の崩壊形と限界変形角の関係を検討する．なお，ここでは本論文および文献 1), 2) で示した試験体 15 体の実験結果を用いる．

本論文では，試験体の限界変形角 R_u を以下のように定義する．1 層崩壊形の試験体では，すべての柱が折損すると急激に水平抵抗力が低下するため，試験体内の各柱が折損したときの変形角 R のうち絶対値の最大値を R_u とする．一方，全体崩壊形の試験体では，限界状態を同じ指標で定義するため，水平抵抗力 P が 0 となるまで加力を行った試験体（2P15=15¹⁾，2P12#12N²⁾，3P12-12f）に

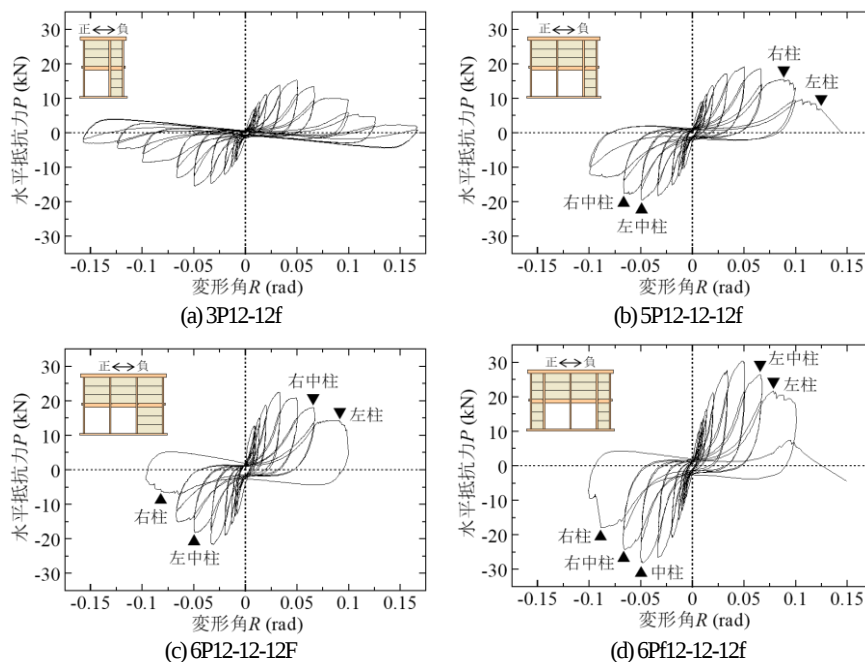
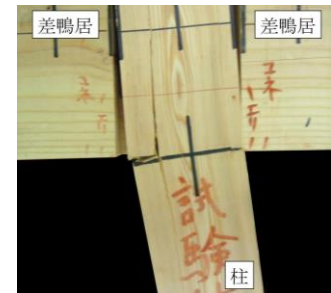
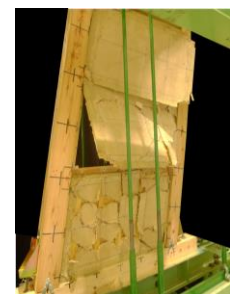


図-6 荷重変形関係（▼：柱の折損）



(a) 柱の折損



(b) 壁の破壊

図-7 主な損傷



(a) 5P12-12f (1層崩壊形)



(b) 3P12-12f (全体崩壊形)

図-8 崩壊時の様子

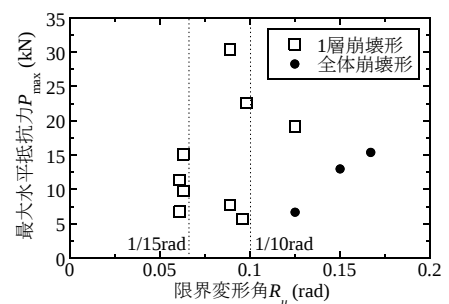


図-9 崩壊形と限界変形角の関係

ついて、加力を行った R の絶対値の最大値を R_u とする。

また、本論文では、各試験体の最大水平抵抗力 $P_{\max}$ を正側加力時の水平抵抗力 P の最大値とする。なお、各試験体の正側加力時と負側加力時の水平抵抗力 P の絶対値の最大値の差は最大で 1 割程度と小さいため、本論文では $P_{\max}$ を各試験体の耐力の指標として考察を行う。

図-9 に、大垂壁試験体の崩壊形と限界変形角 R_u の関係を示す。ここで、限界変形角 R_u と耐力との対応を見るために、同図の縦軸には最大水平抵抗力 $P_{\max}$ を示している。同図より、1 層崩壊形となった試験体では、耐力の大小によらず R_u が $1/15 \sim 1/10 \text{rad}$ 程度であった。一方、全体崩壊形となった試験体では R_u が $1/10 \text{rad}$ を超え、大きい変形角まで水平抵抗力 P を維持できることがわかる。

3. 崩壊形推定式

(1) 方針

本章では、大垂壁付き架構の構面ごとに適用可能な、崩壊形の簡易推定式を提案する。提案式では、架構の崩壊形ごとの耐力を概算し、耐力が小さい方の崩壊形で構面の崩壊形を評価する。耐力要素としては柱の曲げ抵抗と壁のせん断抵抗を考慮し、柱と壁の耐力を累加することで架構の耐力を概算する。

図-10 に、対象とする大垂壁付き架構を含む構面を示す。提案式では、同図に示すように 1 層に壁を有する架構や、2 層に開口を持つ架構にも適用可能である。図-10 に示すように、提案式では差鴨居が片側から取り付いている両端の柱を「側柱」、差鴨居が両側から取り付いている柱を「中柱」とする。架構の変形を考えた時の変形方向側の側柱を「前柱」、逆側の側柱を「後柱」と定義する。なお、中柱は変形方向によらず「中柱」とする。

図-11 に、前章で述べた静的加力実験において確認された、大垂壁付き架構の 2 つの崩壊形を示す。同図(a)の 1 層崩壊形は、差鴨居接合部で柱がすべて折損する崩壊形である。一方、同図(b)の全体崩壊形は、一部またはすべての柱が折損することなく垂壁が破壊する崩壊形である。前章で述べたとおり、大垂壁付き架構は、1 層崩壊

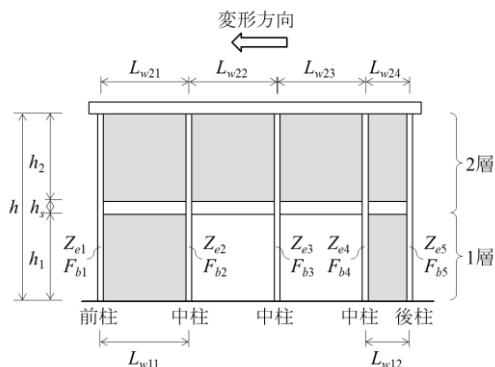


図-10 大垂壁付き架構

形では柱の折損によって急激に耐力低下し崩壊に至るが、全体崩壊形では緩やかな耐力低下とともに $1/10 \text{rad}$ を超える大変形まで水平抵抗力を維持できる。したがって、架構の崩壊形を特定することは、架構の変形性能を評価する上で極めて重要である。

(2) 定式化

前節で述べた方針により、耐力累加に基づく崩壊形推定式を定式化する。図-10のような架構について、寸法・材料強度として以下の変数を用いる。

h_n	: n 層の内法高さ ($n=1, 2$)
h_s	: 差鴨居のせい
Z_{ei}	: 柱 i の差鴨居接合部での有効断面係数 ($i=1, 2, \dots$)
F_{bi}	: 柱 i の曲げ強度 ($i=1, 2, \dots$)
L_{wj}	: n 層壁 j の柱芯々での壁幅 ($n=1, 2, j=1, 2, \dots$)
$q_{w\max}$	: n 層壁の単位壁幅当たりのせん断耐力 ($n=1, 2$)

架構の崩壊形を、各崩壊形での 1 層の層せん断耐力の大小関係より、式 (1a), (1b) のように判定する。なお、提案式で全体崩壊形と判定された場合は、すべての柱が折損しない評価となる。また、1 層の層せん断耐力は、崩壊形の判定とともに同式のように算定される。

$$\begin{cases} \alpha \leq 1 & \text{1層崩壊形} \quad (Q_{1\max} = {}_s Q_1) & (1a) \\ \alpha > 1 & \text{全体崩壊形} \quad (Q_{1\max} = {}_t Q_1) & (1b) \end{cases}$$

ここで、式(1a), (1b)の各変数は式(2)~(4)よりそれぞれ算出する。

$$\alpha = {}_s Q_1 / {}_t Q_1 \quad (2)$$

$${}_s Q_1 = \sum_i Q_{c1i} + \sum_j q_{w1\max} \cdot L_{w1j} \quad (3)$$

$${}_t Q_1 = \beta_1 \cdot \sum_j q_{w1\max} \cdot L_{w1j} + \beta_2 \cdot \sum_j q_{w2\max} \cdot L_{w2j} \quad (4)$$

また、

${}_s Q_1$: 1層崩壊形での 1 層の層せん断耐力
 ${}_t Q_1$: 全体崩壊形での 1 層の層せん断耐力

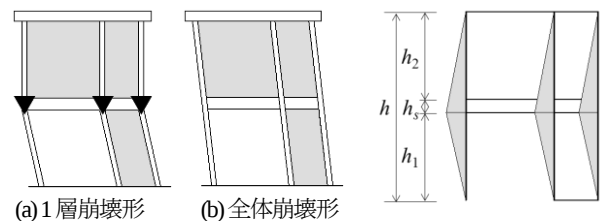


図-11 大垂壁付き架構の崩壊形 (▼: 柱の折損)

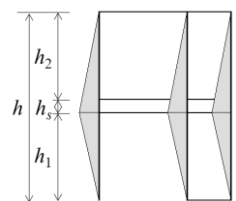


図-12 仮定する柱の曲げモーメント分布

α : 全体崩壊形での1層の層せん断耐力 Q_1 に
対する1層崩壊形での1層の層せん断耐力 Q_{cl} の比
 Q_{cli} : 柱 i の折損時の1層の負担せん断力
($i=1, 2, \dots$)

β_n : n 層壁のせん断力低減係数 ($n=1, 2$)

ここで、柱 i の折損時の1層の負担せん断力 Q_{cli} は式(5)より求める。

$$Q_{cli} = \frac{\gamma_i \cdot F_{bi} \cdot Z_{ei}}{h_1} \quad (5)$$

また、

γ_i : 柱 i の曲げ耐力低減係数 ($i=1, 2, \dots$)

さらに、壁のせん断力低減係数 β_1, β_2 、柱の曲げ耐力低減係数 γ_i は、それぞれ式(6a), (6b), (7)より算出する。

$$\beta_1 = \frac{\mu \cdot h_1}{\mu \cdot h_1 + (h_2 + h_s)} \quad (6a)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu \cdot (h_2 + h_s)}{\mu \cdot h_1 + (h_2 + h_s)} \quad (6b)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1.0 & (\text{前柱}) \\ 0.5 & (\text{後柱} \cdot \text{中柱}) \end{cases} \quad (7)$$

なお、 β_1, β_2 は、柱の曲げモーメント分布が図-12となる
とし、各層の層せん断力の釣り合いから求まる。また、
 γ_i の値は、大垂壁付き架構における柱の曲げ耐力低下の
傾向を考慮した係数であり、架構の変形方向に対する位
置によって柱ごとに定める。

(3) 精度検証

本節では、本論文および文献1), 2)で実験結果を示した
大垂壁試験体15体に対して、提案する崩壊形推定式を適
用し、実験結果と比較することによって提案式の検証を
行う。

各試験体について、提案式の変数を以下のように与
える。まず、各層の内法高さ h_1, h_2 はともに1800mm、差
鴨居のせい h_s は270mmである。次に、差鴨居接合部での

柱の有効断面係数 Z_e は、差鴨居ほぞによる欠損が最も大
きい断面に対して算出した値とする。全断面の断面係数
を Z として、 Z_e は120角側柱で0.68 Z 、150角側柱で0.75 Z 、
120角中柱で0.61 Z である⁹⁾。そして、柱の曲げ強度 F_{bi} は、
3点曲げ試験から得られた各柱の曲げ強度^{10) 11)}とする。最
後に、 n 層壁の単位壁幅当たりのせん断耐力 q_{wmax} ($n=1, 2$)
は、同じ壁仕様である全壁の静的加力実験結果^{2) 7)}に
おける耐力を、柱芯々での壁幅で除した値を用いる。

また、静的加力実験は試験体頂部への1点加力である
ため、層せん断力は各層で等しい、すなわち式(6a), (6b)
において $\mu=1$ とする。変形方向は、静的加力実験におけ
る正側および図-10と同じ、紙面左方向とする。なお、
変形方向が紙面右方向の場合の検証も実施し、紙面左方
向の結果と同等であることを確認している。

図-13に、大垂壁試験体15体の評価結果を示す。なお、
プロットは各試験体の実験結果における崩壊形ごとに分
類している。まず、同図(a)では、各試験体の評価値 α す
なわち崩壊形の判定結果を示す。ここで、式(1a), (1b)に
示すように、崩壊形の判定は評価値 α が1.0以下で1層崩
壊形、1.0より大きいと全体崩壊形となる。同図に示す
ように、1層崩壊形の試験体はすべて1層崩壊形と判定で
きた。また、全体崩壊形の試験体の中では、一部の試験
体を1層崩壊形と判定した。次に、同図(b)では、各試験
体の耐力について、実験値 P_{max} と評価値 Q_{lmax} との比較を
示す。同図において、評価値 Q_{lmax} は実験値 P_{max} と概ね精
度良く対応している。

以上、本節では大垂壁付き架構の実験結果を用いて、
提案式の有効性と精度の検証を行った。検証によって、
耐力および崩壊形の評価結果は、実験結果と概ね良い対
応を示すことを確認した。

4. まとめ

本論文では、伝統木造建物における大垂壁付き架構
の静的加力実験を実施するとともに、蓄積した実験結果
に基づいた架構の崩壊形推定式を提案した。そして、実
験結果を用いて提案式の精度検証を行った。

得られた結果を以下に示す。

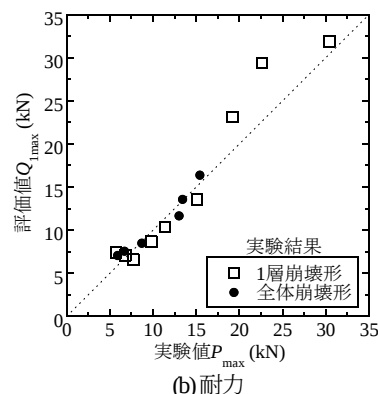
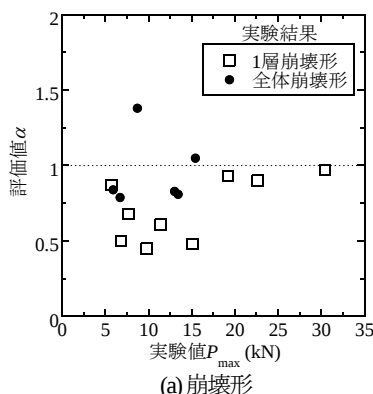


図-13 評価結果

- a) 大垂壁付き架構の崩壊形は、柱の折損による1層崩壊形と垂壁の破壊による全体崩壊形に分類される。1層崩壊形では柱の折損によって急激に耐力低下して崩壊に至るが、全体崩壊形では耐力低下は穏やかで1/10radを超える大変形まで水平抵抗力を維持可能となる。
- b) 大垂壁付き架構について、柱と壁の耐力累加に基づいた構面ごとの崩壊形推定式を提案した。提案式を用いることで、架構の崩壊形を容易に判定可能とし、1層崩壊形を全体崩壊形とするための耐震補強案を検討可能となる。

本論文の研究成果は、大垂壁付き架構の崩壊形を推定可能としたとともに、崩壊形制御により変形性能向上のための耐震対策を検討可能とし、地震による伝統木造建物の倒壊防止に大きく寄与するものである。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)No.15H02275（代表者：林康裕）の補助の下で遂行しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 澁谷悦敬, 南部恭広, 大村早紀, 横部達也, 杉野未奈, 林 康裕：乾式パネルを用いた大垂壁を有する伝統木造軸組架構の静的加力実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.49, pp.1031-1036, 2015.10.
- 2) 大村早紀, 南部恭広, 澁谷悦敬, 杉野未奈, 林 康裕：大垂壁を有する伝統木造軸組架構の耐震性能評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 727 号, pp.1479-1489, 2016.9.
- 3) 文化庁：重要文化財(建造物)耐震基礎診断実施要領(平成 24 年 6 月 12 日改正)
- 4) (一財)日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法 例題編・資料編, pp.151-163, 2012.
- 5) (株)丸浩工業：荒壁パネル施工要領書, <http://www.maruhiro.jp/product/sekou.pdf> (2017.5.7 参照)
- 6) 中川敦嗣, 多幾山法子, 林 康裕：2 階建京町家を想定した実大平面架構の大変形静的加力実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 685 号, pp.513-520, 2013.3.
- 7) (株)丸浩工業：荒壁パネル耐力壁倍率性能評価試験報告書, p.7, 2005.
- 8) 大村早紀, 杉野未奈, 林 康裕：大垂壁を有する伝統木造建物の耐力および崩壊形の簡易推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 743 号, pp.147-154, 2018.1.

一眼レフカメラ等を活用した 迅速な被災状況把握に向けた取組

片山 理佐子¹・関口 泰徳¹・四野宮 良周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 基本図情報部 画像調査課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番) .

国土地理院では災害対策基本法に基づく「指定行政機関」として、災害発生時の迅速な被災状況把握及び災害復旧を支援するために空中写真撮影等を行っている。災害発生後の一層迅速な情報提供という課題に対応するため、以下の3点で改良に取り組んだ。①測量用航空機の底面に測量用デジタル航空カメラに加えデジタル一眼レフカメラの設置。②測量用デジタル航空カメラの生データを画像化する処理作業の効率化。③撮影した画像データを自動処理するツールの開発。本稿ではこれらの取組を活用した迅速な空中写真の提供・公開の手法を概説するとともに、従来の方法と比較した省力化や時間短縮の効果について報告する。

キーワード デジタル一眼レフカメラ、測量用デジタル航空カメラ、被災状況把握、省力化、時間短縮効果

1. はじめに

国土地理院は、「災害対策基本法」(昭和36年法律第223号)に基づく「指定行政機関」であり、災害発生時の迅速な被災状況把握及び災害復旧支援を目的とした地理空間情報の提供のために空中写真撮影等を行っている。撮影した空中写真は各府省庁、地方公共団体などの関係機関へ提供するほか、地理院地図を通して一般に公開している(図-1)¹⁾²⁾。

従来から国土地理院では、災害発生後において測量用デジタル航空カメラ(以下「航空カメラ」という。)による空中写真撮影を行っているが、航空カメラで撮影された画像は、解像度が高い反面、画像合成等の撮影後の処理に時間がかかるため、撮影当日の関係機関への提供や地理院地図での一般公開が困難な場合があった。これを解決するため、2018年9月に測量用航空機「くにかぜⅢ」の底面に、航空カメラに加えて撮影後の処理時間が短いデジタル一眼レフカメラ(以下「一眼レフカメラ」という。)を取り付け(写真-1)、航空カメラと同様に空中写真を撮影し速報的にその画像を提供している。更には、航空カメラで撮影した生データを画像化する処理(以下、画像合成という。)の効率化や、航空カメラや一眼レフカメラで撮影した画像データのインターネット公開に必要な処理を行う自動ツールの開発により、災害発生後の迅速な画像提供ができるよう手法開発を行っている。

本報告では、この一眼レフカメラの導入や画像合成等後処理作業の効率化、自動処理ツールを活用した迅速な空中写真の提供・公開の手法を概説するとともに、従来の方法と比較した省力化や時間短縮の効果について報告する。

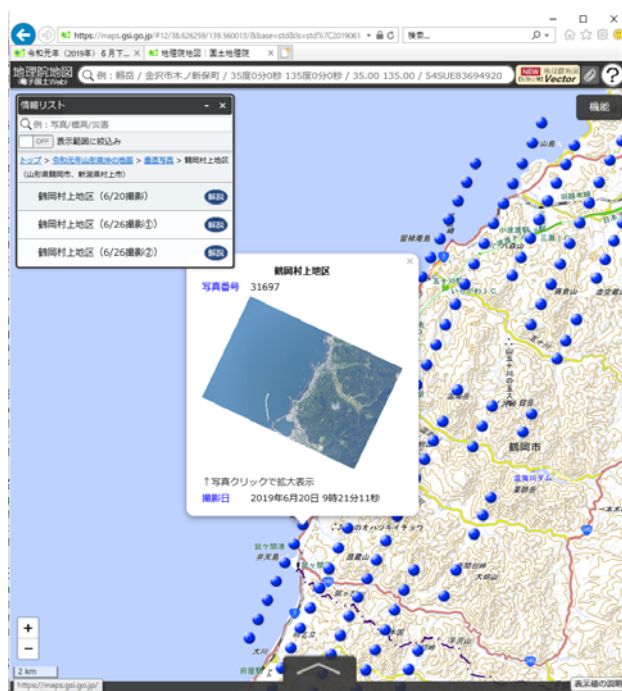


図-1 災害時における地理院地図での空中写真公開
(2019年山形県沖の地震の例)



写真-1 測量用航空機底面に取り付けられた
一眼レフカメラ取付場所（点線部）と
航空カメラ取付場所（実線部）

2. 空中写真撮影からホームページ公開の流れ

本節では災害発生時の緊急撮影で得た空中写真を、地理院地図を通して一般に公開するまでの従来手法と新手法を紹介する。

(1) 従来手法の処理の流れ

従来手法の処理の流れとしては、表-1左列に示すとおり主に5つの工程を実施していた。

- (a) データの運搬
航空カメラで撮影した生データは、容量が極めて大きく、インターネット回線による伝送が事実上不可能なため、格納したHDDを直接国土地理院本院に運搬する。
- (b) 画像合成等後処理作業
生データは、赤・緑・青・白黒等のセンサー毎のデータで構成されているため画像合成の処理を行うとともに、撮影時の位置（X, Y, Z）及び姿勢（ ω , ϕ , κ ）情報（以下「外部標定要素」という。）を作成する³⁾。
- (c) 低解像度画像の作成
合成処理後の画像データはデータ容量が大きいため、画像利用の利便性が向上するように、低解像度画像の作成を行う。
- (d) 画像の回転
Web公開時の閲覧者の利便性向上のために、画像の上方向が北となるよう回転させた画像を作成する。
- (e) Web公開用データ作成
回転画像を地理院地図上で公開するために必要な撮影主点（撮影地点の緯度・経度）や画像のリンク先等を指定したKMLファイルを作成する。

表-1 画像データを一般公開するための従来手法
と新手法の比較

従来手法	新手法	
航空カメラ使用	航空カメラ使用	一眼レフカメラ使用
(a)HDDを用いたデータ運搬	(A)HDDを用いたデータ運搬	(A')インターネットによる画像伝送
(b)画像合成等後処理作業	(B)画像合成等後処理作業	(B')画像の選定・外部標定要素の作成
(c)低解像度画像の作成	(C)低解像度化/回転 Web公開用データ作成	
(d)画像の回転		
(e)Web公開用データの作成		

これら5つの工程を経て行う従来手法には、以下の課題が存在していた。

- ① データの運搬には公共交通機関を使用するため、夜間や遠方の空港利用時には時間を要した。
- ② (c)(d)(e)の工程では、工程毎に異なるソフトウェアを用いて複数の作業者が作業していたため、作業者の確保が必要である上、ヒューマンエラーによる手戻りが発生することもあった。
- ③ 画像回転が 90° 単位でしか行えなかったため、東西/南北コースではない斜めコースで撮影した場合に、画像の上方向を正確な北とすることができなかった。
- ④ カメラの回転角等の有効な情報が、後続作業である(d)画像回転作業に生かされていなかった。
- ⑤ 工程数が多いため、工程間のデータの移動や作業の引継ぎに時間がかかっていた。

これらの課題により、早期に撮影が終了しても関係機関への提供や地理院地図での一般公開を撮影当日に行うことが困難な場合があった。

(2) 新手法の処理の流れ

これに対し、新手法では、伝送時間、画像合成等後処理作業、Web公開用データ作成に対し、作業の時間短縮

と省力化を図るため、以下の3点を改善した。

- ・一眼レフカメラの導入
- ・画像合成等後処理作業の効率化
- ・自動処理ツールの活用

a)一眼レフカメラの導入

従来手法では航空カメラで撮影した生データに対して、表-1の(a)及び(b)の作業が必要であった。これらの作業についての時間短縮を図るため、解像度は航空カメラには劣るが、

- ・画像合成の作業が不要
- ・インターネット伝送が可能

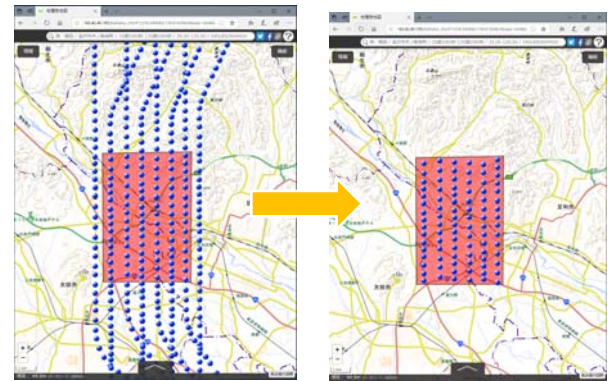
の利点を持つ一眼レフカメラを導入することにより、時間短縮を図った。

一眼レフカメラで撮影された画像データについては、解像度50cmで撮影するとき(航空カメラ画像の解像度20cm時)、撮影画像幅は航空カメラで撮影された画像データと同様である。また、JPEG形式で記録されておりデータ容量も小さいために、表-1右列の(A')のとおり、測量用航空機が空港に着陸後に短時間で国土地理院本院にインターネット伝送することが可能となり、速報版画像を関係機関や地理院地図での提供ができるようになった。一方で、一眼レフカメラによる撮影には、一定間隔の時間で自動撮影されるインターバル撮影機能を使用しているために必要範囲外の撮影写真も含まれる状況となっている(図-2左図)。そのため、新たに開発した自動選

定ツールを使用することで、表-1右列の(B')及び図-2右図のとおり必要範囲内に含まれる画像を自動で選定することが可能となった。さらに画像の主点位置も作成され、後続作業で使用する自動処理ツールによって回転角が計算される。

b)画像合成等後処理作業の効率化

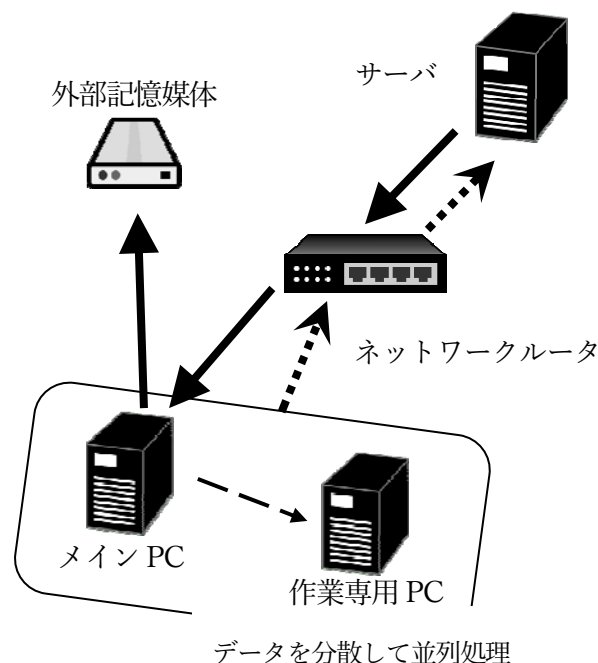
航空カメラで撮影した生データは、各色毎のデータで



ツール処理前

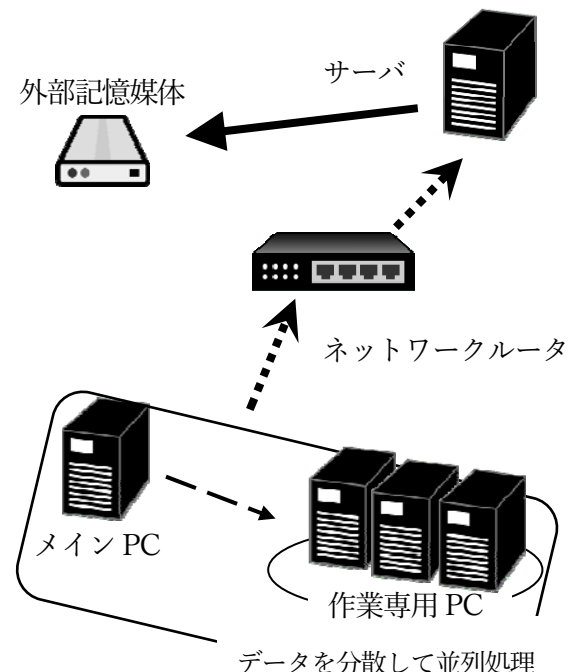
ツール処理後

図-2 自動選定ツールによる処理結果



- ←..... 合成した画像はサーバへ格納される。
- ←..... サーバからダウンロードする。

図-3 従来手法の画像合成処理成果データの流れ



- ←..... 合成した画像はサーバへ格納される。
- ←..... サーバからダウンロードする。

図-4 新手法の画像合成処理成果データの流れ

あり、そのままでは一般的な画像ビューワソフトで表示することができないため、(b)画像合成の処理によって画像化する必要がある。合成処理は図-3に示すように、メインコンピュータを介して複数の作業専用コンピュータとともに並列処理を行い、作成された画像データはサーバに出力していた。

画像合成プログラムは、閉じられたネットワーク環境にて運用しており、後続作業で使用するために作成した合成画像等を外部へ移動させるには、メインコンピュータからネットワーク経由にてデータをダウンロードしていた。その結果、データ伝送の回数が多くネットワークの伝送スピードに依存して時間を要していた。

その解決策として、処理速度の速い外部記憶媒体を用いてサーバから直接ダウンロードすることにより効率化を図った(図-4)。

また、作業専用コンピュータの台数を増やし、画像合成処理に要する時間短縮化の実現を目指した。

c)自動処理ツールの活用

(c)低解像度画像の作成、(d)画像の回転、(e)Web公開用データの作成には、Photoshopをはじめとするソフトウェア等を使用して工程毎に作業員が作業を行っていたが、これらの工程を一括で行える自動処理ツールを開発して対応した。これにより、工程間のデータ受け渡しやヒューマンエラーがなくなった。この自動処理ツールについて、航空カメラに対しては2018年7月、一眼レフカメラについては2019年6月に導入を行った。

表-2 従来手法と新手法での所要時間

	従来手法	新手法	
航空カメラ	航空カメラ	航空カメラ	一眼レフカメラ
撮影写真枚数/公開画像枚数	61枚 /61枚 (約640MB/枚)	288枚 /288枚 (約640MB/枚)	900枚 /306枚 (約5MB/枚)
撮影面積	約80km ²	約413km ²	約413km ²
着陸空港	仙台空港	北九州空港	北九州空港
伝送手段	5時間11分 (HDD運搬)	9時間30分 (HDD運搬)	2時間10分 (インターネット伝送)
画像合成等後処理	14時間6分 (14.87分/枚)	9時間9分 (1.91分/枚)	—
画像選定等	—	—	28分 (0.03分/枚)
低解像度画像の作成・回転	2時間5分 (2.05分/枚)	2時間10分 (0.45分/枚)	1時間22分 (0.29分/枚)
Web公開用データ作成	1時間21分 (1.33分/枚)		
合計処理時間	22時間43分	20時間49分	4時間00分

3. 新手法の効果

新手法の導入の結果、災害発生後にまずは一眼レフカメラの撮影写真を迅速に公開するとともに、並行して航空カメラ写真の処理も進め、準備ができ次第画質の良い航空カメラ写真を公開するという運用をしている。そのため、解像度は低いが速報版画像データとして被災状況のわかる画像の提供までの時間が飛躍的に短縮された。

さらに自動処理ツールの導入により、従来の手動作業工程の多くが自動処理ツールで実行可能になった上、従来手法での工程数(c)～(e) (表-1) の3つから、新手法では(C)の1つに削減できたことで、従来からの課題であった②～⑤を全て解決でき、必要な作業人数の削減にも成功した。

従来手法で作業を行った2016年台風第11号及び第9号における常呂川地区 (撮影面積：約80km²) と、新手法で作業を行った2019年8月の前線に伴う大雨において8月30日に撮影した佐賀地区 (撮影面積：約413km²) の航空カメラと一眼レフカメラで撮影した場合について、それぞれの処理時間を表-2にまとめ、以下でその効果を比較した。

(1) 画像データ運搬/伝送

佐賀地区の撮影において、航空カメラで撮影した場合は空中写真撮影後に北九州空港に着陸してから、9時間30分かけて生データを格納したHDDを国土地理院本院へ運搬した。一方、一眼レフカメラで撮影した画像データは、空中写真撮影後に北九州空港に着陸してから2時間10分で、国土地理院本院へインターネット回線により伝送することができた。このように一眼レフカメラを用いた新手法では、国土地理院本院でのデータ受け取りにかかる時間を短縮することが可能になった。

(2) 画像合成処理/画像の選定

航空カメラの生データの画像合成処理作業について、従来手法(常呂川地区)では61枚に対して14時間6分(14.87分/枚)を要したが、新手法(佐賀地区)では288枚に対して9時間9分(1.91分/枚)で処理を終えた。撮影地域や撮影面積が異なるため、従来手法と新手法では単純な比較はできないが、画像1枚あたりにかかった時間を比べてみると、従来手法14.87分/枚に対し新手法1.91分/枚であり、新手法の方が画像合成等後処理作業を格段に早く終えることができた。

また、一眼レフカメラの場合は必要範囲内画像の選定が必要であるが、この工程は、自動選定ツールによって迅速に実施が可能であり、一眼レフカメラ画像900枚の必要範囲内の画像集約の処理はわずか28分(0.03分/枚)で完了できたことで、この工程における時間短縮効果も非常に大きいことがわかる。

(3) 画像の低解像度化・画像の回転・Web公開用データ作成

従来手法では別々の工程として作業していた(c)低解像度画像作成、(d)画像の回転、(e)Web公開用データの作成の3つの工程について、新手法では自動処理ツールで1つの工程として一括処理が可能となった。このことで、従来手法では航空カメラ61枚の画像に対して3時間26分(3.38分/枚)要していたものが、新手法では航空カメラ288枚の画像に対して2時間10分(0.45分/枚)で作業を終えた。さらに一眼レフカメラを用いた画像については、自動選定された306枚の画像に対して1時間22分(0.29分/枚)で作業を完了することが可能になった。また、自動処理ツールの導入により、時間短縮効果だけでなく、従来手法での手動作業に起因するヒューマンエラーも排除できたことで、手戻りなく一連の作業工程を完了することができるようになった。

(4) 合計処理時間

空港着陸から全処理を完了する合計時間としては、従来手法では航空カメラ61画像に対して22時間43分必要だったものが、新手法での航空カメラ288画像に対して20時間49分、新手法の一眼レフカメラ900画像（公開画像数は306画像）に対しては4時間での処理が可能になった。

(5) 省力化

従来手法と新手法において、ホームページでの第一報を公開するための作業人員の省力化について表-3に示す。従来手法では航空カメラの処理において、5名の作業者と2名の点検者が必要であったが、新手法の一眼レフカメラの処理には2名の作業者と1名の点検者で作業を完遂でき、省力化が認められる結果となった。また、従来手法ではその作業工程の多さから、深夜作業を行う場合が多かったが、新手法として一眼レフカメラを使用することで多くの場合が撮影当日（撮影が午前である場合は当日夕方）のうちに作業を完了できる。

このように自動処理ツールの活用及び画像合成等後処

表-3 ホームページでの第一報公開するために必要な作業人数

	従来手法	新手法
使用カメラ	航空カメラ	一眼レフカメラ
作業者	5名 (a)～(e) 各1名	2名 (A) 1名 (B')(C) 1名
点検者	2名 (c)(d) 1名 (e) 1名	1名 (B')(C) 1名
合計	7名	3名

理作業の効率化、一眼レフカメラ導入による新手法については、従来手法と比較して相当の省力化と時間短縮に対する効果が得られることを確認できた。

4. まとめ

本稿では、災害時における迅速な被災状況把握をするために、新手法として一眼レフカメラ等を活用した空中写真を地理院地図に公開するまでの流れを紹介し、新手法による省力化と時間短縮実績を説明した。

引き続き、災害時の被災状況把握に資する空中写真の提供・公開を一層迅速に行うために、各種作業の省力化や時間短縮に関する技術開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 笹川啓, 2019. 災害時に空中写真を地理院地図に掲載するための自動データ作成ツールの開発, 国土地理院時報, 2019, 132, 印刷中.
- 2) 国土地理院 国土地理院の防災・減災への取組 <https://www.gsi.go.jp/common/000199482.pdf> (2019年8月22日アクセス)
- 3) 吉高神充, 田村竜哉, 2008. デジタル航空カメラ等による空中写真撮影, 国土地理院時報, 2008, 115, 51-59.

降雨の浸透による釧路川の堤防被災要因の検討

川岸 秀敏¹・若松 延幸²

¹北海道開発局 帯広開発建設部 治水課 (〒080-8585 北海道帯広市西5条南8丁目)

²北海道開発局 釧路開発建設部 治水課 (〒085-8551 北海道釧路市幸町10丁目3)

平成28年8月、北海道東部を流れる釧路川で、河川水位が上昇していない状況で降雨による堤防法面すべりが発生した。被災形態は、天端に降った雨水の集中による法肩からの崩壊と、法面への雨水の直接浸透による法中腹からの崩壊が多く見られた。このような被災は北海道内では例がなく、河川管理上の大きな課題となっている。本報告では、釧路川の堤防づくりを検討するうえで、河道変遷に着目した堤防天端の不陸の発生要因分析や現地観測による被災機構の解明について考察を行う。

キーワード 堤防検討, 降雨浸透, 河道変遷

1. はじめに

近年、釧路川では大雨により堤防の法面すべりなどの被災が発生している。堤防の被災形態は浸透による裏法すべりやパイピング、洪水流による表法の侵食、地震動及び液状化による被災など様々であるが、平成28年8月に発生した釧路川の被災では、計画高水位まで水位が上昇するような大洪水ではなく、降雨のみがきっかけで被災を受けていた。なぜ降雨のみで被災したのか。釧路川の堤体土質や基礎地盤土質を調査するとともに旧河道などの河道変遷に着目し、更に現地の試験堤防における実験などを基に被災のメカニズムを整理することとした。

2. 堤防被災の概要

北海道では平成28年8月17日から31日までの2週間に3つの台風が上陸、1つの台風の接近により、東部を中心に記録的な大雨となり、北海道内各地で河川の氾濫や家屋の浸水、農地浸水、道路冠水などが発生した。釧路地方では平成28年8月の台風第11号の影響により釧路川流域に強い雨が降り続き、標茶雨量観測所で観測史上最大の降水量を記録した。また、平成30年3月には、前線を伴った低気圧が通過し断続的に雨が降り続き、気温の上昇に伴う融雪などの要因もあって、釧路川標茶水位観測所において戦後最大の昭和35年3月洪水に次ぐ2番目となる水位を記録した。この相次ぐ増水に伴い標茶町市街地の一部では、平成28年8月に避難勧告、平成30年3月には避難指示が発令された事態となった。一方、平成28年8月の大雨により、釧路川左岸45.8k付近(標茶町富士樋

門地先)で堤防の法面すべりなどの河川被害も発生した(写真-1)。法面すべりは堤防川表の2箇所が発生しており、被災延長は、発見時、下流側で延長約10mであったが1週間後には約65mにまで広がった。上流側の被災も約65mに達し、合わせて約130mの被災まで広がった。被災発見時、釧路川の外水位は上昇中であったものの、高水敷上の水深は堤防法尻が浸かる程度であった。降雨の状況については、法面すべりを発見する直前には、時間10mm程度の降雨が1日に1回以上、1週間にわたり観測されていた。このことから、堤防の湿潤状態が継続していると同時に、被災直前の強い雨が重なり、法面すべりが発生したものと考えられる。



写真-1 釧路川で発生した堤防法面の被災（平成28年8月）

3. 堤体土質、基礎地盤土質の特徴と被災形態

釧路川では、平成16年から平成17年にかけて堤防の浸透に関する照査が実施されている。照査時のボーリング調査結果から、釧路川堤防の堤体土質は、大部分が火山

灰質の砂質土や礫質土で構築されていることが確認できる。また、被災を受けた堤防の川表法面は、火山灰質でシルトを多く含む粘性土により被覆されている断面である。また、堤防基礎地盤の土質は、過年度に実施された土質調査結果を整理した土層縦断面図より判断すると、砂質土や礫質土が主体となっている一方で、被災箇所の堤防基礎地盤に粘性土が見られたこと（図-1）が特徴的といえる。



図-1 被災を受けた堤防の土質

また、被災した上下流2箇所の堤防法面被災には、被災形状に違いが見られた。上流側は堤防天端の法肩からの崩壊であり、下流側は法面の中腹からの崩壊であった。堤防天端の法肩から崩壊した箇所では、堤防天端に降った雨水の流れが堤防の川表側へ集中し、法肩や法面のシルトを多く含む粘性土に浸透して強度低下を起こしたことが要因といたと考えられる。一方、法面の中腹から崩壊した箇所は、堤体表層のシルトを多く含む粘性土の部分に雨水が直接浸透して、強度低下を起こしたことが要因と推測される。このことを、雨水の流れが集中しやすい堤防天端の不陸箇所の発生要因を分析や、既設堤防の現地調査や実物大の試験堤防による雨水浸透などの確認を行うこととした。

4. 雨水の流れが集中しやすい堤防天端の不陸箇所の発生要因分析

1) 堤防天端の不陸箇所の存在

平成28年8月に被災した釧路川堤防の天端は、経年的な沈下に伴うような局所的な不陸部分が発生していた。また、このような堤防天端の局所的な不陸部分は、他の箇所においても今回の様な被災が発生する可能性もあると考え、釧路川中上流部の38.0kから70.0kを対象に、雨水集中の可能性がある堤防天端の不陸部分を抽出した。抽出にあたっては、平成28年8月被災前のMMS測量（モバイル・マッピング・システム）により得られた3次元データを用いて、堤防天端縦断面図と平面コンター図を作成した。抽出条件は、上流との標高差が0.2m以上であり、かつ、下流とは逆勾配である区間を堤防天端の不陸部分として34箇所を抽出した（図-2）。また、堤防天端コンター図を用いて34箇所の発生場所を①樋門箇所、②取付道路箇所、③それ以外の一般部に分類した（表-1）。樋門箇所や取付道路箇所は、一般部と比べると、比較的車両の往来が多いと考えると、堤防天端からの活荷重により堤防天端の不陸部分が発生したと想定している。一方、全体の34箇所のうち、大部分を占める29箇所の一般部に

ついては、何らかの沈下により堤防天端の不陸部分が発生したと想定している。

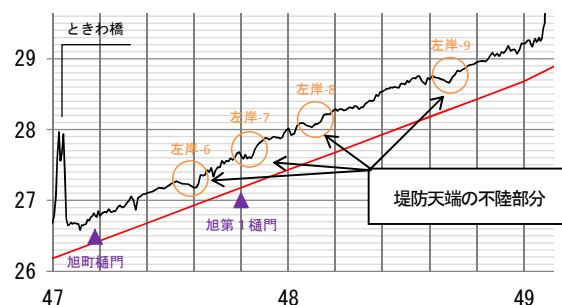


図-2 堤防天端の不陸部分の抽出（MMS 縦断面図）

表-1 堤防天端の不陸箇所の抽出

釧路川 KP38～KP70	箇所数		
	左岸	右岸	計
①樋門箇所	1	1	2
②取付道路箇所	3	0	3
③一般部	23	6	29
計			

堤防の沈下が基礎地盤に起因している可能性は、国管理区間の一級河川で実施されている河川堤防の安全性照査のための堤防詳細点検の土質ボーリングデータを活用することで、概ねの沈下状況が把握できる。例えば、今回抽出した堤防天端の不陸箇所に該当する釧路川41.5k右岸の土層横断面図（図-3）を見ると、堤防天端の沈下は、基礎地盤の粘性土が圧密・圧縮することにより生じている可能性があることが確認できる。

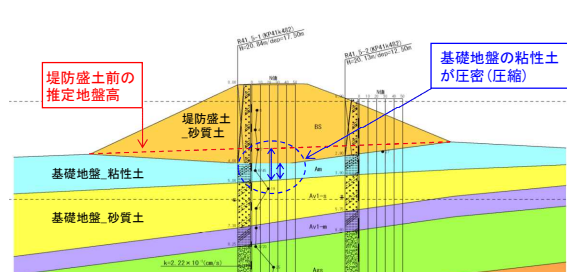


図-3 釧路川41.5k右岸の土層縦断面図

2) 釧路川の治水事業による河道変遷

釧路川の治水事業は、広大な原野や原生林の開拓とともにあり、低平地の洪水氾濫を減少させるとともに、地下水低下による土地利用を可能とすることを目的に、捷水路掘削（28箇所）や堤防整備が進められてきた（図-4）。また、釧路川流域においては、土地利用の拡大は喫緊の課題でもあったことから、捷水路掘削と併せて旧河道が埋め立てられ、その際に発生した掘削土（粘性土等）が埋め立て材料として使用されていたと推測される。そのことから、堤防天端の不陸箇所の発生は、旧河道の位置と関連しているものと仮定し、治水地形分類図（更新版）（国土地理院、2018.2）から旧河道の位置などを整理した。

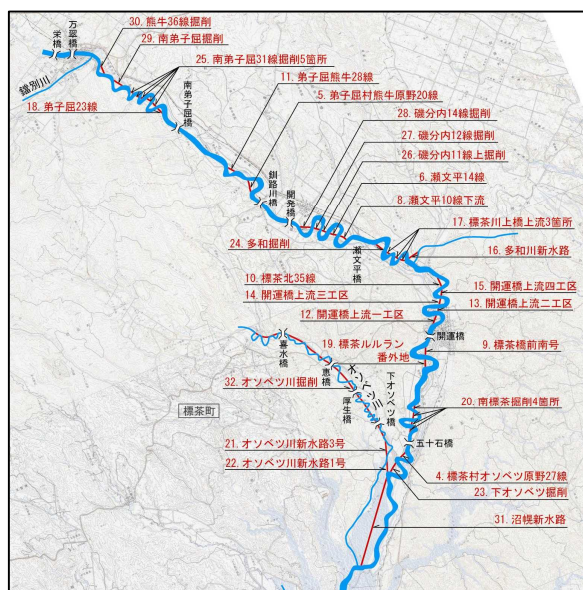


図-4 釧路川中上流域の捷水路整備（釧路川河川整備計画より）

3) 治水地形分類図による旧河道の把握と地形図・航空写真による確認

今回、旧河道を把握する手段として、治水地形分類図のほか、昭和23年撮影の航空写真、明治や大正年代の国土地理院地形図を用い、それぞれを重ねることで、釧路川の河道変遷を把握した。

なお、釧路川に係る治水地形分類図は、平成30年2月に更新されており、「旧河道」を「明瞭な旧河道」と「不明瞭な旧河道」に分けている他、「旧流路」を新たな情報として整理されている。

明治年代の旧地形図と旧流路位置の関係を把握したものを図-5に示す。明治末期～大正初期年代を抽出した旧流路と、時期が近い明治30年の旧地形図の河道を重ねた図である。両者の位置を確認したところ、河道の位置は一致しなかったが、概ね同様と言える。

簡易的に複数時期の確認を実施したことにより、釧路川においては、治水地形分類図による旧河道の位置の精度は高く、今後の河川整備に係る資料として十分活用できるものと判断できた。

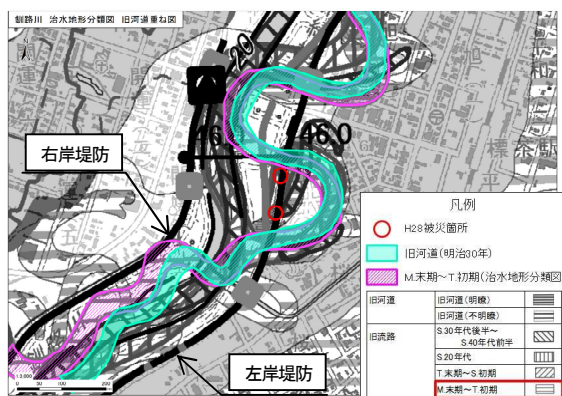


図-5 明治年代の旧地形図と旧流路位置の比較

4) 堤防の不陸部分と旧河道等との関係

抽出した釧路川堤防の天端の不陸部分と、治水地形分類図における旧河道および旧流路の関係を分析した。治水地形分類図更新版の旧河道（明瞭、不明瞭）と旧流路（4時期）をすべて重ねた図に、天端の不陸部分をプロットし、34箇所全ての箇所に対して表-2のとおり整理したところ、堤防天端の不陸部分の大部分が旧河道および旧流路に該当していることがわかった。これにより、釧路川の旧河道・旧流路の存在が堤防天端の不陸部分の発生と大きく関係していると考えられる。

表-2 堤防天端の不陸部分と旧河道・旧流路の関係

堤防天端の低み				旧河道・旧流路
				治水地形分類図より
1	左岸	左岸-1	KP 40.36 付近	-
2		左岸-2	KP 40.56 付近	旧河道（不明瞭）
3		左岸-1（樋門）	KP 40.88 付近	旧流路（S.20年代）
4		左岸-3	KP 42.20 付近	旧流路（S.20年代）
5		左岸-4	KP 42.66 付近	-
6		左岸-5	KP 45.95 付近	旧河道（明瞭）
7		左岸-1（取付道路）	KP 46.28 付近	旧流路（S.20年代）
8		左岸-6	KP 47.60 付近	旧河道（明瞭）
9		左岸-7	KP 47.82 付近	旧河道（明瞭）
10		左岸-8	KP 48.10 付近	旧河道（不明瞭）
11		左岸-9	KP 48.68 付近	旧流路（T.末期～S.初期）
12		左岸-10	KP 53.54 付近	旧河道（明瞭）
13		左岸-3（取付道路）	KP 53.82 付近	旧河道（明瞭）
14		左岸-11	KP 55.15 付近	-
15	左岸-12	KP 57.60 付近	旧河道（明瞭）	
16	左岸-13	KP 57.78 付近	旧河道（明瞭）	
17	左岸-14	KP 57.87 付近	旧河道（明瞭）	
18	左岸-4（取付道路）	左岸-15	KP 59.26 付近	旧流路（S.20年代）
19		左岸-15	KP 60.55 付近	旧流路（S.30年代後半～S.40年代前半）
20		左岸-16	KP 61.00 付近	旧河道（不明瞭）
21		左岸-17	KP 61.75 付近	旧流路（S.30年代後半～S.40年代前半）
22		左岸-18	KP 63.67 付近	旧流路（S.30年代後半～S.40年代前半）
23		左岸-19	KP 64.88 付近	旧河道（不明瞭）
24		左岸-20	KP 64.98 付近	旧河道（明瞭）
25		左岸-21	KP 66.68 付近	旧河道（不明瞭）
26		左岸-22	KP 67.85 付近	旧流路（M.末期～T.初期）
27		左岸-23	KP 68.00 付近	旧河道（明瞭）
28	右岸	右岸-1	KP 37.76 付近	-
29		右岸-2	KP 39.76 付近	旧河道（不明瞭）
30		右岸-3	KP 41.40 付近	旧河道（明瞭）
31		右岸-4	KP 43.82 付近	旧河道（明瞭）
32		右岸-5	KP 44.30 付近	旧流路（S.20年代）
33		右岸-6	KP 46.01 付近	-
34		右岸-1（樋門）	KP 55.13 付近	旧河道（明瞭）

5) 堤防天端の不陸部分と堤体基礎地盤の土質との関係

旧河道・旧流路の存在と堤防天端の不陸部分の発生の関係を把握する目的で、被災を受けた標茶町市街地周辺において、旧河道を中心に深度 2m～3m 程度のオーガーボーリングを実施した。その結果、旧河道では粘性土が分布する傾向が確認された。このことにより、堤防天端の沈下は、堤防下の基礎地盤と旧河道・旧流路が交わる箇所の粘性土が圧密・圧縮することにより生じたと考えられる。そこで、捷水路掘削と堤防整備により多くの旧河道・旧流路についても同様のことが言えるのかを確かめるため、オーガーボーリングによる土質確認の範囲を広げて調査を実施した。調査は、旧河道を中心に堤防基盤となる高水敷を深度方向 2m～3m を確認した。その結果、堤防天端の不陸部分は、多くが基礎地盤に粘性土や泥炭を挟んでおり堤防沈下の要因と考えられたこと、また、旧河道・旧流路でも、多くが基礎地盤に粘性土や泥炭を挟んでおり、捷水路掘削での埋め立てとの関連があることが明らかになった（図-6）。

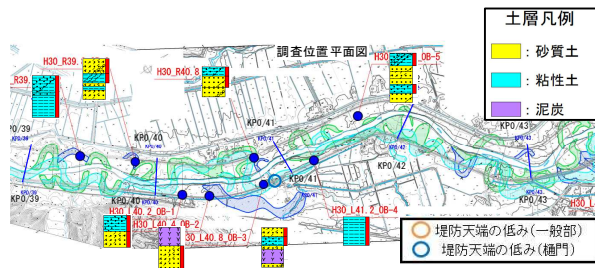


図-6 旧河道や堤防天端の不陸部分と堤体基盤土質の関係

釧路川の基礎地盤は、過年度実施した堤防詳細点検や樋門改築時の土質ボーリングデータを整理した土層縦断面図より判断すると、砂質土が主体となっている。一方、釧路川の旧河道や旧流路は、ピッチの細かい蛇行により入り組んだ形状をしている。この旧河道上にある現在の堤防は、戦後の捷水路事業による粘性土などの掘削土を堤防整備と交わる箇所に埋め立てて処理していたと考えられ、堤防下には局所的な粘性土が分布する状況であると整理した(図-7)。

堤防天端の不陸箇所は旧河道の箇所に当たることが明らかとなり、旧河道が埋め立てられて出来た粘性土の基礎地盤が圧密し、堤体盛土の沈下が発生したものと考えられる。今後の釧路川の堤防天端の高さ管理を行う上では、旧河道の位置を把握することが重要である。

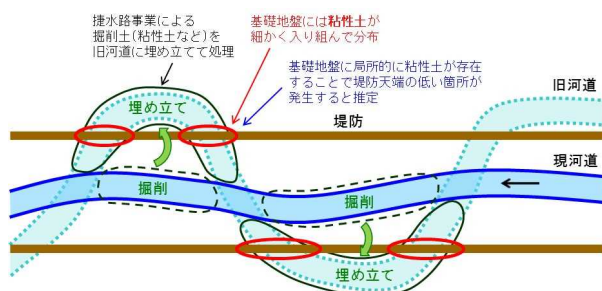


図-7 「堤防天端の不陸部分」と「旧河道」「粘性土」の関係

5. 既設堤防の現地調査や実物大の試験堤防による雨水浸透などの確認

堤防の被災形態から、堤防法面の被災は、堤防天端の不陸箇所に集中した雨水の流れに加え、法肩や法面のシルトを多く含む粘性土の部分に雨水が直接浸透して強度低下を起こしたことが要因と考えられた。また、堤防基礎地盤の粘性土が不透水層となって堤体内の浸潤面上昇させたことも要因の1つとして考えられた。そのため、既設堤防の現地調査に加え、雨水や外水の浸透による堤体の強度低下などを検証するため、実物大の試験堤防による現地実験を実施した。

1) 雨水の堤体への浸透調査(既設堤防の現地調査)

既設堤防の現地調査は、被災を受けた KP45.8 左岸堤防と同様の形状及び堤体材料で構築され、かつ、平成28年8月に被災を受けていない KP45.7 左岸付近にて雨

水の堤体浸透調査を実施した。調査は、平成29年10月から平成30年8月まで、堤防の川表・川裏法面に、深さ方向20cm, 40cm, 60cm, 80cmに土壌水分計を設置して降雨に対する体積含水率の観測を行った。観測期間中にまとまった降雨を観測した期間を抽出して分析した結果から、体積含水率は、降雨開始後1時間から2時間程度の遅れを生じて、地表面からの深さ方向20cm, 40cm, 60cmと、順番に上昇する傾向が確認された。地表面から深度方向に向けて順番に降雨の影響が伝播することが捉えられていることから、この観測結果は被災を受けた釧路川堤防の堤体表層の粘性土部分に降雨が浸透する現象をよく表しているものと言える(図-8)。

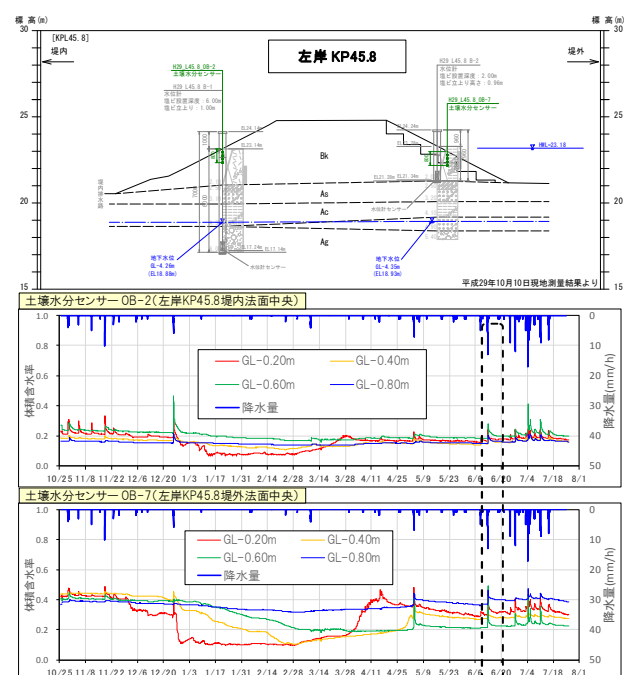


図-8 既設堤防による雨水の浸透確認結果 (H30.6.12~13 抜き出し)

2) 実物大の試験堤防による現地実験

次に、雨水や外水の浸透による堤体の強度低下などの被災への影響を検証するため、平成30年11月に釧路川の高水敷で実物大の堤防現地実験を実施した(写真-2)。盛土の飽和度が上がるとコーン貫入抵抗値が低下することが既往の実物大実験の結果で明らかにされている(山村和也, 久楽勝行, 川口丸尾: 降雨実験からみた斜面の安定解析方法, 土木技術資料, Vol115, No.3, 1973)。釧路川の堤体においても、降雨の浸透による強度低下があったことを想定し、平成28年8月被災時の堤体内の

浸潤面と堤体の飽和度上昇時の堤防表面の強度変化の推移を把握することとした。



写真-2 実物大の試験堤防

現地実験では、釧路川での実現象を再現出来るように、堤体は全体を基本的に火山灰質の砂質土とし、堤防の川表法面部分は火山灰質でシルトの多い粘性土とした（図-9）。法面勾配は既設堤防と同様に2割勾配とした。今回の現地実験は法面への降雨の浸透、法面から堤体内への水分の把握を目的としていることから、基礎地盤への浸透と堤防天端からの雨水の浸透等境界条件の影響を排除するため、堤防天端と基盤面に止水シートを敷設して不透水性を確保した（表-3）。降雨については農業用散水ホースにより散水することとしたが、現地実験当日、事前降雨に相当する自然の雨が降ったことから、それを事前降雨として代替することとした。降雨による散水後、外水による堤体内浸潤面の上昇を確認することを目的に外水位を上昇させた。

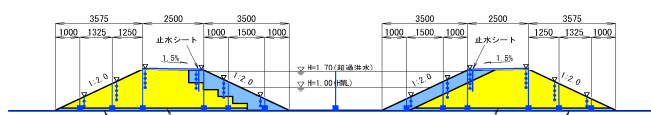


図-9 試験堤防の断面図

表-3 現地実験の仕様（形状、境界条件等）

実堤防/実現象	現地試験
H26(表層), H28(法肩, 法中央の亀裂)の被災形態の違いを確認	川表表面の粘性土施工時の段切りの有無
基礎地盤土質が粘性土	基礎地盤表面に止水シートを敷設することにより、不透水性を再現
堤防法面形状	2割勾配
堤防天端状況(傾斜, アスファルト舗装)	試験盛土天端の勾配(1.5%), 止水シートで降雨浸透を抑止

主な観測項目は、法面部分の体積含水率を把握するための土壌水分計を設置し、降雨の状況に合わせてポータブルコーン貫入試験による法面強度の把握、堤体内浸潤面の観測と堤体材料の室内力学試験を実施した。

雨水の浸透試験では、試験堤防の川表法面（火山灰質でシルトを多く含む粘性土）の表層の土壌水分計の反応より、雨水のみでも堤体表層に浸透することが確認された（図-10）。さらに、ポータブルコーン貫入試験より、試験堤防の川表法面のシルトを多く含む粘性土には雨水の浸透後、法面全体の強度低下が確認された（図-11）。

また、川裏法面（火山灰質の砂質土）にも雨水の浸透が見られ、強度低下については回復している場合もあるが、強度の低下が確認された。試験堤防の川裏法面のように火山灰質の砂質土であっても雨水の浸透により強度低下し、特に基礎地盤が不透水性の場合、法尻が先行的に飽和状態となり弱点になることが考えられる（写真-3）。



写真-3 降雨による川裏法尻の変状（現地試験）

今回の現地実験では、実際の洪水を想定して外水を湛水させた実験を行った。満水状態まで湛水し、水位を低下させた直後から試験堤防の川表法肩でクラックの発生が確認され、外水位が完全に低下した後、法面の中腹から法尻にかけて大きな崩落が発生した。大きな崩落が発生する際は、外水位が完全に下がりきっていた一方で、堤体内に浸潤面が形成されていることが確認された。これらの結果は、堤体内に浸潤面が形成されれば外水位が低下した後であっても、堤体内に浸潤面が残り、法面変状が発生する可能性があることを示している（写真-4）。

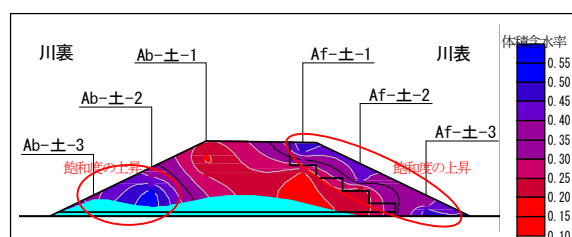


図-10 降雨の堤体浸透（現地試験による体積含水率の変化）

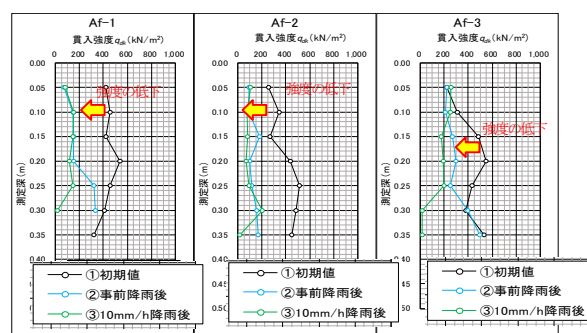


図-11 降雨時の強度低下（現地試験によるコーン強度）



写真-4 外水位低下後に見られた川表法面の変状

6. 釧路川堤防の法面被災要因

堤防天端や法面に降った雨により、堤体に浸透して法尻から飽和度が上昇する。これは、降雨のみで法尻の変状が発生した現地実験でも確認された。

このことにより、釧路川堤防で発生した法面被災は、堤防天端の不陸箇所集中した雨水の流れに加え、法肩や法面の火山灰質でシルトを多く含む粘性土の部分に雨水が直接浸透して飽和度が上昇し、表層の強度低下を起こしたことが被災要因であると考えられる（図-12）。また、火山灰質の砂質土部分についても雨水の浸透による強度低下が発生することとなり、特に基礎地盤が不透水性の場合、法尻の被災の危険性がより高くなると考えられる。

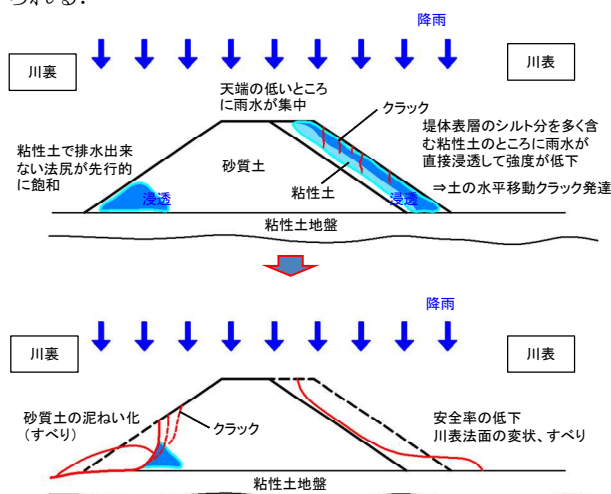


図-12 釧路川堤防の法面被災要因概要図

7. まとめ

治水地形分類図（国土地理院発行）により把握した旧河道と堤防の不陸箇所との関係の分析に加え、従来方法に比べ圧倒的に簡易な手法である地表面から2～3m程度のオーガーボーリングによる調査により、堤防沈下による雨水集中リスクが高い箇所の同定手法を提案することができた。また、現地堤防へのセンサー設置による観測、実物大の堤防実験による夜を徹した連続浸透実験により、釧路川の堤防の安定性検討にあつては、特有の堤防土質条件や河川水位に加えて降雨による雨水の集中による堤体内への浸潤の進行の影響を考慮することが重要であることを解明した。

また、本報告で示した簡易な堤防被災リスク検討方法の立案により、堤防の整備・管理方策の検討作業の負担が大きく軽減され、実河川への技術適用に向けた検討において、河川工学や地盤工学の専門分野を超えて安全で安心な川づくりを検討する先導事例となった。

本取り組みを通じて得られた技術的検討に関する知見は、釧路川の事象の解決のみならず、今後の北海道全体

の川づくりの対応体制の飛躍的な向上に繋がることを期待する。

謝辞：

釧路川の堤防づくりに係る技術的課題の検証には、河川工学と地盤工学両方の専門知識が必要であった。さらに、今回のような新たな課題の検証には、現地の把握に加え、実物大レベルの堤防模型実験や数値解析モデルによる検討など高度な検討を要するものとなった。このため、中央大学研究開発機構福岡捷二氏、名古屋工業大学前田健一氏をはじめとする「釧路川堤防技術検討委員会（平成30年5月～平成31年3月）」を設置し、釧路にて合計5回の委員会を開催するとともに、各委員会前後には個別に打合せを行うなど、集中的に議論を重ね取りまとめを行ったものである。各委員から多大なるご指導とご助言をいただくとともに、現地調査では、北見工業大学川尻峻三氏に多くのご協力と助言をいただいた。関わったすべての方に深く感謝し、ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 釧路川堤防技術検討委員会報告書：平成31年3月
- 2) 独立行政法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント，2013.6
- 3) 国土地理院発行治水地形分類図解説書（平成27年8月）
- 4) 福岡捷二：河川堤防の調査・研究分野に期待することーこれからと100年後と，第5回河川堤防技術シンポジウム，論文集，2017)

除雪機械の故障傾向に関する分析

伊藤 義和¹・植野 英睦¹・斉藤 勉¹

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)

近年、除雪機械の使用年数が大幅に伸び、老朽化した機械が増加傾向であることから、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。その維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的な評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、FTA (Fault Tree Analysis : 故障の木解析) を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析手法であるワイブル型累積ハザード解析で故障傾向の分析を行った。その結果、ワイブル分布の m (形状パラメータ) から故障の傾向を判定でき、使用継続による信頼度 (残存確率) の変化を信頼度曲線図で可視化できることを確認した。

キーワード 除雪機械, 維持管理, ワイブル型累積ハザード解析, 信頼度

1. はじめに

積雪寒冷地における冬期の円滑な道路交通の確保は、地域住民の生活にとって必要不可欠であり、確実な道路除雪体制が求められている。しかし、近年、除雪機械の使用年数が大幅に伸び、老朽化した機械が増加傾向であることから、重大故障の発生に伴う除雪作業停止日数は年々増加しており、道路除雪体制への影響が懸念される¹⁾。

そのため、限られた予算の中、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。その維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、ワイブル型累積ハザード解析による除雪機械の故障傾向の分析を行っている。



写真-1 除雪トラック²⁾

本報では、ワイブル型累積ハザード解析による故障傾向の分析概要と、除雪機械の故障傾向に関する分析結果の1事例として除雪トラック (写真-1) の作業装置について報告する。

2. FTAによる重大故障箇所の抽出

解析対象データは、国土交通省北海道開発局が保有している除雪機械の2007～2015年度に発生した故障データ約4,900件を用いた。このうち、除雪作業が2日以上停止となった故障 (以下、「重大故障」という) 箇所のうち、5件以上発生した箇所について、除雪機械毎にFTA (Fault Tree Analysis : 故障の木解析) で抽出した。

FTAは論理線図解析であり、論理ゲートと事象記号を用いて故障を可視化した図に展開し、因果関係の評価を進めるものである。このとき描かれる階層図が、樹木の形に展開されることから「故障の木解析」とよばれている。論理線図の最上位に好ましくない故障事象を明示し、その発生要因を逐次下位の段階まで展開することによって、故障発生の経路、原因及び確率を分析するなど、因果関係を掘り下げていくトップダウン型の解析手法である³⁾。

除雪トラックの作業装置に関するFT図を図-1に示す。建設機械整備標準作業工数表 (除雪機械編)⁴⁾

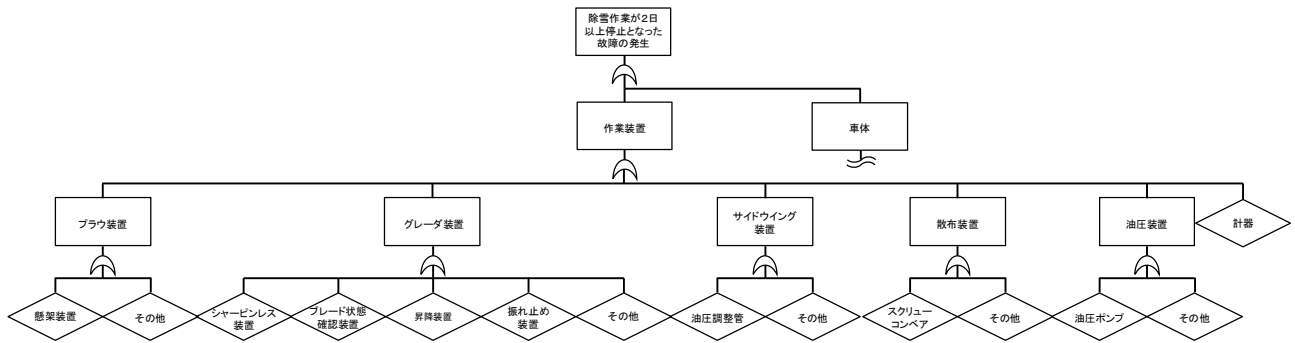


図-1 除雪トラックの作業装置に関する FT 図

の作業項目区分に準じて整理した結果，除雪トラックの作業装置に関する重大故障箇所は 14 箇所抽出でき，グレーダ装置に関する箇所が多い傾向となった。

3. 故障傾向の分析及び信頼度の算出

FTA で抽出した重大故障箇所について，ワイブル型累積ハザード解析を行い，故障傾向の分析とともに信頼度（残存確率ともいう）を算出した。

(1) ワイブル分布について⁵⁾

ワイブル分布は，スウェーデンの科学者ワイブルが材料強度の研究において，材料の破損確率を表す分布関数として提唱したものである．その後，別の科学者が真空管の寿命についても，この分布があてはまることを示した．ワイブル型累積ハザード解析は，この分布を用いた信頼性データ解析手法の一つであり，次の 3 つのパラメータが使われる。

m ：形状パラメータ

η ：尺度パラメータ

γ ：位置パラメータ

m （形状パラメータ）の値によって，ワイブル分布の形状も変化し， $0 < m < 1$ の場合は故障率減少型の初期故障， $m = 1$ の場合は故障率一定型の偶発故障， $m > 1$ の場合は故障率増加型の摩耗劣化故障を表すこととなる。

η （尺度パラメータ）は， m の値に不信頼度（累積故障確率，累積分布関数ともいう） $F(t) = 1 - e^{-1}$ （約 63.2%）となる観測値 t を基準化した際の寿命の尺度を表し，特性寿命ともいう。

γ （位置パラメータ）は，故障が始まる位置を表し， $\gamma = 0$ ならば最初から故障が起こり始め， $\gamma > 0$ は無故障期間があることを表すが，通常は $\gamma = 0$ と考える。

不信頼度 $F(t)$ ，信頼度 $R(t)$ 及び累積ハザード値（累積ハザード関数ともいう） $H(t)$ は，次に示す式(1)，

式(2)，式(3)で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m \right] \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m \right] \quad (2)$$

$$H(t) = -\ln R(t) = -\ln \{1 - F(t)\} = \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m \quad (3)$$

この解析専用に市販されているワイブル確率紙やワイブル型累積ハザード紙，表計算ソフトウェアを使用することにより，3 つのパラメータの推定ができる．また，上記の式に当てはめることにより，バスタブ曲線で表される故障の傾向（初期故障，偶発故障，摩耗劣化故障）の判定や特性寿命，信頼度などが算出できる。

(2) ワイブル型累積ハザード解析について⁶⁾

複数の機器を一斉に使用または試験を開始し，すべての機器が故障するまで観測し続けた「完全データ」といわれる場合は，ワイブル確率を用いたワイブル解析が有効である。

しかし，除雪機械は購入年度が異なり，また，機械が更新に達しても故障に至らないこともある．そのため，故障データの解析については，より有効である累積ハザード法を用いたワイブル型累積ハザード解析を適用した．観測値を稼働時間とした表-1 の故障データ例で，ワイブル型累積ハザード紙を用いた解析手法の手順を示す。

手順 1：解析する故障データを観測値 t が小さい方から並び替える．同じ観測値で故障の有無がある場合は，故障のあるデータを前に，故障のないデータを後に並べる．

手順 2：観測値 t の大きいデータから小さいデータへ向かって，1, 2, …, 6 と逆方向の順位（逆順位）を振る．データが n 個あれば，最も観測値の小さいデータの順位は n となる．

手順 3：故障のあるデータに対して，逆順位の逆

数を求める．この値をハザード値という．
 手順4：手順3のハザード値を観測値 t の小さいデータから順次加えていく．この値を累積ハザード値という．
 手順5：故障のあるデータの観測値 t ，累積ハザードの対のデータを図-2に示す累積ハザード紙などにプロットする．
 手順6：プロットされた点に直線Aをあてはめ，

この直線と平行でハザード紙上の定点である m 推定点（上横軸 $\ln t = 1$ ，右縦軸 $\ln H(t) = 0$ の交点）を通る直線Bを引く．

手順7：直線Bと，上横軸 $\ln t = 0$ との交点を求め，そこから水平線を右に伸ばして右縦軸の目盛りを読む．読み取った値の絶対値が m （形状パラメータ）となる．

手順8：直線Aと右縦軸 $\ln H(t) = 0$ との交点より下横軸へ垂線を下ろし目盛りを読む．読み取った値が η （尺度パラメータ）となる．

以上の手順により導出したパラメータを信頼度の算出式(2)に当てはめることで，信頼度の算出が可能となる．当てはめた式を式(4)に示す．

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4} \right] \quad (4)$$

式(4)を用いて，観測値 t を0～20,000時間までの1,000時間ごとに算出した信頼度は表-2となり，グラフ化すると図-3になる．

この故障データの解析結果は， m （形状パラメータ）が1.4であることから故障率増加型の摩耗劣化故障である．算出された信頼度は使用開始直後から低下し，信頼度が0.5（残存確率50%）で全体の半数が故

表-1 故障データ例

手順1 観測値 t	手順2 故障の有無	手順3 逆順位	手順4 ハザード値 $h(t)$	手順5 累積ハザード値 (累積ハザード関数) $H(t)$
2,000	有	6	1/6	(1/6)=0.166→17%
2,000	無	5	-	-
3,000	無	4	-	-
4,000	有	3	1/3	(1/6)+(1/3)=0.5→50%
8,000	無	2	-	-
10,000	有	1	1/1	(1/6)+(1/3)+(1/1)=1.5→150%

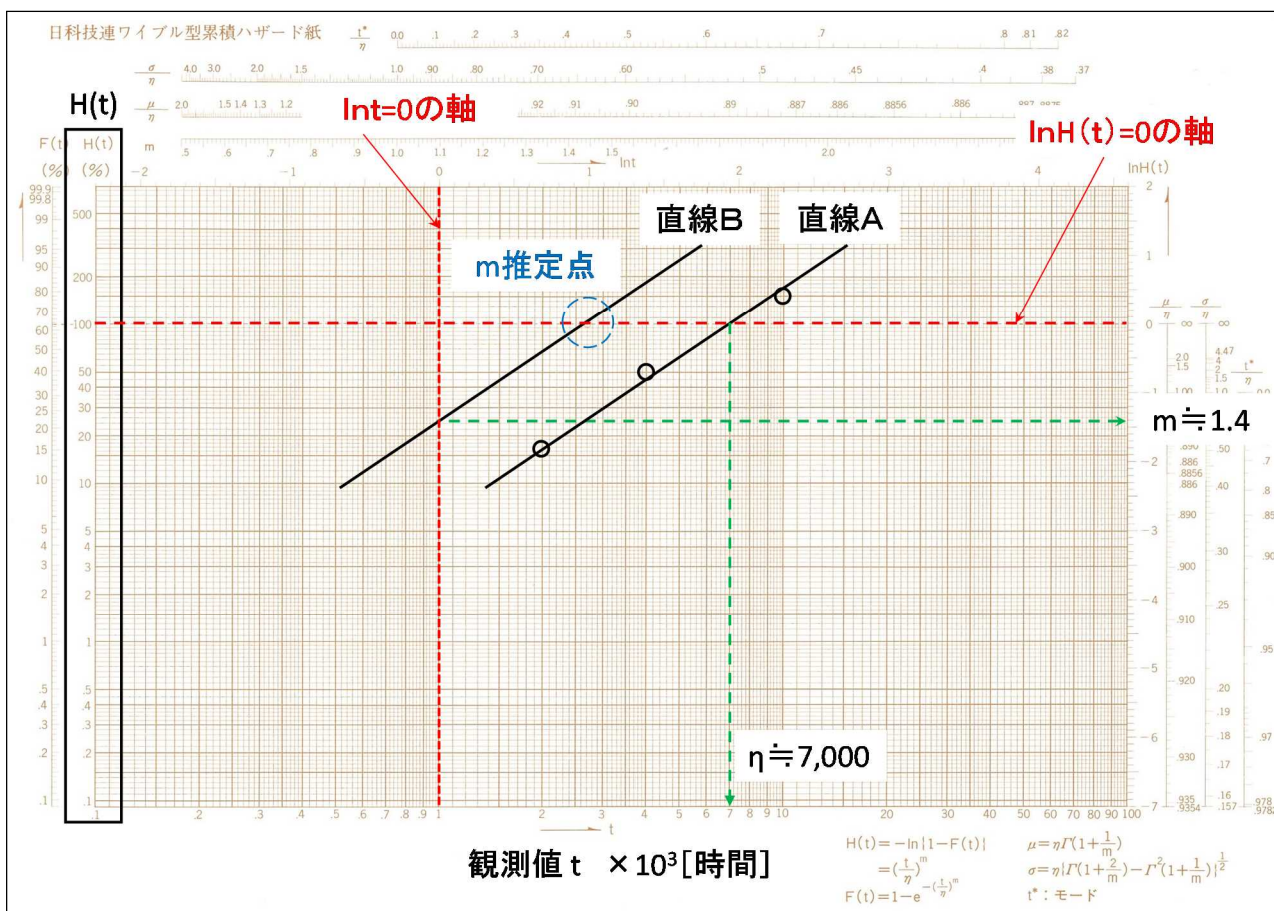


図-2 ワイブル型累積ハザード紙

表-2 算出した信頼度

観測値 t	信頼度 $R(t)$	観測値 t	信頼度 $R(t)$
0	1.000		
1,000	0.937	11,000	0.152
2,000	0.841	12,000	0.119
3,000	0.737	13,000	0.093
4,000	0.633	14,000	0.071
5,000	0.536	15,000	0.055
6,000	0.447	16,000	0.042
7,000	0.368	17,000	0.031
8,000	0.300	18,000	0.023
9,000	0.241	19,000	0.017
10,000	0.193	20,000	0.013

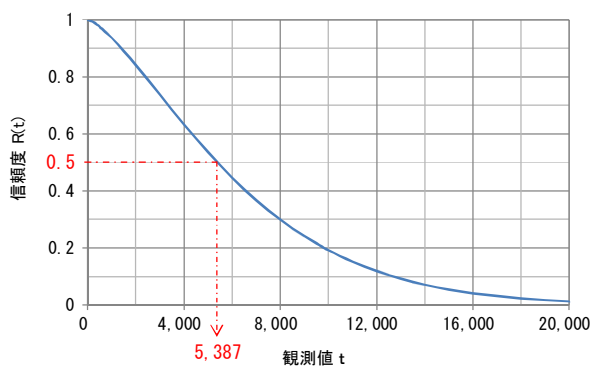


図-3 算出した信頼度（グラフ）

障する時間は 5,387 時間と推定できる。

(3) 除雪トラックの作業装置に関する分析事例

除雪機械の故障傾向に関する分析結果の 1 事例として、除雪トラックの作業装置に関する分析事例を示す。観測値については、故障データに記載されている「走行距離」、「稼働時間」及び「使用年数」で解析を行った。「グレーダ装置・ブレード状態確認装置」の故障を「稼働時間」で確率紙にプロットした結果を図-4 に、確率紙で推定した各パラメータから算出した信頼度曲線図を図-5 に、 m （形状パラメータ）、 η （尺度パラメータ）、 $R(t)$ （信頼度）の算出式及び信頼度が 0.99（残存確率 99%）における走行距離、稼働時間及び使用年数を表-3 に示す。

確率紙にプロットした結果、 $m \approx 1.54$ であることから、「グレーダ装置・ブレード状態確認装置」の故障は、故障率増加型の摩耗劣化故障であることがわかる。稼働時間の信頼度曲線図は、使用開始から 50,000 時間までほぼ一律に低下する曲線となった。

走行距離及び使用年数でも $m > 1$ であることから、故障率増加型の摩耗劣化故障を示しており、信頼度

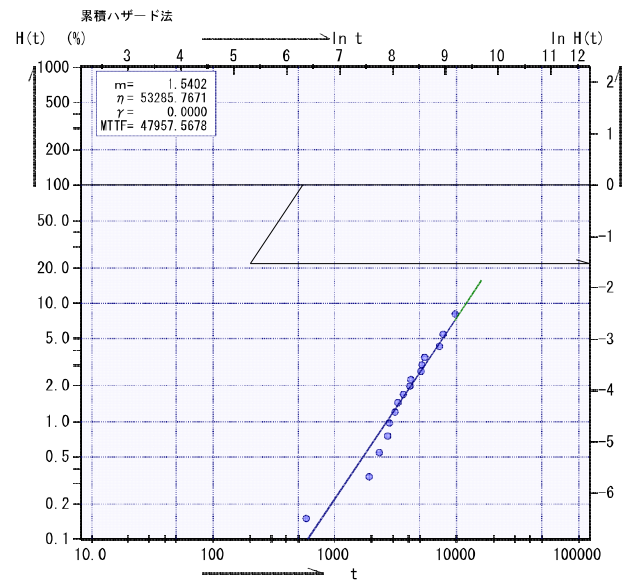


図-4 「グレーダ装置・ブレード状態確認装置」故障の確率紙プロット結果（稼働時間）

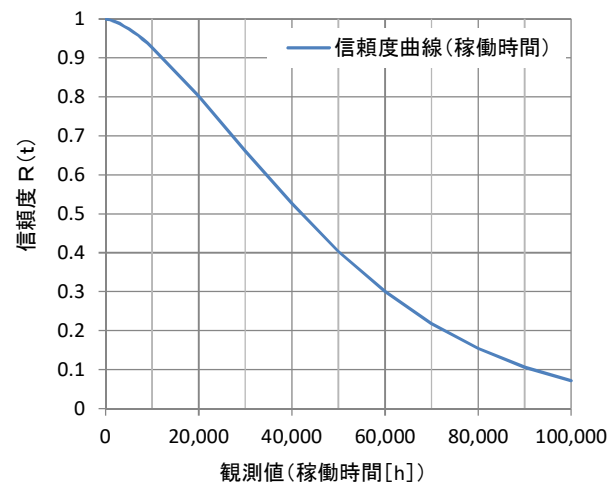


図-5 「グレーダ装置・ブレード状態確認装置」信頼度曲線図（稼働時間）

表-3 m , η , $R(t)$ の算出式及び信頼度 0.99 における走行距離、稼働時間及び使用年数

	走行距離	稼働時間	使用年数
m	1.7285	1.5402	3.0014
η	761,494	53,286	46.5
$R(t)$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{761,494}\right)^{1.7285}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{53,286}\right)^{1.5402}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{46.5}\right)^{3.0014}\right]$
$t_{(R(t)=0.99)}$	53,193[km]	2,688[h]	10.04[y]

が 0.99（残存確率 99%）になる期間は、走行距離で約 53,000km、稼働時間で約 2,700 時間、使用年数で約 10 年となった。

なお、信頼度が 0.99（残存確率 99%）というのは、解析対象台数である 2007～2015 年度に所有してい

表-4 除雪トラックの作業装置に関する重大故障箇所のワイブルパラメータ

重大故障箇所		ワイブルパラメータ					
項目	小項目	走行距離		稼働時間		使用年数	
		m	η	m	η	m	η
ブラウ装置	懸架装置	1.8232	756,128	2.1949	27,772	1.7420	124.5
	その他	4.2939	286,702	2.5978	34,683	13.2893	17.4
グレーダ装置	シャープペンレス装置	1.5563	1,200,334	1.6781	57,386	1.4283	278.0
	ブレード状態確認装置	1.7285	761,494	1.5402	53,286	3.0014	46.5
	昇降装置	1.9974	673,998	1.9567	41,235	4.2253	33.9
	振れ止め装置	2.5759	512,538	2.1363	37,072	3.6213	40.4
	その他	1.6384	758,841	1.4454	57,882	2.0794	70.7
サイドウイング装置	油圧調整管	1.2377	1,409,484	1.2835	76,132	1.3866	139.8
	その他	1.5216	541,269	1.5970	28,411	1.8873	62.8
散布装置	スクリュコンベア	2.9251	317,468	2.6902	14,022	1.5193	73.7
	その他	1.7626	331,866	1.7764	13,558	2.4275	22.2
油圧装置	油圧ポンプ	2.2254	710,688	2.0938	44,599	3.0151	56.1
	その他	2.2180	614,400	4.5576	11,766	1.6782	179.5
計器	全て	3.3296	415,076	2.9021	26,053	4.8795	36.3

た 701 台の 1%にあたる約 7 台に、重大故障の発生が推定されることを意味している。

このようにワイブル型累積ハザード解析を行った結果、除雪トラックの作業装置に関する重大故障箇所 14 箇所のワイブルパラメータは表-4 に示すように、3 つの観測値(走行距離、稼働時間及び使用年数)とも m (形状パラメータ) が 1 以上であることから、摩耗劣化故障であった。

これらの結果から、ワイブル型累積ハザード解析により、除雪機械における故障の傾向(初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障)を m (形状パラメータ) の値から判定でき、信頼度と観測値の関係を信頼度曲線図で可視化できることを確認した。

この信頼度を除雪機械劣化度の定量的評価の指標とし、重大故障を未然に防止できる信頼度の閾値を、整備コストなどを考慮して設定することで、効果的で効率的な除雪機械の維持管理を行えると考える。

4. まとめ

除雪機械劣化度の定量的評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、FTA (Fault Tree Analysis : 故障の木解析) を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析手法であるワイブル型累積ハザード解析で、重大故障箇所に関する故障傾向の分析及び信頼度の算出を行った。また、分析結果の 1 事例として紹介した除雪トラックの作業装置に関する重大故障箇所の故障傾向は、全て摩耗劣化故障であることがわかった。

これらの結果から、ワイブル分布の m (形状パラメータ) の値から故障の傾向を判定でき、使用継続による信頼度(残存確率)の変化を信頼度曲線図で可視化できることを確認した。

今後、除雪機械劣化度の定量的評価に向けた信頼度の閾値設定方法の検討などに取り組み、整備コストや故障発生による社会的影響度などを考慮した除雪機械の維持管理手法を提案すべく、研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 大上哲也・木下豪・中村隆一：除雪機械体制と除雪機械の老朽化リスクの見える化の検討，第 61 回北海道開発技術研究発表会，2018.2
- 2) 国土交通省北海道開発局網走開発建設部ホームページ掲載の写真を一部加工：https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/douro_seibi/v6dkjr0000002pum.html (2019 年 9 月 9 日確認)
- 3) 福井泰好：入門信頼性工学，pp.113，2006
- 4) 社団法人日本建設機械化協会北陸支部：建設機械整備標準作業工数表(除雪機械編)(平成 22 年度版)，pp.13～35，2010
- 5) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.68～75，2009
- 6) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.129～131，2009

渡良瀬川流域における小中学校の空き教室を 利活用した草の根防災減災教育支援プロジェクト

亀井 めぐみ

関東地方整備局 渡良瀬川河川事務所 調査課 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3) .

近年頻発化、激甚化する自然災害に備えたソフト対策の一環である防災減災教育は、児童・生徒の段階からの展開が望まれるが、当該教育に割り振られた時間は少なく、当事務所による出前講座等による支援も限られていることから、常日頃から接し、理解を深めることができる教育環境を確立する等、具体的な支援が必要である。このような背景を踏まえ、当事務所では児童・生徒が日頃から防災減災に関する情報に触れることができる拠点として、小中学校の「空き教室」に着目した草の根防災減災教育支援プロジェクトを立案し、2018年度に構築、着手した。本稿は、初年度における成果及びその後の進捗状況について報告するものである。

キーワード 草の根防災減災教育支援、空き教室、地域防災力向上

1. 背景

国土交通省は、頻発する洪水の備えとしてハード・ソフト両面からの防災減災対策を地方公共団体、流域の企業、住民等と連携を図りながら進めている。その内、特に、防災減災教育は「(自ら或いは他人の) 命を守る」ことに係る重要な事項であることから、児童・生徒の段階からの理解が望まれる。

一方、実際の教育現場では限られた時間での防災教育の実施の他、少子化に伴う児童・生徒の減少等による廃校、普通教室として使用されない施設の取り扱い、開かれた学校への取組み等、様々な対応が必要とされている。

以上の背景を踏まえ、渡良瀬川河川事務所は、防災減災教育の日常性確保の為、小中学校に存在する空き教室の利活用に着目し、両者の課題解決に寄与することを目的とした事務所独自のプロジェクトを2018年に構築、着手した。

2. 目標設定

本プロジェクトでは、渡良瀬川流域における小中学校の空き教室を拠点とし、安全・安心・安らぎ(安3つ)をテーマとした防災減災教育により、地域防災力の強化を図ることを上位目標として設定した(図-1参照)。

なお、本プロジェクトは、英語表記(The Partnership

Project for Disaster Resilience Education by utilizing empty classrooms at Elementary and Junior high schools in Watarase River Basin) から「PDEc」を略称とした。

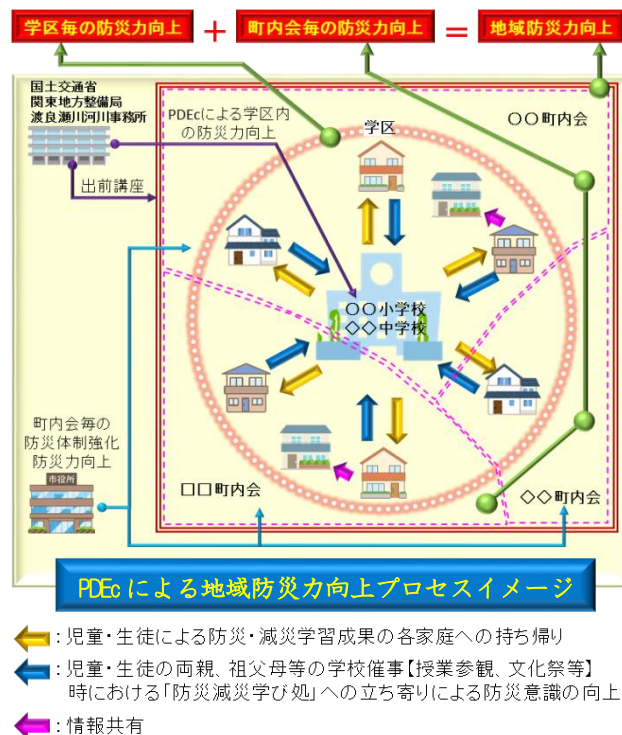


図-1 地域防災力向上プロセスイメージ図

3. 活動計画

上位目標達成に向け、4つのフェーズを設定した。

フェーズⅠ：足利市立第三中学校によるパイロット化

フェーズⅡ：防災減災教育を実施している他の足利市立小中学校での展開

フェーズⅢ：足利市教育委員会との連携による小中学校での展開

フェーズⅣ：渡良瀬川流域における小中学校での展開

なお、各フェーズにおける目標達成時期は、フェーズⅠが着手年度内、フェーズⅡが着手後2～3年以内、フェーズⅢ以降は中長期的な位置付けとして設定した。

4. カウンターパートとの実施体制の確立による双方の役割分担、活動内容等の調整

実施体制については、カウンターパート（空き教室を提供する学校側）と当事務所の関係者で構成されるPDEc実行委員会（表-1参照）により確立を図る。カウンターパート側の構成は、学校長、教頭、その他の教諭及び生徒会・安全委員会の生徒、事務所側は所長、副所長、関係課長及び出張所長を基本とした。

当該委員会により、両者の役割分担、投入内容の調整及びプロジェクトの進捗管理を行う。基本的な役割分担として、カウンターパートは、空き教室、展示ボード等の提供、施設及び展示パネル等の維持管理担当者の選定及び日々の管理、事務所側は、展示パネル・展示物、配布物等の作成を担うものとした（表-2参照）。

5. 実施にあたっての創意工夫

(1) 展示テーマ設定

防災減災を間接的に、親しみやすく接することができるようなテーマを設定することとし、当事務所における将来の方向性である「両毛の地に安全、安心、安らぎを運ぶ渡良瀬川」で使用している「安全、安心、安らぎ」の3つの言葉の頭文字「安」に着目した（図-2参照）。

「安3つ」を「あんみつ（餡蜜）」に掛け、3種類のあんみつを「渡良瀬あんみつ」と名付け、それぞれのあんみつをテーマとした防災減災に関するパネルの作成、展示を行うものである。

(2) 展示内容

渡良瀬川流域に係る情報を基本とし、自然災害等に関する全国的、国際的な内容を基本形とした。なお、展示後は、カウンターパートからの要請に基づいたアフターケアを行う。

表-1 PDEc実行委員会（基本形）

〇〇学校	渡良瀬川河川事務所
1. 校長	1. 所長
2. 教頭	2. 副所長
3. 教務主任	3. 〇〇課長
4. 安全委員担当教諭	4. 〇〇出張所長
5. 安全委員担当生徒	
6. 生徒会本部役員生徒	

表-2 両者の投入内容（基本形）

〇〇学校	渡良瀬川河川事務所
1. カウンターパート（施設管理者を含む）の配置	1. 担当者の配置
2. 空き教室及び当該教室室内設備	2. 展示パネル
3. 空き教室の電気、水道	3. 展示物
4. 展示用具（展示ボード）	4. 展示用具（木製展示柱）
5. その他	5. その他（暖簾、案内板等）
	6. ポスター、配布・閲覧用印刷物
	7. その他



図-2 渡良瀬あんみつイメージ図

(3) 展示環境

展示テーマを「渡良瀬あんみつ」と設定していることから、利用する空き教室を、あんみつを提供する「甘み処」ならぬ「防災減災学び処」と名付けた。「甘み処」の雰囲気を感じられるよう出入り口に「暖簾」を設置し、案内板等の色彩文字体等も配慮した。また、渡良瀬川河道内樹木を利用したパネル展示柱を作成し、利活用した。

(4) 維持管理

小中学校の空き教室を利用するため、カウンターパート側に日々の管理を一任する体制とした。カウンターパート側が選定した維持管理担当者に対して、事務

所から委嘱状を交付し、開店時からの展示物、レイアウト等の変更、別教室への移動等も含め、カウンターパートの責任により実施される。

6. 2018年度の成果

足利市立第三中学校をパイロット校に位置付け、2019年1月28日に一号店として開店した。

(1)パイロット校指定の背景

足利市は1947年(昭和22年)9月のカスリーン台風による甚大な被害に見舞われた歴史的背景を有している。足利市立第三中学校では、その歴史的背景及び近年の頻発する自然災害を踏まえ、2011年からPTA役員の方々を中心とした多くの方々の協力による防災教育を実施する等、防災意識が高く、本プロジェクトの趣旨と一致していることから、パイロット校として位置づけた。

	展示パネル内訳	パネル(A1)数
a	プロジェクト概要	1
b	安全あんみつ	19
c	安心あんみつ	6
d	安らぎあんみつ	6
e	裏メニュー	6
f	特別メニュー	10
	合計	48

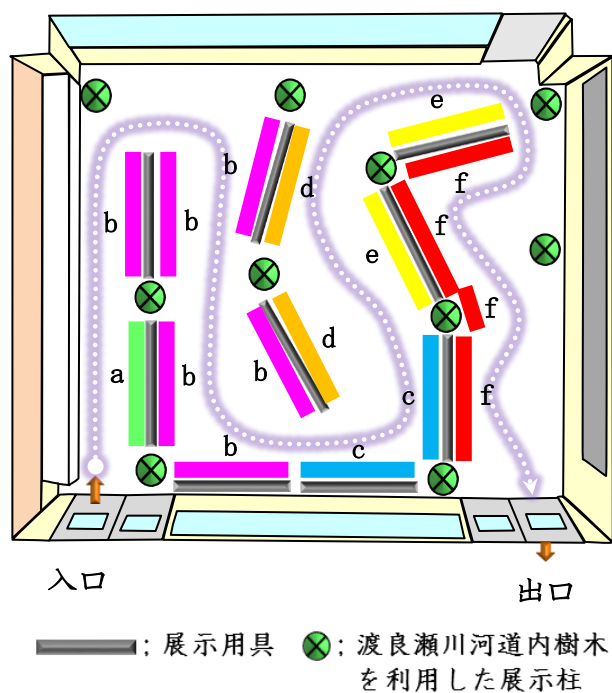


図-3 展示パネルレイアウト図 (足三中店)

(2)プロジェクトにおけるパイロット校の位置づけ

上位目標達成に向け設定した4つのフェーズの内、パイロット校における取り組みをフェーズⅠとして位置づけた。

(3)活動経緯

双方の代表者で構成するPDE c 実行委員会を設立し、プロジェクトの進め方、役割分担、投入、維持管理等について協議を行った。

(4)展示内容

「渡良瀬あんみつ」の内、「安全あんみつ」では渡良瀬川における砂防事業、河川事業等、「安心あんみつ」では渡良瀬川の維持管理、防災体制等、「安らぎあんみつ」では渡良瀬川の利水、環境等に関するパネルを作成した。更に「裏メニュー」として、近年の自然災害の紹介、「特別メニュー」として東南アジア、中央ヨーロッパの河川・都市についても展示内容に加えることで、A1サイズのパネル計48枚が最初の展示構成となった(図-3、図-4参照)。なお、事務所による展示パネル内容の時点修正、新たなパネルの追加を適宜行うと共に、カウンターパートからの要請(展示内容に関する詳細情報、関連情報等)に応じた対応も並行して行うこととしている。

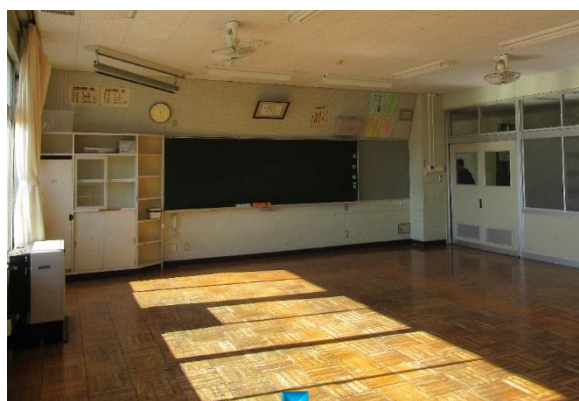


図-4 空き教室の変化



図-5 開店式典の様子（足三中店）

(5) 施設管理

当該施設の日々の維持管理については、当該施設が中学校内にあることから、カウンターパートとの調整結果を踏まえ、当該校の生徒会本部役員及び生徒会安全委員会の生徒が担当する。また、開店後の展示レイアウト、パネル等の移動も含めたパネルの利活用については、カウンターパート側に一任した。

なお、2019年1月28日に開催した開店式典において、事務所から生徒会長及び生徒会安全委員長に委嘱状を交付した。

(6) 開店式典

2019年1月28日、足利市立第三中学校において「防災減災学び処 渡良瀬あんみつ 足三中店」の開店式典を開催した。

開店式典は、委嘱状交付、感謝状授与、テープカット、暖簾あげ、内覧会で構成した（図-5参照）。

表-3 開店式典に係る報道結果

名称	日時等	タイトル
1) とちぎテレビ	1月28日 とちテレ ニュースlife	空き教室活用し防災学ぶ 第一号拠点が開所
2) 下野新聞	1月29日 3面カラー	空き教室に防災教育拠点
3) 日刊建設新聞 (栃木県全県版)	1月30日 2面	空き教室利用し防災教育

(7) 報道結果

開店式典開催に先立ち、2019年1月23日に事務所が記者発表を行い、事前登録方式での取材対応を募ると共に、カウンターパートも関係者への情報提供を行った。当日の取材は、とちぎテレビ、下野新聞、日刊建設新聞の3社であり、それぞれの報道結果を表-3に示す。

7. 2019年度の進捗状況

フェーズⅡにおける最初の実践校として足利市立協和中学校を位置付け、2019年9月11日に二号店を開店した。

(1) 開店までの経緯

当事務所による当該校PTA主催の防災講演会開催に向けた協議の中で、空き教室がない学校に対する当該プロジェクト展開の可能性について、カウンターパートからご相談頂いた。

パイロット校同様にPDE c 実行委員会を設置し、協議を進め、図書室を有効利用する方針で合意に至った。なお、「渡良瀬あんみつ 足利協和店」開店については、2019年9月9日に開催された防災講演会の中での紹介を経て、翌々日の9月11日、開店式典に至った。

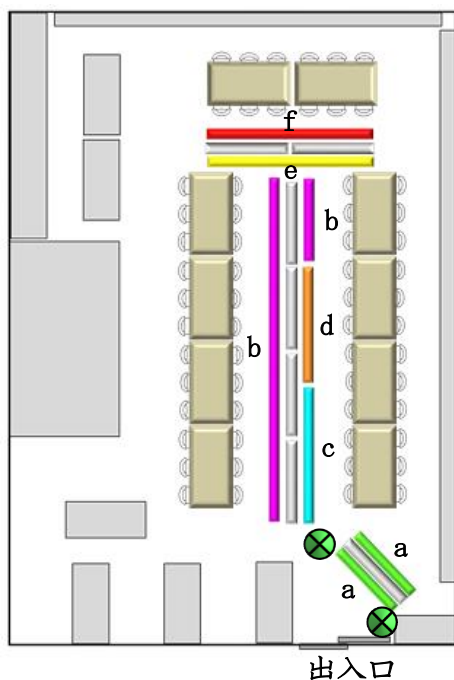
(2) 展示内容

展示パネルは、カウンターパートがパイロット校における展示パネル目録から選定した41枚のパネル（A1サイズ）を対象とした。また、展示レイアウトについては、カウンターパートとの協議を経て、図書室利用に支障のない配置とした（図-6、図-7参照）。

(3) 施設管理

パイロット校同様、当該施設の日々の維持管理については、カウンターパートとの調整結果を踏まえ、当該校の生徒会安全委員会の生徒が担当することとし、開店式典において、事務所から委嘱状を交付した（図-8参照）。

	展示パネル内訳	パネル(A1)数
a	プロジェクト概要	6
b	安全あんみつ	14
c	安心あんみつ	5
d	安らぎあんみつ	4
e	裏メニュー	6
f	特別メニュー	6
	合計	41



—: 展示用具 ⊗: 渡良瀬川河道内樹木
を利用した展示柱

図-6 展示パネルレイアウト図 (足利協和中学)



図-7 図書室の変化



図-8 開店式典の様子 (足利協和中学)

8. 開店後の各校における利活用状況

(1) 足利市立第三中学校

学校行事に合わせた関係者への見学会開催、地域に向けた広報誌、ブログ等への掲載を通して、新たな教育スタイルへの取り組みを積極的に展開されている。また、各教科における教材、参考資料としての活用、来年度開催予定の文化祭における展開等も伺っている。

施設場所については開店以降は3階の教室を利用しているが、今後は地域の方々にもご覧いただけるよう1階への移動も検討されている旨、伺っている。

事務所としては、適宜展示パネルの更新を行っているが、当該校による今後の利活用を踏まえ、パネル内容の深化、追加等、適切に対応することとしている。

(2) 足利市立協和中学校

防災講演会及び当該学び処の展示に基づいた内容に沿って、今後、足利市少年消防クラブ活動報告会で発表を行う意向であることから、事務所として、資料提供、アドバイスをすることとしている。また、来年度の文化祭における利活用についても検討されている旨、伺っている。

9. 今後の展開

パイロット校の開店以降、本プロジェクト説明用パンフレット、展示パネル目録を作成し、事務所独自の取り組みとして、幅広く情報発信している。

プロジェクト校については、必要に応じて調整、協

議を行うこととしているが、具体的な運用を行いながら、課題抽出を行い、今後の展開に反映させる計画である。

一方、事務所としては、展示パネルの更新が必要となることから、素材収集、パネル化への作り込み等を日頃から留意して進めることとしている。

また、2019年5月18日に40年ぶりに足利市内で開催された第68回利根川水系連合・総合水防演習における事務所展示ブースにて「渡良瀬あんみつ」を出店すると共に、10月末に10日間、足利市庁舎1階ロビーにおける臨時出店予定もあり、事務所独自の展開も並行して積極的に取り組んでいる。

最後に、本プロジェクトは「草の根防災減災教育支援プロジェクト」の内、空き教室を利活用した防災減災教育拠点づくりの内容であるが、これと同時並行的に、流域内高等学校オリジナルデザイン防災ゲームカード作成による地域特性を生かした魅力ある防災減災教育ツールの整備、広報施設、出前講座等の活用、充実等も展開しており、これらの相乗効果により、所期の目標設定に向け、柔軟な発想とカウンターパートとの連携の維持、強化を進めることとしている。

謝辞：本プロジェクトは、事務所独自の取り組みであり、プロジェクトの構築、着手及びフェーズⅠの事前・事後を通じ、プロジェクト校である足利市立第三中学校及びフェーズⅡにおける最初の実践校である足利市立協和中学校の両校の皆様からのご理解、ご協力と共に適切なご指導を賜った。この場を借りて、改めて感謝申し上げる。

TEC-FORCE活動報告と得た知見について

～若手職員の自己啓発～

藤田 怜

東北地方整備局 能代河川国道事務所 工務第二課（〒016-0121 能代市鹹渚字一本柳97-1）

平成30年7月豪雨で被災地の1つである岡山県にTEC-FORCE隊員として若手職員でありながら任命・派遣された。本稿ではTEC-FORCE活動中に得た経験や知見について報告する。被災現場では豪雨による法面の流出が確認され、これに起因した土砂や流木等による排水施設の閉塞が更なる被害に繋がった形跡が見られ、雨水の処理の重要性に気づくことができた。極端な降水現象が増加している昨今、被害の予測や状況把握のための備えが重要と考えられる。

これらの経験からさらに研鑽を深めつつ、若手職員の育成のためにも今後の若手職員によるTEC-FORCEでの活躍に期待する。

キーワード TEC-FORCE, 若手育成, 雨水, 排水

1. はじめに

TEC-FORCEは、大規模な自然災害等に際して、被災自治体が行う被災状況の迅速な把握、被害の拡大防止、被災地の早期復旧等に対する技術的な支援を円滑かつ迅速に実施するものである。

そのため派遣には即戦力となる経験を積んだ職員が対象となる場合が多いものと認識していたが、平成30年7月豪雨において発動されたTEC-FORCEに自分が若手職員でありながら任命された。現場経験が少ないこともあり活動中は状況把握や要領を得るのに時間を要し大変苦慮したが、今後の業務に活かせる印象を強くもった。

本報告は若手職員である自分が経験したTEC-FORCEの活動内容と、そこで得た経験や知見について報告するものである。



写真1 美作市との事前打ち合わせ

2. TEC-FORCE への任命から活動まで

TEC-FORCE活動に派遣されたのは、平成30年7月豪雨において被災した岡山県美作市。能代河川国道事務所からは道路班として4名が任命された。その中で採用3年目の若手職員の自分が任命されたのは驚いたが、その責任の重さと経験が浅いことの不安を強く感じていた。

しかし、現場に到着するとそのようなことを考えている余裕はなく、同行した先輩職員たちの指示のもと、活動することに集中して、とにかく身体を動かしていた。

TEC-FORCE活動は大きく現場作業と内業に分けられる。事前に美作市役所で担当者から現地状況等について説明を受けた（写真1）後、現場では被災箇所の位置や範囲、規模の測定、構造物等の損傷状況の確認、原因の究明から応急的・本復旧案の対策の検討を行った（写真2）。



写真2 現地調査

内業においては現地調査を終えて本部に戻った後、現場でのスケッチや写真を基に被災状況の記録や被害額の算定、復旧対策案などを所定の報告書にとりまとめた。作成した報告書は先発班の調査結果分を含め美作市長へ、調査結果の説明とともに報告し手交した。（写真 3～5、図 1）



写真3 本部での内業の様子

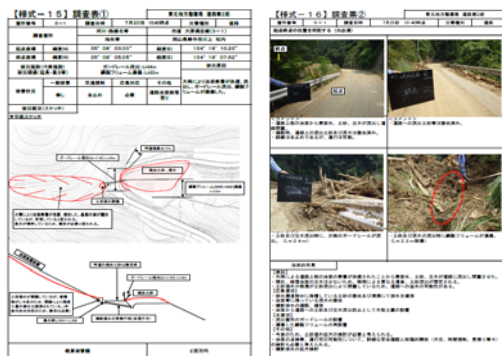


図1 報告様式



写真4 美作市長へ報告書の説明



写真5 美作市長への手交完了

3. 被災現場での気づき

被災現場の中で被災状況が顕著な箇所を紹介する。被災箇所は山中にある市道で、山側の自然法面が雨で洗掘され法面表層の土砂や岩石が流木等とともに流出し道路上に堆積したり、側溝や横断排水を閉塞させていた。また、新たな沢道が生まれ大量の雨水が山側から流れたことから、道路本線部の盛土内の水位が上昇し、安定性が低下し崩落していた。（図2、写真6～9）

被災現場を調査していく中で、ある共通点に気づいた。

①被災箇所の多くは集中豪雨により自然斜面や法面が流出していること。

②排水施設が土砂等で埋まり排水機能を有しなくなり、被災を拡大した形跡があること。

いずれにしても雨水が起因したもので、雨水の処理が如何に重要であるかを知った。①に関してはなかなか対策できるものではないと見たが、②については雨の強さによるが工夫しだいで対応できるものがあると感じた。

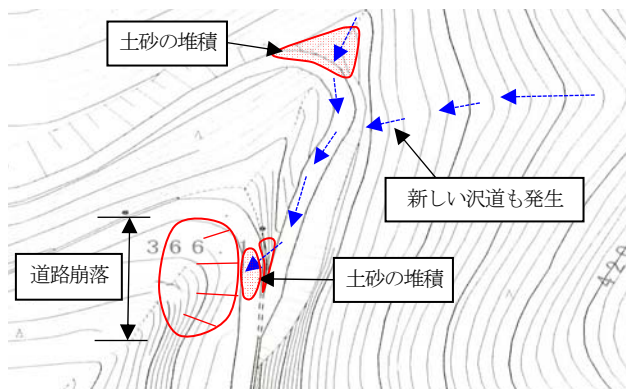


図2 現場スケッチ



写真6 自然斜面からの土砂流出



写真7 今回の被災で発生した沢道



写真8 道路の崩落



写真9 側溝の閉塞

4. 雨水の処理の重要性

TEC-FORCEから帰還してから間もなく、自分が担当する道路の改築現場で、岡山県の被災地とは比べものにならないが比較的強い雨が降り、法面の縦側溝から水が溢れる事象が発生した。（写真10、11）原因は法面の上部が工事中で裸地だったことや、短時間での多量の降雨により他の側溝から溢れた雨水が勾配などの位置関係から流入したものである。幸いにも法面が流出するような被災拡大はなかったが危ない状況であった。後日、縦側溝に流れる雨水を分散させるため、土のうとポリ管で応急的に2系統とする対応を行った。それによって、その後同程度の雨でも同様の事象は発生せずに済んだ。（写真12）この事象は今回のTEC-FORCEの被災現場で強く感じたこと「雨水の処理の重要性」を思い出し、それを裏付けるものだった。

一方で近年、大雨日数や極端な降水現象発生が増加が報告されており、それらは地球温暖化が関係している可能性が指摘されている。表1は気象庁が発表した1時間降水量が50mm以上の集中豪雨の年間発生件数を表したグラフである。極端な降雨が1975年以降は増加傾向にあることを示しており、現にこのような集中的な降雨は毎年場所を問わず各地で発生している状況であることから、今後同じような災害が東北管内でも十分起こりうるものと考えられる。

表1 極端な降水現象発生状況¹⁾

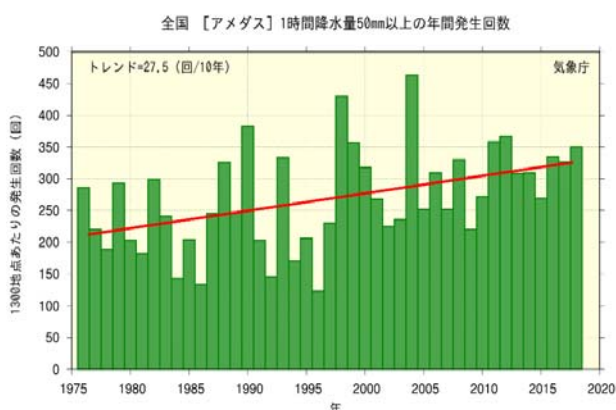


写真10 本線への越水



写真11 縦側溝越水の確認



写真12 応急対策実施後

害の予測や被災時の復旧方法の検討，二次災害の防止といった面についても常に意識しなければならないと強く認識している。

5. 災害に備えて

自分が所属する東北地方整備局では2011年3月に東日本大震災という未曾有の災害を経験した他，最近では自分の想像を遙かに超える規模の台風被害も少なくない。この両方に共通して言えることは，被災の全体像を早急かつ的確に把握することが最重要と考えられる。その為にも，被災状況をその場から素早く共有できるツールと技術を備えておくことが求められる。

今年度行われた東北地方整備局の防災訓練において，現場から公共ブロードバンド移動通信システム（以後，「公共BB」）を使用したリアルタイムの映像による状況報告訓練の機会を与えてもらい経験することができた。

（写真13）これは国土交通省のCCTV設備や道路情報表示設備、衛星通信車を利用し，約5kmの範囲内で撮影した映像を光ケーブルや既存の衛星通信を介することで，公共の通信インフラを使用することなく対策本部や支部と情報共有することが可能となる。被災現場ではガレキや汚水，故障車などで車での進入が困難と想定される場所でも撮影者さえ進入できれば映像が共有できる点は非常に有効と感じられた。

と同時に今回、自分が派遣されたTEC-FORCE活動では、ある程度全体像が把握されたあとの詳細調査を担当したが，公共BBによる状況報告は，災害初期段階でリアルタイムに状況把握する上で有効なツールであると認識した。

このようなツールも今後第一線で活動するため，しっかりと活用できるように備えておかなければならない。



写真13 公共BBによる映像共有訓練

6. まとめ

今回，TEC-FORCE活動を通じて集中豪雨災害の甚大さを知った一方で，その活動中の多くのことが勉強になった。若手職員の育成にあたっては「若手育成プログラム」など技術力強化に向けて取り組んでいるが今回のTEC-FORCE活動も自分にとってはひときわ大きな経験となり，今後の業務に活かしていかなければならないと強く感じたことなど，非常に有益であった。防災訓練においても早急かつ的確な被災状況の把握の重要性，公共BBといった最新技術を用いた情報共有ツールの有益性を学ぶことができ，災害時の備えの重要性を再認識する機会となった。

毎年各所で豪雨や地震による災害でTEC-FORCE活動が行われている中，若手職員に声がかかる機会も今後は多くなっていくものと思われる。その際は若手職員だからと萎縮することなく自信を持って，国土交通省職員として自治体のため戦力になってもらいたいし，自分自身も今回の経験をもとにさらに研鑽を深めていきたい。

7. 謝辞

岡山県でのTEC-FORCE活動にて，現地での調査のあり方や考察など細部にわたりご指導いただきました，佐々木建設専門官を始めとする隊員のみなさまに深く感謝いたします。

また，本論文の作成にあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さいました増事務所長を始め，関係者の皆様にも心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

8. 参考文献

1) 極端な降水現象発生状況：気象庁HP「大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化」

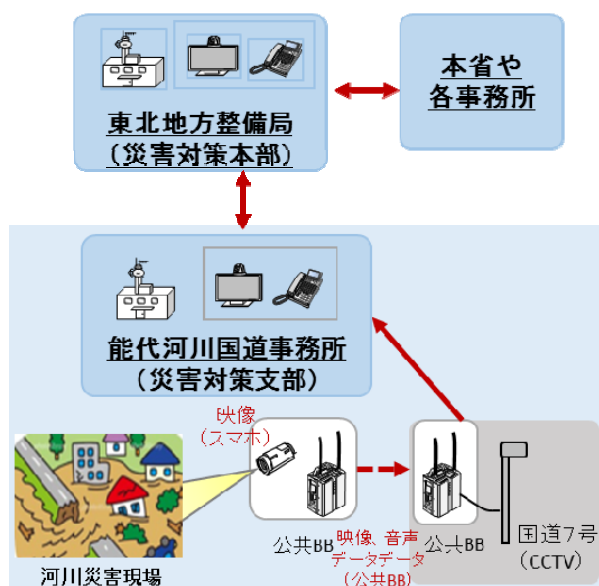


図3 公共BB移動通信システム

2016年出水後の十勝川における流路変動および側岸侵食について

川村 里実¹・大石 哲也¹・矢部 浩規¹

¹(国研)土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

十勝川水系では、2016年8月出水時、流路変動に伴う大規模な側岸侵食により深刻な被害が多数発生した。その後約2年が経過した2018年の夏期出水において小規模な出水にも関わらず側方へ約40mもの河岸侵食が発生した。本研究では、2016年出水後に十勝川で生じた流路変動に伴う側岸侵食を報告するとともに、大規模な出水後に流路の側方への移動が活発になり小規模出水でも比較的大規模な側岸侵食が発生する過程を考察した。

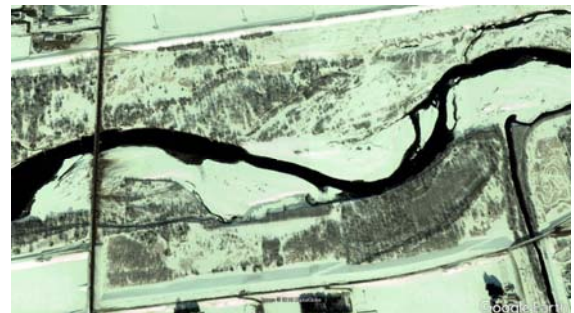
キーワード：自然災害，側岸侵食，流路変動，堤防被害

1. はじめに

十勝川水系の急流区間では、出水時の河道内流路の変動が激しいため河岸の側方侵食による堤防決壊等の被災が懸念されている。どのような条件下で大規模な側方侵食が進行するのかを把握することは、効果的かつ効率的に整備を実施する上で重要となる。

十勝川水系では、2016年8月に茂岩観測所等の12箇所の観測所で既往最大水位を記録する大規模な出水が発生し、この時、流路変動に伴う側岸侵食によって堤防決壊や護岸損壊などの深刻な被害が多数発生した。その後約2年が経過した2018年の夏期出水において、小規模な出水にも関わらず比較的大規模に河岸侵食が進行した箇所が複数確認されている。写真-1に示す十勝川KP63付近では、2018年出水時、蛇行した流路の水衝部で側岸侵食が進行した。この地点では、後述するように側方へ約40mもの河岸侵食が発生し、堤防の侵食が懸念されるまでに至った。2016年に経験した大規模な出水を経て、その後、十勝川では流路変動や側岸侵食が以前より活発になっている可能性がある。本研究では、十勝川KP63で

生じた流路変動および側岸侵食を例として報告し、小規模出水にも関わらず比較的大規模な側岸侵食が発生した過程を考察する。



2012. 2 撮影 (Google Earth)



2016. 8 撮影 (Google Earth)



写真-1 十勝川 KP63 付近 (2018年出水で側岸侵食発生箇所)



2016. 11 撮影 (帯広開発建設部)

写真-2 十勝川 KP63 付近の河道変遷

2. 対象箇所概要

本研究では前出の十勝川KP63付近で生じた流路変動および側方侵食を対象とする。この区間における河床勾配は約1/400、河床材料の平均粒径は27.1mmであり¹⁾、セグメント1に分類される箇所である。当該箇所の概要を以下に説明する。

(1) 河道変遷

対象箇所の河道変遷を写真-2に示す。2012年2月および2016年の大規模出水前後の航空写真である。

(a) 2016年出水前の河道状況

2012年から2016年出水までは砂州形状に若干変化があるが河岸の位置に大きな変化がみられないことから、この間は側岸侵食はほとんど生じていないことがわかる。対象箇所の上流に位置する芽室太観測所地点の年最大流量²⁾を図-1に示す。2018年は暫定値ではあるが、2012年から2016年出水までの間、2018年と同等規模の出水を幾度か経験していることが確認できる。このことから、2016年出水前は2018年と同規模な出水で大きな河岸侵食は生じていなかったため、2018年の出水規模で河岸侵食の発生を想定するのは難しかったと考えられる。

(b) 2016年の大規模出水による河道内の流路変化

2016年出水の前後では、元々蛇行していた流路の振幅が増大している。これに伴う変化の特徴として以下の二つの点が挙げられる。

- ・振幅が増大しながらも波長は同程度かやや短くなり、流路の湾曲（蛇行角）が著しく増大した。流路の蛇行角は流路内の砂州の移動や停止など土砂の堆積場所に影響するため³⁾、湾曲の程度が大きく変化した場合は、河床変動や流路変動の特性が出水前とは異なる可能性がある。
- ・右岸側の水衝部で植生域の流失を伴う側方侵食が生じた、これまで河川流にさらされていた河岸とは異なる新たな侵食面が露出している。新たな侵食面では、草木の定着状況⁴⁾や河岸構成材料の違いなどによって、侵食特

性が出水前の河岸とは大きく異なる可能性がある。

(c) 2018年出水時による側岸侵食

2018年の夏期出水時にKP63付近において写真-2と図-2中に図示するように河岸侵食が進行した。堤防侵食が懸念されるまでに至ったため、緊急的に河道内の掘削やブロック設置などの対応が実施された。

(2) 河床材料および河岸構成材料

KP63付近の河岸を写真-3に示す。写真は2018年夏期出水後の調査時のものである。河岸の侵食面は、礫混じりの細砂で構成され、粘着性はなく、細砂が移動すると容易に崩落が生じる状況が確認された。また、付近の河道内の河床は写真-4のように主に礫で構成されており、河床材料よりも河岸の構成材料の方が動きやすい状況にある。2016年出水以前の河岸の状況が不明のため、2016年出水前後の違いを比較することはできないが、少なくとも2016年出水後の河岸の構成材料は侵食に対して非常に脆弱であり、このことが2018年の小規模出水で河岸侵食が進行した主要因の一つと考えられる。

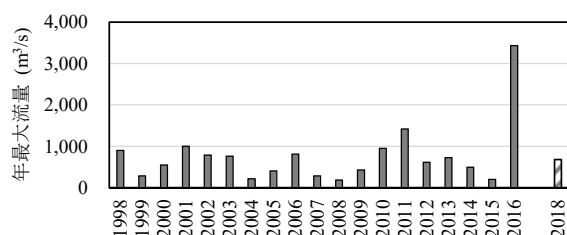


図-1 年最大流量²⁾（芽室太観測所、2018年は暫定値）

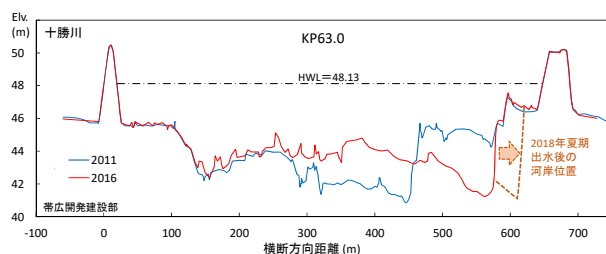


図-2 2016年出水前後の横断形状の変化（十勝川 KP63.0）

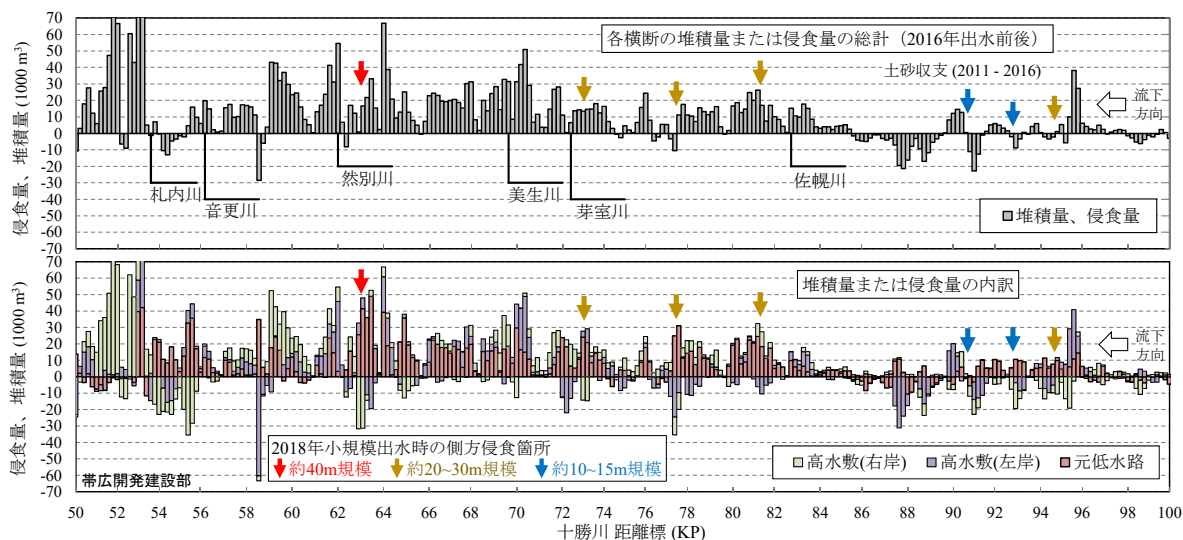


図-3 2016年出水の土砂堆積量・侵食量（十勝川、2011～2016年の土砂収支）。上：総計，下：元低水路部と高水敷部の内訳。



写真-3 KP63 付近の河岸面 (2018 年 11 月撮影)



写真-4 KP63 付近の河道内河床 (砂州上, 2018 年 11 月撮影)

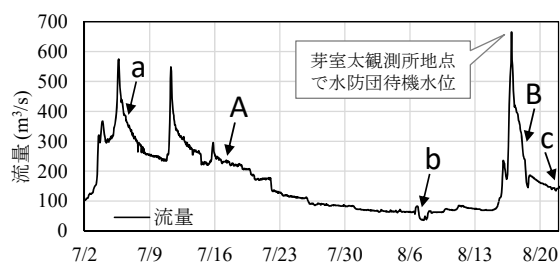


図-4 2018 年出水の流量ハイドログラフ (推定値)

(3) 2016年出水時の河道内の土砂堆積量とその特徴

図-3に2016年出水による河道の堆積・侵食量を示す。上図は各横断形の変化から算出した堆積・侵食の総量を示し、下図はそれを元低水路部と高水敷部に分けて示す。

図-3上図では、佐幌川合流点から下流側で顕著な堆積傾向が見られる。これらの土砂堆積は、2016年出水の影響が特に大規模だった各支川からの流入土砂量によるものと推定され、2016年出水以降は河道内に堆積した土砂が動きやすい状況となっている可能性がある。

図-3中の赤矢印は、本研究の対象箇所 (KP63.0) を示している。図-3上図ではKP63.0地点の特異性がわかりにくい。図-3下図をみると、この地点では元低水路部に著しい土砂堆積が生じていたことがわかる。KP63.0地点の横断形状の変化を図-2に示す。横断方向に砂州が拡大して河岸が大きく侵食され、主流位置 (最深部) が大きく側方へ移動している。この地点のように、河岸侵食が生じている場合は、たとえ土砂堆積が著しくても、河岸の侵食量に相殺されてしまうため、堆積量を断面の総計



写真-5 2018 年夏期出水時の衛星画像⁵⁾

表-1 河岸侵食定期監視調査結果

確認年月日	法尻から河岸の距離 (m)	前回調査日からの変化 (m)	備考
2018/4/16	62.6		
2018/5/11	62.6	0.0	
2018/6/14	62.6	0.0	
2018/7/6	大きな侵食が無いことを確認		図-4中 a 時点
2018/8/7	32.3	-30.3	図-4中 b 時点
2018/8/22	23.0	-9.3	図-4中 c 時点

で計上するだけではその特徴が見えてこないことがある。土砂収支から特徴を見出すには、例えば下図のように元低水路部と高水敷に分けて示す等の処理が必要となる。

図-2では河道内の砂州高さに若干の増大がみられるものの、この地点の堆積土砂は、砂州の高さよりもむしろ横断方向への砂州の拡大に大きく寄与しており、この土砂堆積によって流路の湾曲が前述のように増大した状況が理解できる。2016年出水以降も砂州を横断方向に拡大させるような堆積傾向が継続したため、2018年の小規模な出水で側方侵食が進行したものと考えられる。

2018年の小規模出水時に側方侵食が進行した箇所は、KP63.0地点以外にもあり、側方侵食の規模が20~30m規模の地点を黄矢印、それ以下の規模で確認された地点を青矢印で図-3中に示す。比較的大規模な側方侵食地点を示す黄矢印について図-3下図をみると、元低水路部の堆積量が特に大きい値を示す地点とほぼ一致しており、これはKP63.0地点の傾向と同様である。このように、先行の

大規模出水による元低水路部への堆積量が特に大きい値を示す地点で、その後の小規模な出水時で比較的大規模な側方侵食が生じやすくなっているという特徴がわかる。

(4) 2018年出水時の流量ハイドログラフ

2018年夏期出水時の対象地点の流量ハイドログラフ(推定値)を図-4に示す。これは上流側の芽室太観測所(KP71.1)における暫定値を参考に推定したものである。7月5日、7月11日、8月16日にピークがみられるが、いずれも水防団待機水位またはそれ以下の規模であった。

(5) 2018年出水時における側方侵食の進行過程

2018年の夏期出水時の対象箇所の状況を簡易的に把握する方法として、公開されている衛星画像を利用することができる。写真-5に示したのは、国立研究開発法人産



図-5 再現計算対象範囲

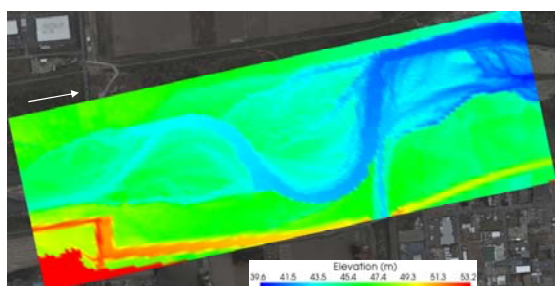


図-6 初期河床形状 (2016年LP測量データ)

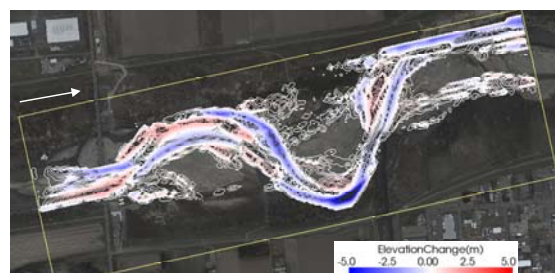


図-7 再現計算結果 (河床変動量コンター図)

業技術総合研究所が無料で公開⁹⁾しているASTER(分解能15m)またはSENTINEL2(分解能10m)の衛星画像である。対象期間中の侵食幅(約40m)に対して十分な分解能ではないため、当衛星画像から侵食過程を定量的に把握することは難しいが、少なくとも7月17日時点(図-4中A時点)で流路の蛇行振幅が増大して侵食が進行している状況を確認できる。その後の8月16日のピーク後の画像(8月18日(図-4中B時点))では更に侵食が進行している状況を確認できる。

また、表-1に帯広開発建設部が実施した河岸侵食定期監視調査結果を示す。7月6日の時点(図-4中a時点)では大きな侵食が生じていないことから、上記の衛星画像と合わせて考えると、7月6日(図-4中a時点)から7月17日(図-4中A時点)の間にある程度侵食が進行していたことになる。また、調査結果によると、その後の8月16日のピーク前後(図-4中bからcの間)で侵食が約9m進行し、最終的に侵食が約40m(堤防法尻から23m)に至ったことがわかる。

3. 再現計算

本研究では、定量的な侵食過程を把握し、侵食が進行した流量規模を明確にするために、数値シミュレーションによる流路変動および側方侵食過程の再現を試みた。

(1) 計算概要

再現計算の対象範囲を図-5に示す。計算にはiRIC⁹⁾ ver.2.3の平面二次元河床変動計算ソルバーNays2DHを用いた。初期河床形状には2016年出水後に実施されたLP測量データを使用した(図-6)。LP測量データには水面下の地形が反映されないため、本計算では簡易的に水面箇所を-50cmとした。河床材料は均一粒径27mm、マニング粗度係数は0.027とし、流砂量式には芦田・道上式⁷⁾を適用した。また、斜面崩落モデルを適用することで、河岸侵食に対する脆弱さをある程度計算に反映した。流量条件に図-4に示したハイドログラフを使用し、河岸侵食定期監視調査で初期から約40mの侵食が確認された8月22日までの期間を計算対象とした。ただし、再現計算を効率的に進めるため、図-4に示す期間のうち、明らかに河床変動が小さいと考えられる流量100m³/sを下回る期間(7月26日2時~8月15日13時)は計算から除いた。

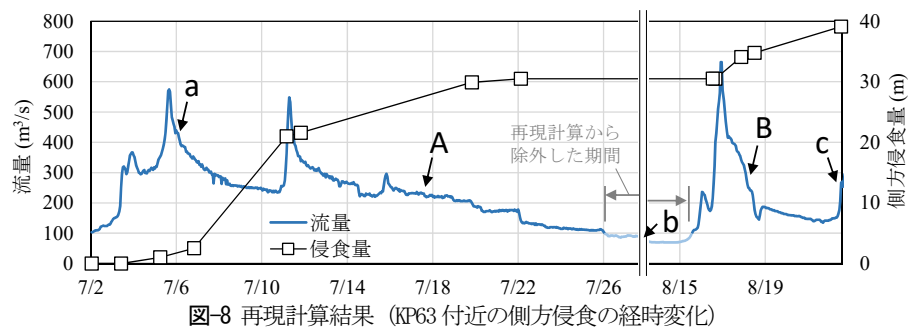


図-8 再現計算結果 (KP63 付近の側方侵食の経時変化)

(2) 再現結果

計算結果（河床変動量のコンター図）を図-7に示す。蛇行流路の右岸水衝部（KP63付近）で側方侵食が進行し、河岸が堤防に接近している様子が再現されている。再現された最終的な側方侵食量は39mであり、河岸侵食定期監視調査結果が示す値より若干過小評価する結果ではあるが、流量や河床材料や崩落のしやすさなどに不確定な部分もあることを考慮すると良好に再現されている。

また、KP63付近右岸の側方侵食量について計算された経時変化を図-8に示す。前出の衛星画像や河岸侵食定期監視調査結果が示すとおり、7月6日（図-4または図-8中 a時点）から7月17日（図-4または図-8中 A時点）の間に大きく侵食が進行し、また、その後の8月16日のピ

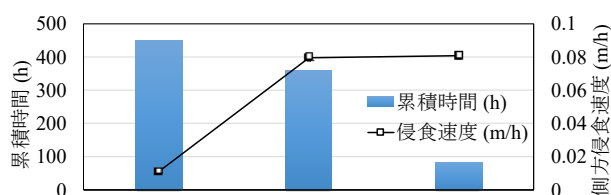


図-9 流量規模別の累積時間および侵食速度

表-2 各流量規模における掃流力

Q (m³/s)	τ^*
150	0.05
200	0.06
350	0.08

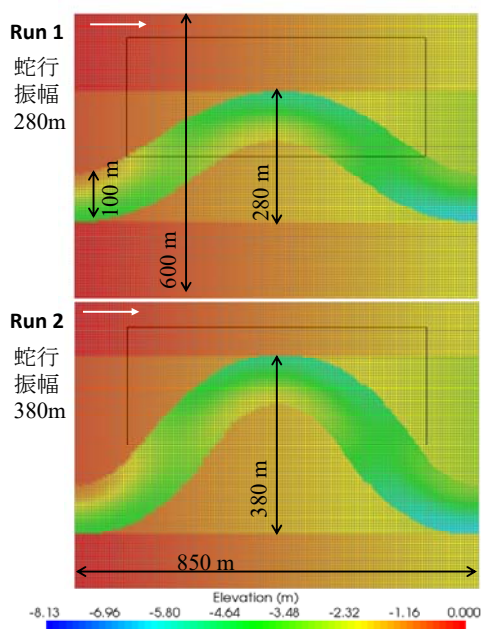


図-10 初期河道

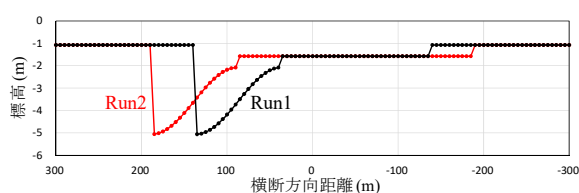


図-11 初期横断形状

ーク前後（図-4または図-8中 bからcの間）で更に侵食が進行した結果となっており、侵食の経時的な進行過程も良好に再現されている。

4. 考察

(1) 小規模流量下で進行する側方侵食

再現計算の結果を用いて、どのような流況下で側方侵食が進行したのかを考察する。図-9に対象期間中の各流量規模の累積時間と各流量下における侵食速度（平均値）を示す。図より、主に200m³/s以上の流量規模で侵食が進行したことがわかる。表-2には各流量規模における掃流力の値を示す。ここではKP63付近の河道形状より流路幅100m、河床勾配1/400として簡易的に等流計算で算定している。表より、流量規模200m³/sというのは河床材料（平均粒径27mm）が動き出す限界掃流力 τ^* （=0.05）をわずかに超える程度の流量規模であり、非常に小規模な流量下で侵食が進行したことがわかる。

一般に流量規模が小さいほど累積時間は多いため、小規模な流量下での侵食速度が従来よりも少しでも増大すれば、トータル侵食量は従来よりも大きく増大することになる。対象の侵食発生箇所では、200～350m³/s程度の小規模流量下での侵食速度が増大したため従来の想定よりも大規模な側方侵食が進行したと考えられる。

(2) 流路の蛇行度が側方侵食に与える影響

小規模流量下での侵食速度が以前よりも増大した要因の一つとして、前述のとおり、2016年出水時に土砂堆積による流路の蛇行振幅の増大に伴い、蛇行度（振幅/波長）が増大した影響が考えられる。そこで、流路の蛇行度の違いが堆積現象や側方侵食に与える影響を検討する。

先の再現計算と同様にiRIC[®] ver.2.3の平面二次元河床変動計算ソルバーNays2DHを用いた。図-10のような流路の蛇行度が異なる二つの初期河道を作成した。KP63付近の河道を想定し、平均河床勾配1/400、波長850m、流路幅100mとした。流路の蛇行振幅は、Run1では2016年出水前を想定して280m（蛇行度0.33）、Run2では2016年出水後を想定して380m（同0.45）とした。また、流路内には蛇行と同位相で内岸砂州を図-11のように配置した。ここで、Run1とRun2ともに同じ砂州高さを与えている。図-2の横断形状をみると、2016年出水前の時点で既に波高の大きい砂州の存在が確認されるため、Run1とRun2ともに水位に対して十分に大きい波高の砂州を想定している。また、先の再現計算で主に侵食が進行した流量規模（200～350m³/s）の中間的な値である250m³/sを流量条件として一定流量下で計算を実施した。上下流端は周期境界条件とした。なお、計算は初期100時間を慣らし計算とし、その後350時間計算した結果を比較検討した。

計算結果（河床変動量のコンター図）を図-12に示す。Run1では、主な堆積域が蛇行頂部よりも下流側に見ら

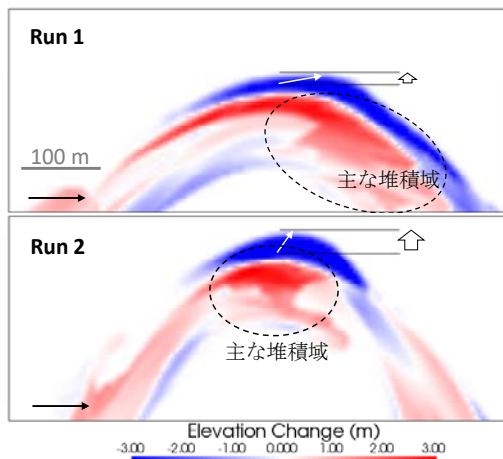


図-12 計算結果（河床変動量コンター図、図-10 中黒線枠内）

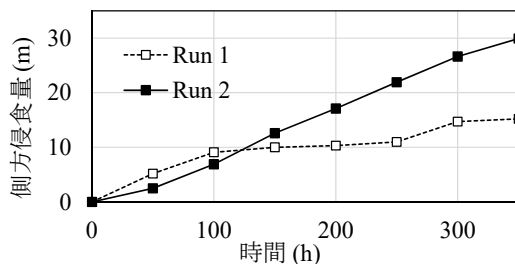


図-13 計算結果（側方侵食の経時変化）

れ、流路内岸の砂州が流下している状況がわかる。これに伴いRun1では水衝部の位置が流下するために、側岸侵食が蛇行頂部から下流側までの広い範囲で生じてはいるが、側方への侵食量は比較的小さいことがわかる。これに対して、Run2では、主な堆積域が蛇行頂部に見られ、流路内岸の砂州が蛇行頂部で横断方向に拡大している状況がわかる。これに伴いRun2では蛇行頂部付近で側岸侵食が集中的に進行するために、側方への侵食量が大きくなっていることがわかる。2018年出水時のKP63付近での側岸侵食は、水衝部の位置に変化がなく、流路の蛇行頂部付近のみで側方侵食が進行しており、Run2に見られる特徴はこれに類似しているのがわかる。

Run1およびRun2における側方侵食量の経時変化を図-13に示す。Run1では側方侵食がほとんど進行しない期間が見られる。これは、水衝部が流下方向に移動するために側方へは侵食が進行しない期間である。これに対してRun2では、ほぼ一定の速度で側方侵食が継続しており、Run1よりも大きく進行する結果になる。この結果より、2016年出水時に流路の蛇行度が増大したことが、その後の侵食速度が増大した主要因の一つと言える。

(2) 先行出水時の河道内への堆積土砂の影響

図-3下図において、先行出水で元低水路部の堆積量が特に大きい値を示した地点とその後大規模な側方侵食が進行した地点とがほぼ一致した理由は、先行出水時に元低水路部へ堆積した土砂によって流路の蛇行度が増大し、前節の検討のとおり侵食速度が増大したためである。

また、先行出水時の河道内への堆積土砂やそれによ

って変化した河道形状の影響については、前節の検討からもわかるように、先行出水後の地形を初期河道形状に適用することによって計算結果にある程度は反映されていると考えられる。ただし、堆積土砂の影響全てを反映しているのかは、粒度の変化なども含めてもっと慎重に評価する必要がある。今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、2018年の小規模な出水時に十勝川KP63付近で生じた側岸侵食を例として検討し、2年前の2016年に経験した大規模な出水以降、河岸侵食がより活発になった箇所の特性を考察した。以下に結果を示す。

- ・先行出水で大規模な河岸侵食が発生した箇所では、これまでの河岸とは異なる新たな侵食面が露出することになる。河岸構成材料の違いなどによって、新たな侵食面となった河岸が侵食に対して従来よりも脆弱な場合には、その後の側岸侵食は従来よりも活発に進行する可能性がある。
- ・先行出水で河道に顕著な堆積傾向が見られ、河道内の土砂が以前より動きやすくなった可能性がある。
- ・先行出水時での流路の蛇行度の増大によって砂州の移動特性が変化したことが、その後以前よりも側方への侵食速度が増大した要因の一つである。
- ・先行出水で元低水路部の堆積量が特に大きい値を示した地点において、その後の出水時に比較的大規模な側方侵食が進行した。これは、先行出水時に元低水路部へ堆積した土砂によって流路の蛇行度が増大し、前項のとおり侵食速度が増大したためである。
- ・一般に小規模な流量ほど継続時間が長いため、小規模流量下での侵食速度が従来より少しでも増大すれば、最終的な侵食量は大きく増大することになる。

以上のような特性が該当する箇所では、小規模な流量下でも侵食が進行することに留意して監視する必要がある。また、今後の出水時には従来の想定よりも側方侵食が大規模に進行しやすい状況であることに留意した上で対策を検討する必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり北海道開発局帯広開発建設部より貴重な資料を提供いただいた。感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 帯広開発建設部:平成28年度十勝川河床材料調査業務報告書,2016
- 2) 国土交通省:水文水質データベース.
- 3) 三輪式：実際河川における砂レキ堆の移動と安定の限界角度,昭和49年農業土木学会講演会前刷,1974.
- 4) 久加朋子,山口里美:側岸に繁茂する植生が流路変動に与える影響,土木学会論文集B1(水工学)Vol.74 No.4, I_1135-I_1140, 2018.
- 5) <https://landbrowser.airc.aist.go.jp/landbrowser/index.html>
- 6) <https://i-ric.org/ja/>
- 7) 芦田和男,道上正規:移動床流れと抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第206号,pp.59-69, 1972.

地震を受けた木造住宅の継続使用性の評価

山崎 義弘¹・槌本 敬大¹

¹国立研究開発法人 建築研究所 材料研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

本論文では、木造耐力壁構造に対して、応答スペクトルは等しいが継続時間の異なる2種の模擬地震動を繰り返し入力する振動台実験を実施し、せん断力-変形角関係の包絡線や最大応答変位におよぼす影響を調べた。継続時間が長い地震動は、多数回の繰り返し変形を生じさせるため、応答変形の増大が著しいだけでなく、最大耐力も低下する傾向にあった。また、終局変形角の1/3程度の変形レベルでは性能劣化が小さく、継続使用性が保持されることを把握した。

キーワード 筋かい耐力壁、合板耐力壁、性能劣化、累積損傷

1. はじめに

木造住宅の主たる耐震要素は耐力壁であり、その力学性能は壁倍率によって明示される。壁倍率とは、規定の載荷履歴に則って変形角を与える試験を実施し、取得されるせん断力-変形角関係の包絡線から評価されるが、規定の載荷履歴よりも多数回の変形を生じさせる試験を実施すると、耐力やエネルギー吸収性能が低下する可能性があることが指摘されている^{1,2)}。建築物の耐震設計における目標の一つは一度の大地震に対して倒壊を防止することであるが、2016年熊本地震のように震度7の激震に2回も襲われる可能性も実際にはあり、多数回の揺れにより性能が劣化することも加味して性能を評価することで、より安全・安心な住宅の供給につながる。また、近年は大地震に対する倒壊防止という、建築基準法の最低限の要求性能だけでなく、大地震後も軽微な補修のみで継続使用できる高い耐震性能が住宅に求められることもあり、これを実現するには耐力壁が任意の繰り返し変形に曝されたときの性能劣化挙動の評価が鍵となる。

そこで本研究では、壁倍率の取得を目的とした従来の試験業務では見落とされがちな、繰り返し変形履歴を変動要因とした実験を行い、性能劣化挙動を把握する。具体的には、木造耐力壁構造に対して、応答スペクトルは等しいが継続時間の異なる2種の模擬地震動を繰り返し入力する振動台実験を実施し、筆者らの既提案の評価法³⁾の妥当性を検証するとともに、地震動の継続時間、ひいては繰り返し回数の違いが最大応答変位におよぼす影響を調べる。さらに性能劣化を小さく留めて継続使用が可能な変形レベルのクライテリアを明らかにし、今後目指すべき高耐震住宅の設計における指針となる基礎資料の取得を行う。

2. 振動台実験

(1) 実験概要

対象とする耐力壁は、図-1に示す筋かいタイプと合板タイプの典型的な2種類からなる。筋かいタイプは2P(柱間910mm)の二つ割ハの字型筋かい耐力壁に、筋かいが取りつく側に厚さ12.5mmの石こうボード(GB-R, GN40@150mm)を取りつけた。接合金物として筋かい端部には壁倍率2倍用ボックス型の筋かい金物を、中柱には山形プレートを用いた。合板タイプは1Pの厚さ9mmの構造用合板耐力壁(N50@150mm)とした。両タイプとも壁の外側の柱脚、柱頭接合部に20kN用HD金物を用い、載荷前にHDに初期張力として5kNを与えた。振動台実験では中央構面に耐力壁を設置し、外側構面はそれぞれ柱間2730mmの柱2本のみの架構とした。加振は水平一方向である。各タイプについて、文献3の静的載荷実験で得られた短期基準せん断耐力を用い、耐震等級1相当($C_0 = 0.2$)および耐震等級3相当($C_0 = 0.3$)となるように支持重量を調節した。ただし、耐力壁以外の要素が地震力の1/4を負担していると仮定した⁴⁾。図-2のように、耐力壁2種(B, P)、耐震等級2種(1, 3)で合計4種類(それぞれB1, B3, P1, P3と表記)の試験体を同時に加振した。

図-3に入力地震動について、(a)擬似加速度応答スペクトル、(b)加速度時刻歴、(c)エネルギースペクトル(速度換算値)を示す。主要動の継続時間が大きく異なる2波として、十勝沖地震の八戸NS位相(以下、八戸模擬波)と、兵庫県南部地震のJMA神戸NS位相(以下、神戸模擬波)とした模擬地震波を採用した。両地震波は、擬似加速度応答スペクトルの形状が大小2種類の減衰定数について近いが、継続時間に違いがあり、このためエネルギースペクトルが大きく異なる。応答スペクトル

の形状は、現行耐震基準の極稀地震レベルと同一となるよう、5%減衰時の擬似加速度応答スペクトルが短周期領域で 980cm/s^2 で一定とし、長周期側は2種地盤の R 曲線に適合させた。結果として得られたエネルギースペクトルは、八戸模擬波では基準法レベル（図中の破線）⁵⁾を大きく上回った。加振手順は、模擬波50%を1回、100%を10回、神戸模擬波のみ150%を1回入力し、各加振前後でホワイトノイズ波（ $\text{PGA}=98\text{cm/s}^2$ ）を入力した。途中で倒壊した試験体は錘を降ろし、残りの試験体のみで加振を続行した。まずは八戸模擬波のシリーズを上記加振手順で実施し、試験体の入れ替えを行った後、神戸模擬波のシリーズを実施した。模擬地震波には 0.33Hz （150%入力のみ 0.5Hz ）のハイパスフィルターを施したが、試験体周期とスペクトルの関係から応答への影響は小さいと判断した。

試験体に入力されるせん断力は天井合板、土台に取り付けた加速度計と土台が取り付け基礎架台直下のせん断型ロードセルを用いて計測した。層間変形は計測タワーとの相対変位としてレーザー変位計により計測した。

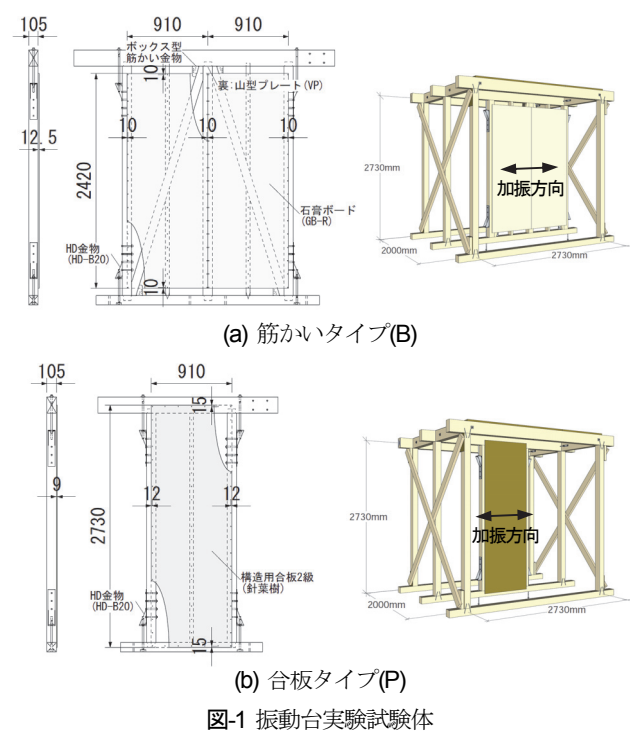


図-1 振動台実験試験体

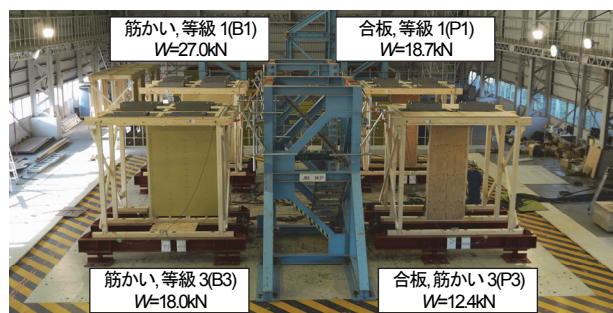


図-2 振動台実験のセットアップ

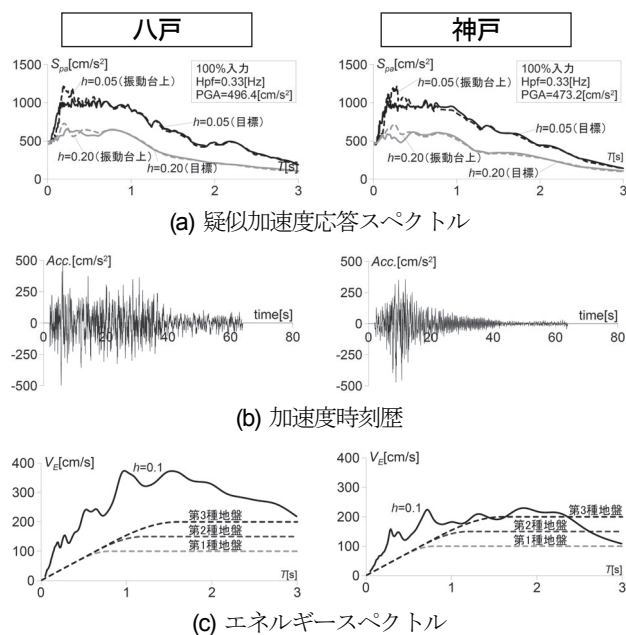


図-3 入力地震動の特性

(2) 実験結果

図4に各加振における最大層間変形角を示す。図中に破線で示す δ_u は事前に実施した静的載荷試験で得られた終局変形角であり、これを超えた時点で実質的には倒壊と見なされる。図4より等級によらず神戸模擬波よりサイクル数が多く劣化の影響が大きな八戸模擬波の方が変形の増大が速いことがわかる。等級3相当では $1/3\delta_u$ 以下の劣化の小さい範囲では地震波による違いが小さいが、劣化が進行し非線形化してくると顕著に違いが表れた。また、同じ等級の試験体であっても、筋かいタイプの方が合板タイプよりも変形の増大が緩やかで、劣化しにくいことがわかる。

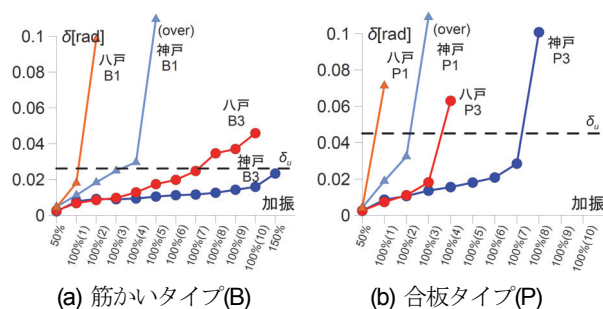


図-4 最大層間変形角

振動台実験で得られたベースシア係数－層間変形角関係の包絡線を図5に示す。筋かい・合板とも、等級1（青線）では八戸波と神戸波で包絡線に大きな違いは見られなかったが、等級3（赤線）では神戸波より八戸波の方が最大ベースシア係数が小さくなった。このことは、繰り返し数の少ないパルスのような載荷履歴より、繰り返し

数の多い载荷履歴の方が耐力の劣化が生じやすいという、文献3で述べた結果と調和的である。よって、等級3については、八戸波と神戸波の最大応答の違いは等価周期（包絡線）の違いが一因であると考えられる。

図-6に合板タイプで観察された釘の破壊モードを示す。静的繰り返し载荷実験³⁾と同様、主にパンチングアウトと引き抜けおよび破断が見られた。実験終了時に観察された釘の破断本数は、図-7に示すように等級によって特徴付けられた。すなわち、実験終了までの加振回数が少ない等級1相当では破断せずにパンチングアウトが多かったが、加振回数が多い等級3相当では釘の破断数が多くなった。これは静的载荷実験³⁾の傾向と同様である。

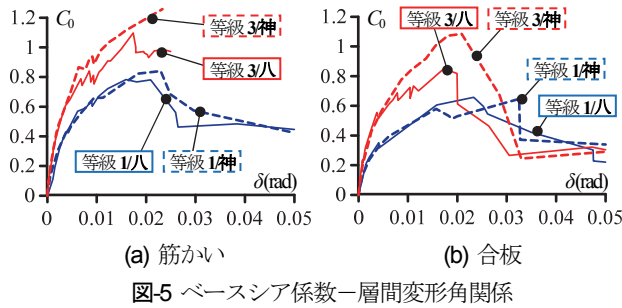


図-5 ベースシア係数－層間変形角関係



図-6 合板タイプにおける釘の破断モード

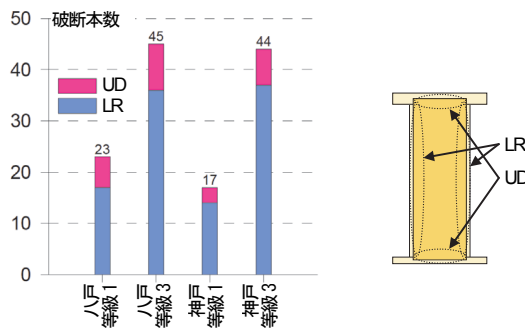


図-7 合板タイプにおける釘の破断本数

3. 性能劣化の評価法の提案

(1) 耐力劣化の評価法

材料の疲労破壊による寿命を予測する経験則として累積損傷則があり、様々な振幅による損傷の蓄積を乗算的に表す点で物理的意味も理解しやすい。しかし、木造耐力壁では疲労破壊を明確に定義することができず、また

本論では耐力の劣化、すなわち低下率の推移に興味があることを踏まえ、文献3ではランダム履歴にも対応させた次式を提案した。

$$f(\Delta, n) = (1 - f_{\infty}(\Delta)) \prod_{i=1}^n (\phi(\Delta, \Delta_i) e^{-\lambda(\Delta_i)} + 1 - \phi(\Delta, \Delta_i)) + f_{\infty}(\Delta) \quad (1)$$

ただし、 Π は総乗記号であり、 $f_{\infty}(\Delta)$ = 目標振幅比 Δ での $f(\Delta, n)$ の収束値、 $\lambda(\Delta)$ = 目標振幅比 Δ の耐力劣化の速度を決める係数、 $\phi(\Delta, \Delta_i)$ = 目標振幅比 Δ のときに、過去に経験した i 番目の振幅拡大サイクル（振幅比 $\Delta_i (\leq \Delta)$ ）からの振幅拡大に伴う損傷の低減係数である。振幅拡大サイクルとは、経験最大振幅を更新したサイクルを表す。既往の耐力劣化を考慮した復元力特性モデル¹²⁾は、除荷後の再载荷時における指向点の耐力の低下、または変形の増大により劣化を表現するが、劣化後も包絡線は不変と考え、振幅を拡大すれば元の包絡線を辿る。本手法は静的载荷実験結果³⁾の傾向を踏まえ、図-8に示すように小振幅での損傷の影響を大振幅で低減または保持する $\phi(\Delta, \Delta_i)$ を考慮し、包絡線を適宜下方修正するところに特徴がある。また、その際に振幅拡大サイクルのみカウントする。既往モデルでも指向点の調節により見かけの包絡線形状を低減・適合させることは可能ではあるが、骨格曲線を特定の载荷履歴の実験の包絡線に対し適合させており、包絡線形状が変化することを前提としないため、その適合度合いは不確かである。一方で本手法は応答スペクトル法への適用が主眼にあり、予測対象である最大応答点は必ず包絡線上に存在するため、包絡線形状を直接予測の方が趣旨に沿うと言える。

評価式は $f_{\infty}(\Delta)$ 、 $\lambda(\Delta)$ 、 $\phi(\Delta, \Delta_i)$ の3変数からなり、以下にこれらの同定方法を述べる。なお、文献3で既に述べた手法より精度改善を図っている。まず、定振幅载荷では振幅の拡大を伴わないため、 $\phi(\Delta, \Delta_i) = 1$ であり、式(1)が式(2)のごとく書き換えられる。

$$f(\Delta, n) = (1 - f_{\infty}(\Delta)) e^{-\lambda(\Delta)n} + f_{\infty}(\Delta) \quad (2)$$

上式は $n=0$ で1、 $n \rightarrow \infty$ で $f_{\infty}(\Delta)$ に収束する指数関数であり、文献3で示した定振幅繰り返し载荷時に耐力が指数関数的に劣化する挙動を模擬することができる。これに式(2)を最小二乗法で適合させることで、 $f_{\infty}(\Delta)$ と $\lambda(\Delta)$ を得る。後述のように、これらは Δ の関数に近似する。

$\phi(\Delta, \Delta_i)$ に関しては、静的载荷実験結果³⁾を踏まえると、小振幅で受けた損傷の影響は完全回復（図-8(a)）、逆に大振幅で受けた損傷の影響は無回復（図-8(b)）に近くなる。ゆえに、 $\Delta_i = 0$ で $\phi(\Delta, \Delta_i) = 0$ 、 $\Delta_i = \Delta$ で $\phi(\Delta, \Delta_i) = 1$ となることを拘束条件に検討し、 $\phi(\Delta, \Delta_i) = (\Delta_i / \Delta)^p$ のべき乗関数で表すこととした。既に得られた $f_{\infty}(\Delta)$ 、 $\lambda(\Delta)$ を用い、筋かいタイプは従来载荷の結果に、合板タイプは多サイクル

波の結果に包絡線形状が適合するよう、最小二乗法で同定して α を求めた。合板タイプで従来载荷を用いなかったのは、終局変形近傍での繰り返しが十分でないため、精度の低下が見られたためである。

以上の手順で得られた各パラメータの傾向を図-9に示し、以下に各近似式(図-9の破線または実線)を示す。

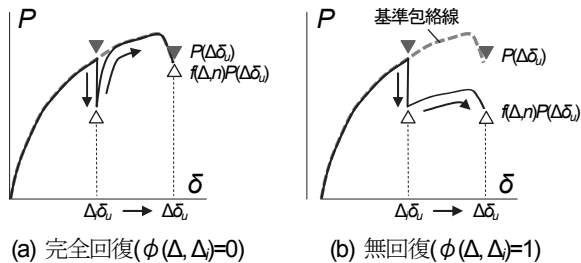


図-8 $\phi(\Delta, \Delta_i)$ の影響

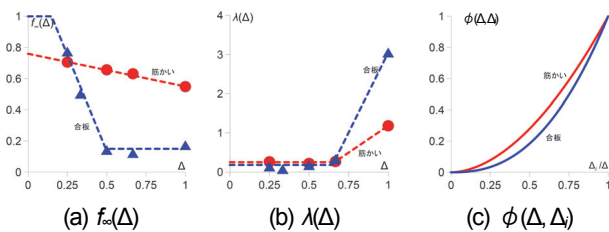


図-9 パラメータの傾向

$$f_{\infty}(\Delta) = -0.21\Delta + 0.76$$

$$\text{筋かい: } \lambda(\Delta) = \begin{cases} 0.25 & (0 \leq \Delta \leq 0.66) \\ 2.74\Delta - 1.56 & (0.66 < \Delta \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi(\Delta, \Delta_i) = (\Delta_i / \Delta)^{1.84}$$

$$f_{\infty}(\Delta) = \begin{cases} 1 & (0 \leq \Delta < 0.15) \\ -2.47\Delta + 1.37 & (0.15 \leq \Delta \leq 0.49) \\ 0.15 & (0.49 < \Delta \leq 1) \end{cases}$$

$$\text{合板: } \lambda(\Delta) = \begin{cases} 0.18 & (0 \leq \Delta < 0.65) \\ 8.17\Delta - 5.12 & (0.65 \leq \Delta \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\phi(\Delta, \Delta_i) = (\Delta_i / \Delta)^{2.44}$$

本評価法の適用範囲は $\Delta \leq 1$, すなわち単調载荷時の終局変形以下での挙動であり、この範囲内では大変形時に正負の損傷が相互に与える影響¹²⁾は小さいと考えている。

図-10(a)~(d)に文献3のランダム载荷、2章の振動台実験の結果と評価式による包絡線の予測を示す。評価式による予測では、実験で得られた変形履歴と基準包絡線(単調载荷時の包絡線)を既知とし、各振幅拡大サイクルでの $f(\Delta, n)$ (式(1))を求め、基準包絡線における各振幅拡

大サイクルの荷重に $f(\Delta, n)$ を乗じて包絡線を作成した(図中の丸プロット)。振動台実験については、耐力の大きい方を正側と読み替えて評価の対象とし、等級1相当のみ示した。振動台実験で得られた包絡線は、静的载荷実験³⁾で得た基準包絡線に比して小変形時から荷重上昇が起きていた。この要因は動的载荷の影響⁶⁾や境界条件の違い等が考えられるが、本論では要因については追求せず、両実験結果をキャリブレーションすることとした。すなわち、繰り返しによる劣化がまだ生じていないと考えられる1/450radと1/300radの点を結んだ傾きの比を求め、これを基準包絡線に乗じて比較を行った。この比率は図中に示す通り、大凡1.1~1.2であった。提案した評価式による予測点が概ね包絡線の形状を予測できていることが分かる。

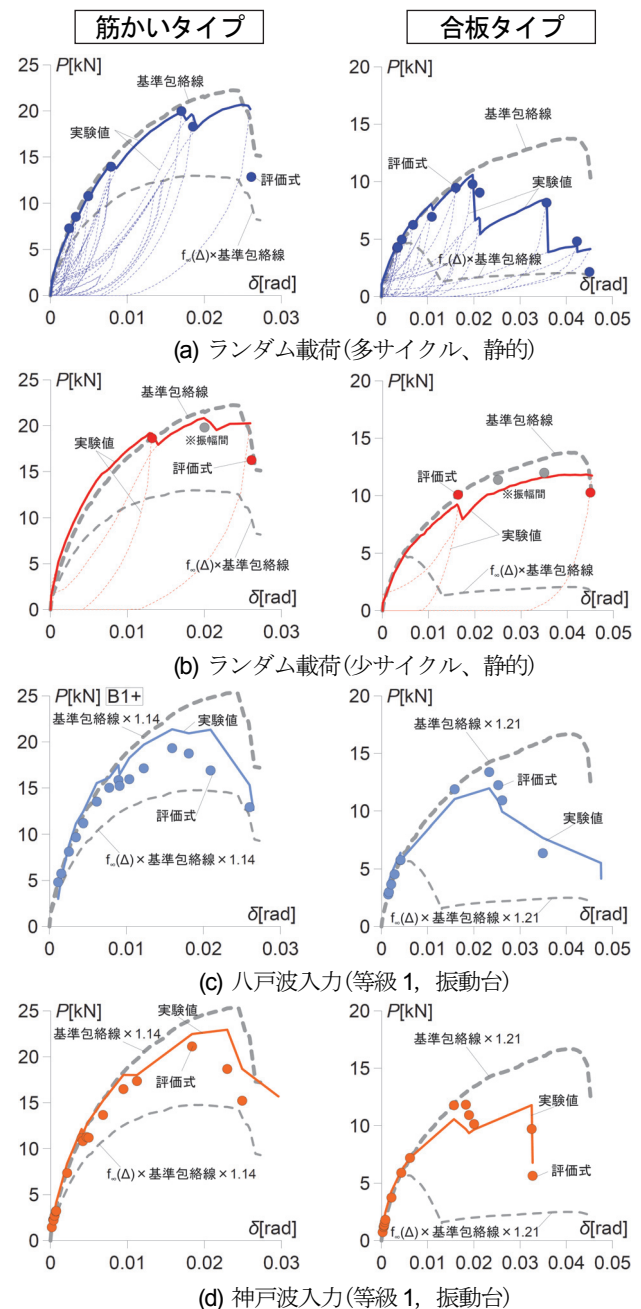


図-10 せん断力-変形角関係の包絡線と評価式による予測

また、図中に示す基準包絡線に $f_{\alpha}(\Delta)$ を乗じて低減したカーブは、劣化後の耐力の下限值を表しており、合板タイプの $\delta > 0.012\text{rad}$ では、柱はりのみのフレームの包絡線に概ね近いことを別途確認している。つまり、任意の変形履歴を受けた際の包絡線は、基準包絡線とそれに $f_{\alpha}(\Delta)$ を乗じたカーブの間のどこかを通過する。

(2) エネルギー吸収性能の劣化の評価法

静的載荷実験結果³⁾を踏まえ、 h_{eq} は経験したサイクル数よりも既に経験した最大振幅への依存性が強いと考え、 Δ_r/Δ に基づいた h_{eq} の傾向として以下の近似式を得た。

$$\text{筋かい: } h_{eq} = -0.26\Delta_r / \Delta + 0.29 \quad (5)$$

$$\text{合板: } h_{eq} = \begin{cases} -1.13\Delta_r / \Delta + 0.65 & (0 \leq \Delta_r / \Delta \leq 0.5) \\ -0.10\Delta_r / \Delta + 0.14 & (0.5 < \Delta_r / \Delta \leq 1) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 Δ_r/Δ とは既に経験した最大振幅を終局変形で基準化したものであり、 $\Delta = 1$ 、すなわち終局変形での h_{eq} のみを評価の対象とした。

本論ではさらに振動台実験の $\Delta = 1$ に最も近い変形における h_{eq} を図-11中にプロットし、動的載荷では粘性減衰により h_{eq} が上昇することを勘案して近似式に0.05を加えた直線（図-11の灰破線）も併せて示した。振動台実験（図中赤破線）が静的載荷実験よりもやや大きく、どちらも近似式の傾向に近い結果を得られた。

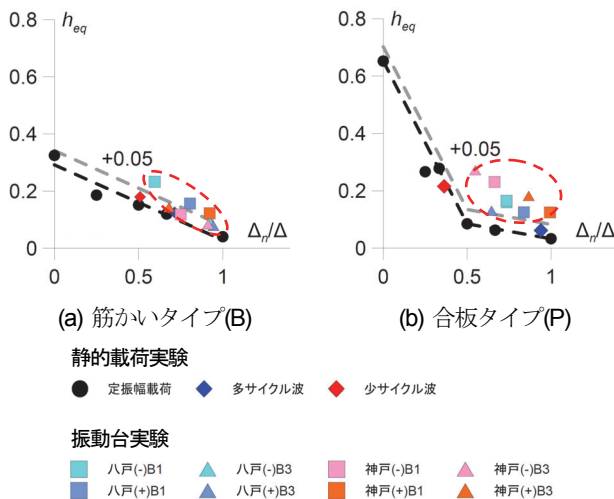


図-11 経験最大変形に基づく等価減衰定数の傾向 ($\Delta = 1$)

4. おわりに

筋かい耐力壁と合板耐力壁をもつ木造耐力壁構造の振動台実験を行い、繰り返し地震動に対する性能劣化挙動、ならびに性能劣化を小さく留めて継続使用が可能な

変形レベルのクライテリアを把握した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 応答スペクトル形状は等しく、位相特性（継続時間）が異なる地震動を繰り返し入力すると、継続時間の長い地震動の方が変形の増大が大きかった。これは文献3で示した静的載荷実験結果と同様に、サイクル数の大小に起因して耐力が劣化したためだと考えられる。
- 2) 合板耐力壁は筋かい耐力壁より繰り返し変形に対して劣化しやすかった。これは破壊性状と関連があると考えられ、合板耐力壁では、サイクル数が少ないと釘のパンチングアウト、サイクル数が多いと釘の破断が生じていた。
- 3) 筋かい・合板耐力壁とも、終局変形の1/3程度の変形レベルまでは繰り返し地震を受けても変形が増大しにくく、性能が維持され、継続使用性を確保できることを把握した。
- 4) 耐力および等価減衰定数の評価式を提案した。耐力の評価式は、小変形での損傷の影響を大変形で低減または保持させるパラメータを有しているところに特徴があり、任意変形履歴を受けたときの包絡線形状を予測できる。等価減衰定数の評価式は、経験したサイクル数よりも既に経験した最大振幅への依存性が強いという実験事実を元に経験式を提案した。両提案式とも、実験結果と比較して概ね良好な精度であることを確認した。

謝辞：本研究の振動台実験は、国立研究開発法人防災科学技術研究所・大型耐震実験施設で実施しました。また、JSPS 科研費若手(A)（代表者：山崎義弘、課題番号 17H04943）の補助を受けて行いました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 五十田博：大変形と繰り返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデルの精度検証 木造建物の地震時挙動に関する研究 その3、日本建築学会構造系論文集、第 659 号、pp.113-120, 2011.1
- 2) 汐満将史、境有紀、五十田博、荒木康弘、松森泰造：既存木造建物を対象とした復元力特性モデルの開発、日本建築学会構造系論文集、第 747 号、pp.717-726, 2018.5
- 3) 山崎義弘、神田健吾、坂田弘安：繰り返し載荷を受ける木造耐力壁の耐力およびエネルギー吸収性能の劣化挙動、日本地震工学シンポジウム、pp.749-758, 2018.12
- 4) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法、2012.6
- 5) 日本建築学会：免震構造設計指針、丸善株式会社、2013.10
- 6) 鈴木賢人、小川一真、田中亮磨、小宮山征義、真崎雄一、永野正行：動的載荷された木質面材大壁の面内せん断性能と動的効果の評価 その3 面内せん断性能と動的載荷における荷重上昇の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、pp.271-272, 2017.7

大スパン屋根の耐風安全性に関する一考察

高館 祐貴¹

¹国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

大スパン陸屋根構造物の屋根面の空力安定性に着目し、LES(Large Eddy Simulation)を用いた数値流体解析を用いて大スパン屋根の空力安定性と動的応答の評価を行った。数値流体解析は、既往の風洞実験と比較することで解析の妥当性を明らかにした。そして、屋根の空力安定性は強制加振解析を用いることで、屋根の振動の速度に比例する空力減衰力と屋根の変位に比例する空力剛性を用いて評価した。大スパン屋根を有する建築物の耐風安全性については、これらの見かけの剛性と減衰(振動依存風力)を屋根の運動方程式に組み込み、周波数領域でのスペクトルモーダル解析を行うことで屋根の設計時には屋根の質量が重要なパラメータとなることを示した。

キーワード 大スパン屋根, 空力安定性, 数値流体解析, 強制加振解析, 非定常空気力

1. はじめに

近年、新たな構造材料や工法の開発、解析技術の発展によって従来の大空間構造物より軽量かつ大スパン屋根を有する構造物の設計・建設が可能となっている。このような大スパン構造物は、屋根面に膜材が使用されることが多く、そのような場合には軽量かつ剛性が低くなることから設計時には一般に風荷重が支配的となる。さらに、風による屋根面の変形や振動が生じやすくなるため、屋根面の空力安定性がしばしば問題となる。特に、変形が生じやすい屋根面には接近流の乱れによる変動空気力だけでなく、構造物自身の運動に伴う付加的な空気力(非定常空気力)が作用するため、屋根面に作用する風荷重は非常に複雑なものとなる。空力安定性を評価するための代表的な手法には自由振動法と強制振動法がある。自由振動法を用いた代表的な研究として、Uematsu and Uchiyama¹⁾は吊屋根に対する空力弾性実験を行うことで屋根面の動的応答と空力不安定振動の発生条件を評価している。また、Matsumoto²⁾は一樣乱流中の吊屋根に対して空力弾性模型を用いた風洞実験を行うことで、逆対称一次モードでの空力不安定振動の発振風速を示している。さらに、三宅ら³⁾は一樣流と境界層乱流中での風洞実験に基づき、剥離せん断層の不安定現象による大スパン屋根の励振特性を明らかにしている。一方、強制振動法を用いた代表的な研究として、大熊ら⁴⁾は大スパン陸屋根を対象とした風洞実験を行い、屋根面を逆対称一次モードで強制加振することで得られる非定常空気力を用いて屋根面の空力安定性を評価している。また、Ding ら⁵⁾は風洞実験と CFD 解析を用いて、強制加振された円弧屋根に作用する非定常空気力を求め、屋根面の動的応答を検討している。これらの研究では様々な検討が行われて

いるものの、空力不安定振動の発生機構は必ずしも明らかになっていない。これは、自由振動法では実験での相似則を満たすことが、また、強制振動法では模型の作製が困難なことが原因と考えられる。

本報では、パラメータの設定が容易である CFD 解析を利用し、大空間構造物として基本的な形状である陸屋根を対象とし、強制振動法を用いることで、振動時の屋根面に作用する基本的な風圧特性を明らかにする。さらに、屋根面の加振振動数と加振振幅を変化させることで、屋根面に作用する非定常空気力を変位と同位相の成分である「空力剛性」と速度と同位相である「空力減衰」として評価し、それらを用いた応答評価を行うことで大スパン陸屋根に作用する非定常空気力が屋根面の空力安定性に及ぼす影響や大スパン屋根の設計時に重要となる振動を抑制するための条件を明らかにする。

2. 解析概要と妥当性の検証

(1) 対象とする建築物

図-1に解析モデルを示す。本研究では、大スパン建築物の代表的な形状として、スパン方向の長さ L と軒高 H が実スケールで 120m, 20m の陸屋根を対象とする。CFD 解析は風洞実験を模擬した縮小モデルでの解析とし、解析モデルの幾何学的縮尺率は $1/400$ と仮定する。屋根の振幅を z_0 とし、風上屋根端部から屋根に沿った座標を s とする。

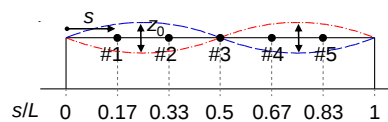


図-1 解析モデル

(2) 解析手法

CFD 解析での計算コードには ANSYS Fluent (ver. 17.2) を用いる。支配方程式は式(1), (2)に示される連続式と 3 次元の Navier-Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここで, $i=1\sim 3$, $j=1\sim 3$ を表し, x_i は空間座標の 3 成分, u_i は風速の x_i 成分, p は圧力を表す。乱流モデルは LES とし, サブグリッドスケール(SGS)モデルには WALE モデル($C_w=0.325$)を用いる。空間項の離散化は 2 次精度中心差分を用い, 時間項の離散化には 2 次精度陰解法を用いる。解析時間は実スケールで 10 分相当の 6 秒とし, 時間刻みは 2.0×10^{-4} 秒, サンプリング周波数は 1000Hz とする。解析における総メッシュ数は約 60 万である。図-2 に解析領域を示す。CFD 解析は 3 次元空間に対して行うが, 屋根面に作用する風圧や非定常空気力は代表値としてモデルの中心線上の 2 次元な流れ場に基づいて評価する。図-3 に解析モデル中心位置における風速のプロファイルを図-4 に変動風速のパワースペクトル密度を示す。本研究では乱れのない一様流(Uniform)と境界層乱流(ABL)の 2 種類の気流を用いる。境界層乱流は ANSYS Fluent の Spectral Synthesizer を用いて平均風速と乱流エネルギー, 散逸率を与えることで生成した。図中には建築物荷重指針・同解説⁹で規定される地表面粗度区分Ⅲの値が示されているが, 生成した流入風は指針値と概ね一致している。変動風速のパワースペクトル密度はフィルタ効果によって高振動数成分が減衰しているものの, 荷重評価で重要となる低振動数成分では Kaman 型⁹と概ね一致している。

(3) 屋根面の強制加振

本研究では, 振動屋根面に作用する風圧と非定常空気力を考慮した応答評価を行うために屋根面を強制的に加振した解析を行う。 k 次モードにおける屋根面の加振変位 $z_k(s, t)$ は次式のように表される。

$$z_k(s, t) = x_k(t) \phi_k(s) \quad (3)$$

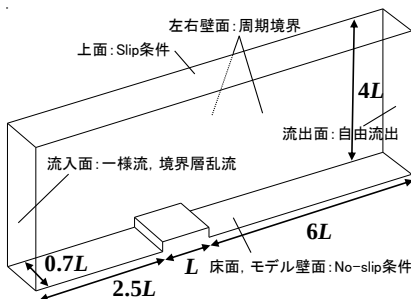


図-2 解析領域

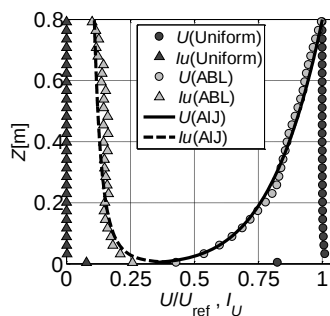


図-3 モデル位置での風速プロファイル

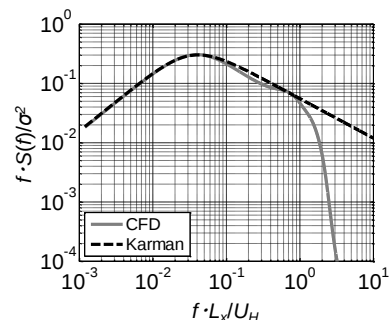


図-4 変動風速のパワースペクトル密度

$$x_k(t) = z_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (4)$$

$$\phi_k(s) = \sin\left(k\pi \frac{s}{L}\right) \quad (5)$$

ここで, x_k は k 次モードの一般化変位, ϕ_k は k 次モードの形状, z_0 は加振振幅, f_m は加振振動数, s は屋根面に沿った距離を表す。本研究では, 図-1 に示すような内部容積の変化がなく, 自励的な振動が最も発現しやすいと考えられる逆対称一次モード($k=2$)を対象とする^{1) 2) 4)}。

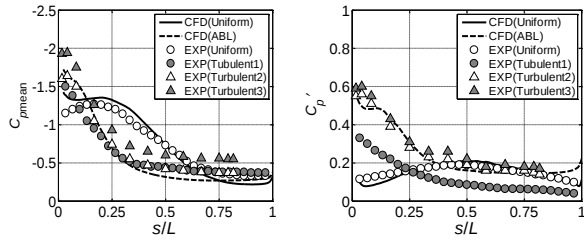
3. 解析結果

(1) CFD 解析の妥当性の検証

CFD 解析の妥当性を示すために, 非振動時および強制加振時の風圧係数分布を既往の風洞実験結果^{7) 9)}と比較する。図-5 に非振動時の平均風圧係数と RMS 変動風圧係数の分布を示す。縦軸は平均風圧係数 $C_{p,mean}$ および RMS 変動風圧係数 C_p' , 横軸は風上端部からの距離 s を屋根のスパン L で基準化したものを表す。一様流(Uniform)については解析結果が風洞実験の結果とよく一致している。境界層乱流(ABL)については, 類似した気流を用いた実験結果に近い分布となっている。次に, 強制加振解析の妥当性を明らかにするために, 一様流を用いた CFD 解析と大熊らの一様乱流を用いた風洞実験の結果⁷⁾を比較する。図-6 に無次元加振振幅 z_0/L が 1.0×10^{-2} , 無次元加振振動数 $f_m^* (=f_m H/U_H)$ がそれぞれ 0.083, 0.25, 0.42 のときの風圧係数分布を示す。加振振動数が大きいつき, $s/L=0.75$ 付近の C_p' の値は実験値の方がやや大きい。これは, 用いた気流の違いや実験でのチューブや装置の振動の影響によるものと考えられるが, CFD 解析の結果は強制加振時の風圧係数分布の変化を概ね捉えている。

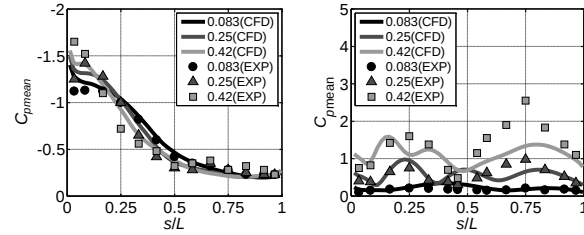
(2) 振動屋根面における風圧係数分布

図-7 は, 無次元加振振動数 f_m^* の変化に伴う平均風圧係数 $C_{p,mean}$ および RMS 変動風圧係数 C_p' の分布の変化を示す。これらは無次元加振振幅 $z_0/L=1.0 \times 10^{-2}$ の場合について, 一様流と境界層乱流を用いて得られた分布を示したものである。無次元加振振動数 f_m^* は 0~1.33 の範囲で変化させた。これらの結果によると, 一様流では振動屋根



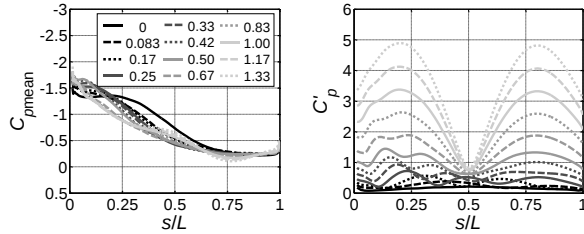
(a) 平均風圧係数 (b) RMS 変動風圧係数

図-5 非振動屋根面に作用する風圧係数分布

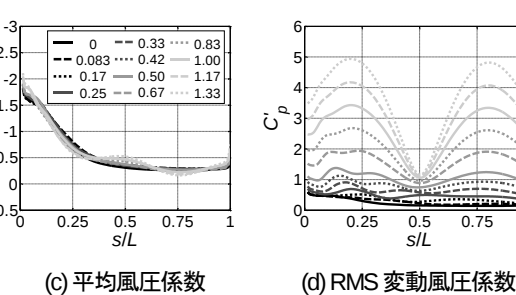


(a) 平均風圧係数 (b) RMS 変動風圧係数

図-6 振動屋根面に作用する風圧係数分布



(a) 平均風圧係数 (b) RMS 変動風圧係数



(c) 平均風圧係数 (d) RMS 変動風圧係数
図-7 加振振幅数の変化に伴う風圧係数分布の変化
($Z/L=1.0 \times 10^2$, (a), (b) 一樣流, (c), (d) 境界層乱流)

面に作用する平均風圧係数分布が非振動時の分布とはやや異なっている。しかし、振動時の分布については、いずれの無次元振動数においても比較的良好に一致している。一方、境界層乱流では振動時でも非振動時でも f_m^* の変化が平均風圧係数分布に与える影響は小さい。したがって、屋根面の振動は平均風圧係数分布にはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。ただし、 $f_m^* > 0.83$ の場合では、屋根面の振動が平均的な流れ場にやや影響を及ぼしている。

RMS 変動風圧係数分布に着目すると、 f_m^* が大きくなるにつれて C_p' の最大値が大きくなる。さらに、 f_m^* が大きいほど、逆対称一次モードの腹の位置 ($s/L=0.25, 0.75$)

と節の位置 ($s/L=0.5$) の付近で C_p' が明確な極大値、極小値を示す。流入気流による RMS 変動風圧係数の変化に着目すると、 C_p' の大きさは f_m^* が大きくなるにつれて、用いた気流によらず類似した分布になることが分かる。したがって、屋根面の振動に直接的な影響を与える RMS 変動風圧係数は屋根の振動の影響も受けるため、屋根が振動する場合の流体と構造体の相互作用を考慮した応答評価を行う必要があると考えられる。

4. 非定常空気力と屋根面の空力安定性

(1) 空力剛性と空力減衰の定義

乱流中の k 次モードの一般化変位に関する運動方程式は次式で表される。

$$M_{sk} \ddot{x}_k(t) + C_{sk} \dot{x}_k(t) + K_{sk} x_k(t) = F_{kk}(t) \quad (6)$$

$$F_{kk}(t) = F_T(t) + F_W(t) + F_{Ak}(t, x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots) \quad (7)$$

ここで、 M_{sk} は構造物の一般化質量、 C_{sk} は構造物の一般化減衰、 K_{sk} は構造物の一般化剛性、 F_{kk} は一般化風力を表す。添え字の k はモード次数を表す。また、一般化風力は接近流の乱れによる変動風力 F_T 、流れの剥離に伴う渦に起因する変動風力 F_W 、物体自身の運動に伴う非定常空気力 F_{Ak} によって表される。以下、 $k=2$ の逆対称一次モードを対象とし、 k は省略する。非定常空気力 F_A は変位と同位相の成分と速度と同位相の成分の和で近似的に表すことができる。

$$F_A = K_a x(t) + C_a \dot{x}(t) \quad (8)$$

ここで、 $K_a x$ は空力剛性力、 $C_a \dot{x}$ は空力減衰力を表す。式(8)を式(6)に代入することで次式が得られる。

$$M_s \ddot{x}(t) + (C_s - C_a) \dot{x}(t) + (K_s - K_a) x(t) = F_T(t) + F_W(t) \quad (9)$$

通常の建築物の場合、質量が大きく剛性が比較的高いことから空力剛性による固有振動数の変化は無視できるほど小さいとされているが、軽量かつ剛性が小さい建築物では空力剛性の影響が大きくなる。また、空力減衰は建築物の応答に大きく影響する。 $C_a < 0$ のときは空力減衰が振動系の減衰を増加させるため、屋根面の振動が抑制されるように働くが、 $C_a > 0$ のときは振動系の減衰を減少させるため非定常空気力が振動を助長するように働く。特に、 $C_a > C_s$ の場合、屋根面全体が負減衰となるため、空力不安定振動が生じると考えられる。この空力剛性や空力減衰で表される非定常空気力を適切に評価することが屋根面の空力安定性を検討する上で重要である。非定常空気力 F_A は空力剛性成分 F_R と空力減衰成分 F_I をフーリエ級数展開することで以下のように表される。

$$F_A = F_R \sin 2\pi f_m t + F_I \cos 2\pi f_m t \quad (10)$$

$$F_R = \frac{1}{T} \int_{-T}^T F_k(t) \sin(2\pi f_m t) dt \quad (11)$$

$$F_I = \frac{1}{T} \int_{-T}^T F_k(t) \cos(2\pi f_m t) dt \quad (12)$$

ここで、 F_R は空力剛性、 F_I は空力減衰を表す。本研究では、空力剛性 F_R と空力減衰 F_I を速度圧 q_H 、荷重負担面積 A_S 、無次元化振幅 z_0/L で無次元化し、空力剛性係数 a_K と空力減衰係数 a_C として表す⁹⁾。

$$a_K = \frac{F_R}{q_H A_S (z_0 / L)} \quad (13)$$

$$a_C = \frac{F_I}{q_H A_S (z_0 / L)} \quad (14)$$

(2) 非定常空気力の評価

図-8に式(13)と(14)によって与えられる空力剛性係数 a_K と空力減衰係数 a_C を示す。横軸は無次元風速 $U_H^* (= U_H / (f_m L))$ を表す。図中には大熊ら⁴⁾による風洞実験の結果も併せてプロットされている。空力剛性係数 a_K に着目すると、本解析結果は $U_H^* > 0.5$ では既往の風洞実験結果と概ね一致している。全体的な傾向を見ると、 U_H^* が小さくなるにつれて、 a_K は正で、その大きさは指数関数的に大きくなっている。一方、空力減衰係数 a_C に着目すると、 U_H^* の増加とともに増加している。また、全体的に風洞実験の結果とよく一致していることが分かる。一様流と境界層乱流の結果を平均し、近似曲線を引くと、一様流では $U_H^* > 1.4$ 、境界層乱流では $U_H^* > 1.7$ で $a_C > 0$ の空力負減衰領域となっている。つまり、建築物荷重指針⁹⁾に示されているように、乱れの小さい一様流の方が境界層乱流よりも空力不安定振動が励起されやすい傾向にある。また、Matsumoto²⁾によると $U_H^* > 1.1$ において逆対称一次モードの空力不安定振動が発生するとされているが、今回得られた空力負減衰領域はそれよりも大きい範囲となっている。

(3) パラメータの変化に伴う周波数応答関数の変化

非定常空気力を考慮した屋根面の動的な応答を把握するために、空力剛性係数 a_K 、空力減衰係数 a_C を組み込んだ動的応答倍率を用いた評価を行う。ここでは非定常空気力が振動数に与える影響は小さく、静的変形や非定常空気力による振動数の変化は考慮しないものとする。式(13)と(14)に示された空力剛性係数 a_K と空力減衰係数 a_C を用いると、空力剛性定数比 K_a/K_S と空力減衰定数 h_a および動的応答倍率 $|X(f)|^2$ は次式のように表される⁹⁾。

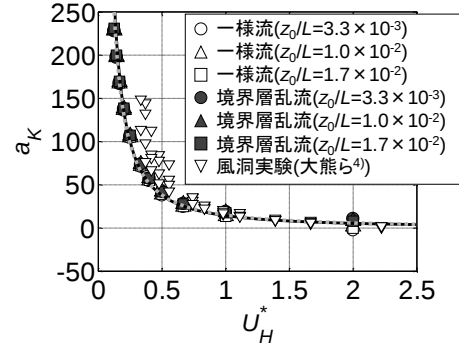
$$\frac{K_a}{K_S} = -\frac{1}{8\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_s} \left(\frac{U_H}{f_s H} \right)^2 \frac{H}{L} a_K(U_H^*) \quad (15)$$

$$h_a = -\frac{1}{16\pi^2} \frac{\rho_a}{\rho_s} \left(\frac{U_H}{f_s H} \right)^2 \frac{H}{L} a_C(U_H^*) \quad (16)$$

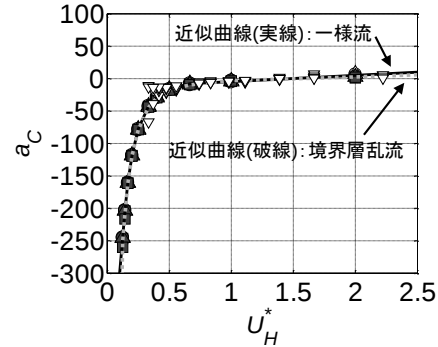
$$|X(f)|^2 = \frac{1}{\left\{ 1 - (f/f_s)^2 + K_a/K_S \right\}^2 + 4(h_s + h_a)^2 (f/f_s)^2} \quad (17)$$

ここで、 ρ_a は空気密度、 ρ_s は屋根の密度、 f_s は構造物の固有振動数、 h_s は構造減衰定数を表す。ここでは、実ス

ケールの大空間構造物を対象とし、スパン方向の長さ L および軒高 H はそれぞれ 120m、20m と仮定する。また、固有振動数 f_s は 0.5Hz、減衰定数 h_s は 1% とする。図-9(a) に単位面積あたりの屋根の重量 M_R を 2kg/m^2 とし、風速 U_H を 10~40m/s まで変化させた結果、図-9(b) に $U_H=30\text{m/s}$ とし、 M_R を $1\sim6\text{kg/m}^2$ まで変化させた結果を示す。ここでは、図-8に示された a_K 、 a_C の近似曲線を用いることで広範囲の U_H^* に対して評価を行っている。これらの結果

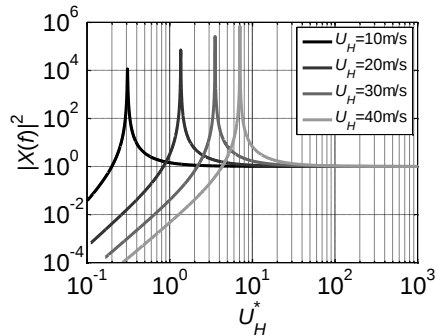


(a) 空力剛性係数

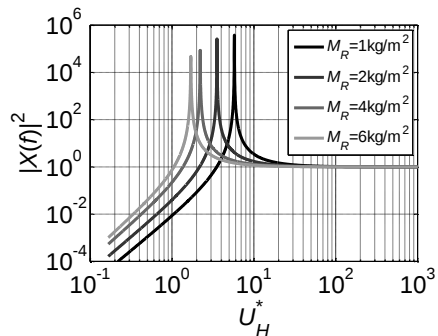


(b) 空力減衰係数

図-8 非定常空気力の無次元風速による変化



(a) 風速の変化 ($M_R=2\text{kg/m}^2$)



(b) 屋根質量の変化 ($U_H=30\text{m/s}$)

図-9 動的応答倍率

によると、 U_H^* が増加すると、 α_K の影響によって見かけの剛性が変化し、 $|X(f)|^2$ のピーク値が大きくなる。一方、 M_R が増加すると、 $|X(f)|^2$ のピーク値は徐々に小さくなる。これは、屋根の質量の増加に伴い、見かけの減衰が大きくなるためである。つまり、空力不安定振動の発生を抑制するためには、屋根の質量の制御が重要であると考えられる。

(4) スペクトルモーダル解析による屋根の動的応答評価

前節で得られた動的応答倍率 $|X(f)|^2$ を用いて屋根の動的応答を評価する。逆対称一次モードで振動する屋根に作用する一般化風力 $\tilde{F}(t)$ は次式で表される。

$$\tilde{F}(t) = \int_0^L \phi(s) f(s, t) ds \quad (18)$$

ここで、 $f(s, t)$ は屋根の位置 s に作用する外力を表す。スペクトルモーダル解析を用いると、一般化変位の標準偏差 σ_w は次式によって表される。

$$S_x(f) = \frac{1}{K_0^2} |X(f)|^2 S_F(f) \quad (19)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\int_0^\infty S_x(f) df} \quad (20)$$

ここで、 S_x は変位のパワースペクトル密度、 S_F は一般化風力のパワースペクトル密度、 K_0 は空力剛性と構造剛性による一般化剛性を示す。図-10に式(19)および(20)を用いて得られた一般化変位の標準偏差 σ_w を屋根のスパン L で無次元化した結果を示す。凡例は屋根面の単位面積当たりの質量 ρ_s を表し、横軸は軒高風速 U_H を示す。また、凡例のFSIは非定常空気力として α_K 、 α_c の効果を考慮した結果、noFSIは非定常空気力の効果を考慮していない結果を表す。

いずれの結果についても軒高風速 U_H の増加とともに屋根の振動応答が大きくなっていることが分かる。屋根の質量が小さい場合、 $U_H > 34 \text{ m/s}$ で非定常空気力を考慮した場合の振動応答が大きくなる。しかし、 $\rho_s = 2 \text{ kg/m}^2$ よりも屋根の質量が大きい場合、いずれの結果についても非定常空気力によって屋根の応答が低減されている。つまり、今回検討した範囲においては、大スパン屋根の風による振動応答は屋根の質量が大きいほど小さくなる

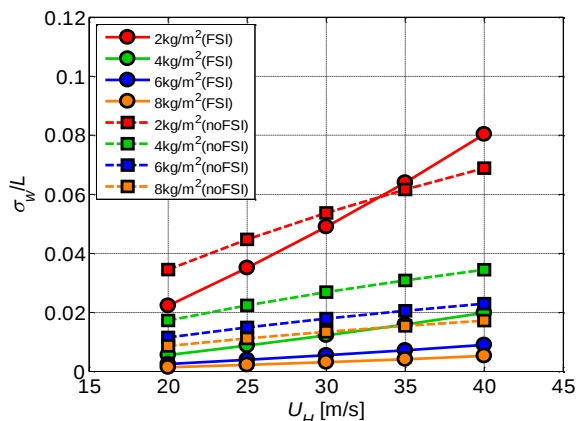


図-10 風速の変化に伴う一般化変位の標準偏差

と考えられる。実際に大スパン屋根を建設する際には、軽量の屋根が望まれるが、屋根の空力安定性を考慮した設計を行う場合、ある程度の質量をもたせておくことが流体と構造体の相互作用を考えた設計を行う上では重要になる。

5. まとめ

本研究では大スパン屋根を有する陸屋根構造物に作用する基本的な風圧分布と非定常空気力の特性について、LESを用いた強制加振解析に基づき検討し、屋根面の台風安全性に関する検討を行った。以下に主な結論を示す。

- ・ RMS 変動風圧係数は屋根面の振動の影響を受けやすく、流入気流よりも屋根の振動の影響を強く受ける。一方、平均風圧係数はRMS変動風圧係数ほど屋根面の振動の影響を受けないものの、加振振動数や加振振幅が大きくなるにつれてその分布がやや変化する。
- ・ 空力剛性と空力減衰に基づき非定常空気力を評価すると、乱れの小さい一様流の方が境界層乱流よりも空力不安定振動が励起されやすい。また、非定常空気力を用いて屋根の動的応答倍率を求めると、その大きさは接近流の速度や屋根の質量によって変化する。そして、構造物の応答を小さくするためには屋根の質量が重要になると考えられる。
- ・ スペクトルモーダル解析に基づき屋根の動的応答の評価を行うと、屋根の質量が 2 kg/m^2 よりも大きい場合、流体と構造体の相互作用を考慮した屋根の振動応答が小さくなることが明らかとなった。大スパン屋根の空力安定性を考慮した設計を行う場合、屋根にはある程度の質量をもたせておくことが重要と考えられる。
- ・ 今後は屋根の形態によって変化する屋根まわりの流れ場に着目し、様々な形状を有する大スパン屋根に対して空力安定性の検討を行うことで、大空間構造物の耐風安全設計の一助となるような検討を進める。

謝辞: 本研究はJSPS 科研費(課題番号: 16J01789)および公益財団法人能村膜構造技術振興財団の助成を受けたものである。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Uematsu Y. and Uchiyama K.: Wind-induced dynamic behavior of suspended roofs, The Technology Reports of the Tohoku University, Vol. 47, No. 2, pp. 246–261, 1982.
- 2) Matsumoto T.: Self-excited oscillation of a pretensioned cable roof with single curvature in smooth uniform flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 34, No. 3, pp. 304–318, 1990.
- 3) 三宅昭春, 吉村健: 吊屋根の空力弾性振動に関する基礎的研究 第2報 渦放出と励振発生の関係について, 日本建築学会構造系論文報告集第438号, pp. 39–48, 1992.
- 4) 大熊武司, 丸川比左夫: 大スパン屋根の空力不安定振動の発生機構について, 日本風工学会誌第42号, pp. 35–42, 1991.

- 5) Ding W., Uematsu Y., Nakamura M. and Tanaka S. : Unsteady aerodynamic forces on a vibrating a long-span curved roof, Wind and Structures, An Int'l Journal, Vol. 19, No. 6, pp. 649–664, 2014.
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.
- 7) 大熊武司，丸川比左夫，萩澤毅：大スパン建造物の屋根面に作用する非定常風圧特性，第10回風工学シンポジウム論文集，pp.73–78, 1988.
- 8) 上田宏，田村幸雄，藤井邦雄：陸屋根の平均風圧性状に対する気流の乱れの影響(陸屋根の風圧性状に関する研究：その1)，日本建築学会構造系論文報告集第425号，pp.91–99, 1990.
- 9) 上田宏，田村幸雄，藤井邦雄，勝村章：陸屋根の変動風圧性状に対する気流の乱れの影響(陸屋根の風圧性状に関する研究：その2)，日本建築学会構造系論文報告集第447号，pp.17–30, 1993.

「命を守る」小中学生を対象とした 水防災教育プログラムの作成支援

藤ノ木 沙良¹・辻 隆宏¹・大丸 歩¹・桑原 秀和¹・木伏 重男²

¹北陸地方整備局 信濃川下流河川事務所 調査設計課 (〒951-8153 新潟市中央区文京町14-13)

²(前)北陸地方整備局 信濃川下流河川事務所 調査設計課(現管理課) (同上)

2017年6月にとりまとめられた「水防災意識社会の再構築に向けた緊急行動計画」において、防災教育の促進が位置づけられたことから、「水害に強い信濃川下流域づくり推進協議会」にて、防災教育支援を実施する指定校を教育関係者等と調整の上決定し、水防災学習のための指導計画となる「水防災教育プログラム」の作成を行った。本稿は、新潟市立味方小学校及び中学校を対象に実施した水災害に関する学習や、国土交通省防災教育ポータル内にある「防災カードゲーム」、「動画」を用いた水防災教育支援の取組状況を報告すると共に、1年間の支援をとおりて明らかとなった防災教育の課題や改善点について整理し、考察を行った。

キーワード 水防災教育、水防災意識社会、防災カードゲーム、まち歩き

1.はじめに

国土交通省では、「平成27年9月関東・東北豪雨」を受け、同年12月11日に「水防災意識社会 再構築ビジョン」を策定し、「施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」として、ハード・ソフト対策を推進している。その後、度重なる災害の発生を受け、2017年6月19日に水防法等の一部を改正する法律が施行された。本法律では、地方公共団体と河川管理者、水防管理者が連携して、洪水氾濫による被害軽減に資する取組を推進するため新たに「大規模氾濫減災協議会（以下、協議会という。）」制度を創設し、設置を義務づけている。

信濃川下流河川事務所（以下、当事務所という。）では、「平成23年7月年新潟・福島豪雨」を受け、関係機関と連携して、流域全体の地域防災力を向上させる治水方策を推進するため、2013年5月に「水害に強い信濃川下流域づくり推進協議会」（以下、信濃川下流協議会という。）を組織しており、これを法律上の協議会に位置づけている。

また、2017年改正の水防法の施行と合わせ、同年6月20日に『水防災意識社会の再構築に向けた緊急行動計画（以下、緊急行動計画という。）』がとりまとめられた。本計画では、協議会において水防災教育支援を実施する学校を教育委員会と連携して決定し、指導計画の作成支援に着手することとしている。

その後、2017年11月には、国土交通省及び文部科学省

から各地方整備局及び各都道府県・指定都市教育委員会に対し、協議会において学校における防災教育の充実に向けた取組を強化するよう通知がなされた。取組に際して、以下の2点が示されている。

①教育委員会及び学校の意向や実情を十分に踏まえること。

②「命を守る」という観点に留意し、災害の危険が迫っている段階において必要なのは、緊急的な避難行動であることの正確な理解が進むよう工夫すること。

ここまでの流れを受け、信濃川下流協議会として、水防災教育支援を行い、水防災学習のための指導計画となる『水防災教育プログラム』の作成を行うこととした。

なお、新潟県では既に「自分たちが生活する地域の自然との関わり方を学ぶこと」、「生きぬく力を育むこと」を基本理念とした『新潟県防災教育プログラム』が策定されているため、水防災教育支援内容のベースとしている。

今回、水防災教育プログラム作成にあたっての支援校の決定は、新潟市教育委員会と調整し、信濃川の派川である中ノ口川近傍に位置する新潟市立味方小学校及び中学校とした。同校は、新潟市教育委員会が2015年から2019年の5年間で市内全校を対象に防災教育の支援を行う「「防災教育」学校・地域連携事業」の2018年の対象校でもある。そのため、信濃川下流協議会からの支援の他に、

新潟市の支援事業として新潟市南区が支援を行っている。各支援機関の関係性は図-1に示すとおりである。

本稿は、新潟市立味方小学校及び中学校を対象に実施した水災害に関する学習や、国土交通省ホームページ「防災教育ポータル」内にある、既存のツールを用いた水防災教育支援の取組状況をまとめたものである。また、今回の取組をとおり、明らかとなった防災教育支援の課題や改善点について整理し、考察を行った。

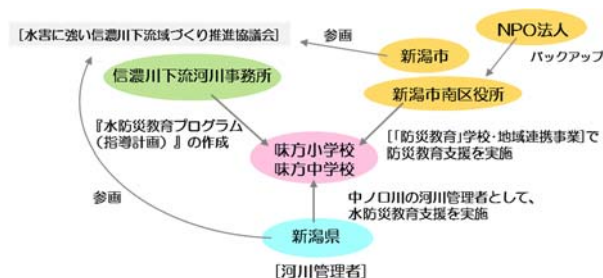


図-1 水防災教育の関係性

2. 水防災学習

水防災学習のねらいとして、特に「命を守る」という観点に留意し、水害の危険性、緊急的な避難行動について、児童達の正確な理解を進めていくことを目指した。

また、前述したとおり、教育委員会及び学校の意向や実情を十分に踏まえながら取組を実施することとなっている。これまでの水防災教育は、出前講座など、ほとんどが1回きりの学習であるため、学校側の意向を取り入れた学習内容にするには限度があった。今回の支援では、水防災学習支援の経緯、支援内容について事前打合せを実施することで、学校側の意向を取り入れると共に、学校及び各機関との連携が密なものになるよう工夫した（写真-1）。参加者、実施内容については表-1に示すとおりである。

水防災学習の実施フローを、図-2に示す。初めに、近年の水害の発生状況や、味方地区の特性、水害への備えや、避難時に注意すべきことなど座学を行い、水害に対する正しい知識の習得を図った。その後、実際に地域を歩き、危険箇所などを確認し避難マップを作成した。生徒の関心や理解が深まるよう、小学生を対象に既存ツールの「防災カードゲーム「このつぎなにがおきるかな？」すいがい編」（以下、防災カードゲームという。）や「子供向け動画「洪水から身を守るには」～命を守るための3つのポイント」（以下、動画という。）を用いた実習を行った。また、学習終了毎に、学習内容の定着を図ると共に生徒の理解度を把握するため、学習内容の振り返りをする「ふりかえりシート」を記入している。「ふりかえりシート」への記入は小学生のみが実施した。

以下、それぞれの学習内容について記述する。

（1）水害についての座学（2018年9月18日、19日、10月9日）

小学校全学年で実施し、5,6年生（以下、高学年という。）、1,2年生（以下、低学年という。）、3,4年生（以下、中学年という）に分けて実施した。授業時間は、事前打ち合わせでの学校側からの要望を受け、それぞれ45分間で実施している。全国で発生している近年の大規模水害、中ノロ川の既往災害についてや、味方地区の地形



写真-1 事前打ち合わせの様子

表-1 事前打ち合わせの実施内容

実施日・内容	特筆すべき意見	参加者
2018年5月18日 ・水防災学習支援の経緯について ・支援内容（案）について	○学校意見 ・使用する資料は、子供向けに文字を大きくする ・地域の写真を使用するなど、地域特性を出してほしい	味方小学校、中学校、新潟県土木部、信濃川下流
2018年8月2日 ・授業内容と使用する教材（資料）について	○区役所意見 教員の負担軽減のため、教材（PPT）に読み原稿をつけてほしい	新潟県土木部、新潟市南区役所、信濃川下流
2018年8月6日 ・授業内容と提供資料について	○学校意見 授業のコマ割があるので、学習時間は1時間程度（45分～60分）としてほしい	味方小学校、中学校、新潟県土木部、新潟市南区NPO法人、信濃川下流

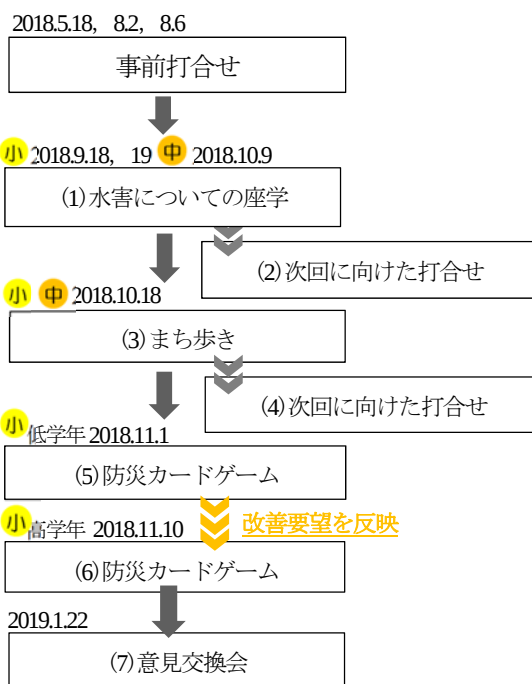


図-2 水防災学習の実施フロー

について説明し、浸水した場合の危険をハザードマップに絡めて説明した。また、「水害」にばかりスポットを当てるのではなく、反対に雨が降らなかったらどうなるのか、といった雨の恩恵についても学習できるようにした。教材の作成にあたっては、パワーポイントを使用し、文字を大きくしたり、各学年の履修内容に漢字表記を合わせ高学年、中学年、低学年とで分けて作成した。（写真-2、3）中学校では、新潟市支援事業にて教材の作成及び授業の講師を行っている。

（2）次回に向けた打合せ（2018年9月18日）

学習終了後には、学習内容の詳細についてや、これまでの学習で得られた気づきを反映することを目的に、次回学習に向けた打合せ実施した。

次回実施予定であった、「まち歩き」について以下の要望があり、対応している。

- ・避難マップを作成するために、中ノ口川を目立たせた住宅地図を提供してほしい。

（3）まち歩き（避難マップの作成）（2018年10月18日）

座学だけでは学習内容の定着が薄い、普段見慣れた学校周辺を「災害時はどうなるのか」という視点で考えることで、水害への意識を高めることを目的に新潟市支援事業にて、「まち歩き」を実施した。小学校高学年と中学生が学校周辺を歩き、「大雨の時注意すべき危険箇所」、「安全に避難できる経路」を確認するまち歩きを行った。

（写真-4）まち歩き終了後、生徒自らが得た情報を地図に書き込み、撮影した写真を貼りオリジナルの避難マップを作成した。まち歩きを50分間、その後の避難マップ作成を35分間で実施している。

（4）次回に向けた打合せ（2018年10月18日）

次回実施予定であった、防災カードゲーム、動画を使用した学習について、以下の要望があり対応している。

- ・前回の学習（まち歩き）の写真があると、学習内容を思い出せるので入れて欲しい
- ・避難時の服装について説明してほしい

（5）防災カードゲーム、動画を使用した学習（2018年11月1日）

小学校低学年、中学年を対象に実施した。防災カードゲームや、動画、今回作成したパワーポイントの教材を使用し、これまでの学習を踏まえ、水害時の適切な避難方法、「命を守る行動」について学習した。（写真-5、6）

「防災カードゲーム」は、水害の危険についての文章が書かれており、4枚1組で、内3枚を並べると文章が繋がり、残り1枚は、文章全文と、そうならないためにはど



写真-2 使用した教材



写真-3 水害についての座学の様子



写真-4 まち歩き、避難マップ作成の様子



写真-5 防災カルタの様子

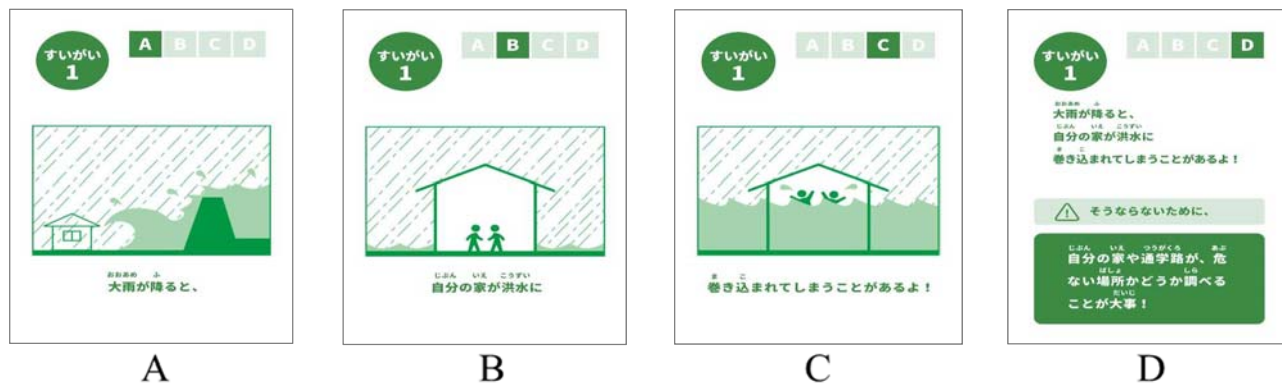


写真-6 防災カードゲーム

うしたら良いかが記載してある。以下に一例を示す。

A:「大雨が降ると」

B:「自分の家が洪水に」

C:「巻き込まれてしまうことがあるよ!」

D: A～Cまでの文章と、そうならないためにはどうしたら良いか。

遊び方は、防災カルタ、防災七並べ、防災ババ抜き
の3種類がある。時間配分、参加可能人数を考慮し、今回の学習では防災カルタを行うこととした。防災カルタのルールは一般的なカルタと同じで、A～Cを取り札とし、Dを読み札とする。読み札を読み、それを生徒が取るというもので、カルタと異なる点は、取り札が3枚ある点である。「防災カルタ」を行った後は、生徒にカードを正しい順番に並べてもらい内容の定着を図った。

しかし、4枚1組のカードには、アルファベットのAからDまでが振られている。そのため、記載された文章ではなく、アルファベットを揃えれば容易に正しい順番に並べることが可能となり、防災カルタを実施する場合においては問題点となった。

動画の放映時間は8分間で、洪水から身を守るための3つのポイントをドラマ形式で説明している。3つのポイントは以下に示すとおりである。

①「どんな危険があるのかを調べ、家族で話し合う」

②「浸水が始まる前に逃げる」

③「安全に逃げる方法を知っておく」

動画放映後には、3つのポイントをもう一度説明し、中ノロ川があふれた場合はどうなるのかなど、地域の特性に絡めて説明した。

(6) 防災カードゲーム、動画を使用した学習（2018年11月10日）

小学校高学年を対象に実施した。同日には、味方地区自主防災会との合同訓練が行われている。小学校全校生徒が参加し、避難訓練や、「まち歩き」の活動報告をポスターセッション形式で実施した。授業参観日であり、保護者も参加している。当日の学習は、保護者も見学し、防災カルタは共に実施した。これまで生徒のみの学習であったが、保護者も参加することで、家族で水防災について学ぶ機会となった。

防災カルタを行う際、1回目が発覚した、問題点であるアルファベットを削除し、文章の意味を考えて、正しい順番に並べることに集中できるよう工夫した。また、いきなり「防災カルタ」を行うのではなく、一度生徒自ら考えて正しい順番に並べ替え、答え合わせを行い、文章の内容を考える場面を設けた。

(7) 意見交換会（2019年1月22日）

一連の水防災学習終了後、各支援機関及び、小学校、中学校教諭合同で意見交換会を行った。

反省意見としては、小学校、中学校共に「市からの支

援と、信濃川下流協議会からの支援が重なり混乱した」、「初回の打ち合わせを5月に行ったが、次の動きが9月になってからと初動が遅かった」、「年間計画が決定してから、今回の支援が決定したので大変だった」という意見があった。

好意的意見としては、「これまでの防災教育は地震、火事がメインで水防災の取組は行っていなかったため、非常に濃い内容を学ぶ良い機会となった」、「水防災の教材がほとんど無かったが、必要な教材を提供してもらいありがたかった。パワーポイントなど、自由にカスタマイズできて使いやすかった」などがあった。この他に、他地域への展開に向けて、それぞれの地域特性を考慮し、その場所に合った危険に対する学習を行うべきだ、という意見があった。

3. 水防災学習の効果検証

水防災学習をとおり、生徒、教諭の意識変化や学習内容の継続性を検証するために、小学校生徒は学習終了毎に「ふりかえりシート」の記入を行い、小学校及び中学校教諭には、水防災学習全体をとおしてのアンケートを実施した。ふりかえりシート、アンケートの質問項目は表-2のとおりである。ふりかえりシートの主な回答を以下に示す。

Q3の回答として、「水害がとても恐いことが分かった。災害リュックを準備しておく。すぐに避難する。」、Q6の回答として、「天気予報を見て大雨が降らないか確認する」といったものがあつた。

適切避難のタイミングや水害に対する正しい知識を身につけていることが読み取れる。

小学校及び中学校教諭を対象に行った、水防災学習全体に関するアンケートのQ.11の回答では、小中学校教諭

表-2 ふりかえりシート水防災学習全体をとおしてのアンケート質問項目

「ふりかえりシート」の質問（小学生対象）	
「水害についての座学」終了時	
Q.1	もし雨が降らなかったら私たちの生活はどうなってしまいますか？
Q.2	大雨の時、味方地区はどうなりますか？
Q.3	今日の学習で分かったこと、もっと知りたいことを自由記述
「防災カードゲーム、動画を使用した学習」、「合同防災訓練」終了時	
Q.4	洪水が発生するかもしれないとニュースがあつたとき、あなたならまずなにをしますか？
Q.5	洪水の時、家の近くで危ない場所がありますか？
Q.6	今日の学習で分かったこと、避難時に気をつけたいと思ったことを書こう
Q.7	今日の学習の振り返りを書こう
水防災学習全体をとおしてのアンケート（小学校・中学校教諭対象）	
全体をとおして	
Q.8	先生の水防災学習への関わり度合い
Q.9	学校の防災意識を高める効果はあつたか
Q.10	Q.10に対し、もっとも効果があつたと思われる内容
Q.11	児童の防災意識を高めるため（持続させる）に効果的だと思うもの
Q.12	当初計画に合致していたか
Q.13	最も負担であつたこと
Q.14	今後の水防災学習を継続するとき、あつたら良いと思う教材や支援
Q.15	自由記述

共に、約80%以上が「体験型の取組を継続的に実施」が効果的であると回答があった。また、小学校教諭は「保護者と一体となった取組を継続的に実施」が73%と次いで多い回答となったが、反対に、中学校教諭は17%と低い。小学校では実際に保護者も参加していたことが起因すると考える。中学校では、保護者が参加する機会は無かった。（図-3）

4. 水防災教育プログラムの作成

本取組内容を元に、水防災学習のための指導計画となる水防災教育プログラムの作成を行った。水防災教育プログラムには、1年間実施したの学習内容を元に作成し、学習の内容やそのとき使用する教材が分かるように示してある。加えて、新潟県防災教育プログラムとの対応表にもなっており、新潟県で実施している水防災教育と独立したものにならないよう工夫した。（写真-7）

信濃川下流域内の教育委員会、小学校、中学校及び関係機関への共有を図っているところである。

5. 考察

一連の水防災学習を実施する中で、以下の2つの観点で、課題や改善点について考察をした。

（1）水防災教育プログラム（指導計画）の作成、作成後の展開について

今後、水防災学習を水防災教育プログラムを活用して、普段の授業に組み込んでいき、学校単独で実施していくこととなる。とはいえ、水防災教育プログラムを各機関に共有して「完了」ではなく、その後、水防災教育プログラムを活用した結果を踏まえ、水防災教育プログラムの改良や、各学校に合わせた内容に作り変えていく必要がある。今回作成した水防災プログラムは、あくまで味方小学校及び中学校の内容を元に作成している。他校で利用した時、不足する部分や、先生が授業をするのに「使いにくい」と感じる部分がある可能性がある。また、水災害の特徴として地域の土地や川の状況に大きく左右される。そこで、同じ流域内であっても、一律的な学習を行うのではなく、地域の特性を盛り込んだ水防災教育プログラムにすべきであるとする。今回の学習では、自分の家が浸水してしまう可能性があることや、身近な川が過去に溢れていたという事実を学び、水防災への意識を高めている。ハザードマップが地域毎に作成されているように、水防災教育プログラムも地域毎もしくは学校毎に作成すべきだと考える。

Q.11児童の防災意識を高めるため（持続させる）に効果的だと思うもの

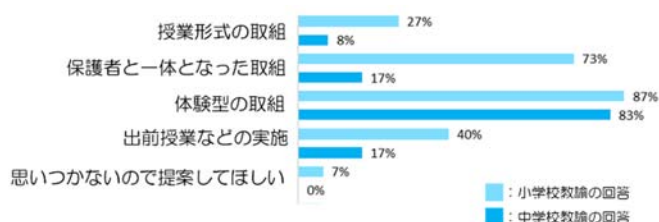


図-3 水防災教育学習全体のアンケート結果(Q.11)

とはいえ、いきなり学校毎の水防災プログラム作成に着手するのではなく、まずは水防災プログラムの改良を行い、段階的に作成していくべきだと考える。1つの案として、新たに別の支援校を決定し、同様に1年間の支援を行い、実態に合わせて改良を行ったものを再度各機関に展開を図る、などが挙げられる。

（2）水防災学習全体について

水防災教育プログラムの作成に限らず、水防災学習全体について課題や改善点が考えられる。

現在、水防災学習の場としては、主に学校からの依頼を受け、事務所職員が学校に出向く「出前講座」がある。前述したように、単発の学習であるため、学校側の意向を取り入れた学習内容とすることが難しいのが実情である。そこで、1度だけの出前講座であっても、学校側と学習前の事前打ち合わせと、終了後の打合せを行うことで、水防災学習の手法、内容をブラッシュアップさせることができると考える。しかし、効果が期待できる反面、気軽に依頼できる出前講座のメリットが薄れ、学校側の負担増加に繋がる可能性がある。

次に、指導者である教諭の水防災教育の指導方法について、理解が不十分であることが挙げられる。今回の支援をする中でも、「何をしたらいいかわからない」、「様々な情報が提供されているが、使い方、伝え方がわからない」という声があった。ただ教材や、水防災教育プログラムを提供するのではなく、詳細な実施例や、分かりやすい使用方法を伝えていく必要がある。1つの案として、既に提供、共有されている水防災に関する情報や教材を1つにまとめたプラットフォームを作る。もしくは、国や地方自治体、NPO法人などの支援機関の連絡先をまとめ、どこに問い合わせればいいのか分かるように、水防災教育プログラムにて提示するなどが挙げられる。

この他、現在行っている生徒への出前講座の他に、水防災教育の実施のやり方や、水害とは、水防災とはについて先生向けの出前講座を実施すれば水防災教育への敷居が下がるのではないかと考える。

6. おわりに

「命を守る」という観点において、重要となるのは、一人ひとりの「意識」である。

誰かが守ってくれる、なんとかなる、といった受け身の姿勢ではなく、日頃から水害に備える、いざという時、自分で逃げなくてはいけない、という能動的な「意識」を持つことである。

水防災教育において、生徒に、水害は自分とは縁遠いことだという認識を持たせてはいけない。

今回の水防災学習の中で、「まち歩き」を行っているが、これは普段見慣れた地域が、水害がおこったらどうなるのか、どうやって逃げるのか、ということ自分の足で歩きながら考える機会であり、自分たちにも当てはまるのだ、という「意識」付けに有効であったと考える。

今回の取組では、先生の意欲と協力があって成立している。一方的な支援ではなく、事前の打ち合わせで、なぜ水防災学習を実施する必要があるのか、何を伝えていきたいのかを説明し理解していただいたことも影響していると考え。

生徒は1年間をととしての継続、段階的な学習により、水害への理解を深め、避難行動の必要性、適切な避難方法を学ぶことができたと考えられる。

本支援のみで途切れるのではなく、引き続き信濃川下流協議会では、水防災教育プログラムを展開し、水防災教育を推進していく。これらの取組により水防災教育の

新潟県防災教育プログラムより		防災学習 指導要領
洪水災害編の カリキュラム構成	洪水災害編の各授業で 教える学習テーマ	座学、実習で用いる スライドの主な内容
低学年（1・2年生）		
必須学習項目	必須-1 大雨が降った時の危険性を知る ・大雨が降った時の状況を考える。 ・大雨が降った時の身を守るための行動を知る。	①自然（川）の恵みについて知る ②地域の危険性について知る ③災害からの避難方法について理解を深める 座学1-1 雨が降るとどうなる？ 座学1-2 雨が降らないとどうなる？ 座学2-1 大雨が降るとどうなる？ 座学3-1 “私たちの地域”の地形のとくちょうを知ろう 座学3-2 ハザードマップを見てみよう 実習1-1 “私たちの地域”に大雨が降るとどうなる？ 実習1-2 “私たちの地域”の地形のとくちょうはなんだろう？ 実習2-1 こう水から身を守る3つのポイント！ 実習3-2 ゲームの答えあわせ～水害で危険なことにならないために～
	必須-2 大雨が降った時の身を守る行動を知る ・大雨で洪水が発生した時の危険性を知る。 ・大雨が降った時の避難方法について理解を深める。	③地域の危険性について知る ④災害からの避難方法について理解を深める 座学2-1 大雨が降るとどうなる？ 実習1-2 “私たちの地域”の地形のとくちょうを知ろう 座学3-2 ハザードマップを見てみよう 実習1-1 “私たちの地域”に大雨が降るとどうなる？ 実習1-2 “私たちの地域”の地形のとくちょうはなんだろう？ 実習2-1 こう水から身を守る3つのポイント！ 実習3-2 ゲームの答えあわせ～水害で危険なことにならないために～

写真-7 水防災教育プログラム（指導計画）

子供達への浸透、またご家族へ波及していくことが期待できる。

謝辞：本稿の執筆にあたり、ご協力いただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

北海道胆振東部地震による斜面崩壊土砂に 起因した河川の濁水発生状況 および農業取水のリスク管理

田中 健二¹・鵜木 啓二¹・川口 清美¹

¹土木研究所寒地土木研究所 水利基盤チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

厚真川流域では、平成30年北海道胆振東部地震により斜面崩壊が発生し、濁水発生に伴う農業用水への影響が懸念された。そこで、厚真川本川の頭首工4地点に濁度計を設置し、時期ごとの濁水の発生状況を把握した。その結果、非灌漑期では、支流の崩壊地面積率と関係があることが示唆され、灌漑期では、頭首工の濁水低減効果との関係が明らかとなった。さらに、SS濃度を指標とした取水操作手法を検討した結果、大きな出水時に1週間取水できない可能性があった。灌漑が必要な時期に水不足が生じると収量・品質の低下が懸念されるため、取水を暫定的に許容することが現実的な対応策と考えられた。

キーワード 自然災害，斜面崩壊，浮遊物質濃度，農業用水

1. はじめに

近年、平成28年熊本地震に代表される大規模地震や平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月豪雨に代表される想定を超える規模の豪雨により大規模な斜面崩壊が頻発している。斜面崩壊に起因した道路の寸断や河道閉塞などの一次的な影響のほかに、崩壊地からの土砂流出による河床への堆砂や濁水発生などの二次的な影響も懸念される。2018年9月6日に北海道胆振東部地方において最大震度7の地震（平成30年北海道胆振東部地震）が発生し、震源地である勇払郡厚真町周辺では大規模な斜面崩壊が発生した（図-1）。国土交通省の調査報告¹⁾によると、この崩壊面積は国内の地震災害の中で明治以降最大の大きさの13.4km²、崩壊土砂量は5番目に多い3,000万m³と推定されている。そのため出水時には、斜面崩壊地の侵食や堆積した土砂に起因した濁水が厚真川で発生することが予想された。さらに流域下流には水田地帯が広がり、厚真川の水を取水しているため、農業用水の水質への影響が懸念される。

斜面崩壊により濁水が発生し浮遊物質（以降、SS：suspended solids）が増えると河川生態系などに大きな影響を及ぼす。SSが生態系に及ぼす影響には、魚類のエラを塞ぎ、呼吸を妨げて窒息死させる危険性や、太陽光の透過を妨げ、藻類の光合成を阻害させる等がある

2) 一方で、農業用水として取水され農地に堆積したSSは、稲の活着根の損傷や有機性沈降物質の嫌氣的分解による根の損傷などの被害が及ぶことが知られている³⁾。しかし、斜面崩壊に伴う濁水発生が農業に及ぼす影響を対象とした研究は、一部に限られる^{4) 5)}。石川県手取川流域では、豪雨に伴い土砂崩壊が発生し、130万m³の崩壊土砂により最大濁度で4,012度（カオリン度）の濁水が発生した。濁水の発生期間が長期間継続していたため、下流扇状地の水田では農業用水として高濃度の濁水を取水せざるを得ない状況であった。濁水発生前後で水田減水深調査を実施し比較した結果、濁水の影響により水田



図-1 斜面崩壊地の状況（2018年9月13日撮影）

浸透量が36%減少したことが報告されている。以上から、濁水による農業用水への影響が大きい場合には、対応策を検討する必要がある。

厚真川流域で発生した斜面崩壊は、規模が大きく広範囲であることから、濁水発生がより顕著であることが予想される。しかし、厚真川では常時、濁水を観測する態勢がとられていないため、濁水発生状況が不明である。営農を継続するために水田農地にその濁水を取水せざるを得ない期間があれば、農業水利施設に堆砂することによる送水能力の低下や農地の土壌物理性の変化などの影響が懸念される。そのため、本研究では、厚真川本川において採水調査と連続観測を実施し、濁水発生状況の把握を行った。また、濁水発生状況を基に農業用水への影響を緩和させるリスク管理手法を検討した。

2. 研究対象地

本研究の対象地である厚真川流域は、流域面積 366.1 km²、幹川流路延長 52.3 km である(図-2)。厚真川流域には、樽前山や恵庭岳の第四紀の火山活動がもたらした降下火山砕屑物が堆積し、そのため流域の土壌は、粗粒質火山灰土が大部分を占める。粗粒質火山灰土の理化学性は、土粒子の風化程度によって異なる⁶⁾。表層の噴火年代の新しい未風化層は、粗粒質なものからなるため透水性に優れ、保水性、保肥力に劣る特徴がある。風化の進んだ埋没土層は、未風化層に比べ保水性、保肥力に優れる特徴がある。厚真川流域の気候は、太平洋側西部気候区に属し、厚真町の年平均降水量は約 1,200 mm、年平均気温は 7℃である。融雪期は例年 3 月中旬から 4 月中旬までであるが、冬季の積雪量や気象条件により時期が変動する。

一方で厚真町は胆振地方有数の穀倉地帯として知られ

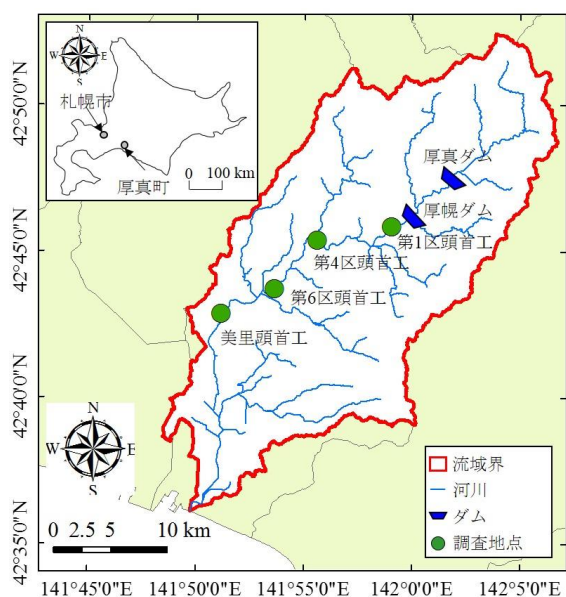


図-2 厚真川流域

て、水田稲作の灌漑期は5月上旬から8月下旬までである。取水源である厚真川の上流域には、農業用ダムである厚真ダムと多目的ダムである厚幌ダムがあり、中・下流域の 3,224 ha の農地(水田 2,866 ha, 畑地 358 ha)を灌漑している。地震後は、厚真ダムは運用を停止し、厚幌ダムは運用されている。厚幌ダムを取水源とした厚幌導水路の整備が国営かんがい排水事業として実施され、2018年にパイプラインに通水が開始されが、地震により管の離脱や破損が生じ被災した。復旧までは長期化するとみられ、厚真川本川の頭首工を利用した暫定取水を行っている⁷⁾。

3. 研究手法

本研究では、厚真川本川にある農業用頭首工4地点において濁度計を設置した。観測対象は取水する農業用水の水質把握を想定しているため、濁度計の設置位置を、頭首工の堰の直上流部とし、取水口の平均的な高さとした。各地点に設置した濁度計は2種類であり、低濃度域(0度~3,000度)から高濃度域(~50,000度)まで観測可能である。測定は10分間隔で行い、連続的に濁水の発生状況を把握した。なお、本研究の観測期間は、2018年11月から2019年8月までである。また、採水調査を非灌漑期の出水時に10回、灌漑期の出水時に2回実施した。採水した試料を室内実験室にてGFPろ過重量法により浮遊物質分析に供し、SS濃度を計測した。試料が対応する日時で濁度-SS濃度関係式を作成し、測定した濁度をSS濃度にキャリブレーションした。一方で、流出土砂の粒径区分を調べるため、非灌漑期における出水時の採水試料から、流出土砂を沈降させて採土し、室内実験室にてレーザー回折・散乱法により粒度分析に供した。

4. 結果

(1) 濁度-SS濃度関係式

濁度とSS濃度の関係を図-3に示す。試料数は、灌漑

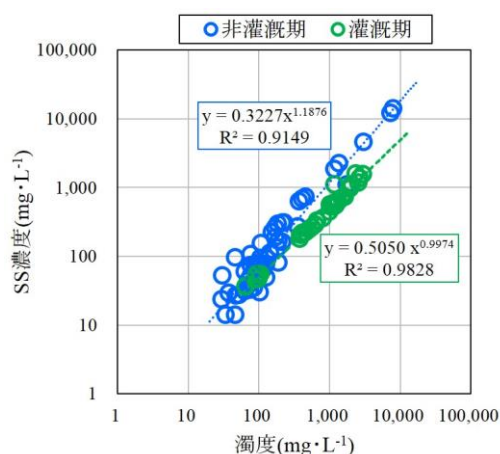


図-3 濁度とSS濃度の関係

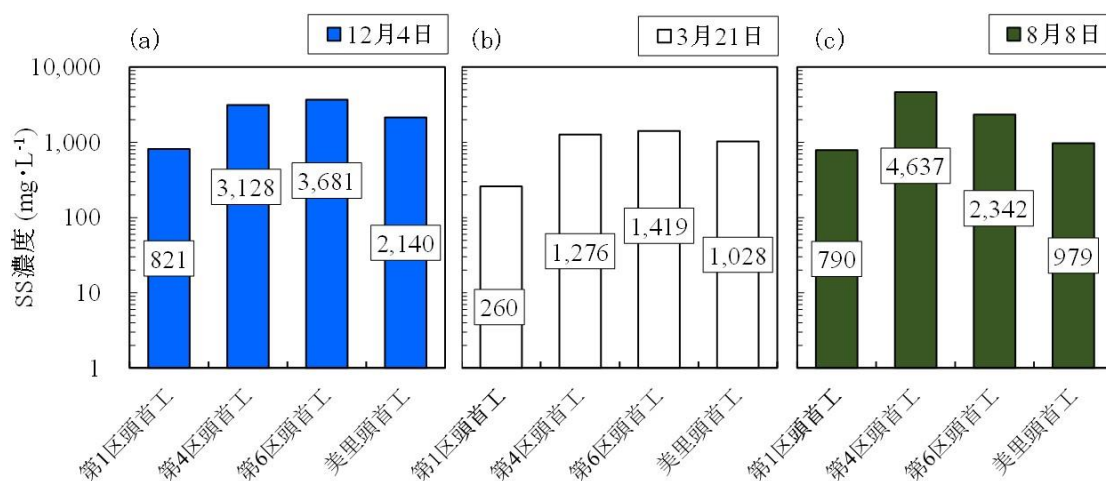


図-4 出水イベントごとのSS濃度の最大値

表-1 出水イベントの詳細

出水イベント	降雨波形	降雨継続時間 (h)	総降水量 (mm)	最大1時間降雨強度 (mm/h)
2018/12/4	複峰型	8	19.5	6.0
2019/3/21	前方主山型	4	5.5	2.5
2019/8/8	複峰型	21	64.0	17.0

期で32個、非灌漑期で49個であった。灌漑期に作成した関係式の相関係数は0.98、非灌漑期に作成した関係式の相関係数は0.91であり、高い相関関係が得られた。しかし、SS濃度が2,000mg/Lから10,000mg/Lまでのデータが十分でないため、今後も採水調査を継続し、出水時のデータ数を増やすことで関係式の信頼性を高める必要がある。

(2) 出水時の濁水発生状況

非灌漑期、融雪期、灌漑期の各時期における出水イベントごとのSS濃度最大値を図-4に示す。出水イベントは各時期における最大の出水であり、詳細を表-1に示す。

全体的にみて総降水量が多く最大1時間降雨強度が強いとSS濃度が高くなる傾向がみられたが、灌漑期と非灌漑期ではSS濃度最大値と気象条件の関係が異なる傾向がみられた。非灌漑期の2018年12月4日の出水では、第6区頭首工で3,681mg/Lを観測したが、灌漑期の2019年8月8日の出水では、総降水量と最大1時間降雨強度が約3倍にもかかわらず第6区頭首工で2,342mg/Lを観測した。また、非灌漑期では第6区頭首工が最も高いSS濃度を観測したのに対して、灌漑期では第4区頭首工が最も高いSS濃度を観測した。各時期のその他の出水イベントでも同様の傾向を示した。

融雪期の2019年3月21日の出水では、第6区頭首工で1,419mg/Lを観測した。特徴として、総降水量が少なく最大1時間降雨強度が弱くてもSS濃度が高くなる傾向がみられた。19日と20日の日最高気温は10℃以上であり、気温上昇に伴う融雪の影響により崩壊地の表層土壌が湿潤状態であったため、21日の少量の降雨でも融雪と相まって侵食が発生したと考えられる。この降雨により積雪深は14cmから0cmまで減少した。2019年の融雪期は積雪量が少なかったことに加え、大きな降雨が無かったためSS濃度最大値が比較的低い値であった。しかし、積雪寒冷地河川では融雪期に降雨があると大きな

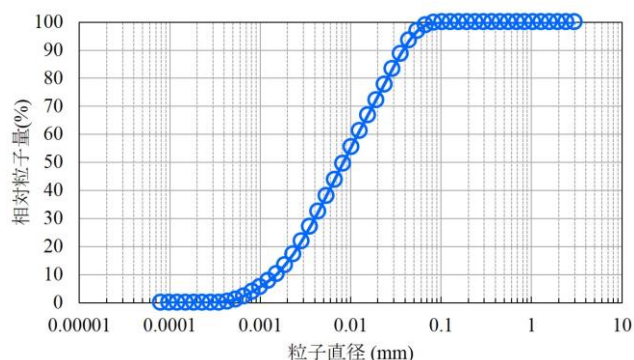


図-5 流出土砂の粒径加積曲線

出水になることが多く、融雪期に濁水発生が顕著になる可能性がある。さらに、融雪期の時期が灌漑期までずれ込む場合に濁水の影響が大きくなるため、そのような年の取水には注意を要する。

(3) 流出土砂の粒径区分

粒度分析により得られた粒径加積曲線を図-5に示す。国際土壌学会が定義している粒径区分では、細砂（粒子直径：0.02mm～0.2mm）が27.7%、シルト（同：0.002mm～0.02mm）が54.9%、粘土（同：0.002mm以下）が17.4%であり、シルト成分が支配的であった。なお、粒粗砂（同：0.2mm以上）と礫（同：2mm以上）は含まれていなかった。3つの区分の質量組成に基づく土性区分はシルト質壤土であった。流出土砂は、砂礫が少なくシルト質を多く含むことから風化が進んだ埋没土層と推察され、斜面崩壊地で多くみられた粗粒質火山灰土のTa-cやTa-dの粒径区分と類似している⁶⁾。

5. 考察

(1) 非灌漑期の濁水発生状況と斜面崩壊地の関係

出水時の濁水発生状況の結果から、非灌漑期におけるSS濃度が最も高い観測地点は第6区頭首工であることが示された。次いで第4区頭首工、美里頭首工、第1区頭首工であった（図-4(a), (b)）。この濁水発生状況の観測地点ごとの差異について斜面崩壊地との関係から考察する。村上⁹⁾は、厚真川の中・上流域を対象に、喜田⁹⁾が作成した斜面崩壊地分布を用いて支川流域ごとの崩壊地面積率を報告した。斜面崩壊地分布に支川流域ごとの崩壊地面積率の情報を追加・編集したものを図-6に示す。第1区頭首工は、上流域に斜面崩壊地が多く分布しているが、直上流には厚幌ダムが在るため土砂が沈降し、SS濃度が高くならなかったと考えられる。第4区頭首工は、上流域に厚真川本川に直接流入する崩壊地や崩壊地面積率が22.6%の日高幌内川が流入しているため、第1区頭首工に比べSS濃度が高くなったと考えられる。第6区頭首工は、上流域に崩壊地面積率が16.1%の頗美宇川と35.3%の東和川が流入しているため、第4区頭首工に比べSS濃度が高くなったと考えられる。美里頭首工は、上流域に崩壊地面積率が26.1%の近悦府川が流入しているが、流域面積が大きく崩壊地面積率が小さい知決辺川（崩壊地面積率10.4%）とウルク川（崩壊地面積率9.0%）が流入しているため、希釈効果により、第6区頭首工に比べSS濃度が低くなったと考えられる。以上から、非灌漑期における濁水発生状況と支流の崩壊地面積率に関係があることが示唆された。しかし、崩壊地面積率は二次元の情報のため、斜面崩壊前後の地形の差分値から崩壊土砂量を計算し、三次元の情報から考察を進める必要がある。

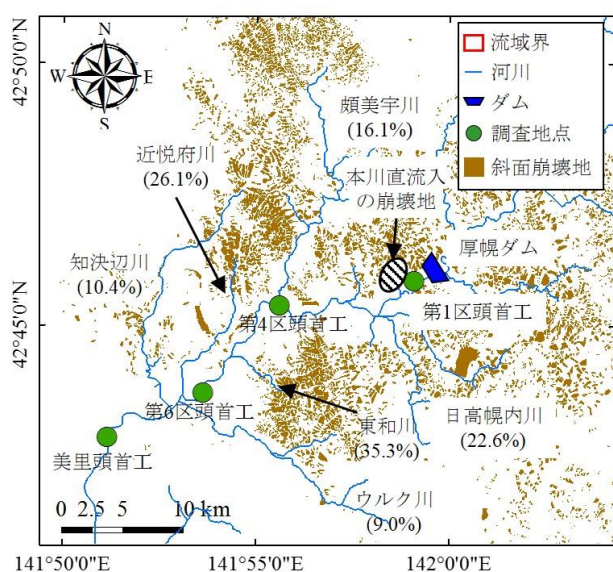


図-6 支川ごとの斜面崩壊面積率（支川名下の括弧内の数値は崩壊面積率）

(2) 灌漑期の濁水発生状況と農業用頭首工の関係

出水時の濁水発生状況の結果から、灌漑期におけるSS濃度は、非灌漑期と比較して総降水量と最大1時間降雨強度が大きいにもかかわらず低い傾向が示された（図-4）。斜面崩壊地から土砂流出量が時期により極端に減少したとは考えづらく、農業用頭首工の存在によってSS濃度が低下したと考えられる。流出土砂の粒径区分は、沈降時間が短い細砂が27.7%含まれ（図-5）、頭首工により河川が堰きとめられ、滞留が生じることで砂成分が沈降したと考えられる。実際に、灌漑期終了後の踏査では、頭首工から上流数十メートルの区間で河床に堆砂が生じていることを確認した。そのため、灌漑期におけるSS濃度の最大値は第4区頭首工が最も高く、次いで第6区頭首工、美里頭首工であり、頭首工による濁水低減効果により、頭首工を流下するごとに段階的にSS濃度が低下したと考えられる。さらに、頭首工の規模により滞留時間が異なるためSS濃度の低減効果が異なると考えられる。今後は、頭首工の規模と堆積した土砂の粒径区分を調査し、濁水発生状況との関係を調べるのが課題である。以上から、灌漑期には頭首工による濁水低減効果が得られたが、灌漑期が終了した後に頭首工の堰が倒されると、灌漑期間に堆積した土砂がその後の出水イベントで流出すると予想され、下流への影響が懸念される。そのため、下流の利水などにどのような影響を与えるかの想定や、それを踏まえたゲート操作方法の検討が必要といえる。

(3) 農業取水のリスク管理手法の検討

2019年8月8日の出水イベントにおけるSS濃度の経時変化を図-7に示す。第1区頭首工を除く第4区頭首工、第6区頭首工、美里頭首工のSS濃度は、降雨後の数時間で急激に上昇し、さらに数時間で急激に低下したが、出水前のレベルまでは下がらず、比較的高濃度の状態が長期間継続した。一方で第1区頭首工の降雨によるピーク後に現れた緩やかな濃度上昇は、直上流の厚幌ダムの影響と考えられる。そのため、下流の頭首工でも同様の変動を示し、降雨開始から50時間を経過したあたりから徐々に低下した。

農業用水としての濁水取水は、農業水利施設や農地の土壌物理性に影響を及ぼすことが予想される。そこで、農業用水における濁水取水の影響を回避する、もしくは最小限に抑えるため、リスク管理として「SS濃度を指標とした取水操作手法」を検討した。今回は、指標としたSS濃度を農業用水水質基準¹⁰⁾である100 mg/Lと、既往の研究^{5), 11)}を参考に設定した農地の物理性及び収量に影響が及ぶ濃度である500 mg/Lとした。取水操作の目安となる時間は、降雨開始後100 mg/L以下を維持する時間を“a：取水可能時間”、500 mg/L以上の時間を“b：取水を停止することが望ましい時間”、100 mg/L以上500 mg/L

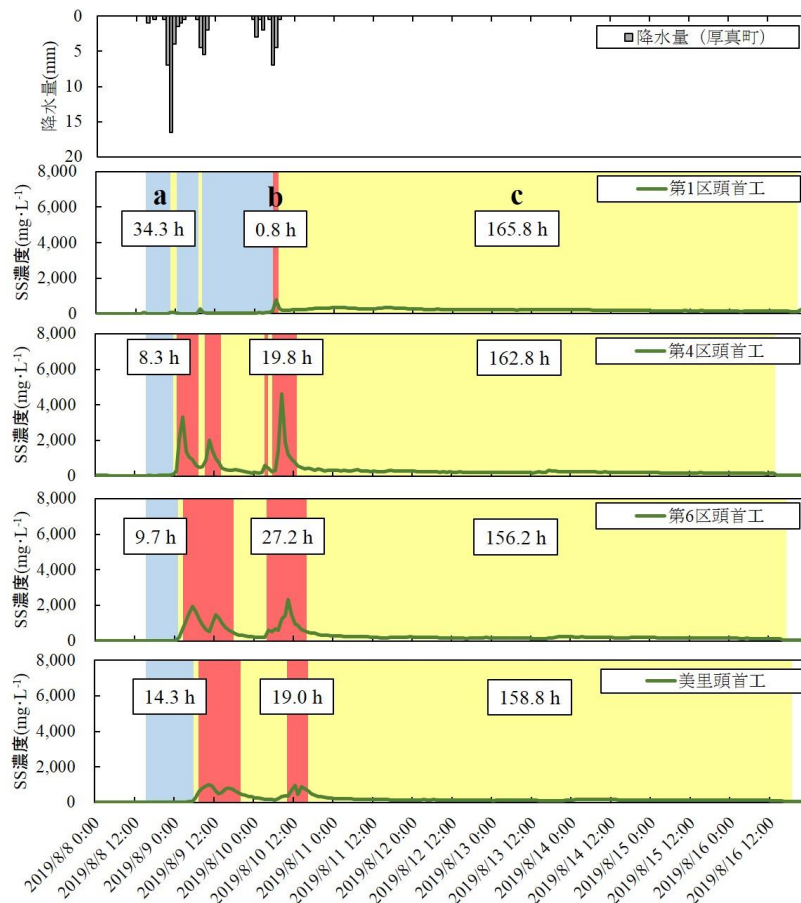


図-7 2019年8月8日の出水イベントにおけるSS濃度の経時変化 (a:取水可能時間, b:取水を停止することが望ましい時間, c:取水に注意を要する時間)

未満の時間を“c: 取水に注意を要する時間”とした。

aは第1区頭首工で34.3時間であり、先に述べたようにダムの影響を受けたことで長くなった。一方で、aはその他頭首工で下流地点ほど長い傾向がみられ、すべての頭首工で8時間以上あり、降雨開始後も一定時間は取水可能であること、取水を停止する操作を行うのに十分に時間があることが示された。bは第1区頭首工を除くその他の頭首工で19時間以上、cはすべての頭首工で155時間以上であり、長期化する傾向がみられた。bとcの合計時間は非常に長く、1週間程度取水できない可能性があり、灌漑が必要な時期に水不足が生じると収量及び品質低下のリスクが懸念される。そのため、SS濃度がc“取水に注意を要する時間”の場合であっても取水を暫定的に許容することが現実的な対応策と考えられる。今後は、営農に支障の無い許容濃度を明らかにすることが課題である。

6. まとめ

近年、大規模災害が常態化するなかで、大規模地震や豪雨により斜面崩壊が頻発している。厚真川流域では、平成30年北海道胆振東部地震により斜面崩壊が発生し、

濁水発生に伴う農業用水への影響が懸念された。そこで、濁水の影響に対して農業用水におけるリスク管理をするため、濁水の発生状況を把握しSS濃度を指標とした取水操作手法を検討した。

厚真川本川の出水時におけるSS濃度は高濃度であることがわかった。また、非灌漑期と灌漑期で濁水発生状況が異なることがわかった。非灌漑期では、地点ごとの濁水発生状況と支流の崩壊地面積率に関係があることが示唆された。灌漑期では、頭首工により河川が堰きとめられ、滞留が生じることで細砂成分が沈降し、SS濃度が低下したことがわかり、地点ごとの濁水発生状況と頭首工の濁水低減効果の関係が明らかとなった。

SS濃度の経時変化は、降雨後の数時間で急激に上昇し、数時間で急激に低下したが、出水前のレベルまでは下らず、比較的高濃度の状態が長期間継続した。農業用水としての濁水取水は、農業水利施設や農地の土壌物理性に影響を及ぼすことが予想される。そこで、農業用水における濁水取水の影響を回避する、もしくは最小限に抑えるため、SS濃度を指標とした取水操作手法を検討した。出水時を対象に取水操作の目安となる時間を地点ごとに整理すると、灌漑期の2019年8月8日の出水では、降雨開始後の取水可能時間は8時間以上であり、降

雨開始後も一定時間は取水可能であること、取水を停止する操作を行うのに十分に時間があることが示された。一方で、取水を停止することが望ましい時間と取水に注意を要する時間の合計は非常に長く、1週間程度取水できない可能性があり、灌漑が必要な時期に水不足が生じると収量及び品質低下のリスクが懸念された。濁水の発生が長期化する場合、取水を暫定的に許容することが現実的な対応策と考えられる。今後は、営農に支障の無い許容濃度を明らかにすることが課題である。

謝辞： この研究は日本学術振興会科学研究費若手研究(課題番号：19K15941、研究代表者：田中健二)の支援により行われた。また、現地調査を実施するにあたり、北海道開発局農業水産部関係各課及び室蘭開発建設部の協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1)国土交通省(参照 2018.10.15)：北海道胆振東部地震の崩壊面積と過去の地震災害の比較(オンライン)，入手先<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h30_iburitobu/181005_sediment_volume.pdf>2018.
- 2) 藤原公一：濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へおよびす影響，滋賀県水産試験場研究報告，46，9-37,1997.
- 3) 国土交通省(参照 2019.10.1)：SS(浮遊物質量)(オンライン)，入手先<http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/pdf/s04.pdf>
- 4) 田中健二，瀬川 学，藤原洋一，高瀬恵次，丸山利輔，長野峻介：土砂崩壊に伴う高濃度濁水が手取川扇状地水田の地下水涵養機能に与える影響，水文・水資源学会誌，30(3)，173-180，2017.
- 5) 田中健二，瀬川 学，藤原洋一，高瀬恵次，丸山利輔，長野峻介：高濃度濁水が扇状地の水田浸透量・河川伏流量に及ぼす影響—手取川流域の大規模土砂崩壊を対象として—，農業農村工学会論文集，306，147-154，2018.
- 6) 赤沢 伝：北海道の特殊な土壌-1 火山性土壌 3 粗粒質火山性土，URBANKUBOTA，No.24，1985.
- 7) 北海道開発局(参照 2019.1.7)：平成 30 年北海道胆振東部地震に係る復旧・復興等の状況(オンライン)，入手先<<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/saigai/splaat000001e1uy.html>>，2018
- 8) 村上泰啓，伊波友生，藤浪武史：北海道胆振東部地震における厚真川支川の崩壊地調査について，平成 30 年度北海道開発技術研究発表会，2019.
- 9) 喜田耕一(参照 2018.9.16)：2018 年 9 月 6 日発生北海道胆振東部地震正射画像のトレース(オンライン)，入手先<https://github.com/koukita/2018_09_06_atumatyout>，2018.
- 10) 田淵俊雄：農業土木技術者のための水質入門，農業土木学会，1986.
- 11) 皆川裕樹，増本隆夫，堀川直紀，吉田武郎，工藤亮治，北川 巖，瑞慶村知佳：水稻減収尺度の策定のための実水田圃場内に清水・濁水区を設けた模擬冠水試験，農工研技報，214，111-121，2013.

埼玉県道路メンテナンス会議の取り組み

中山 雄一

大宮国道事務所 管理第二課 (〒331-9649 埼玉県さいたま市北区吉野町1-435)

埼玉県は市町村数が63と、全国でも北海道、長野県に次ぐ多さであり、狭い県域の中で、都心部に近い県南では都市化が進む一方、地形的にも北東域では低地帯、南西域では中山間部となっているなどの多様性が特徴となっている。

本稿では、これら地域性や、それぞれ財政・体制が異なる各市町村において実施される道路施設の維持管理に関し、実情にあったきめ細やかな対応を行うことを目的として埼玉県道路メンテナンス会議内に設置された「地域支援チーム」における産学官連携による取り組みについて紹介する。

キーワード 道路メンテナンス会議、自治体支援、産学官連携、地域支援チーム

1. はじめに

埼玉県道路メンテナンス会議は、平成26年5月に設置され、各道路管理者が相互に連絡調整を行うことによる円滑な道路管理の促進を図ってきた。

これにより、支援制度、新技術等の各種情報の共有や、管理施設の老朽化の状況把握を進めてきたが、財政や技術者数の異なる各市町村の実態や、北東域の低地帯、南西域の中山間部など地形由来の悩みや県南部の都市化、道路利用形態による課題等を十分に把握し切れておらず、画一的で、自治体の求める多様なニーズに対する確かな支援となっていなかった。



図-1 埼玉県内63自治体を対象とした意見照会

2. 更なる支援に向けた検討

このような現状を踏まえ、それぞれの市町村が抱える本来の「悩み」、「課題・問題点」を吸い上げ、よりの確かな支援の実施、および、きめ細やかな対応を可能とするための新たな支援を検討することとした。

(1) 市町村の求める支援

市町村が抱える大きな3つの課題として、予算不足・人手不足・技術力不足といわれている。本取り組みでは、さらに具体化し、市町村が抱えている本来の「悩み」、「課題・問題点」、「求める支援の傾向」を把握することを目的とし、県内63自治体の協力により埼玉県道路メンテナンス会議独自の意見照会を実施した。

その結果、予算規模や、職員体制により求める支援の内容に違いがあることが判明した。

(2) 新たな支援に向けた検討

今回、求める支援の傾向の把握は、予算および技術力に着目し、自治体のグループ化を行った上で求める支援を重ねることにより実施した。（図-1）

主な傾向を整理すると以下となる。

- ある程度の予算が確保されており、技術力を有している自治体は、更なる効率化を求めて新技術等の活用に資する支援を求めている。
- 職員が一定の技術力を有するものの、予算規模が小さい自治体は、自ら診断・判定を実施するための高度な技術力の習得を目指している。
- ある程度の予算が確保されているが、技術系職員が少ない自治体は、診断・判定に悩む際の相談窓口の充実を求めている。
- 技術系職員が少なく、予算規模も小さい自治体は、職員自らが点検等を行うため職員不足やノウハウの継承に課題があると感じている。 など

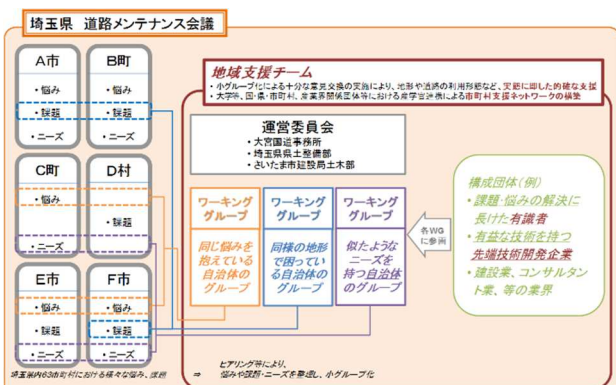


図-2 ニーズのグループ化、および、有識者・ノウハウをもつ企業等のサポートイメージ

道路メンテナンス会議としては、今後、これらを含め、新技術の活用などによる点検の効率化や、点検結果に基づく補修など、多岐にわたる支援要望に対し、検討していくこととなるが、国、県、政令指定市の職員等で構成される道路メンテナンス会議・事務局のみでの対応では、

- 市町村が抱える個別の悩み・課題を深掘りするための機会（時間や場所）がなかなか設けられない
- 複雑な構造を有する構造物など、高度な技術相談が出てきた場合のアドバイス等、支援の実施にあたり学術的な意見を求められることも想定される
- 新技術等の活用を想定した場合、現場における具体的な作業イメージの構築や、シーズ技術の活用などの検討にあたっては学術的な知識や経験が有利
- 効率化・高度化に資する先端技術が、メンテナンス会議・事務局が収集可能な情報に限定されるなどの課題が想定された。

また、きめ細やかな支援実施にあたっては、各自治体のニーズに対し、直接的な意見交換の場が有効と考えられることから、「同じ悩み」、「同様な地形由来の課題」、「似たようなニーズ」を持つ自治体などをグループ化し、各グループにおける議論を通じて「求められる支援」についての具体化を図ることとした。（図-2）

3. 地域支援チームの設立

上記、課題の解消や、グループ化による支援体制の運営にあたっては、豊富な経験・知識・技術を有する民間や有識者等と協働し、産学官の連携による支援体制の構築が有利と考えられたことから、埼玉県道路メンテナンス会議では、埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センターに設置された「埼玉橋梁メンテナンス研究会」等との産学官連携による「地域支援チーム」を設立し、各市町村における持続的なインフラメンテナンス体制の確立を支援することとした。

この研究会は、埼玉県内の基幹インフラ施設である道

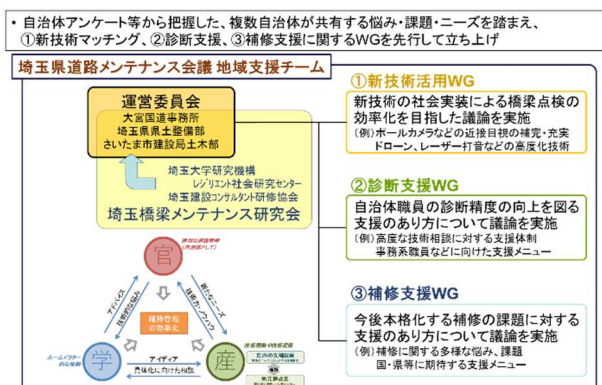


図-3 地域支援チームの運営と各ワーキンググループの構成

路橋の維持管理（点検、診断、補修・補強）について広く事例等を収集し、その保全施策や保全技術に対して検討・研究するとともに、県内橋梁技術者の育成、県内橋梁の保全の効率化に貢献していくことを主な目的として設立されており、インフラ強靱化の施策に長けた大学教授や、地域・地形に精通した県内建設コンサルタント会社により設立された「埼玉県建設コンサルタント技術研修協会」、埼玉県、さいたま市等が参画して、平成30年度より本格的に始動している。

地域支援チームの設立は、道路メンテナンス会議と研究会において共通する問題意識や取り組み方針、検討時期や地域性など、同様の方向性を有していたことが連携につながったと考えられる。

なお、地域支援チームにおける支援については、自治体からの支援要望等を勘案のうえ、必要な都度ワーキンググループ（WG）を設置するとともに、上記、研究会のみならずノウハウをもつ企業等も加えるなど、効率的・効果的な支援実施に向け、柔軟な対応による支援体制の構築を行っていくこととしている。（図-3）

4. ワーキンググループ（WG）の活動

(1) 新技術活用WG

新技術に関しては、NEDOによるインフラ維持管理用ロボット技術や、次世代社会インフラ用ロボットの実用化（SIP）、インフラメンテナンス国民会議におけるオープンイノベーションによる支援技術開発など、様々な主体による取組が展開されており、前述の意見照会等の結果においても各自治体から高い関心が寄せられていた。

このようなことから、「地域支援チーム」のキックオフは、ニーズの高い橋梁を代表に、定期点検の更なる効率化を目的とした新技術活用WGを皮切りに実施された。

道路構造物の定期点検については、平成26年度以降の一巡目の点検結果を踏まえた効率化・合理化や、新技術の積極的な活用等の観点から、平成31年2月に定期点検要領（技術的助言）が改定され、一定の条件を満たす場

合において新技術等による近接目視の代替が期待されているところであるが、本報告の取り組みでは上記要領の改定前であったことから、狭隘部などの近接目視が困難または非効率な箇所に対して、近接目視を行う前のスクリーニングとして活用するなど、効率的な点検に資する支援（補完）技術を対象として実施したものである。

具体的には、既に実用化された支援（補完）技術等について、「現場に取り入れた際の課題」の整理や、今後、採用を検討している各自治体に向け「どのように導入すべきか」の検討、もしくは実用化目前の技術に対し「実用化された段階での早期導入に向けた事前準備」など、現場での活用に向けた検討を行う場を設けることとし、「定期点検に限定せず、日常行う維持管理も含め、僅かな工夫で効率化・省力化がはかれる技術活用」を念頭に、

- 実際に技術に触れられる場
- 普段使いの中で「構造物の損傷部位等を簡易的に確認するための技術」や「日常管理の中ですぐに導入できる技術」

について運営委員会で検討・準備を行い、

- 法定点検に適用できるか否かを議論するのではなく、法定点検の補助、近接目視の補完・充実として、どのように使えるか議論する

として、それらに興味を持つ自治体に集まってもらい小グループを構成することとした。

題材は自治体ニーズを参考にボールカメラを採用し、普段遣いから高機能まで異なる技術を複数選定した。

また、実施当日は、2部構成により実施するものとし、第1部は直轄管理橋梁を用いた技術試行、第2部は参加者による意見交換とした。

なお、現場における技術試行については、実機に触れる機会を増やすことを目的に、参加者を1班10名程度の少人数に班分けし、橋梁各所に割り当てた試行技術を順番に巡ってもらう形態とした。技術展示会等ではなく、実際の橋梁を用いた試行であり、企業によるデモンストレーションや希望者による試行、実機に関する質疑応答を行った。（写真-1）



写真-1 参加者を4班に分けて実施した実機（ボールカメラ）を用いた試行の状況



写真-2 机は準備せず椅子を車座に配置し、ざっくばらんな意見交換を実施

また、意見交換には、各自治体の担当者や埼玉橋梁メンテナンス研究会のメンバーのみではなく、開発企業を交えた座談会形式を採用した。（写真-2）

実機を試行した上での意見交換となったことから、

- ボールカメラには、汚れている面をきれいにできるノズル・機能があると良いのでは
- 路上からの確認作業が多いため手元でボール形状が操作できるなど効率化が図れないか
- 女性職員も増え、重さや使い勝手の観点も重要などの現場担当者の生の声が出され、それを直接、開発企業に届けられる機会となった。

前述のとおり、点検要領改定を受けて新技術活用の気運が高まるなかで、本WGの重要性や、本WGに寄せる自治体の期待度も一層高まるが見込まれる。

一方で、人の目に勝る新技術の台頭には、長期的な視点を必要としているのが実情であり、近接目視の重要性和新技術活用による効率化の兼ね合いが肝要であると考えている。

また、これらの高度な新技術の導入には、使う側の人材にも相応の技術力が要求され、両者のバランスを欠けば画餅とも成りかねない。

今後は、点検要領の改定を踏まえ、新技術活用WGの目的・役割を改めて明確化するとともに、点検要領に示される近接目視の代替について、まずは、自治体職員や地元の民間技術者が活用可能とする普段使いの技術を中心に、その適用範囲を整理することが必要と考える。

(2) 診断支援WG

診断・判定に関する支援は、これまでに「技術相談窓口の設置」や、点検表記録様式の記載内容等の確認を行う「プロセスの妥当性確認・点検診断のアドバイス」および、直轄国道事務所において実施している「橋梁診断判定会議の傍聴」などを行ってきた。

一方、これら診断・判定に関し市町村からは、

- 気軽に相談できる窓口があると良い

- なお、今回の取組については前例がなく、一から手探りの状態での試行であったことも含め、当日の円滑な実

実施イメージ(モニタールーム)

1-70

- アドバイザーからの指示や質問に的確に対応する現場のコーディネーター役として、相応の技術力をもつ職員が現地に赴く必要がある

などの課題が挙げられたが、「これらの改善が図られれば非常に有効なツールになるのではないかと継続取り組みを求める声が出された。

これらの意見を踏まえ、地域支援チームでは、遠隔診断アドバイスの試行を定例化し、実施体制や進め方等の改善を図るとともに、今後の県内自治体への展開に向けたノウハウ蓄積に努める予定である。

なお、埼玉県道路メンテナンス会議としては、今回試行した遠隔診断を各自自治体において実施する判定・診断の代替と考えている訳ではなく、あくまで、高度な技術力によるアドバイスが必要となる場合において、県単位のメンテナンス会議として実施しうる支援の「最後の砦」的なものとして考えている。

最終的なバックアップとして遠隔診断があることを安心材料として、自治体職員が、道路管理者としての責務を果たすべく、自ら判定・診断を行うための体制作りを支援することが目下の急務である。

今後は、自治体が抱える診断に関する悩み（支援ニーズ）の把握を更に深化させ、既存の支援策の適用が難しい支援ニーズについて、相談チャンネルの補完を目指し、新たな診断支援策を検討していく。

(3)補修支援WG

昨年度末までに、5年に1度の定期点検が一巡したこととなり、各市町村の管理施設全体の状況が把握された。

限られた予算の中での効率的・効果的な措置や、メンテナンスサイクルの見直しが急務となると考えられる。

また、市町村からは、予算面での支援要請の他、

- 補修にあたっての優先順位の付け方
- 長寿命化修繕計画立案にあたっての考え方等のマネジメントに関する悩みや、
- 補修工法の比較資料による支援
- 補修の考え方・工法をテーマとした研修会

などの技術的な支援を求める声も寄せられている。

今後、本格化する各自自治体における修繕計画や措置に関する支援の充実に向け、自治体ニーズの把握、産学官の連携による効果的な取組を行いたいと考えている。

具体的には、検討プロセスを考慮した補修事例集の作成が考えられる。ただし、様々な地域地形・利用形態等に対し、「ビフォーアフター形式」の事例集では標準的な補修工法事例にしかならず、使って良いかの判断が難しい場合がある。また、補修事例は多岐にわたることから、「マニュアル」とするには全てを網羅することが困難であり、また利便性も低くなることが懸念される。

上記を念頭に「FAQ」や、家庭用電気（電子）器具等の取扱説明書における「故障かなと思ったら」をイメージした様々な損傷要因の究明に関する参考資料や、

「点検（判定・診断）～補修設計～工事实施」までのプロセスを纏められるフォーマットの検討など、使い勝手の良い支援策を検討していきたい。

4. おわりに

埼玉県道路メンテナンス会議では、県内市町村の道路施設のメンテナンスへの取組に対し、これまで様々な支援を行ってきた。

上記、支援を実施する過程や、各自自治体へのヒアリングやアンケート結果等により寄せられる「課題・悩み」の背景には、

- 人員削減等も含め日々の業務に追われており、長い目で見たインフラ維持管理戦略を考える余裕がない
- 長寿命化修繕計画等、国の指導や施策が自らの問題解決につながるという実感が持てずにいる

すなわち、新しい取り組みに対して保守的（前例踏襲）であり、かつ、専門性を深化させる余裕もないといった根本的な問題が遠因にあると考えられる。

現状の道路管理に必要とされる技術は多岐にわたっているが、それぞれの自治体により異なる課題・悩みの解消に向けた支援として、これらをわかり易くかつ利用しやすいよう体系化することにより、自治体に寄り添った支援の実現を目指した取り組みを進めていきたい。

今年度、設置された「関東道路メンテナンスセンター」を、高い技術力による支援、医療における「高度医療センター」としての自治体支援を実施するものと位置付けるならば、埼玉県道路メンテナンス会議は、「町医者」として、地域に寄り添ったきめ細やかな対応を行うの存在を目指していきたいと考えている。

今後は、それぞれの組織に与えられた役割を念頭に、地元の有識者、地形、地域性等に精通し経験豊富な身近なコンサル等との産学官連携による自治体サポート体制を一層強化させるとともに、市町村が抱える悩み・課題等を的確に把握し、これまでの支援に加え、産学官連携による支援の効率的・効果的な展開、高度なものは関東道路メンテナンスセンターとの連携による支援を行うなど、柔軟な対応を行っていきたい。