

■ 論 文 ■

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

深谷 渉* 松橋 学** 小野寺 知 幸***
庄野 貴 英**** 小西 康 彦*****

要 旨：平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、震度 7 の揺れに加え、10m を越える巨大な津波を引き起こし、太平洋沿岸部の広い範囲に甚大な被害を与えた。

気仙沼市では、津波の襲来時にマンホール蓋が飛散し、マンホールから大きな水柱が上がる現象が発生した。ゲリラ豪雨時にマンホール蓋が飛散する事例は過去にあり、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、津波による飛散の発生事例は少なく、その発生メカニズムについては不明な部分が多い。本事例研究は、今後の津波襲来時におけるマンホール蓋飛散防止対策の一助とするために、気仙沼市で発生した津波によるマンホール蓋飛散の事例について、津波発生時の貴重な映像や津波シミュレーション結果の情報を整理し、現地調査結果に基づく蓋の飛散状況の把握、CFD を用いた管きよ内の流体解析等を通じ、飛散要因に関する考察と対策案について報告を行うものである。

キーワード：東日本大震災、津波、マンホール蓋、飛散

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、震度 7 の揺れに加え、10m を越える巨大な津波を引き起こし、太平洋沿岸部の広い範囲に甚大な被害を与えた。

下水道施設では、東北地方の太平洋沿岸部に位置する下水処理場やポンプ場がとくに甚大な被害を受け、長期間の機能停止を余儀なくされた。震災後の官民あわせての懸命な復旧活動により、現在（平成 25 年 11 月時点）では機能停止した処理場の大部分が従前の水処理機能を回復している。

一方、津波被害は目につきやすい処理場等の屋外構造物に注目されがちであるが、埋設物である管路施設も被害を受けている。津波の強い波力を受けた箇所では、地盤の浸食とともに管きよ及びマンホールが流失し、家屋とともに排水設備も破壊されている。管きよ等の破損箇所からの大量の瓦礫や土砂侵入、津波により運ばれた海水や降雨時の雨水の滞水も多く発生しており、被害状況の把握や復旧作業の支障となった。

また気仙沼市では、上記の管路被害の他、津波の襲来時にマンホール蓋が飛散し、マンホールから大きな水柱が上がる現象が発生した。ゲリラ豪雨時にマンホール蓋が飛散する事例は過去にあり、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

る飛散事例は少ない。ここでは、気仙沼市で発生した津波によるマンホール蓋飛散の事例について、飛散原因に関する考察と対策案について報告を行う。

2. マンホール蓋の飛散メカニズムと過去の事例

マンホール蓋の飛散については、平成 10 年の高知市を襲った集中豪雨時の事故を契機に、そのメカニズムの解明及び対策が進められている。

『下水道マンホール安全対策の手引き（日本下水道協会）¹⁾』では、豪雨時のマンホール蓋の浮上・飛散の現象を①水圧の上昇、②空気圧の上昇、③空気塊の急上昇の 3 つに区分した上で、その要因として流下能力や管きよの構造・配置、地形、マンホール蓋種別等と関連づけて、危険度の判定を行っている。

また国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）では、雨水貯留管などの伏せ越し型管路を対象とした理論及び実験に基づいた数値解析モデルを構築し、様々な条件における計算結果を簡易判定図表に取りまとめ公表している^{2)~6)}。

本事例は、過去の豪雨時に発生するマンホール蓋飛散と異なり、津波が管きよ内に浸入したことにより発生したものである。マンホール蓋の飛散が招く 2 次災害としては、車両、歩行者の交通障害及び避難の遅延

や、土砂や瓦礫の管内侵入による復旧活動遅延があげられ、豪雨時の蓋飛散メカニズムや過去の津波時の蓋飛散事例を参考にして、現象の解明及び対策の検討が必要である。

また、津波による事例としては、平成22年2月に発生したチリ地震時に気仙沼市で確認された津波の逆流によるマンホール蓋からの海水溢水がある。橋本・今村（東北大学）による当時の調査⁷⁾によると、海水が溢水したのは岸壁から200m程度の距離にある雨水用マンホールで、津波による浸水時にマンホールの隙間（蓋穴や蓋と受け枠の隙間）から海水が流入し、管内の空気が圧縮されマンホールの蓋穴や蓋と受け枠の隙間から吹き出した状況が確認されている。なお、マンホールからの溢水箇所は、今回報告するマンホール蓋飛散（水柱）から約300m岸壁寄りの位置にあった。

この他、東日本大震災では、北海道釧路市において、河川沿いの低地で雨水管への津波浸入（逆流）が多発し、一部においてマンホールからの溢水が生じたとの報告もある⁸⁾。

3. 研究結果

3.1 気仙沼市の下水道施設被災状況

東日本大震災では、気仙沼市赤岩で震度6弱、同市笹が陣で5強、同市本吉町で5強を観測した。津波高さは20mに達したと推定され⁹⁾、市域の約6%に相当する19km²が浸水し⁹⁾、千名以上の死傷者及び2万戸以上の家屋（非住家含む）が全半壊した¹⁰⁾。また、沿岸部では、最大で1.5m以上の地盤沈下が確認されている。

下水道施設は、気仙沼市の基幹処理場である気仙沼終末処理場（処理能力9800m³/日）及び津谷街浄化センター（同680m³/日）が津波による甚大な被害を受け、水処理機能が停止した。

下水道管路施設については、津波により運ばれた海水等の滞水や土砂、瓦礫の管内堆積により、個々の管きよの破損状況の把握は困難であるが、全般的な被災状況は以下の通りである。

マンホール蓋が飛散し、水柱が上がった地域は気仙沼処理区で、汚水の認可面積は、平成22年3月31日現在512haで、うち407haが供用開始済みとなっている（図-1）。供用開始済み区域のうち、気仙沼処理場周辺の流末の幹線等及び沿岸部の幹線等が浸水エリア内に位置している。

また、地震動あるいは津波の波力によって、浸水域の汚水管きよが破損し、海水が管内に流入する被害が発生している。

3.2 津波の浸入状況

気仙沼市を襲った津波の浸入状況については、当時撮影されたビデオ（動画）の記録や研究者等による津波痕跡調査、津波の数値解析（シミュレーション）か

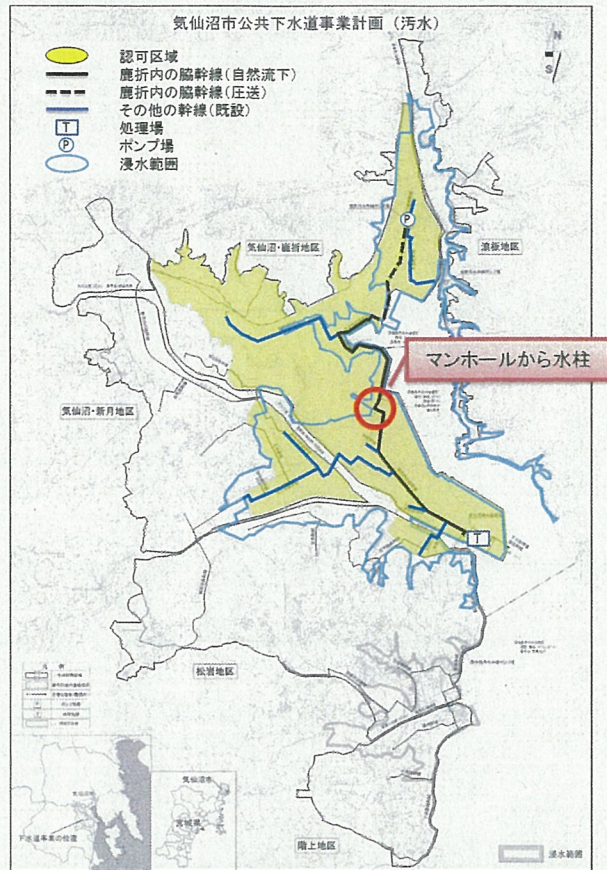


図-1 気仙沼処理区（污水）計画図

ら読み取ることができる。

図-2は、国土交通省都市・地域整備局による津波シミュレーション結果¹¹⁾に基づき、津波（第1波）先端部の移動を時系列で模式化したものである。



図-2 津波による浸水範囲の時系列変化¹²⁾

気仙沼終末処理場における浸水発生時刻を0とすると、約8分で主要な幹線管きょの約7割が水没したことになる。

津波の進行方向は、気仙沼終末処理場から水柱発生地点に向かう津波(南→北)と、気仙沼湾の海鮮市場付近から水柱発生地点に向かう津波(北→南)の2つが見られ、その2つの津波は水柱発生地点で合流する。なお本解析結果は、後述する動画の様子とも一致する。

2つの津波は、道路を流路として進行するとともに、浸水深の増加と共に多くの家屋を破壊した。浸水エリアの内、浸水深2mを超える地区では、家屋の多くは住宅の基礎部を残すのみとなっている(写真-1)。津波高(最大浸水深)は、気仙沼終末処理場付近で最大約9m、水柱発生地点では2~4m、津波速度は気仙沼終末処理場付近で約6m/s、水柱発生場所で3m/sとなっている。

3.3 マンホール蓋の飛散状況

(1) マンホール蓋の飛散状況

マンホール蓋の飛散は、河北新報社前の交差点(図-3参照)で発生し、津波襲来中に大きな水柱がマンホールから噴出した。津波発生時からマンホールから水柱が噴出するまでの状況を、避難中の住民が撮影(河北新報社より撮影)した動画を基に時系列で整理すると表-1、写真-2の通りとなる。

マンホール蓋が飛散した瞬間は撮影されていないが、画像を見る限り、水深が1m程度(写真⑧)までは水柱発生地点の路面に異変が見られないことから、蓋は路面が冠水後に飛散したものと推測される。また、発生した水柱は、現地調査及び画像より最大高さGL+7.62mに達したものと推測された。

また、水柱の発生したマンホール近辺では、画像等では同様の水柱が見られず、当時現場付近にいた避難者(動画撮影者)からも水柱の目撃証言は得られてい



写真-1 津波浸水域の航空写真

ないことから、蓋の飛散した箇所は当該箇所のみであったと推測される。なお、別地区のマンホールでは蓋が流失していた箇所があったようであるが、震災後の混乱の中、住民の方が蓋を元に戻したり、緊急的な作業通路確保のため嵩上げた仮設道路下に埋められたりしたため、具体的な場所や飛散時の様子は把握されていない。

(2) 本管・マンホールの構造及び配置

水柱発生地点の管きょ及びマンホールの設置状況等について整理する。水柱発生地点は、図-3に示す通り、汚水幹線(鹿折内の脇幹線)が直角に折れ曲がる交差点部に位置し、交差点の一角(内陸側)は高台になっており、多くの住民が津波時の避難場所として利用した。

蓋が飛散したマンホールは内径1500mm(3号)で

表-1 津波及びマンホール蓋飛散状況

No.	経過時間(m:s)	津波等の発生状況
①	0:00	海側(画像奥)より津波浸入。地上の津波の到達より先に、路側帯周辺から水が噴出。
②	0:23	道路からの噴水が続いている。
③	0:48	車が津波に飲み込まれようとしている。
④	1:11	津波により道路が冠水。水深は腰下程度。
⑤	1:32	津波は河北新報社交差点付近の道路に到達。画像右手へ浸水域が拡大。
⑥	2:04	津波の勢い(流速)が増し、交差点付近の車は津波により流出。
⑦	2:13	交差点付近での津波の勢いは激しく車が流される。主流は、画像の右上から左下方向。
⑧	3:54	津波により車(トラック等)が3台流されている。水深は約0.8m。
⑨	4:06	津波は、海側からの主流(画像上から下)に、横方向(画像右から左)の流れが加わっている。画像左上側の道路は、死水域になっている。水深は約1.5m。
⑩	4:45	津波勢いは激しく、水深は約2.0m。
⑪	5:00	約5分間で一体は冠水した。水深は約2.5m。
⑫	5:10	水面が円形状に盛り上がりボイルが発生。水柱発生時の兆候。水深は約2.9m。
⑬	5:13	水面の漂流物を水柱が押し上げている。水深は約2.9m
⑭	5:15	マンホールからの水柱が建物の屋上に達する(最高頂GL+7.6m)。水深は約2.9m
⑮	5:17	1回目の水柱は約7秒噴出。水深は約2.9m
⑯	5:26	水面が2回目の盛り上がりを見せている。水深は約2.9m。
⑰	5:28	2回目の水柱は1回目より小さい。(最高頂 約6.6m) 水深は約2.9m
⑱	5:30	2回目の水柱は約4秒上がっていた。水深は約2.9m。この後、少なくとも20秒は、間欠的に噴出が続く。



写真①



写真⑦



写真⑬



写真②



写真⑧



写真⑭



写真③



写真⑨



写真⑮



写真④



写真⑩



写真⑯



写真⑤



写真⑪



写真⑰



写真⑥



写真⑫



写真⑱

写真-2 河北新報社前交差点の津波発生時状況写真集
(気仙沼市の小山裕隆氏提供の撮影動画を編集)

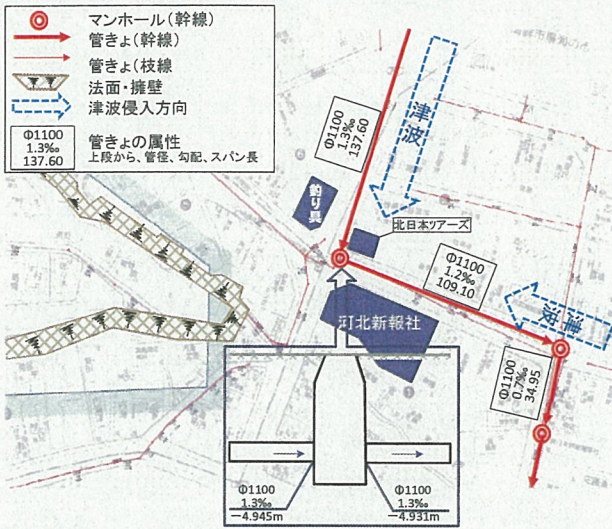


図-3 水柱発生地点の管きよ及びマンホール設置状況

あり、土被り約5mの位置に鉄筋コンクリート管(φ1100)が接続している。上流と下流の管口はインバートで接続しており、大きな段差はなく緩やかな勾配ですりつけられている。

(3) マンホール蓋の構造

近年、下水道用のマンホール鋳鉄蓋としては、受け枠と蓋が蝶番により連結され、開閉操作時に逸脱しない構造とするものが一般的(JSWAS G-4)であるが、今回飛散した蓋は、昭和52年頃に製造された鋳鉄製のもので、蓋と受け枠を止めるロック機能のない平受け構造であった(写真-3)。蓋と受け枠の間に隙間が

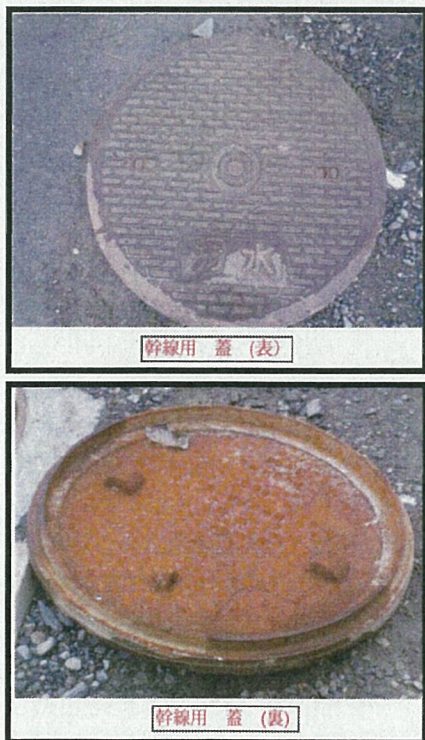


写真-3 水柱発生地点の蓋(同一品)

あるため、車両等の通過時に蓋が容易に挙動することからガタツキが発生しやすく、それ故に現在の規格と比較すると外れ易い構造と言われている。

震災後、災害復旧のため道路が嵩上げされ、当該マンホール蓋等の状況は確認できないが、グーグルのストリートビュー(平成23年7月時点)において嵩上げ前の蓋の様子が確認できる(写真-4)。既に蓋は元の位置に戻されているが、蓋周り(蓋枠や枠周辺舗装)の破損は見られず、蓋のみが飛散したと推察される。



写真-4 水柱発生人孔周辺の震災後写真(平成23年7月時点のGoogleストリートビュー)

3.4 マンホール蓋の飛散機構の推定

前述した水柱発生地点周辺の津波発生状況及び施設配置状況を整理すると、マンホール蓋の飛散及び水柱は、図-4に示すような概念で発生したと推測される。

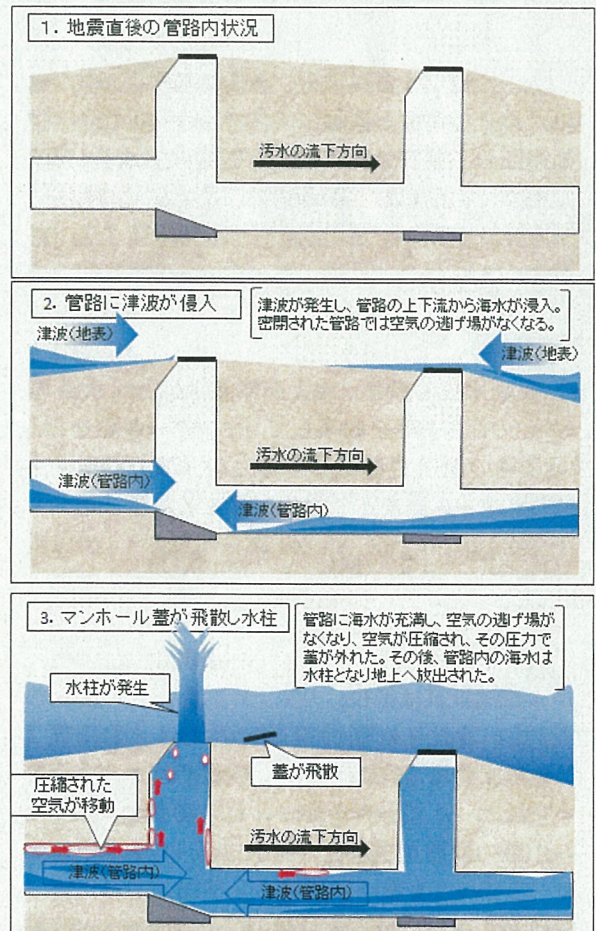


図-4 マンホール飛散概念図

下記に蓋の飛散を招いた要因について述べる。

(1) 管きよ内への海水の浸入経路

水柱の発生した幹線は自然流下の污水管であり、計画流量に対して50~100%の余裕をもった断面となっている。現状の供用状態及び地震直後の津波警報に伴う市民の避難状況を考慮すると、津波時の管内の9割以上には空気が充満していたと推測される。通常であれば、污水管は河川や海に放流口を持たず、下水処理場に流入するシステムであり、マンホール、宅内ますには蓋があるため、浸水しても污水管に海水が流入することはない。

しかしながら鹿折内の脇幹線の圧送管吐出先マンホールから水柱が発生したマンホール付近までの区間は比較的家屋が張り付いており、これら家屋が津波により破壊、流失したため、台所、洗面所、トイレ等の排水口、汚水ます、取付管の継手部から多くの海水が下水道管きよへ流入したと考えられる。また、海沿いの一部の幹線・枝線管きよは、津波により流出、損傷しており、このような損傷部からも海水が流入したことにより、管きよ内水位が急激に上昇するとともに管内空気が圧縮され、蓋の飛散を招いたと考えられる。

(2) 飛散したマンホールの位置及び構造

水柱の発生したマンホールは、直角に屈曲した平面線形の屈曲部に位置している。地上の津波は、その線形に沿うように、当該マンホールに向かい、奇しくも2方向の津波は、当該マンホール付近で合流した。

管きよ内を遡上する津波も、若干の時間差はあったものの、地上の津波と同様に当該マンホールで合流したと推察され、管内で圧縮された空気は、地上が津波による浸水で面的にふさがれているために逃げ場を失い、当該マンホールで集中的に一気に噴出したものとする。

(3) マンホール蓋を押し上げた津波の圧力

水柱が発生したマンホールの寸法(φ1500、高さ約6.4m)及び水柱の高さ、地上の津波抵抗力(水深GL+2.88mの海水)等を勘案して、マンホール蓋を押し上げた水柱の全圧力を試算すると約170,000Paと推定される。

$$P = P1 + P2 + M1 \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここに、P:水柱発生全圧力、P1:水柱圧力、P2:浸水による抵抗力、M1:蓋の抵抗力(蓋重量40kg、蓋と受け枠の摩擦抵抗は無視)

平受けマンホール蓋の飛散・浮上は、耐内圧力5,600Pa以上の場合に浮上高さが受け枠高さ以上となる³⁾⁴⁾ことから、当該マンホールはこの数値を大きく上回り、蓋の飛散及び水柱の発生に至ったと考えられる。

国総研が公表している蓋飛散の簡易判定図表(図-5)は、雨水貯留管などの伏せ越し型管路を対象とし

下流側入孔、流量規模:満管流速3.0m/s相当

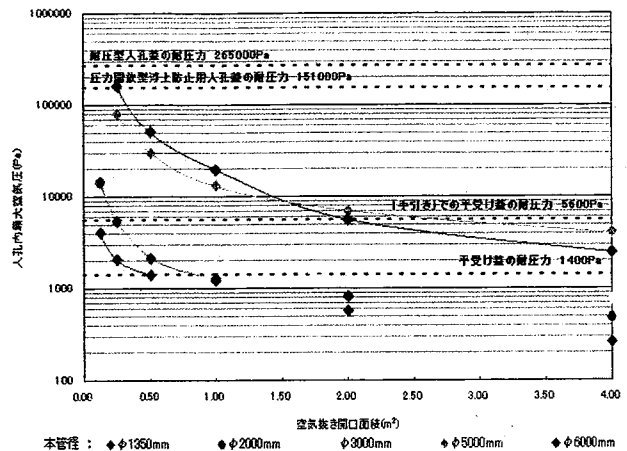


図-5 蓋飛散の簡易判定図表²⁾

たものであり、必ずしも今回の津波による蓋の飛散事例とは一致しないが、開口面積が0.28m²、伏せ越し内の流速を津波と同じ3.0m/sと仮定するとマンホール内の最大空気圧は約2,000Paとなる。前出の通り、水柱による圧力は170,000Paであり、本図表の算定結果を大きく上回る。これは当該マンホールの上下流から空気塊及び水が集中することや、管きよ内の狭隘断面を津波が高流速で流れた可能性を示唆している。

(4) CFDによる管きよ内流体解析

津波の管内遡上によるマンホール蓋飛散時における管きよ内の水理現象を明らかにするため、CFDを用いた解析を行った。

解析には、OpenFOAMの多層流モデルを使用した有限体積法による流体シミュレーションを用いた。蓋の飛散したマンホールの上流側3スパン、下流側2スパンを対象とした構造メッシュを作成し、計算領域の境界となる管きよ端部から任意の流速を与え、この際の水位は満管とした。現象解明に必要な津波の管内速度及び空気混入率については数パターンの組み合わせを設定し、実現象との照合を図った。

計算メッシュについては、マンホールからの溢水を考慮し、マンホールの上部に直径5m×高さ5mの円筒状の計算領域を設けた。また、実録のビデオ画像から、当該マンホールからの水柱は浸水深が約2.9mの状況で発生しており、この溢水計算領域では、水深(マンホール頂部からの距離)2.9mで系外に流れ出るものとした。

解析の結果、津波の浸入速度を3m/秒、空気の混入率を5%としたケースにおいて、マンホール蓋飛散箇所における水柱高さが実現象と概ね一致するとともに、3.2で示した津波の数値解析による地表面の流速(水柱発生箇所近辺)ともほぼ一致した。また、飛散箇所から1スパン離れた上・下流側のマンホールでは、計算上、溢水が発生しなかった。現地においても、水

柱発生箇所以外の水柱が確認されていないこと(3.3(1)参照)から、計算結果は現地状況を概ね再現できていると考えられる。

なお、本現象がどのような条件下(地形や管きょ構造など)で発生するのかについては、さらなる検証が必要である(図-6)。

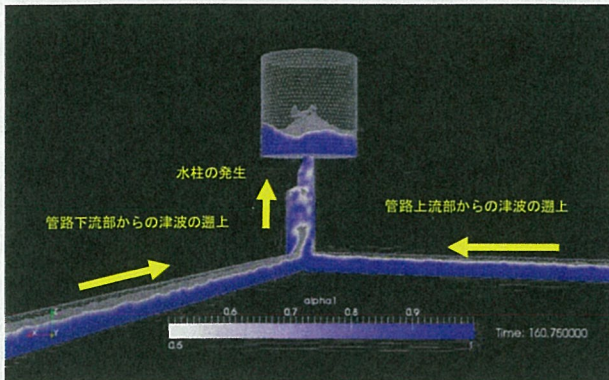


図-6 CFD解析結果

4. 津波によるマンホール飛散対策案

気仙沼市では、チリ地震に続き東日本大震災においても津波の管きょ内浸入によるマンホールからの溢水及び蓋の飛散が発生した。今後の津波によるマンホール蓋飛散を防止するための対策案について述べる。

①管きょ内への津波浸入抑制対策

マンホール蓋の飛散は、管きょ内に津波が浸入することにより生じることから、浸入経路となりうる箇所の防水化等を実施することが考えられる。例えば、吐口からの津波浸入を防止するためのフラップゲート設置が考えられるが、津波による浸水深が小さい場合や雨水管に対しては有効である一方、津波による浸水深が大きく家屋の倒壊や流出が見込まれる場合(排水設備系統からの津波浸入が想定される場合)や吐口を有さない汚水管に対しては効果が低くなることが想定される。

②蓋飛散防止対策(津波浸入を許容)

管きょ内への津波浸入を防止することが困難な場合には、マンホールの蓋が飛散しないように対策を講じる必要がある。飛散防止タイプには、圧力開放型浮上防止用蓋と耐圧型蓋があり、耐内圧力は、圧力開放型浮上防止用蓋が151,000Pa、耐圧型蓋が265,000Paとされている¹⁾。マンホール毎に躯体寸法や蓋の規格が異なり、さらに想定される津波浸水深等も異なるため、個別に必要な耐内圧力を計算することが望ましい。また、全マンホール蓋を対策することが困難な場合には、シミュレーション結果や津波の実績、避難路などの防災上重要な道路等、場所を絞って対応するか、圧縮空気の逃げ道を別ルートや通気管により確保したり、飛散させるマンホールをあえて用意する等が考え

られる。

連結構造の違いにより、①開閉操作時に逸脱しない逸脱防止性能、②所定の専用工具以外で容易に開放されないよう錠を備えた不法開放防止性能、③管路内の圧力を開放させるために、20mm以下の高さに浮上し、内圧低下後には蓋が受け枠に納まる圧力解放耐揚圧性能を各々備えており、特に③については、豪雨時の蓋飛散対策として、他都市では導入が進められている。

5. おわりに

津波によるマンホールからの海水溢水や蓋の飛散・浮上の事故事例は少なく、今回の東日本大震災の事例を除けば、チリ地震で確認された程度である。今回の事例では、避難中の住民の方による撮影動画や高度な津波シミュレーション結果により、津波時のマンホール蓋飛散の状況やメカニズムの一部が見えてきたが、事故発生時の二次的な被害に配慮すると、蓋飛散対策についての議論をさらに深める必要がある。

本事例研究が、このような議論の場で役立つとともに、今後の大津波に備えた対策の一助となれば幸甚である。

(参考文献)

- 1) 下水道マンホール安全対策の手引き, 日本下水道協会, 1999.3
- 2) 伏せ越し型雨水貯留管におけるマンホール(人孔)蓋に加わる内圧の算定手法(案), 国土技術政策総合研究所下水道研究室ホームページ: <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/kanni-hantei/kanni-top.html>
- 3) 森博昭, 那須基, 森田弘昭, 松原誠, 水理模型実験による雨水管路の空気混入・排出現象に関する研究, 環境技術 vol.32, No.4, pp.328-336, 2003.4
- 4) 森博昭, 那須基, 松原誠, 藤生和也, 森田弘昭, 伏せ越し形状貯留管における空気と水の混相流を考慮した数値解析モデルの開発, 下水道協会誌 vol.41, No.506, pp.105-117, 2004.12
- 5) 森博昭, 那須基, 松原誠, 藤生和也, 森田弘昭, 伏せ越し形状貯留管における空気混入・噴出現象の定量化, 下水道協会誌 vol.42, No.507, pp.149-162, 2005.1
- 6) 森博昭, 那須基, 松原誠, 藤生和也, 森田弘昭, マンホール蓋の浮上・飛散に対する安全性照査手法の開発, 工業用水 No.559, pp.63-74, 2005.4
- 7) 橋本貴之・今村文彦, 2010年チリ地震による被害に関する気仙沼での現地調査報告書, 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター津波工学研究報告第27号津波工学研究報告第27号, 2010
- 8) 吉川泰弘, 釧路・十勝地域の望ましい対応, 水循環NW施設災害軽減研究小委員会資料, 2012.5
- 9) 東日本大震災1年の記録(みやぎの住宅・社会資

- 本再生・復興の歩み), 宮城県, 2012.3
 10) 東日本大震災 復興元年 半年の記録 (みやぎの住宅・社会資本再生・復興の歩み), 宮城県, 2012.9
 11) 東日本大震災による被災現況調査業務報告, 国土

- 交通省都市・地域整備局, 2012.3
 12) 11)データを加工
 (25.9.12 受付)



* (ふかたに わたる)
 国土交通省国土技術政策総合研究所
 下水道研究室主任研究官
 平成3年建設省入省
 平成23年より現職



** (まつはし まなぶ)
 国土交通省国土技術政策総合研究所
 下水道研究室研究官
 平成21年国土交通省入省
 平成24年より現職



*** (おのでら ともゆき)
 気仙沼市建設部下水道課 課長
 昭和57年気仙沼市入庁
 平成23年10月より現職



**** (しょうの たかひで)
 (株)日水コン 東北支所下水道事業部
 東北下水道部
 平成4年(株)日水コン入社
 平成9年より現職



***** (こにし やすひこ)
 (株)日水コン 下水道事業部東部
 計画・管路部 担当部長
 平成2年(株)日水コン入社
 平成24年より現職

Abstract

Study on Manhole-cover Lifted by the Tsunami Which Wave Run-up in a Pipe

Wataru FUKATANI, Manabu MATSUHASHI, Tomoyuki ONODERA, Takahide SHONO, Yasuhiko KONISHI

The Great East Japan Earthquake on March 11, 2011 recorded a magnitude of 9.0, the largest ever recorded in Japan. The gigantic tsunami over 10 meters that followed the earthquake wreaked havoc on coastal areas and caused unprecedented widespread damage, with heavy loss of life and property.

In Kesenuma city, the manhole-cover was lifted by the wave which wave run-up in a pipe, and the big column of water went up from the manhole. In the past example, a manhole-cover was lifted at the time of torrential rain. However, there are few examples caused by the tsunami, and the mechanism of generating is unknown. We grasped the situation using the tsunami picture and tsunami simulation. In addition, we examined a cause and the measures of this phenomenon.

