

地上・地下統合浸水解析モデルを用いた輪島市 下水道施設の津波による想定外被害の推定

安田 誠宏¹・山中 明彦²・池本 良子³・宮島 昌克⁴・
森崎 啓⁵・高野 典礼⁶・大谷 卓⁷・岡部 良治⁸

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)
E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町2丁目3-13)
E-mail: akihiko.yamanaka@os.pacific.co.jp

³正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: rikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3丁目22番地)
E-mail: hirosaki.morisaki@os.pacific.co.jp

⁶正会員 石川工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)
E-mail: takano@ishikawa-nct.ac.jp

⁷学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)
E-mail: takumacbook182@gmail.com

⁸元関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)
E-mail: 0ca.ryo2@gmail.com

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、多くの下水道施設にも大きな被害を与えた。下水管渠、人孔、処理場、ポンプ場が被害を受けた。管路施設内に滞水、汚泥堆積が起り、流下機能支障による汚水の溢水や、管路内に浸入した津波によるマンホール蓋の飛散も確認された。本研究の目的は、石川県輪島市をケーススタディの対象地として、輪島市における下水道事業業務継続計画BCPで想定されていない、下水道施設の津波による被害の可能性を検討することである。標高データおよび道路データを用いた地表面のモデル化、海岸線のモデル化と流入津波水位の作成、人孔や管渠のデータを用いた下水道のモデル化を行い、さらにモデルを統合し、津波浸水シミュレーションを行った。

Key Words : sewer system, BCP, unintended tsunami damage, integrated inundation simulation

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、太平洋沿岸部に壊滅的な津波被害を与えた。この津波は、人的な被害や家屋の流出だけでなく、下水道施設にも大きな被害を与えた。管渠の被害は1都10県に及び、被害延長は642km、施設被害は48処理場、79ポンプ場が稼働停止であった¹⁾。東日本大震災においては、地震動による被害、液状化による被害に加え、津波による被害など、被害の要因が多岐にわたった¹⁾。管渠被害では、液状化

による被害が顕著で、全体のおよそ9割を占めた。人孔についても、液状化による被害が約7割と高い割合であった。処理場およびポンプ場においては、津波による被害割合が半数以上と多い傾向であった。また、津波によるマンホール蓋の流出被害が数多く確認され、マンホールポンプの制御盤の機能停止被害も起こった¹⁾。管路施設内に滞水、汚泥堆積が起り、流下機能支障による汚水の溢水も確認された。さらに、気仙沼市では、管路内に浸入した津波により、幹線管渠(汚水)のマンホール蓋が飛散し、道路上に大きな水柱が上がる現象が発生し



図-1 マンホール蓋の飛散の様子²⁾

た(図-1)²⁾。マンホール蓋の飛散については、過去にゲリラ豪雨によって問題が表面化し、その対策として圧力開放型蓋の導入が進められているが、津波による飛散事例は少なく、対策が十分であるかどうかの検討が必要である。また、地盤沈下、排水機場の損壊、がれきによる排水路の閉塞、停電による揚水ポンプの停止等により、排水が困難となり、湛水が長期継続した。

津波により下水道施設が被災するとトイレが使用不能となるほか、公衆衛生問題の発生も懸念される³⁾。しかし、下水道施設は、大部分が地下に埋設され、日常生活においては、その存在も軽視され、老朽化の問題や耐震化対策への緊急性について、エンドユーザーである住民の認識が低く、十分な対策がなされていない状況がある。下水道施設はこれまで、耐震対策を中心に対策を講じてきたが、津波への備えは十分に議論されていなかった。

このような背景から、津波による被害が予想される地域においては、陸上の浸水による被害想定だけでなく、下水道施設の被害がどう複合的に影響するかについても考慮すべきといえる。本研究で対象とする石川県輪島市においても、津波浸水想定がなされているが、下水道への津波の流入は考慮しておらず、下水道施設の被害による影響まで考慮されていない。本研究の目的は、下水道施設の津波による想定外の被害を、地上の浸水と地下の下水管渠流れの統合解析によって推定することである。輪島市の下水道施設を対象にケーススタディを行い、想定外の被災が生じる可能性があるかどうかを検討する。

2. 対象地における下水道事業と津波浸水想定

(1) 公共下水道事業

輪島市の公共下水道事業は、平成6年度より輪島処理区に事業着手して以来、整備が進められ、平成12年6月に輪島市浄化センターの供用を開始している。平成25

年度末の下水道処理人口普及率は99.8%(=13,937人/13,970人)である。一方、平成25年度末の全国下水道処理人口普及率は77.0%である。このことから、本研究の対象地である石川県輪島市は、全国の市町村と比較しても、下水道処理事業が広く普及している地域といえる。

輪島市公共下水道事業計画⁴⁾によると、輪島処理区の下水道計画区域は、既成市街地387haである。一般的に、下水の排除方式は、分流式と合流式に大別される。大都市では主に、浸水解消を目的として施工されてきた背景から、合流式を採用しているところが多い。しかし、下水道施設が公共用水域の水質保全という役割を課せられて以来、合流式の雨天時における未処理放流および、初期降雨時における水質悪化等の問題から、分流式を採用する都市が圧倒的に増えてきている。輪島市の場合、雨水については、公共下水道事業以前に整備された雨水排水管等により浸水に対応している。公共用水域の水質保全並びに生活環境の改善を図るための污水排除計画事業を進めることは急務であり、費用的にも安価で、事業効果の早期達成・投資効率の観点から、分流式を採用している。

輪島市の下水道計画区域、浄化センターとポンプ場の位置、および下水の流れを図-2に示す。輪島地区の污水处理を担っている輪島市浄化センターは、対象地域の西端に位置する山本町の山裾に位置する。一般的には污水处理場は海岸付近に設置されるが、輪島地区では高地に処理場が設置されている。そのため、対象地には污水を圧送するためのポンプ場が2つ存在している。1つは河合町中継ポンプ場であり、輪島市の中心を流れている川原田川東側からの污水を堀町ポンプ場へと圧送するものである。もう1つは堀町ポンプ場であり、河合町中継ポンプ場からの污水に加え、川原田川西側からの污水を輪島市浄化センターへと圧送するものである。それぞれのポンプ場への污水の集水方法は、いくつかのマンホールポンプによる圧送は含むものの、基本的には自然流下



図-2 輪島市下水道と下水(污水)の流れ



図3 輪島市津波浸水想定図（能登半島北方沖地震）

によって集水される。そして輪島市浄化センターで処理された水は、2級河川の鳳至川へと放流される。

(2) 津波浸水想定

石川県輪島市は、能登半島北部に位置しており、その北側は日本海に面している。東日本大震災後に制定・施行された津波防災地域づくりに関する法律により、都道府県知事は津波浸水想定を最悪のケースを想定して設定するものとされた。しかし、これまで日本海においては、太平洋側の海溝型巨大地震に比べると、歴史記録や津波堆積物等の地質記録が少なく、想定地震について十分な検証ができていない状況であった。これを受けて、国交省、内閣府、文科省による「日本海における大規模地震に関する調査検討会⁹⁾」により、最大クラスの津波の断層モデルが設定された。石川県⁹⁾はこの断層モデルをもとに、周辺海域で4つの津波波源を想定し、シミュレーションを行い、津波浸水想定区域図（ハザードマップ）を作成した。輪島市輪島地区のハザードマップ⁷⁾のうち、能登半島北方沖を波源とする最大想定ものを図-3に示す。このハザードマップより、堀町ポンプ場と河合町中継ポンプ場には、陸上を氾濫する津波は到達しないと想定されていることがわかる。

(3) 下水道事業業務継続計画

輪島市の上下水道課は、下水道事業業務継続計画<地震・津波災害版>⁸⁾（以下、下水道BCP）を制定している。一般的に、下水道事業における業務継続計画とは、地震や津波などの緊急事態において、事業資産の損害を最小限にとどめつつ、事業の中核となるライフラインとしての機能を、継続あるいは早期復旧を可能とするために、平常時に行うべき活動や緊急時における事業継続のための方法などを取り決めておく計画のことである。輪島市の下水道BCPには、非常時対応計画、事前対策計画、教育訓練計画、維持改善計画の4つの計画を策定や、下水処理施設の災害への対策、加えてマンホールからの溢水箇所の想定と対策等が記されている。全体の管路延長

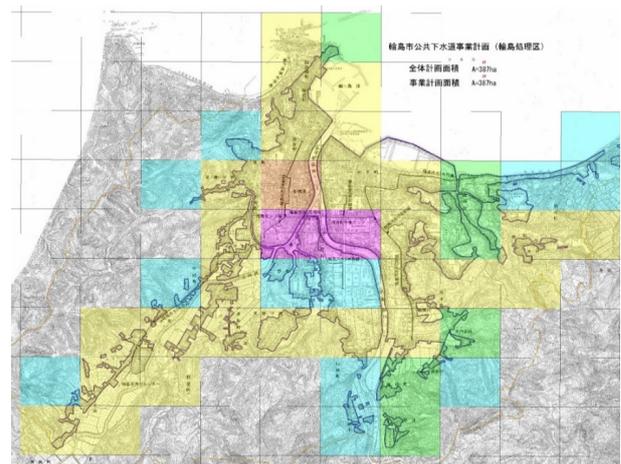


図4 輪島処理区における液状化による管路被害想定

の約16.8%程度は被害が想定されており、輪島処理区の鳳至地区、河井地区付近で比較的被害が想定されている（図-4）。堀町ポンプ場、河合中継ポンプ場、輪島市浄化センターではレベル2地震動に対して耐震性を確保しており、電源の喪失に備えて12時間分の自家発電設備を備えていることも記されている。しかし、浸水想定で津波が到達しないと想定されていることから、これら施設に対する津波対策は策定されていない。また、被害想定結果より、鳳至地区においてマンホールからの汚水溢水が想定されており、近傍の河川・水路管理者・水利権者と災害時緊急放流の協議・調整を図っていくとされている。汚水溢水の対策としては、比較的水量が少なく管内貯留ができる箇所では、バキューム車による吸引対応や水中ポンプによって下流のマンホールへ送水を行い、水量が多い箇所や管内貯留ができない箇所では、マンホール周囲に土嚢を用いた仮設水路を設置し、下流のマンホールへ誘導を行う、または、近傍水路等への消毒放流の措置を講じるとされている。

3. 解析方法

(1) 統合浸水解析モデル

本研究では、氾濫解析モデルとして InfoWorks ICM（以下、IW）を利用する。IWは下水道管路網を考慮して、地表面氾濫解析を行うことができる。本研究で用いるモデルは地表面流出モデル、管内水理モデル、地表面氾濫モデルから構成されている。IWにおける解析の流れは、津波により地表面に氾濫水が流れ、考慮している下水管に流入し、下水管が満管になると溢水する。そして、溢水した水の挙動は、地表面氾濫モデルにより計算される。管内水理モデルは、Saint Venant 方程式に基づく DynamicWave 法を適用し、管渠内の水理計算を行っている。なお、圧力管状態を計算する際には、下水道管の頂

部に仮想のスロットを設けることで、管路流を開水路流として扱うことのできる Preissmann のスロットモデルを用いている。これらの式を式(1)および(2)に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\cos \theta \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q : 流量(m³/s), g : 重力加速度(m/s²), t : 時間(sec), K : 輸送能力, θ : 管底の水平角, A : 断面積(m²), S_0 : 管底の勾配である。地表面流出モデルには単一線形貯留モデルを用いた。貯留式を式(3)に示す。

$$S = kQ \quad (3)$$

ここで、 S : 貯留量(m³), Q : 流出量(m³/s), k : 線形貯留係数である。

(2) 地形のモデル化

輪島地区のモデル化に当たって、国土地理院の基盤地図情報を利用した。まず道路縁を入力し、次に海岸線を入力した。図-5 に道路縁を緑色、海岸線を水色で示した。次に、地形データからメッシュポリゴンを作成するにあたり、今回は川の遡上を考慮しないことから、川の内部を非計算メッシュに設定した。図-6 に川の境界線を赤色で示した。そして、地形データとして数値標高モデル 10m のグリッドデータを使用し、IW によって非構造格子計算メッシュを切った。IW が任意の点を抽出し、その点の地盤高を周囲の地形データの平均から読み取り、その点を頂点とする三角形メッシュを大量に作成する。これを利用することで地表面での水の動きを計算する。非構造格子計算メッシュを図-7 に示す。

(3) 入力津波水位の検討

津波は、上で設定した海岸線からの水位の時間変化によって入力した。石川県が想定している、日本海東縁部、能登半島東方沖、能登半島北方沖、石川県西方沖の4つを波源とする地震のうち、対象地に最も被害を与えると考えられる能登半島北方沖を波源とする地震による津波の最大浸水深の計算結果を対象とした。図-2 に示した津波ハザードマップの浸水域を再現するための、入力水位の時間波形について検討した。まず、図-8 に示す能登半島北方沖地震津波による対象地域における最大浸水深図から、最大津波浸水深を約4.5mと推定し、最大水位が4.5mの正弦波を、半周期20分として入力した。しかし、ハザードマップと比べると、最大浸水深が大幅に小さく

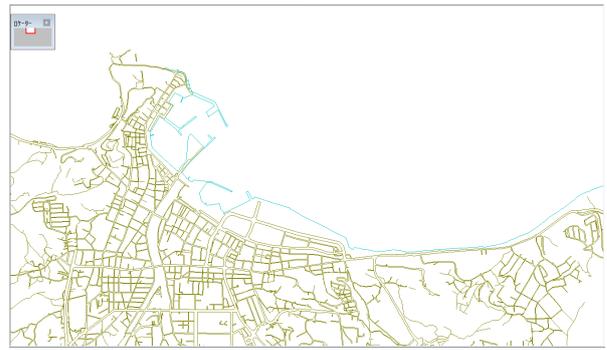


図-5 道路縁（緑線）と海岸線（水色線）

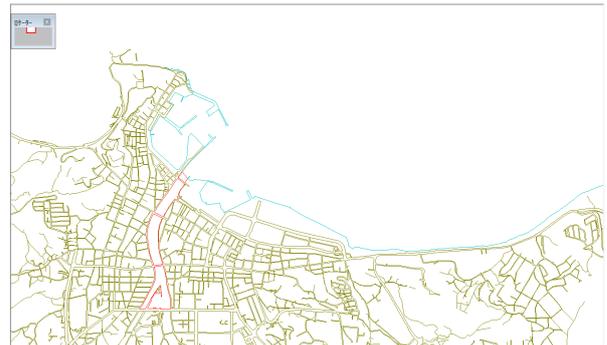


図-6 川（赤線）

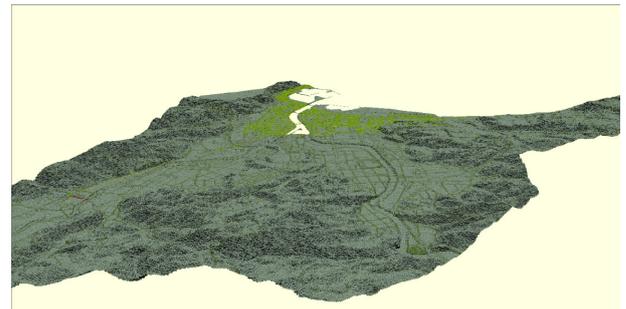


図-7 10m数値標高データから作成された非構造格子計算メッシュ

なりました。これは、津波を海岸線での水位変化として入力を行ったため、津波が流入した途端に波が崩れてしまい、その結果、ハザードマップと比べると最大浸水深が小さくなってしまい、整合性がとれなかったのではないかと推測した。入力波の改善を図り、正弦波の半周期20分という設定はそのまま、最大水位を増やすことで流量を増やし、ハザードマップとの整合性を調べた。だが、最大水位を15mまで引き伸ばしても、ハザードマップの浸水深より小さい結果しか得られなかった。そこで、最大水位の継続時間についても変更することにした。試行錯誤の結果、最大水位が6.0m（浸水深4.5m+海岸付近の地盤高1.5m）で、その水位が70分間継続するとした、合計90分間の水位の変化を入力すると、図-9のような最大浸水深となり、ハザードマップとの整合がよい結果を得ることができた。

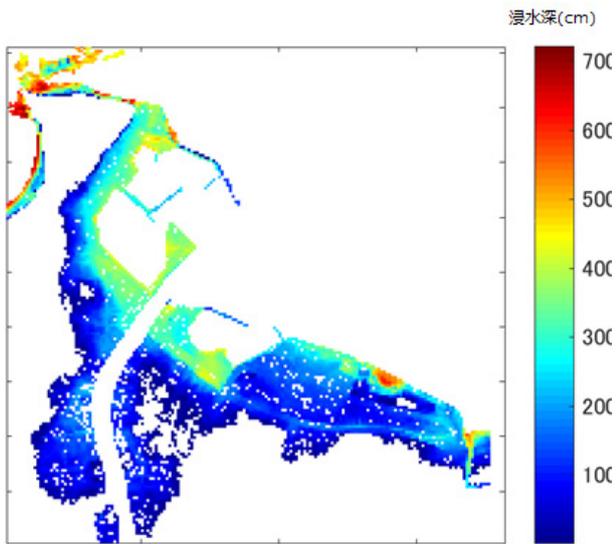


図8 能登半島北方沖地震津波による最大浸水深図



図9 IWによる津波浸水の再現計算結果

(4) 下水道のモデル化

ここでは、対象地に存在する人孔、管渠、ポンプ場のモデル化について記述する。今回使用したデータは、管渠1本とその上流人孔と下流人孔のデータが1つになっているものを使用した。管渠については、管径、延長、上流管底高、下流管底高、勾配、のデータを利用した。人孔については、直径と位置のデータを利用した。人孔の地盤高は、IWによって地形モデルから推測した値を使用した。そして、人孔に必要なデータとして、人孔の底のレベルが必要となったがこのデータがなかったため、人孔に接続されている管渠の管底高を底のレベルとして使用することで対応した。接続されている管渠の管底高が2つ以上あるものについては、その中で最も低い値を使用した。管渠と人孔のデータ全てをプロットしたものを図-10に示す。解析時間と、管底高等の不完全データの修正の効率化のため、津波による流入が想定されない人孔及び管渠は削減することとした。削減後の管渠と人孔

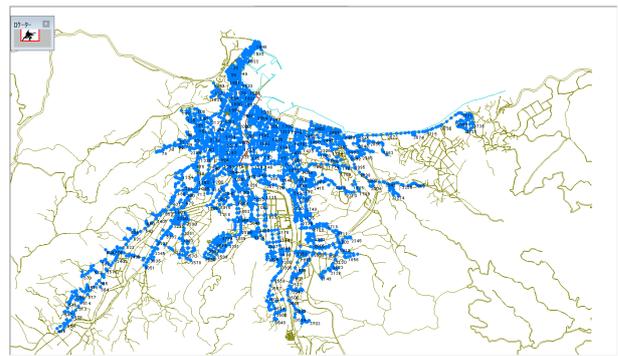


図-10 全下水道管網

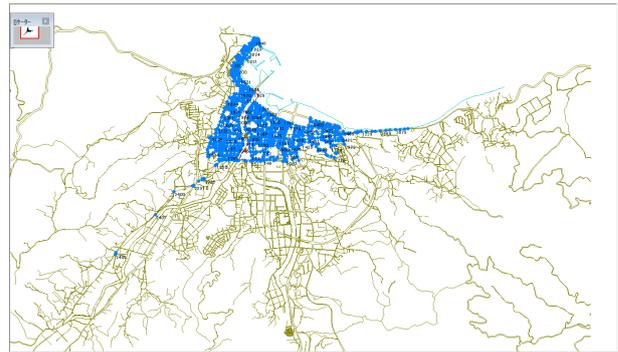


図-11 津波の流入可能性がある下水道管網



図-12 ポンプ場及び処理場の位置 (図中△印)

を図-11に示す。

加えてポンプ場のモデル化については、ポンプモデルの上流に、ポンプ場の最大容量分の体積を持つノードを作ることでポンプ場の被災を考慮しようと考えた。図-12にポンプ場と処理場の位置をプロットした図を示す。ポンプ場の最大容量や、稼働水位、停止水位は、ポンプ場の図面からの推定によって決定したため、誤差を含んでいる可能性がある。加えて、管渠のデータにおいて、主に圧送管の管底高のデータが欠落していたため、その部分は上流と下流を辿って、存在する管底高の差を管路延長で比例配分することで補間を行った。

4. 被害推定結果

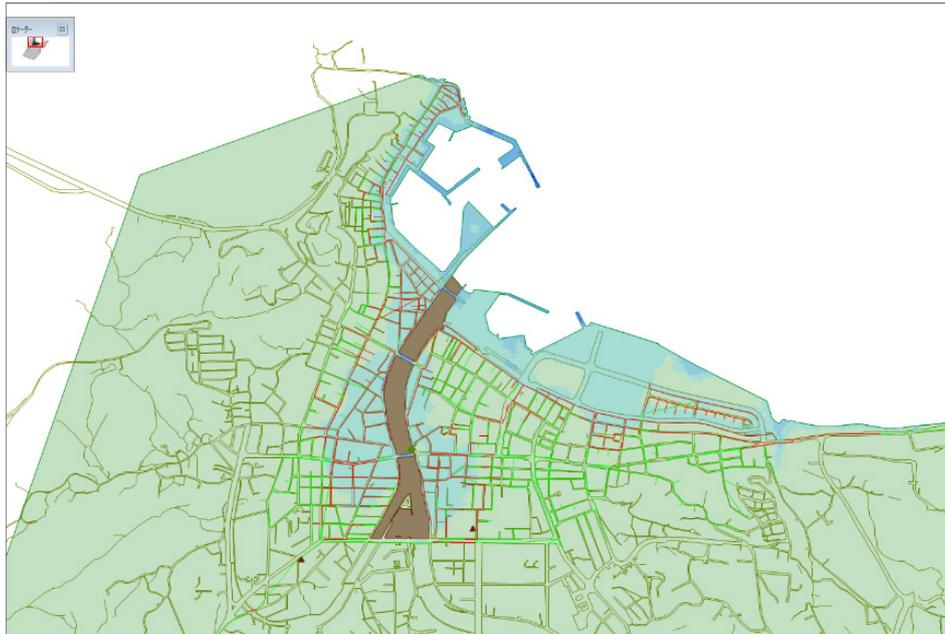


図-13 地上・地下統合モデルによる浸水シミュレーション結果（赤：流入管渠，黄緑：未流入管渠）

作成した地上・地下統合モデルに、設定した入力波水位を与えたシミュレーションを行った。その結果を図-13に示す。結果としては、人孔及び管渠内に津波による流入がみられ、自然流下によりポンプ場に水が集水され、ポンプ機能により水の圧送が行われていた。しかし、河合町中継ポンプ場と堀町ポンプ場を繋ぐ圧送管と、堀町ポンプ場と輪島市浄化センターを繋ぐ圧送管において流入水が塞ぎ止められてしまった。理由としては、圧送管内の仮想人孔のモデル化の際に不備が生じたのではないかと考えており、モデルの改良が必要である。

5. おわりに

本研究では、対象地である輪島市の下水道事業BCPでは現在考慮されていない、下水道施設の被害を検討するために、対象地域のモデル化を行った。まず、対象地域の地盤高を与え地形の起伏を作成した。次に、石川県が想定した津波の1つである能登半島北方沖を波源とする津波による最大浸水想定図から浸水深を読み取った。それを参考に、ハザードマップの最大浸水深と整合する流入津波水位の時間変化を作成した。そして、下水道管渠、人孔、ポンプ場をモデル化し、作成した流入津波水位を与え、地表面と下水道の統合浸水解析を行った。シミュレーションの結果、人孔及び管渠に流入し、計算を行うことはできた。しかし、圧送管内の仮想人孔において、流入水が塞ぎ止められてしまったため、詳細な氾濫の分析はできなかった。今後の課題としては、この仮想人孔のモデル化の不備を解消することと、ポンプ場、人孔、管渠の正確なモデル化のために現地調査を含めた、正確

なデータの収集が必要と考えられる。

謝辞：本研究で用いた下水管渠データおよび下水道事業継続計画は、輪島市上下水道課から提供いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 下水道地震・津波対策技術検討委員会: 下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書 ー東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後の対策のあり方ー, 324p., 2012.
- 2) 深谷 渉, 松橋 学, 小野寺知幸, 庄野貴英, 小西康彦: 気仙沼市における津波の管路内遡上によるマンホール蓋飛散事例研究, 下水道協会誌, Vol.51, No.615, pp.105-112, 2014.
- 3) 安田誠宏, 山中明彦, 宮里直樹, 宮島昌克, 池本良子, 清水芳久, 高橋尚裕, 小西康彦, 森崎 啓, 有吉隆宏: 戦略的な水循環ネットワーク確保のための基礎研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.I_915-I_922, 2015.
- 4) 石川県輪島市: 輪島市公共下水道事業計画 (輪島処理区) 変更協議申出書<下水道法>, 74p., 2014.
- 5) 日本海における大規模地震に関する調査検討会 報告書, 43p., 2014.
- 6) 石川県危機管理監室危機対策課: 平成 23 年度石川県津波浸水想定調査報告書, 161p., 2012.
- 7) 石川県危機管理監室危機対策課: 石川県津波浸水想定区域図 輪島市, <http://www.pref.ishikawa.jp/bousai/tsunami/12wajima/wajima.html>, 2012.
- 8) 石川県輪島市上下水道課: 輪島市下水道事業業務継続計画<地震・津波災害版>ー平成 27 年度版ー, 69p., 2016.

ESTIMATION OF UNINTENDED TSUNAMI DAMAGE OF SEWER SYSTEM IN WAJIMA CITY BY INTEGRATED OVERGROUND-UNDERGROUND INUNDATION SIMULATION MODEL

Tomohiro YASUDA, Akihiko YAMANAKA, Ryoko IKEMOTO,
Masakatsu MIYAJIMA, Hiroshi MORISAKI, Morihiko TAKANO,
Taku OTANI and Ryoji OKABE

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami devastated not only houses but also sewer systems. It is important to discuss the risk of tsunami damage to sewer systems and to make business continuity plan (BCP) in advance. The purpose of this study is to discuss insufficiency of the BCP and possibility of unintended tsunami damage in Wajima city. Wajima is facing to the Sea of Japan and assumed possible tsunami inundation by the north offshore Noto earthquake model.

The overground modelling uses elevation and road information data, and the underground modelling uses sewer system data, such as size and location of manholes, and length, depth, and gradient of pipes. The integrated overground-underground inundation model simulates the tsunami floods not only on the ground but also into the sewer. The detail analysis compares the volume of inundated seawater and capability of the pump stations and the sewage treatment plant to assess unexamined risks.