

管渠周辺地盤における空洞進展メカニズムと空洞対策の優先度評価

中日本建設コンサルタント(株)	正会員	前本尚二
中日本建設コンサルタント(株)	正会員	○川井望
名古屋工業大学大学院	正会員	前田健一
名古屋市上下水道局		間下秀利

1. はじめに

全国各地の都市部では、道路占用物件(上下水道、電気、通信、ガスなど)が要因と考えられる道路の陥没が、年間 3,000~4,000 件発生している¹⁾。道路に埋設されたライフラインの多くは、高度経済成長期に布設された施設が多く、これらの老朽化した施設が道路陥没を引き起こす前に対策を行うことが求められている。

地下水位は降雨や季節により変動し、地下水位の上昇に伴う管渠周辺地盤の空洞進展の挙動は、図-1に示すように、少しずつ進展するものと考えられる。

空洞調査時には小さな空洞でも、急に大きな陥没
図-1 管渠周辺地盤の水位上昇による空洞進展挙動

事故を引き起こす事例があることから、管渠周辺地盤における空洞進展メカニズムを把握するため、大型土槽模型を用いて、管渠の欠損の形状・外水位や管渠の内水位等の水位条件・埋戻し地盤材料について、複数の条件のもとでモデル実験を行い、この現象の解明を試みた。

この実験の結果に名古屋市における過去4年分の空洞調査結果を加味して、空洞調査によって空洞が発見された場合の追加調査の方法と空洞対策の優先度評価方法を提案した。

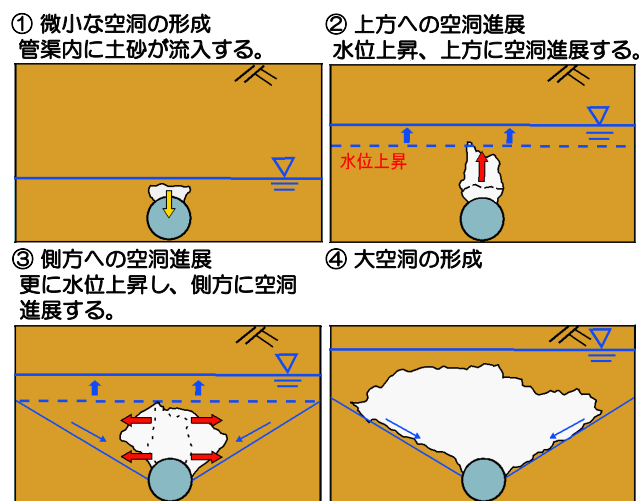


図-1 管渠周辺地盤の水位上昇による空洞進展挙動

2. 実験内容及び実験方法

2.1 模型実験の概要

模型実験に用いる土槽を図-2 に示す。土槽底面部に管渠を模擬した $\phi 150\text{mm}$ のアクリルパイプを設置し、その先端に $15\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 幅の半円形でスリット状の欠損を設け、管渠継ぎ手部等の破損により土砂が流出する状況を再現した。布設後数十年経過している管渠では、地下水位以下の埋戻し土は飽和状態になっていると考えられるので、水中で締固めを行って飽和状態の地盤を作成し、作成後に土槽の底部に取り付けた水压計を用いて土槽内水位の平衡状態を確認した。

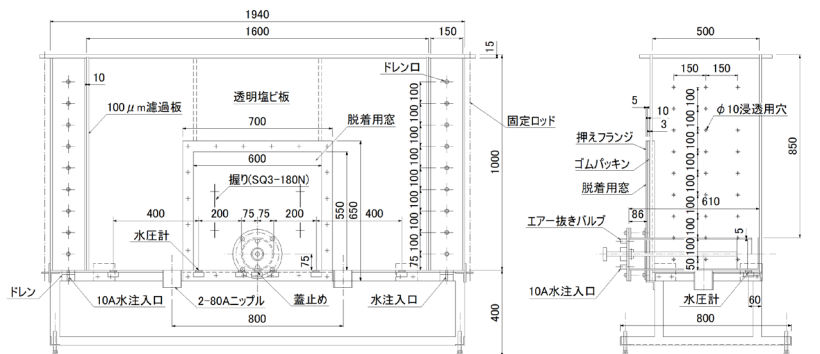


図-2 模型実験に用いた土槽

Mechanism of cavity propagation in ground surrounding sewer pipe and evaluation of measure priority
: Syoji Maemoto(Nakanihon Engineering Consultants Co.),Nozomu Kawai(Nakanihon Engineering Consultants Co.),
Kenichi Maeda(Nagoya Institute of Technology) and Hidetoshi Mashita(Nogoya City)

2.2 実験に用いる土の物性

実験に用いる土は、管渠布設時の埋戻しに使われている「山砂」と「改良土」を用いた。実際に空洞が生じる箇所は、施工後数十年が経過していることから、地下水位の変動や管渠の劣化部からの漏水等により土の細粒分(シルト・粘土分)が流されて、土の透水係数が大きくなっていると考えられる。そのため本実験では、施工後数十年経過した土の状況を再現するため、山砂と改良土を水洗いし、細粒分を取り除いたものを用いるものとした(図-3)。

水洗いを行った「山砂」と「改良土」の粒度特性は、図-4の粒度加積曲線に示すとおり、元の状態から細粒分が抜け、1mm以上の分布が多く、空洞が進展しやすい分布特性である。また透水係数は図-5に示すとおり、細粒分を取り除いたことにより透水性が上昇し、「山砂」と「改良土」のいずれも透水性は低い・非常に低いから、中位に分類されるようになった。

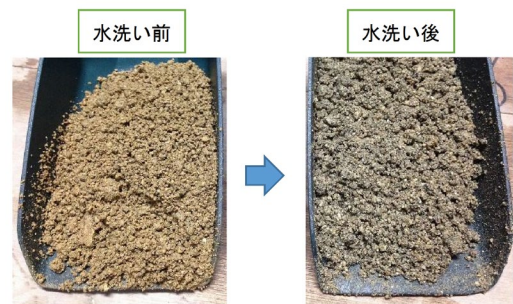


図-3 山砂を洗った状況

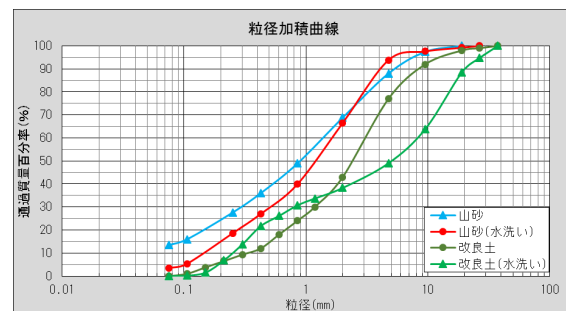


図-4 実験に用いる土の粒度特性

2.3 実験の種類

模型実験は、空洞が小さい状態で発見されてから、大空洞に至る空洞進展メカニズムを解明することを目的とし、外水位条件や管渠の内水圧の条件を段階的に変化させるケースに加え、模擬管渠の欠損幅が拡大するケースを設定した。

(1) 外水位変動がある場合の空洞実験

降雨や季節による地下水位の変動を想定し、外水位を上昇・下降させて空洞の進展を確認する実験(図-6)。

外水位の変動は管中心から上方へ40cmの位置から±20cm変動するケースと、±40cm変動するケースとした。水位の保持時間は10分とし、外水位の上昇→下降→上昇のサイクルを5回繰り返した。

(2) 内水圧の条件を変化させる場合の空洞実験

ゲリラ豪雨や浸水等を想定し、管渠の内水圧の条件(水頭、給水時間)を変化させる実験(図-7)。

土の種類	透水係数 (cm/s)	透水性
山砂	4.28×10^{-4}	低い
山砂(水洗い)	5.11×10^{-3}	中位
改良土	8.68×10^{-6}	非常に低い
改良土(水洗い)	1.26×10^{-2}	中位

透水性	透水係数 k (cm/s)			
	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
透水性	実質上不透水	非常に低い	低い	中位
対応する土の種類	粘性土 (C)	微細砂、シルト、砂-シルト-粘土混合土 (SF) (S-F) (M)	砂および礫 (GW) (GP) (SW) (SP) (G-M)	清浄な礫 (GW) (GP)
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験	定水位透水試験	特殊な変水位透水試験
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算	なし	清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算	

図-5 実験に用いる土の透水係数²⁾

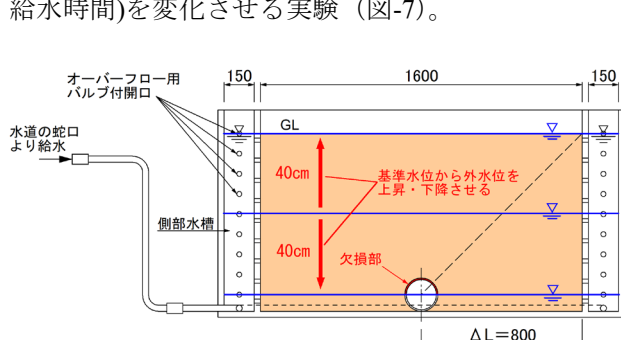


図-6 外水位変動がある場合の土槽モデル図

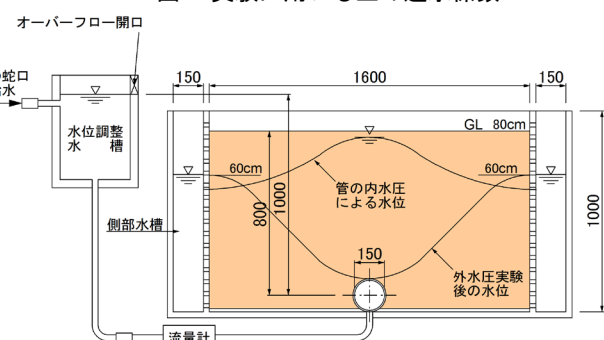


図-7 内水圧の条件を変化させる場合の土槽モデル図

(3) 空洞発生後に欠損部の幅が拡大する場合の空洞実験

空洞が発生し、図-8に示すように空洞の下部にゆるい土砂の層ができたケースで、実験中に欠損部の幅を拡大してゆるい土砂の層の土砂を流出させ、空洞の進展状況を確認する実験。

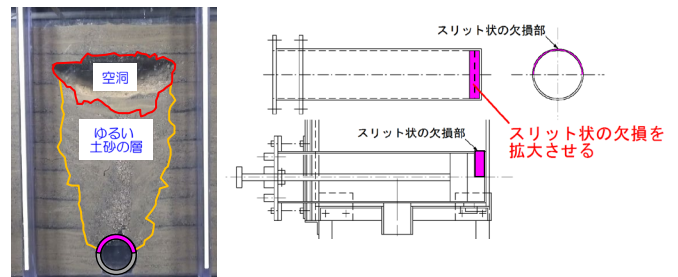


図-8 ゆるい土砂の層とスリット欠損の拡大

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果

実験結果の一覧表を表-1、表-2に示す。

表-1 実験結果の一覧表

実験名称	実験No	土の種類	欠損	地下水位条件	実験結果	実験写真	
(1) 水位変動がある場合の空洞実験	1	山砂 (水洗い)	30mm	変動(標準) 管中心から 40cmを基準 ±20cm	外水位上昇で 空洞進展(中)	40cm外水位一定を作用させた状態	水位変動±20cm_10分5サイクル給水完了時
	2	山砂 (水洗い)	30mm	変動(大) 管中心から 40cmを基準 ±40cm	外水位上昇で 空洞進展(大)	40cm外水位一定を作用させた状態	水位変動±40cm_10分5サイクル給水完了時
(2) 内水圧の条件を変化させた場合の空洞実験	3	山砂 (水洗い)	15mm	外水位一定 60cm +内水圧 水頭50cm (5分間)	内水圧の載荷で 空洞進展(小) 水頭50cmによる 影響はほぼ無い	60cm外水位一定を作用させた状態	内水圧50cm_5分5サイクル給水完了時
	4	山砂 (水洗い)	30mm	外水位一定 60cm +内水圧 水頭50cm (5分間)	内水圧の載荷で 空洞進展(小) 水頭50cmによる 影響はほぼ無い	60cm外水位一定を作用させた状態	内水圧50cm_5分5サイクル給水完了時
	5	山砂 (水洗い)	15mm	外水位一定 60cm +内水圧 水頭50cm (10分間)	内水圧の載荷で 空洞進展(小) 10分載荷による 影響はほぼ無い	60cm外水位一定を作用させた状態	内水圧50cm_10分5サイクル給水完了時
	6	山砂 (水洗い)	15mm	外水位一定 60cm +内水圧 水頭100cm (10分間)	内水圧の載荷で 空洞進展(大) 10分載荷による 影響はほぼ無い	60cm外水位一定を作用させた状態	内水圧100cm_10分5サイクル給水完了時

【囲み線の凡例】

- 空洞の範囲
- ゆるい土砂の層の範囲

【着色凡例】

- ①空洞領域が大きい ($A=200\text{cm}^2 \sim 1000\text{cm}^2$)
 - ②ゆるみ領域が大きい ($A=200\text{cm}^2 \sim 1000\text{cm}^2$)
 - ③空洞領域+ゆるみ領域が大きい ($A=1000\text{cm}^2$ 以上)
 - ④空洞領域、ゆるみ領域が小さい ($A=200\text{cm}^2$ 未満)
- ※①or②では領域面積の大きい方に判定する

表-2 実験結果の一覧表

実験名称	実験No	土の種類	欠損	地下水位条件	実験結果	実験写真	
(3) 欠損部の幅が拡大する場合の模型実験	7	山砂 (水洗い)	15mm ↓ 30mm	外水位一定 60cm	ゆるんだ土砂の層の排出 スリット拡張で空洞進展 (大)	欠損幅15mm_外水位一定60cm	欠損幅30mm_外水位一定60cm
	8	山砂 (水洗い)	15mm ↓ 30mm	外水位一定 60cm + 内水圧 水頭100cm (5分間)	ゆるんだ土砂の層の排出 スリット拡張で空洞進展 (大)	欠損幅15mm_外水位一定60cm	欠損幅30mm_内水圧100cm_5分5サイクル
	9	改良土 (水洗い)	30mm ↓ 50mm	外水位一定 80cm	スリット拡張で空洞進展 (大)	欠損幅30mm_外水位一定60cm	欠損幅50mm_外水位一定80cm
	10	改良土 (水洗い)	30mm ↓ 50mm	外水位一定 60cm + 内水圧 水頭100cm (5分間)	ゆるんだ土砂の層の排出 スリット拡張で空洞進展 (大)	欠損幅30mm_外水位一定60cm	欠損幅50mm_内水圧100cm_5分5サイクル

【囲み線の凡例】

- 空洞の範囲
- ゆるい土砂の層の範囲

【着色凡例】

- ①空洞領域が大きい ($A=200\text{cm}^2 \sim 1000\text{cm}^2$)
 - ②ゆるみ領域が大きい ($A=200\text{cm}^2 \sim 1000\text{cm}^2$)
 - ③空洞領域+ゆるみ領域が大きい ($A=1000\text{cm}^2$ 以上)
 - ④空洞領域、ゆるみ領域が小さい ($A=200\text{cm}^2$ 未満)
- ※①or②では領域面積の大きい方に判定する

3.2 模型実験の考察

空洞調査で発見された小さな空洞が短期間で大きな空洞に変化する理由や、空洞の進展メカニズムを解明することを目的として模型実験を行った結果、次の考察が得られた。

(1) 外水位変動がある場合の空洞実験

水位変動は外水位一定実験の結果と同様に、外水位が高くなるほど空洞の形が大きくなった。水位変動幅が小さい場合は、1 サイクル目以降の空洞の進展はあまり見られなかったが、水位変動幅が大きい場合は、5 サイクル目まで空洞の進展が見られ、徐々に大きな空洞になっていった。

このことから、季節により地下水位が変動する条件下では、ある段階で発見された空洞が小さくても、季節の移り変わりに伴い空洞が徐々に進展する可能性があることが分かった。

(2) 内水圧の条件を変化させた場合の空洞実験

管渠の内水圧の水頭が地下水位よりも低い場合は、外水位一定実験と同規模の空洞が発生した。内水圧の水頭が地表面より高くなると、欠損幅が 15mm の場合は、欠損部の直上に発生した空洞が徐々に上に移動していき、最終的には地表面に近い位置で平たい空洞になった。空洞の下部にはゆるくて厚い土砂が堆積した層が発生した。

内水圧実験では給排水の繰返し回数が増えるに従い空洞が上部に向かって移動していったことから、過去に浸水被害を受けた回数が多いほど、空洞の下部にゆるくて厚い土砂の層を持った空洞ができ易いのではないかと考えられる。

（３）欠損部の幅が拡大する場合の空洞実験

空洞の下部にゆるくて厚い土砂の層がある空洞は、欠損部に目詰まりしていた土砂が道路の振動や豪雨時の内水圧等によって外れたり、管の劣化等によって欠損部が拡大すると、地表面付近にある平たい空洞が急激に大きな空洞に進展することが確認できた。

（４）空洞が拡大する場合の進展メカニズム

実験結果より、内水圧の条件を変化させた場合や、欠損幅が小さい場合は、小さい空洞の下にゆるい土砂が堆積する状況が確認された。例えば、図-9 に示す実験 No.8 のケースでは、STEP1 で外水位の作用により小さな空洞の下にゆるい土砂の層が形成された。STEP2 で内水圧の作用により空洞が地表面付近まで上方に移動していき、STEP3 で欠損部の幅が拡大することで、ゆるい土砂の層の土砂が流出して大空洞に進展した。

この実験で、地表面付近にできた小さな空洞が、外的条件の変化に伴い急激に大きな空洞に進展するメカニズムを確認することができた。

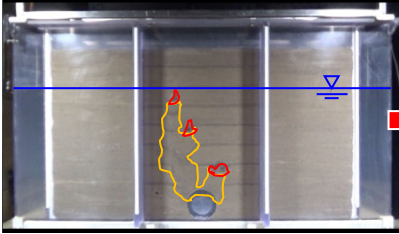
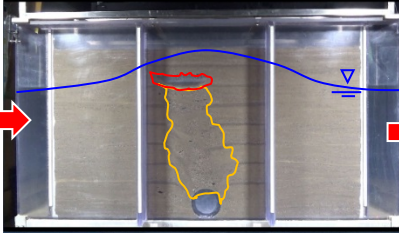
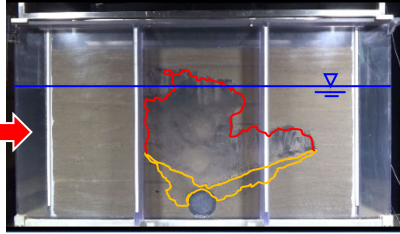
STEP1	STEP2	STEP3
欠損幅:15mm、外水位一定60cm 60分実験を継続した状態	欠損幅:15mm 内水圧(水頭100cm,5分間給水) 5サイクル繰り返した状態	外水位一定60cmの状況下で 欠損幅:15mm→30mmに拡大した状態
		
外水位の影響により、ゆるみ領域を伴う小さな空洞が複数形成されている。	さらに、水頭100cmの内水圧を受けることにより、空洞は地表面に向かって移動していき、一つの平たい空洞になった。 空洞の下にはゆるい土砂の層が形成された。	最後に、模擬管渠のスリット状の欠損幅を15mm→30mmに拡大することにより、ゆるみ領域の土砂が流出し、大空洞に発展した。横方向への空洞拡大も生じている。

図-9 空洞拡大の進展メカニズム(実験 No. 8)

4. 空洞対策の優先度評価

（１）空洞発生や路面陥没の可能性が高くなる地域の特徴（地盤条件）

模型実験の結果に、過去４年間の空洞調査結果を収集して分析し、空洞発生の危険度が高いと考えられる地域や、空洞の上部における状況により路面陥没の可能性が高いと考えられる地域の外的条件を整理して表-3 に示す。

表-3 模型実験の結果から空洞発生の可能性が高いと考えられる地域

外的条件	模型実験の結果	空洞発生の可能性が高い地域
地下水位	地下水位が欠損部より高くなるほど大きな空洞に進展する。 地下水位が欠損部より下にある場合は、空洞は進展しない。	地下水位が高い地域
内 水 圧	内水圧が地表面以上になる場合は、内水圧により地表面近くに空洞が発生する。	浸水実績の多い地域 (地表面以上の内水圧が作用する)
水位変動	水位変動が大きい場合は地下水位の変動に合わせて空洞の進展が見られるが、空洞の最終形状は、一番高い地下水位の位置で決まる。	河川の近くなど、地下水位が高く、 水位変動が大きい地域
欠損部の 拡大	空洞の下にゆるい土砂の層がある空洞は、欠損部の拡大により急激に大きな空洞に進展する。	路面の振動が多い地域や内水圧の影響を受けやすい地域
土の種類	山砂は地下水等で細粒分(粘土・シルト分)が流出すると空洞が発生しやすくなる。 改良土の場合は透水係数が小さく、空洞が発生する可能性が低い。	山砂で埋戻された施工年度が古い 管路のある地域

(2) 換算空洞厚

空洞調査の一次調査で空洞が発見された場合、二次調査としてスコープ調査が実施される。スコープ調査の際に空洞下部の地層で簡易貫入試験を行うことにより、空洞下部にゆるい土砂の層があるかどうかを確認できる。簡易貫入試験の結果から換算 N 値が低く、空洞の下にゆるい土砂の層がある場合には、図-10 に示すように換算 N 値から換算空洞厚 (D_0) を計算し、空洞対策の優先度評価に利用する。

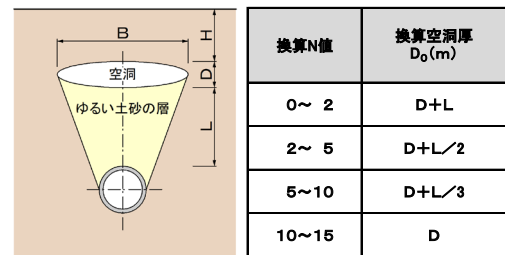


図-10 換算空洞厚

(3) 空洞対策の優先度評価手法

模型実験の結果と過去の空洞調査結果の分析より、空洞調査によって空洞を発見した場合の、空洞対策の優先順位付けを行う方法を提案する。

図-11 は、過去 4 年間の空洞調査結果における 875 箇所の空洞の扁平率 (換算空洞厚 D_0 / 空洞の短辺方向寸法 B) と、空洞発生深度比 (空洞発生深度 H / 換算空洞厚 D_0) をプロットしたものである。図中に示す包絡線を用いてそれぞれの段階の数がほぼ等しくなるように 4 段階の危険度区分を設定した。図-12 は、実験結果を図-11 の危険度区分に当てはめたものである。ゆるい土砂の層をもつ空洞は、発見された時点の空洞の大きさでは危険度中となるが、ゆるい土砂の層を評価に加えた場合、危険度大の判定となることが実験結果からも確認できた。危険度が大きい順に対策を行うことで、効率的な空洞対策を実施することができる。

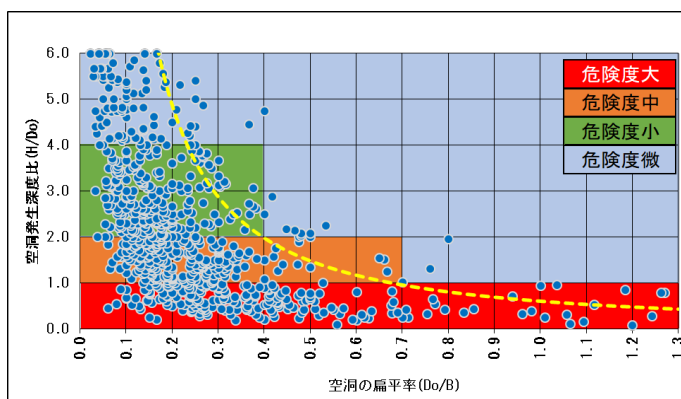


図-11 路面陥没の危険度区分

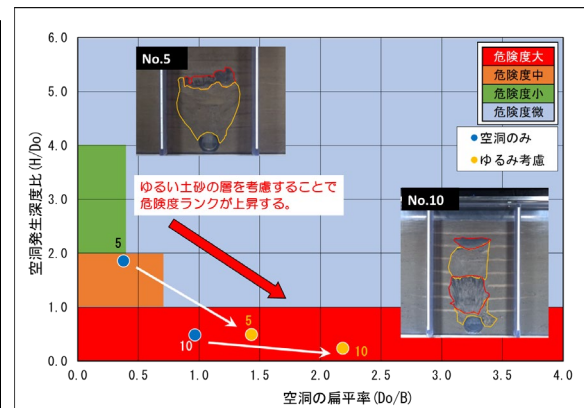


図-12 実験結果での検証

5. おわりに

空洞が拡大する場合の実験では、空洞の下部にゆるくて厚い土砂の層がある空洞は、水位変動の繰り返し作用や、欠損拡大等の外的条件の変動により、急激に大きな空洞に進展する危険性があることがわかった。これらのことから、二次調査のスコープ調査時に空洞内で簡易貫入試験を実施して、空洞の下部の危険度判定を行う方法を提案した。これにより、急に大きな陥没を引き起こす恐れのある空洞を早期発見することが可能となる。また、見つかった空洞に対して、空洞の扁平率と空洞発生深度比を整理することにより、空洞の陥没危険度を評価する手法を提案した。これらの適用により、陥没を未然に防ぐ空洞対策の実施が可能となるものとする。なお、今回提案した路面陥没の危険度区分は、既存の空洞調査結果から便宜的に設定したものであるが、実際に路面陥没が発生した空洞データを収集・整理することで、より実用的な危険度の区分が可能になると考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：路面陥没発生状況 . <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/h27-29kanbotu.pdf>.
- 2) 公益社団法人 地盤工学会 (2010)：地盤材料試験の方法と解説