

都庁舎の居ながら制振改修工事の 円滑な推進に向けて

篠田 裕樹¹・鈴木 智嗣¹・黒沢 謙人²

¹財務局 建築保全部 庁舎整備課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号)

²財務局 建築保全部 施設整備第二課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号)

長周期地震動は地震に伴って発生する周期の長いゆっくりとした大きな揺れの地震動であり、特に超高層建築物について構造安全性への影響が指摘されている。長周期地震動による大きな揺れに対しても都庁舎の防災拠点としての機能を維持するため、東京都では平成26年度から平成32年度(予定)まで実施している都庁舎の設備更新の機会に合わせて長周期地震動対策として制振装置の設置を進めている。一方、都庁舎では常に庁舎としての行政機能等を維持する必要があるため、作業上の様々な制約に対処しながら、居ながら制振改修工事を円滑に進めることが求められる。

キーワード 長周期地震動、制振改修、オイルダンパー、居ながら工事

1. はじめに

東京都長期ビジョン¹⁾では、「世界一の都市・東京」の実現に向けた基本目標の一つとして「課題を解決し、将来にわたる東京の持続的発展の実現」を掲げており、東京が世界の範となる持続的発展が可能な都市に生まれ変わるために、山積する諸課題の解決に取り組んでいくとしている。このうちの課題の一つである「災害への備えにより被害を最小化する高度な防災都市の実現」のための目標の一つとして、災害時に防災拠点として重要な機能を担う都庁本庁舎の長周期地震動対策が挙げられている。

都庁本庁舎の諸元については表-1に示すとおりである。都庁第一・第二本庁舎ともに高さ60mを越える超高層建築物であり、竣工から20年以上が経過している。

東京都では平成20年から超高層建築物への影響が指摘される長周期地震動に対して様々な観点から検討を重ね、取りまとめた結果として、平成23年5月に「都庁第一本庁舎・第二本庁舎における長周期地震動対策への取組」²⁾を公表した。そして、平成26年度からの都庁舎改修プロジェクト³⁾において、都庁舎の設備更新工事(都庁舎改修工事)に合わせて長周期地震動対策を実施している。

2. 長周期地震動対策の概要について

(1) 都庁舎の長周期地震動対策の検討概要

長周期地震動は平成15年9月に発生した十勝沖地震の際に、震源から遠く約250km離れた苫小牧市内で起こった石油タンク火災の原因として注目された。諸々の調査

表-1 都庁本庁舎の諸元表

	第一本庁舎	第二本庁舎
竣工年	平成2(1990)年12月	
敷地 (m ²)	14,349.80	14,030.29
延床 (m ²)	196,755.04	139,949.78
高さ (m)	243.3	163.3
階数	地上48階 地下3階	地上34階 地下3階
職員数	約5,300人	約5,100人
容積率	1300(%)	1000(%)

研究などによれば、超高層建築物についても長周期地震動に対し、構造安全性を確保することが必要であると考えられている。

東京都では、都庁舎に対する長周期地震動の影響を把握するための調査及びその対策の必要性について様々な観点から検討を行ってきた。都庁舎への影響が最も大きい東海・東南海の2連動地震を想定して作成した長周期地震波入力時において、倒壊・崩壊や外壁の崩落の可能性はないものの、層間変形角においては基準値(1/100)を上回る階が発生することが分かった。また、長時間の繰返し揺れにより、梁など一部構造部材で基準値を超える損傷が生じる階が発生することが判明した。

そこで、長周期地震動に対して「構造体の塑性化は許容するものの、過大な変形は生じない(層間変形角1/100以下、部材の塑性率4以下、主架構であるスーパ一柱・梁の局部座屈や梁端破断は発生しない)」ことを判定指標として設定し、都庁舎を補強するため制振装置を設置することとした。さらに建設時に取得している建築基準法第20条第一号に基づく認定に係る性能評価を自主的に受け、大臣認定を再取得することで、構造安全性を有することを客観的にも確認している。

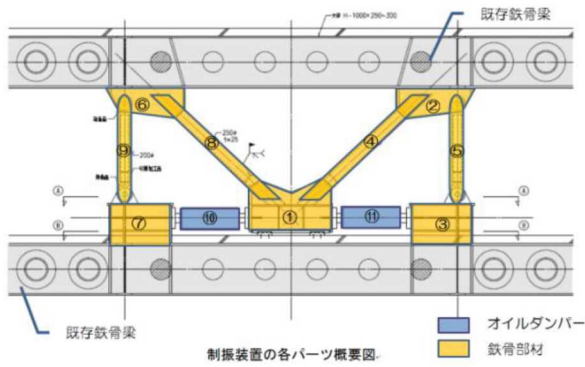


図-1 制振装置の概念図

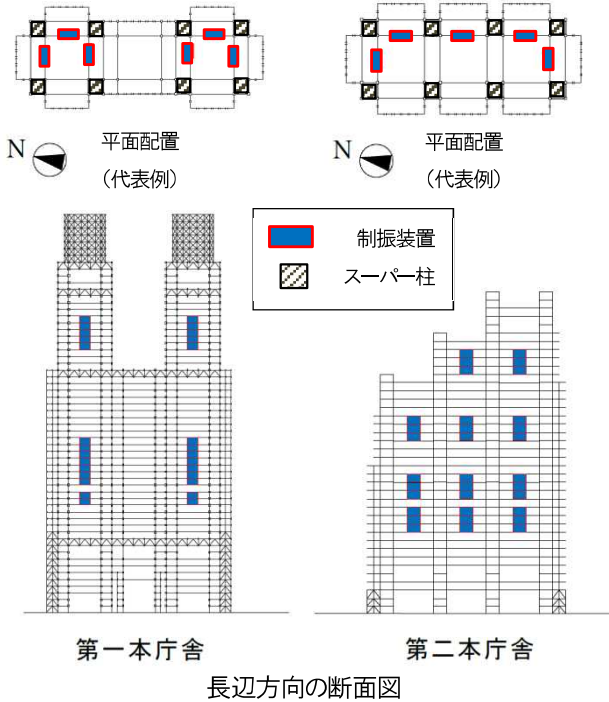


図-2 第一本庁舎(左)・第二本庁舎(右)の制振装置の配置計画

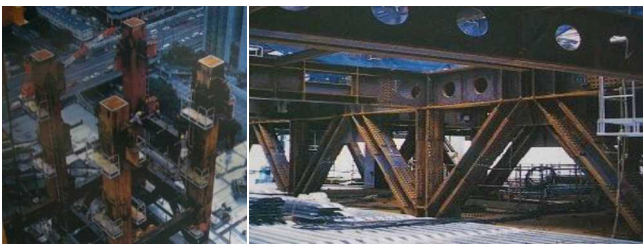


図-3 スーパー柱(左)・スーパー柱(右)



図-4 制振装置の設置状況

(2) 都庁舎の制振装置の概要

本工事で採用する制振装置には、長周期地震動の繰返し変形に対して性能が安定し、中小地震にも応答低減効果が期待できるオイルダンパーを用いている。地震や強風による建物の揺れを建物躯体である大梁に設置した鉄骨ブレースを介して、オイルダンパーで吸収する仕組みとなっている(図-1)。制振装置の配置計画として、図-2に示すとおり、第一本庁舎・第二本庁舎ともにそれぞれ20フロアの執務室内の計155か所(第一本庁舎94か所、第二本庁舎61か所)に設置することとした。

都庁舎はスーパーストラクチャー構造を採用しており、耐震性の高い構造となっている。これは厚さ最大80mmの鋼板を用いた箱型鉄骨柱4本をK型ブレースで結んだ「スーパー柱」と、フロア上下の梁にブレースを設けて1フロア分の高さをもつ「スーパー梁」により十分な強度を有する構造である(図-3)。制振装置はこのスーパーストラクチャー構造を構成するスーパー柱を繋ぐ大梁に設置することが構造上最も効果が得られることが検証の結果分かった。したがって配置計画上、執務室内に制振装置が配置されることとなった。そのため、執務室内に設置される上でのデザイン上の工夫として、色彩は室内の仕上げと同系色とし、かつ見え掛かりとなるブレースなどの鉄骨部材は鋼管で構成することで、丸みを持たせ圧迫感の少ないデザインとなるよう配慮した(図4)。

また、執務室内の見通しを確保する観点から、制振装置を囲うカバーは装置の下半分のみをパネルで隠すタイプを基本形状とし、室内レイアウトに応じて装置の上半分にもパネルを設置できるような仕組みとしている。これにより、必要に応じて天井までの壁とすることで会議室などの間仕切り壁とすることも可能であり、執務室の用途に応じて対応可能となるよう配慮している。

(3) 制振補強の効果

制振装置補強前・後の地震応答解析による長周期地震動発生時の最大層間変形角および最大応答変位分布の比較結果を図-5に示す。制振装置の補強効果により、揺れの大きさが約2-3割程度抑制される。

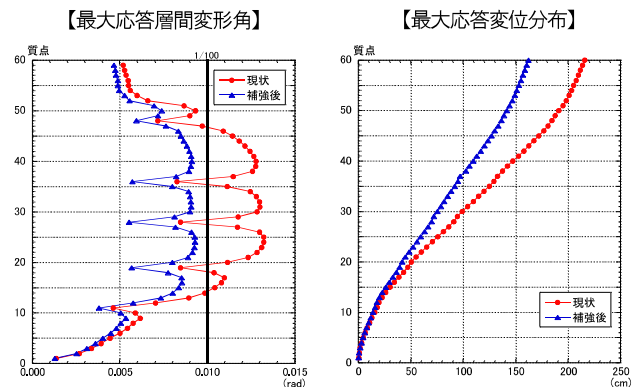


図-5 長周期地震動発生時の制振補強の効果(都庁第一本庁舎の場合)

3. 都庁舎の居ながら制振改修工事について

都庁舎改修工事は庁舎としての諸機能を維持しながら約7年間という非常に長い期間にわたって行う工事となり、庁舎内では通常通り職員が執務を行い、かつ窓口にも来庁者が訪れる状態である。ここでは、様々な制約に対処しながら進めている施工現場での苦労や創意工夫点について紹介する。

(1) 鉄骨部材の分割搬入

制振装置1か所あたりの寸法は、全体で横幅約7.2m、高さ約2.65m、奥行き0.6mであり、構成する鉄骨部材等の総重量は約6tにもなる。鉄骨部材の荷下ろしには10tトラックが停車しアームクレーンで荷捌きができる程度の広さが必要となるため、庁舎の正面エントランスから搬入作業を行っている。正面エントランスには、開庁時間帯には多くの来庁者の出入りがあり作業を実施することが困難であるため、鉄骨部材の搬入は土日休日や夜間といった閉庁時間帯に限定して実施している。

本工事は既存建築物の改修工事であり、エレベータ開口などの搬入ルートが狭あいであることから、鉄骨部材を制振装置の形として組み上げた状態で搬入することはできない。そのため、鉄骨部材を施工フロアまで運搬できる寸法以下に分割する必要がある。分割しても鉄骨部材は、一つの部材が最大で約1tもの重量物となるため、運搬の際は搬入ルートとなる既存の床石やエレベータかご内等の各所に養生を施した上で慎重に作業を実施している（図-6）。

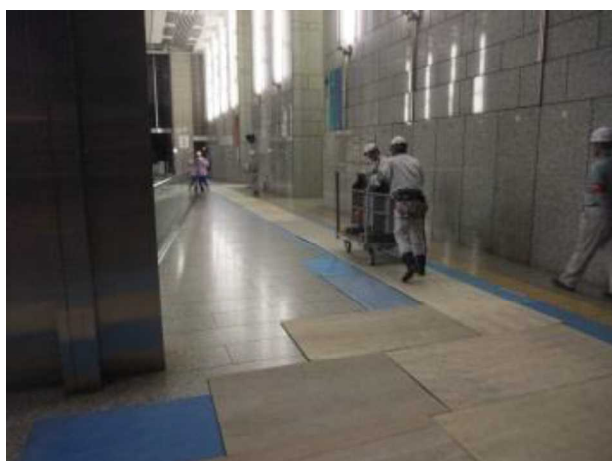


図-6 鉄骨部材搬入および各所養生

特に鉄骨部材のエレベータへの搬入作業では、鉄骨ブレース寸法とエレベータ開口幅が同程度の寸法であるため、接触しないよう細心の注意を要する困難な作業である。部材の中でも最大の長さである約3mの鉄骨ブレース

材のエレベータ内への搬入にあたっては、図-7のように部材を斜めに吊り起さなければならないため、専用の吊り治具を製作して作業に使用している。



図-7 鉄骨ブレースのエレベータへの搬入作業

(2) 鉄骨部材の建て方作業

ここでは施工フロアまで搬入した鉄骨部材を設置箇所では組み上げていく工程について説明する。1フロア単位の全体工程中、制振装置の設置工程がクリティカルとなっているため、定められた工程期間内で段取り良く進めていくことが重要となる。そのために鉄骨部材の建て方に先立ち、設備工事との作業間調整を図り、干渉するフリーアクセスフロアや床下配線、天井内電気配線、スプリンクラー配管等を先行的に撤去することで、速やかに制振装置の設置作業に着手できるようにしている。

鉄骨部材の取付では、図-8のようにクランプで大梁に取り付けたチェンブロック等により鉄骨部材を吊り上げながら所定の位置まで揚重している。その後、JASS6鉄骨工事（建築工事標準仕様書・同解説 一般社団法人日本建築学会）に準拠して建て方精度を正確に管理しながら、取付位置を微調整して鉄骨を組み上げていき、仮溶接で固定している。



図-8 鉄骨部材の組み上げ過程

(3) 庁舎内での現場溶接作業

上記のとおり、鉄骨部材を分割して搬入し、一つずつ組み上げていくため、現場での溶接作業が必要となる。都庁舎は基本的に屋内での裸火厳禁を徹底していることから、現場溶接にあたっては以下のような対策を取りながら安全に工事を進めている。

a) 火気作業の区画化

溶接作業を行う箇所は仮設の鋼板パネルや防災シート等で区画されたエリア内で実施することで、溶接火花の飛散やヒュームガスの拡散などの他作業への影響を最小限に抑えている(図-9)。エリア内でも、可燃物の除去や火気養生、消火器の設置、残火確認、火気監視人の配置などの火気対策を徹底している。

b) 下階での火気監視・火気養生

鉄骨部材の下階の既存大梁への溶接は、既存の床スラブを部分的にはつり出し大梁を現した状態で作業を行う。このため溶接火花や粉じんが直下階の執務室に落ちる可能性があるため、安全を確認するため図-10のように直下階の天井ボードを部分的に撤去し、天井裏が確認できる状態とした上で常時監視することとしている。さらに、万が一、溶接作業時の火花等が落下した時のために、下部の什器等を防災シートにより養生している。

溶接作業はスラグはつり除去時に騒音が発生するため、閉庁時間帯である夜間を中心に作業を実施している。なお業務に支障のないように、職員の執務時間帯は撤去した天井ボードをその都度仮復旧している。

c) 溶接作業時の排煙対策

溶接作業では火気以外の留意事項として溶接時に生じるヒュームガスの処理が挙げられる。都庁舎は外壁面には開閉できる窓がなく、排気口の数や箇所も限られている。そのため、区画されたエリアのヒュームガスを適切に処理するため、各区画ごとに排気ダクトを設置して、既存の空調機械室やトイレのガラリ等を利用して屋外へ排気している。

(4) 鉄骨工事における品質管理

現場溶接は作業環境や溶接姿勢の制約などの理由から、工場溶接に比べて、品質確保のための管理対策が特に重要である。そのため、本工事では以下のような対策をとることで、溶接部位の品質確保を実現している。

a) 溶接技能者の技量付加試験

本工事では溶接技能者に対して、建築鉄骨溶接技術者検定試験(AW検定)に準拠した技量付加試験を実施している。本工事内の試験で用いる部材は、実際に現場溶接で用いる部材厚を考慮して、通常のAW検定で用いる19mmより厚い32mmの板厚としているため、より難度の高い試験を課している。

b) 溶接施工性試験

他にも、実際の鉄骨部材のディテールを再現し、所定

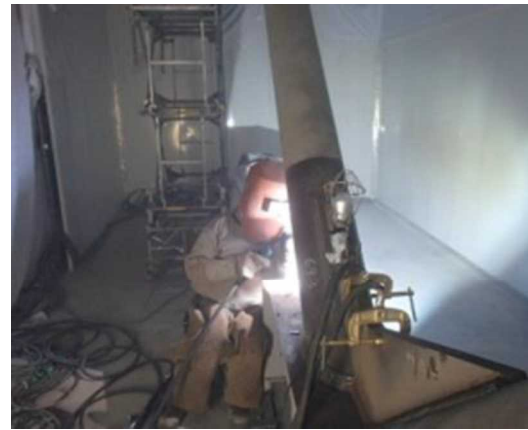


図-9 区画内での現場溶接作業



図-10 什器等の火気養生

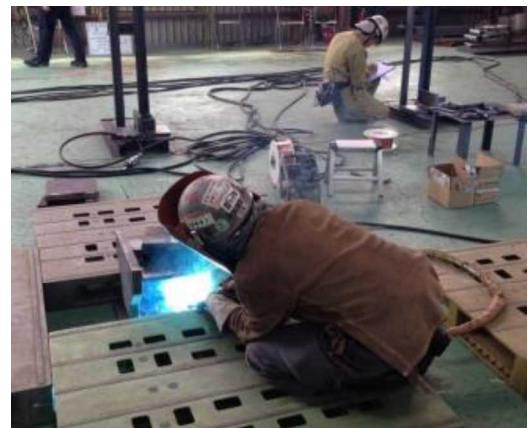


図-11 溶接施工性試験(上)と実際の溶接状況(下)

の姿勢で溶接作業を再現し、実際に適切な溶接が出来ているかを外観検査や超音波探傷試験（UT）により確認する溶接施工性試験も実施している（図-11）。

c) 第三者専門機関による品質検査

現場溶接部位については、その全箇所数を第三者専門試験機関による外観検査やUTを実施することで、その品質が確実に確保されていることを確認している。

なお、検査の結果、不具合が発見された箇所については、突合せ溶接の食い違い仕口のずれの検査・補強マニュアル（独立行政法人 建築研究所）に従って、補修を実施することとしている。

(5) 部分竣工時の耐震安全性の確認

都庁舎改修工事は執務室フロア等の移転を繰り返しながら、長期間にわたって行う工事であり、移転計画に基づき工事計画が立てられている。制振改修工事もこれに合わせて進めるため、庁舎内で不規則的に制振装置が設置されていく形となる。

そこで、制振装置の設置過程を大きく3つの状態に分けて、各状態での地震応答解析を実施した。その結果、各状態において応答低減効果を発揮していることを確認でき、工事中の各段階で一定の耐震安全性が確保されていることが確認できた。

(6) オイルダンパーの本締め時期の検討

オイルダンパーは制振改修が完了したフロアから順次ボルトを本締めし、効かせていく状態とすることを原則としている。しかし、前述のとおり庁舎内で不規則的に制振装置が設置されていく形となるため、工事工程の都合により、制振装置設置階の直下階の大梁の補強が未施工の状態が長く続く箇所が発生する。

制振装置には地震時に大きな減衰力が生じ、既存の大梁との接続部にその反力が生じる。そのため、制振装置位置の上下の既存の大梁に対して補強を施している。しかし、上記のとおり直下階の大梁の補強が未施工となる箇所についてはオイルダンパーを効かせた状態とした場合、地震時に既存の大梁を損傷させてしまう恐れがある。そのため、このような箇所については高力ボルトを本締めせずに仮置きした状態としておき、直下階の大梁の補強が済んだのち、高力ボルトの本締めのために再入室し作業を行うこととしている。

4. 制振装置の維持管理計画について

オイルダンパーの維持管理については、メーカー推奨の点検要領により、図-12に示すように「定期点検」と「臨時点検」の段階に分けて考えている。

「定期点検①」では建物管理者として年1回の外観目視点検を実施し、オイルダンパーの傷や油漏れがないことを確認する。

「定期点検②」では保守専門会社による定期的な外観目視点検も実施し、塗装面の剥離の有無、ロッドの傷・発錆の有無、油漏れの有無、ダンパーの作動範囲に干渉物が無いかなどの詳細な点検を行うこととしている。その際、不具合がある場合にはそれぞれの不具合に応じて適切な処置を実施する。

「臨時点検」は地震・火災等による災害発生後にオイルダンパーの機能上、支障がないことを確認するもので、点検内容は保守専門会社による点検内容（定期点検②）と同様である。さらに「臨時点検」にて異常が認められた場合には、その原因の把握と対応を検討するため「詳細点検」を実施する計画としている。

制振改修工事で設置が完了したオイルダンパーは順次、上記の計画に沿って、適切に維持管理されていく計画である。



図-12 制振装置の点検フロー図 (例)

また、図-13に示すように、オイルダンパーの近傍のパネルを取り外し式とすることで、点検のしやすさにも配慮した設計としている。なお、点検時に支障とならないよう、点検用開口の手前に固定する什器等を置かないように、パネル面に注意喚起表示を掲示するとともに庁内への周知を図っている。

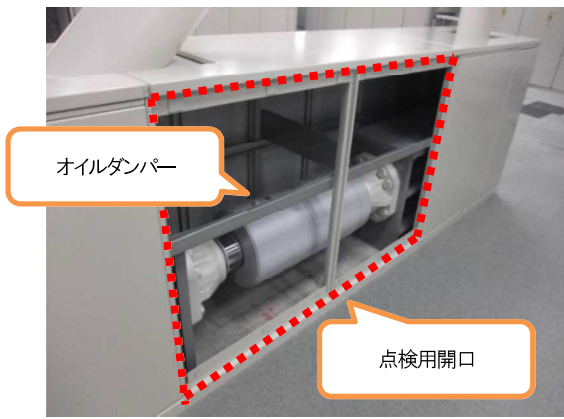


図-13 オイルダンパー点検用パネル

5. 既存の超高層建築物における長周期地震動対策の普及・啓発について

本改修工事は長周期地震動対策に先駆的に取り組むことを通じて、まだ先行事例の少ない既存の超高層建築物における長周期地震動対策の普及・啓発を図ることを目的の一つとしている。

(1) 制振装置の『見える化』について

一部の施工箇所では図-14のように制振装置を囲っているカバーを腰高程度のガラスにすることで、内部のオイルダンパー等の制振装置の機構を全面的に「見える化」させる計画である。これにより、一般来庁者をはじめ、打合せや申請等に訪れた他の工事業者等に対しても、都庁舎の長周期地震動対策をより目に留まりやすいように工夫することで、既存の超高層建築物等の長周期地震動対策の普及・啓発に役立てていく。



図-14 制振装置架構の「見える化」イメージ

(2) 外部視察・研修等について

本工事では様々な外部機関からの視察・見学を受け入れてきている。都庁舎の長周期地震動対策に対する検討については、超高層建築物の構造や地震工学を専門とする学識経験者で構成される委員会にて実施しており、当該

委員会の学識経験者による施工状況の確認会を実施した。

また、庁舎の長周期地震動対策を検討している他自治体や、トルコやインドネシアをはじめとした海外からの視察も行われた。今後も、こうした類似の工事を検討する団体等の見学を積極的に受け入れることによって、都庁舎の長周期地震動対策について広く普及・啓発に努めていく。

6. おわりに

平成28年6月24日に国土交通省より「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」⁴⁾ (技術的助言) が地方公共団体等の関係団体あてに通知がなされた。この中では、平成29年4月1日以降に超高層建築物等を新築する際には、南海トラフ巨大地震の長周期地震動を考慮した設計用地震動による検討を義務化している。一方、既存の超高層建築物等については、対象地震による建設地の長周期地震動の大きさが、設計時に用いた地震動を上回る場合には、自主的な検証や必要に応じた補強等の措置を講じることが望ましいとされている。なお都庁舎においては、関東圏で示されたスペクトルを満足した告示波での検討を行っており、構造上問題ないことを確認している。

また気象庁の観測情報の発表が平成25年に試行されて以来、熊本県熊本地方を震央とする「平成28年(2016年)熊本地震」で初めて長周期地震動階級の最上階級「階級4」が観測されるなど、長周期地震動は近年さらに世間の注目度を増してきている。

上記の経緯等からも、今後、既存の超高層建築物等の長周期地震動対策がより一層求められてくることが想定される。都庁舎での長周期地震動対策は、庁舎としての機能を維持しながらの設備更新に伴う「居ながら制振改修工事」であり、特有の作業上の制約に対処しつつ、安全を確保しながら工事を進めるものである。本工事が今後の既存の超高層建築物等の長周期地震動対策のモデルケースとして参考になれば幸いである。

東京都では、こうした国の動向等に注視しつつ、引き続き、都庁舎の居ながら制振改修工事の円滑な推進に向けて取り組んでいく。

参考文献

- 1) 東京都 (平成 26 年 12 月) 「東京都長期ビジョン～「世界一の都市・東京」の実現を目指して」
- 2) 東京都財務局 (平成 23 年 5 月) 「都庁第一・第二本庁舎における長周期地震動対策への取組」
- 3) 東京都財務局 (平成 25 年 2 月) 「都庁舎改修プロジェクトの取組について」
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課 (平成 28 年 6 月 24 日) 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」

地震と津波の重畳時における 防波堤腹付工の効果

岡田 克寛¹・鈴木 高二朗²・有川 太郎³

¹国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋研究領域
耐波研究グループ 研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1)

²国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋研究領域
耐波研究グループ長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1)

³中央大学教授 理工学部 都市環境学科
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

東北地方太平洋沖地震津波では、地震と津波で多くの防護施設が被災した。その多くは、津波が原因であると考えられ、津波越流に対する被害メカニズムが研究され、防波堤に対しては、腹付工を設置し津波被害を軽減させる対策が提案されている。一方で、地震発生後は数多くの余震が観測されている。そのため、津波来襲時にも余震が発生していることも考えられる。そのため、地震と津波の重畳時において、腹付工に与える影響と腹付工の効果を検討した。

キーワード 地震 津波 防波堤 腹付工

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波においては、地震と津波によって、多くの防護施設が被災した。地震では、最大2933galの揺れを計測した地点もあったが、その原因の多くは、津波越流時によるものと推定されている。この経験を踏まえて、東北地方太平洋沖地震の後では、津波越流による被害のメカニズムが研究され、今日では防波堤に対しては、腹付工を設置し、越流に対する抵抗力を上げ、津波被害を低減する対策が行われている¹⁾。

一方で、2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震直後には、数多くの余震や誘発地震が発生している。津波到達時にも地震による揺れが確認されており、構造物が地震と津波の重畳現象によって被災した可能性も考えられる。そこで、本研究においては、地震と津波の重畳現象を水理模型実験で再現し、津波対策として実施されている腹付工への影響と効果について検討することを目的とした。

2. 地震と津波の重畳について

明治以降、日本国内においては、東北地方太平洋沖地震津波以外にも、津波を伴った地震によって、数多くの被害が発生している。そのうち、3つの事例を抽出し、代表的な地点について、地震と津波の重畳の有無について確

認を行った。確認方法は、津波の到達時間と最大水位の時間を過去の資料で確認し、その間に発生した地震について、気象庁の震度データベースで検索し、重畳現象の有無について確認を行った。

1例目は1983年5月26日に秋田県沖で発生した日本海中部地震(M7.7)の例である。深浦港では地震発生後7分程度で津波の到達が確認され、1時間33分後に最大水位が確認されている。その間に9回の余震の発生が確認でき、最大震度は3を観測している。(図-1)

2例目は1993年7月12日に北海道南西沖で発生した北海道南西沖地震(M7.8)の例である。江差港では地震発生後の10分後に津波が到達し、48分後に最大水位が確認されている。その間に8回の余震の発生が確認でき、最大震度は3を観測している。また、江差港では最大水位観測とほぼ同時刻に最大震度が確認できる。(図-2)

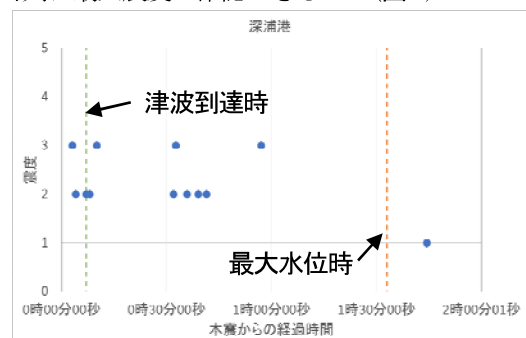


図-1 日本海中部地震時の深浦港の余震発生状況

3例目は2011年3月11日に三陸沖で発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)の例である。第1波の山・谷の出現時刻は地震発生後、釜石港では25分後、宮古港では27分後に確認され、最大高さの波が釜石港で35分後、宮古港で40分後に確認されている。また、最大高さの波が確認された時間とほぼ同時に、釜石港で震度1、宮古港で震度3の地震の発生が確認されている。(図-3)

検討した3つの地震の抽出箇所においては、津波到達時(第1波の山・谷出現時刻)から最大水位(最大高さの波)の間にも余震の発生が確認でき、場所によっては、最大水位(最大高さの波)とほぼ同時に余震が確認されている。以上の事から、防波堤に対しても、地震と津波

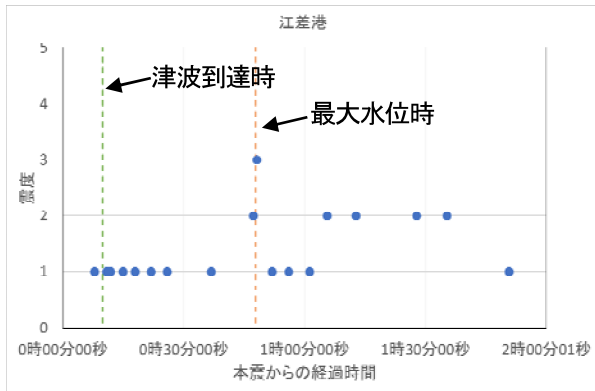
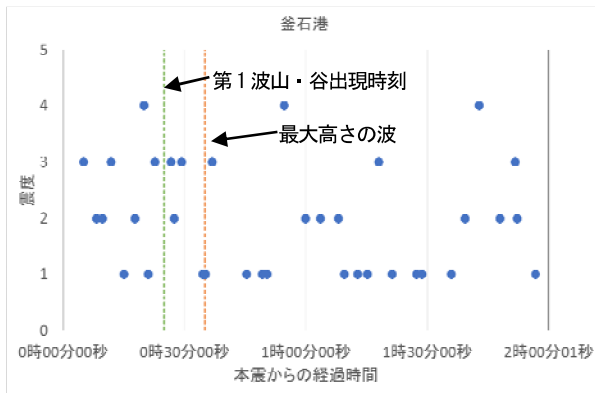
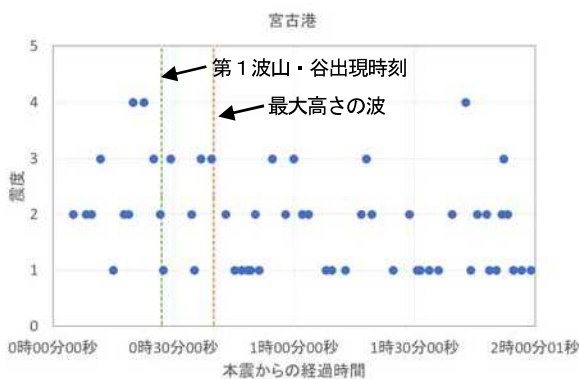


図-2 北海道南西沖地震時の江差港における余震状況



(a) 釜石港の余震状況



(b) 宮古港の余震状況

図-3 東北地方太平洋沖地震における余震状況

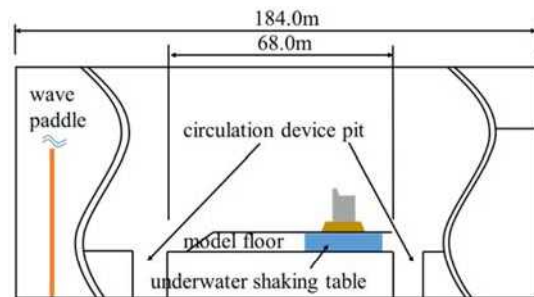
による影響が出ている可能性が考えられる。

3. 水理模型実験概要

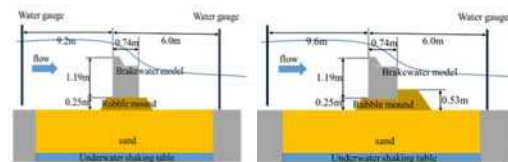
(1) 実験断面

実験は、大規模水路で行った。水路は長さ184m、幅3.5m、高さ12mの水路で、造波機、還流装置、水中振動台を備えた施設である。水中振動台は長さ12m、幅2.5mで水路と同じ方向の1方向のみ加震が可能で、最大重量は170tで980galの加震が可能である。還流装置は220kWの軸流可動翼式ポンプが2台設置されている。性能は、最大で20m³/sの流れを起こすことが可能である。この、還流装置を用いて、防波堤の越流状態を再現し、越流が定常状態になった後に加震を行った。

実験断面は、外洋に面したK港の防波堤を参考に1/20の縮尺で再現した。地盤は砂地盤とし、その上に5号砕石によりマウンドを設置した。腹付工有りの断面については、マウンドと同じ5号砕石を用いて、腹付工を設置し



(a) 水路全体



(b) 腹付なし (c) 腹付有り

図-4 模型配置図

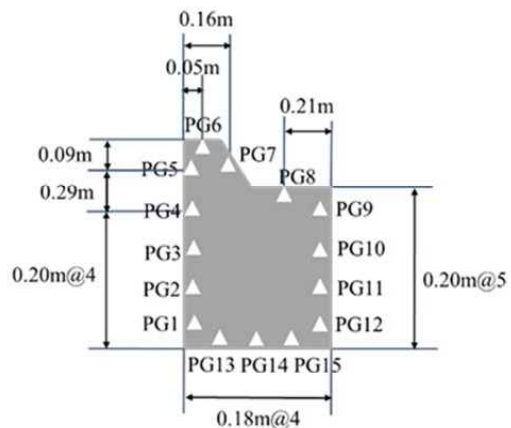


図-5 計測器配置図

た。防波堤模型は重量と重心位置の調整を行っている。
(図-4)

(2) 計測機器

地震と津波の重畳現象における防波堤への影響を計測するため、水位、流速、波圧、加速度、変位の計測を行った。波高計(WG)は容量式波高計、流速計(V)は、水中部は電磁流速計で、気中になる恐れがある箇所はプロペラ流速計を用いた。模型周囲は加振時に模型と接触する恐れがあるため、加振時に当たらない箇所に設置したが、一部計測できていないものがあった。防波堤模型には、前面、背面及び天端には波圧計(PG)、模型底面には間隙水圧計(UG)を設置した。また、模型底面と天端からそれぞれ10cmの位置に加速度計(AG)を設置した。模型の変位については、模型天端部にターゲットを取り付け、レーザー変位計を用いて天端付近の変位の確認を行った。

(図-5)

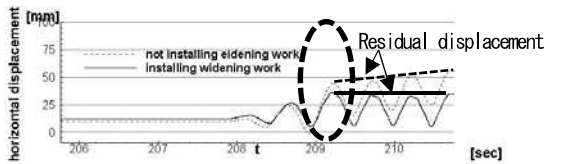
(3) 実験条件

本実験においては、腹付工のない断面と腹付工を設置した断面において、還流装置を用いて防波堤の越流状態を再現し、定常状態を確認した後に加振を行った。

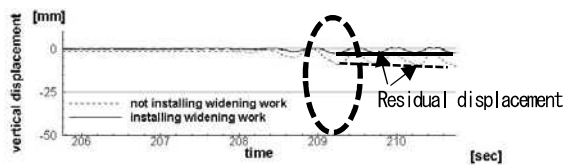
4. 水理模型実験結果

(1) 腹付け工の有無における波圧特性の違い

水位差は異なるが、100galで加震した腹付工なしと腹付工有りの結果の時刻歴を比較し、腹付工の有無における波圧特性の違いの確認を行った。変位の時刻歴を図-6に示す。水平変位の時刻歴波形をみると、加震2波目から腹付工無しのケースは水平方向の残留変位が発生しているのに対し、腹付工が無いケースはほとんど発生していないことが分かる。その時点の、波圧計の波形を確認すると、模型前面 (PG3) については、大きな違いは無く、模型背面 (PG10) については水平変位の影響で、わずかながら波圧が増大しているものと考えられ、水平変位の直接的な原因では無い。模型底面の波圧 (沖側よ



(a) 鉛直変位



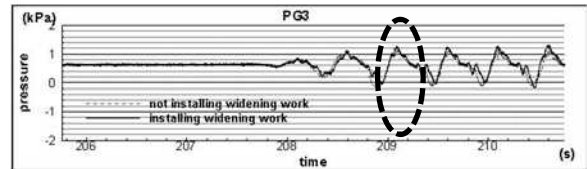
(b) 水平変位

図-6 変位時刻歴

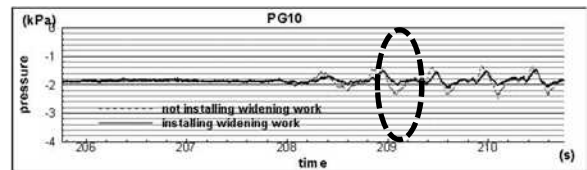
りPG13, PG14, PG15)の時刻歴を確認すると、加震時における波圧増大分が腹付工無しのケースでは、腹付工有りのケースと比べてPG13で3.41倍、PG14で1.51倍、PG15で1.03倍であった。(図-7)これは、鉛直変位の時刻歴より、腹付工無しのケースは越流時にわずかながら模型前面が浮き上がっていることが原因では無いかと考えられる。この結果より、腹付工無しのケースにおいては、越流によって模型上面が押され、わずかながら模型前面が浮き上がった状態で、加震の影響を受けることにより、模型に水平変位が生じたものと考えられる。対して、腹付工有りのケースにおいては、越流時の模型前面の浮き上がりを抑えることにより、加震時における模型底面にかかる波圧を低減し、水平変位を抑制できたものとする。

(2) 腹付工の効果の算定

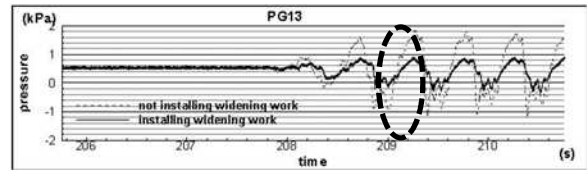
腹付工の効果について、菊池らは、直線滑りを仮定し、裏込めの受動抵抗力を求めている。そこで本研究におい



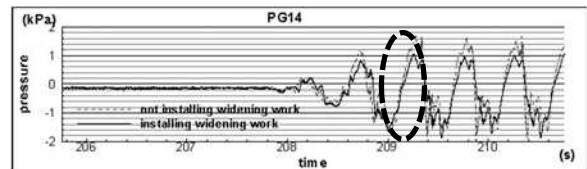
(a) 前面波圧 (PG3)



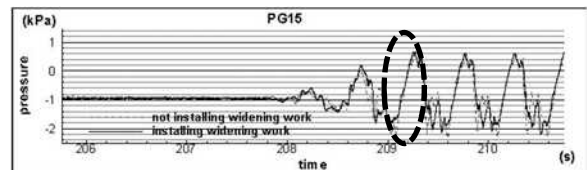
(b) 背面波圧 (PG10)



(c) 底面波圧 (PG13)



(d) 底面波圧 (PG14)



(e) 底面波圧 (PG15)

図-7 時刻歴波形

ても、菊池ら (2011) の式(1)を用いて腹付工の抵抗力を算定した。ここで、 R は裏込による水平抵抗力、 W_s は滑り線より上方の裏込め重量、 θ は滑り線の水平方向とのなす角度、 φ は裏込め材料の摩擦角、 δ は壁面摩擦角である。本件等においては、通常の港湾構造物の設計で用いられる $\delta=15^\circ$ を用いた。計算して得られた腹付工の抵抗力は3.36kNであった。模型の抵抗力は7.78 kNである。腹付工の算定結果を用いて、加震前後における抵抗力を検討した結果を図-8に示す。

本実験においては、抵抗力は越流によって初期抵抗力から6%~12%程度低下し、さらに加震時には、初期抵抗力から11%~17%低下することを確認した。

(3) 腹付け工の有無における安全率の比較

腹付工の有無における安全率の比較を行った。結果を図-9に示す。図の安全率については、加震前の越流状態の最小となる安全率と加震中における最小の安全率を記

$$R = \frac{W_s \tan(\theta + \varphi)}{1 + \tan \delta \cdot \tan(\theta + \varphi)} \quad (1)$$

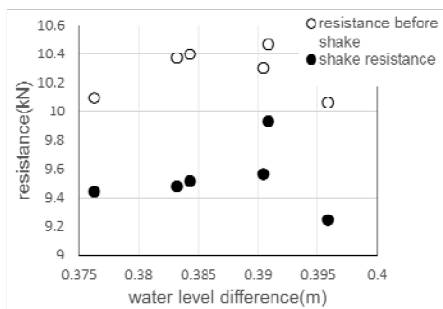
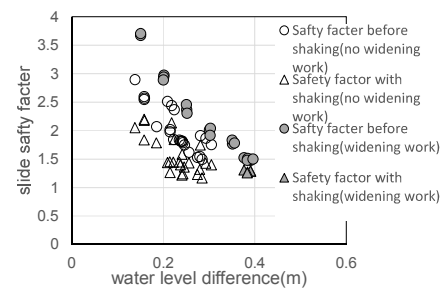
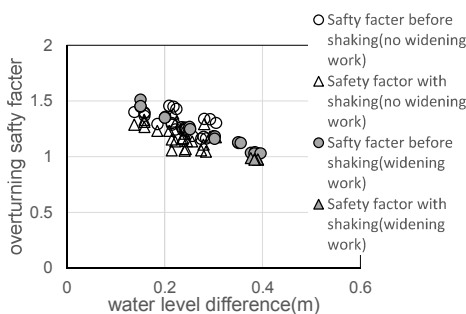


図-8 加振前後における腹付工抵抗力



(a) 滑動安全率



(b) 転倒安全率

図-9 腹付工の有無による安全率の違い

載している。また、腹付工有りのケースについては、腹付工無しの結果と比較するため、時刻歴より抽出した安全率も同時に記載している。

越流時における安全率については、腹付工がある場合とない場合で水位差が同程度の場合は、腹付工の抵抗力の効果によって腹付工がある場合の方が安定度が増している。次に加震時の安全率については、腹付工がないケースは150galで加震した際は、最小滑動安全率1.39はあるものの、0.07mの残留変位が確認された。これは、越流時の変形による加震時の模型底面の波圧増加が原因であると考えられる。

一方、腹付工有りのケースは加震前の越流状態で、概ね最小滑動安全率1.25、最小転倒安全率0.97であったが、破壊が発生したケースは200galで加震したケースのみであった。破壊状況として、腹付工については越流もしくは加震時の振動によって、腹付工天端の沈下が確認できた。そのため、今回の破壊については腹付工の機能が低下したために、破壊に至ったと考えられる。

5. 結論

本検討では地震と津波の重畳現象について、以下の結果を得た。

- 地震と津波の重畳現象については、過去の事例からも影響がある可能性が考えられる。
- 腹付工の抵抗力を菊池ら (2011) の式より求めると、加振前後で低下することが確認できた。
- 腹付工は、越流時の模型前面の浮き上がりを抑えることにより、加震時における模型底面にかかる波圧を低減し、水平変位を抑制できたものと考えられる。

参考文献

- 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉慶善, 高橋研也, 釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討-水理特性を中心とした第一報-, 港湾技研資料, No.1251
- 気象庁:震度データベース, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>, 参照 2016-05-10
- 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野晋, 平石哲也, 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾空港技術研究所, 資料, No.470
- 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 山崎浩之, 松永康男, 関口信一郎, 水野雄三, 藤本義則, 1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.791
- 気象庁:【気象庁技術報告】平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告, p94-99
- 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也, 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学) Vol67(4), p474-487

被災検証による震度算定式の妥当性の評価 —重力式岸壁を対象に—

福永 勇介¹・野津 厚²・竹信 正寛¹・宮田 正史¹・小濱 英司²

¹国土技術政策総合研究所 港湾研究部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

²港湾空港技術研究所 地震防災研究領域（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

現行の港湾分野の設計基準「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、レベル 1 地震動に対応する震度として、照査用震度が新たに導入された。震度法の枠組みで用いられるこの震度は、従来の水平震度とは異なり、地震動の周波数や継続時間による構造物の変形への影響や許容する構造物の変形量を考慮可能であるが、数値計算結果のみによって定式化されている。

本研究では、重力式岸壁を対象として、数値解析結果のみにより定式化された照査用震度式の妥当性を評価するために被災検証と呼ぶ方法を提案し、被災検証によってその他の震度算定式の妥当性評価も行い、各種震度算定式間の妥当性の比較を行う。

キーワード 被災検証、照査用震度、作用震度、限界震度、重力式岸壁

1. 序論

平成 19 年に発行された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾（以下、技術基準と呼称）では、レベル 1 地震動に対する耐震設計法の一環として、照査用震度の算定式（以下、H19 基準照査用震度式と呼称）が新たに導入された。当該式は震度法における水平地震外力の評価に用いられるもので、当該式により算出された照査用震度に構造物の重量を乗じることで、本来動的な作用を静的な作用として置き換えた水平地震外力が得られる。

照査用震度が技術基準に採用される以前に水平震度として用いられてきた設計震度は、全国を幾つかのブロックに分けそれぞれの地域区分ごとに設定された地域別震度に、構造物の設置地点の地盤種別ごとに設定された地盤種別係数と用途、構造、規模などの構造物自体の特性の観点から設定される重要度係数を乗じることで算出される。3 つの数値を乗じるだけで簡便に算出されるものであったが、地点ごとに異なる地震動の特性や構造物の変形に寄与する地震動の周波数特性、地震動の継続時間までは考慮されていなかった。

その課題を解消すべく、H19 基準照査用震度式は、レベル 1 地震動に対する構造物の変形特性と構造物の設置

地点の地震動の周波数特性を考慮した上で定式化された。当該式は、レベル 1 地震動に対する構造物の変形量許容値や、地震動の周波数特性や継続時間を考慮して補正した構造物の設置地点の地表面における地震動の加速度の最大値から震度を求める式となっており、従来の設計震度と同様、当該式により算出された震度を震度法の枠組みの中で用いる²⁾。

よって、当該式により算出された照査用震度による設計は、変形量許容値を通じて設計者が構造物の重要度に応じてその変形量のある程度コントロール可能であることが期待でき、構造物の変形に寄与するレベル 1 地震動の周波数特性が反映されているという点で、従来の震度法の枠組みを継承しつつ発展させたものとなっている。しかし、当該式は 2 次元有効応力有限要素法による数値計算結果のみに基づいて定式化されたもので、当該式より算出される震度に基づく設計計算と実構造物の既往地震における実際の被害の有無とが対応するか否かの確認はなされていない。

本研究では、重力式岸壁の実構造物を対象に、既往地震によりその構造物が実際に経験した地震動とその地震動により構造物に生じた変位の実測値を基に、本研究において提案する被災検証という方法を用いて、H19 基準

照査用震度式の妥当性の評価を行った。併せて、平成19年以前に耐震強化施設を対象に用いられていた野田・上部らにより提案された震度算定式³⁾(以下、野田・上部式と呼称)、2015年に水産庁より提案された水深-5.5m未満の重力式岸壁を対象とした照査用震度式⁴⁾(以下、水産庁照査用震度式と呼称)による被災検証を通じて、それぞれの式で算出される震度の妥当性の比較を行った。

なお、実構造物の被害データを用いた震度算定式の検証事例としては、野田・上部ら³⁾による重力式岸壁を対象とした検討が著名であるが、この検討と本検討との大きな違いは、本検討では構造物が実際に経験した地震動を推定する際にサイト特性を考慮しているという点である。

2. 被災検証による各種震度算定式の妥当性の評価手法の提案

2.1 被災検証の方法

本研究において、H19基準照査用震度式を始め野田・上部式や水産庁照査用震度式(以下、これら3つの式を総称して震度算定式と呼称)の妥当性を評価するために、以下に示す被災検証の方法を提案する。

被災検証は主に2段階で構成される。1段階目は個別の構造物を対象としたものであり、実構造物に対し、既往地震によりその構造物が実際に経験した地震動とそれにより生じた変位の実測値を用いて、2つの方法により被災・無被災の判定(以下、被災判定と呼称)を行う。1つは設計計算上の被災判定(以下、手法①と呼称)、もう一つは実被害による被災判定(以下、手法②と呼称)である。2段階目は各構造形式を対象としたものであり、個別の構造物の被災判定の結果を構造形式ごとに集め、1段階目で行った被災判定の全体の傾向により、震度算定式の妥当性を評価する。

(1) 個別の構造物を対象にした設計計算上の被災判定 (第1段階の手法①)

1段階目における手法①では、作用震度と限界震度という2つの震度を導入し、その大小関係により被災判定を行う。

a) 作用震度

作用震度とは、対象とする構造物が既往地震により実際に経験した地震動を基に震度算定式により算出される震度と定義する。具体的には、その構造物の設置地点の地表面における地震動時刻歴を算出し、それを各震度算定式に代入すれば作用震度が算出される。

b) 限界震度

限界震度は、対象とする実構造物に対し、まずどの破壊モード(例えば、重力式岸壁では、滑動・転倒・支持力破壊)も生じない大きさの水平外力を作用させ、そこからその外力の大きさを段階的に大きくしていった場合、いずれかの破壊モードが初めて生じた時の水平外力を構造物の重量で除したものを、即ち、耐力を作用で除した値として定義した安全率がいずれかの破壊モードに対して初めて1.0未満になった時の震度として定義する。

限界震度の値について、一部の構造物については文献5)で整理されている限界震度の値を用い、それ以外の構造物については本研究において新たに限界震度を算定した。各種構造形式の各破壊モードに対する性能照査式は、文献1)に基づく。実構造物は、平成19年の技術基準の一つ前の基準となる平成11年の技術基準であれば安全率、平成19年の技術基準であれば部分係数を用いて構造物の安全の余裕を考慮して設計されているが、その安全の余裕を考慮して設計された構造物に対しいずれかの破壊モードが生じる際の震度を限界震度とするため、各種設計用値を算出する際の部分係数、構造解析係数はいずれも1.0とした。

c) 作用震度、限界震度の比較

被災判定において、作用震度が限界震度以上となる場合は被災、それ以外の場合は無被災と判定する。またこの手法は、断面諸元が決まっていれば何れの震度も一意的に定まるので、設計上の計算のみによって判定できるものとなっている。

ここに、手法①による被災判定の定義をまとめる。

・手法①(設計計算上の被災判定)の定義

- ・作用震度 > 限界震度: 被災と判定
- ・作用震度 ≤ 限界震度: 無被災と判定

(2) 個別の構造物を対象にした実被害による被災判定 (第1段階の手法②)

1段階目における手法②においては、既往地震により対象構造物が実際に経験した地震動により構造物に生じた変位の実測最大値と震度算定式中のパラメータである変形量許容値の大小関係により被災判定を行う。被災判定において、変位の実測最大値が変形量許容値以上となる場合は被災、それ以外の場合は無被災と判定する。またこの手法は、実際の変位の計測値を用いなければ判定できないものとなっている。

ここに、手法②による被災判定の定義をまとめる。

・手法②(実被害による被災判定)の定義

- ・天端残留水平変位の実測最大値 > D_d : 被災と判定
- ・天端残留水平変位の実測最大値 ≤ D_d : 無被災と判定

(3) 手法①、②による第1段階の被災判定

手法①、②による被災判定結果がいずれも被災あるいは無被災となる場合、即ち合致する場合、その構造物については被災判定は良好であり、評価を「合致」とする。手法①、②による被災判定結果が合致しない場合は、手法②で被災と判定されたにもかかわらず手法①で無被災と判定されたもの、手法②で無被災と判定されたにもかかわらず手法①で被災と判定されたものの2種類がある。

手法①で無被災、手法②で被災となったものは、設計計算で求めた作用震度が限界震度より小さかったにもかかわらず実被害の観点では被災していたことになるので、作用震度を過小評価している可能性があるため、評価を「危険」とする。一方、手法①で被災、手法②で無被災となったものは、設計計算で求めた作用震度が限界震度より大きかったにもかかわらず実被害の観点では被災していなかったことになるので、作用震度を過大評価している可能性があるため、評価を「安全」とする。

(4) 構造種別ごとの被災判定（第2段階）

2段階目の震度算定式の妥当性の評価については、合致率、危険判定率、安全判定率という3つの指標を導入し、それらの数値の大小により震度算定式の妥当性を評価する。合致率は被災検証を行った同じ構造形式を有する構造物のうち、1段階目で被災判定結果が合致となったもの、危険判定率は危険となったもの、安全判定率は安全となったものの割合をそれぞれ表す。

合致率は、第1段階の被災判定結果が合致となる場合が多い程高くなるが、この値が高いと設計計算上の被災判定結果が実被害の被災判定結果をうまく説明しているということになるので、作用震度を算出する際に用いた震度算定式が実際の被災の有無に対して高い説明力を有すると言える。危険判定率は、第1段階の被災判定結果が危険となる場合が多い程高くなるが、前述のとおり、作用震度を過小評価している可能性があるため、作用震度を算出する際に用いた震度算定式が実際の被災の有無に対して説明力を持たないと言える。安全判定率は、第1段階の被災判定結果が安全となる場合が多い程高くなるが、この値が高いと、前述のとおり、作用震度を過大評価している可能性があるため、危険判定率が高い時と同様、震度算定式が実際の被災の有無に対して説明力を持たないと言える。

以上のとおり、危険判定率も安全判定率も高い場合は被災検証における震度算定式の説明力が低いことには変わりはない。しかし、地震外力を過大評価するよりも過小評価する方が構造物の安全性において危険側となるため、安全判定率よりも危険判定率の方を重視する。従って、合致率は高い程、かつ危険判定率は低い程被災判定は良

好であると言え、作用震度の算出の際に用いた震度算定式は被災検証上妥当と言える。

2.2 被災判定グラフの導入

2.1 では被災検証における定量的な評価方法について述べたが、本節では視覚的に被災判定結果を俯瞰し、震度算定式の妥当性を評価するために被災判定グラフを導入する。

被災判定グラフとは、図-2.1 に示すとおり、縦軸に限界震度を横軸に作用震度を取ったもので、作用震度 > 限界震度となる右下の領域（灰色の領域）、作用震度 ≤ 限界震度となる左上の領域（白色の領域）はそれぞれ、被災検証における1段階目の手法①の被災、無被災の被災判定結果に対応している。加えて、手法②による被災判定の結果を、被災であれば▲、無被災であれば▽のプロットのマーカの種類で表現する。このグラフでは、マーカの種類により手法①による被災判定結果が、マーカの種類により手法②による被災判定結果が表されるので、第1段階の被災検証結果を視覚的に即座に判断できるようになる。

図-2.1 には、第1段階の被災判定結果の合致、危険、安全の全3種類のパターン全ての場合を例示してある。

a) 合致となっているものは、被災判定結果が手法①、②のいずれにおいても被災となった場合のもので、手法①の被災判定結果で被災を意味する灰色の領域に、手法②の被災判定結果で被災を意味する▲のマーカで描かれている。b) 危険となっているものは、被災判定結果が手法①で無被災、手法②で被災となった場合のもので、手法①の被災判定結果で無被災を意味する白色の領域に、手法②の被災判定結果で被災を意味する▲のマーカで描かれている。c) 安全となっているものは、被災判定結果が手法①で被災、手法②で無被災となった場合のもので、手法①の被災判定結果で被災を意味する灰色の領域に、手法②の被災判定結果で無被災を意味する▽のマーカで描かれている。

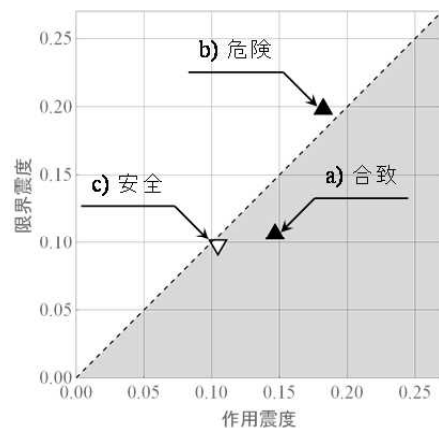


図-2.1 被災判定グラフと第1段階の被災検証結果

このように、個別の構造物について被災判定を実施し、同一の構造形式を有する構造物を同じ被災判定グラフ上にプロットすることで、グラフの全体の傾向によって、その構造形式の震度算定式の妥当性を評価することができる。

3. H19 基準照査用震度式による被災検証結果

本章においては、作用震度の算出に以下の式で示される H19 基準照査用震度式³⁾を用いた場合の被災検証結果について述べる。

$$k_h = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (3.1)$$

ここに

- k_h : 照査用震度の特性値
- D_a : 岸壁天端の変形量許容値 [cm]
- D_r : 変形量許容値の基準値 (= 10) [cm]
- α_c : 補正を行った地表面における地盤加速度の最大値 [Gal]
- g : 重力加速度 (= 981) [Gal]

式 (3.1) の基準変形量には、平成 19 年の技術基準¹⁾に従い 10cm を使用し、作用震度には、上限値として 0.25、下限値として 0.05 の制限を課した。

3.1 被災検証に使用したデータ

被災検証に必要なデータは、対象構造物の岸壁の壁高、背後地盤の初期固有周期、海底面下の地盤の初期固有周期などの断面諸元、既往地震によりその構造物が実際に経験した地震動、その地震動により生じた構造物の法線直角方向の天端の残留水平変位および天端の沈下量である。

検討対象の構造物として、実構造物のうち、既往地震により実際に地震動を経験し、その被災状況について被災報告書に記録が残されているもののうち、水深が-7.5m~-14.6mの重力式岸壁41施設を対象にした。水深が-7.5m以深のものを対象にしているのはH19基準照査用震度式を定式化する際の数値計算上のモデル断面として-7.5m以深のものを使用しているためである。また、水深が-14.6m以浅のものを対象にしているのは、著者らが確認した被災事例に関する記録の中に、それより深い水深を有する岸壁に関するものが存在しなかったためである。

地震動については、作用震度を算出するために対象構造物の設置地点の地表面における加速度時刻歴が必要となる。構造物の設置地点に地震計が設置されていればその記録を用いればよいが、必ずしも構造物の設置地点に

地震計が設置されているとは限らない。その場合、構造物の設置地点の近隣に設置されている強震計（港湾地域強震観測⁶⁾、防災科学技術研究所強震観測網 [K-NET]⁷⁾など）の記録を基に、構造物の設置地点及び強震計設置地点のサイト増幅特性を考慮して、構造物の設置地点の地表での時刻歴を算出した上で被災検証に使用した。この手法については、團村らの研究⁸⁾に詳しい。

震度法による設計では地盤に液状化が生じないことを前提としているため、既往地震による地震動により液状化が生じたことが被災報告書から読み取れる施設は検証対象から除外している。

3.2 重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）の被災検証結果

重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全41施設に対する変形量許容値別の被災検証結果を、表-3.1および図-3.1に示す。重力式岸壁では、変形量許容値を標準値の10cmとした場合において、合致率が90.2%と非常に高くかつ危険判定率が7.3%、安全判定率が2.4%と低くなり、式(3.1)は妥当であると言える。

表-3.1 H19 基準照査用震度式に基づく重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全 41 施設の被災検証結果

unit: % (施設数)	
D_a [cm]	10
合致率	90.2 (37)
危険判定率	7.3 (3)
安全判定率	2.4 (1)

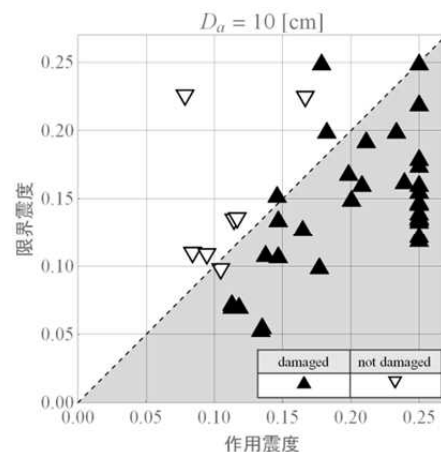


図-3.1 H19 基準照査用震度式に基づく重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全 41 施設の変形量許容値別被災判定グラフ

4. 野田・上部式による被災検証結果との比較

本章では、3.2で示したH19基準照査用震度式による被災検証結果の妥当性を評価するため、他の震度算定式に

より算出した作用震度による被災検証結果との比較を行う。比較に当たっては、平成19年以前に耐震強化岸壁の設計震度算定に用いられていた野田らによる次式で表される震度算定式³⁾を用いる。

$$k_h = \begin{cases} \frac{\alpha_s}{g} & \text{if } 0 \leq \alpha_s \leq 200 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_s}{g} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{if } \alpha_s > 200 \end{cases} \quad (4.1)$$

ここに

- k_h : 水平震度の特性値
- α_s : SMACフィルターによるフィルタリング後の地表面における地盤加速度の最大値 [Gal]
- g : 重力加速度 (=981) [Gal]

また、本章で検討に用いた対象構造物並びに地震動は第3章と全く同じものである。

4.1 重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）における被災検証結果の比較

重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全41施設に対する、野田・上部式、H19基準照査用震度式による被災検証結果の比較を、表-4.1および図-4.1に示す。

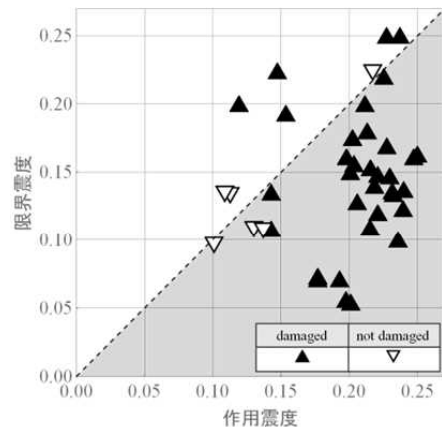
合致率はH19基準照査用震度式の方が高く、かつ危険判定率はH19基準照査用震度式の方が低くなったため、H19基準照査用震度式は野田・上部式に比して妥当と評価できる。

図-4.1によると、作用震度は野田・上部式の方がH19基準照査用震度式よりも全体的に大きな値となり、また表-4.1によると、安全判定率も大きな値となっている。これは、野田・上部式がもともと震度を安全側に評価することを意図して提案されており、その結果平成19年以前は耐震強化岸壁の震度を算出するために用いられていたのに対し、H19基準照査用震度式はレベル1地震動を対象に震度を算出するために考案されたものだからである。即ち、同じ地震動群を対象に野田・上部式とH19基準照査用震度式で設計をすれば、全体に前者の方が建設コストがかかると考えられる。それにも関わらず、危険判定率については、H19基準照査用震度式の方が小さな値となっており、しかも、合致率もH19基準照査用震度式の方が大きな値となっている。従って、H19基準照査用震度式は、より小さいコストで高い信頼性を実現しているという点で優れた震度算定式であると言える。

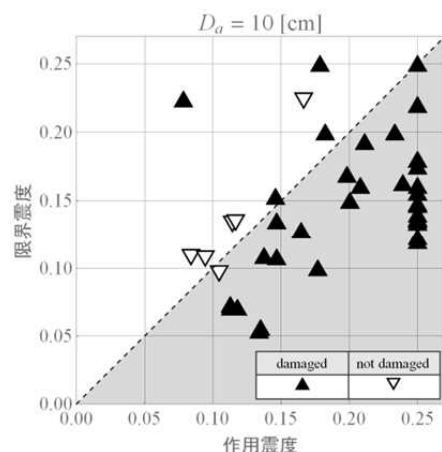
表-4.1 各種震度算定式に基づく重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全41施設の被災検証結果の比較

	野田・上部式	H19基準照査用震度式
合致率	80.5 (33)	87.8 (35)
危険判定率	12.2 (5)	9.8 (3)
安全判定率	7.3 (3)	2.4 (3)

unit: % (施設数)



a) 野田・上部式



b) H19基準照査用震度式（重力式岸壁）

図-4.1 重力式岸壁（水深-7.5m~-14.6m）全41施設を対象にした各種震度算定式に基づく被災検証結果の比較

5. 浅い水深の構造物（水深-7.5m未満）を対象とした水産庁照査用震度式による被災検証結果との比較

H19基準照査用震度式は水深-7.5m以深のモデル断面を対象にした数値計算により定式化されたものであるが、浅い水深を対象とした照査用震度を算出するための式が存在しない。このため、水深-7.5m未満の浅い水深の構造物に対してもH19基準照査用震度式が適用されてきたと考えられる。その一方で、近年水産庁より、水深-

2.1m～5.1mの重力式岸壁のモデル断面を対象に数値計算により定式化された照査用震度の算定式が公表されている⁴⁾。この水産庁照査用震度式は、式(3.1)に示される¹⁾H19基準照査用震度式²⁾と全く同じものである。

ただし、 α_c を算出する際に本章5.1(4)で述べるフィルターを用いるが、そのフィルターが水産庁照査用震度式とH19基準照査用震度式とで異なるため、同じ構造物を対象として照査用震度を計算しても、結果として異なる照査用震度が算出される。

第4章までは水深-7.5m～-14.6mの構造物全41施設を対象に被災検証を行ってきたが、本章においては、水深-7.5m未満の構造物全44施設を対象に、各種震度算定式による被災検証結果の比較を行い、浅い水深の岸壁に対する震度算定式の妥当性を検証する。

5.1 浅い水深の重力式岸壁（水深-7.5m未満）における被災検証結果の比較

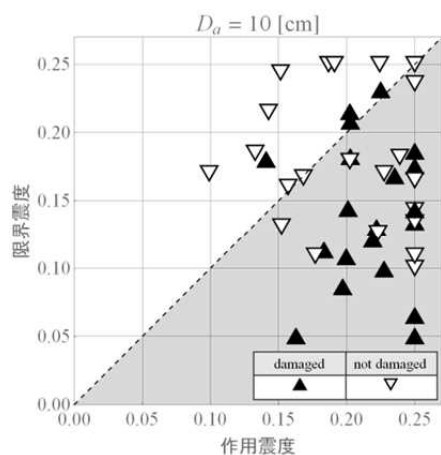
重力式岸壁（水深-7.5m未満）全44施設に対し、H19基準照査用震度式、水産庁照査用震度式による被災検証結果間の比較を表-5.1および図-5.1に示す。なお、変形量許容値は標準値である10cmとした。

その結果、合致率についてはほぼ同等であるが、危険判定率については、水産庁照査用震度式による値の方が大幅に小さかったため、H19基準照査用震度式に比して水産庁照査用震度式の方が妥当であると評価できる。

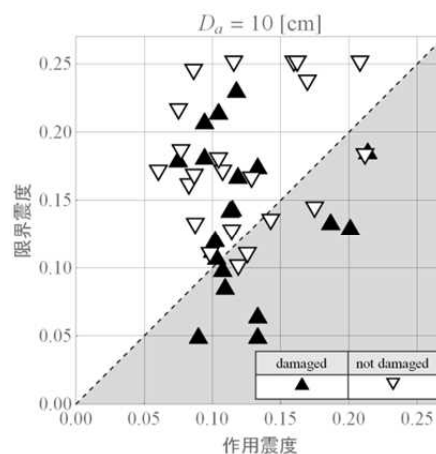
表-5.1 手法②による各種震度算定式に基づく重力式岸壁（水深-7.5m未満）全44施設の被災検証結果の比較

unit: % (施設数)

	水産庁照査用震度式	H19基準照査用震度式
合致率	59.1 (26)	56.8 (25)
危険判定率	9.1 (4)	31.8 (14)
安全判定率	31.8 (14)	11.4 (5)



a) 水産庁照査用震度式



b) H19基準照査用震度式（重力式岸壁）

図-5.1 重力式岸壁（-7.5m未満）全44施設を対象にした各種震度算定式に基づく被災検証結果の比較

謝辞：本稿をとりまとめるにあたり、水産研究・教育機構 水産工学研究所の佐伯 公康氏には浅い水深の重力式岸壁の照査用震度式の定式化に関する研究成果について情報をご提供頂いた。また、渡部 富博港湾研究部長、松本 英雄港湾新技術研究官には、本稿の執筆方針および検討内容に対して貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 2) 長尾 毅，岩田 直樹，藤村 公宜，森下 倫明，佐藤 秀政，尾崎 竜三：レベル1地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法，国土技術政策総合研究所資料 No.310，2006。
- 3) 野田 節男，上部 達夫，千葉 忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所 報告 第14巻 第4号，1975，pp.67-111。
- 4) 水産庁：漁港・漁場の施設の設計参考図書，http://www.jfamaff.go.jp/gyoko_gyozyo/g_thema/sub52.html。
- 5) 野津 厚，上部 達生，佐藤 幸博，篠澤 巧：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係，港湾技術研究所 資料 No.893，1997。
- 6) 港湾地域強震観測ホームページ，<http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>。
- 7) 防災科学技術研究所ホームページ，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>。
- 8) 團村 肇，宮田 正史，野津 厚，若井 淳，浅井 茂樹：液状化を考慮した岸壁残留変形量の簡易評価法の高度化，国土技術政策総合研究所資料 No.743，2013。

平成28年熊本地震における 鉄筋コンクリート造建築物の被害

中村 聡宏¹・坂下 雅信¹・田沼 毅彦¹
向井 智久¹・諏訪田 晴彦²

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

²国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原 1) .

本論文では、平成28年4月14日および4月16日に発生した、最大震度7を記録した平成28年熊本地震における、鉄筋コンクリート造建築物の被害について報告し、被害要因を分析する。耐震設計法が大幅に改定された1981年以降に設計された建築物では、倒壊・崩壊した事例は確認されず、下階壁抜け構造等の特定層に変形が集中する構造物において大破した事例が確認された。これらの被害は、兵庫県南部地震での被害と同様である。1981年以前に設計された建築物では、倒壊・崩壊した事例が複数確認された。一方、耐震改修された建築物では、耐震改修により倒壊・崩壊が防止された。

キーワード 地震被害、鉄筋コンクリート造建築物、倒壊、大破、耐震改修

1. はじめに

平成28年4月14日21時26分に発生した、熊本県熊本地方を震源とするマグニチュード(M)6.5の地震で、熊本県上益城郡益城町で最大震度7を記録した¹⁾。さらに、その約28時間後の4月16日1時25分に、同地方でM7.3の地震が発生し、上益城郡益城町および阿蘇郡西原村で震度7を記録した¹⁾。これらの一連の地震活動は平成28年熊本地震と呼称されている。

この地震の発生を受け、国立研究開発法人建築研究所(以下、建研)および国土交通省国土技術政策総合研究所(以下、国総研)は、主として建築物の被害状況を把握するため、4月14日の地震発生直後から14次にわたる現地被害調査を実施した。これらの調査結果速報は、同研究所の特設HPをご参照いただきたい²⁾。

本稿では、主に鉄筋コンクリート造(RC造)建築物の被害について報告する。鉄筋コンクリート造建築物の被害調査は、図-1に示すように、震度7を経験した益城町、西原村を中心に15市町村を対象として実施した。調査にあたり、各自治体へのヒアリングや他機関の被害調査情報の収集を行い、比較的被害程度の大きい建築物を中心に調査を実施した。

構造設計法が大きく改定された1981年(昭和56年)を基準として、1981年以降に設計された建築物および1981年以前に設計された建築物の特徴的な被害を報告し、そ

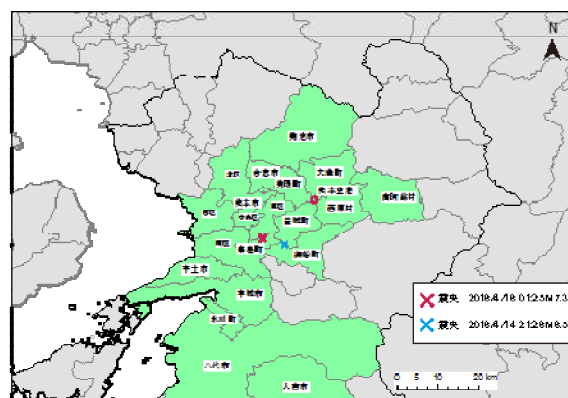


図-1 調査エリア

の被害要因を分析する。また、1981年以前に設計され耐震改修された建築物についても取り上げる。

2. 鉄筋コンクリート造建築物の被害

(1) 1981年以降に設計された建築物

1981年以降に設計された建築物では、倒壊・崩壊に至った被害事例は確認されなかった。一方で、下階壁抜け(以下、ピロティ)構造や特定層に変形が集中する構造を持つ建築物で、特定層への変形集中により大破と判定される事例が確認された。ここでは、その概要を述べる。

a) 共同住宅A

本建築物は、1998年に建設された4階建てのRC造共同

住宅である(写真-1)。平面形状は長方形であり、桁行方向は北西-南東方向である。2階梁伏図を図-2に示す。本建築物は、桁行方向10スパン、張間方向1スパンであり、桁行方向に対称な平面プランである。1階には、桁行方向両端に壁厚220mmの連層耐力壁が、階段室直下(Y4構面の北東側)に壁厚220mmの壁柱が複数枚配置されている。それらの壁を除き、1階は純ピロティ構造となっている。スパンの短いX2-X3区間、X4-X5区間、X7-X8区間およびX9-X10区間は桁行方向に梁はなく、スラブのみで接続している。構造計算上は、これらの区間は両端ピンの梁で接続するようにモデル化され、4本または6本の柱で構成するゾーニングがなされている。1階の柱は断面が650×650mmである。主筋にはD22が用いられ、せん断補強筋はD13がおおよそ100mmピッチで配筋されている。

1階柱は、主筋の座屈が多数見られ、一部の主筋は破断していることも確認された(写真-2)。このような被害は主に柱頭部で確認されたが、一部の柱では柱脚部でも同様の被害が生じている。被災度区分判定基準³⁾に従い、部材損傷度を判定した結果を図5に示す。部材損傷度の判定結果に従い、被災度区分判定をしたところ、耐震性能残存率 $R=21(\%)$ となり、「大破」の判定となった。なお、同団地内に同時期に建設された3階建てないし4階建ての壁式RC造共同住宅15棟の外部からの調査では、構造部材に対する被害は見られない。

当該建築物は、構造計算では1階の部分崩壊型で計画されている。兵庫県南部地震において、ピロティ構造物の部分崩壊による甚大な被害を受け、1997年版の構造規定⁹⁾では、ピロティ構造の層崩壊を避けた設計方針が提示された。本建築物はこれらの規定が提示される以前に設計された建物であったため、ピロティ層の耐震性能が不十分であり、今回のような被害に至ったと推察される。

また、X1、X11構面の2階以上は開口付き壁(柱際に部分スリットあり)であるが、純ラーメン架構としてモデル化されており、それ以外の構面では2階以上の壁(戸境壁)は耐力壁としてモデル化されている(図-3)。X1およびX11構面の部分スリット付き壁が水平力に抵抗した場合、解析モデルに比べて当該構面の1階に作用するせん断力が大きくなり、変動軸力も顕著になることから、柱主筋の座屈や破断が生じたものと考えられる。このような壁のモデル化に起因する被害は、兵庫県南部地震においても確認されており⁹⁾、997年版の構造規定⁹⁾において、部分スリットを有する壁のモデル化について言及されている。

b) 共同住宅B

本建築物は、1985年に建設された4階建てRC造共同住宅である。平面図(および部材損傷度判定結果)を図-4に示す。北東面の階段室の壁を除き、1階は純ピロティ構造となっている。1階の柱は断面が650×650mmである。主筋にはD25が用いられ、せん断補強筋はD10がおおよ



写真-1 外観

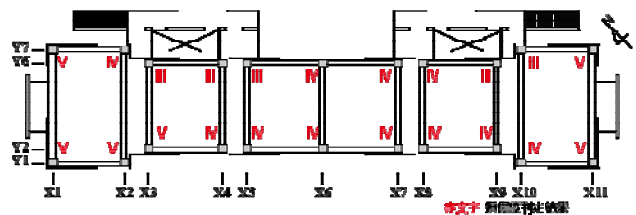


図-2 2階梁伏図および部材損傷度判定結果



写真-2 1階柱柱頭部の被害

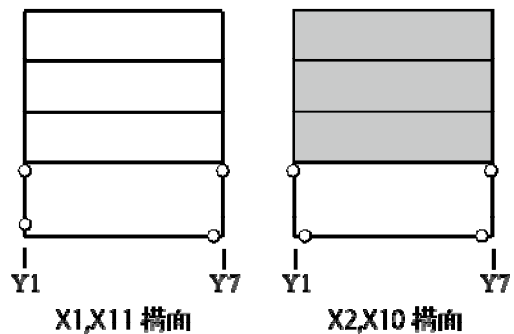


図-3 構造計算におけるモデル化と崩壊型

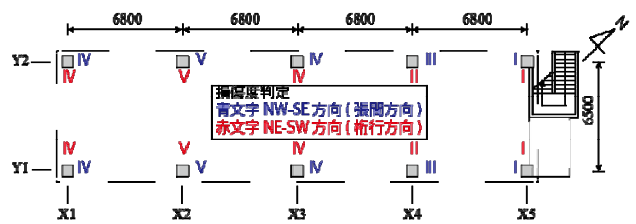


図-4 1階伏図および部材損傷度判定結果

そ100mmピッチで配筋されている。

代表的な被害状況を写真-3に示す。1階柱は、北側角の階段室側から遠い構面の柱に被害が集中しており、ねじれ挙動が生じていることが推察される。X2構面柱がもっとも損傷度が高く、軸支持能力が明らかに低下していることが確認できる。X1構面の隅柱は、柱頭部からやや接合部側に入った位置で曲げ破壊が生じている。X3構面の柱は付着割裂破壊が生じている。

被災度区分判定基準⁹⁾に従い、部材損傷度を判定した結果を図-4に示す。部材損傷度の判定結果に従い、被災度区分判定をしたところ、被害が比較的大きいNW-SE方向（張間方向）で、耐震性能残存率 $R=37(\%)$ となり、「大破」の判定となった。

1997年の建築物の構造規定⁹⁾において、ピロティ柱の設計は柱上下端で曲げ降伏となるように計画し、その際の軸力は崩壊形形成時のものを用いることが示されている。本建築物においては、ピロティ柱が変形性能の劣る脆性的な破壊（付着割裂破壊）が生じており、構造設計において脆性的な破壊を防止するための保証設計が十分ではなかった可能性がある。

c) 共同住宅C

本建築物は、1992年に建設された10階建てRC造共同住宅である。1階は駐車場となっており、北側で10階建ての別棟とエキスパンションジョイントで接続されている。平面図を図-5に示す。1階柱の断面は950mm×950mmで、主筋にはD25が用いられており、せん断補強筋はD13がおよそ75mmピッチで配筋されていた。張間方向の大梁は、桁行方向の大梁と比較して、せい、幅共に短かった。張間方向の大梁の下端筋にはD25が用いられており、せん断補強筋はD10がおよそ200mmピッチで配筋されていた。

1階の外周部には、壁厚150mmのRC壁が設けられているが、それらの壁は柱際に沿って部分スリットが設けられている。したがって、張間方向に関しては、2階以上には耐力壁が配置されているが、その直下の1階には耐力壁がなく、柱だけで構成される純ピロティ構造として設計された可能性がある。

特徴的な被害写真を写真-4および写真-5に示す。X4-Y2柱は中心高さ付近で、X5-Y1柱は脚部に損傷が集中し、コンクリートが剥落すると共に主筋が座屈している(写真-4)。また、X3-Y2柱では、柱自体の損傷は軽微であるものの、X3-Y2柱の取りつく張間方向の大梁の端部で破壊し、下端筋が座屈している(写真-5) また、隅角部の柱(X1-Y1柱)では、大梁が偏心して取り付いた柱梁接合部で残留ひび割れ幅が2.0mmを超えるひび割れが確認された。

上階の桁行方向の共用廊下側の構面でも、1階と同様に柱際に部分スリットが設けられていたが、特に2、3階では、コンクリートの剥落を伴うような袖壁、腰壁、方立壁の被害が見られた。また、柱の損傷度がVと判定さ



(a) X2-Y1柱 (b) X1-Y1柱 (c) X3-Y1柱

写真-3 1階柱の被害

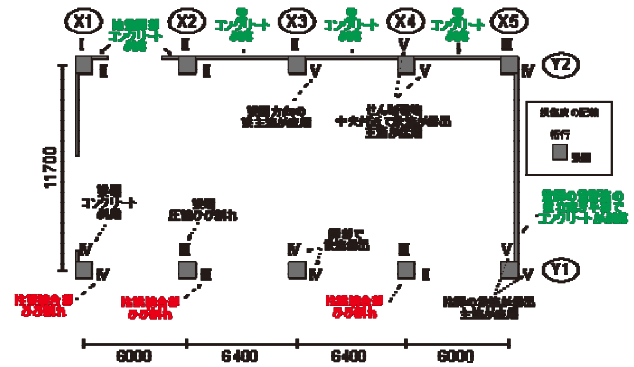


図-5 1階平面図



写真-4 柱の損傷 (X4-Y2柱)



写真-5 梁端部の損傷 (X3-Y2柱に取りつく張間方向大梁)

れ、柱や大梁が大きな損傷を受けた張間方向のX3、X4構面では、スパン中央付近で2階大梁に数センチ程度の鉛直たわみが生じていることを確認している。

被災度区分判定基準⁴⁾に従い、被害が最も大きい1階について、部材損傷度の判定した結果を図-5に示す。被災度区分判定をしたところ、桁行方向の耐震性能残存率はR=35(%)、張間方向の耐震性能残存率はR=31(%)となり、いずれの方向についても「大破」の判定となった。

d) 共同住宅D

本建築物は、10階建てSRC造共同住宅である。桁行方向は8スパン、張間方向は最大3スパンで、平面形状はL字形である。調査時点において、当該建築物は継続使用されている様子であった。本調査では、被害の概要を把握するとともに、被害が大きい5階の共用廊下側の構面の一部を対象とした被災度区分判定を実施した。

桁行方向では、1～8階に渡って方立壁がせん断破壊しており、コンクリートの剥落や鉄筋の露出が見られた(写真-6)。また、当該方立壁は高さ方向に不規則に配置されており、壁のアスペクト比は1から2程度となっている。一方で、バルコニーが設けられた張間方向の外側の構面では、方立壁を含めて、目立った損傷は確認できなかった。現地で実測した方立壁の厚みは180mmで、D10の壁筋がおよそ150mmピッチで配筋されていた。構造的な被害としては、各階の柱や梁、柱梁接合部で、曲げひび割れやせん断ひび割れが見られたが、ひび割れ幅は0.2mm以下のものが大部分を占めていた。

被災度区分判定基準⁴⁾に従い、被害が最も大きい5階について、桁行方向の共用廊下側のおよそ5スパンについて、部材損傷度の判定を行った。6本の柱のうち、4本の損傷度がⅠ、2本の損傷度がⅡ(大梁のせん断ひび割れの損傷を読み替えたもの)と判定され、当該箇所の耐震性能残存率はR=88(%)、被災度は「小破」の判定となった。

方立壁、袖壁に関しては、2015年改訂版の被災度区分判定基準⁴⁾で新たに追加された非構造壁の被災度区分判定を別々に実施した。ただし、非構造壁の被災度と、建築物の性能や修復経費等の因子との関係は現時点で明確ではなく、今後の課題として示されているため、本稿では参考値として扱うものとする。方立壁は今回調査した8枚全ての損傷度がⅢを上回り、被災度を評価する際の基準となるⅣ以上の損傷度となったものが全体の88%を占めたため、非構造壁の被災度は「大破」と判定された。一方、袖壁に関しては、今回調査した5枚全ての損傷度がⅢ以下と判定されたため、非構造壁の被災度は「無被害」となった。

(2) 耐震改修された建築物

a) 庁舎E

本建築物は、1980年に建設された3階建てのRC造庁舎であり、外付けフレームによる耐震改修がなされている。庁舎は2棟あり、渡り廊下で接続されている。庁舎1階床

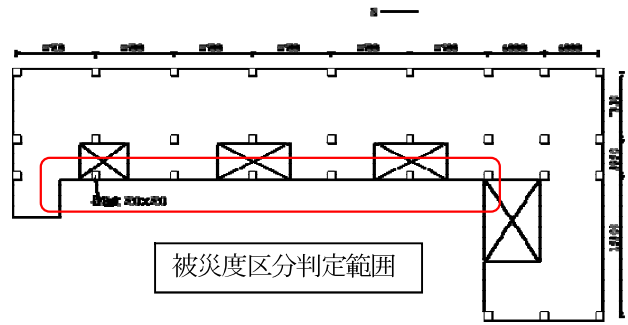


図-6 基準階略平面図および被災度区分判定対象範囲



写真-6 方立壁の損傷

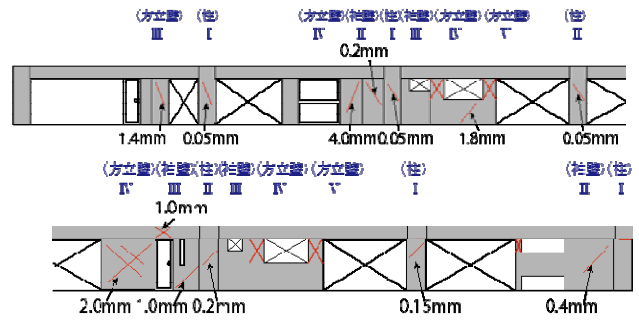


図-7 部材損傷度判定結果



写真-7 外観



写真-8 渡り廊下の損傷

面に設置された地震計では、4月14日の地震、4月16日の地震ともに、震度7を記録している。

4月16日の地震で、エレベータ棟の損傷、地盤変状の悪化が確認され、渡り廊下部分の壁部材が大きく損傷したことを確認している。また、外付け架構と既存架構をつなぐ短スパンの梁部材にわずかなせん断ひび割れを確認している。建築物内部の被害は廊下についてはほとんど見られなかったものの、電算室内の什器や窓ガラスの破損が確認されている。

b) 庁舎F

本建築物は、1968年に建設されたRC造3階建てであり、2010年に枠付き鉄骨ブレースによる耐震改修が施されている。1998年に実施された耐震診断では、桁行方向は耐震性能判定指標 I_s 値が0.30~0.35、張間方向は0.54~1.04となり、桁行方向は全層が、張間方向は1、2階が基準値($I_s=0.6$)を満たさない結果となっている。耐震改修に当たっては、強度・靱性型の枠付き鉄骨ブレース補強が採用され、 I_s 値は0.8前後まで改善されている。

建築物内の耐力壁に損傷が生じており、外装材やコンクリートが剥落している。また、張間方向における外周柱と建築物外壁構面の間の梁にせん断ひび割れが発生しており、特に建築物北側において戸境壁（耐力壁）が設けられた部分の短スパン梁のひび割れが顕著である(写真-11)。被害の程度は、3階と1階が大きい。当該建築物では、天井が崩落した3階の一部の部署を除き、大半の部署で建築物内の業務を継続している。

(3) 1981年以前に設計された建築物

a) 庁舎G

本建築物は、1965年に建設された。5階建てのRC造庁舎である。平面形状は五角形の庁舎棟と長方形のコア棟（階段室、エレベーター、トイレ）から構成される。前者は主としてラーメン架構（上階ほど柱の断面が小さい）、後者は連層耐力壁架構である。

2003年に実施された耐震診断では、 I_s 値は0.20~0.43となり、3階が最も低い I_s 値となっている。庁舎棟とコア棟が45度に傾く複雑な平面形状をしており、スラブで接続されていること、コア棟に耐力壁が集中していることから、平面的なバランスを示すSD指標が0.62という低い数値となっている。また、柱断面が小さく、配筋量も少ないことが指摘され、耐震改修が必要であることが指摘されている。

当該建築物の庁舎棟は4、5階の内柱及び十字形柱梁接合部の大破により局部崩壊している。また当該柱に接続されている梁も大破し、庁舎棟2階柱脚部に損傷が確認された。さらにコア棟の北構面の2階壁脚部で曲げ圧縮破壊を起こし、一部は鉄筋座屈が生じている。庁舎棟とコア棟とは厚さ110mmの床スラブで接続されているが、その接続部には大きなひび割れが発生しており、それらの一体性がどの程度確保されているかは不明である。

南東南西いずれの4階柱梁接合部が大きく損傷してお



写真-10 外観



写真-11 短スパン梁のせん断ひび割れ



写真-12 局部破壊



写真-13 ピロティ層の層崩壊

り、特に南西側4階中央柱両端部の被害が激しい。また東側の4階梁に大きなせん断ひび割れが確認された。

b) 共同住宅H

本建築物は、7階建てRC造共同住宅兼店舗である。県道303号線に面しており平面形状はL字形であるが、エキスパンションジョイントによる分割は見られない。用途は、1階が店舗、2階以上が住宅である。

当該建築物は、南北軸の住棟が層崩壊しており、それに伴って東西軸の北東側の1階柱も大きく損傷している。南北住棟の1階部分は主として駐車場として利用されており、その階に耐力壁がないことが層崩壊の原因と考えられる。なお、当該建築物の東側の裏手には墓地が広がっており、半数以上の墓石が南北方向に転倒していた。

当該建築物周辺には、同様の規模・建設年の共同住宅が2棟存在する。それらの建築物では、ピロティ柱にひび割れが確認されるものの、崩壊には至っていない。被害が異なる要因としては、ピロティ層の壁の配置や平面形状の影響が考えられる。

3. まとめ

本節では、平成28年熊本地震における鉄筋コンクリート造建築物の被害の概要と特徴について報告した。

- ・ 1981年以降に設計された建築物において、下階壁抜け構造（ピロティ構造）部の柱が曲げ・せん断・軸応力により損傷し、大破と判定された事例が確認された。このような被害は兵庫県南部地震でも確認されているものであるが、今後、建築物の設計情報等から被害要因の詳細分析を行う必要がある。
- ・ 1981年以降に設計された建築物において、構造部材、非構造壁やエキスパンションジョイントおよびその周辺部の損傷により、地震後の継続使用性が阻害される事例が確認された。部位の損傷と地震後の継続使用との関係性について詳細に分析する必要がある。
- ・ 耐震改修された建築物において、建築物の損傷が大きい事例が確認された。
- ・ 1981年以前に設計された建築物において、柱や柱

梁接合部の大きな損傷により、建築物が倒壊または部分崩壊した事例が確認された。また、被災建築物の周辺でほとんど被害の見られない多くの建築物が確認されている。それらの建築物の被害が少なかった要因についての分析を行うことが求められる。

謝辞

今回の地震で亡くなられた方及びそのご遺族に対し、深く哀悼の意を表します。また、被災された方々に心からお見舞いを申し上げますとともに、一刻も早い復興を祈念いたします。

本調査を実施するにあたり、国土交通省九州地方整備局建政部、熊本県土木部建築住宅局建築課、熊本市都市建設局都市政策部建築指導課、宇土市建設部都市整備課建築住宅係、その他被災建築物の調査にご協力頂きました関係者の皆様には大変お世話になりました。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：平成28年（2016年）熊本地震の評価、http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/20162016_kumamoto_3.pdf、2016.5
- 2) 国土技術政策総合研究所、建築研究所：平成28年熊本地震建築物被害調査報告（速報）、<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/0929/houkokusokuhou.htm>、2016.9
- 3) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針、2016.3
- 4) 建設省住宅局建築指導課・日本建築主事会議監修、建設省建築研究所協力、（財）日本建築センター発行、建築物の構造規定 - 建築基準法施行令第3章の解説と運用-1997年版、1997.12
- 5) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計、1998.10

「国土交通省ハザードマップポータルサイト」 を通じた防災情報の提供

武藤 雅知¹・本嶋 裕介¹・小島 脩平¹・山本 洋一²

¹国土地理院 応用地理部 防災地理課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

²国土地理院 応用地理部 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

災害から少しでも多くの命を守るためには、国民が災害リスクを正しく理解し、適切な避難行動をとれるようにすることが重要であり、そのためにハザードマップなどの防災情報の活用は有効であると考えられる。その一助として国土地理院応用地理部では、国土交通省水管理・国土保全局等と協力し、「国土交通省ハザードマップポータルサイト」を運用している。

本報告では、国土交通省ハザードマップポータルサイトの概要と直近の改良内容、今後の課題について報告を行う。

キーワード ハザードマップ, 災害リスク, 防災情報, 避難を促す緊急行動

1. はじめに

2015年9月に発生した「平成27年9月関東・東北豪雨」における洪水災害や2016年4月に発生した「平成28年(2016年)熊本地震」における地震・土砂災害など、各地において大規模な自然災害が毎年のように発生している。大規模な災害が起こった際には、「想定外の災害だった」と耳にすることも多いのが実情である。少しでも防災対策不足や想定外による逃げ遅れを減らし、自然災害から命を守るためには、国民が災害リスク情報を容易に入手するとともに正しく理解し、適切に避難ができるようにすることが重要である。

各市区町村や国によって整備されているハザードマップや各種災害想定情報には、その土地の想定浸水深や避難所といった各種の防災情報が含まれている。これらの情報を活用し、土地の災害リスクを理解できれば、一定の災害を「想定内」のものとして心構えを持つことができる。その上で適切な避難行動ができるようになれば、想定外の状態で起こるよりも被害の軽減につながる事が期待される。

上記を達成するため国土地理院は、国土交通省水管理・国土保全局等と協力して、「国土交通省ハザードマップポータルサイト(以下「ハザードマップポータル」という。)」を2007年4月から運用している。また、国土交通省が2015年1月に公表した「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」¹⁾や、平成27年9月関東・東北豪雨を受けて実施している「避難を促す緊急行動」²⁾に基づき、国民が自身の住んでいる場所等の災害リスクを理解し、自然災害に対する知識と心構えを持つことができるウェブサイトとするための調査検討を行い、その結果を踏まえて改良を行っている。

2. ハザードマップポータルの概要

ハザードマップポータル(図-1)は、主に「わがまちハザードマップ」と「重ねるハザードマップ」の2つによって構成されている。

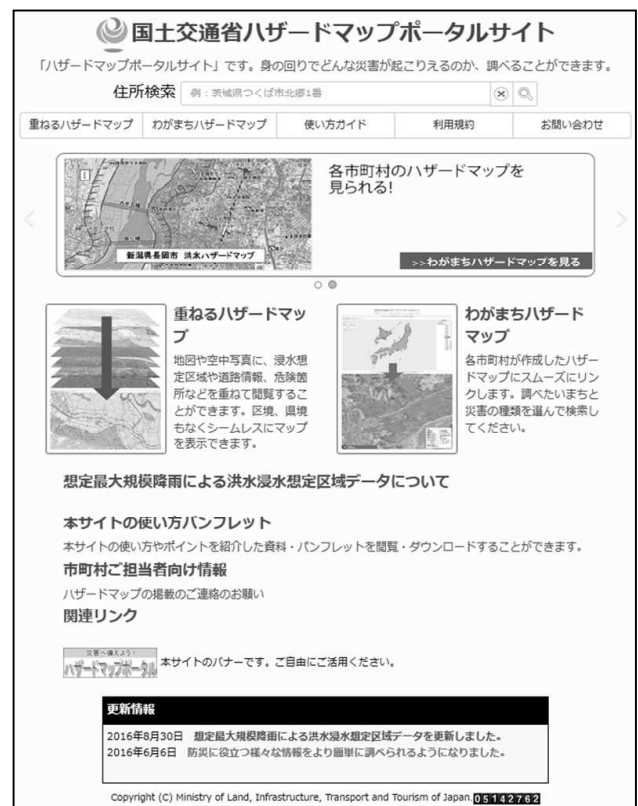


図-1 ハザードマップポータルのトップページ

URL: <http://disaportal.gsi.go.jp/>

(1) わがまちハザードマップ (図-2)

全国の市区町村が作成した洪水、内水、高潮、津波、土砂災害、火山の6種類のハザードマップを「地図」や「災害種別」から検索することで、市区町村のハザードマップのページへスムーズにアクセスし、各種ハザードマップを閲覧することができる。また、想定される震度被害や地盤被害(液状化)、建物被害、火災被害などを表したマップなども同様に閲覧できる。

(2) 重ねるハザードマップ (図-3)

国土交通省が取りまとめている、洪水浸水想定区域、津波浸水想定区域、土砂災害危険箇所、事前通行規制区間、道路冠水想定箇所、大規模盛土造成地や、国土地理院が作成している空中写真、都市圏活断層図や土地条件図等多数の防災情報を、1つのウェブ地図上に重ねて表示できる。(図-4) 以下にその特長を示す。なお、③から⑤の機能は2015年度の調査・改良業務によって検討され、2016年6月に実装された機能である。

①所定の内容しか表示できない紙やPDFのハザードマップと異なり、見たいデータを自由に選択してディスプレイ上に表示できる。

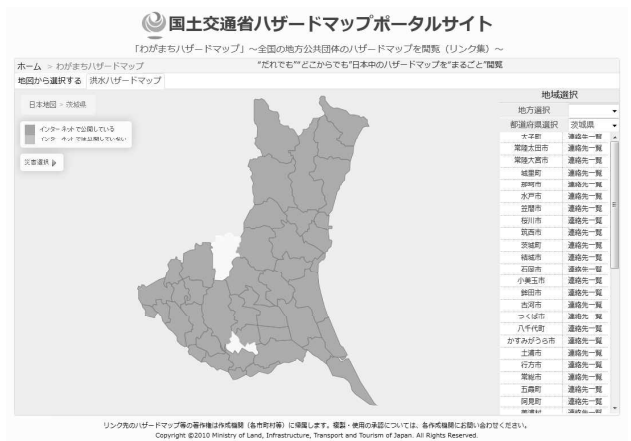


図-2 わがまちハザードマップ
(茨城県内の水害ハザードマップを地図から検索した例)



図-3 重ねるハザードマップ

②各市区町村によって作成されているハザードマップの場合、市区町村内、もしくは管内の地区ごとに別ページで提供されていることも多いが、重ねるハザードマップでは市区町村や地区の境界に関係なく、防災情報をシームレスに表示させることが可能である。これにより、市区町村域をまたぐ広域災害にも対処しやすい。ただし、重ねるハザードマップは、各市区町村のハザードマップをシームレスに接続したものではないので注意されたい。

③地図上に示された情報の内容を知るためには、従来では凡例と見比べる必要があったが、洪水浸水想定区域や土砂災害警戒区域等についてはその場所をクリックすることで、情報がポップアップ表示され、凡例と見比べることなくより簡単にその土地の防災に関する情報を得られる(図-5)。

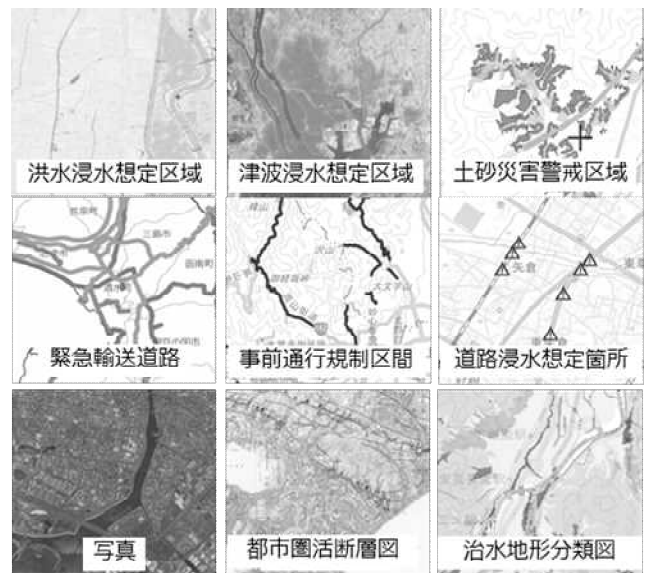


図-4 重ねられる主な情報



図-5 属性情報のポップアップ表示

- ④「リスクをまとめて調べる」機能（図-6）を用いると、ある地点の数種の自然災害リスク（洪水によって想定される浸水深、土砂災害の危険性、大規模盛土造成地、治水地形分類図、明治期の低湿地）を一度にまとめて検索できる。スマートフォン等のGNSSによる測位機能を利用した「現在位置」による地点検索で、その場の自然災害リスクが即時にわかる。その他にも住所や地図上から検索することで、その場所の自然災害リスクを容易に取得できる。
- ⑤「地図機能」により作図や計測、印刷ができるので、自分でカスタマイズしたハザードマップを簡単に作成できる（図-7）。



図-6 リスクをまとめて調べる機能

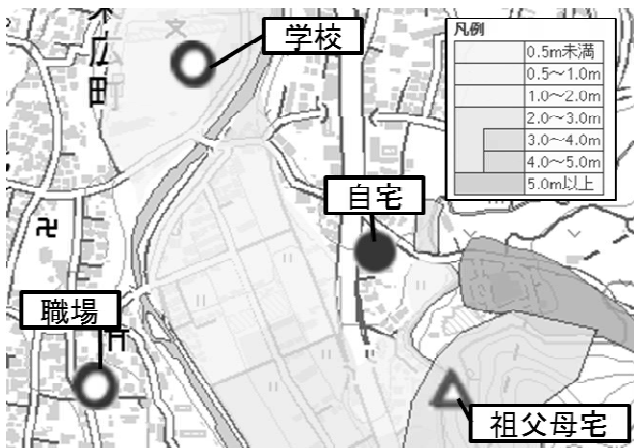


図-7 カスタマイズしたハザードマップの例

3. 活用例

「重ねるハザードマップ」の活用方法を以下にいくつか紹介する。

(1) 大雨を想定した例

図-8は「洪水浸水想定区域」、「土砂災害危険箇所」、「事前通行規制区間」及び「道路冠水想定箇所」を重ね合わせた地図である。大雨の際、浸水が予想される区域とその深さや、土砂災害によって通行が寸断されるおそれがある道路、災害時に通行止めや冠水するおそれのある道路が1枚の地図上に表示されており、これらを避けた災害リスクの小さい避難ルートを事前に検討できる。

(2) 地震を想定した例

図-9は「都市圏活断層図」、「急傾斜地崩壊危険箇所」及び「大規模盛土造成地」を重ね合わせた地図である。内陸型地震を引き起こすといわれる活断層の位置と、地震の際にがけ崩れや滑動崩落をもたらす可能性がある場所が1枚の地図上に表示され、これにより地震に関するリスクを把握し、建物の立地や耐震化の検討などに役立てられる。

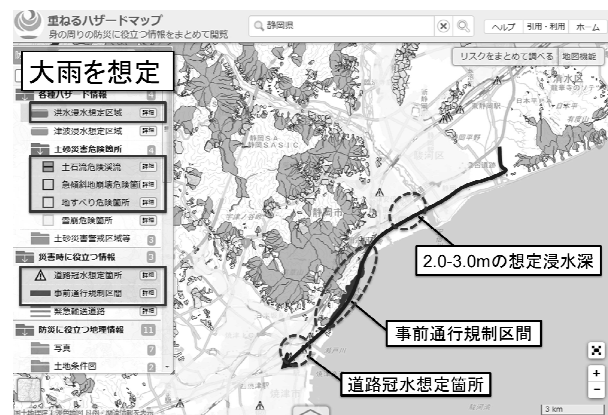


図-8 大雨による災害を想定した例



図-9 地震による災害を想定した例

4. まとめと今後の課題

今回の改良で、「リスクをまとめて調べる」機能の追加や、スマートフォン等のGNSSによる測位機能を用いて、現在地を取得する機能を追加したことにより、任意の場所、特に現在地においてどのような災害が起こる可能性があるのか容易に知ることができるサイトとなった。それに加え、防災情報コンテンツの充実と整理、使いやすさの向上などの改良を行ったことによって、国民が防災情報を入手しやすい状態を提供できた。

しかし、「防災情報の入手」にとどまらず、「災害リスクを理解」するところまで導かなければ、災害時における国民の適切な避難行動には結びつかない。

例えば「リスクをまとめて調べる機能」は、その土地の様々な自然災害リスクを提示するが、「扇状地」や「氾濫平野」といった専門用語が含まれ、ここから災害リスクを正確に読み取ることができる人は多くない。この課題を解決し、より多くの国民に災害リスクを理解してもらうには、様々な方法が考えられる。解決策の1つとして、専門用語の解説を挿入することにより、体系的に土地の災害リスクが判断可能になる。そのほか、ハザードマップが示す推定被害範囲を三次元表示できれば、災害リスクを容易に理解することが可能になる。このように「防災情報の入手」から「災害リスクの理解」に至るプロセスを強化することが、今後早急に解決すべき課題であると考え（図-10）。

国民が正しく災害リスクを認識し、適切な避難行動をとって命を守ることができるよう、今後もハザードマップポータルサイトの改良を行っていく。

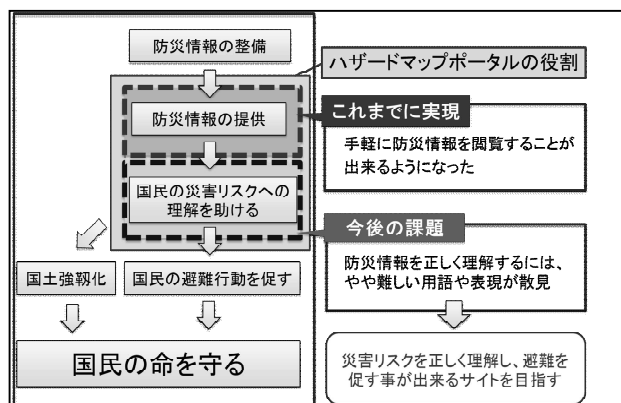


図-10 災害から国民の命を守るためのプロセス

参考文献

- 1)国土交通省（2015）：新たなステージに対応した防災・減災のあり方，<http://www.mlit.go.jp/saigai/newstage.html>（accessed 26 Sep. 2016）
- 2)国土交通省水管理・国土保全局河川計画課（2015）：避難を促す緊急行動，http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000893.html（accessed 26 Sep. 2016）

氾濫危険箇所の監視体制の効率化について ～簡易水位計を用いた一括監視・報告システム～

土田 元気¹・宮川 祐司²

¹関東地方整備局 甲府河川国道事務所 調査第一課 (〒400-8578 山梨県甲府市緑が丘1-10-1)

²関東地方整備局 下館河川事務所 工務課 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成1753)

出水時、基準水位観測所で氾濫危険水位を超えた場合、氾濫危険箇所の水位は水防活動や避難に資する情報として非常に重要であり、常に把握し情報発信することが有効である。一方、富士川水系は氾濫危険箇所数が多く、限られた人員で氾濫危険箇所の水位把握・報告は困難である。そこで、氾濫危険箇所への設置が容易な簡易水位計及び水位データの収集・整理・公開・報告様式作成を支援するシステムを開発した。システム開発に当たりクラウドシステムを活用したため、事務所内の既存システムへの影響を最小限に抑えたほか、当事務所のみならず、他事務所及び自治体での利活用も可能なシステム環境を構築することができた。

キーワード 氾濫危険箇所、簡易水位計、クラウドシステム、様式作成

1. はじめに

河川の出水時における対応で要となる水位概況については、従来より基準水位観測所の水位を基に監視を行ってきた。しかしながら、各基準水位観測所の受け持ち区間は長大で、基準水位観測所の水位のみを以て個々の氾濫ブロックに対する河川状況をそれぞれ個別に把握することは困難である。また、基準観測所が氾濫危険水位を示しているときは、受け持ち区間で氾濫危険水位に達する恐れがあることを示しているに過ぎず、直ちに氾濫危険箇所の実測水位（実況水位）を示しているものではない。そのため、2014年8月から、基準観測所で氾濫危険水位に達した時点で、その基準観測所が受け持つ区間に属する全ての氾濫危険箇所の実況水位（各氾濫危険箇所における堤防天端と水面との実測比高差）を本局へ毎正時報告することとなった（水管理・国土保全局河川環境課長、平成26年8月6日付け事務連絡）。

ところが、富士川では報告対象となる氾濫危険箇所が74箇所と多数存在する上、既存の水位計やCCTVカメラによる監視ができていない箇所も多数あった。さらに、人員が限られていることから、現地での直接観測や観測情報の整理に時間を要する。そのため、氾濫危険水位に達する基準水位観測所が受け持つ区間の全ての氾濫危険箇所水位を毎正時遅延無く報告することが困難となることが危惧された。

一方、富士川の特長として、急流かつ土砂流出が多く、

出水による河床変動等が生じることから、氾濫危険箇所の位置も出水のたびに変わることが考えられる。

前述の背景から、氾濫危険箇所の監視体制の効率化に向けて、設置・移設が容易かつ安価な簡易水位計及び氾濫危険箇所の実況水位を統括的に収集・整理し、速やかな公表・報告を支援するシステムを開発した。

2. 富士川の流域特性に対応したシステム要件

(1) 富士川の概要

富士川は、その源を山梨県と長野県境の鋸岳（標高2,685m）に発し、途中多くの支流を合わせながら山間峡谷部を抜け、甲府盆地南端において笛吹川を合わせて再び山間峡谷部に入り、静岡県富士市と静岡市の境において駿河湾に注ぐ、幹川流路延長128km、流域面積3,990km²、平均河床勾配が1/240の急流河川で、礫河原を呈している。また、流域の西側には日本列島を東西に分断する大断層糸魚川～静岡構造線が走っていることから流域は極めてもろい地質構造になっており、崩壊地が多く、豪雨とともに崩壊土砂が河道に流出し、流れの緩やかな所に堆積している。

(2) 氾濫危険箇所の監視に係る課題

富士川水系直轄管理区間の特徴と氾濫危険箇所の監視に係る課題について記す。

a) 降雨・流出特性

降雨・流出特性は、降雨のピークから出水のピークまでの時間が極めて短い。そのため、洪水対応においては体制初期段階から短時間かつ多様な防災業務の遂行が求められることとなるが、その一方で人員は限られているため、可能な限りの省力化が不可欠となる。

b) 氾濫危険箇所

富士川直轄管理区間における氾濫危険箇所は74箇所あり、これらを同時に監視する必要がある。特に、山間峡谷部を蛇行しつつ流下する中流域においては山間の集落が多く、氾濫ブロックが点在していることから、氾濫危険箇所が多数存在する(写真-1)。

また、山間峡谷部においては、電源や通信のインフラに乏しく、従来の水位観測施設では設置が困難な場所が多い。

c) 土砂堆積・河床変動

富士川流域が極めてもろい地質構造であることから、河道への土砂流入により、土砂堆積や河床上昇が発生しやすい。例えば、1982年8月洪水(整備計画流量規模)では、釜無川の一部区間で約420万m³の土砂が堆積し、平均約1m(最大約4m)の河床上昇が発生した。このように、出水前後において河道断面が変化することにより、氾濫危険箇所の位置も出水前後で変化することが考えられる。



写真-1 集落が点在する富士川中流域

(3) システムに求められる要件

前述から、簡易水位計及びシステムに求められる要件を整理する。

a) 簡易水位計

- 氾濫危険箇所の位置変化へ柔軟に対応出来るもの
- 電源や通信に商用の有線設備を必要としないもの
- 多数の氾濫危険箇所に対応するため、安価に導入出来るもの

b) 水位監視・様式作成支援システム

- 氾濫危険箇所の監視・報告に当たって、全ての氾濫危険箇所の水位を統括的に情報集約出来るもの
- 報告様式の作成等を自動で行い、省力化を図ることが出来るもの
- 多数の氾濫危険箇所の水位データを同時に処理しても、事務所内の既存システムへ負荷をかけないもの

3. 簡易水位計の開発

氾濫危険箇所の水位を監視するために、電源や通信インフラがない場所にも設置が容易で安価な簡易水位計を開発した(図-1)。

(1) 簡易水位計の構成

氾濫危険箇所に設置する簡易水位計の構成を示す。通常の水文観測に用いる従来の水位観測施設は、センサ、局舎、テレメータ装置、パンザマスト等で構成される大規模で高価な施設である。一方、簡易水位計の目的はあくまで「氾濫危険水位に達した氾濫危険箇所の監視」を安価に実現することにあることから、中小洪水による氾濫危険箇所の変化にも対応できるように、簡易水位計の構成は極力簡素なものとした上で、市販の機器の組み合わせにより構成した。以下に、機器の構成を記す。

a) 水位センサ(水圧式センサ・保護管)

現地に保護管(単管パイプ)のみで設置できる市販の水圧式センサとする。

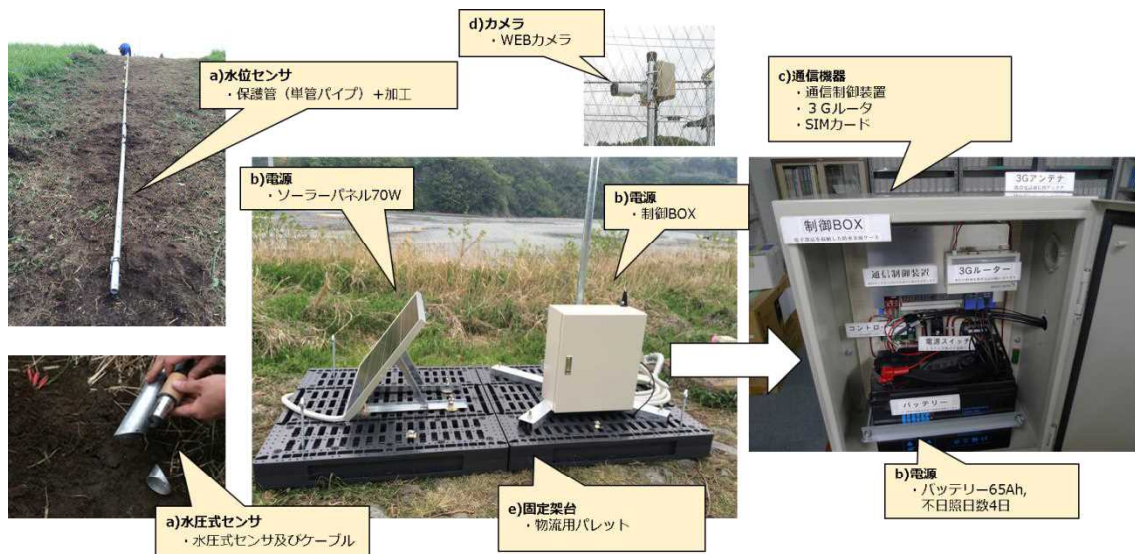


図-1 簡易水位計の構成

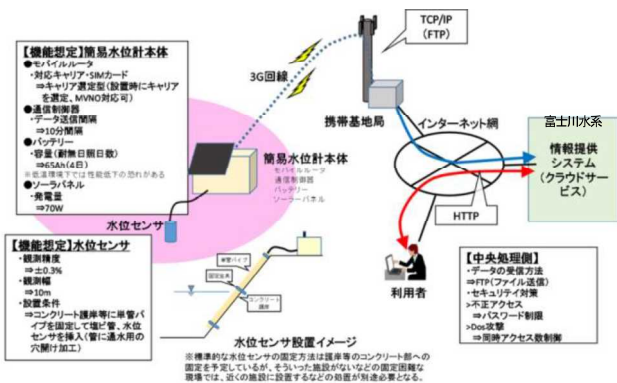


図-2 簡易水位計 データの流れ



図-4 簡易水位計データ表示画面

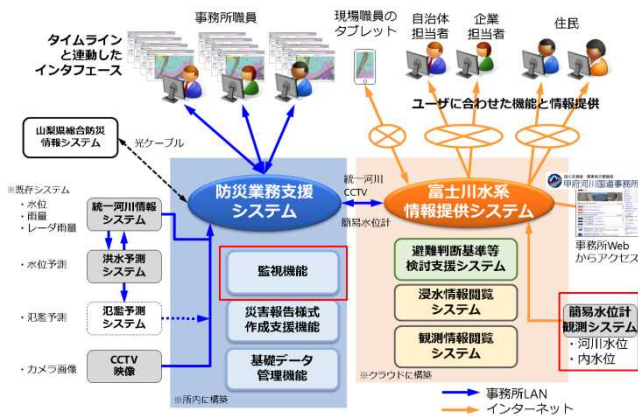


図-3 「富士川水系情報提供システム」と「防災業務支援システム」との関係

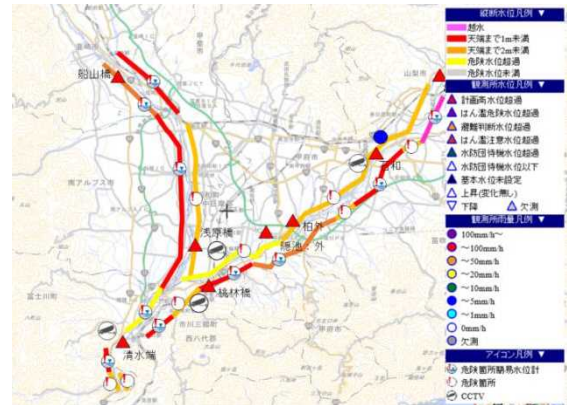


図-5 氾濫ブロック毎 クリアランス表示画面

b) 電源（ソーラー発電装置・バッテリー）

商用電源からの配線や発電機への燃料補給の必要が無く、さらに発電機等と比べてコンパクトなソーラー発電装置を主電源とする。また、ソーラー発電装置のバックアップとしてバッテリーを設置する。

c) 通信機器（3G回線）

通常の携帯電話網を活用し、携帯電話同様にSIMカードの契約のみで導入できる3G回線とする。

d) カメラ（WEBカメラ）

インターネットを通じて閲覧可能なWEBカメラとする。

e) 固定架台（物流用パレット）

市販の物流用パレットを固定架台とする。

f) その他 設置についての留意点

水位センサの設置位置について、通常の水位観測所ではセンサを低水路（濡筋）に固定する。しかしながら、氾濫危険箇所監視に当たっては、あくまで氾濫危険箇所（堤防部分）の実測水位が必要なこと、氾濫危険水位以上の水位が計測できれば良いことから、センサは氾濫危険箇所近傍の堤防表法尻等に設置している。

また、防犯措置として保安柵を必要に応じて設置する。

4. 水位監視・様式作成支援システムの開発

簡易水位計の観測値を表示するためのシステムを開発

し、氾濫危険箇所の水位を監視できるようにした。また、氾濫危険水位に達した基準水位観測所が受け持つブロック全ての氾濫危険箇所水位を報告様式として自動出力する機能を構築した。

さらに、観測データはインターネットで公開し、避難勧告等を発令する自治体と情報共有が出来るようにした。

(1) システム構成

氾濫危険箇所の水位監視に当たっては、多数の簡易水位計のデータを同時に処理する必要がある。しかしながら、事務所内の既存システム（データサーバ等）の容量には限りがあること、自治体等外部へのデータ公開に当たりセキュリティ確保の必要があることから、簡易水位計のデータサーバは外部のレンタルサーバを活用したクラウドシステム上に構築することとした。

簡易水位計のデータは、まず、クラウド上に構成された「富士川水系情報提供システム」に格納・整理される（図-2）。さらに、所内イントラネット上に構築された「防災業務支援システム」へ必要な情報を読み込むことで、各種様式が作成される（図-3）。

(2) 機能紹介

a) 簡易水位計 観測データ表示機能（一般公開）

簡易水位計の観測データを開覧する機能（図-4）。ここでは、水位のみならず、近傍のCCTVカメラ映像を合わせて表示することで、河川の概況を掴みやすくなる

<本局への報告様式>

- ・堤防天端までの水位（クリアランス）
- ・推定浸水戸数等を表示

危険箇所水位状況報告様式【有堤部】

■有堤部		第1種より記載											
日付	時間	地盤名	事務所名	水系名	河川名	受け持ち 基準観測所名	牛口標 (k.m)	左・右岸	特定区画	水位状況 (堤防天端・実況水位) (m)	市町村名	浸水想定 浸水戸数(戸)	主要公共施設
8月28日	18:00	関東地方整備局	甲府河川国道事務所	富士川水系	富士川	南部水位観測所	H144	右岸		2.0	南都町(富士地先)	210	南都町役場
	18:30	"	"	"	"	"	"	"	"	1.6	"	"	"
	19:00	"	"	"	"	"	"	"	"	1.2	"	"	"
	19:30	"	"	"	"	"	"	"	"	0.8	"	"	"
8月28日	18:00	関東地方整備局	甲府河川国道事務所	富士川水系	富士川	南部水位観測所	H212	左岸		1.9	身延町(柏田地先)	38	
	18:30	"	"	"	"	"	"	"	"	1.7	"	"	"
	19:00	"	"	"	"	"	"	"	"	1.5	"	"	"
	19:30	"	"	"	"	"	"	"	"	1.3	"	"	"
8月28日	18:00	関東地方整備局	甲府河川国道事務所	富士川水系	富士川	南部水位観測所	H66	右岸		3.0	富士市(木島地先)	59	富士市役所
	18:30	"	"	"	"	"	"	"	"	2.6	"	"	"
	19:00	"	"	"	"	"	"	"	"	2.2	"	"	"
	19:30	"	"	"	"	"	"	"	"	1.8	"	"	"
8月28日	18:00	関東地方整備局	甲府河川国道事務所	富士川水系	富士川	清水橋水位観測所	H202	左岸		3.2	市川三郷町(岩間地先)	322	
	18:30	"	"	"	"	"	"	"	"	2.8	"	"	"
	19:00	"	"	"	"	"	"	"	"	2.4	"	"	"
	19:30	"	"	"	"	"	"	"	"		"	"	"
8月28日	18:00	関東地方整備局	甲府河川国道事務所	富士川水系	釜無川	船山位観測所	K219	左岸		1.5	甲斐市(下今井地先)	410	県立農業大学校(茨瀬校舎)
	18:30	"	"	"	"	"	"	"	"	1.1	"	"	"
	19:00	"	"	"	"	"	"	"	"	0.8	"	"	"
	19:30	"	"	"	"	"	"	"	"		"	"	"

図-6 危険箇所水位状況報告様式作成画面

よう工夫している。

なお、この機能は「富士川水系情報提供システム」によりインターネット公開されており、自治体だけでなく沿川住民が自ら氾濫危険箇所の状況を確認することが出来る。

b) 概況監視機能（事務所内）

各氾濫ブロック毎に、簡易水位計（未設置の箇所は換算水位）の水位を天端までの水位（クリアランス）により色分け表示する機能（図-5）。

これにより、より危険な状態となっている氾濫ブロックを一目で把握することが出来、河川巡視や首長へのホットライン等に活用することが出来る。

c) 氾濫危険箇所ランキング表示（事務所内）

氾濫危険箇所の水位データを読み込むことにより、ランキング表を作成する機能。下記の項目により任意に並び替えることが出来る。

- ・ 上下流
- ・ 天端までの水位（クリアランス）
- ・ 想定浸水戸数
- ・ 簡易水位計の有無

d) 危険箇所水位状況報告様式作成機能（事務所内）

氾濫危険箇所様式を毎正時に自動作成・メール発出する機能（図-6）。簡易水位計の設置済み箇所には簡易水位計の実測値、未設置箇所には基準水位観測所の水位を基にした換算水位を自動入力する。本局への報告に当たっては、換算水位を実測水位に置き換えた上で、メール発出する。

5. 今後の予定

現在のところ、簡易水位計は直轄河川管理区間の氾濫危険箇所に33箇所設置済みである（2016年5月現在）。また、「富士川水系情報提供システム」は2015年12月18日に一般公開を開始した。

今後は、2016年度から導入された「危険箇所（越水）」により、富士川水系においても新たな氾濫危険箇所が設定されていることから、これらへの簡易水位計設

置を予定している。さらに、富士川の洪水氾濫時における浸水状況把握のため、堤内地側の支川や水路等への簡易水位計設置を検討する。

また、中期的には、洪水時において基準水位観測所に加え簡易水位計のデータを基にした水面形を分析することにより、河床変動のモニタリングへ活用することも期待できる。

6. おわりに

本論文では、氾濫危険箇所への設置が容易でリアルタイム監視が可能な簡易水位計の開発、氾濫危険箇所の水位データ収集・整理・公開・報告様式作成を支援するシステムの構築による、低コストでの監視体制強化及び省力化の実現について報告した。

また、システムをクラウド上で稼働することとしたことにより、事務所内の既存システムへの影響を最小限に抑えたほか、当事務所のみならず、他事務所及び自治体での利活用も可能なシステム環境を構築した。これにより、2015年9月10日に発生した鬼怒川破堤災害において復旧工事期間中の水位監視に活用された。さらには、自治体において当システムの有効性への認識が広まりつつあり、今まで水位の観測体制がなかった支川に自治体自らの負担で簡易水位計の設置を進めるようになってきている。

今後、本格的に本システムを活用した洪水対応を行う中で、システムに必要な改善を継続的に実施することが必要と考える。また、システムの安定性や簡易水位計の耐久性の検証、夜間におけるWEBカメラの視認性の検討、施設点検等の維持管理方法についても今後の課題である。

付録

富士川水系情報提供システム

<http://kofu-river-bosai.ktr.mlit.go.jp/>

より一層の安全性向上を目指した橋梁補強事例の紹介

— 中央自動車道沢底川橋 —

NEXCO中日本 田尻丈晴¹・萩原幹²

¹八王子支社 松本保全・サービスセンター 更新工事担当課 (〒390-0852 長野県松本市島立1347)

²八王子支社 松本保全・サービスセンター 更新工事担当課 (〒390-0852 長野県松本市島立1347)

本論文は、NEXCO中日本におけるリニューアルプロジェクトの一貫で実施された橋梁の補強事例を紹介するものである。補強対策を実施するにあたり、事前に劣化事象を把握するための「非破壊等の調査」及び「劣化要因分析」を行った。また、高速道路の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討を踏まえ、より一層の安全性向上に着目した取り組みを紹介する。

キーワード リニューアルプロジェクト、長期保全、安全性向上、橋梁補強

1. はじめに

当該橋梁では、2015年9月末から11月中旬にかけて上り線を、2016年5月中旬から7月中旬にかけて下り線を対面通行規制により橋梁補強工事（床版取替工事）を実施した。橋梁形式は、中間支点部の床版上縁部引張応力を補うため床版内にPCケーブルを配置し曲げ上げる構造を有した「連続合成I桁橋」であり、橋梁の経年劣化に伴い、中間支点部における連続PCケーブルが損傷し本体構造の安全性能の低下が確認されたため、PC外ケーブル補強により安全性の向上を図ったものである。

(図-1参照)

本件は、国内でも稀な補強対策であり、補強設計検討、構造物の非破壊検査（調査）及び対策工施工を通じて、プレストレストコンクリート橋における「より一層の安全性向上」に着目した取り組み状況について紹介するものである。また、撤去した既設床版を観察したところ、特異な水平ひび割れの劣化が確認されていたため、損傷原因の考察をあわせて行う。

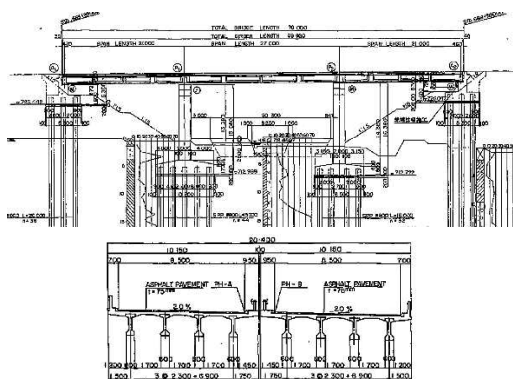


図-1 橋梁一般図

2. 供用環境と劣化要因の把握

(1) 供用の環境

中央自動車道の小淵沢IC～伊北IC間は、1981年（昭和56年）に供用後、約35年経過しており、大型車交通の累積荷重による影響や冬季の累積凍結防止剤による影響など、供用環境の厳しい区間となっている。特に、凍結防止剤量については、年間で約30 t / k m以上（累積約1000 t / k m）と推測され、「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会（2014年1月）委員長 東京大学 藤野教授」の報告書による「凍結防止剤の影響（塩害）」の影響が懸念される路線に選定されている。（図-2参照）

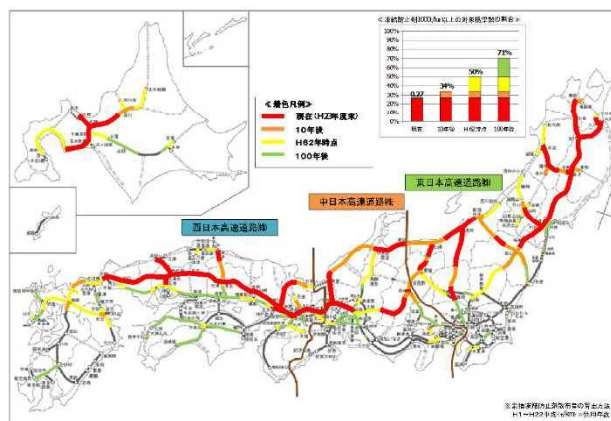


図-2 凍結防止剤の累積散布量

(2) 劣化要因の把握

表-1は、2009年1月の点検により確認された劣化事象(図-3)について、その要因を究明するための現地調査及び非破壊検査の結果を整理したものである。なお、現地調査及び非破壊検査の内容並びに劣化要因の推定は、「中央自動車道PC橋補修・補強検討会(委員長 山梨大学 檜貝教授)」の検討結果を踏まえ、整理している。

表-1 現地調査結果の概要

項目	検討結果等
外観損傷	点検等により既に確認できている浮きの範囲と非破壊検査である「赤外線撮影法」による浮きの検知範囲とがほぼ一致
塩分量調査	床版下面より深さ約 120mmの位置にて最大 2.7 kg/m ³
中性化深さ	床版部で最大 15mm
表面硬度	48.8N/mm ² (設計基準強度 35N/mm ²)
グラウト充填	床版連結ケーブルで 11本の未充填を確認



図-3 既設コンクリート床版の損傷

(3) 既設床版劣化状況

図-4は、既設床版に確認された「PC鋼材」を繋ぐように発生している水平ひび割れの状況写真である。シーズ部に見られた水平ひび割れについては特異な事例であり、その発生原因について分析を行った。



図-4 既設床版に発生した水平ひび割れ

a) 輪荷重による位置との関係性

桁間の床版厚が 190 mm と薄く、輪荷重による影響が推察されたが、図-5に示す通り、大型車の輪荷重位置とシーズ部のひび割れ位置との関係は一致しておらず、輪荷重が直接の原因とは言えない。これは、輪荷重が載下されない G3-G4 桁間や張出床版でも、シーズ部の水平ひび割れが見られることから裏付けられる。

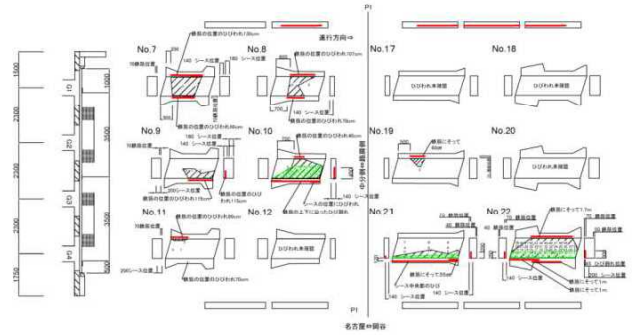


図-5 既設コンクリート床版の劣化展開図

b) 鉄筋の爆裂の位置との関係性

PC鋼材の場合と同様、鉄筋の爆裂による水平ひび割れが確認されているが、当該水平ひび割れは上側鉄筋に限定されており、シーズ部のような深層部まで及んではおらず、鉄筋の爆裂による水平ひび割れとシーズ部での水平ひび割れは独立したものと考えられる。

c) ASR との関係性

伊北 IC 付近においては、他橋梁で ASR の報告がされており、沢底川橋においても既設床版の一部から ASR とと思われる骨材周りの白い生成物が発見された。試料採取の上、ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断を行ったが、図-6に示す通り、当該ひび割れの原因になるような、顕著な反応を示さなかった。



図-6 ASR 簡易診断の結果

d) 凍結との関係性

図-7には、辰野観測局の昨シーズン厳冬期(2015年12月から2016年3月末)の気温及び路温(橋面)のデータを示す。辰野観測局では、当該期間中の最低気温は-14.1℃、最低路温は-12.0℃であり、氷点下を記録した合計日数は気温で100日、路温で88日であった。

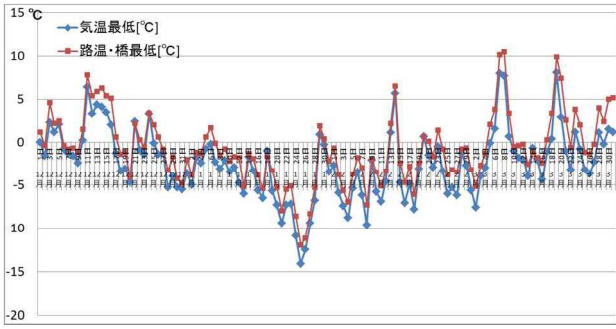


図-7 昨シーズン厳冬の気温・路温

過去 2011 年に実施した調査の結果から、上り線 P2 の G2-G3 桁間においてシース内部からの漏水、ケーブルの腐食が確認されている。当該漏水箇所については、撤去床板の調査結果からも、シース部の水平ひび割れが確認されている。また、上下線ともに床版連結ケーブルは建設当時からシース内のグラウトが不足していることが確認された。さらに、過年度調査（2011年実施）ではシース内の滞水も確認されている。これより、グラウト不足であるシース内は、水が侵入し滞水しやすい環境であったことが考えられる。

よって、水が凍結して氷になった場合、体積は約 9% 膨張し、凍結膨張圧は約 100MPa となる。とりわけ、円形シース内に水が充填された状態で水が凍結した場合、図-8 に示すように凍結膨張圧に伴う引張応力がコンクリートに発生し、コンクリートの引張強度以上に達するとひび割れが生じることが考えられる。凍結膨張圧は、円形の冷凍管を使用することで、実際に、コンクリート構造物の破碎技術¹⁾ に活用されており、当該橋梁ではグラウト不足のシース内に雨水等の水が充填され、この水が凍結膨張圧を発生させたことによって、水平ひび割れの原因になったと推察できる。

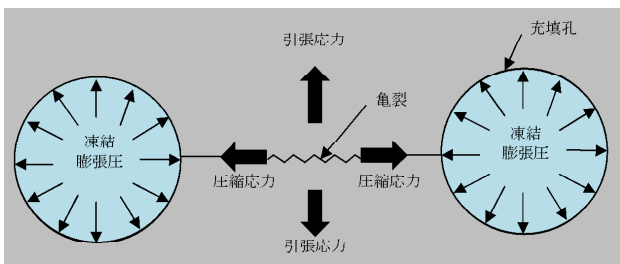


図-8 応力発生概念図¹⁾

以上の損傷原因の考察のまとめとして、シース部に見られた水平ひび割れについては、グラウト不足で空洞があるシース内に、雨水等が侵入し滞水した状態で凍結膨張したことが最も有力な原因であると考えた。このとき、輪荷重による影響、鉄筋の爆裂による影響、その他 ASR による影響については、水平ひび割れ発生への寄与は小さいものと考えた。

3. 補強対策の計画及び工事の実施

(1) 補強対策の検討

補強対策検討では、建設時の施工を加味した復元設計を実施し、対策工法の選定を行った。また、詳細調査による一次床版劣化状況や PC ケーブルグラウト充填状況などを加味した結果、部分的な断面修復工などによる対策工では長期安全性が確保できないと判断し、大規模な補強対策工法による比較検討を実施した。その結果、補強工法は外ケーブル工法とし、劣化の著しい一次床版の全撤去再設置及び桁端部の主桁を含む劣化コンクリート部分打換工を併用する施工方法を採用した。（表-2 参照）なお、建設時の連続合成桁橋における一般的な施工手順について、図-9 に示す。

表-2 補強工法の比較

	外ケーブル工法	連続繊維補強工法	鋼板補強工法
長所	<ul style="list-style-type: none"> 実績が多い 補強対象が明確である 維持管理が容易 	<ul style="list-style-type: none"> 連続繊維が軽量であり施工が容易 塩害環境に適している 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的安価
短所	<ul style="list-style-type: none"> 定着体付近の応力カックが必要 PCケーブルの防錆が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 実績が少ない 中間支点上負荷の補強ができない 繊維でコートの劣化が見えなくなる 剥離の可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 実績が少ない 中間支点上負荷の補強ができない 鋼材でコートの劣化が見えなくなる 剥離の可能性がある 鋼材の防錆が必要 施工が比較的煩雑
工費	○	△	◎
判定	◎	○	△

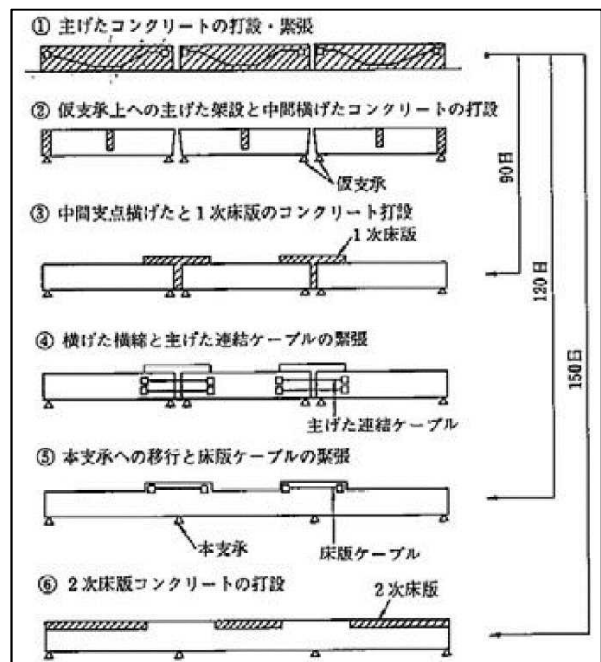


図-9 連続合成桁の施工手順

(2) 補強工事の実施

当該補強工事の区間は、朝夕の時間交通量が約 2,000 台であり、車線規制に伴う渋滞が発生しお客様に対する走行安全性及びサービスレベルの低下が懸念される。そこで、工事の実施に当たっては、施工期間の短縮を念頭に入れた計画を立案した。また、交通安全性の観点から、高速道路本線の規制帯から材料等搬入出を極力させない施工計画とした。図-10 に施工ステップを明記する。

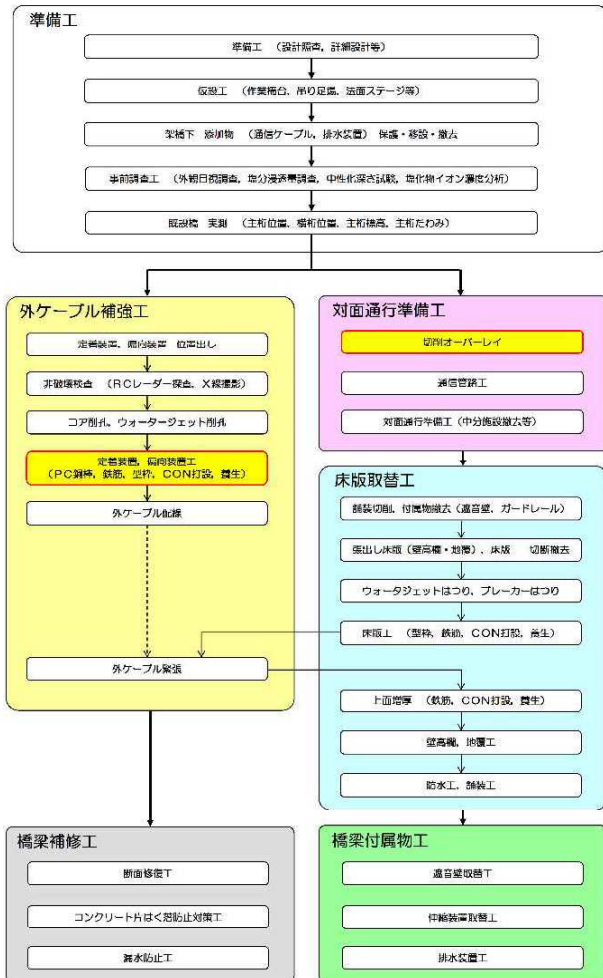


図-10 補強対策の全体施工手順

4. 更なる安全性の追求

(1) PC外ケーブル補強の安全性検証

PC 外ケーブル補強工法における更なる安全性の追求として、構造系全体の応力状態のみならず、局部的な応力集中に着目した FEM 解析を実施した。FEM 解析では、既設 PC 桁への合理的なプレストレス配分を目的とし、PC 外ケーブル定着部並びに偏向部の応力配分を念頭に置いたメッシュ配置としている。また、応力メッシュ図は、外ケーブル補強工で最も重要な部位である既設

PC 桁への定着突起部における荷重条件を把握し作成した。図-11 は、定着部及び偏向部の橋軸方向応力図の結果を示したものである。

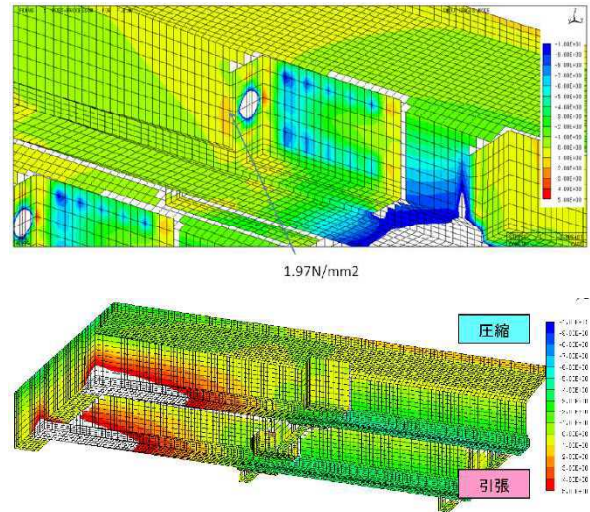


図-11 FEM解析の結果

解析の結果、当初設計検討で予定していた定着構造（桁端部定着 1 突起）を定着構造（桁端部定着 2 突起）に変更することで、合理的なプレストレス配分ができ、更なる安全性（安定性）向上が図れた。なお、外ケーブル工法における定着部及び偏向部の細部断面を図-12 示す。

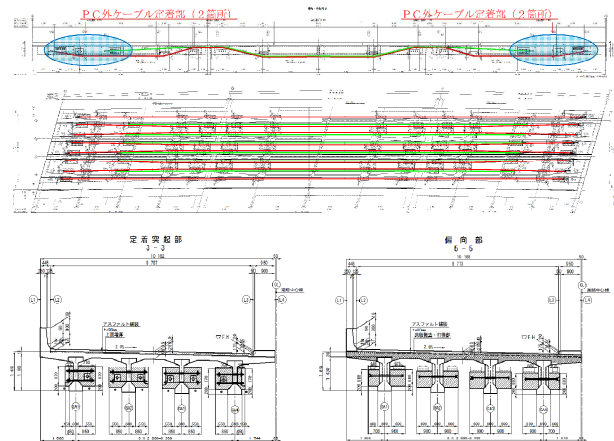


図-12 PC 上部工の補強構造図

(2) 交通運用上の安全性向上

供用中の高速道路におけるリニューアル工事の実施では、交通規制による渋滞が起因した事故発生に対し、情報提供のあり方に着目した更なる安全性向上を実施している。例えば、「Bluetooth を活用した渋滞情報提供」（図-13 参照）では、リアルタイムで通過時間を提供することで走行安全性及び信頼性（定時性の確保）向上が実現できた。また、工事規制形態の工夫や事前に広域的な工事 PR 活動を実施することにより、本線交通の円滑

化や一般道への迂回効果が発揮され、結果、工事中における社会的影響の低減が図れた。

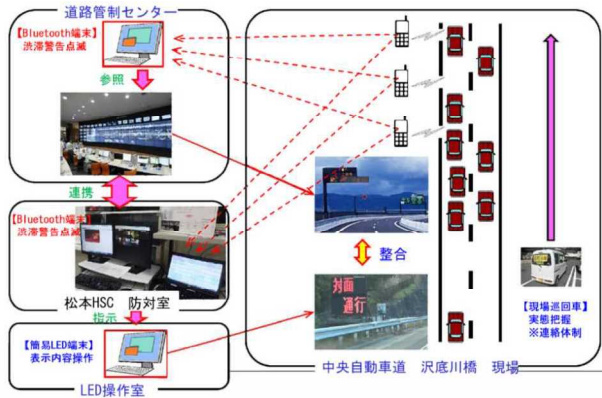


図-13 Bluetoothを活用した渋滞情報提供の概念図

5. 今後の課題

凍結防止剤の影響に伴う劣化因子（塩化物イオン）の侵入に対しては、コンクリート断面の緻密化を図ることが求められる一方、床版防水工のハイグレード化や止水対策工、遮蔽性向上対策など、フェールセーフ的な発想が求められる。また、建設時の懸案である「PC グラウト充填」に対する課題も浮き彫りとなっている。そこで、今後の課題として、PC グラウト再注入工法の確立が求められると考えられる。財団法人プレストレストコンクリート技術協会「コンクリート構造診断技術」及び「既設ポストテンション橋のPC 鋼材調査および補修・補強指針」では、PC グラウトの再注入工法が明記されており、リニューアルプロジェクトの参考としていく。

図-14 に真空ポンプを用いたグラウト再注入工法の概念図を示す。

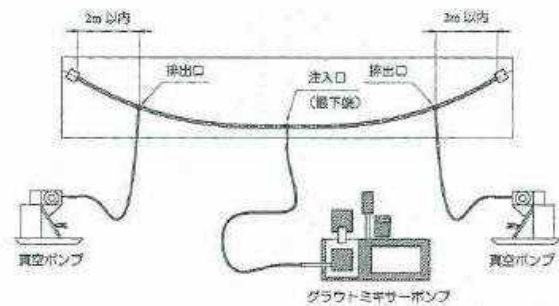


図-14 PC グラウトの再注入概念図²⁾

6. まとめ

リニューアルプロジェクトの展開及び円滑な推進には、「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討報告書」を参考に、リニューアルプロジェクト実施に伴う課題に着目し、解決策を検討する必要がある。

表-3 は、課題及び解決策の提案である。

表-3 リニューアルプロジェクトの課題と解決策

課題	解決策 (案)
社会的な理解を得るための説明責任	必要な情報を正確かつ判りやすく広く社会に説明していく ⇒ 定期的に事業計画や進捗など情報を発信する
国、地方公共団体等との連携	工事渋滞などの影響を予め情報共有し連携強化を図っていく ⇒ 地域イベント（観光産業）の情報収集を行い工事時期の調整を図る
社会的影響への配慮	工事渋滞や交通事故の影響を低減させる方策を検討していく ⇒ 広域的なPR活動や安全啓発活動を通じて渋滞緩和や走行安全性の構造を図っていく
円滑な事業推進	事業実施の体制及び業務システム強化を検討していく ⇒ 人材確保、人材育成及び技術者評価制度の確立を図っていく

また、今後ますます高齢化が進んでいく道路資産を合理的かつ効率的に維持管理していくためには、構造物の点検合理化を図り、メリハリのある補修・補強計画と立案していく必要がある。そのためには、道路資産の長期保全のあり方や道路資産アセットマネジメントの導入など、国際的な知見を導入していく必要がある。また、建設ストックの時代から維持補修の時代へシフトしていく中において、より一層の技術知見やノウハウが必要であり、そのための技術伝承について検討していくことが求められる。また、長期的な事業の検証では、定期的な方向性を確認（チェック）し、事業効果のPDCAサイクル実践のための手法を検討していくことが必要である。

参考文献

- 1) 鈴木信也ほか：水の凍結圧力を利用したコンクリート構造物の破砕技術に関する研究，技術研究報告第 41 号，2015. 10
- 2) コンクリート構造診断技術：公益社団法人プレストレストコンクリート工学会

ダム防災情報のリアルタイム公表について

堀内 崇志³・白井 岳之¹・立野祐輔⁴・中川 泰成²・上出 明莉¹

¹北陸地方整備局 河川部 河川管理課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1)

²北陸地方整備局 河川部 河川計画課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1)

³北陸地方整備局 金沢河川国道事務所 調査第一課 (〒920-8648 金沢市西念4-23-5)

⁴北陸地方整備局 阿賀川河川事務所 工務課 (〒965-8567 会津若松市表町2-70)

ダム防災情報提供システムは、洪水調節の状況や下流基準点等での水位低減効果について、インターネットを通じて、広く一般に分かりやすく情報提供を行うとともに、迅速かつ適切な防災情報の公開を行うシステムとして2015年6月より運用を開始した。

本論文は、システムの開発にあたっての留意点や、閲覧状況等を踏まえた評価分析及び更なる改良について、ここにとりまとめ報告するものである。

なお、本システムは、下流基準点における水位低減効果量をリアルタイムで公表する本邦初の取り組みである。

キーワード 洪水調節, リアルタイム, 水位低減量, 評価分析, 改善

1. はじめに

治水ダムは、洪水時に洪水の一部を貯め込み、下流河川に流す水量を低減させ、下流河川の水位を低下させることにより、水害の防止・軽減に貢献している。

しかし、洪水調節による水量の低減効果が分かりにくいことから、ダムの放流により下流河川の水位が上昇した等の誤解による論調等も生じている。

このため、誤解を招かないよう、ダムによる下流河川における水位の低減量を分かりやすく、迅速かつ適切な防災情報の公開を行うシステムとして、2015年6月よりリアルタイム公表を開始した。

公開から1年を経て、システムの開発にあたっての留意点や、閲覧状況等の公表結果を踏まえた、評価分析及び更なる改良について、ここにとりまとめ報告する。

わからない) ③ダム放流により被害が発生・拡大した(異常洪水時防災操作や後期放流への理解がない)等が考えられ、ダムの洪水調節操作の正しい理解が必要である。

(2) システム開発の経緯

誤解を招かないためには、ダムの水位低減効果を速やかに公表し、理解を得る必要があることから、平成25年度より洪水調節中に公表する取り組みを実施してきた。

公表にあたっては、ダムの流入量、放流量等の情報に加え、下流河川の水位の低減量を洪水調節中に分かりやすく公表することとし、必要なデータや様式等をあらかじめ準備し対応した。しかし、資料作成から公表までには、タイムラグがあり、ダム管理者等が持つ防災情報を住民に役立つように、迅速に情報提供を行っていくことが課題となっていた。

2. 洪水調節効果公表の課題

(1) ダム放流への誤解

近年、洪水調節を行ったダムは、速やかにダム流入量・放流量等の情報の公表等を行ってきたが、ダム放流への誤解による「浸水被害はダムの操作が原因」、「ダムの放流により下流河川の水位が上昇した」等の批判報道やTwitter等の発信が相次いでいる。

誤解の原因として、①ダムからの放流量が増えている(流入量以上の放流をしていない) ②ダムからの放流により下流河川水位が上昇した(ダムの水位低減効果が伝

図1 一記者発表事例



3. ダム防災情報提供システムの構築

(1) 目的

2. の課題解決のため、ダムによる下流河川の水位の低減量について、一般の方に分かりやすく、かつ、リアルタイムで公表するシステムの構築を行うこととした。

構築にあたっては、ダム管理者等が持つ防災情報をより住民に役立つ防災サイトとなるように配慮した。

閲覧できる情報

- ・洪水時のダム上流域の降雨状況
- ・貯水位、流入量、放流量、調節量
- ・ダム下流河川の水位低減効果量
- ・ダムや下流河川に設置したカメラ映像 等

(2) 情報提供地点の決定

ダムの洪水調節効果は、一般の方に分かりやすい表現方法として、水位・流量の低下量で評価することとした。

しかし、河道の貯留効果や支川合流により、特定のダムの調節効果が水位低下量として明確に発現する区間は、ダム直下流の一定区間に限られるため、洪水データの検討及び主要洪水の抽出を行い、以下の項目を整理・検討し、水系基準点や主要地点、水位観測地点などから情報提供地点を決定した。

- ・実績放流量による情報提供地点までの洪水到達時間
- ・実績の洪水到達時間を考慮したダム調節による水位低下の確認
- ・水位低下量による情報提供地点としての適否・妥当性の検討

(3) 洪水到達時間の検討

ダム調節効果を評価するにあたっての洪水到達時間は、流量に応じた到達時間の変化をできるだけ適切に評価する方法として、システム内で不定流計算を行うなど逐一演算する方法もあるが、以下の課題が大きい。

- ・演算機能の導入によりシステムの規模が肥大化する。
- ・対象河川の殆どが急流河川であり、洪水時は射流が発生し、不定流計算の精度確保、安定稼働の面で懸念が残る。

このため、事前に不等流計算を実施し、流量と流速の相関関係を求め、流速と流路延長をもとに流量と到達時間の関係を導き出すこととし、実績洪水や一般的な到達時間算定式（角屋式、クラーク式）と比較し妥当性を確認した。

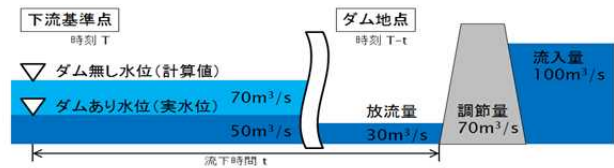
(4) 洪水調節効果の縦断的な変化状況の検討

情報提供地点におけるダム効果は、ダムによる洪水調節量がそのまま基準点まで到達するものとして評価した。

これは、洪水時の不定流特性について、三国川ダムを代表ダムとして不定流計算を実施し、流量低減や到達時間遅れの状況を算定して、洪水調節効果の伝播状況を評価した結果、情報提供地点までの間に規模の大きい支川合流が無い場合には、洪水調節量がそのまま情報提供地点まで到達するものとして評価することにより概ね実態を表現できると判断したものである。

図2 一水位低減量算定の考え方

- ・水位低減量 = ダム無し水位 - ダムあり水位
(計算値) (実水位)
- ・下流基準点のH-Q式を用いて、ダム無し流量からダム無し水位を算定
ダム無し流量 = 実流量 + 流下時間を考慮した調節量



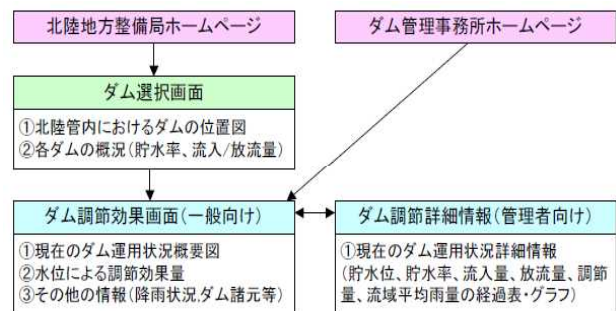
(5) サイト構造・コンテンツデザイン等

サイト構造は、ダム選択画面からダムを選択し、ダム調節効果画面に遷移するという構造とし、ダム選択画面は何れのダムが洪水体制に入っているかを判別できるコンテンツとした。

さらに、河川管理者や防災管理者がダムの運行状況を確認する標準的な情報コンテンツ（ダム流域平均雨量ハイエトグラフ、放流量・流入量・貯水率）として、ダム調節詳細画面を提供し、ダム調節効果画面から遷移できるようにした。

また、各ダム管理所のホームページから直接状況を確認しようとする利用者を想定し、各ダムの調節効果画面はURLの直指定でも閲覧できるものとし、各ダム管理所のホームページにダム選択後の詳細画面のリンクが配置できるようにした。

図3 システムのサイト構造



a) 閲覧方法

閲覧方法は、検索エンジンより「ダム防災」で検索（<http://www.hrr.mlit.go.jp/river/dam-bousai/>）、または、国土交通省水管理・国土保全局の「ダム」及び北陸地方整備局の「河川」及び各事務所のページのリンク先から閲覧を可能とした。

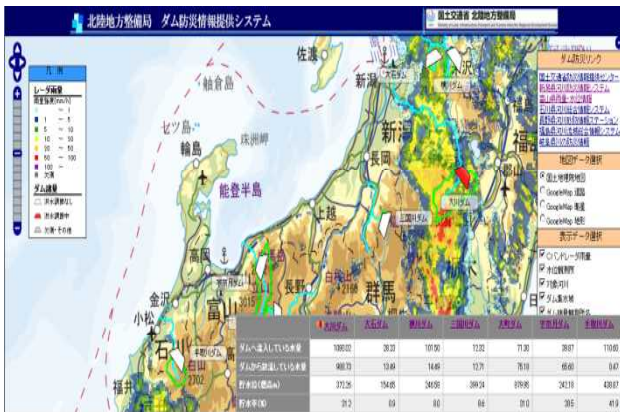
b) トップページ構成

トップページは、背景地図の種類に国土地理院地図、GoogleMap（道路・衛星・地形）から選択できるようにし、Cバンドレーダ雨量、対象河川、ダム集水域を重ね合わせて表示した。

項目は上から「ダム諸量観測所名」、「全流入量(m³/s)」、「全放流量(m³/s)」、「貯水率(%)」となり、ダム諸量観測所名をクリックすることで当該ダムの個別画面を表示する。

全流入量が洪水開始調節流量を超えているダムについては、ダム名の左にランプの画像が表示され、情報提供を行わない観測所については、「ダム諸量観測所名（調節中）」と表示され、個別画面へのリンクはなくなるようにした。

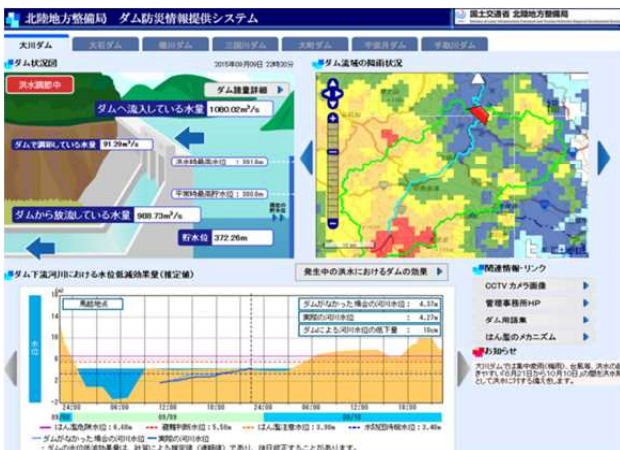
図4—トップページ（初期表示）



c) ダム毎のページ構成

ダム現況図を表示し、洪水が発生しているとき、「通常操作中」の文字は「洪水調節中」に変化し、背景画像が赤色になり、また、全流入量、全放流量の下部にある矢印は、それぞれの流量に応じて大きさが変化するようにした。

図5—個別ダム（洪水調節中）

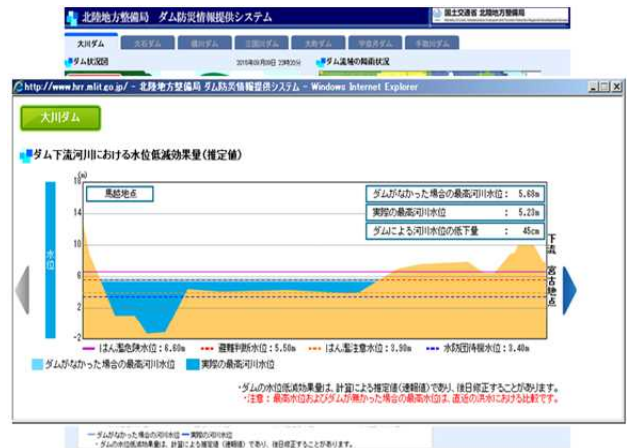


洪水調節時に「発生中の洪水におけるダムの効果」のバナーが表示され、クリックすることでダム効果量画面（発生中の洪水における最大限の低減量時）をポップアップで表示する。

なお、各ダムごとに指定した期間の間に洪水が発生し

ている場合にのみこのリンクは表示される。

図6—個別ダム（ダム効果量画面）
※ポップアップ画面



4. ダム防災情報提供システムの運用・評価分析

(1) アクセス数の推移

各月のアクセス推移は、公表を記者発表した2015年6月は約半月13日間で約3,000ものアクセスがあったが、洪水がなかった各月は約2,000アクセスで推移している。

関東・東北豪雨のあった2015年9月には大川ダム（阿賀川）が洪水調節を行ったこともあり、通常時の約2.5倍の約5,000アクセスに増加している。

また、同月の日別の数値を見ると、一日平均92アクセスの数値に対し、10日には1,159アクセスと10倍以上の数値を示しており、洪水調節時における関心の高さが見て取れる。

図7—月別アクセス数

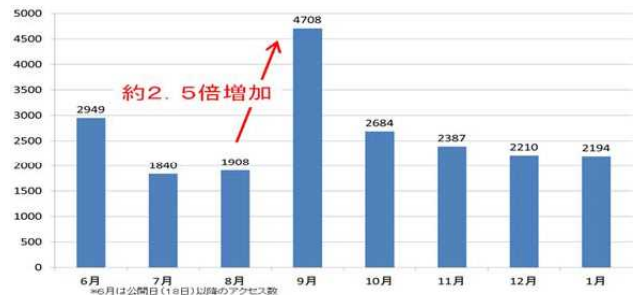
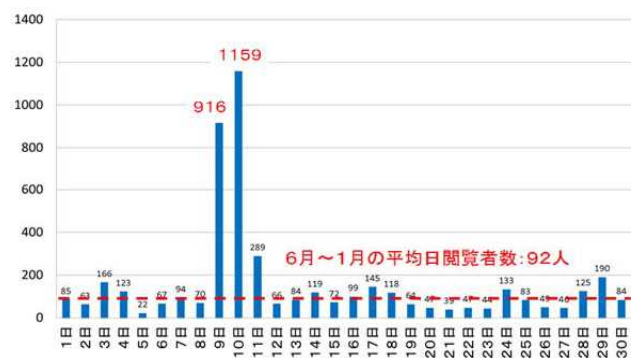


図8—2015年9月のアクセス数



(2) ダムマニアからの評価

2015年6月17日に記者発表した翌日のTwitterにおいて、ダムマニアの皆様より「ダム防災情報提供システムこれだよこれ！このシステムが欲しかったんだよ！！全国でやって欲しい！！！！」やシステムの紹介等の情報発信をいただき、また、ダムマニアの皆さんが運営するホームページへのリンクやソーシャルブックマークへの登録をいただいている。

ダム防災情報提供システムは、ダムの水位低減効果量をリアルタイムで公表する本邦初のシステムであり、関心の高さが伺える。

5. ダム防災情報提供システムの改善

(1) システムの更なる改善

公開から約1年の出水期運用を経て、ダム概況図画面等をより見やすく、正確に分かりやすくする改善を実施した。

トップ画面については、表示の状況がいつ更新したのか分からないため現在時刻表示機能の追加、正確性を向上させるためシステム全体の運用状況を示すことができるお知らせを表示する機能を追加、治水利水別の貯水状況が分からないため、利水容量と治水容量のそれぞれに対する貯水率を表示する改善を行った。

図9—トップ画面の改善



個別ダム画面については、治水利水の機能を明確にするため、ダムから放流している水量と発電取水量を分けて表示する改善を行った。また、表示内容を分かりやすくするため、ダム周辺地図の凡例追加として、地図上にレーダ雨量・集水域・河川の凡例を表示する改善を行った。さらに、お知らせ機能の改善を行った。

一洪水におけるダムの最大調節効果については、当初のシステムでは、ダムがなかった場合の河川水位と実際の河川水位それぞれの最高水位を基に表示していた。

図10—個別ダム画面の改善



改善後は、ダム地点の流入量が最大となった時の調節量を基準に、その調節効果が情報提供地点に到達する時刻の河川水位とその時刻にダムがなかった場合の河川水位により表示することとし、支川等の影響を排除して、ダムの調節効果をよりの確に表現するものに変更した。

6. 今後の課題と展望

ダム管理者が「分かりやすく情報を発信する」というテーマに取り組み、リアルタイム公表から約1年の出水期の運用を経て、有識者、ダム管理の現場担当者や諸先輩等からご意見をいただき、主に見やすさや正確性の向上、維持メンテナンスの操作性等の改善を行った。

昨年の関東・東北豪雨では、インターネット上でも鬼怒川の4ダムの洪水調節に注目が集まったが、いまだにダム放流への誤解による誤った情報発信も散見された。

誤った情報が発信されないように、ダムは洪水に対して「何をしたのか」、「その効果は、どうだったのか」、「提供した防災情報をどう役立てていくのか。」をよりの確に表現していく必要がある。

このため「分かりやすい情報の発信」として、求められる情報を分析し、ハイドロ・ハイトグラフの組み合わせ、流域の水防警報や洪水予報文へのリンク、難解な用語の説明、ダム諸元の追加等を検討していきたい。

また、防災情報は、単独の情報ではなく、他情報との連携により効果的な情報となることやリンクの拡大になることから、全国の直轄ダム、補助ダム、利水ダム等との連携した防災情報等への発展も考慮していきたい。

今後とも、ダム管理者等が持つ防災情報をより流域住民の皆様役に役立つように地域防災への活用を考慮した防災サイトとなることに配慮し、防災情報リンクの充実や正確で見やすく分かりやすいシステム構築を心がけ、地域の安心安全に貢献できるようにしてまいります。

謝辞：本システムの設計、公開にあたりご指導ご助言をいただいた関係者の皆様に感謝の意を表します。

御嶽山噴火に伴う対応及び水質に関する影響

小野島 広大¹・坂野 和弘¹・石黒 勇次郎¹

¹水資源機構愛知用水総合管理所 牧尾管理所(〒397-0101 長野県木曾郡木曾町三岳7696-1)

御嶽山では、有史以来2度目となる大噴火が平成26年9月27日に発生した。

前回噴火時(1979年)の経験から、牧尾ダムの貯水池水質は、長期にわたり噴火の影響を受けることが予測されたため、愛知用水総合管理所として綿密な水質監視体制を構築し、関係自治体やユーザーに水質情報を提供するとともに、下流河川に対し可能な限り水質影響の軽減対策を講じることとした。この結果、現在までは特段の支障を来すことなく、ダムからの利水補給を継続している。

本稿では、こうした御嶽山噴火に伴う対応及び水質に関する影響について報告する。

キーワード：牧尾ダム、御嶽山、水質調査、火山噴火、濁度、PH

1. はじめに

(1) 御嶽山の噴火

御嶽山では、有史以来2度目となる大噴火が平成26年9月27日に発生した。

愛知用水の水瓶である牧尾ダムは御嶽山より南東約10km地点に位置し、主となる流入河川は王滝川である(図-1)。この王滝川の支流として伝上川、濁川があり、源流が御嶽山腹にあるため、発生した火山噴出物が河川内に降り積もり、これらの河川を通して牧尾ダム貯水池へ流れ込み、土砂堆積や、水質等に大きな影響を与えている。

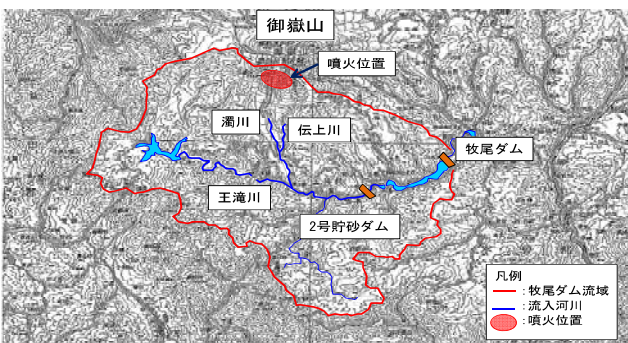


図-1 牧尾ダム位置図及び流域図

(2) 牧尾ダムの水運用

牧尾ダムの水運用は、12月1日から翌年3月31日を目途に発電利用により貯留水を全量使用し、4月1日から貯留

を開始し、5月以降は灌漑用水として使用するという特殊な運用となっている(図-2)。

下流への利水補給は、通常運用ではダム貯水池底層部(EL.826m)に設置された関西電力発電放流設備を用いて行っている。発電放流設備が使用出来ない場合は、牧尾ダムのEL.827mに設置された利水放流設備から放流を行うこととなっており、いずれの設備を使用しても、常時、底層放流となることに特徴がある。このため、水運用として貯水位が低下する冬期から春期にかけて、底層に堆積している火山噴出物が再懸濁化して、放流水質に悪影響を与えることが懸念された。

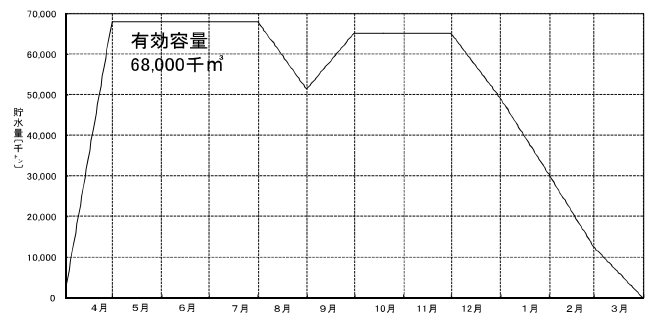


図-2 牧尾ダム貯水運用曲線

(3) 水資源機構としての対応

このような事態に対し、利水補給に影響を出さないために以下の対応を適時的確に行った。

a) 関係機関との情報共有・合意形成

各関係機関による水質監視体制の構築及び合意形成の場の設立

b) 貯水池内の状況把握

水質監視体制の構築，水質調査，貯水位低下時の水質予測及び堆積状況調査

c) ダム放流による下流への影響軽減

汚濁防止設備の設置及び試験放流の実施

d) 緊急対策工事

火山噴出物の貯水池内への流入軽減

また，上記対応に伴い，水運用に関係して時系列順に4つの想定される課題に対し，機構が所有している水質予測モデル(JWAモデル)の改良を行った上で以下の検討を行うことで，対策実施や運用に貢献した。

本稿では，これらの対応策について報告する。

表-1 牧尾ダムの濁水に係る課題とその対応の概要

時期	内 容
10～12月	① 循環期における貯水池の濁りの長期化 【課題】貯水池底層の濁水の巻き上げが懸念 【観測】出水時観測，現地鉛直観測 【実験】循環流動による巻き上げ影響実験 【予測】循環期の濁りを予測（拡散等モデル改良）
12月中旬	② 水位低下時における底部利水放流管の放流 【課題】汚濁防止フェンスの設置効果，試験放流時予測 【対応】汚濁防止フェンス：10mの設置 【観測】現地高濁度水標高の把握，鉛直観測継続 【実験】火山灰濁質流出実験，凝集沈殿剤試験 【予測】汚濁防止フェンス効果，試験放流時予測
1月～3月 4月～5月	③ 水位低下時の貯水池の濁り 【課題】どこまで水位を下げられるか 【観測】出水時観測，現地観測実施 【予測】水位低下毎の貯水池濁水予測（4ケース）
5月～ 8月頃	④ 夏期出水時における放流濁水の長期化 【課題】放流濁水の継続時間と水位との関係 【観測】出水時観測，現地観測実施 【予測】放流濁度のピークと継続時間と水位との関係

2. 関係機関との情報共有・合意形成

御嶽山の噴火を受け，10月28日に各関係機関が連携・協力し，水質監視体制や牧尾ダム貯水池の水質保全対策，下流河川への影響緩和策等を検討するため，国土交通省中部地方整備局，農林水産省東海農政局，経済産業省中部経済産業局，長野県，愛知県，岐阜県，三重県，名古屋市，関西電力，水資源機構中部支社をメンバーとする「御嶽山噴火に伴う木曽川上流域水質保全対策検討会」（以下「検討会」という）が設置された。この検討会により，御嶽山噴火に伴う牧尾ダム及び下流河川への影響を把握するための水質監視体制の確認，影響を緩和するための対策，牧尾ダムの試験放流計画等，今後のダム運用を含めた議論がなされるなど，関係者間の合意形成の場となった。

3. 水質調査

(1) 水質監視体制の構築

火山噴火以降，牧尾ダム貯水池では噴出物が大量に流入・堆積している状況が確認されている。（写真-1，2）このような状況下において，貯水池水質及び放流水質へ与える影響を把握するため，噴火の翌日より流入地点，貯水池地点，放流地点において（図-3），pHと濁度を中心に観測を開始し，関係機関への情報提供及びホームページでの公表を行うこととした。



写真-1 流入地点の火山噴出物堆積状況



写真-2 ダムサイトから上流6.4km地点の噴出物堆積状況

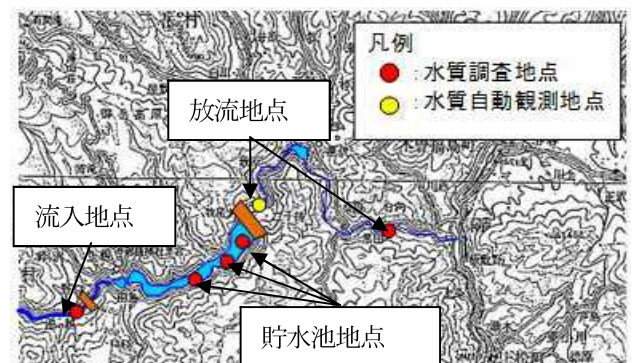


図-3 水質観測箇所位置図

(2) 水質観測結果

a) 濁度と粒度分布

流入河川の濁度は，通常，出水時に高くなり流量が減少すると濁度も低下するが，牧尾ダムでは，噴火直後の

2014年9月末から約2か月間にわたって、流入量の大小にかかわらず、数千度の高濁度水となっていた（図-4）。12月以降になると、出水時の濁度は例年に比べるとやや高い値を示すものの、平水時には数度～数十度まで低下した。

貯水池の濁度は、通常、数千度の濁水が長時間流入すると貯水池内全層が高濁度化するが、図-5に示すようにEL.827m～829mの貯水池底層付近のみで500度以上となっており、それよりも高位標高部は低い値となっていた。

また、通常、出水時に流入した高濁度の濁質は様々な粒度分布で構成されているため、上流に粗い粒子、ダムサイト付近に細かい粒子が堆積するが、牧尾ダムでは流入地点と貯水池底層の濁質粒度分布を比較すると、概ね同じ分布形状となっており分級が見られていない（図-6, 7）。

これらの理由は、濁水塊が1つの高密度な塊となり密度流として流入したため、貯水池内で拡散する濁質量が少ないことに起因しているものと考えられる。

一方、木曾川本川に位置する兼山地点の濁度は、噴火直後の2014年9月末から約2週間にわたって、流入量の大小にかかわらず、数百度の高濁度水となっていたが、それ以降は例年とほぼ同様の値まで低下した（図-4）。

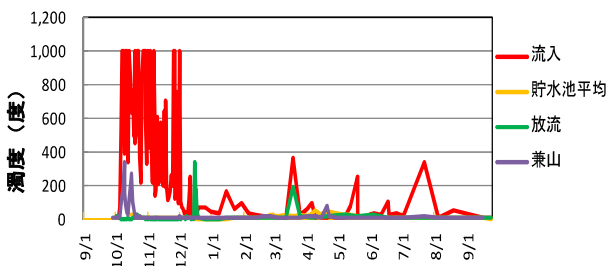


図-4 噴火後における濁度の変化（2014.9～2015.6）
（濁度1000以上は測定不可のため1000度で表示）

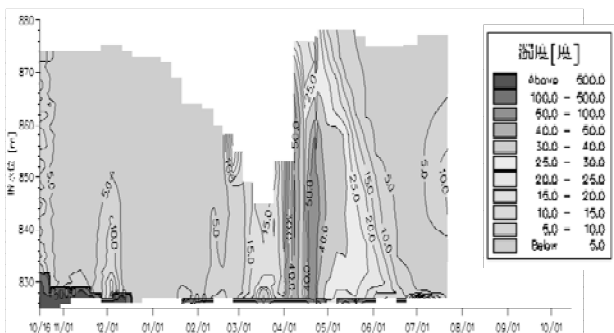


図-5 ダム貯水池の濁度鉛直時系列図（2014.10～2015.7）

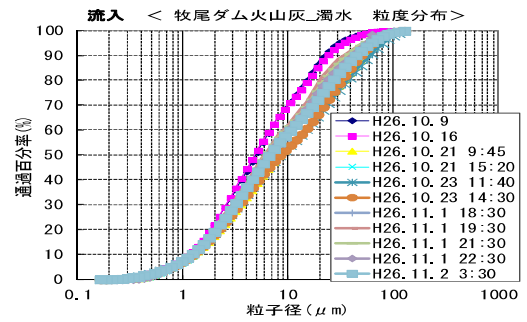


図-6 流入濁質の粒度分布

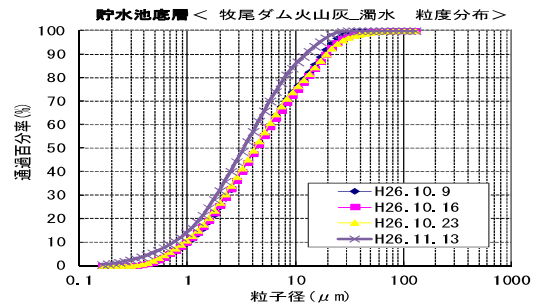


図-7 底層に滞留している濁質の粒度分布

b) pH

流入河川のpHは、濁度と同様に噴火直後の2014年9月末から約2か月間にわたって、流入量の大小にかかわらずpH4～6の間で推移していたが、12月以降になると、出水時のpHは例年に比べると低い値を示すものの平水時にはpH6～7まで上昇した（図-8）。

放流水のpHは、噴火直後の2014年9月末から約2か月間にわたってpH5～6となっていたが、12月以降になると、出水時のpHは例年に比べると低い値を示すものの平水時にはpH6～7まで上昇した。

一方、兼山地点のpHは、出水時も含めて例年とほぼ同様の値が継続しており、大きな変化が見られない。

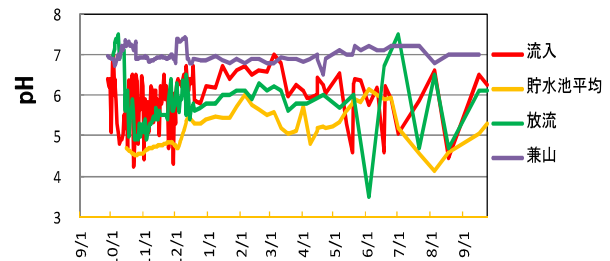


図-8 噴火後における濁度の変化（2014.9～2015.6）

4. 水質予測モデルの改良

(1) 予測モデル改良の必要性

牧尾ダムでは、火山噴出物の流入に伴い底層に高濁度水が滞留していることが判明したため、貯水池の濁りの

長期化予測および精度の高い放流濁度の予測が必要となった。

水質調査の結果、高濁度水が流入しているにもかかわらず、貯水池内濁度は数十度に収まっているなど（図-5）、通常の貯水池では見られないような特殊な現象が確認されていたため、水資源機構が所有している貯水池水質予測モデル（JWAモデル）を用いて、牧尾ダム貯水池で生じている濁水の挙動解析を実施した。

(2) 流入負荷量（L-Q式）の修正

流量が100m³/s以下の場合には表層の濁りへの影響が少ないこと、及び、洪水後には速やかに低減が見られることから、流入負荷量の修正及び同定を行った（図-9）。その結果、予測に用いた修正L-Q式は、実測から求めたL-Q式の約1/10のSS比負荷量となった。

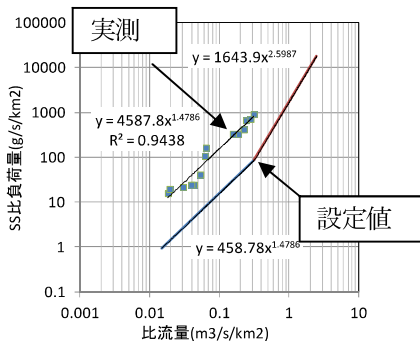


図-9 予測に用いた修正L-Q式と実測L-Q式との関係

(3) 再現結果

修正L-Q式を使用した再現結果を、図-10に示す。修正L-Q式を使用した場合は、平常時や出水時の貯水池の濁り状況、及び、水位低下時の濁度上昇とその後の低減状況が再現されている。

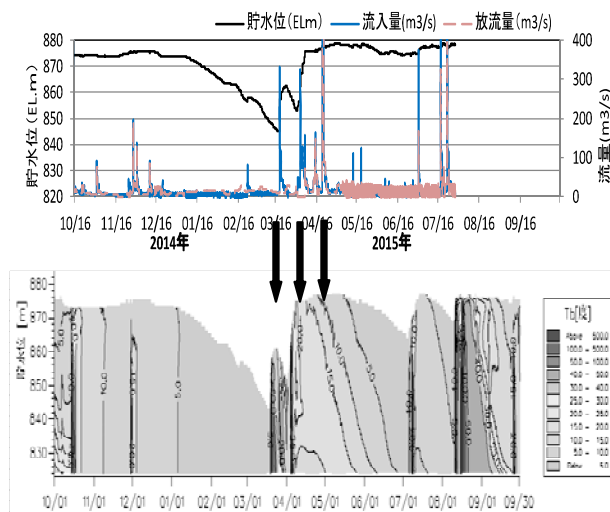


図-10 修正L-Q式を使用した濁度鉛直時系列図 (2014. 10~2015. 9)

5. 水質影響の軽減対策

(1) ダム放流による下流への影響軽減

前述したように牧尾ダムから下流への利水補給は、通常運用ではダム貯水池底層部（EL.826m）に設置された関西電力発電放流設備を用いて行っているが、2014年度下半期にかけて発電放流設備が改修中であったため、2015年3月までの放流はEL.827mに設置されている利水放流設備（最大流量30m³/s）を使用した。

この取水深は、牧尾ダム貯水池の最深部付近に堆積している火山灰土とほぼ同じ標高であるため、取水による流速で利水放流設備から下流へ流下することが懸念された。このような影響を軽減するため、利水放流設備の上流側に沈下式の汚濁防止フェンスを設置した（図-11・写真-3）。



写真-3 沈下式汚濁防止フェンス

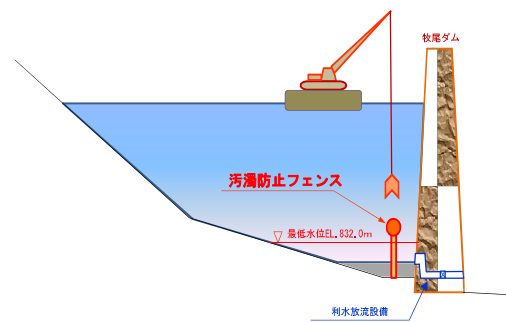


図-11 沈下式汚濁防止フェンス概念図

(2) 汚濁防止フェンスの効果

利水放流設備から放流される濁度の予測は、高濁度水の現地状況を踏まえて、高濁度層と低濁度層が2層に分類している状況を初期値とし、流動層厚を考慮して放流濁度を算出した。その結果、汚濁防止フェンスを設置すると、放流初期は一時的に放流濁度が高くなるものの、1~2時間程度で速やかに低減するという結果が得られたことから（図-12）、「検討会」での了承を得て試験放流を実施した。

試験放流は、下流河川への影響を確認しながら、利水放流設備からの放流を4m³/sから15m³/sまで徐々に増加

させた。なお、利水放流設備からの放流は、放流初期に高濁度になることが予測されていることから、余水吐ゲートから貯水池表層の水を希釈水として放流することとした。結果は、図-12に示すように、放流初期は直下流地点で最大900度となったが、時間とともに急速に低下傾向を示しており、予測結果とほぼ同様となっていた。また、汚濁防止フェンスの効果を算定するため汚濁防止フェンスなしのケースで予測計算を実施した結果、約1200度の放流濁度が長時間継続すると算出されたことから、沈水式の汚濁防止フェンスは所定の効果を発揮したものと考えている。

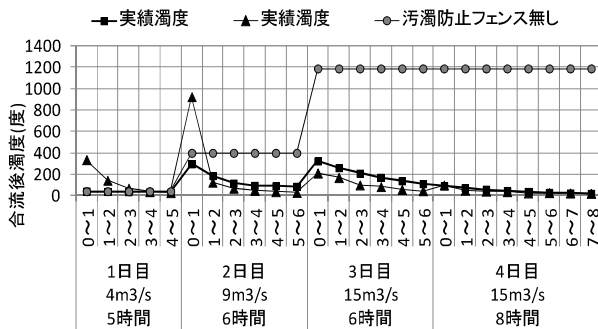


図-12 試験放流時の放流濁度（予測・実測）

(3) 貯砂ダム堆積土砂撤去工事

噴火により降灰した火山噴出物は、出水の度に牧尾ダム貯水池へ流入した（写真-1）。2014年10月に火山噴出物の堆積状況を調査した結果、牧尾ダム有効貯水域内及び死水域内に、それぞれ約24万m³、約43万m³の計算結果となった。このような火山噴出物の流入は、今後も大規模な出水が発生する度に発生し、特に冬期から春期の水位低下時には貯水池全体が濁水化して下流への放流に悪影響を及ぼすことが懸念されたため、貯水池への流入を軽減することを目的として、2014年10月から2015年3月にかけて約15000m³の堆積土砂撤去工事を行った（写真-4）。

また、関西電力では、貯水池底層に堆積した土砂が発電放流設備から流出することを防ぐ目的で、EL.827m～829mに角落しゲートを設置した。



写真-4 火山噴出物撤去状況（平成27年2月4日）

(4) 水位低下時の水質予測

1月から3月にかけての水位低下時において、出水により高濁度の水が流入すると貯水池が高濁化することが予測されるため、JWAモデルによる予測計算を実施した。予測計算にあたっては、火山灰による流入濁度は大部分が密度流として進入するため、流入負荷量（L-Q式）を図-9に示すように設定した。

予測計算は、3月末までに貯水池運用でどこまで水位を下げられるのかを検討するため、低下水位を3ケース（EL.846m, EL.855m, EL.863m）設定し放流SSの比較計算を行った。その結果、洪水を迎えた時の貯水位が低いほど放流SSのピークは高くなるが、その後の低減は早くなり、貯水位が高いほど放流SSのピークは低くなるがその後の低減は遅くなると予測された（図-13）。しかし、試験放流の結果から、放流水が下流河川に及ぼす影響はいずれのケースにおいても大きくないと判断されることから、「検討会」での了承を得て、発電取水で低下する貯水位に対しては特段の制限を設定しないこととした。

また、貯水位が最低となる2015年3月末前後の濁度鉛直分布の予測結果は、図-10に示すように、貯水池内の濁度は、4月初旬の洪水による影響で全層が数百度まで上昇するが、その後数日で50度まで低下しており、実測の濁度鉛直分布（図-5）とほぼ同様の結果となっている。

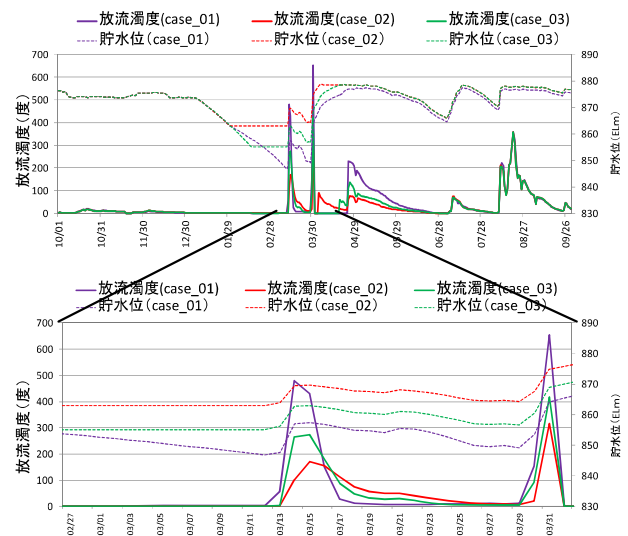


図-13 水位低下時の放流濁度予測結果

6. 今後の課題

噴火後1年半を経過した現在において、流入水の濁度は出水時にはやや高くなるものの平水時は安定しているため、今後も大きな影響を及ぼす可能性は小さいものと考えられる。しかし、流入水のpHは、出水時にはpH4程度まで低下する場合があります。貯水池内、特に底層部の

pHが低下して、出水時および出水後の放流水がpH4～5程度になる場合がある。

このような場合、ダム下流、特に水道取水地点での影響を軽減する観点から、上層からのゲート放流と下層からの放流を併用した放流や、他ダムからの希釈放流の検討も行っている。

このような低pHの放流は、1979年噴火時において5年程度継続していることから（図-14）、今後も長期にわたって継続すると予測されるため、長期的な視点でモニタリングを実施する必要がある。

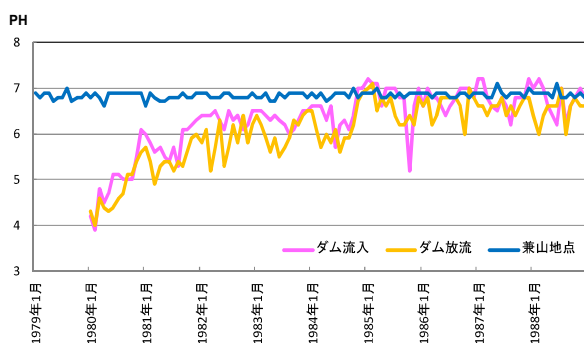


図-14 昭和54年噴火時のpH観測結果

また平成28年3月には、ダムの水位低下に伴い、貯水池内底部に堆積した堆積物が流水に浸食されてダム堤体近くに流れ込む状況も確認されており（写真-5）、貯水池内の濁度上昇、pH低下につながるともに、取水工付近の高濁度層が上昇した。今後もダム運用による貯水位低下の度に、堆積物の浸食によって水質が悪化する傾向が数年間継続するおそれがある。こうした堆積物の抜本的な除去対策も今後の大きな課題となっている。



写真-5 貯水池堆積物浸食状況(平成28年3月)

7. あとがき

今回の噴火後における初期対応、貯水池への影響把握が適切に行われたため、各関係機関との連絡・調整も滞りなく行うことが出来た。また、火山灰による濁水の予測についても、現地観測結果を反映した予測を行ったことで精度の高い予測が可能となり、現地における各課題への対応の検討及び実施に適時反映できた。

噴火は自然災害であり、上流に位置する機構や他機関のダムだけでなく、その下流の河川環境や河川水を利用する利水者を含めて木曾川全体に亘って影響を及ぼすこととなる。また過去の事例を参考にすると、噴火の影響は今後5年から10年の間発生する可能性があるとして予測され、長期的な対応が必要と考えられる。このため、噴火に伴って必要となるさまざまな対応については、ダム施設の管理者のみならず、河川管理者や平常時において木曾川によって利益を受けている関係者で公平に分担して対応していくシステムを構築していく必要がある。

今回の御嶽山の噴火対応は、近年多発する自然災害における初期対応として貴重な経験となった。また、噴火により得られた各種データは、火山噴出物がダム湖へ流入するという特異な状況であるが、全国的にも貴重なデータが蓄積されていると考えられる。今後も継続して観測と分析を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 東京大学地震研究所 気象庁130回火山予知連絡会
- 2) 防災科学研究所 気象庁130回火山予知連絡会
- 3) 御嶽山降灰合同調査班 気象庁130回火山予知連絡会
- 4) 1979年御嶽山噴火による災害 科学技術庁
- 5) 産業技術総合研究所 気象庁130回火山予知連絡会

平成28年熊本地震 TEC-FORCE被災状況調査班の記録

高橋 玲仁¹・南竹 知己¹

¹九州地方整備局 企画部 情報通信技術課 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東2丁目10番7号)

平成28年4月に発生した「平成28年熊本地震」では震度7を2度観測し、熊本・大分地方を中心に未曾有の被害が発生した。この地震災害に対して、国土交通省TEC-FORCE被災状況調査班は、衛星通信車等を派遣し情報収集に努めていたが、現地で再び発生した震度7の地震により機材及び隊員が被災した。本発表はこれらの状況下で活動を実施した隊員の行動を時系列に整理し、そこから得られた知見についてとりまとめたものである。また、今回の災害で活用した無人航空機（ドローン）についても報告する。

キーワード 熊本地震・災害対応, TEC-FORCE, ウェアラブルカメラ, 公共BB, ドローン

1. はじめに

平成28年4月14日（木）21時26分、熊本地方を震源とするマグニチュード6.5、最大震度7の地震が発生した。その28時間後の4月16日（土）01時25分には、さらに規模の大きいマグニチュード7.3、最大震度7の地震が発生し、熊本県、大分県を中心に大きな被害が発生した。これらの災害に対して、九州地方整備局では、直ちにTEC-FORCE（国土交通省緊急災害派遣隊）を被災地に派遣し、災害対応にあたった。



写真-1 被災直後の九州災害対策本部(14日)

(1)前震発生から本震まで

4月14日（木）21時26分[本震28時間前]
熊本地方で震度7

4月14日（木）22時45分
第7管区及び第10管区海上保安本部へり離陸
九州地方整備局へりテレ基地局により映像受信

4月15日（金）00時02分
衛星通信車、九州技術事務所より出動

4月15日（金）01時45分[本震24時間前]
衛星通信車、益城町役場到着



写真-2 グランメッセ熊本に展開した衛星通信車

情報通信班は、直ちに衛星通信車等を益城町の3箇所（国道443号被災現場、役場庁舎、グランメッセ熊本）に派遣し、災害対策本部や関係機関へ向けて被災状況を伝送した。被災状況調査では、TEC-FORCE隊員のヘルメットに装着したウェア

2. TEC-FORCE被災状況調査班の活動状況

ラブルカメラを活用して調査・記録を実施した。



写真-3 ウェアラブルカメラで撮影した
益城町役場庁舎内の被災状況

4月15日(金)21時00分[本震4時間前]
被災状況調査班、熊本市内の宿に帰還

(2)震度7(本震)発生、夜明けまで

4月16日(土)01時25分 震度7発生

突然、携帯電話の緊急速報メールが鳴ると同時に揺れが始まった。また余震かと思ったが、次第に揺れが強くなり、ベッドが前後左右上下に激しく揺れ始め、部屋中を動き回って、壁にぶつかるような状態となった。建物が倒壊するかもしれないと思ったが、ベッドと壁に挟まれる恐れもあったので、身動きが取れなかった。揺れた時間はとても長く感じ2～3分は揺れていたような気がするが、実際は短い時間だったのかもしれない。停電となったが、災害時優先指定の公用携帯電話は通話可能で、災害対策本部(九州本局)に状況の一報を入れることが出来た。



写真-4 宿泊した部屋の壁に入ったクラック

現地対策本部が設置されたグランメッセ熊本に向かうため部屋を出た直後、「倒壊の恐れがあるのですぐ建物の外に出て」と従業員に言われた。停電して開かない駐車場の電動ゲートをなんとか手で開けて車を出すと、熊本市内では多くの人が建物の倒壊を

恐れて屋外に避難しており、ガラスが散乱している箇所や信号機が稼働していない交差点、道路に段差や地割れが出来た箇所が複数見受けられた。



写真-5 益城町付近の被災状況(16日本震直後)

ラジオでは、今までの余震とは規模が異なっており、阿蘇大橋や俵山トンネルで被害が出ている事が報道されていた。移動中、益城町に近づくにつれ建物や道路の被害が酷くなっていることが確認出来た。また、衛星通信車が損傷したとの一報が入っていた。

4月16日(土)02時45分[本震1時間後]
グランメッセ熊本に到着



写真-6 グランメッセ熊本の避難状況(16日本震直後)

避難所に指定されているグランメッセ熊本では、夜中にもかかわらず、多くの方が避難をしてきていたが、避難所はガラスが割れたり天井が落ちたりして大きく被災していたため立ち入ることが出来ず、多くの方が駐車した車両に避難していた。なお、対策本部車に詰めていた職員と衛星通信車運用の協力業者に幸い怪我は無く無事であった。しかし、展開していた衛星通信車は3台共カメラポールや車両固定ジャッキ、車載カメラに損傷を受けてしまった。ただ、主要な機能である衛星通信装置や発電装置に損傷は無く、予備の三脚やカメラに切り替えて映像伝送を再開する事が出来た。その後、他の被災箇所に移動することが想定された為、伸びたまま曲がって格納出来なくなったカメラポールを自動車で牽引



写真-7 被災直後の衛星通信車（益城町役場）

して修正した上でほぼ格納状態とし、車両固定ジャッキも切断して応急的に走行可能な状態に復帰させた。この作業を行いつつ、テレビとラジオ、Twitter等のSNS（ソーシャルメディアネットワーク）、夜明けからは衛星回線で受信した防災ヘリコプターの映像により被災状況の把握に努めた。現場では様々な信憑性の判らない情報が流れていたが、阿蘇地域で大きな被害が発生していることは間違いないようで、阿蘇方面に向け途切れなく続く緊急車両の赤色灯やサイレン音からも容易に推察出来た。

3. 本部指示（任務）

(1) 「阿蘇大橋崩落、被害甚大

阿蘇大橋左岸側から被災状況を伝送せよ」

4月16日（土）08時25分[本震7時間後]

グランメッセ熊本出発、阿蘇大橋左岸へ

朝になると、阿蘇大橋を巻き込み大きく崩落した国道57号の現場を黒川左岸側から撮影せよとの指示があり準備を開始した。この段階で、阿蘇方面に向かう複数のルートが通行出来ないという情報が入っており、ルート選定が課題となった。結果として



図-1 南阿蘇村までの迂回ルート（赤線）

大きく遠回りにはなるが、確実に通行出来ることが分かっており、途中に整備局所管の緑川ダムがあって情報収集や資材補給が可能な、高森町を經由して南阿蘇村に至る国道218号→265号→325号のルートを選定した。なお、被災地は相当の被害が懸念されたことから、整備局で最も優れた悪路走破性と資機材の運搬能力を持ち、K-COSMOS（国土交通省移動通信システム）や衛星携帯電話等の通信機能を装備する情報収集車を使用することとした。



写真-8 約20cmの段差を乗り越える情報収集車

また、被災地での様々な任務に対応出来るよう衛星小型画像伝送装置（Ku-SAT）、見通し外通信が可能な公共ブロードバンド移動無線装置（公共BB）、空撮が可能な無人航空機（ドローン）を搭載した。被災地へ向かう途上は、橋梁擦りつけ部の沈下による約30cmの段差や、地割れ等が複数発生していたが、本車両の持つ機動力を活かして走破出来た。

4月16日（土）12時10分[本震11時間後]

南阿蘇大橋（阿蘇大橋左岸遠望）到着

(2) 「至急、南阿蘇村役場へ向かい支援内容について打合せを実施せよ」

4月16日（木）14時15分[本震13時間後]

南阿蘇村久木野庁舎到着

崩落斜面が視認出来る南阿蘇大橋に到着し、衛星回線での映像伝送を準備していたところ、南阿蘇村と支援内容について打合せを行えとの指示が入った。急遽、村役場へ向かい、村長・総務課長と打ち合わせを実施し、併せて防災ヘリコプターやドローンの映像を提供するためのKu-SATとモニターを役場内に設置した。また、TEC-FORCE本隊到着に備え、庁舎内に活動スペースを確保した。



写真-9 南阿蘇村村長との打合せ及び役場への
Ku-SAT・ヘリ映像用モニター設置状況



写真-12 ドローンの映像より作成した3Dモデル
(阿蘇大橋崩落現場付近)

(3)「阿蘇大橋左岸側までの通行ルートを調査せよ」

南阿蘇村までの移動中は、被災地の道路状況をGPSロガー(ガーミン、スマホアプリ等)とウェアラブルカメラを活用して記録した。この時期は携帯電話が使えないエリアがあり、災害対策本部との連絡にはK-COSMOSや衛星携帯電話を活用した。



写真-10 GPSロガーによる走行軌跡及び道路被災状況

(4)「ドローンにより捜索・救助活動支援を実施せよ」

4月17日(日)～5月1日(日)

[本震1日後～2週間後]

地震により行方不明となられた方の捜索・救助活動の支援及び被災状況の調査としてドローンを用いて約30回の調査飛行を実施した。ドローンで取得したデータは南阿蘇村や熊本県に提供し、陸上自衛隊には捜索・救助活動の支援として空撮映像を基に現地状況についての説明を実施した。



写真-11 阿蘇大橋付近での捜索支援活動

捜索支援を実施した中でも阿蘇大橋周辺の黒川は、深さ90mにも及ぶ狭隘な溪谷で、機体位置保持に必要なGNSS(全球航行法衛星システム)の受信が困難であり、操縦者の技量が頼りのマニュアルモードでの運用を強いられた。その上、溪谷内に複数の送電線が垂れ下がったため、無線機を持たせた監視員を複数配置して操縦者と連携を取りながら機体を誘導し、送電線を潜り抜けながら調査を実施した。

(5)「各地方整備局から支援部隊到着、被災現場へ」

4月19日(火)～5月6日(金)

[本震3日後～20日後]

被災した衛星通信車に対する支援として、近畿地整、中部地整、中国地整、四国地整から衛星通信車と電気通信職員が派遣され、各被災現場や自治体からの映像伝送等を担って頂いた。応急修理を実施した九州地整の衛星通信車も、各地整車両交替時の代替や新たな現場への派遣等、機動的な運用に充てた。



写真-13 各地方整備局の衛星通信車展開状況

(6)「衛星回線から固定回線へ

被災自治体へ通信回線を延ばせ」

4月28日(木)～現在[本震12日後～現在]

災害対応の長期化が予想される南阿蘇村役場には、整備局内のネットワークをi-RAS(統合網無線



写真-14 i-RAS, 監視カメラ設置及び

ソフトフォン利用状況 (南阿蘇村役場)

アクセスシステム)を設置して延長し、メール送受信、映像共有化システム、内線通話用ソフトフォンを使用出来る環境 (出張所と同等) を構築した。また、阿蘇大橋被災現場や宇土市役所被災庁舎にも i-RAS 回線を用いた監視用カメラを設置した。なお、熊本市内の熊本 I C 等の被災箇所では、建物による遮蔽が多く固定回線の設置が困難であったため、見通し上に障害物があっても通信が可能な公共 B B 移動無線装置を活用して現地映像の伝送を実施した。



写真-15 公共 B B 及び監視カメラ設置状況 (熊本市内)

4. 反省・要改善事項

- (1) 「地震災害派遣時、衛星通信車のカメラポールは高く上げないこと。車両固定ジャッキは使用することにより転倒防止に効果があると判断」

今回の地震で観測された速度応答スペクトルは車両が揺れやすい約 0.8 秒周期の成分を含んでいた。破損はしたが、車両固定ジャッキを使用することで車両の固有振動数が高周波側にシフトし、転倒防止に一定の効果があったものとする。そのほか、転倒している車両の方向や鉄塔の倒壊方向がほぼ一定で、同じ衛星通信車でも東西軸寄りに設置した車両より、南北軸寄りに設置した車両の被害が大きい事

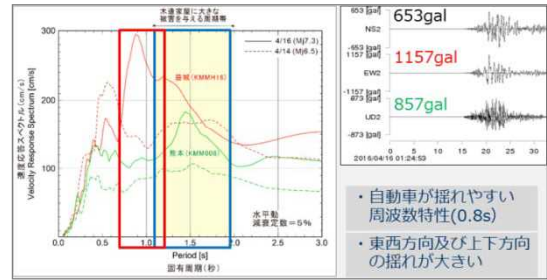


図-2 熊本地震の波形及び速度応答スペクトル (N I E D) から、今後、地震災害での派遣では本震の振幅方向を参考に衛星通信車の設置方向を決める事で、余震での被害を軽減出来る可能性がある (今後要検討)。

- (2) 「結局、電源が確保出来ないと何も出来ない」

防災通信機器を稼働させる一般的な可搬型発電機は、1日2~3回の給油や数日に1回のオイル交換が必要であり、定期的に危険個所に立ち入らなければならない。危険個所での作業を極力少なくするためには、例えば、太陽光+バッテリーによる連続給電が可能な電源装置等の確保・配備が必要と考える。



写真-16 太陽光パネルとバッテリーによるカメラ電源 (南阿蘇村・国道 5 7 号災害現場)

- (3) 「被災地ではガソリンの入手は困難だが、軽油の入手は比較的容易であった (発災~3日程度)」

被災地では発災から3日程度、ガソリン給油のための車列が見られた。一方、軽油を使用するディーゼル車では燃料の入手について特段支障は無かった。

- (4) 「災害時優先指定の携帯電話は有効に機能したが、モバイル通信回線は関係機関の利用増加に伴い通信速度が低下し、データ伝送に時間を要した」
携帯電話が被災地で使用出来たのは、携帯電話各社が固定基地局のバックアップとして被災地に派遣した移動基地局が効果を発揮したものとする。

(5)「公衆線・自営線接続による内線接続は
災害対策室との連絡に必須」

整備局と現地間の通話には、内線接続が出来る公衆線・自営線接続が有効であった。また、i-RASにより整備局ネットワークを延長した南阿蘇村では、試験的に運用した内線通話用ソフトフォンが好評であった。



写真-17 ソフトフォンを利用するリエゾン隊員
(南阿蘇村役場内)

(6)「衛星通信回線は映像伝送に加え、データ伝送で
利用したいという要望が多い」

被災地ではモバイル回線によるデータ通信の速度低下が問題となる一方、高画質の空撮動画や大量の現場写真を送信したいという要望が多い。迅速に設営可能な衛星通信回線を大容量のデータ伝送に活用出来ればさらなる使い勝手の向上が期待出来る。

(7)「迅速な被災地の調査のためには機動調査班を」

道路事情が厳しかった南阿蘇村への展開では、情報収集車の機動力と、Ku-SAT等の通信機器の組み合わせが効果を発揮した。想定される南海トラフ地震等で道路啓開調査が必要な状況では、公共BBやモバイルルータ、ドローンを小型車両に搭載した機動調査班を派遣する事が有効であると考えられる。



写真-18 阿蘇大橋付近での情報収集車と衛星通信車

(8)「災害現場でのドローンの運用には高度なノウ
ハウと支援が必要で、要員養成が課題である」

ドローンを活用した捜索支援や被災状況の把握は高い効果を発揮した。一方、今回の災害現場のようなGNSS機能による操縦支援が難しい環境でドローンを安全に運用出来る職員は、九州地整の無人航空機操縦者資格を有する者の中でも、広島土砂災害や口永良部島噴火災害等に派遣された経験を持ち、高度な技術を有する数人であり、同じチームを複数回派遣せざるを得なかった。チーム編成には操縦者の他、飛行後の機体整備、ソフトウェアチェック、バッテリー管理、飛行記録の保存整理や空撮データの送信、sfm(3D地形図)の作成等、運用を支援する要員が必要であり、今後の養成が課題である。



写真-19 飛行前ブリーフィングの様子(阿蘇大橋現場)と九州地方整備局無人航空機運用教本

5. さいごに

今回の災害では受援地整として不慣れな点が多く、衛星通信車等の派遣先における安全の確保等、支援地整への説明が不十分だった点など、反省すべき点も多かった。なお、本省及び各整備局からの迅速かつ手厚い支援と、活動頂いた協力業者の皆様には、この場をお借りして謝意を表すものである。被災地では未だ多くの方が不自由な生活を強いられている。速やかな復旧・復興を願いつつ、整備局として今後も引き続き必要な支援を継続し、今後、TEC-FORCEの派遣時には、今回得られた知見が迅速な災害復旧活動の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) NIED 地震観測データから見た熊本地震 H28.4
- 2) 近畿大学理工学部 自動車の固有振動数計測 H14.9

大雪STOP&GO作戦の 取り組みの紹介について

岡部 浩司¹・斎藤 哲也²

¹近畿地方整備局 福井河川国道事務所 道路管理課 (〒918-8015 福井市花堂南2-14-7)

²近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工務課 (〒918-8239 福井市成和1-2111ポラリスビル内)

一般国道8号福井県越前市～同敦賀市間では、大雪による通行障害がたびたび発生している。2006年度豪雪以降、関係機関が連携を取りつつ対策強化を図ってきたが、2014年度も通行障害が発生し、各方面から交通確保に向けた社会的要請を受けることとなった。このため福井河川国道事務所は、雪害による社会的影響を少しでも軽減する新たな措置として「大雪STOP&GO (ストップアンドゴー) 作戦」を計画するとともに、新たに民間企業や交通管理者との協力関係を築き、実施に向けた取り組みを行った。

キーワード 除雪の効率化、スタック防止、民間企業との協力、タイヤチェーンの委託販売

1. はじめに

福井県内は全域が豪雪地帯に指定されており、大野市 勝山市、今立郡池田町、南条郡南越前町は豪雪地帯対策特別措置法による特別豪雪地帯に指定されている。

福井河川国道事務所が管理する国道8号は石川県境から滋賀県境を縦貫する幹線道路で、平行する主要な路線として中日本高速道路(株)が管理する北陸自動車道がある(図-1)。このうち、越前市から敦賀市にかけては山間や海沿いの急峻な地形となっており、冬期においては大雪による交通障害がたびたび発生した。雪害による長時間の交通障害は物流の停

滞や経済活動の損失をもたらし、ひいては報道等により地域のイメージダウンにつながる。

特に敦賀市は、嶺北地方と嶺南地方、関西・中京方面への結節点にあたり、日本海側と太平洋側を結ぶ物流の結節点でもあり、円滑な交通の確保が求められる。しかし、2006年度および2011年度には丸一日近く国道8号と北陸自動車道が同時に通行止めとなり、地域活動が麻痺状態に陥った経緯がある。その教訓から福井河川国道事務所では、道路管理者間の各情報収集・発信を一元化する「福井県道路情報連絡室」の開設や啓発活動の強化などのソフト面のほか、CCTVカメラの増設、除雪機械の増強、チェーン着脱場の整備などのハード面の双方で対策を進めてきたところであった。

しかし、2015年2月9日～10日にかけて、敦賀市内でのスタック車両2台の発生を発端に、南条郡南越前町赤萩～敦賀市赤崎の16.7kmの区間で約590台の立ち往生が発生した。除雪作業が著しく停滞する中で、福井河川国道事務所は緊急車両の通行確保を目的として災害対策基本法を適用し、2月10日3時00分～9時55分にかけて当該区間を通行止めとし、除雪作業とスタック車両の排除を行うこととなった。

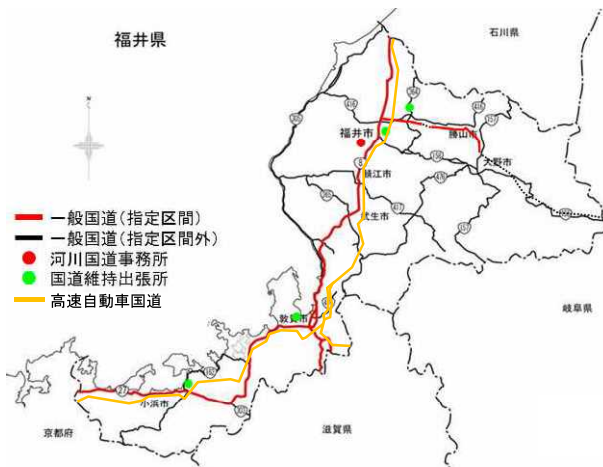


図-1 福井県の主要国道位置図

2. 大雪STOP&GO作戦の取り組み

国道8号における長時間の通行止めをはじめとする大規模な交通障害を繰り返さないために、福井河川国道事務所は「大雪STOP&GO (ストップアンドゴ

一) 作戦」(以下、「SG作戦」という)と称して、スタック車両の発生を抑えるための連続した集中除雪作業の取り組みを行った。作戦を実行する区間は過去のスタック車両発生の実態に加え、国道上での除雪作業等で通行規制が生じる場合、平行する補助国道(国道364号、476号)等に経路案内が可能な区



図-2 STOP&GO 作戦の区間

間として、南条郡南越前町赤萩～敦賀市赤崎の間に選定した(図-2)。

SG作戦とは、福井県嶺北地方南部と嶺南地方東部に大雪警報が発令され、かつ北陸自動車道が通行止めとなった場合を条件に、①降雪が強くなり路面状態が悪化傾向の場合は、一時的な通行規制または通行止を実施し区間内の集中除雪を行う(STOP状態)。②路面状況が改善し除雪機械を先頭とする除雪体制が整った後に、除雪機械を先頭に「先導除雪」をしながら後続車両を追従させて通行状態を確保する(GO状態)。③SG作戦においては、除雪機械を区間内の作業に専念させる。雪が弱く路面状況が比較的良好のうち、通行規制は行わず除雪車先導による開放を継続し、気象状況が悪化傾向になれば①②を繰り返すことで、区間内の道路状況を維持し、スタック車両の発生を防ぐというものである(図-3)。

■STOP&GO作戦の状態

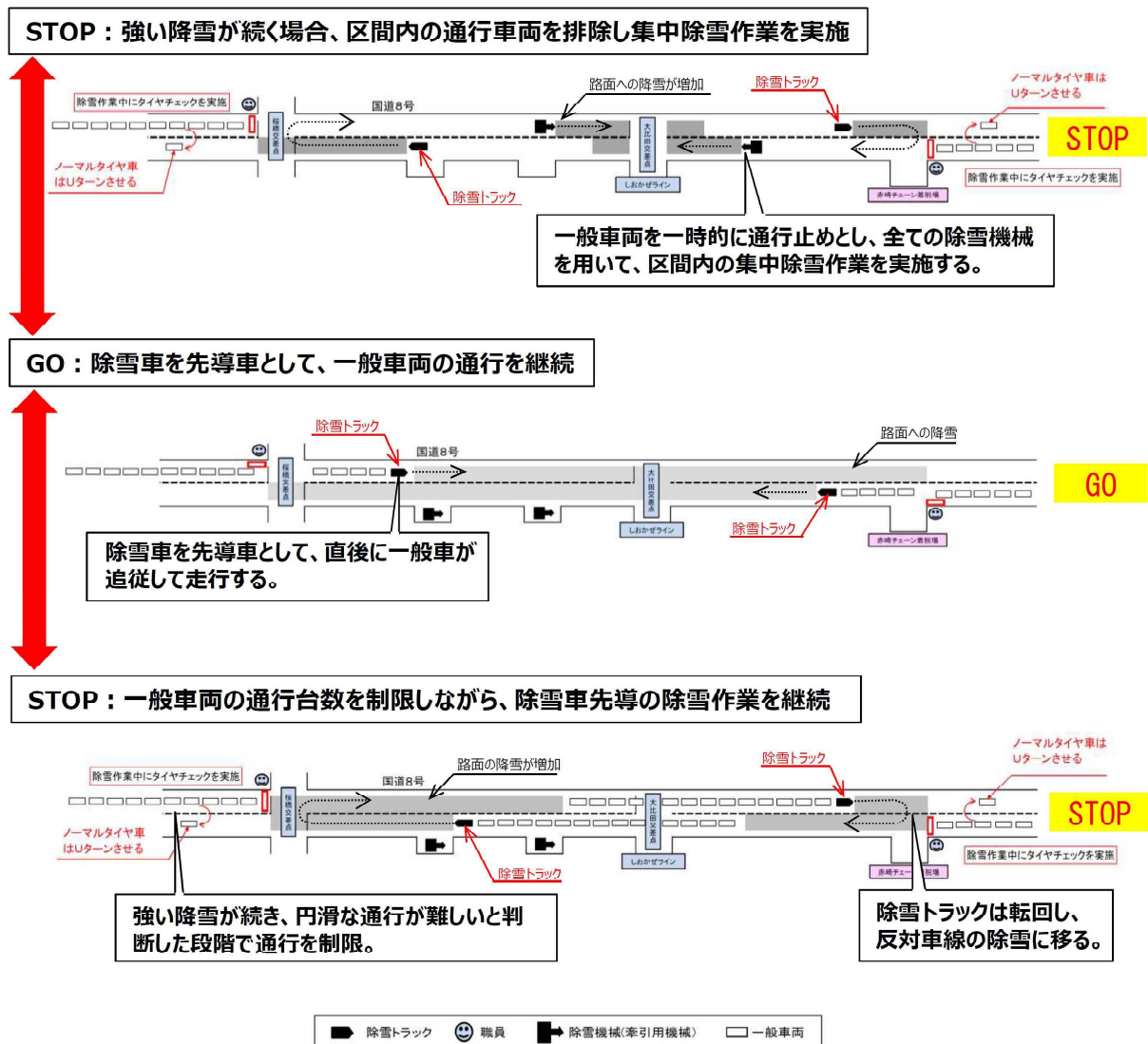


図-3 STOP&GO 作戦の概要

3. 作戦実施に向けての問題点と課題

(1) 交通管理者との連携

SG作戦では起終点では通行車両に対する一時的な通行規制や交差点内での除雪車の転回が生じる。この際、通行車両の安全確保と効率的な除雪作業のため、交通管理者（警察）との連携が必須となる。この連携は、安全、確実な作業を目的とする道路管理者と、交通規制時間の短縮を理想とする交通管理者の双方の公益実現を、可能な限り調整することとなる。よって、限られた要員で現場で混乱なくかつ効率的に作業を行うため、計画段階において警察本部および所轄警察署と懸案事項の整理、課題解決を図った。この課題解決の具体的内容は、下記のとおりである。

a) 交差点内の信号制御

SG作戦の起点側は信号交差点となっており、除雪作業による通行規制や一時的な通行止めの際の事故防止のため、交通誘導の明確化が必要である。一旦事故が起これば、事故対応が優先されるため除雪作業は中断せざるを得なくなるからである。

警察との調整の結果、道路を通行するドライバーは信号現示に従うことが基本であることから、作戦時に点滅現示とした場合に不要な混乱を招く恐れがあること、また点滅現示にすることで交差点内の交通誘導に多くの要員を割くことになるとの判断から、通行規制時においても、通常的信号現示を継続するとした。

b) 先導除雪作業における警察パトカーの配置

先導除雪は約17kmの区間を連続して低速で作業するため、後続の通行車両が除雪トラックを追い越すことが想定された。除雪車の先の路面状況の悪い箇所でスタック車両が発生すれば、車両の救出が最優先となるため、除雪作業を中断せざるを得なくなる。これを防ぐために、先導除雪を行う除雪トラックの直後に警察のパトカーを配置することでドライバーの心理面に訴えかけ、追い越しの抑制が期待できると考えた。この趣旨に交通管理者も理解を示し、作戦時には所轄警察署よりパトカーの派遣が可能となった。

(2) 効果的なノーマルタイヤチェック

福井河川国道事務所では従来から大雪警報発令時に国道上で所轄警察署と協力して、国道上の通行車両に対してノーマルタイヤチェックを行っている。タイヤチェック時にはスタッドレスタイヤ等の装着状況の確認と同時にノーマルタイヤ車に対しては、雪道走行の注意喚起及び現場での引き返しを要請していたところである。しかし、道路管理者としては強制力がないため、要請に従わずに通過したり、天候や道路状況が回復するまで道路上に滞留し、除雪作業の支障となってきた。また、今回、SG作戦を交通管理者に説明した際には、限られた要員で作業を行う以上、より効果が発揮できるタイヤチェックの

手法がないかの意見が出された。これら課題の検討を行った結果、ノーマルタイヤ車の現地でのタイヤチェーン装着が、ドライバー自らが対策できる内容であり、かつスタック車両の発生抑制につながると考えた。

a) タイヤチェーンの委託販売

SG作戦の区間の前後にはガソリンスタンドやコンビニエンスストアが立地している。これら店舗にタイヤチェーンを商品として陳列し、購入者がその場でタイヤに装着することにより、区間内のより安全な通過が可能になるとの視点で発案したものである。

次に、沿道の自動車関連商品を扱う企業や大手コンビニチェーンには順次職員が直接訪問し、担当者に対して過去の雪害状況やSG作戦の趣旨に対する理解を得たうえでタイヤチェーン委託販売協力を要請した（図-4）。その結果、タイヤチェーンの提供元としてA社、委託販売先として大手コンビニチェーンC社ならびにE系列のガソリンスタンド2社から理解を得て、具体的な委託販売方法等について調整を進めた。

b) 店舗への趣旨説明及び協力依頼

相手方へは主に以下の観点で協力依頼を行った。

『大雪により幹線道路が通行止めになった場合、渋滞が発生するだけでなく物流停止となって商品の調達が滞り、結果として店舗の営業に影響を与える

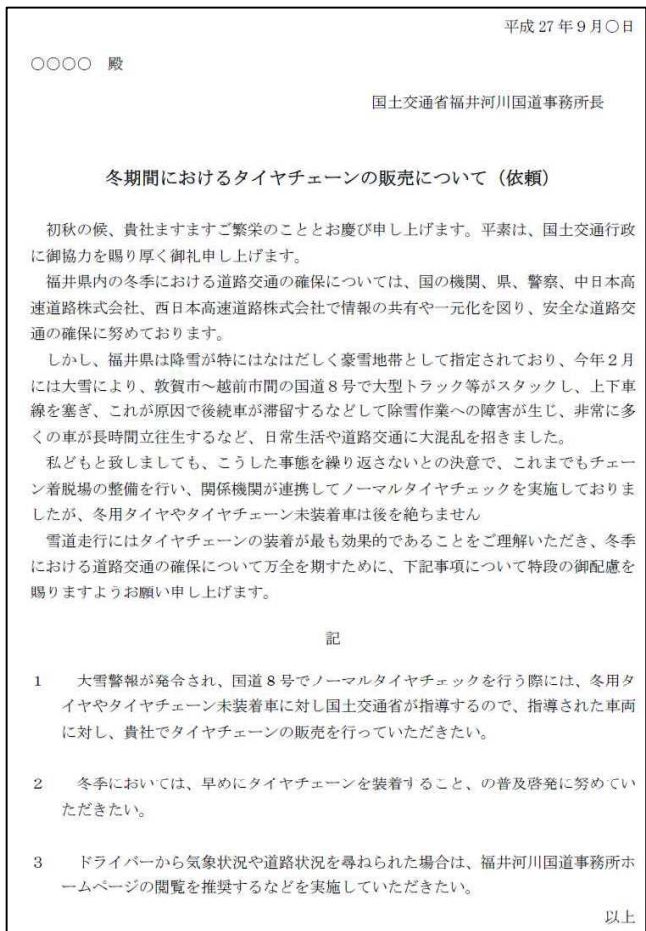


図-4 協力依頼文書

こと。』

『コンビニやガソリンスタンドにはトイレがあり、大型のガソリンスタンドにおいては休憩施設等も併設されている。このためノーマルタイヤ車や運転の不慣れたドライバーに対しては、天候や道路状況が回復するまでの一時的な休憩所としての利用が可能であること。これによりノーマルタイヤ車の侵入を減らすことで、スタック車両の発生を防止できること。』

『店舗の営業時間が決まっている場合、SG作戦時には閉店時間を可能な限り延長し、チェーン購入希望者の対応をお願いしたいこと。』

これらの説明を行った結果、スタック車両の発生を防ぐことが物流確保に直結し店舗側にも大きなメリットがあるとの理解をいただくことができた。委託販売の協力店舗としてA社は支店がある越前市内と敦賀市内の2店舗、ガソリンスタンドは越前市と敦賀市内の2店舗、コンビニエンスストアは越前市内、南越前町内、敦賀市内の12店舗が取り扱い店舗となった(図-5、写真-1,2)。なお、タイヤチェーンの各店舗への納入及び商品管理、精算方法等については各企業間が調整した。

c) タイヤチェーンの装着講習会

タイヤチェーンの購入客は冬用装備を行っていないまたは雪道に不慣れである場合が多いことが想定される。店舗で購入するだけでなく現地で装着ができなければ、スタック車両の発生を防ぐことにはならない。このため、委託販売に先立ち、A社よりコンビニエンスストアの各店舗責任者に対してタイヤ



写真-1 啓発ポスターの掲示協力依頼の様子



写真-2 コンビニエンスストア店内におけるタイヤチェーン及びSG作戦ピラの陳列状況



図-5 店舗に掲示した啓発及びタイヤチェーン販売ポスター



写真-3 タイヤチェーン装着講習会の様子

欠であり、委託販売の実効性を大きく左右する要素であることが確認できた。

d) 高機能標識車及びタブレット端末の配備

国道8号が通過する敦賀市は、福井県における関西や中京方面との結節点であり、雪道の運転技術が不十分なドライバーは少なくない状況であると推測できる。このため、北陸方面へ向かう車に対する情報提供手段として、SG作戦の終点側にある赤崎チェーン着脱場内にSG作戦区間内のCCTVカメラ映像を表示できる「高機能標識車」の配備を行った（写真-4）。

高機能標識車は主に交通規制時において文字情報を表示する機会が多いが、CCTVカメラの機器と接続することで、リアルタイムのライブ映像を表示することが可能である。これにより、SG作戦区間内にあるCCTVカメラ13基の映像を数秒おきに順次表示することで、ドライバーに対して現地での最新情報の提供が可能となる。さらに映像を見たドライバーが場合によっては引き返すか、あるいはタイヤチェーンを購入して引き続き走行を行う等の判断を行うための選択肢を提供することが期待できる。なお、後述の現地訓練時には、訓練の区間内において訓練とは関係ない一般車両による交通事故が発生した。このとき、事故現場の状況をライブ映像で表示したことで、訓練による一時的な通行規制により現場で待機していた他のドライバーは道路状況を直接把握できたため、混乱や苦情が生じなかった。よって、実際の作戦時にも有用な情報提供手法であると評価した。

一方、ノーマルタイヤチェック時には職員が現地に派遣される。ここでも現地での情報不足に加え、ドライバーから情報提供を求められた際に、迅速な対応ができずに苦情を受ける場合がある。これを解消するために、WEB情報表示や通話機能およびメール機能等を搭載したタブレット型端末を配備した。端末を現地で携帯することで、除雪車の位置情報、事務所や現地間での情報提供・共有を可能となる。これら「見える化」によりドライバーから情報提供を求められた場合にも視覚的に確実な手段により、迅速かつ多数の車両に、適切に情報提供することが期待できる。



写真-4 高機能標識車によるライブ映像表示状況

4. SG作戦を地域へ浸透させる取り組み

(1) 現地訓練

過去の豪雪被害を教訓に大雪警報発令時には「福井県道路情報連絡室」を開設しており、毎年の雪害対策期間前には机上訓練を実施している。平成27年度においては従来の訓練内容に加え、SG作戦の現地訓練を行った。

実際のSG作戦を想定して警察パトカーの除雪トラック追従走行、除雪トラックの交差点内の転回、高機能標識車の稼働確認、スタック車両を想定した大型トラックのけん引・排除作業を行った（写真-5）。なお、除雪トラックの転回及びスタック車両の排除時には、所轄警察署の協力を得て、2回に分けて国道を30分程度通行止めに行っている。このとき通行止めにより道路上に待機していた通行車両に対して、職員によるノーマルタイヤチェック作業の手順確認の訓練と併せてSG作戦およびタイヤチェーン委託販売店舗紹介のビラ配布を通行車両に対して行った（図-6）。

(2) 協力企業へのフォロー

2015年度は暖冬だったため、雪害対策期間中のタイヤチェーンの販売実績については数セット程度にとどまった。しかし、コンビニエンスストアやガソリンスタンドにおける貴重な経営資源である物販スペースに数ヶ月間にわたってタイヤチェーンやSG作戦のビラを陳列していただいたことは、適切な道路管理への大きな貢献である。この点に関する謝意を伝えるため、2016年4月に協力企業へ感謝状の贈呈を行った（写真-6）。併せて感謝状の贈呈に関する記者発表を行った結果、地元ケーブルテレビが取材に訪れ、後日、その様子が地域に放送されるに至った。

これらの内容をもとに2016年度には他の大手コンビニチェーンや自動車部品販売会社に対して福井河川国道事務所の取り組みを紹介していき、タイヤチェーンの委託販売先の拡大に努めていきたいと考えている。

(3) 広報

これら国交省の取り組みを多くの道路利用者に対し周知・広報するため、各種記者発表の他、タイヤ



写真-5 警察パトカーと協力した現地訓練の様子

3. 現状の冬期走行支援

(1) 津軽自動車道の吹雪対策施設

津軽自動車道の一部である浪岡五所川原道路や五所川原西バイパスでは、吹雪対策として表-1および写真-1～2に示す吹雪対策施設がほぼ全線にわたって整備されてきた。

表-1 津軽自動車道の吹雪対策施設

吹雪対策	概要
防雪柵（吹き止め柵） （写真1）	柵高：4mまたは5m 空隙率：下部無孔板、上部有孔板 ※形式の異なる吹き止め柵を適宜配置
自発光視線誘導標 （写真2）	設置間隔：50m（五所川原道路） 40m（五所川原西バイパス） 発光方法：点滅、緑色（LED）



写真-1 吹き止め柵

（左上：標準型、右上と左下：高性能防雪柵、右下：斜風対応型）



写真-2 自発光視線誘導標

(2) 吹雪時の津軽自動車道の課題

前述のように防雪柵や自発光視線誘導標の整備が進められてきたが、吹雪による交通障害が十分に解消されていない。平成23～27年度冬期の津軽自動車道の通行止めは合計18回に達し、地吹雪や大雪による通行止めが10回、交通事故による通行止めが8回である（表-2）。さらに、平成21年1月～平成26年12月までの冬期に発生した交通事故15件のうち、表-3に示す6件は吹雪時の視界不良に起因した事故と考えられる。

表-2 津軽自動車道の冬期通行止め履歴

年度	冬期通行止め件数		
	地吹雪（視界不良） ・大雪	交通事故	合計
平成23年度	2回	2回	4回
平成24年度	5回	2回	7回
平成25年度	0回	0回	0回
平成26年度	3回	0回	3回
平成27年度	0回	4回	4回

表-3 吹雪時の視界不良による事故履歴

No.	発生日	発生時刻	昼夜区分	天候	事故類型
1	平成21年1月15日	10:20	昼	雪	車両相互（その他追突）
2	平成24年1月31日	21:55	夜	雪	車両相互（追突-停止中）
3	平成24年2月8日	8:30	昼	雪	車両相互（追突-停止中）
4-1	平成24年2月9日	10:34	昼	雪	車両相互（追突-停止中）
4-2		10:38	昼	雪	車両単独（駐車車両）
6	平成25年2月8日	11:45	昼	雪	車両相互（追突-停止中）

表-3の6件の事故のうち5件は日中に発生し、そのほとんどが停止中の車両への追突事故である。自動車専用道路である津軽自動車道では停止車の存在は考えにくく、吹雪による視程障害によって道路線形や道路端を見失った乗用車が安全のために減速・停止し、後続車がこれに追突した事故形態が容易に想像がつく。

4. 新たなハード対策による走行支援策

(1) 視線誘導標等による走行支援実験

平野部にある津軽自動車道では、日中の吹雪時に周囲が白一色となるホワイトアウトに陥りやすい。周囲が明るい日中の吹雪時に対しては自発光視線誘導標よりも黒っぽく視野に占める面積の大きい樹木や看板の方が識別されやすい。そこで、ハード対策として間伐材を活用した『視線誘導樹』と『旗』の試験設置を行った（写真-3）。視線誘導樹および旗は路肩に等間隔で配置した視線誘導対策である。



写真-3 視線誘導樹と旗

ハード対策の概要を以下に示す。

①視線誘導樹 (H26・27実施)

- ・ 視線誘導樹：スギ (間伐材) H26 H=2.5m
H27 H=3.5m
- ・ 設置区間：H26 KP9.190～KP9.690、L=500m
H27 KP8.920～KP9.920、L=1,000m

- ・ 設置間隔：50m間隔
- ・ 設置位置：左側路側 (ガードロープ支柱に添架)

②旗 (H27実施)

- ・ 旗：ピンク色 H=3.0m
- ・ 設置区間：KP10.060～KP10.505 L=500m (25m間隔)
KP10.535～KP10.985 L=500m (50m間隔)
- ・ 設置位置：左側路側 (ガードロープ支柱に添架)

視線誘導樹と旗は五所川原IC～五所川原東IC区間の上り車線側に試験設置を行った (図-2)。この区間は視程障害発生頻度の高い区間であり、特に上り車線側は防雪柵がなく視的目標物が少ない区間である。視線誘導樹の高さがH26とH27で異なるのは、H26のアンケートにおいて、さらに高い樹を求める意見があったことによる。H27に旗を追加設置したが、スギの間伐材よりも経済的な材料を模索したものである。



図-2 視線誘導樹等の設置位置

(2) 視線誘導樹の効果検証結果

a) 視線誘導樹による日中の吹雪時の視認性の向上

写真-4は吹雪時に車内から撮影した写真である。周囲が白一色で自発光視線誘導標が見えない中、視線誘導樹によってかろうじて路側が視認できることがわかる。



写真-4 視線誘導樹の視認状況

図-3は、移動気象観測車による計測視程とドライバーが感じた視線誘導樹と自発光式視線誘導標の視認距離 (視認本数) を比較した結果である。その結果、自発光式視線誘導標の視認距離は計測視程に達することはなく、視線誘導樹の視認距離は計測視程の値に近い。これは、視線誘導樹によって本来見えるべき視認距離が得られていることを意味する。自発光式視線誘導標と比較すると視線誘導樹の視認距離は0～150m程度向上している。旗 (図-4) については、自発光式視線誘導標の方が視認距離が長い場合があり、視線誘導樹ほどの効果は見られなかった。

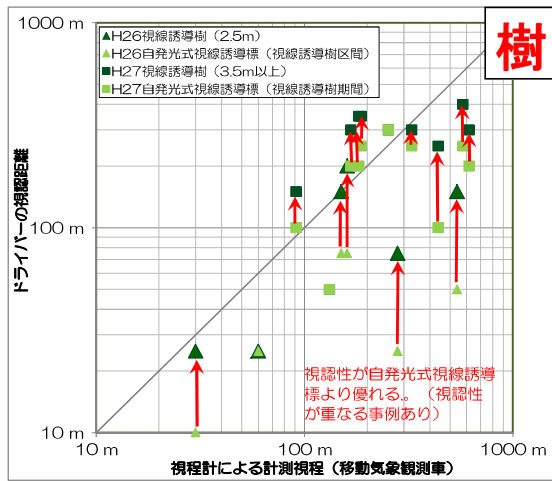


図-3 視線誘導樹と自発光式視線誘導標の視認性比較

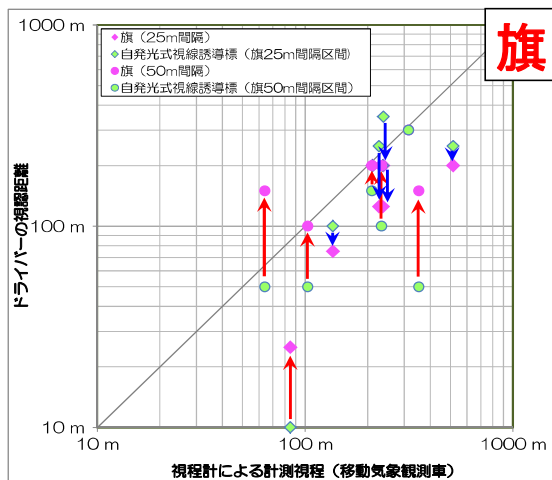


図-4 旗と自発光式視線誘導標の視認性比較

b) 視線誘導樹による走行挙動の円滑化

図-5は平成27年1月17日（吹雪時）の民間プローブによる自動車走行速度変化の一例である。この車両は五所川原ICから津軽自動車道に進入したとみられ、視線誘導樹設置区間の直前で一時的に減速するが、区間の中ほどから速度がやや上昇し50km/hの前後での安定した走行となっている。

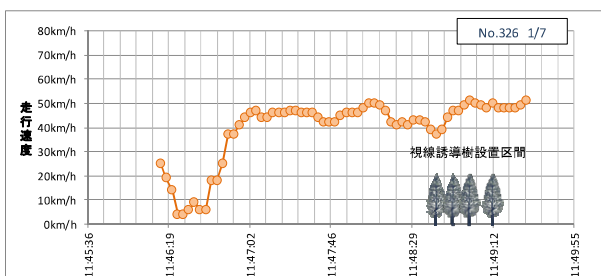


図-5 走行速度の変化事例（民間プローブデータ）

また、津軽地方で猛吹雪となった平成27年2月10日の民間プローブデータから、走行速度の変動（変動係数）を視線誘導樹の設置区間と未設置区間で比較すると、設置区間の方が速度変動が小さいことがわかる（図-6）。民

間プローブによる解析事例は走行車全体のごく一部にすぎないが、視線誘導樹が日中の吹雪時の走行円滑化に寄与した事例として考えることができる。

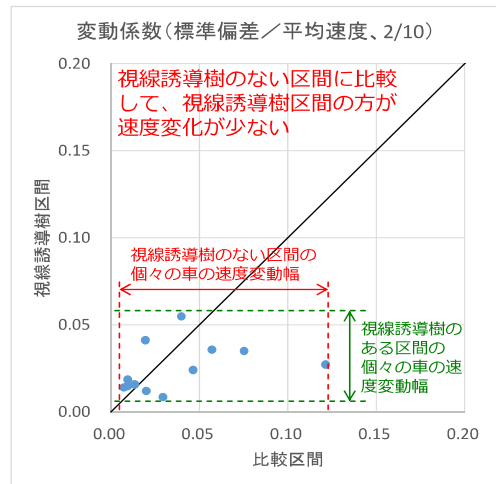


図-6 視線誘導樹の有無による走行速度の変動（2月10日）

c) ドライバーからの視線誘導樹の認知度と評価

平成24年度からドライバーに対し津軽自動車道のメール配信を行っているが（次章で詳細説明）、メール配信登録者および未登録者に対して行ったアンケート結果より、視線誘導樹等の認知度と吹雪時の視線誘導機能の評価を行った（図-7,8）。平成27年度の視線誘導樹の認知度については、平成26年度よりも増加した。理由として、平成26年度からの支援策であることや、チラシやホームページ等の広報による視線誘導樹の機能や役割の周知を行ったためと思われる。また、視線誘導樹等の存在を知っていた人（図中の赤枠内）に限れば、視線誘導樹、旗ともに「目印になった」、「どちらかといえば目印になった」と回答する人が約6～9割と多い。このことから、視線誘導樹は吹雪時の視線誘導効果が一定程度あるという評価が得られた。さらに、視線誘導樹の機能や役割を知ることにより、吹雪・地吹雪時の視線誘導効果をより実感できるため、広報が重要と考えられる。

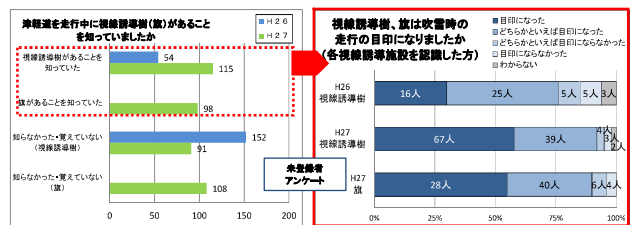


図-7 視線誘導樹の認知と吹雪時の有効性（登録者アンケート）

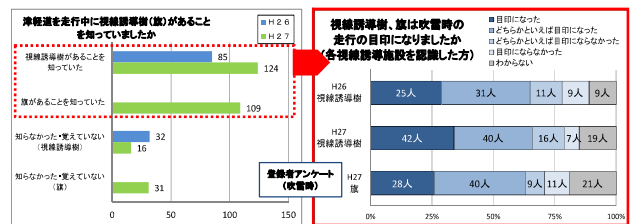


図-8 視線誘導樹の認知と吹雪時の有効性（未登録者アンケート）

5. ソフト対策による走行支援策

(1) 津軽自動車道における道路情報メール配信

青森河川国道事務所では、津軽自動車道を対象に、冬期の通行止めや気象状況などの情報を利用登録者に電子メールで提供するサービスを、平成24年度～平成27年度冬期までの4年間にわたり試験的に行ってきた。このメール配信は、道路管理者が専用フォームで通行止め情報等の配信文を登録すると、配信登録者にその内容がメールで通知される（図-9）。平日の配信を基本として運用している。

平成26年度からは、それまでの道路情報メールに加えて吹雪視程情報とライブカメラ画像の提供を試行的に実施した。メール本文には吹雪視程情報へのURLリンクが付加され、登録者自ら吹雪視程情報とライブカメラ画像を確認できるようにしている（図-10）。

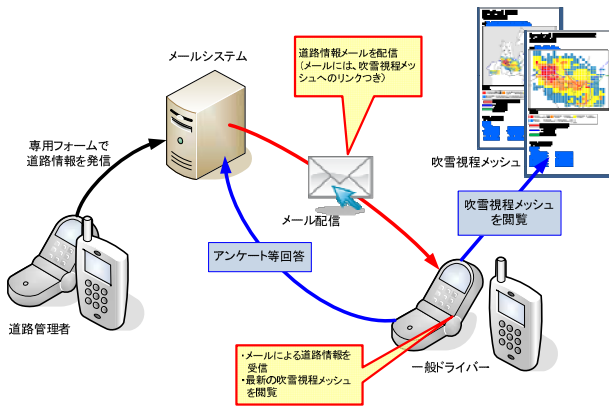


図-9 道路通信メール配信の概要

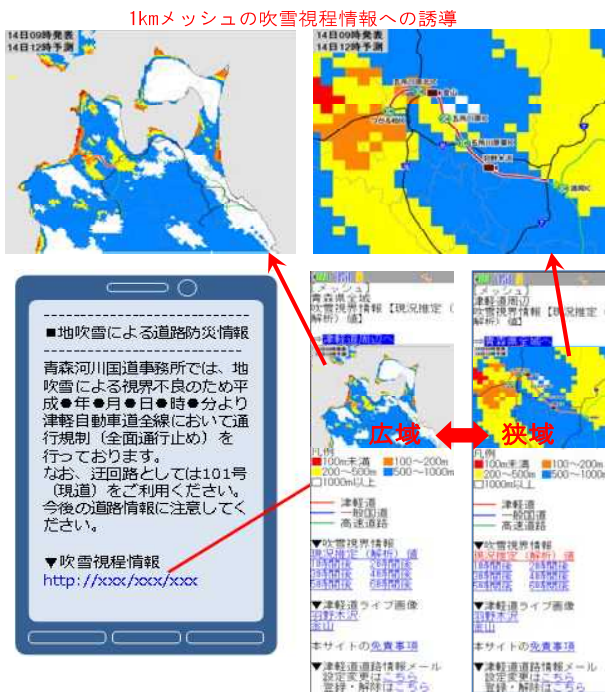


図-10 吹雪視程情報の提供

(2) ソフト対策の効果検証結果

a) 道路情報メールの利用者数評価

平成26～27年度の道路情報メール配信の概要を表-4に示す。平成27年度の登録者数が平成26年度より減少しているのは、平成27年度の気象が穏やかであったことが要因と考えられる。

表-4 道路情報メール配信の概要

配信期間		平成26年度	平成27年度	
登録者数（最終）		12/15～3/20	12/14～3/18	
（配信開始後の純増数）		(375名)	(445名)	
配信情報	気象情報	・気象警報情報 ・気象・路面情報	48件	79件
	視界不良	・視界不良情報	0件	2件
	通行止情報	・通行規制情報	7件	17件
	その他規制情報		0件	0件
	路面状態	・路面情報	0件	-
	除雪作業	・除雪作業情報	30件	-
	その他	・その他	7件	3件
合計		92件	101件	

b) 道路情報メール配信の有用性と交通行動

平成26年度に行った視界不良による通行止め時の交通行動等についてのアンケート結果では、メール配信が役に立ったとする回答が多い（図-11）。さらに、「津軽自動車道を利用予定だったが通行止めになった」と回答した人に着目して、その後の行動を集計すると、「他の道路に経路変更した」人が最も多く、「出発時間を早めた」、「予定していた運転を止めた」との回答が多い。

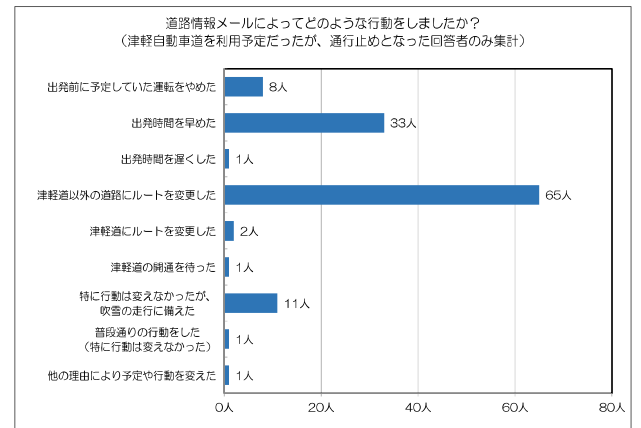
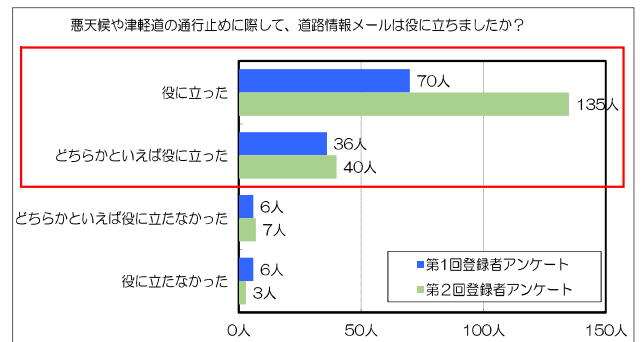


図-11 道路情報メールの有用性と情報による交通行動
(H26年度（12/1、2/13、3/11の通行止時）

同様に、平成27年度の事故に伴う通行止め直後に実施した同様のアンケートでもメール配信が役に立ったという人が多く、特に通行止め情報が役立ったと回答し、情報によってルート変更や出発時刻の変更が促されたことがわかる(図-12)。このように、配信した情報によって配信登録者が適切と考える交通行動が選択されていたことがわかる。

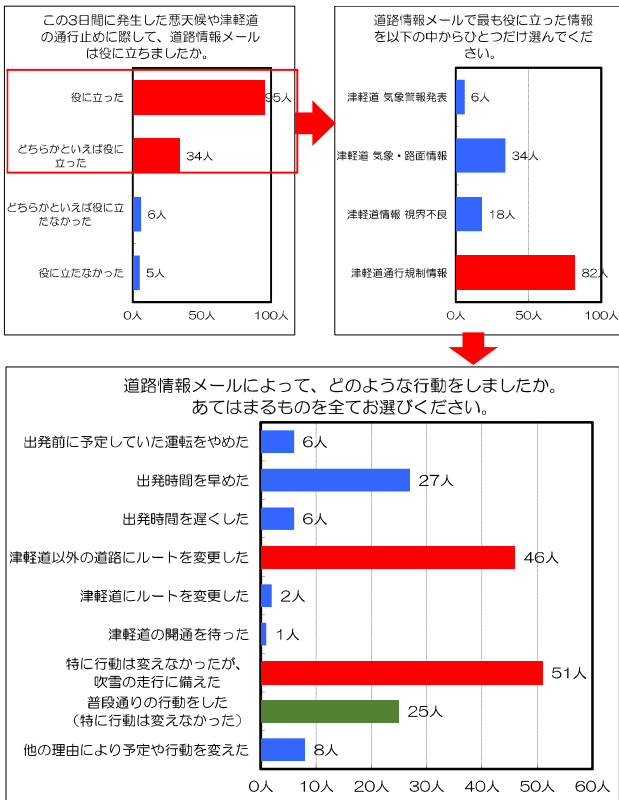


図-12 道路情報メールの有用性と情報による交通行動
(H27年度(2/15~17))

6. 課題及び今後の方向性

平成26・27年度に行った冬期走行支援策(ハード・ソフト)に関する課題及び今後の方向性は以下のとおりである。

(1)ハード対策

①日中の吹雪による視程障害時の視線誘導として視線誘導樹は一定の効果が得られたが、視線誘導施設として視線誘導樹の機能に対する誤解も多い。主な意見は次のようなものである。

- ・夜間の視線誘導効果に対する疑問(日中の視線誘導に特化した対策としての周知不足)

- ・間伐材利用でなく植栽木であるという誤解や懸念(間伐材利用であることの周知不足)
 - ・防雪林との誤解(防雪機能と視線誘導機能の混同)
- 視線誘導樹の機能について認知度が高まるほど視線誘導効果が理解されやすいため、視線誘導対策の機能や役割を周知・啓蒙する必要がある。
- ②平成27年度は暖冬傾向のため、本来の吹雪・地吹雪による厳しい視界不良の評価が難しかったため、調査の継続による効果の検証を検討していく。

(2)ソフト対策

- ①道路利用時に情報提供を行う道路情報板と事前に情報提供を行える道路情報メールサービスの長短所を整理し、それぞれの長所を生かしたソフト対策を検討する必要がある。
- ②道路情報メール配信は道路管理者の手作業にてメール本文が作成されており、現状、道路管理者の負担が大きい。一方で、土日祝日の配信を望む利用者のニーズが多く、要望に対応するためには、情報配信の一部について自動配信化を検討する必要がある。また、継続運用に向けては、作業効率化を図っていく必要がある。(平成27年度に配信メールの標準文例の入力自動化について一部実施済み)
- ③情報が広く行きわたるよう、登録者数を増やすため広報の工夫が必要である。
- ④現在は津軽自動車道のみが道路情報メール配信の対象であり、並行する101号や接続する国道7号、東北自動車道は対象となっていない。接続する道路や迂回路の状況などの情報提供が行えるよう、青森県やNEXCOとの連携をさらに進める必要がある。

7. おわりに

津軽自動車道は、鱒ヶ沢道路が今年度開通し、今後、青森県西北地域での津軽自動車道の役割はますます重要になり、安全走行の確保に向けた道路管理者としての責務はさらに大きくなる。今後も、ハード対策とソフト対策の両面から冬期の安全走行支援策について検討していきたいと考えている。

8. 参考・引用文献

- 1) 佐々木耕嗣, 三上泰光, 丹治和博: 津軽自動車道における吹雪時の走行支援策とその評価, ゆきみらい研究発表会(2016)

須崎港防波堤における津波越流時の洗掘対策の検討

上邨 知輝

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

須崎港防波堤は、港内の静穏度を確保するとともに、背後地を津波被害から防護することを目的に整備が進められている。また、須崎港においては、東南海・南海地震等による被害が想定され¹⁾、対策が急務となっており、最大クラスの津波の来襲を想定し被災後の港湾機能の早期復旧を目的とした構造の検討を行っている。一方、津波対策として腹付工の設置による対策が粘り強い構造として知られている²⁾が、津波来襲時には越流による腹付工の洗掘等が考えられ、腹付工を防護する被覆ブロックの安定性は明らかにされていない。そこで、本稿では須崎港防波堤で適用が想定される腹付工について、被覆ブロックの空隙率による効果及び洗掘防止マット敷設による洗掘抑制効果について水理模型実験から明らかにする。

キーワード 防波堤, 津波, 被覆ブロック, 洗掘防止マット

1. はじめに

須崎港防波堤(図-1)は、東南海・南海地震等による津波が想定され、防波堤を越流する設計津波を越える津波への対策として粘り強い構造化が進められている。一方、粘り強い構造としては腹付工の設置を基本とした津波対策や、基礎マウンドの洗掘を防ぎ堤体の滑落を防ぐ被覆工や洗掘防止工を敷設する構造が倒壊しにくい構造として知られている。

しかし、粘り強い構造の方針について示されている国土交通省港湾局「防波堤の耐津波設計ガイドライン」においては、腹付工を防護する被覆ブロックの安定性は明らかにされていない。そこで、本稿では後述の項目について水理模型実験により検証を行った。

- ①本防波堤における最大クラスの津波に対する安定性の確認を行う。
- ②被覆ブロックに空隙を設けることによる安定性に対する効果について明らかとする。
- ③洗掘防止マット敷設による効果について明らかとする。



図-1 須崎港防波堤

2. 要求性能

検討対象とする須崎港防波堤は、三つのレベルの津波を設定している。

一つ目の津波は、海岸施設として昭和南海地震津波を対象とし、防波堤に越流を生じさせず背後地の津波被害からの防護を目的とする。また、本防波堤の要求性能は被災後も即座に施設を共用可能な「使用性」とする。

二つ目の津波は、港湾施設として発生頻度の高い津波については東南海・南海地震津波(2003年中央防災会議)を対象とし、越流は許容しつつも防波堤の堤体の安定性を保つことを目的とする。また、本防波堤の要求性能は被災後も即座に施設を共用可能な「使用性」とする。

三つ目の津波は、港湾施設として最大クラスの津波については南海トラフ巨大地震津波(2012年内閣府)を対象とし、粘り強さを付与することでできる限りその場に留まり、背後地への津波到達時間の遅延や被災後の港湾機能の早期復旧を目的としていることから、要求性能は設定していない。

3. 腹付工等の粘り強い構造

腹付工等の粘り強い構造の効果としては、長時間繰り返される津波作用によって、越流する津波から防波堤背後の基礎マウンドが一気に洗掘されることを防ぐことで、ケーソン本体が大きく倒壊することを防ぐことを期待している(図-2)。

腹付工については、基礎マウンドを嵩上げすることにより、津波作用によるケーソン本体の滑動及び基礎マウンド等の洗掘を可能な限り低減できる効果を期待している。被覆工及び洗掘防止工については、越流する津波水塊が腹付工に

直接作用することを防ぎ、その結果として腹付工の洗掘速度を抑制する効果を期待している。

そこで、本防波堤では堤体の安定性確保の観点から腹付工を設置し、洗掘対策として被覆工と洗掘防止工で腹付工を覆うことを計画した。被覆工は腹付工上面を越流する津波の流速に対して所要質量を満たした被覆ブロックとした。また、洗掘防止工は洗掘防止マット(アスファルトマット)を敷設することとした。

なお、津波来襲時に港内外の水位差が大きい場合、基礎マウンドを流れる浸透流が発生し、基礎マウンドや腹付工の拘束圧の低下によって、支持力低下等の問題が指摘されている³⁾ことから、本防波堤においては、別途浸透流実験を実施した上で、浸透流による支持力低下等の効果は本防波堤においては支配的で無く、安定性には影響がないことを確認している。

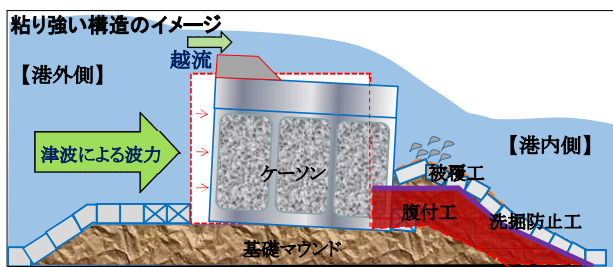


図-2 粘り強い構造のイメージ

4. 水理模型実験⁴⁾

(1) 水理模型実験の概要

水理模型実験は港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路(長さ184.0m, 幅3.5m, 高さ12.0m)を使用し、津波高さや堤内外の水位差を変えて、基礎マウンドの被害率を確認する。模型断面は現地の1/12.5の縮尺とし、ケーンソン背後の腹付工の上には被覆ブロックを敷設した。本実験においては、被覆ブロックの空隙率は0%, 8%, 24%となる3種類の被覆ブロックを用いて行った。形状による影響を受けないよう一般的な直方体とした。各ブロック重量は約3.1kgとなるよう重量を調整したものを用いた。なお、厚みは5.2cmの一定としている。洗掘防止マットは、強度の高いアスファルトマットとし、開口率20%の穴あきとした(厚さ4mm, 開口部φ17mm)。洗掘防止マットは被覆ブロックと腹付工の間に敷設し、ケーンソン壁から法尻までの1枚ものとした。(以後寸法は実験スケールのものを記載する。)

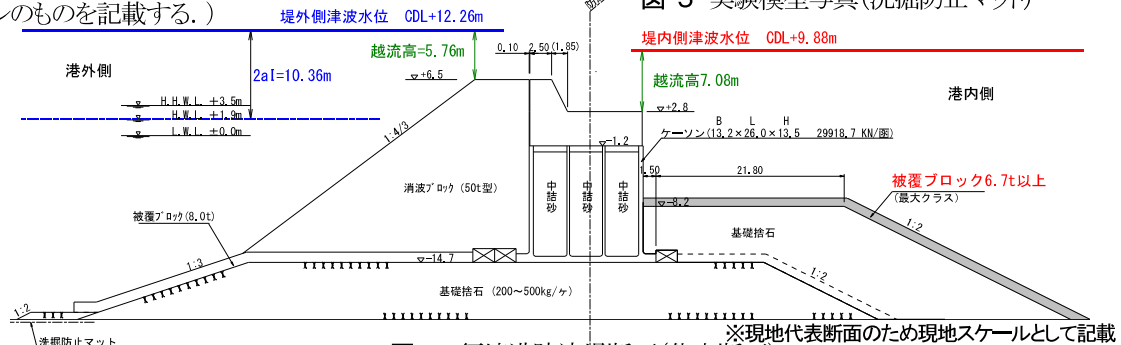
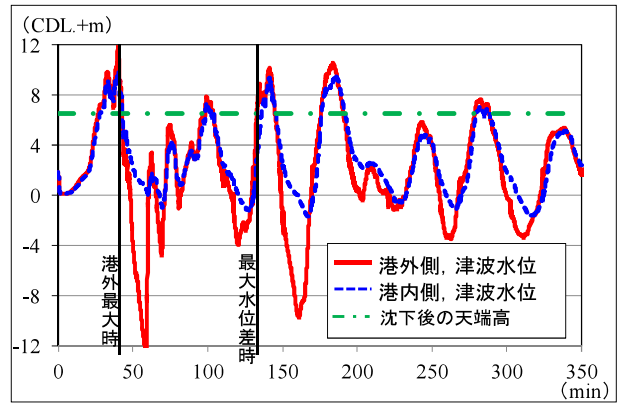


図-6 須崎港防波堤断面(代表断面)

(2) 津波条件

実験に用いる津波水位は、津波シミュレーションから設定した。最大クラスの津波の結果を図-3に示す。シミュレーションから地震発生後40分に堤外側最大水位12.26m, 堤内側水位9.88mとなり、水位差2.38mとなる。なお、境界条件として、防波堤に対して水位が大きくなるように防波堤背後の防潮堤は無限高に設定した。



ケース		堤外 (m)	堤内 (m)	水位差 (m)	時刻 (min)
設計津波	港外最大時	10.27	8.89	1.38	35.6
	最大水位差時	6.51	4.67	1.84	29.5
最大クラス	港外最大時	12.26	9.88	2.38	40.0
	最大水位差時	7.18	2.97	4.21	133.2

図-3 津波シミュレーション(代表断面)



図-4 実験模型写真(被覆ブロック)



図-5 実験模型写真(洗掘防止マット)

(3)防波堤の安定照査

実験に先立ち安定照査を行った結果を表-1に示す。なお、津波波力の計算は、国土交通省港湾局「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に示される方法に則り行った。また、変動状態の波浪の計算は、港湾の技術基準(平成19年7月)に示される方法に則り照査した。結果(表-1)を見ると偶発状態の安全率に余裕がある一方で、沈下後の変動状態は耐力側に余裕がないことが分かる。これは、本防波堤では津波による港内外の津波水位差が小さく越流した後の津波波力がそれほど大きくならなかったことや、本防波堤において対象としている波浪が非常に大きいことが要因と考える。

表-1 安定性照査結果

	偶発状態 地震後(設計津波)	偶発状態 地震後(最大クラスの津波)	変動状態 地震後(波浪_50年確率波)
潮位	H.W.L	H.W.L	H.H.W.L
滑動	4.257 > 1.0	3.168 > 1.0	1.294 > 1.0
転倒	4.015 > 1.0	2.858 > 1.0	1.106 > 1.0

(4)実験結果

1)マウンド流速と質量比

実験結果を図-8及び図-9に示す。図-8よりマウンド中央部においては水位差が大きくなったとしても、流速の値は最大でも1.0m/s程度であるのに対し、マウンド法肩部では、水位差0.5m程度まではマウンド中央部と同様の挙動を示すが、水位差が0.8m程度になると流速が急激に上昇し、最大で3.0m/s程度となる。また、図-9より計算質量と模型質量の比を確認すると、マウンド中央部では本実験においては常に安定していたのに対し、マウンド法肩部では、水位差0.6m程度で必要質量が不足し水位差0.8m程度の箇所においては最大で60倍程度の質量が必要となる結果となった。

2)ブロックの空隙率の違い

実験結果を図-10に示す。最大クラスの津波相当の水位差0.2m(※現地スケール2.38m)においては空隙率の違いに関わらず被覆ブロックの被害は確認されず安定していた。

水位差を最大クラスの津波相当の水位差より更に大きくしていくと空隙率の違いに応じ、空隙率0%は水位差0.41m、空隙率8%は水位差0.53m、空隙率24%は水位差0.63mからそれぞれ被覆ブロックの被害が生じはじめ、被害が生じはじめると空隙率に関係なく被害が急速に拡大していることが見て取れる。

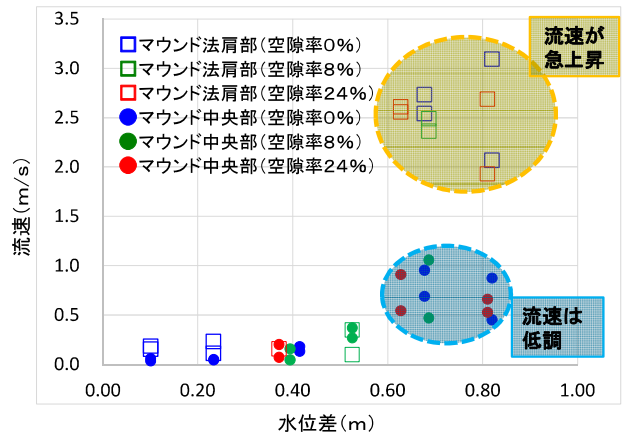


図-7 マウンド流速の関係図

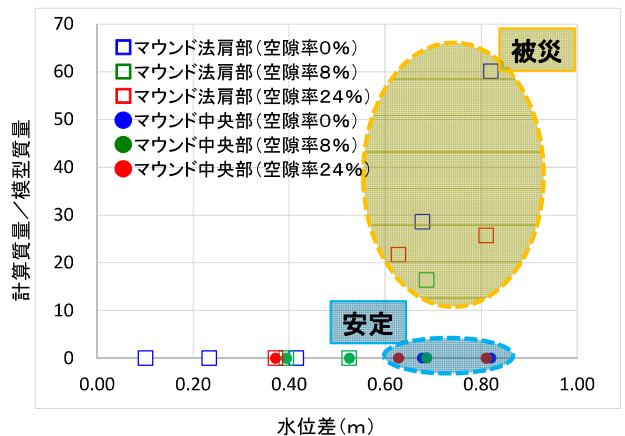


図-8 計算質量/模型質量と水位差の関係図

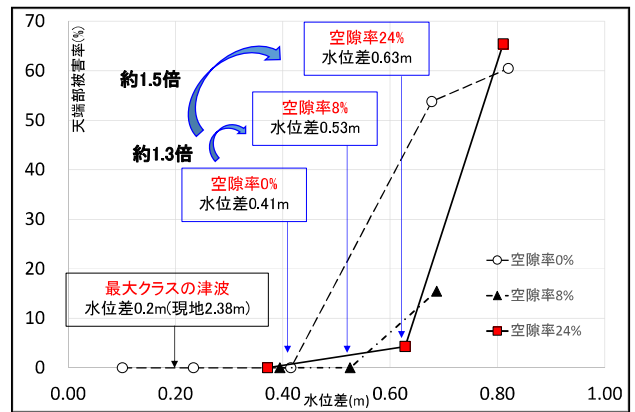


図-9 被害率の関係図(被覆ブロックの空隙率の違い)



図-10 実験時の被覆ブロックの散乱状況(左:空隙率0% 中:空隙率8% 右:空隙率24%)

3) 洗掘防止マットを敷設した場合

実験結果を図-11に示す。洗掘防止マットを敷設した場合においても、最大クラスの津波相当の水位差では被覆ブロックは安定していた。その後、2)と同様に水位差を最大クラスの津波相当の水位差より更に上昇させていくと水位差 0.66m 程度から被害が生じはじめ、0.87m で被害率 22%、0.92m で被害率 38%となった。

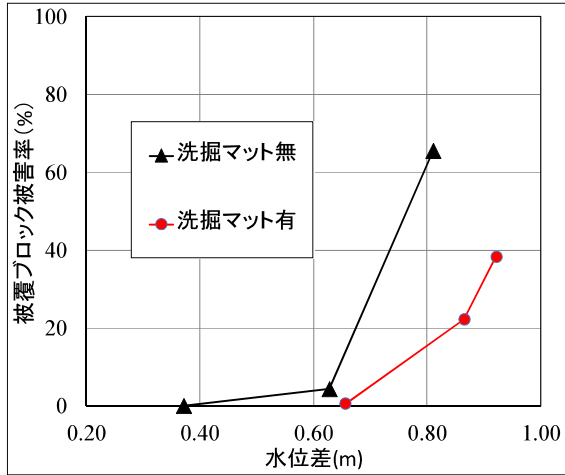


図-11 被害率の関係図(洗掘防止マット)

(5) 実験結果の考察

1) 堤体の安定性について

模型実験における堤体の安定性は、(3)防波堤の安定性照査における照査結果と同様に、最大クラスの津波相当では安定していた。また、被覆ブロックについても最大クラスの津波相当の水位差では被害は確認されなかったことから、堤体背後の洗掘は発生しないものと考えられる。

2) 空隙により被害率に差が生じた要因について

被覆ブロックの上面と下面に生じた圧力を比較したところ(図-12)、空隙率 0%では下面の圧力が-3.6kPa 程度まで上昇すると、上面及び下面で圧力に乱れが生じ-4.0kPa 程度で被害の発生が確認された。しかし、空隙率 24%では下面に生じた圧力が-4.0kPa 程度から乱れが生じるものの、被害の発生は-5.1kPa 程度からとなっており被害発生までの圧力差が大きいことが見て取れる。また、空隙率 24%で作用する圧力を確認すると(図-13)、上下の圧力が連動していることがわかる。空隙率 0%ではこのような連動は見られなかった。よって、空隙率の大きいブロックほど急激な圧力差が生じず被害を受けにくい。このことが空隙率によって被害率に差が生じた要因であったと考える。

3) 洗掘防止マットの効果について

洗掘防止マット無では、被害が発生すると急激に被害率が上昇し、被害率 50%を越える結果となった。一方で、洗掘防止マット有では、洗掘防止マット無と比較して、被害が発生しても被害の上昇が抑えられていた。このことから、洗掘防止マットを敷設することで、堤体背後の洗掘に対し効果があることを確認できた。

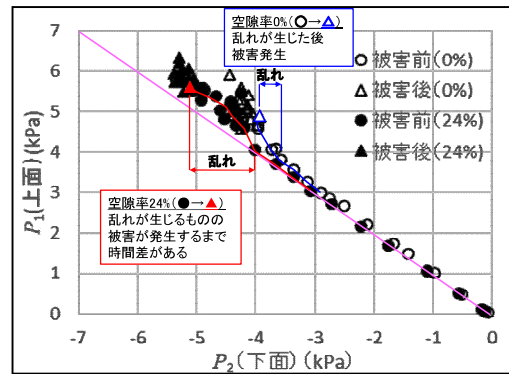


図-12 被覆ブロック上下の圧力変化(空隙率 0%, 24%)

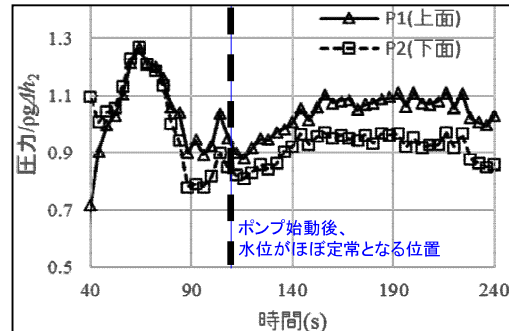


図-13 被覆ブロック上下の圧力の連動(空隙率 24%)

5. まとめ

模型実験より明らかとなった項目について以下に示す。

- ①本防波堤の想定する二つのレベルの津波(設計津波、最大クラスの津波)に対しては、堤体及び被覆ブロックは十分な安定性を有していた。
- ②被覆ブロックに空隙を設けることで、被覆ブロックの被害を抑制する効果を有していた。本実験では、空隙率 0%の被害発生時の水位差が水位差 0.41m であったのに対し空隙率 24%では被害発生時の水位差が 0.63m となり、1.5 倍程度の水位差まで抑制出来ていた。
- ③洗掘防止マットを敷設することで被覆ブロックに対する被害率の上昇を抑え、洗掘による被害を抑制できる効果を持っていることも分かった。

本防波堤のように設計津波を超える津波作用を受けた場合でも減災効果の発揮が求められる防波堤においては、対策の確実性を可能な限り高めることが重要である。そのため、洗掘対策としての腹付工を基本とした対策には、被覆ブロック及び洗掘防止マットの敷設が有効であると考えられる。

参考文献

- 1)南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)
- 2)国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン,平成 25 年 9 月.
- 3)高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹:津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.52 No.2, 2013
- 4)有川太郎, 岡田克寛, 下迫健一郎:防波堤の腹付け被覆ブロックの安定性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2

火山岩類トンネルにおける時間依存性変状の発生メカニズムの解明と地球化学的手法による評価

山崎 秀策¹・岡崎 健治¹・倉橋 稔幸¹・伊東 佳彦²

¹国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 防災地質チーム
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 地質研究監 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

時間依存性を示すトンネル変状の事前評価手法の提案を目的として、掘削から約2ヶ月後に変状が顕在化した国道トンネルを対象に、先進ボーリングコア試料の解析を行った。時間依存性変状の発生は、掘削に伴う岩盤の緩み域において、硫化鉱物の酸化分解と酸性水による炭酸塩鉱物の溶脱により岩石組織の脆弱化が生じ、それに伴い膨張性粘土鉱物の含水膨張が促進され、緩み域が拡大し、膨張圧が増大したためと推定される。この酸化分解・溶脱・膨張のサイクルが徐々に進行・拡大することが、時間依存性を示す理由と考えられる。また、変状発生個所の事前評価法として、岩石の化学組成変化による指標化が有効であることが示された。

キーワード トンネル変状, 時間依存性, 岩石学, 鉱物組成分析, 全岩化学組成分析

1. はじめに

山岳トンネルの施工・管理においてしばしば問題となっているのが、路盤の盤膨れ、覆工のひび割れ・変形などのトンネル変状現象である。中でも、トンネル掘削後あるいは施工完了から数日～数十年の時間が経過した時点でトンネル変状が顕在化する「時間依存性変状」は、事前調査および施工中の調査・計測による評価・検出が困難であり、施工・共用時の経済性・安全管理に係わる解決すべき課題である。時間依存性変状の発生事例としては、新生代の火山岩・凝灰岩など火山岩類を主体とする地山での事例報告が大多数を占めている¹⁾。また、時間依存性変状の発生要因については、火山岩類の地層を形成した火山活動に関連した熱水変質・鉱化作用との関連性が指摘されているが²⁾、時間依存性に関する地質的要因を明らかにした事例は筆者の知る限り報告が無い。そこで本研究では、火山岩地山における時間依存性変状の発生メカニズムの解明とその事前評価方法の提案を目的として、北海道の新第三紀中新世後期の火山岩類からなる地山を掘削した山岳トンネルにおいて発生した時間依存性変状について、トンネル掘削時に採取された先進ボーリングコア試料の記載岩石学および地球化学的な解析を行った。

2. 調査トンネルにおける時間依存性変状の概要

本研究の調査対象は、北海道石狩地方に2014年に完成した延長約3kmの国道トンネルである。北海道開発局による施工情報によると、トンネル地山は、起点側から終点側に向かう単斜構造を示し、岩種と変質程度により、起点側より弱～中変質の安山岩溶岩・自破碎溶岩、非～弱変質の安山岩・自破碎溶岩、非変質の安山岩溶岩に3区分されている(図-1)。時間依存性変状は、トンネル中央部の最大土被り部(厚さ約330m)周辺の非～弱変質の安山岩・自破碎溶岩内に位置する起点側抗口から1600m付近(以下、起点側)および、土被り約290m部の1715m付近(終点側)の2個所で発生した。変状発生区間における先進ボーリング試料の調査報告書によると、対象区間は孔内弾性波速度検層により起点側が $V_p=3.5$ (地山強度比5.1)を示し、RQD(5)は平均で99と亀裂がほとんど認められない。一方、終点側は、RQD(5)平均が77とやや亀裂が認められる。両変状区間ともに亀裂数は周囲と変わらず、両区間の岩級区分は、周辺の健全部と共にCII級と判定された。岩相の記載として、両変状区間を含む区間は、暗灰色の安山岩礫・ブロックを不均質に含む灰色の自破碎状安山岩が一様に分布しており、炭酸塩鉱物脈および黄鉄鉱粒子を含むとされ、全体に亀裂の少ない塊状岩盤であるが岩片は一部でやや軟質で、容易に細粒化・泥滓化すると記載されている。また、起点側変状区間では掘削時の切羽観察においては、先進コ

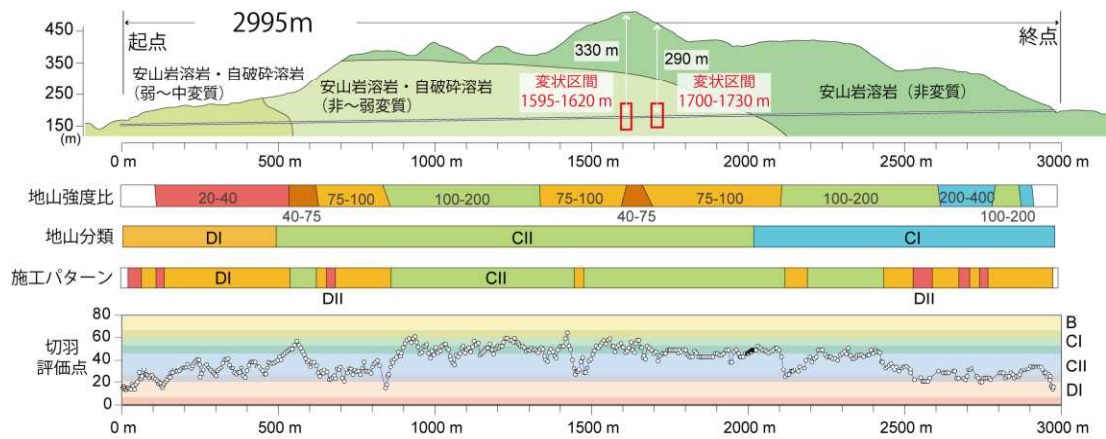


図-1 調査トンネルの地質断面，事前調査結果（地山強度比・地山分類），施工パターンおよび切羽評価点

ア試料に認められない変状区間内に最大厚 10 m 程度の強変質軟弱部が出現するが，岩級区分に用いられた切羽評価点は，起点側変状区間の 46.75～56，終点側は 39.5～47.5 と，変状区間内外（1500～1800m 区間の統計として，最低値 39.5，最大値 59.25，平均値 $49.8 \pm 4.5 [1\sigma]$ ）で差は認められず，変状発生区間は共に CII パターンにて設計・施工された。なお，本トンネルにおける CII パターンでは，路盤の泥濘化や地山岩類が高いスメクタイト（膨張性粘土鉱物）の含有量を示すことから，長期的安定性確保のために全線でインバートの設置が行われている。

起点側における時間依存性変状の顕在化の経緯は，トンネル掘削による切羽の通過から 55 日経過した時点で，盤膨れに伴う支保の変状が発生したため，増しロックボルトによる変状抑制工が実施された。その後インバートコンクリートが打設されたが，切羽通過後 66 日目に，打設されたインバートコンクリートに最大 10cm のズレが生じ，縫返し対策が実施された。終点側の変状区間においても同様の経緯を示し，吹き付けコンクリートのク

ラックおよびロックボルトの破断が認められ，縫返し対策が実施された。

先行研究では，本トンネルにおける変状の発生要因は，掘削に伴う周辺地山の緩みと粘土鉱物による膨張圧が複合的に作用ためと推測されており，調査ボーリングによるコア試料の解析から，中～アルカリ性の熱水変質を受けたデイサイトが，膨張性判定の指標³⁾となる 20%超のスメクタイトを含有することが，膨張地圧の素因であると報告されている⁴⁻⁵⁾。また，この変状発生区間の先進ボーリングコアには，掘削直後は健全であった部分が膨張した後，細かな岩片へと崩壊する現象が掘削後から数日～数ヶ月以上の時間をおいて発生し，33 ヶ月経過した時点においても膨張・崩壊の進行が認められることから，時間依存性変状の発生過程との関連性が指摘されている（図-2）²⁾。

3. 解析手法

両変状区間を含む 1490～1760m の区間の先進ボーリングコア試料から 95 試料を採取し，偏光顕微鏡による岩石薄片の記載，鉱物化学組成分析，全岩化学組成分析を実施した。鉱物組成の分析は，めのう乳鉢・タングステンカーバイド製スライドミルにて粉末化した試料を，ガラス製ホルダーに充填した不定方位試料を，寒地土木研究所設置の PANaritical 社製 X 線回折装置 Empryean にて測定した。全岩化学組成は，同じ粉末試料を油圧シリンダーにて加圧成形したペレット試料を，寒地土木研究所設置の日本電子 JSX-3600II により検量線法にて定量分析を行った。

4. 結果

(1) 先進ボーリングコア試料の記載岩石学的特徴

先進ボーリングコア試料および岩石薄片の観察結果は以

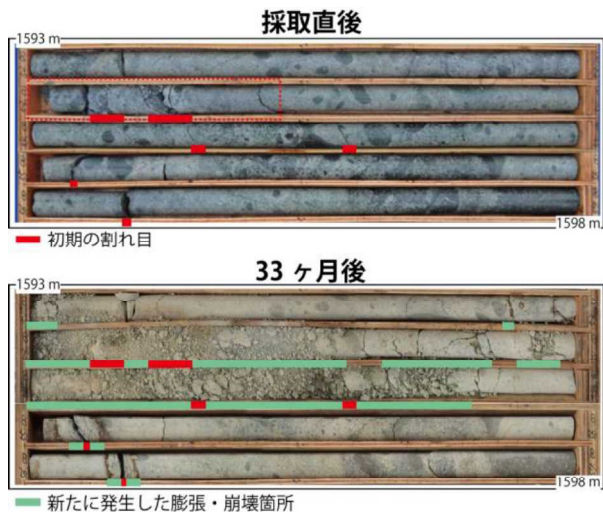


図-2 変状発生区間近傍の先進ボーリングコア試料に認められた膨張・崩壊現象の進行

下の通りである。起点側の変状区間内外の岩相は共通しており、球状～不規則形状の暗色包有物を多数伴った安山岩～デイサイト質溶岩を主体とし、暗色包有物と同質の玄武岩質塊状溶岩と、両者の中間的な組成をしめす玄武岩質～デイサイト質溶岩部を不均質に伴う一様な塊状溶岩の地層から構成されている(図-2)。施工時のコア試料観察結果では、自破碎状溶岩と記述されていたが、正しくは自破碎状を示さない安山岩質の塊状溶岩である。観察した範囲では岩相の差異によらず、石基組織は共通して変質鉱物による交代のため、初性的な組織は不明瞭である。また、2 次的な変質鉱物として、変状区間の内外に共通して、粘土鉱物(スメクタイト類)・シリカ鉱物(クリストバル石)による初性鉱物・火山ガラスの交代が認められる。また、岩石の空隙や割れ目を脈～パッチ状に充填し、岩石組織を強固にセメント化している炭酸塩鉱物(方解石)と、石基部に散在する硫化鉱物(黄鉄鉱)も共通して認められる。一方で、変状区間付近の試料に限り、数 mm～数 cm の硫化鉱物(白鉄鉱)脈の形成が認められ、局所的な鉱化作用の存在が示唆される。また、変状区間内近傍の特徴として、間隙を充填する炭酸塩鉱物の周辺および全体に反応縁が認められ(写真-2)、一部では炭酸塩鉱物が完全に溶脱している様子が認められる。コア試料において、炭酸塩鉱物の溶脱が顕著に認められる個所では、空隙に硫酸塩鉱物(石膏)の晶出を伴うことが多い。

以上をまとめると、起点側の変状発生区間近傍は一様に同種の安山岩～デイサイト質溶岩から形成されており、初性的な構造や岩相の変化などが、時間依存性変状の要因となったとは考えられない。一方で、2 次的な膨張性粘土鉱物、炭酸塩鉱物、硫化鉱物などの出現は、トンネルルートは広域的な熱水変質と局所的な鉱化作用の影響化にあったことを意味しており、これら 2 次的な変質鉱物の存在が、時間依存性変状の発生要因に関わるものであると考えられる。

(2) 鉱物組成・全岩化学組成分析結果

変状発生区間近傍と健全部との比較においては、変状発生区間周辺の変質鉱物組成に特徴的な変化が認められた。変状発生区間周辺では、硫化鉱物(黄鉄鉱・白鉄鉱)と硫酸塩鉱物(石膏・鉄明礬石)が検出可能な含有量で局所的に分布している(図-4)。また、各鉱物特有

のピークの高さを比較することで分かる、定性的な含有量変化を見ると、膨張性粘土鉱物であるスメクタイトは、変状区間内外で共通して高い含有量(恐らく 20%以上)を示すが、起点側の変状区間近傍で周囲より若干含有量が高い(図-4)。

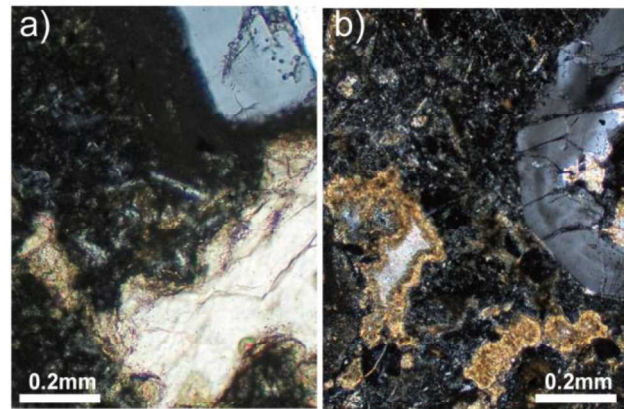


図-3 先進ボーリングコア試料の偏光顕微鏡写真(クロスニコル)。 (a)変状区間外(起点から 1570m)の方解石と比べて、(b)変状区間近傍(1592m)の方解石には反応縁が認められる。

一方で、全岩化学組成の変化として、健全部(弱変質部)と変状発生区間(強変質部)の試料による比較では、Ca, Na, Mg, K, Sr, Ba の減少(溶脱)と S の増加(付加)が認められた。S の付加は熱水変質・鉱化作用により硫化鉱物が結晶化したためと考えられる。また、Na, K などの溶脱は熱水との反応による斜長石の分解と粘土鉱物による交代を、また Ca, Sr, Ba の溶脱は炭酸塩鉱物の溶脱による流出によるものと解釈される。

5.考察

(1) 時間依存性変状の発生メカニズム

先進ボーリングコア試料の偏光顕微鏡観察および鉱物化学組成の変化より、変状発生区間近傍が 2 次的な粘土鉱物による交代と、硫化鉱物の鉱化作用を伴う広域的な熱水変質の影響を被っていたことが明らかとなった。また、炭酸塩鉱物(方解石)に反応縁が認められること(図-2)は、炭酸塩鉱物の溶脱現象の存在を示唆しており、また、溶脱後に硫酸塩鉱物が新たに晶出しているこ

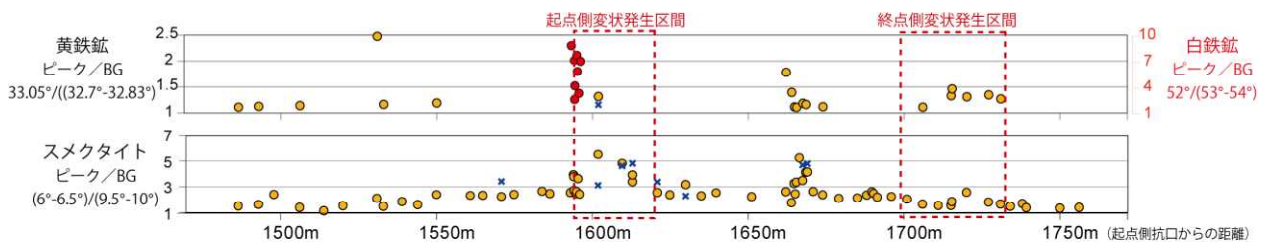


図-4 回折 X 線分析による鉱物含有量の定性的な変化傾向(凡例, ●: 安山岩溶岩, ×: 暗色包有物)

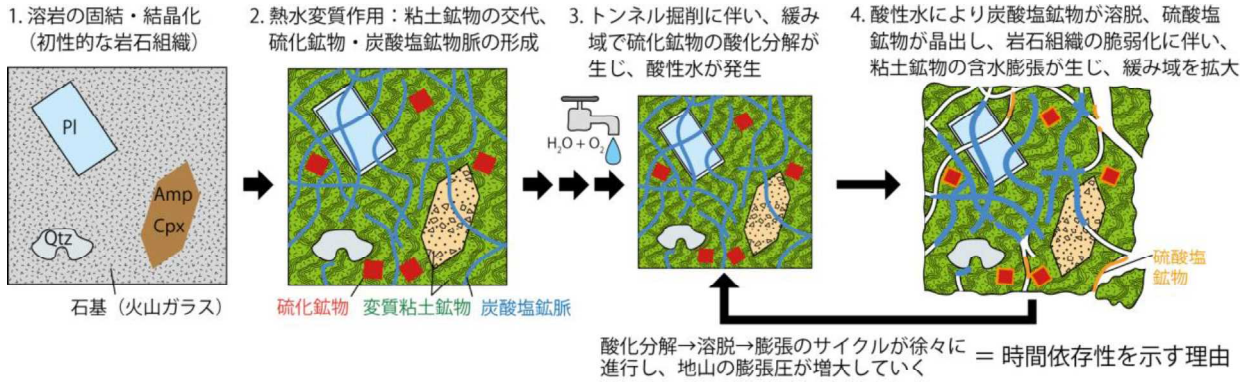


図-5 対象トンネルにおける時間依存性変状の発生メカニズムの模式図

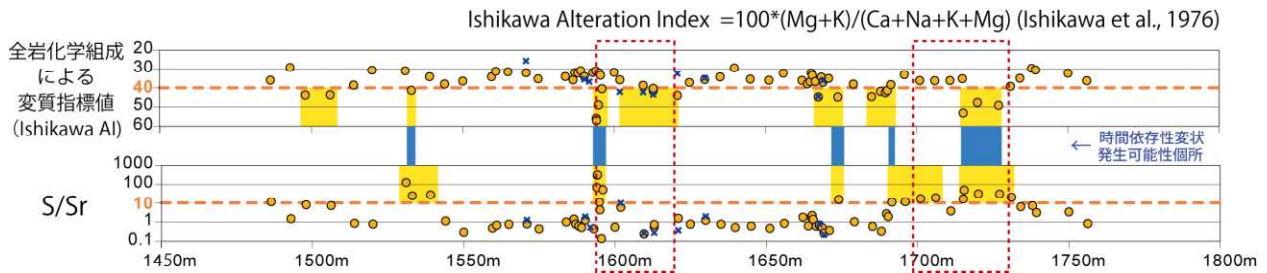


図-6 全岩化学組成 (Mg, Ca, Na, Kによる変質指標と S/Sr 比) による、時間依存性変状発生個所の評価

とから、硫化鉱物の酸化分解により放出された硫酸イオンと、炭酸塩鉱物の溶脱に伴うカルシウムイオンとが反応して石膏 (化学式: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) が生成されたと考えられる。これは、硫酸性の酸性水が生成されていた証拠である。また、回折 X 線分析の結果において、変状発生区間近傍では硫化鉱物の含有量が高く、その酸化分解生成物である石膏などの硫酸塩鉱物の含有が認められることと調和的である。この変状発生区間近傍の先進ボーリングコア試料に認められた岩石組織および鉱物組成の変化から、時間依存性変状の発生メカニズムは次のように推定される (図-5)。

対象トンネルにおける時間依存性変状の発生は、トンネル掘削による岩盤の緩み域に、水と酸素が供給されることで、変状発生区間周辺に局所的に存在した硫化鉱物の酸化分解を生じた (図-5 の 3)。硫化鉱物の酸化分解は、硫酸性の酸性水を生成し、その酸性水により周囲の硫酸塩鉱物の溶脱が生じる。そして、岩石組織を強固に拘束していた炭酸塩鉱物が溶脱することで、元々高い含有量で含まれていた膨張性粘土鉱物の含水膨張が可能となり、岩石の膨張・脆弱化がさらに進行する (図-5 の 4)。この硫化鉱物の酸化分解→炭酸塩鉱物の溶脱→膨張性粘土鉱物の含水膨張のプロセスが繰り返されることで緩み領域が拡大し、地山の膨張圧がトンネルの耐久力を超えたことで、トンネル変状が顕在化したと考えられる。従って、時間依存性を示す理由は、硫化鉱物の酸化分解の進行と炭酸塩鉱物の溶脱に時間が掛かったためであると考えられる。

(2) 全岩化学組成による時間依存性変状発生可能性個所の評価

本研究のような岩石学的解析を行うことで、他の事例においても時間依存性変状のメカニズムを解析することが可能であると思われる。しかしながら、実際のトンネル調査・施工現場において、このような解析を高密度に実施することは困難であろう。そこで実際の施工現場において、トンネル切羽の進行、先進ボーリングの調査期間において十分対応可能な解析手法として期待されるのが、蛍光 X 線分析をはじめとした化学組成分析手法である。

本トンネルにおける変状発生は、熱水変質を起源とする膨張性粘土鉱物の高含有個所と、酸性水の起源となる硫化鉱物の局所的な分布が重なった個所で炭酸塩鉱物の溶脱が進むことで生じたと推測されるが、これを岩石の全岩化学組成の視点から見ると、変状発生個所において、熱水変質による粘土鉱物交代作用ではナトリウム、カルシウム、ストロンチウムなどの変質により移動しやすい元素が減少すること、硫化鉱物が存在する個所では硫黄含有量が高いことが期待される。岩石の風化や変質を定量化するために、変質により移動しやすい元素の挙動を用いて、0-100 の数値などに指標化する手法が数多く提案されている⁶⁾。本研究では Ishikawa et al.⁷⁾による変質指標により膨張性粘土鉱物の交代を主とする熱水変質作用の影響個所を指標値 40 を閾値として可視化し、さらにそれに加えて硫化鉱物の分布と炭酸塩鉱物の溶脱個所を、硫黄含有量とストロンチウム含有量の比が 10 を超える個所として、変状が発生する可能性がある個所の抽

出を試みた(図-6)。両指標で抽出された分布域が重なる範囲は、変状発生個所と比較的よく一致することから、全岩化学組成を用いた変質・鉱化作用の指標化は、時間依存性発生可能性個所の評価・検出法としてある程度有効であると考えられる。今後の展開として、多種多様な地山における同手法の適応可能性を検証を行い、全岩化学組成による変質の指標化を切羽やボーリングコア試料の評価の重み付け等に活用することで、トンネル掘削現場における即時性の高い評価・検出法の提案を目指したい。

6. まとめ

北海道の火山岩類を主体とする地山を掘削した国道トンネルにおいて発生した時間依存性変状の事例を対象に、先進ボーリングコア試料の岩石学的・地球化学的解析を行った結果、以下の知見が得られた。

変状発生区間近傍の解析から、時間依存性変状が発生した区間は、特に強度の熱水変質と硫化鉱物の形成が生じた領域として特徴付けられ、硫化鉱物の酸化と炭酸塩鉱物の分解に続く粘土鉱物の含水膨張のサイクルが局所的に継続することで、トンネル内空に時間依存性変状が顕在化したと推定された。

時間依存性変状が発生した区間の岩石組織・鉱物組成・全岩化学組成の変化は互いによく対応していることから、トンネル掘削現場に適応可能な簡便な化学組成分析を調査手法として活用することで、これまで検出が困

難であった、時間依存性変状の事前評価・検出法として活用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの変状メカニズム(変状事例集)，pp214-269, 2003.
- 2) 山崎秀策, 岡崎健治, 倉橋稔幸, 伊東佳彦：P40 先進ボーリングコアを利用した山岳トンネルの時間依存性変状の要因解析：北海道の後期中新世火山岩類を例として，平成 27 年日本応用地質学会研究発表会論文集，pp.213-214, 2015.
- 3) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準施工方書[山岳工法]同解説, 第 2 編計画および調査 pp. 7-50, 2006.
- 4) 佐藤嘉高, 多田和広, 佐々木隆, 石黒聡, 宇治川徳夫, 福田和寛：熱変性を受けた自破碎溶岩によるトンネル変状部の施工，土木学会第 68 回年次学術講演会，IV-393, 2013.
- 5) 佐々木隆, 宇治川徳夫, 石黒聡：熱水変質軟弱層による施工中の盤膨れを縫返し工で克服，トンネルと地下，Vol. 44, No. 11, pp. 7-15, 2013.
- 6) Duzgoren-Aydin N.S., Aydin, A. and Malpas, J.: Re-assessment of chemical weathering indices: case study on proclastic rocks of Hong Kong, *Engineering Geology* 63, 99-119, 2002.
- 7) Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., Horiuchi, M.: Delineation of prospective targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology* 26, 105-117, 1976.