

大規模地震後の路面陥没現象発生確率のモデル分析 Model Analysis of Road Surface Collapsing after a Large Earthquake

○徳光勇人¹, 工藤祥子², 瀬良良子³, 加藤孝明⁴
Yuto TOKUMITSU¹, Shoko KUDO², Ryoko SERA³, Takaaki KATO⁴

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 都市工学専攻修士課程

Department of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

² 東京都 下水道部 (元東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻修士課程)

Sewerage Works Department, Tokyo Metropolitan Government

³ ジオ・サーチ株式会社 研究開発センター

Research Development Center, Geo Search Co., Ltd

⁴ 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 准教授

Associate Professor, ICUS, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

In order to handle emergency situations after a large earthquake, the securing of a sufficient road network is essential. The current legal system aims to achieve this by promoting the reinforcement of buildings to prevent them from collapsing, but this paper focuses on the collapsing of road surface as another reason for road function loss and considers the probability of occurrence of this phenomenon. Through model analysis using data about the sewerage system of a specific city and observational data of underground cavities in the city, it can be said that continuing the current situation will lead to a significant increase in the risk of road surface collapsing.

Keywords: road surface collapsing, earthquake, model analysis, underground cavity

1. 本研究の背景と目的

地震大国である日本では頻繁に地震が発生し、大規模地震の危険性は常に存在する。特に切迫性が高いといわれる首都直下地震に関しては、行政や経済といった重要機能が集中するこの地域の耐震性を高めるとともに、被災後の対応力の確保が社会的な課題となっている。

地震後の応急対応期、復旧期に必要な不可欠な要素として道路の交通機能確保があげられる。道路の交通機能の確保は、人の広域避難、火災消火や人命救助を行う緊急車両のために不可欠である。事実、兵庫県南部地震では、建物倒壊による道路閉塞による交通機能障害が生じた。現在の法体系では、これを教訓として耐震改修促進法に基づく耐震改修促進計画において、道路閉塞対策として重要路線の沿道建物に対して耐震改修を行うことが規定されている。一方で、道路そのものや道路の直下の被害に起因する道路閉塞については着目されていない。東日本大震災では、地震動に起因する道路陥没の被害が報告されているが、路面陥没現象は、そのリスク評価の方法が不十分に確立されてないこともあって、現状では行政計画に位置づけられていない。地震後の道路の交通機能確保を行うためには、建物倒壊による道路閉塞に加えて、道路陥没による道路断絶にも着目する必要がある。

地震時の道路陥没現象のメカニズムとしては、もともと道路下に存在する空洞が地震動によって拡大し、その結果、アスファルト舗装が落盤壊する、また地震動により下水管をはじめとする地下埋設物が損傷し、空洞が生じて舗装面が落盤するといったものが考えられることから、地震時の道路陥没現象は、平時の道路の維持管理、および、下水道の維持管理・整備のあり方と密接に関連しているといえる。

ここで、行政計画の現状をみると、道路の維持管理に

関しては、幹線道路維持保全計画¹⁾が策定されている。ある都市 C 市では、平成 27 年 3 月に策定されている。しかし、この計画では「計画的な維持管理に転換して維持管理費の抑制を図ることや(中略)道路附属物等の劣化や損傷に起因する事故を未然に防ぐこと」を目的としたものになっており、ひび割れの修繕やカーブミラーの補修と通常利用から見た維持管理計画となっている。道路の維持管理を目的とする行政計画は、あくまで通常利用のための計画であり、震災時の交通機能の確保という観点から策定されているわけではない。

一方、下水道に関しては、一般に公共下水道管路施設長寿命化基本計画²⁾及び下水道整備計画³⁾が策定されている。C 市でも公共下水道管路施設長寿命化基本計画²⁾及び下水道整備計画³⁾の 2 つがそれぞれ 2011 年度と 2010 年度にかけて策定し、その中で管路の老朽化に伴って道路陥没の危険性が増加することに言及している。ただし計画の中では、管路の敷設年次を評価基準として道路陥没の危険性を判断し、古い管路が集中する地域を重点整備することとしている。この計画は、管路の維持管理と修繕・整備を目的とした下水道担当部局の行政計画であり、災害時の交通機能の確保に留意したものとなっていない。

今後大地震が発生した際の道路網の交通機能を確保するためには、建物倒壊による道路閉塞の可能性に加えて、路面陥没による道路断絶の可能性も考慮することが不可欠である。そのためには道路地下の空洞の要因と考えられる下水道と道路陥没との関係を理解した上で、地震時の道路陥没の可能性を評価することが必要とされる。その上で、道路陥没の発生件数を抑え、地震時の道路機能を十分に確保するための対策を行政施策の中に位置づける必要がある。

既存文献をみると、平時の道路陥没のリスクを評価する手法としては、下水道管路に起因する道路陥没につながるリスクを評価する手法を開発した研究⁴⁾がある。下水道の修繕・整備の優先順位づけを主眼としているため、道路陥没リスクの相対評価に留まっており、現状の市街地での潜在的な道路陥没の可能性を評価するものではない。地震時に関しては、地震動に対する道路下の空洞の挙動を実験的に確認する研究⁵⁾がみられるが、地震時の道路陥没のリスクを評価する研究は見当たらない。

そこで、本稿に始まる一連の研究では、地震時の路面下空洞や陥没の発生確率を定量的に分析する手法を構築し、現状の都市における地震時の路面陥没の可能性を把握し、今後の防災対策の検討の方向性を示すことを最終目的とする。なお、本稿は、その初期段階のプレ研究と位置づけ、実在の都市 C 市を対象として、入手可能なデータという制約下で現在の路面陥没の可能性を概算するための分析手法を構築した。なお、用いたデータはジオ・サーチによる空洞調査（総延長 22.18km、空洞数 115 個）及び C 市提供の下水管網の GIS データである。

2. 本研究の分析手法

(1) 空洞発生要因の定義

路面下空洞を発生させる要因としてはいくつか考えられ、埋設構造物もそのうちの一つである。種別として、下水管、雨水管、地下鉄など考えられるが、本研究では、下水管のみに着目することとした。

下水道管に関するデータとして、敷設からの経過年数、管材、接続部数がある。C 市に関しては、管材についてはデータの完全性に不備が見られることから、敷設された年と強い相関関係があるとみなし、敷設からの経過年数と接続部数の2つを用いることとした。

一般的に敷設からの経過年数によってその下水管の破損確率は変わると考えられる。そこで、経過年数を独立変数とおいた。管路の接続部分を潜在的な路面下空洞の発生箇所とし、接続部の種別について下の表のように分類した。

表 1 下水道管の接続部種別

種別	概要
マンホールと本管の接続部分	作業員が出入りするための施設であり、繋ぎ目が緩むことがある
引込管と本管の接続部分	家屋から発生する排水を本管に流すためのものであり、繋ぎ目が緩むことがある
本管同士の接続部分	本管と本管の繋ぎ目が緩むもしくは破損することがある

接続部によって設置の方法、構造的な特徴、総数が異なるため、空洞の発生確率関数をそれぞれの種別毎に設定することとした。また、空洞と要因の関連付けについては、5m以内に引込管の接続部あるいはマンホールが存在した場合は直近のものを要因とし、ない場合は管路自体を要因と設定した。

(2) 路面下空洞動態モデルの設定

ジオ・サーチ株式会社提供の C 市にて行った路面下空洞調査データから空洞が実際に発生した時点を導出するため、図 1 のように路面下空洞の動態モデルを定義した。

今回用いた動態モデルは円錐と円柱を組み合わせた単純な構造として設定した。このモデルを元に、下の①から④の仮定を用いて、平均的な空洞の大きさや成長にか

かる年数を算出した。

- ① 空洞発生深度は 1.5m と 1.75m の 2 通りを設定した。
- ② ジオ・サーチによる具体都市に関わる観察データより、空洞からの土砂流出速度を毎年 0.25m^3 とした。
- ③ 円錐部分の母線と路面がなす角度を、土砂が安定するとされる安息角である 30 度とした。
- ④ 空洞の地面と平行に切断した場合の断面をジオ・サーチの観測データと同じ楕円と仮定し、その短軸を集計データの平均より 1.33m とし、長軸を 2.06m とした。

また、空洞の形状に対する地震動の影響に関しては、瀬良による振動台を用いた実験結果⁵⁾に基づいて次のように設定した。形状が変化する空洞は、舗装下 30cm 以内のものとし、空洞は、地震動が加わることによって安息角を保ちながら拡大すると仮定した。

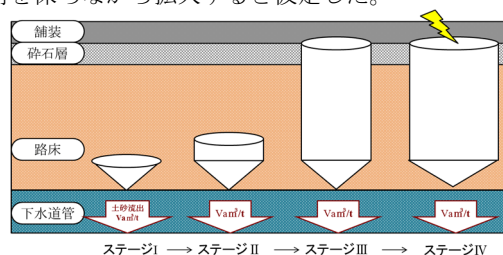


図 1 路面下空洞動態モデル

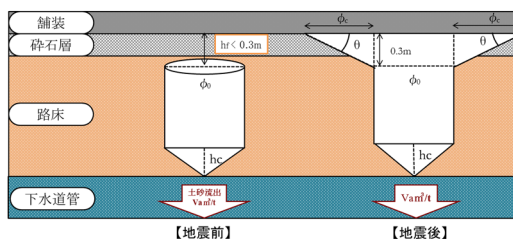


図 2 地震時の空洞挙動モデル

(3) 舗装破壊確率の設定

陥没の原因となる路面舗装破壊の確率をジオ・サーチ株式会社の破壊実験結果及び調査実績から導出した。

今回対象となっている具体都市内の道路舗装の厚さを 0.2m とした。舗装にかかる最大曲げモーメントは実験結果から次式で与えられる。

$$M_{max} = 15.477 \log_{10} \phi + 24.808 \quad (\phi = \text{空洞短軸長})$$

次に舗装の破壊確率関数を算出する。舗装の破壊確率に関しては、実験を積み重ねれば実験データから導出することが可能である。しかし、路面舗装の状況は、使用材料の生産場所、天候などの施工環境、施工を行った人材の能力など施工状況に影響されるため、一定のばらつきを有すると考えられる。この点に関しては既存研究の蓄積が十分でないため、本研究では舗装破壊確率関数を線形と近似し、調査値を元に算出した。

図 3 のように強度曲線を近似し、次の①から③までの仮定を置いた。

- ① ϕ_{p0} は舗装破壊が起こる最小の短軸長であり、ジオ・サーチ株式会社提供のデータより最小の値である 0.3m と設定する。
- ② ϕ_{p1} は路面下空洞の短軸が超えた場合、舗装破壊が必ず起こるとする値である。ジオ・サーチ株式会社はこの数値を舗装厚 0.2m では 1.6m と算出しているため、こ

の値を採用する。

③ ϕ_{pm} とは舗装破壊頻度が最大となる短軸長であり、 $M_{\phi pm} = \frac{M_{\phi p0} + M_{\phi p1}}{2}$ となるような値とした。舗装破壊実験から得られた式より、0.69m と設定した。

これら仮定より、短軸長に対する舗装破壊確率 P は次式となった。

$$P = \begin{cases} 3.2873(\phi - 0.3)^2 & (0.3 \leq \phi \leq 0.69) \\ -0.6038(\phi - 1.6)^2 & (0.69 \leq \phi \leq 1.6) \end{cases}$$

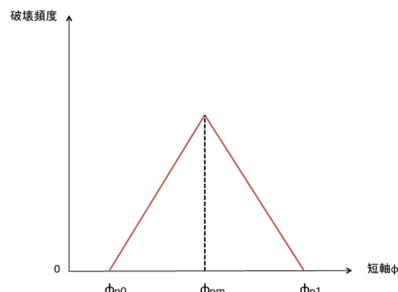


図 3 簡易的な舗装の強度曲線

(4) 空洞発生確率のモデル設定

本研究では、下水道管及びその関連施設をつなぐ接続部分が損傷した時に土砂が流出し、空洞が発生し成長すると仮定している。そのため、接続部分の故障確率と空洞の発生確率は同等であると考えられる。本研究では統計学において生存時間分析に用いられるワイブル分布を採用して空洞の要因箇所が破損する確率を表すこととした。

ワイブル分布は生存時間の分析方法の一種であり、寿命データを扱う生存時間分析に使用される分布の一つである。寿命データを扱うため、観測の打ち切りから発生する打ち切りデータを扱うことができ、ある時点における下水道施設状況をもとに最終的な生存確率を求めることができるため、本研究に適した分析方法である。

3. 分析結果

本研究の分析ではジオ・サーチ株式会社が実施したC市における路面下空洞調査データとC市の下水道管路のGISデータを使用した。調査は平成26年12月12日に行われた。本稿に現れる「現在」とはこの日のことを示す。

この路面下空洞調査は、特定都市の一部道路に沿ってのみ行われたものである。調査対象道路が最近接な道路となっている下水施設を調査対象道路の地下にあると考えられるものと仮定し、これらを抜き出し分析を行った。調査データから使用したデータは提供された内容のうち、空洞全てにおいて揃っていたC市内の位置情報及び観測された深度の2つである。

調査対象路線にて見つかった空洞数、潜在的な要因数、市内全体の潜在的な要因数は以下の表のようになった。なお、敷設からの経過年数が不明なものは、少数であることから含めなかった。また、管路の接続点（継ぎ目）数は、工藤の研究より100m辺り29.9288個⁽⁶⁾とした。

表 2 調査対象路線内の空洞数及びC市内の要因数

	引込管	マンホール	管路の繋ぎ目
空洞数	52	32	31
路線下要因数	1,601	744	8,576
市内要因数	49,300	24,044	172,306

(1) 要因別空洞発生確率関数

分析手法で述べたように、路面下空洞の発生確率はワイブル分布に従うものと仮定した。空洞発生の原因と考えられる下水道施設が敷設されてから破損した時点までの時間を寿命とし、破損しなかったその他の施設の敷設からの現時点までの年数を打ち切りデータとして入力してワイブル分布の推定を行った。その結果、要因別の空洞発生累積確率関数はそれぞれ図4～図6のようになった。

グラフからわかるように、引込管とマンホール双方で敷設から20年経過した後から発生累積確率は上がり始める。しかしそのグラフの線形については傾向が異なることが分かる。マンホールを要因とする累積確率は、線形で一定な上昇が見られるのに対し、引込管を要因とする累積確率は50年を経過すると急激に上昇する。このように2つの要因の間では傾向が大きく異なることがわかる。また、接続点（継ぎ目）を要因とする累積確率は引込管を要因とするものと傾向が同じであるが、示す数値が他と比べ小さい。

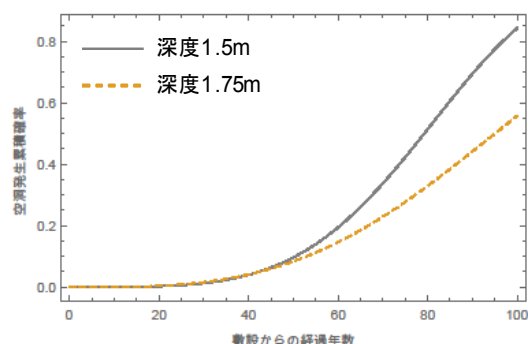


図 4 引込管を要因とする路面下空洞発生累積確率

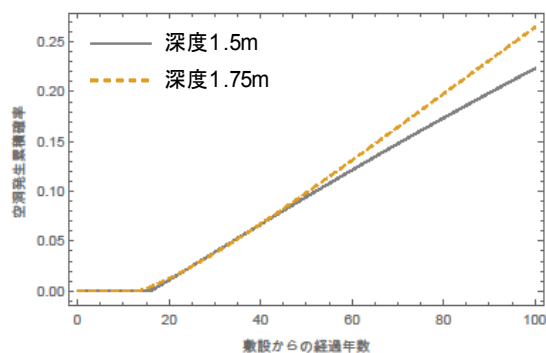


図 5 マンホールを要因とする路面下空洞発生累積確率

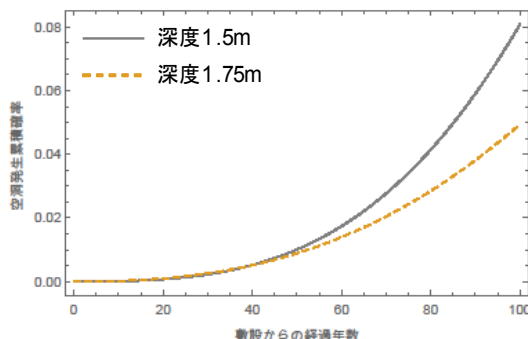


図 6 接続点を要因とする路面下空洞発生累積確率

(2) 今後 10 年間の空洞数について

要因別の路面下空洞発生累積確率と要因数をもとに現在の空洞数、および、今後 10 年間の空洞数の変化を推定

した。図7は、今後10年間現状のまま放置した場合の路面下の空洞数の推計結果である。現状では、合計1,500超の空洞が存在し、今後10年間では、2倍以上の数値になるという結果が得られた。

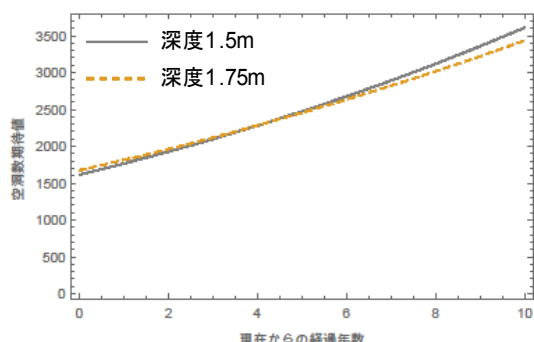


図7 市内全体にある空洞数の今後10年間の動向

図8は、図7に示された空洞数のうち、地震時に地震動により拡大し、かつ、舗装面が落盤することによって道路陥没につながる穴のみを取り出したものである。現状では、合計500超、10年間で3倍近くになることが推計された。なお、先に述べた今回のモデル化の場合、路面下30cm以内の空洞は地震時に陥没する確率が1になるというモデルとなっているため、逆算すると、地震時に道路陥没につながる空洞は概ね8年～11年以前に発生した空洞に対応する。なお、今回の計算では、空洞が発生する深さについては、1.5m、1.75mの2つの設定で計算した。

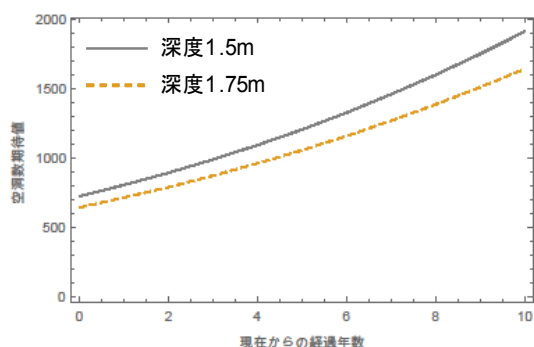


図8 陥没につながる可能性のある空洞数の今後10年間の動向

4. 今後の防災対策の方向性について議論

図8に見るように地震時に道路陥没につながる空洞は時間経過とともにさらに増加する傾向にある。道路陥没による交通支障が応急対応、復旧作業の支障になるのは、地震動により発生する道路陥没数が応急補修の能力を上回る場合である。このことから、交通支障を避けるための今後に向けた対策方針として2つ考えられる。

一つは、地震後の陥没に対する地域の応急補修能力をあげるといふ対策方針である。他方は、予め空洞数を減らしておくといふ対策方針である。図9中に地域の応急補修能力を描くと水平線となる。図中の①が前者、②が後者の方針に対応する。なお、実際の応急補修能力が分からないので図中の線は仮想的に描いた。①、②を組み合わせることで常に地域の応急補修能力を道路陥没数が上回らないようにコントロールすることによって地震時の交通機能の確保が可能となることが理解できる。

5. 今後の課題と方針

今回の分析によって、下水道の状態と路面下空洞の関係性ある程度理解することができた。

ただし、本研究で示したのものには次のような限界を含む。本研究で行った分析による概算結果は、十分な調査データに基づいたものではなく、今後調査データが蓄積されることによって変わりえる可能性があることに留意する必要がある。また、モデル化において設けた仮定について精査する余地がある。例えば、観測、あるいは、実験データによる空洞の成長モデルの精緻化、ばらつきの考慮といったものが挙げられる。

今後、引き続きC市を対象として、現状の研究上の課題を解消するとともに、最終的には、データ収集のための調査、分析、道路陥没を考慮した地震時の交通機能の確保の方策の検討、を一つのパッケージとした防災対策を提示することを目指す。さらに下水道や道路維持管理の平時の視点と地震時の視点を組み合わせた行政計画のあり方について議論を深める予定である。本研究で想定されるアウトプットは、特定の都市C市における固有のものだが、調査・分析・対策検討のパッケージは他の都市に展開できる普遍的なものになると考えている。

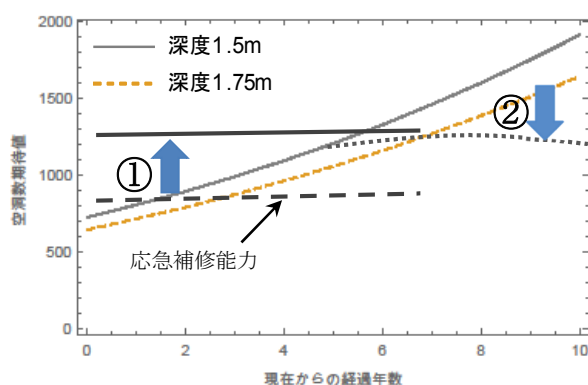


図9 図8を用いた今後の対応の概念図

注 なお本研究は東京大学生産技術研究所、(株)ジオ・サーチ、C市の三者共同研究の一環として進められた。

参考文献

- 1) C市: C市幹線道路維持保全計画, 2015.
- 2) C市: C市公共下水道管路施設長寿命化基本計画, 2012
- 3) C市: C市下水道整備計画, 2011
- 4) 宮本豊尚・深谷渉他: 下水道管路に起因する道路陥没の発生傾向と陥没発生危険箇所との推定, 下水道協会誌, Vol.50, No.607, 2013.5
- 5) 瀬良良子・堀内佑樹「地震動が路面下空洞の拡大化に与える影響の考察 模型実験報告(その1)」地盤工学会第50回地盤工学研究発表会, 2015.9
- 6) 工藤祥子: 大規模災害時の路面陥没現象を考慮した道路断絶リスク評価モデルの開発及びK県C市への適用, 東京大学工学専攻修士論文, 2015