

道路陥没危険度判定システムの開発と 豊中市での検証

RISK DETERMINATION SYSTEM FOR ROAD CAVE-IN AND APPLICATION TO TOYONAKA CITY

清水 康生¹・松ヶ下 伸介²・野村 恭悟²・上村 隆雄³

Yasuo SHIMIZU¹, Shinsuke MATUGASITA², Kyogo NOMURA²,
Takao KAMIMURA³

In late years a lot of accidents by a caused road cave-in occur. Not only when the road cave-in occurs once, it may lead to a casualty, but also hangs a traffic restriction for the repair, and the influence on city activity is serious. This paper presents a system that has peril data and hazard data for predicting road cave-ins. The system's data may be shared by road and sewerage administrators to statistically analyze the relationship between cave-in risks and sewer pipe deterioration levels, pipe material, volume of traffic, etc. and then we create a cave-in prediction equation (mathematical quantification theory class II). The risk indicators that are output using the equation will help the administrators determine the priority of road repairs coupled with sewer pipe rehabilitation. We can regard this theory as one preventive maintenance technology. In this paper, we apply this system to Toyonaka City. Specifically, we calculate a value of cave-ins risk index at a block unit of 20m in the city. Then, it is verified that it offers the effective data for the countermeasure which the municipality carries out.

Key Words : sewage pipe, quantification theory class II, cave-ins risk index, risk determination system

1. はじめに

我が国では道路管理者が道路下に埋設されている下水道管，水道管，ガス管などのインフラ施設の設置に関しての道路占用の許可を与え，管理者はそれらインフラの計画的な補修等の際に占有者間の調整を行い，道路利用者への影響を減らすようにしている．しかしながら，近年，道路下に埋設されている下水道管路の老朽化等が原因で管が破損し，土砂の吸出しが発生し，このことが原因で地中に発生した空洞が道路陥没を誘発する不測の事故が多数発生している．道路陥没は，ひとたび発生すると大事故に至る可能性があるだけでなく，その補修等のために交通制限をかけるなど，都市活動への影響は大きい．

平成28年度の全国の市町村（政令市，特別区含む）で発生した道路陥没件数は11,141件に上る．これらの中では，道路側溝など道路施設が要因の陥没が最も多く（41%），次いで道路占用物件が要因の陥没が24%と多

数となっている．さらに，この中で下水道が要因とされる陥没は2061件で全体の18.5%となっている¹⁾．道路占用物件の中では最も比率が高い要因である．一方，下水道管路は，平成10年に年間布設延長のピークを迎え，平成27年には総延長は47万kmとなっている²⁾．今後は布設から50年を経た古い管路が加速度的に増加すると予想されている³⁾．同時に地方自治体等の技術員の不足や予算の減少が予想されることから，下水道管に起因する道路陥没事故の発生も一層増加することが危惧される．

大阪府豊中市においても下水道管路に起因する道路陥没が頻発しており，有効な予防保全対策が望まれている．同市では，下水道のストックマネジメント計画⁴⁾と下水道取付管更新基本計画⁵⁾により，管路の更新順位を付け，数年間の計画期間と共に毎年計画を立てて陥没の予防保全を行っている．しかし，それでも毎年60件程度の陥没（私道を含む）が発生しているのが現状であり⁶⁾，今後の経年管路の増大や予算制約や人員制約の中でどのような施策を講じることが必要であるか課題となっている．

キーワード：下水道管路，数量化理論Ⅱ類，陥没危険度指標，陥没危険度判定システム

¹正会員 株式会社 日水コン Nihon Suido Consultants Co., Ltd. (E-mail: simizu_y@nissuicon.co.jp)，²非会員 株式会社 日水コン

³非会員 豊中市上下水道局下水道建設課 Toyonaka City Waterworks and Sewerage Bureau.

本稿では、道路の陥没危険度指標を提案し、さらに、路線をブロック化しブロック毎に陥没危険度の判定を行い、管路更新等の優先順位を提示する道路陥没危険度判定システムを提案している。同システムは実用性を重視し、下水道台帳や道路台帳の情報と連動し台帳情報に基づいてブロック単位で危険度を判定する新しいシステムである。豊中市においては、道路陥没に関する現場の情報が蓄積されつつあり、かつ下水道台帳と道路台帳の電子化も進んでいることから、同市で陥没危険度判定式を作成し、道路の陥没危険度指標の算出とその活用を試みて、有効性について検証した。

2. 道路下インフラの維持管理の現状

(1) 一般的な維持管理の考え方

道路には、水道、下水道、ガス、電気などのライフライン施設が埋設されているが、道路法ではこれらを占用施設として許可している。この道路占用には道路法第32条の占用の許可が必要であり、これには道路使用許可申請書を提出しなければならない。この道路占用には、占用期限が定められ、占用料も必要となる。また、占用のための工事の期限や方法についても示すことが求められる。下水道工事などで行う道路の占用工事では、道路を掘削する場合の工事实施方法や占用のために掘削した土砂の埋戻しの方法などが定められ、その工事方法に従わなければならない⁷⁾。また、地方公共団体の道路管理者が道路法に基づき独自に道路占用規則や道路占用工事要領などを定めているので、占有者はこれに従わなければならない。さらに、占有者は、各々の施設を維持管理等するために道路工事を行わなければならないが、その際には道路管理者が中心となって、工事の調整を行うこととなる。調整会議への出席者は、道路管理者・警察及び占有企業者である。この占有者の中に下水道関係者も含まれる。一方、道路管理者が作成する道路台帳には、道路の主要情報が記載されるが、主要な占用物件については少なくともその種別が示されることとなっている⁷⁾。また、平成25年には「道路法等の一部を改正する法律」の施行により、事後対応だけでなく予防保全の観点を踏まえた道路の点検を行うべきことが明示された。具体的には、政令で定める道路の維持又は修繕の技術基準に道路の修繕を効率的に行うための点検に関する基準が含まれることが新たに規定された⁸⁾。また、舗装に関しては、損傷の進行が早い道路等では5年に1回程度以上の頻度を目安として点検を行うことが示されている⁹⁾。このような道路管理の現状に対して、下水道管路の管理のために必要となる布設情報に関しては、各都市の整備する下水道台帳が基本データとなる。同台帳の情報は、都市によ

っては地図情報として整備され公開されている¹⁰⁾。

(2) 豊中市における下水道管路の情報

下水道台帳は、下水道管路の口径・深度・管種・布設年度などの諸元を図面上に記述して電子データ化している。豊中市は平成12年から下水道台帳の電子化を進めており、下水道台帳を同市HP上に公表している。本研究で使用しているデータは、これら公表されているデータを読み込んで、分析に使用している。

今回のシステム構築では、下水道台帳と共に道路台帳を利用している。道路台帳は、道路管理者が作成するもので、道路管理者が管理する道路諸元を平面図上等に記述した台帳である。道路台帳に記された路線は、4.で扱う危険度判定を行うブロックとして道路の分割に利用される。

(3) 豊中市における陥没対策の現状と課題

道路陥没調査⁹⁾に記載された平成18～27年度までの10年分の陥没データのうち市道上で発生した275件をプロットした結果を図-1に示す。同図を見ると比較的古くから下水道管が埋設された地域に陥没が多く発生していることが見受けられる。この現状に対して、市では2つの対策を講じている。最初に、ストックマネジメント計画に基づく下水道管路施設（本管・人孔・取付管）の更新等の実施である。次に、陥没の一番の原因である取付管

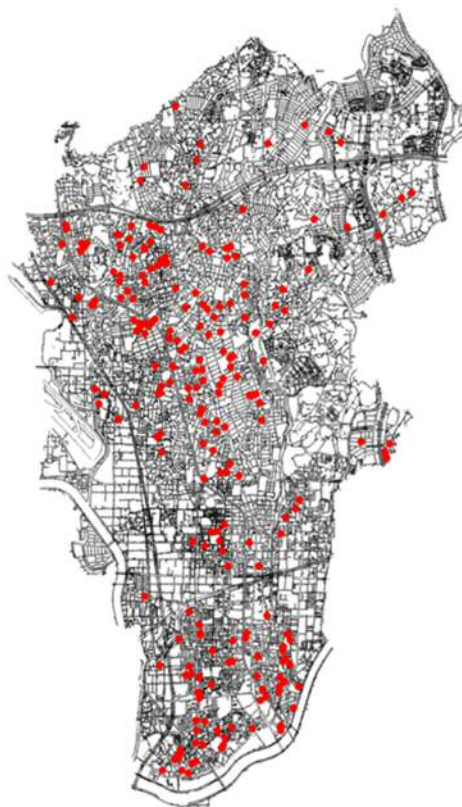


図-1 豊中市の陥没の発生状況（平成18～27年度）

の更新に特化した下水道取付管更新基本計画に基づき、旧陶管（昭和48年以前に製造された陶管）の更新等を進めている。このように対策を進めてはいるが、予算的・人的な資源の不足から必ずしも十分な対応ができていないとも言えない状況である。一方で、予期せぬ陥没が発生した場合には、事後対応を行っている状況である。

これら計画的な管路更新や陥没対応を行っているが、現状ではそれでも道路陥没が発生しており予防保全の観点からの対策が一層望まれる状況となっている。道路管理者の立場からも、予防保全の視点をより明確にした陥没対策の推進が求められている。

3. 道路陥没に関する対策技術の現状

従来より、道路陥没の実態とそのメカニズムや発生の推定に関する基礎的な研究が進められてきた¹¹⁻¹³。国土交通省の国土技術政策総合研究所においては、自治体へのアンケート調査や実験を通じた実態把握とメカニズムなどに関する知見の蓄積が図られている¹⁴。道路陥没に対しては、MMS（Mobile Mapping System）を用いて路面変状を早期に発見する方法¹⁵やGPR（Ground Penetration Radar）を使用し早期に地中の空洞を発見することによって事前に対策を講じる方法などが行われている¹⁶⁻¹⁸。しかし、これらの対策では、空洞発生の原因が考慮されておらず対処療法的な対策となっている。道路陥没の危険度判定を行うためには、陥没までの構造的なメカニズムの変化を物理的に解釈して危険度判定を行う方法が考えられる。しかし、道路下の埋設管路の性状（老朽化度等）、埋戻し土の性状（土壌や地下水の状況等）、アスファルト舗装の性状（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI（International Roughness Index：国際ラフネス指標）で評価される性状など）⁹が関連し、それらを構造的な観点から総合的に評価するには限界があるように思われる。また、陥没発生の危険個所の推定については、幾つかの方法^{19,20}も提示されているが、課題を有すると共に自治体の現場で利用する方法としては技術的な難しさがあると思われる。

本稿では、近年、道路陥没に関する実験や現場の情報が蓄積されつつあることから、道路工事や陥没発生時の情報、布設した下水道管路の情報等を基にした分かり易い統計的な危険度判定手法を提案する。具体的には、これら関連する要因情報を道路陥没の発生と結びつける関係式を数量化理論Ⅱ類の援用により作成し、道路陥没を未然に防止するための情報を提供する陥没危険度判定式を提案する。

4. 陥没危険度判定式の考え方

(1) 陥没危険度判定式

陥没の危険度を判定する手法として、数量化理論Ⅱ類^{21,22}を援用する。陥没危険度判定式は、道路の陥没具合を幾つかのカテゴリーとして定性的に表す目的変数（Y）と陥没を惹起する要因を表す説明変数（Xi）から構成される。このXiは、陥没の理由を説明する変数である。道路陥没の危険度の有無を判定するために、道路陥没を考察した文献¹¹⁻¹⁷から陥没に直接関連する要因や陥没の発生を助長する要因を表-1のように抽出した。これら要因が道路陥没を引き起こす原因になると考えるが、同判定式の中で各要因は幾つかのカテゴリーに分けられたカテゴリーデータとして与えられることになる。個々のデータは、各変数の反応するカテゴリー箇所をマークすることで作成される。陥没危険度判定式の同定には実績データが必要である。当該都市で実際に発生した道路陥没箇所のデータを表-1に示す出典を参考にしながら、一連のカテゴリーデータセットとして整理する。

陥没危険度の判定には、要因をどのようにカテゴリー化するかが重要となる。本稿では、文献等の知見を踏まえてカテゴリー候補を表-1のように設けるものとした。この要因選定やカテゴリー化には都市の特性を反映して行うことが大切である。例えば、布設してから経過年数が50年以上経過した管が多ければ、カテゴリー化の際に考慮する必要がある。式(1)は数量化理論Ⅱ類の基本式形を例示している。この陥没危険度判定式から出力される値を陥没危険度指標（Cave-ins Risk Index）とする。

$$\begin{aligned}
 Y=f(X_i) &= A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + A_3 \cdot X_3 + \dots \\
 &= (a_{11}, a_{12}, a_{13}) \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} + (a_{21}, a_{22}, a_{23}) \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} \\
 &\quad + (a_{31}, a_{32}, a_{33}) \begin{pmatrix} x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \end{pmatrix} + \dots \\
 &= (a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13}) + \\
 &\quad (a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + a_{23}x_{23}) + \\
 &\quad (a_{31}x_{31} + a_{32}x_{32} + a_{33}x_{33}) + \dots \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに、Y：道路陥没、例えば、X1：空洞の存在、X2：経過年数、X3：地下水の状況等である。

陥没危険度判定式の同定には、都市（または一連のデータとして扱うことに合理性のある地域・処理区）に存在するデータを使用する。

次に、説明変数の選択については、当該都市の特性を踏まえて道路陥没に関連性の高い変数を候補と考え、次

表-1 陥没危険度判定式の目的変数と説明変数の候補及びそれらカテゴリーデータについて

目的変数 Y と説明変数 Xi (i=1~11)	データの種別と出典
Y: 道路陥没 (なし、あり) ※推定時の解釈 (陥没しない、する)	陥没復旧工事記録
X1: 空洞の存在 (1.5m 以下に浅くなし、あり 1/2 深未満、あり 1/2 深以上)	GPR 探査情報
X2: 経過年数 (1~30 年未満、30~50 年未満、50 年以上)	下水道台帳
X3: 地下水の状況 (無し、有り、有り・変動もあり)	地下水 (井戸) 調査
X4: 土被り厚 (2m 以上、1~2m 未満、1m 未満)	下水道台帳
X5: 埋設土質 (砂礫土、砂質土)	下水道竣工資料
X6: 管路の部位 (取り付け管、本管、その他)	陥没復旧工事記録
X7: 管種 (陶管、鉄筋コンクリート、その他)	下水道台帳
X8: 下水管破損状況 (破損有り、破損無し)	管内スコープ調査
X9: 交通量 (多い、少ない)	交通量調査
X10: 夏期の気温 (高い、低い)	気象資料
X11: 活断層等の震災ハザード (あり、なし) 地震による振動履歴	活断層ハザード図

の事項を考慮してStepwise法²²⁾などを適用して変数を絞り込む。統計的な優位性だけでなく、説明要因のカテゴリー変数の符号の意味が合理性を有しているか否か等にも留意する必要がある。

○統計的な優位性が高い式であり、カテゴリーのレンジが大きい要因を取り込んでいること

○説明要因のカテゴリー変数の符号が実際の現象を正しく表していること

○データ入手が容易であること

(2) 使用データと説明変数の選定

以上の考え方に基づいて陥没危険度判定式を作成し、同式を用いた危険度判定を行う。使用するデータ項目については表-1に示す項目を想定するが、現時点でこれら全てのデータが揃っている都市は想定しづらい。そこで、重要でありかつ比較的容易に入手可能な情報を基本として、それら項目を組み合わせる分析データとする。また、地域独自の特性要因があればそれを加えてデータとする。

(3) 陥没危険度指標の管理水準

危険度判定指標は、数量化理論の特性から平均値0の基準化された数値で出力される。この閾値を境に危険側か安全側かが判別される。同指標を陥没危険度の管理指標と考えると、例えば図-2の場合、その位置を0より正側に設定すれば誤差判別の少ない安全側の管理水準により危険度判定ができる。この際、実際の管理水準の決定には予算や対応する職員数などの事情を考慮することも必要である。例えば、対策を講じるための予算や人的資源が不足する時に、管理水準を緩くし設定したならば（例えば、-0.2等）、判別の中率は低下する。また、陥没に対してより安全側である正值（例えば、0.2等）を設定した場合には判別の中率は高くなる。このような考え方で管理者の事情を踏まえて管理水準を定めることが必要である。管理水準を定めたならば、水準に満たないブロックに対して、現況の陥没危険度指標の値の小さい

危険側のブロックから優先的に対策を進めることとなる。

(4) ブロック分割とブロックの危険度判定

道路の陥没危険度判定は単位長さ（ブロック）毎に行う。このブロック単位の陥没危険度の判定を行うために、各変数にはブロックの代表値データを付与する。このブロックの大きさは、一般的にはマンホール間の距離程度（例えば、φ600以下では最大で75m）²³⁾を想定する。しかし、密集市街地を含み道幅が狭い市道が多い都市では、ブロック長はより短くする。ブロック内は、状態が均一であると仮定する。道路舗装点検の管理単位延長が100mとされているため²⁴⁾、それ以下の延長で設定することが望ましい。下水道台帳から予め入手できる情報（X2, X4, X7）は、ブロック単位の値として設定する。補修等工事により入手できる情報（Y, X5, X6, X8）とGPR等の各種調査により入手できる情報（X1, X3, X9, X10, X11）については、調査が行われデータが存在する場合には活用する。

5. 道路の陥没危険度判定システム

陥没危険度判定式を使った危険度判定システムの流れを図-3に示す。各ステップについて説明する。

1) ペリルデータ(Y)の収集・整理

道路陥没に対する予防保全を行うために必要となる資料の収集整理を行う。まず、危険事象を表す陥没履歴、道路改良履歴のペリルデータ（Peril Data）を収集し整理する。

2) ハザードデータ(Xi)の収集・整理

次いで、道路陥没を危険事象（ペリル）と考えた時の危険事情であるハザードデータ（Hazard Data）を収集・整理する。データとしては、空洞調査結果（経過観察、原因調査）や下水道台帳から入手する下水道管属性として管種・口径・布設年等がある。道路陥没を惹起するハ

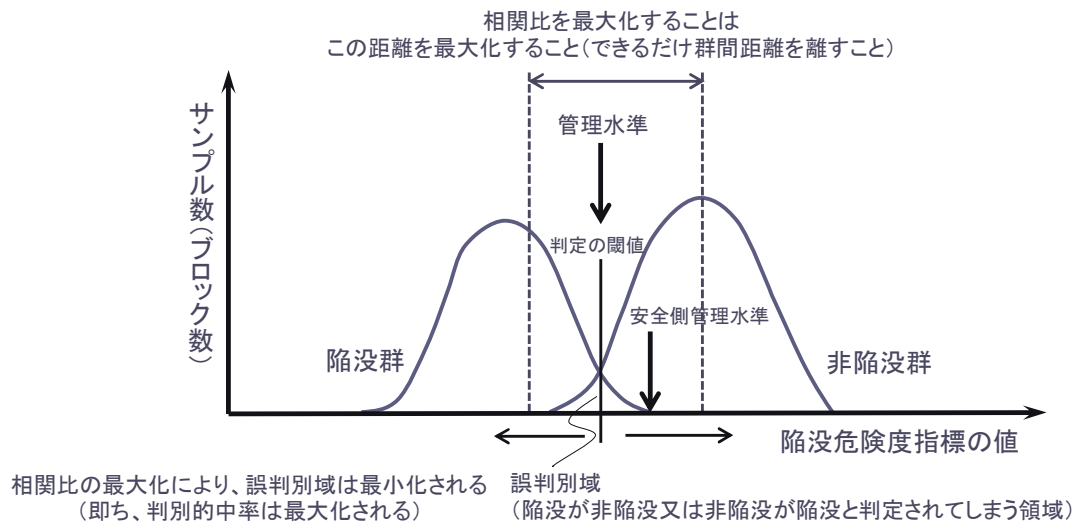


図-2 陥没か非陥没かの判定の考え方

ザードには水道管など他のインフラもあり、これらを考慮する場合には前述と同様のデータが必要となる。さらに、埋設管路の属性データ以外には、埋設土質の情報、地下水位の状況、交通量、路面温度の情報が必要となる。

3) 現地調査によるハザードデータ(Xi)

道路に関する調査データとして、近接目視やMMSによる路面情報とその位置情報が必要である。これについては探査車両が交通規制を必要としない時速40km程度の走行速度で測量を行うことができることから、同車によりレーザースキャナーとカメラによる三次元地形モデルとして計測が可能である。さらに、GPRにより、探査車両で測定したデータから異常信号（空洞や地盤の緩みなどの信号、埋設管などの情報も含まれる）を抽出し、それらの中から空洞の特徴を持つ異常信号を特定する。探査の標準的な精度としては、探査深度1.5m程度、縦50cm×横50cm×厚さ10cm以上の空洞の探知が可能である。また、硫化水素情報等も適宜参照する。

4) データの座標値化・データのマッチング

探査車両のGPS（Global Positioning System）機能により、MMS及びGPRのデータに位置情報を付与することができる。また、下水道台帳に記載されている下水道管路の属性情報についても全てGPSによる位置情報を付与することが可能である。このことから両データのマッチングが可能となり、現地調査と図面資料の情報を併せた管理が可能となる。

5) 陥没危険度判定式の作成(n年度判定式)

道路陥没に関するデータを総合して、道路陥没の発生を推定する陥没危険度判定式を数量化理論Ⅱ類の適用により作成する。推定する目的変数をペリルデータYとして道路陥没状況のレベルを2～3段階程度で表し、そのハザードデータXiに関する情報として2)3)を考える。定性的に与えられるXiデータから、陥没危険度指標の値を推

計する陥没危険度判定式を作成する。

6) 単位ブロック別の陥没危険度指標の推計

陥没危険度判定式によりブロック別の陥没危険度指標を推計する。これは各ブロックの同判定式の説明変数Xiに定性的データを付与して得られる。

7) 道路陥没に対する管理水準の協議・決定

算定された陥没危険度指標値に対して、年度内に目標とする水準を陥没防止の管理水準として設定する。この管理水準を達成するために、補修等を行うブロックの優先順位を道路管理者と下水道管理者で協議・決定する。

8) ハザード対応(道路改良)

陥没危険度指標の管理水準を達成するために、必要となる路面や空洞に関する道路改良を行う。空洞箇所の地盤改良といった補修等の工事も適宜行う。

9) ハザード対応(下水道)

陥没危険度指標の管理水準の達成に向けて、必要となる下水道管の管路内調査、補修等工事、さらに取り付け管改良工事などを行う。

10) ハザードデータ(Xi)の補正

8)と9)のハザード対応を踏まえて、改善された道路と下水道の情報を対象ブロックの新たなハザードデータとなるよう置換する。

11) ブロック別の陥没危険度指標の再計算

補正されたハザードデータを陥没危険度判定式に入力し、陥没危険度指標の再計算を行う。この時、算出される同指標値は前回よりも改善されている（後述する事例では、陥没危険度指標の値は、ハザード対応により改善される程、大きくなる。即ち、同指標値が大きくなる程、陥没危険度は減少する）。

12) 管理水準の達成度判定

指標値が管理水準を達成しているか否かを判定する。未達成の場合には7)のステップに戻る。また、全て達成

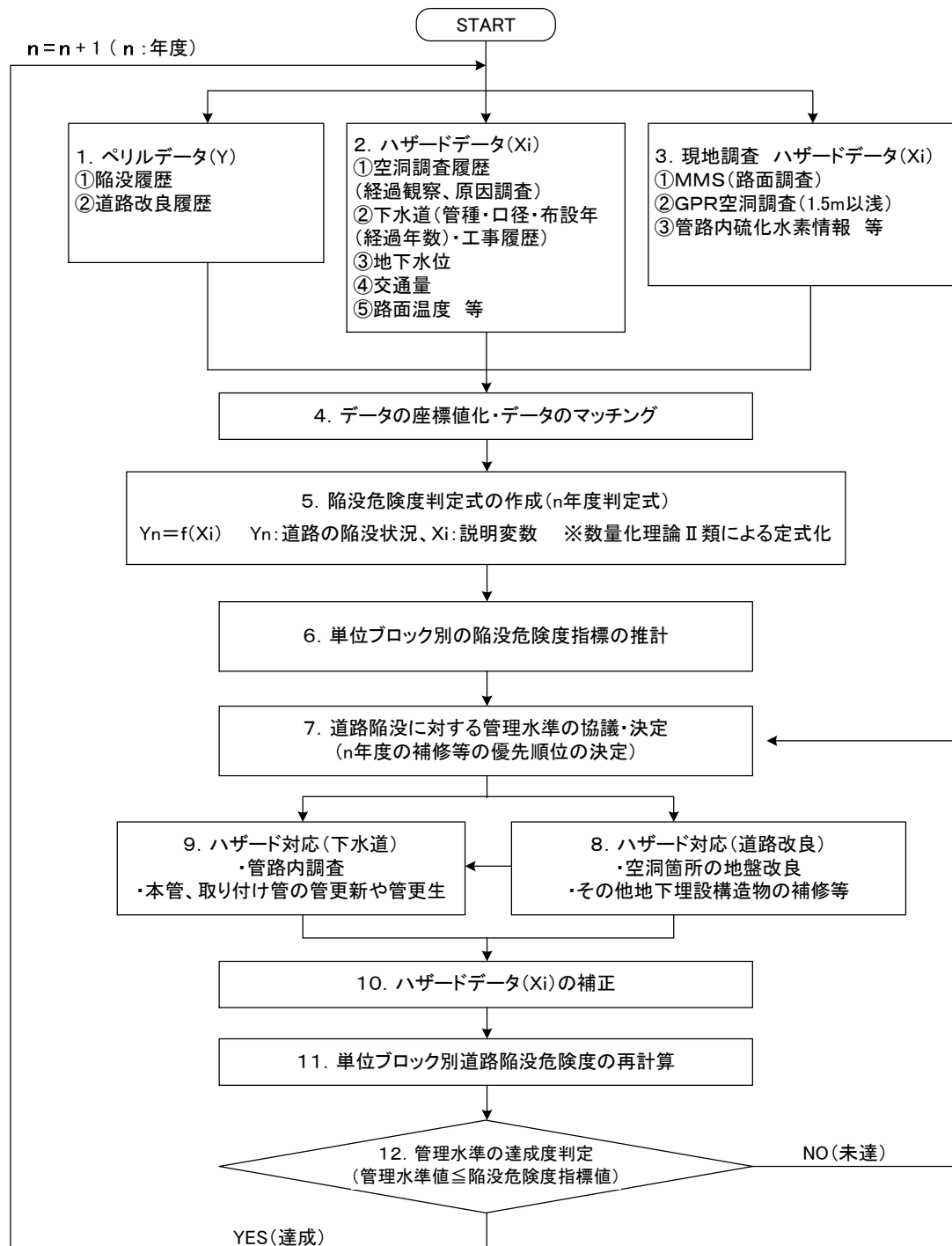


図-3 陥没危険度判定システム

している場合には年度内の対応を終了する。道路改良や下水道管路の補修等の工事記録データは、基礎情報として蓄積し、次年度の陥没危険度判定式の同定に活用する。このサイクルを繰り返すことにより毎年のデータが増え、同判定式の精度は年々向上する。

陥没危険度判定システムの基本的な流れは以上の通りであるが、同システムを実際に運用する場合には適宜、既存の対策計画と調整を行って全体をシステム化するこ

とが必要である。

次章では同フローの中に示される、1)～4)までのデータ整備、5)陥没危険度判定式の作成、6)単位ブロック別の陥没危険度指標の推計、さらに7)道路陥没に対する管理水準の協議・設定までの部分について対象として、豊中市の下水道管路に適用した事例を説明する。

6. 豊中市への陥没危険度判定式の適用

(1) 路線のブロック分割

市内の道路を道路台帳の路線図を基にブロック分割する。ブロックのサイズは前述のようにマンホール間距離程度にとることが標準的と考えるが、同市は人口の密集地域を含み市が管理する道路は狭い道路が多数となっている。このため、ブロックサイズは20mとして分析を進めるものとした。ブロック数は全市で35,585ブロックである。同市では道路台帳の地図情報化が進んでおり、台帳により市道毎に路線番号が付与され管理されている。ブロック化はこの路線図を基として単位長さに分割した。したがって、私道部分は対象としていない。

(2) 説明変数候補の抽出と値の付与

数量化理論の説明変数候補としては、豊中市の特性を考慮し入手が可能な表-2に示す7つの要因とした。豊中市全体で差のない要因（X10, X11）や記録が残っておらず、また、残っていても正確さに欠けるデータである要因（X1, X3, X5, X8）も除くものとした。また、取付管については問題視していることから、ブロック内の取付管の数とその中の旧陶管（仕様改善前の管）⁹⁾で布設された取付管の数についてもX12とX13として要因に含めるものとした。さらに、数量を表す要因のカテゴリについては、カテゴリー化によりブロック相互の違いができるだけ明確になるように区分した。これら説明変数候補は、ブロック毎に付与されるが、同市では、下水道台帳の地図情報システムが整備されているため、同システムにより管理される下水道管路情報を利用してブロック毎の集計値や代表値を作成しカテゴリー化した。

(3) 陥没危険度判定式の作成

豊中市では市道上において平成18年度から27年度までの10年間で275件の下水道管由来の道路陥没が発生している。これら陥没データと表-2に示す属性情報を、その発生場所を表すGIS情報を基に対応するブロックに付与する。陥没危険度判定式の係数同定には、これら陥没データと共に陥没していない非陥没データも必要である。そこで陥没データの位置を利用してボロノイ分割を行い、その示された場所を参照して近傍の場所から非陥没データを400件抽出した。両データの合計数は、675件となる。これらデータを使用して、表-2の説明変数候補から要因を絞り込んで陥没危険度判定式を決定する。

表-2の要因相互についてカイ二乗検定を行い、p値を表したマトリクスを表-3に示す。同表より統計的には独立でない要因を含み一部で因果関係を有する要因（X4とX6）を含む。数量化理論Ⅱ類の分析を行う際には、これらを考慮して変数を組み合わせ、さらに、式を選定す

表-2 説明変数候補の要因とカテゴリー分類

X2：経過年数	a41：1～30年未満 a42：30～50年未満 a43：50年以上
X4：土被り厚	a51：2m以上 a52：1～2m未満 a53：1m未満
X6：管路の部位	a21：取付管 a22：本管 a23：その他
X7：管種	a21：陶管 a22：鉄筋コンクリート a23：その他
X9：交通量	a21：2,000台未満 a22：2,000台以上8,000台未満 a23：8,000台以上
X12：取付管の数	a21：0～5未満 a22：5～10未満 a23：10以上
X13：取付管の数 （旧陶管を対象）	a21：0～5未満 a22：5～10未満 a23：10以上

表-3 説明変数候補間の独立性について（p値）

ケース	X2	X4	X6	X7	X9	X12	X13
X2	—		**	**			**
X4	0.12	—	**				
X6	0.00	0.00	—	**		**	
X7	0.00	0.03	0.00	—		**	**
X9	0.02	0.02	0.01	0.01	—		
X12	0.86	0.10	0.00	0.00	0.03	—	**
X13	0.00	0.10	0.01	0.00	0.03	0.00	—

注：** 有意水準1%

表-4 ケース毎の各変数のレンジと判別の中率（R：%）

ケース	X2	X4	X6	X7	X9	X12	X13	R
C1	1.42	0.23	0.16	1.40	1.43	0.97	1.56	77
C2	1.61	-	-	1.27	1.76	1.03	1.52	76
C3	1.59	-	-	1.33	1.87	-	2.18	76
C4	2.67	-	-	-	2.26	-	2.48	69

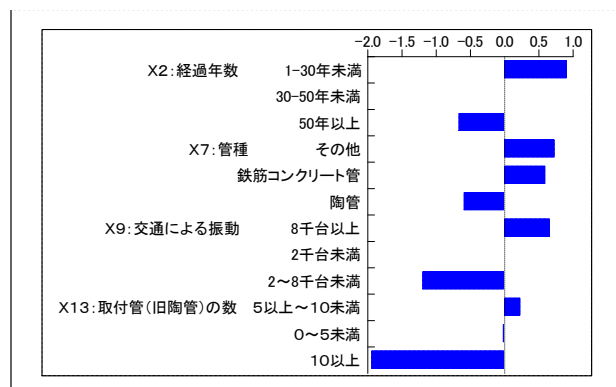


図-4 陥没危険度判定式の同定（ケースC3）

る際に共線性が表れた場合には、これを回避するよう説明変数の選択を行う。

数量化理論Ⅱ類では、統計的にデータの陥没群と非陥没群をできるだけ引き離し、判別の中率を高めるように各変数の係数を決定する。同法を適用し、同式の変数選択について検討した結果を表-4に示す。

まず、全7変数で分析したところ、同表中のケースC1の結果となり、X4とX6はレンジが他の変数よりも大幅に小さくなった。この時の判別の中率Rは77%である。このため、ケースC2ではこの2変数を除いて、5変数で式を作成した。この結果、X7とX12は相対的に少しレンジの小さい変数となったが、RはC1とほぼ同じ76%であった。ただし、X13で単相関と偏相関係数で符号が逆転し共線性の影響が表れた。このため、X12を除いてC3を計算した(図-4参照)。

C3のX9(交通振動)では、2~8千台の場合に陥没危険度が大きくなるが、この理由として本市において交通量が同レベルの道路では取付管の数が多く、そのことが原因で陥没への影響が大きく判定されていると考えられる。この結果、C3も判別の中率は76%と良好な値となった。

さらに、レンジが相対的に小さいX7を除いたX2、X9及びX13でC4を試算した。各変数のレンジがほぼ同程度に高くなったが、判別の中率は69%と低下した。ただし、C3とC4では、共に各変数のカテゴリ係数の符号の意味は合理的な結果となった。

C4は、判別の中率がC3よりも7%程低下するものの変数を減らしているため、データ準備が容易な判定式といえる。しかし、豊中市においては、C3の4変数の場合においても比較的容易にデータを得ることができるため、判定式として精度の良いC3を選定するものとした。

$$\begin{aligned} C3 : Y = & (0.919X21 + 0.008X22 - 0.667X23) \\ & + (-0.592X71 + 0.602X72 + 0.738X73) \\ & + (-0.008X91 - 1.196X92 + 0.669X93) \\ & + (-0.022X131 + 0.239X132 - 1.942X133) \quad (2) \end{aligned}$$

(4) 陥没危険度の管理水準の設定

次に陥没危険度の管理水準を設定する。ここで注意すべきことは、この陥没危険度指標の値はあくまで得られているデータ群から作成した陥没危険度判定式を基に判断された相対的な評価結果であるという点である。従って、数値の大きさから優先順位の情報は得られるが、どの数値以上について補修等の対象とするかという管理水準は判定式毎に毎年設定する必要がある。その際に重視する必要があるのは、陥没を惹起するか否かの境目となる陥没危険度指標の閾値である。この数値を下回っていれば統計的には陥没の危険性があると解釈される。管理水準の決定には予算や対応する職員数などの事情を考慮

することも必要であるが、今回は閾値である0を管理水準と考えた。管理水準を定めたため、水準に満たないブロック即ち、現況の陥没危険度指標の値の小さいブロックから優先的に対策を進めることとなる。

(5) 陥没危険度判定式の有効性の検証

陥没危険度判定式の有効性について検証する。前述のケースC3の4変数の陥没危険度判定式を採用し、ブロック別の危険度判定を行う。同式の係数同定には平成18年度から27年度までの10年分の陥没データを利用している。ここでは、10年分のデータを使って識別したブロック別の指標値を推計し、その結果と同定に使用した275個の陥没データを重ねて表示した結果を図-5に示す。同図は、豊中市でも道路陥没の多い豊中排水区付近(上段)と庄内排水区付近(下段)を示している。全市の陥没の判別の中率は表-4に示すよう76%であるが、空間的な分布をみると危険度の高い路線やブロックで実際に陥没が多数発生していることが再現されている。陥没危険度判定システム(図-3参照)に示すよう、今後、毎年データを蓄積し活用することで、判定式の精度は年々改善するものと考えられる。

(6) ブロック別の陥没危険度判定結果の活用

図-5に示された陥没危険度情報と危険度判定式そのものをどのように活用するかについては、以下のように考えることができる。

①陥没危険度の高いブロックが連続している路線を知ること、または、全市的に眺めてスポット的に危険なブロックを知ることができ、市の行う各種調査の優先順位付けの参考情報となる。

②或るブロックが危険であると判定された時に、その理由を各変数の点数の内訳(判定式のレンジ)から推定することができる。

③①②の情報は、市の進める本管の更新計画や取付管更新計画に対して有効な情報を提供する。この点については次節にて詳しく述べる。

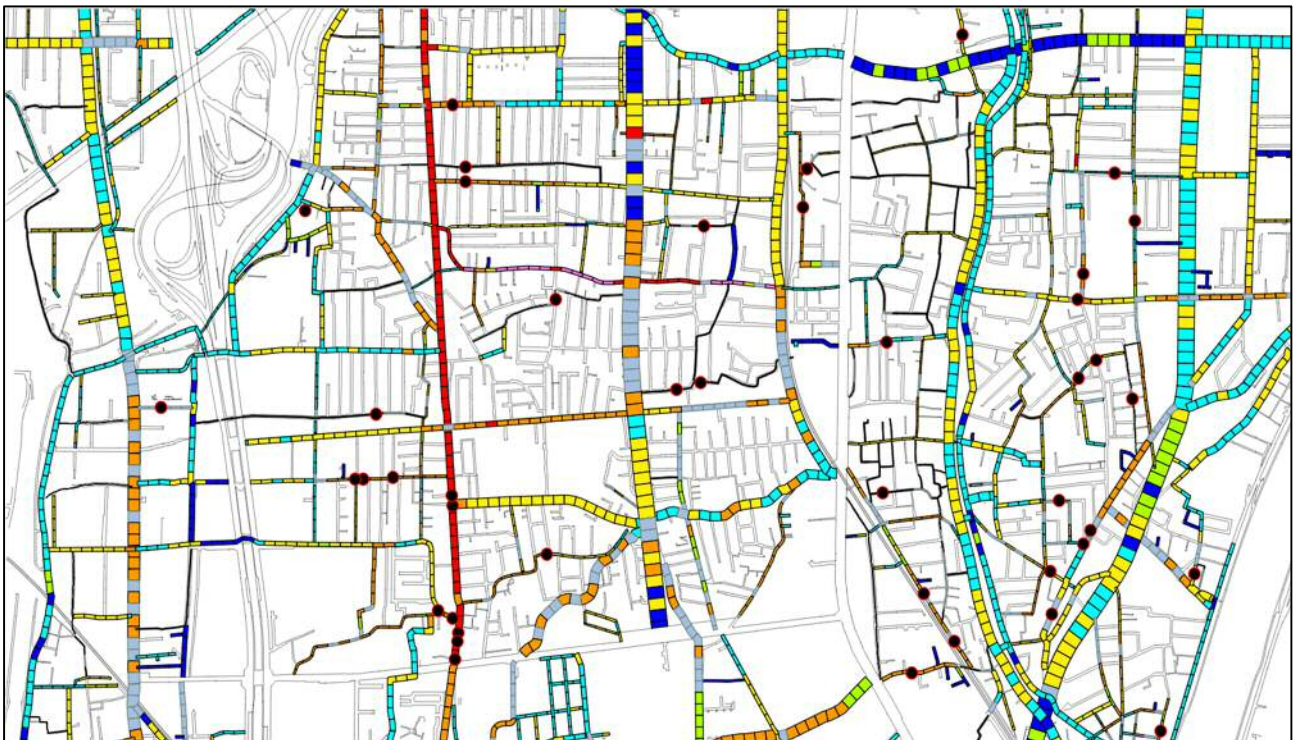
(7) 陥没危険度判定システムの計画上の位置付け

豊中市では、ストックマネジメント計画の一環として布設後40年を経過した下水道本管を対象として、図-6の白枠の項目のフローで対策を講じている。同計画に対して、本稿で提案している陥没危険度判定システムからの出力情報は、ハッチングして表示した追加部分として危険度判定に有効な情報を提示することができる。まず、簡易調査を行う路線の優先度判定に対して総合的な観点から情報を提供できる。さらに、同計画では、調査の結果を受けて管路の状態を優先度Ⅰ～優先度Ⅳ及び維持までの5段階の優先度に分類し、優先度Ⅰ～Ⅲについては

(豊中排水区付近)



(庄内排水区付近)



【凡例】

陥没危険度指標の値：■安全大（1.0以上）→■安全中（0.5以上）→■安全小（0以上）

→■危険小（-0.5以上）→■危険小（-1.0以上）→■危険中（-1.5以上）→■危険中（-2.0以上）→■危険大（-2.00未満）

平成18～27年度の陥没箇所：●

注：陥没箇所は既に補修等がなされているため、現在のブロック表示色は以降の状態を表す色となっている

図-5 豊中市における陥没危険度指標値の判定結果（判定式の同定結果：縮尺1/7500）

次のフローである詳細調査へ進む。これらの優先度判定においても、下水道管以外の交通量などの要因を含めた総合的な視点からのブロック単位の危険度判定の情報を提供することができる。

また、取付管を対象として平成26年度に下水道取付管更新基本計画を策定し、27年度に同実施計画を28年度から同事業を展開している。同実施計画では、既知の陥没多発排水区内の公道に埋設されている旧陶管を対象として取付管調査を実施し健全度を判定している。

取付管調査の健全度の判定では、陥没の可能性の高いAランク、比較的健全であるBランク（可能性低）と異常なしの3段階に分けられ、Aランクについては計画的に更新を実施している。本稿で提案している陥没危険度判定システムは、排水区の中でどの路線を優先的に調査すべきかその地区を特定する情報を提供できる。また、計画対象排水区域以外においても、全市を眺めた上で優先的に調査すべき個別箇所は存在しないかといった個別危険箇所の特定に有効な情報を提供する。

7. 結論

本稿では、道路陥没を未然に防止するための陥没危険度判定式とその出力値である陥没危険度指標及び同式を使用した陥没危険度判定システムの考え方を提案し、その内容を豊中市の下水道管理に適用し、陥没危険度判定値の有効性を検証した。主な成果は次のとおりである。

①陥没危険度判定式から得られるブロック別の陥没危険度指標値は、陥没の危険度を総合的に表し得ることを実証した。このことにより、次のメリットがある。

ア. 管理水準を想定することにより、市内の路線やスポット的なブロックの危険箇所を具体的に特定することができる。

イ. ブロックの危険である理由を指標値の内訳（判定式のレンジ）から推定することができる。

ウ. アとイの情報は、市の進める本管の更新計画や取付管更新計画に対して有効な情報を提供する。

②本稿では、上記①ウの計画上の位置付けを具体的に提示した。ストックマネジメント計画等を進める他都市でも同様の考え方で適用できると考える。

③陥没危険度判定システムは、その手順で陥没対策を進めることにより、危険度判定の精度を継続的に改善することが可能である。

一方、陥没危険度判定に関して、以下の課題がある。本稿では、4要因（経過年数、管種、交通量、取付管（旧陶管）数）を道路陥没に影響する要因として選定した。これら要因を含め、今後、陥没要因のデータ収集と要因と陥没との関係を詳細に考察する必要がある。また、

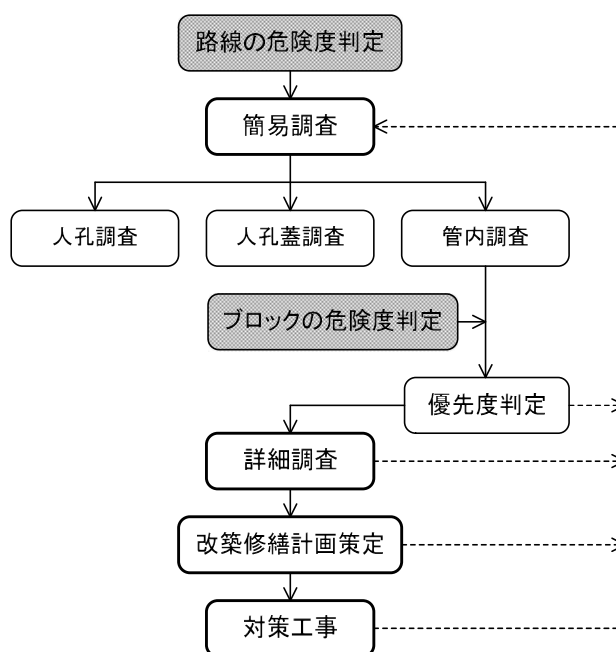


図-6 危険度判定システムの位置付け

道路部局の路線データは利用したが、その他の要因については下水道部局の情報を基本として分析を進めた。今後、道路部局のデータ（舗装劣化、ひび割れ等の情報）を取り込んで解析を進めることにより、さらに総合的な陥没危険度判定式を構築することが可能である。そのため情報共有を進める必要がある。

さらに、本稿で開発した手法を他都市に適用するに際しての課題・留意事項を挙げると以下のとおりである。

①現状では多くの自治体で道路陥没に関する補修等の記録が十分には残されておらず、関連する要因データも体系的には収集されていない。道路陥没の補修等に関するデータを記録・蓄積し、それらを積極的に情報共有し予防保全に活用することが必要である。特に道路陥没位置のデータをGIS情報と共に記録することは重要である。

②下水道台帳と道路台帳は近年になって電子データ化が進んでいる。本稿では、電子化された路線データからブロック別の各種データを自動抽出するシステムを構築している。情報基盤として、台帳情報の電子化・地図情報化を進める必要がある。

③本稿では、下水道管理者の立場を中心として陥没危険度指標の有効性を論じたが、道路管理者と下水道管理者が連携することによる双方にとってのメリット²⁵⁾についても、今後は実証していく必要がある。

④既に道路と下水道の維持管理データを共有し両者を上手く活用している都市では、提案したシステムの導入は容易であり、その実効性も高いと思われる。また、中小都市では、担当者の不足等から一つの部署で道路と下水道のインフラ管理を行っている場合も多い。このような都市でも、導入は有効であろうと考える。

今後、我が国では技術者不足と社会資本整備の財政規模の縮小が見込まれる。そのような状況において、本稿で提案した道路維持管理（陥没の予防保全等）と下水道等の埋設物管理（管の補修等）を一元的に行う包括的管理の必要性は一層高まるものと考え。

最後に、本稿で説明した陥没危険度判定式については、特許を出願中であることを付記する²⁶⁾。

謝辞：本稿を作成するにあたり、豊中市上下水道局の斉藤彰一氏にはデータ精査等のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局 HP, 2018.
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/jikanri/pdf/h27-28kanbotu.pdf>
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 HP, 2017.
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html
- 3) 国土交通省社会資本整備審議会・技術部会交通政策審議会技術分科会，第1回地下空間の利活用に関する安全技術の確立に関する小委員会 HP, 2017.
<http://www.mlit.go.jp/common/001172283.pdf>
- 4) 豊中市上下水道局，ストックマネジメント計画，2017.
- 5) 豊中市上下水道局，下水道取付管更新基本計画，2014.
- 6) 豊中市上下水道局，道路陥没調査.
- 7) 道路法施行規則，昭和27年8月1日建設省令第25号，平成28年10月28日改定.
- 8) 国土交通省道路局HP，道路法等の一部を改正する法律について，平成25年9月2日施行.
<http://www.mlit.go.jp/common/001034600.pdf>
- 9) 国土交通省道路局，舗装点検要領，2016.
- 10) 豊中市，豊中市下水道情報マップ，2017.
<http://gis.city.toyonaka.osaka.jp/webgis/gesuidou.html>
- 11) 桑野玲子・榊谷有吾・堀井俊孝・山内慶太・小橋秀俊，下水管渠の破損に伴う土砂の流出特性，土木技術資料，Vol.49, No.2, pp.60-65, 2007.
- 12) 桑野玲子・堀井俊孝・山内慶太・小橋秀俊，老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.2, pp.349-361, 2010.
- 13) 桑野玲子・佐藤真理・瀬良良子，地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.2, pp.219-229, 2010.
- 14) 横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚，下水道管路施設に起因する道路陥没の現状（2006-2009年度），国土技術政策総合研究所資料，2012.
- 15) 横田敏弘・深谷渉・末久正樹・宮本豊尚・片山辰雄・交久瀬磨衣子，高精度GPS 移動計測装置（MMS）を活用した下水道管渠起因の道路陥没予兆 発見手法の検討，国土技術政策総合研究所資料，第750号，2013.
- 16) 小池豊・瀬良良子，路面下空洞の発生状況に関する考察（その1）空洞発生状況の特徴，第47回地盤工学研究発表会，pp.1457-1458, 2012.
- 17) 瀬良良子・小池豊・天利典弘，路面下空洞の注入補修箇所の経過観察調査報告とその考察，第49回地盤工学研究発表会，pp.1919-1920, 2014.
- 18) 秋元章，最新の埋設物の非破壊探査手法（埋設管マッピングシステム），配管技術，pp.32-37, 2012.
- 19) 松川務・中村秀明・宮本文穂，下水管網に起因する道路陥没の位置推定と危険度及び原因の予測に関する手法の提案，下水道協会誌，Vol.45, No.554, pp.109-120, 2008.
- 20) 宮本豊尚・深谷渉・横田敏宏・太田信弘，下水道管路に起因する道路陥没の発生傾向と陥没発生箇所の推定，下水道協会誌，Vol.50, No.607, 2013.
- 21) 林知己夫監修・駒澤勉著，数量化理論とデータ処理，朝倉書店，1982.
- 22) 田中豊・脇本和昌，多変量統計解析法，現代数学社，1983.
- 23) 社団法人日本下水道協会，下水道施設計画・設計指針と解説 前編 2009年版.
- 24) 国土交通省国道・防災課，舗装の調査要領（案），2013.
- 25) 清水康生・野村恭悟，道路陥没を考慮した下水道管更生の優先順位に関する考察，日本非開削技術協会，第28回非開削技術研究発表会論文集，pp.127-136, 2017.
- 26) 清水康生・野村恭悟，特許申請中（PCT/JP/2018/002316）