

地震による水インフラ被害に起因する 道路閉塞リスクに基づく避難経路探索アプリ

山本浩一¹⁾・山本裕子¹⁾・楮原京子²⁾・森啓年¹⁾・吉本憲正¹⁾・鈴木素之¹⁾¹⁾山口大学大学院創成科学研究科, ²⁾山口大学教育学部

1. はじめに

大規模地震の発生時, 人々の関心は建物の倒壊や火災, 津波に向けられることが多い。しかし, 都市の生命線である水道管や下水道管といった「水インフラ」の被災が避難行動に深刻な影響を与えることは見落とされがちである。過去の地震(2011年東北地方太平洋沖地震, 2016年熊本地震、2018年大阪府北部地震など)では, 地中の水道管破損による道路陥没や浸水, 液状化に伴う下水マンホールの浮き上がりが多発し, 道路網の寸断を引き起こした。災害時の避難は徒歩が原則とされるが, 高齢者, 障がい者, 乳幼児といった避難行動要支援者にとっては車による避難が不可欠となる。しかし, 地中にある水インフラの被害は外観から予測することが難しく, 避難者が通常選択する「最短ルート」が実は通行不能であったり著しい速度低下を招いたりする危険がある。本研究は, 中都市であるA市の一帯を対象として, 計測震度6の地震発生直後の津波避難を想定し, 水インフラ被災リスクを車両の「通行可能最高速度」として可視化することで, 安全かつ迅速な避難を支援するシステムの開発を目的としている。

2. 研究方法

2.1 水道管破損による道路通行阻害リスクの推定

人口約15万人のA市で津波浸水被害が想定される区域を含む約4.5km²を対象地区とした。地震の規模は計測震度6を想定し, (1)式に示す液状化の情報を有していない場合の地震による管路の被害予測式¹⁾を用いて管路の推定被害率(1kmあたりの被害件数)を求めた。対象地区的配水管, 送水管, 導水管の始点・終点の座標, 管種, 繼手の種類, 口径はA市水道局から情報提供を受けた。

$$R_m = C_p C_d C_g R(v) \quad (1)$$

$$R(v) = 9.92 \times 10^{-3} \times (v - 15)^{1.14} \quad (2)$$

ここで R_m : 推定被害率 [件/km], C_p : 管種・継手補正係数, C_d : 口径補正係数, C_g : 微地形補正係数, $R(v)$: 標準被害率 [件/km], v : 地震動の地表面最大速度 [cm/sec]である。今回 C_p は管種・継手により文献値¹⁾の0~2.5とし, 文献にない管種・継手の C_p は類似のものの値を使用した。耐震管・継手の C_p は0となる。 C_d は口径により文献値¹⁾の0.1~2.0とした。 C_d は口径が大きいほど値は小さく, 口径が小さいほど値が大きくなる。 C_g は文献¹⁾の標準微地形区分の値1.0とした。 v は地震の規模を計測震度6と仮定し文献2を参考に85cm/secとし, $R(v)$ を求めた。

2.2 流出流量と通行阻害の定量的評価

水道管への被害が発生した際, 継手の抜けや管の破断箇所から噴き出す最大流量 Q (m³/sec)を, トリシェリの定理を用いて算出した。地震による管の被害1か所から流出する水の最大流量を(3)式で推定する。

$$Q = A\sqrt{2gh} \quad (3)$$

ここで A : 管の断面積 [m^2], g : 重力加速度 $9.8 [\text{m/s}^2]$, h : 水頭 [m]である。水頭 h は安全側の評価として、使用量が少なく動水圧が高くなる深夜・早朝時を想定し、 60 m (約 0.6 MPa) と仮定した。管路 $l \text{ km}$ あたりで流出する予測流量は(4)式で表される。

$$R_m Q l [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

ここで流出した水が道路を陥没させるリスクについては以下の仮定に基づき重みづけを行った。水道管理設深さ $1.2 \text{ m} \times$ 平均普通車長 $4.7 \text{ m} \times$ 道路幅 $W [\text{m}]$ の土砂が流出した際に完全な通行不可となると定義した。すなわち

$$V = 5.64 W \quad (5)$$

として陥没体積を $V [\text{m}^3]$ とした。理想的な避難開始時間とされる 5 分間 (300 秒) で上記体積 $V [\text{m}^3]$ に達する流量 $0.0188 W [\text{m}^3/\text{s}]$ を閾値とした。予測流量が 0 の時の車両の通行可能最高速度を $40 [\text{km/h}]$ 、閾値以上の時を $0 [\text{km/h}]$ とし、その間は流量増加に伴い速度が線形に減少すると仮定すると、通行可能最高速度 $S [\text{km/h}]$ は(6), (7) 式で表せる。

$$S = 40 - (40/0.0188W) R_m Q l \quad (0 \leq Q \leq 0.0188W) \quad (6)$$

$$S = 0 \quad (Q > 0.0188W) \quad (7)$$

求めた S を GIS (地理情報システム) 上で水道管のラインデータに付与し、さらに道路のラインデータと統合し、任意の 2 地点間の経路検索を可能にした。また、道路幅に応じた車両の通行可能最高速度を表-1 のように決め、水道管の被害から求めた通行可能最高速度 S と比較して、速度が小さい方をその区間の値として採用した。水道管被害による道路通行阻害リスクを車両の通行可能最高速度 [km/h] で地図上に表したもののが図-1 に示す。値が大きいほど通行阻害リスクが低いことを表している。

3. 下水マンホール（人孔）浮上による道路通行阻害リスクの推定

3.1 過去の地震データに基づく浮上量推定

液状化による下水人孔の浮上量は、過去の大地震 (2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖震災、2016 年熊本地震、2018 年北海道胆振東部地震) のデータ 1,580 件²⁾ を用いて推定した。

人孔深 (x) と人孔浮上量 (y) の関係について深さ 50cm 区分毎の度数分布を調べたところ、データ

表-1 道路幅による通行可能最高速度

道路幅	通行可能最高速度
3 m 未満	10 km/h
3 m 以上 5.5 m 未満	30 km/h
5.5 m 以上	40 km/h

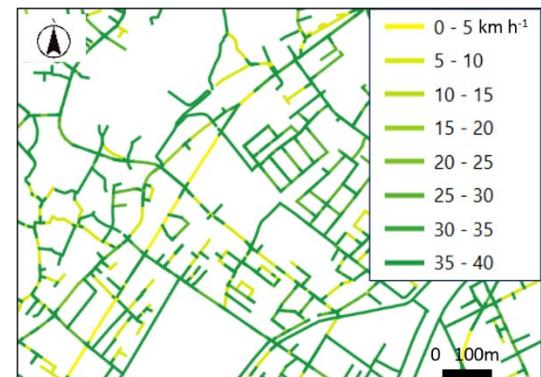


図-1 水道管被害による道路通行阻害リスクを考慮した通行可能最高速度

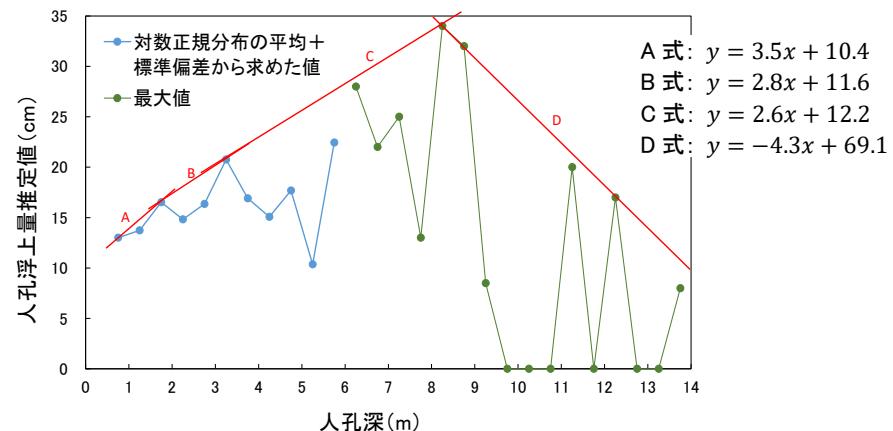


図-2 対数正規分布の平均 + 標準偏差から求めた人孔浮上量推定値(cm)

タ数が多い区分では人孔浮上量が対数正規分布に近い分布となった。そのため人孔深浮上量の推定値は対数正規分布を用いて算出した。データ数が少ない深さ 6.5m 以上については最大値を採用し、これらを包絡する 4 つの直線式 (A~D 式) を導出した (図-2)。これにより、地盤データが不十分な地域でも、マンホール深さから浮上量を推計することが可能となった。

3.2 車両の最低地上高を考慮したリスク評価

推定された浮上量に基づき、表-2 に示すように車両の通行可能最高速度を割り当てた。走行可能性については一般的な普通車の最低地上高 (0.1m~0.2m 台) および平均車幅 (1.7 m) を基準としている。なお経路検索を可能にするため、便宜上、通行不可の場合も極低速 (3km/h) を割り当てている。適用例を図-3 に示す。図-1 の水道管被害による道路通行阻害リスクと比較して、下水人孔浮上によるリスクが高い箇所が多いことがわかった。

表-2 人孔浮上量と通行可能最高速度

人孔浮上量	道路幅の制限	通行可能最高速度
0.1m 未満	—	表-1 の最高速度
0.1m 以上~0.2m 未満	—	表-1 の半分の速度
0.2m 以上	3m 未満	3 km/h (車両通行不可であるが極低速割り当て)
	3m~5.5m 未満	5 km/h (車幅ギリギリを低速走行)
	5.5m 以上	10 km/h

4. リスク統合と避難経路検索アプリの実装

4.1 道路ネットワークへのリスク統合

道路幅も考慮して得られた水道管破損リスクと下水人孔浮上リスクによる車両の通行可能最大速度のうち、値が小さい方（よりリスクが高い方）をその道路区間のリスク値として採用し、これを GIS 上で道路ネットワークデータと統合した。

4.2 アプリの主な機能

アプリは Esri 社の ArcGIS Server (Version 11.4) を用いて実装し、パソコン、スマートフォンからアクセスして経路検索可能とした。本アプリには以下の機能が搭載されている。

- 1) 動的な経路検索：距離のみを考慮した「最短ルート」と、インフラ被災リスク（速度低下）を考慮した「最速（低リスク）ルート」を検索・提示し、所要時間を比較する機能（図-4）。
- 2) 水道管破損リスク単体、下水人孔浮上リスク単体、または統合リスクを地図上に色分け表



図-3 下水人孔浮上による道路通行阻害リスクを考慮した通行可能最高速度

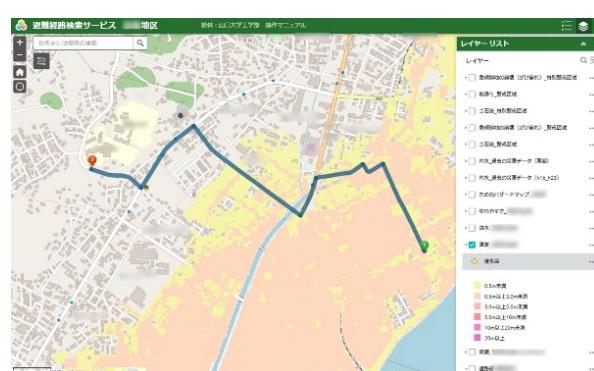


図-4 本アプリによる低リスクのルート検索状況
色はハザードマップのデータ(津波浸水深)

示する機能（ただし非公開）。

- 3) 津波浸水想定区域、土砂災害警戒区域、避難所位置などを重ねて表示できる機能（図-4）。これにより「浸水域を避けつつ、かつ通行阻害リスクの低い道」を事前に選定できる。

5. 考察

対象地区での解析において、水道管の破損よりも下水人孔浮上による通行阻害リスクの方が大きい箇所が多いことが明らかになった。これは、液状化の影響が広範囲に及び、人孔浮上量（20 cm 以上など）が車両の走行に致命的な影響を与えるためである。さらに道路幅が狭い場所ほど、わずかなインフラ被災であっても車両の回避余地がなくなるため、通行阻害リスクが劇的に高まる傾向が確認された。

6. 今後の展望と社会的活用

本研究では、地震時の水インフラ被災という予測困難なリスクを「通行可能最高速度」という具体的な指標で可視化し、それを住民が利用可能な避難支援システムへと応用した。水道管や下水道の諸情報が整備されれば日本中の他地区への横展開も容易であり、次のような活用が想定される。

- 自治会や小学校の避難訓練において本アプリを使用し、通学路や避難路に潜む「見えないリスク」を住民が自ら発見し、議論する手助けとする。
- 高齢者施設や障がい者施設において、車移動を前提とした具体的な避難ルートを事前に策定する際の根拠資料として活用する。
- 警察、消防、救急、バス・タクシー会社、および自治体の道路・下水道・水道各部署とリスク情報をあらかじめ共有し、発災直後の緊急出動や避難誘導の効率化を図る。
- 通行阻害リスクが高いと判定された区間の水道管を優先的に耐震化するなど、限られた予算の中での効率的な水インフラの維持管理・更新計画の策定に役立てる。

謝辞：本研究は公益財団法人鹿島学術振興財団特定テーマ研究助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 公益財団法人水道技術研究センター、平成 28 年度、平成 28 年熊本地震を踏まえた「地震による管路被害予測式」の見直しに関する検討報告書。
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水道研究室、2025. 下水道管路地震被害データベース。URL. https://www.nilim.go.jp/lab/ebg/zishin_db.html (2025 年 1 月時点)。