

空洞発生及び進展条件と空洞上地盤の耐力に着目した陥没発生の危険度評価  
(Risk assessment of depression occurrence based on cavity generation and development condition and strength of cavity ground)

平子ともみ<sup>1</sup>, 河田真弥<sup>2</sup>, 前田健一<sup>3</sup>

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 31415073@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻

3 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

### 概 要

全国各地で地下空洞を起因とした陥没災害が多発しており、今後地下インフラの老朽化によってその数は増加すると予想される。本研究では、地下水位と粒度分布の違いによる地下空洞形成への影響を明らかにするため、モデル実験を行った。加えて、空洞形成後の陥没発生挙動について、空洞形状や空洞上の地盤条件に着目し土槽実験を行った。その結果、土砂が流出する条件として欠損の大きさと平均粒径の値が挙げられ、空洞が発達する条件としてある一定以上の地下水位が挙げられることが判明した。また、空洞形状、大きさ、空洞上地盤の条件によって空洞上地盤の耐力が大きく異なることが明らかになった。これらの実験結果より、地下水位を含めた地盤条件と空洞耐力に着目した地下空洞の危険度評価と陥没発生フローの提案を行った。これを用いて、探査により発見された地下空洞の補修優先度を決定することで、陥没の予防保全が可能となる。

キーワード：空洞，陥没，地下水位，粒度分布

## 1. はじめに

都市部をはじめとする全国各地で、下水管の損傷を起因とする陥没災害は年間約3,300件発生しており、今後下水管の老朽化によってその発生件数は増加すると予測されている。空洞探査や陥没発生箇所からは、陥没災害の原因となる空洞が埋設管周辺に存在していることが報告されており、既往の実験結果<sup>1)</sup>から、地下水位の高さや、下水管の欠損の位置が空洞進展に大きな影響を及ぼすことが確認されている。さらに、形成された空洞上地盤について、空洞形状や地盤条件によってその耐力が大きく異なる<sup>2)</sup>ことが明らかになっている。このように、既往の研究により陥没発生のメカニズムは判明しているが、発生危険度については言及されていない。

そこで、本研究では陥没災害を予測し未然に防止することを目的として、過去5年分の実験データをもとに陥没発生の指標作成と危険度評価フローの提案を行った。

## 2. 空洞進展実験

### 2.1 実験概要

図1に使用土槽の概略図、表1に各土槽の寸法を示す。土槽底面部に下水管を模擬したアクリルパイプを設置し、欠損が生じた管渠周辺地盤を再現した。実験に使用した土

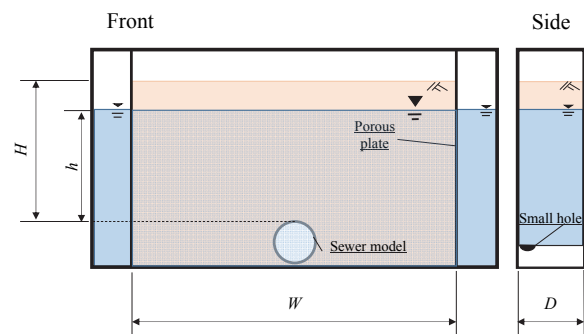


図1 使用土槽の概略図

表1 各土槽の寸法

土槽名	T1	T2	T3
H (mm)	500	800	600
W (mm)	500	1600	1200
D (mm)	250	500	250
h (mm)	100~500	600~800	100~600
欠損形状	円	スリット	円
欠損径 d (mm)	5	5,15,30,50	30,40,50
使用試料	混合硅砂, 豊浦砂, 山砂	山砂, 礫等	山砂

槽は3種類あり、それぞれの土槽寸法、実験条件は表1に示すとおりである。T1, T2 土槽においては水位  $h$  を一定として実験を実施し, T3 土槽において図2に示すように段階的に上昇させた。図3に各土槽で用いた粒度分布を示す。

## 2.2 実験結果及び考察

### 2.2.1 T1 土槽を用いた実験についての結果と考察

図4に実験終了時の土槽の様子、表2にT1土槽を用いた実験結果を元に管上水位  $h$  と  $d/D_{50}$  ( $d$ : 欠損径,  $D_{50}$ : 平均粒径) ごとの土の流出量を示した。また、図5に  $d/D_{50}$  の概念図を示す。表2より、 $d/D_{50}$  の値が大きい順に、豊浦砂、珪砂2号と珪砂7号を重量比3:7で混合した(以下S3:7と示す)ケースにおいて流出が多かった。対照的に、 $d/D_{50}$  が最も小さいケースであるS4:6においては土粒子の流出は見られなかった。また、S6:4を用いたケースにおいては、地下水位によって空洞の進展の有無に大きな差があった。この要因としては、水位が高いケースほど水頭が高くなり、管周辺に流速が集中するため、目詰まりが生じなかったケースにおいて土粒子が流出したと考えられる。これらの結果から、 $d/D_{50}=5\sim 25$  までが空洞の形成の閾値、管上水位  $h=200\text{mm}\sim 300\text{mm}$  が空洞の進展の閾値である可能性があることが判明した。

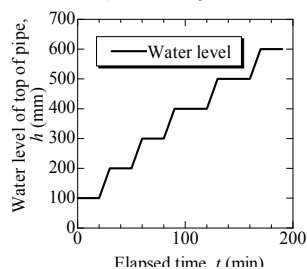


図2 T3土槽における水位条件

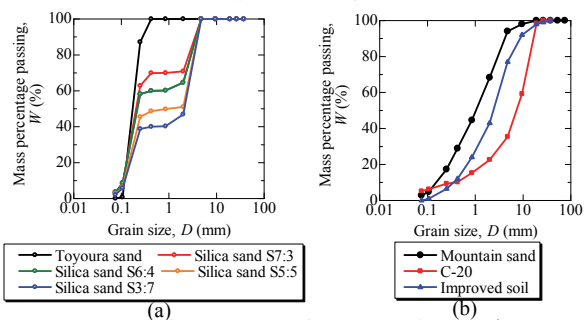


図3 (a)T1土槽, (b)T2, 3土槽で用いた試料の粒度

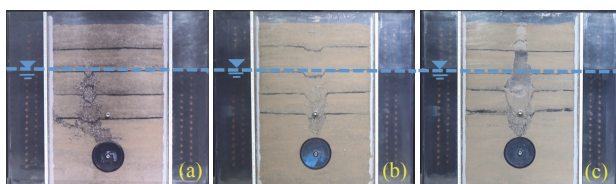


図4 (a)S4:6, (b)S5:5, (c)S7:3を用いた実験結果

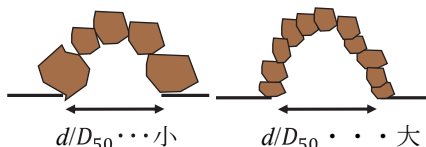


図5  $d/D_{50}$  の概念図

### 2.2.1 T2 土槽を用いた実験についての結果と考察

T1 土槽で判明した土粒子の流出条件を確認するためにさらに規模の大きなT2土槽を用い実験を行なった。表3にT2土槽を用いた実験結果を元に管上水位  $h$  と  $d/D_{50}$  ( $d$ : スリット幅,  $D_{50}$ : 平均粒径) ごとの土の流出量を示した。この結果、 $d/D_{50}$  が25以下のケースにおいては水位を地表面まで上昇させても空洞は形成されなかったが、23以上では土粒子の流出が見られた。これより  $d/D_{50} \geq 25$  が流出量の条件として考えられることが判明した。この表においても、 $d/D_{50} \geq 25$  において空洞が形成されたことが確認できる。図5に示した土粒子が構成するアーチの概念図より、欠損径に対する土粒子の個数が増えると、欠損付近で土粒子によって形成されるアーチの耐力が減少し、土粒子の流出が容易になると考えられる。これらの結果より、 $d/D_{50} \geq 25$  であることが土粒子流出・空洞形成における要因の1つであると考えられる。

### 2.2.2 T3 土槽を用いた実験についての結果と考察

図6にT3土槽を用いた実験での土の流出量を示す。水位を段階的に上昇させたこの実験において水位200mm以下ではどのケースにおいても土粒子の流出は少なかった

表2 T1土槽の実験結果

		水位 $h$ (mm)				
		100	200	300	400	500
$d/D_{50}$	2.03	-	-	278.2	-	28.7
	5.20	-	-	324.8	-	2476.4
	26.26	175.1	382.8	757.6	1660.9	2008.4
	27.78	-	-	1787.1	-	-
	31.84	-	-	46450.0	-	-

表3 T2土槽の実験結果

		水位 $h$ (mm)		
		400	600	800
$d/D_{50}$	4.12	616	-	-
	6.89	1911	-	-
	7.67	-	121	-
	15.34	-	30	-
	20.92	-	-	81
	23.01	-	606	-
	46.01	2103	165337	353835
	76.69	-	33706	133836

空洞形成されず  
目詰まり発生  
空洞形成

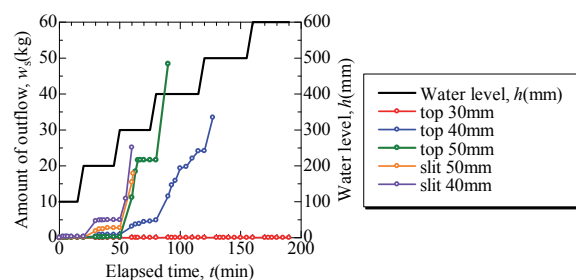


図6 T3土槽の実験結果

が、水位が 200mm から 300mm に上昇する際に土粒子流出量が急激に増加していることが確認できる。水位の上昇により、欠損付近における流速が増大したことで、土粒子で形成されるアーチが崩壊し、土粒子流出につながったと考えられる。これより、水位が管上 200mm を超えると水位 200mm 以上であることが空洞形成における要因の 1 つと言える。

### 3. 空洞耐力実験

#### 3.1 実験概要

地下空洞が形成された後の空洞上地盤の危険度を評価するため、小型土槽を用いて地盤条件と空洞条件を変化させ空洞耐力を測定した。図 7 に実験土槽の概要図、図 8 に用いた試料の粒度分布を示す。土槽は幅 500mm×高さ 300mm×奥行き 100mm を持ち、土槽下部の中央には縦横比( $a/b$ )で成形した木枠を設置して、供試体作成後にこれを取り外すことで所定の空洞を成型した。供試体は、試料を相対密度 70%で層厚  $t$  (mm)まで締固めて作成した。

#### 3.2 実験結果及び考察

##### 3.2.1 飽和度と層厚変化による耐力への影響

試料に豊浦砂、珪砂 4 号、6 号、8 号を用いて空洞形状は  $a=50\text{mm}$ ,  $b=50\text{mm}$  の一定の条件で実験を行った。図 9 に実験結果、表 4 に各試料の最適含水比と対応する飽和度を示す。図 9 (a)より、各試料の最適含水比付近において最大強度を示し、飽和度の上昇・下降によって耐力が減少していることが分かる。低飽和度領域において耐力の減少幅が小さいが、このような現象を示した要因として、低飽和度領域においてはサクションによる影響で、見かけの粘着力が大きくなったことが考えられる。また、各試料の最適含水比となる飽和度から 20%の範囲を超えると耐力が 2 分の 1 まで低下するため、空洞上地盤の危険性を評価するにあたり重要な指標となる。また、試料による耐力の違いも顕著であり、珪砂 8 号を用いたケースではその他の試料を用いたケースより 2 倍以上耐力が大きくなることが明らかになった。逆に、珪砂 4 号は飽和度に関わらず耐力がかなり小さい。

図 9(b)からも、試料によって耐力がかなり変化し、粒径幅の狭い土においては細粒分が多いほど耐力が大きいことがわかる。また、層厚の増加に伴い耐力も増加し、細粒分が多いほど曲線の立ち上がりも顕著である。ここで、 $t/(t+a)$ を層厚比と定義すると、 $t=25\text{mm}$  においてどの試料も耐力をほぼ持たないことから、今回の条件下では  $t/(t+a)<0.33$  の範囲は危険度が高いといえる。

##### 3.2.2 空洞形状による耐力への影響

図 10 に異なる空洞形状における層厚と空洞耐力の関係を示す。縦軸について、空洞耐力  $q$  を大気圧  $P$  で正規化した。これらは全て試料に山砂を用い、相対密度 70%、飽和度  $S=58.9\%$ の条件で空洞形状のみを変化させた。図 10 より、空洞上部地盤が厚くなるほど空洞耐力は増加する傾向にあることがわかる。さらに、空洞形状に着目すると空洞

の縦横比  $a/b$  の値が大きく空洞形状が縦長であるケースほど耐力が大きく、 $a/b$  が一定の場合は空洞面積が小さいほど耐力が大きい。 $a/b$  が大きく空洞形状が縦長の場合、地盤上部より载荷された荷重による鉛直応力が空洞の側面に沿って分散することで、より大きな荷重にまで耐えたと考えられる。これより、空洞上部地盤の陥没発生危険度を推定するには、空洞形状も考慮に入れる必要があるといえる。特に、 $a/b<1$  で空洞形状が横に扁平なものは危険度が高いと考えられる。

図 11 に、異なる空洞形状で行った実験について、層厚比と空洞耐力の関係を示す。図 11 より、すべての空洞形状において、 $0.7<t/(t+a)$ においては耐力が極端に大きくなっているものが多いことが分かる。このとき層厚  $t$  は空洞高さ  $a$  の約 2.3 倍以上であり、空洞高さに対して層厚がある程度確保されていれば空洞形状の影響を受けず耐力が保たれると予想される。これより、層厚比は空洞上地盤の陥没発生危険度を評価するうえで重要な指標であるといえる。

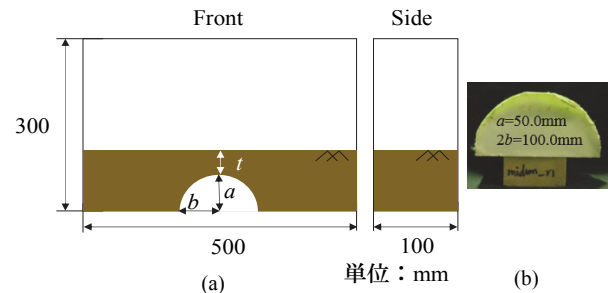


図 7 (a)空洞耐力実験機, (b)空洞作成用木枠の概要図

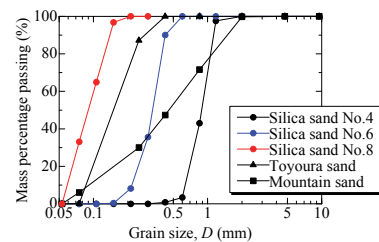


図 8 用いた試料の粒度分布

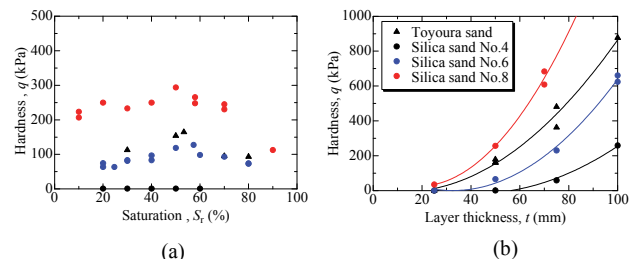


図 9 (a)飽和度と耐力の関係, (b)層厚と耐力の関係

表 4 各試料の最適含水比と対応する飽和度

	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	飽和度 $S_t(\%)$
豊浦砂	14.0	53.34
珪砂 4 号	12.0	40.85
珪砂 6 号	17.0	57.64
珪砂 8 号	17.9	57.95

#### 4. 陥没発生危険度評価フローの提案

地盤の陥没に至るには、地盤内に空洞が形成される過程と空洞上地盤の耐力が低下し地盤が崩壊する過程を経る。よって、これらの過程をそれぞれ空洞形成過程、陥没発生過程と定義し、各過程について実験結果から得られた指標を用いてフローを作成した。図 12 に陥没発生の危険度評価フローを示す。

##### 4.1 空洞形成過程

空洞形成過程においては、欠損径または幅  $d$ 、平均粒径  $D_{50}$ 、水位  $h$  を用いて危険度 1, 2 に分類した。欠損径または幅  $d$  に対する平均粒径  $D_{50}$  より  $d/D_{50}=25$ 、水位  $h$  より、 $h=200\text{mm}$  を閾値として設定した。

##### 4.2 陥没発生過程

陥没発生過程においては、層厚比、空洞形状、飽和度、地盤材料の項目を用いて危険度 3, 4, 5 に分類した。層厚比  $t/(t+a)$  より  $t/(t+a)=0.7$ 、空洞形状  $a/b$  より  $a/b=1$ 、飽和度  $S_r$  より  $\pm 20\%$  を閾値として設定し、地盤材料については砂質土、粘性土で場合分けを行った。

#### 5. まとめ

本研究では、空洞の発生及び進展条件と空洞上地盤の耐力に着目して陥没発生の危険度評価を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 欠損径または幅に対する土粒子の個数がある一定の値を超えると土粒子で構成されたアーチが崩壊し、空洞が形成される。また、空洞発生の閾値として  $d/D_{50} \geq 25$  が挙げられる。
- 2) 地下水位がある一定の値を超えると、欠損部における流速の増加によって、地下空洞は急激に進展する。アーチが崩壊し空洞が進展する閾値として管上 200mm 以上が挙げられ、地下水位がそれ以上になる可能性のある地域は重点的な調査が必要である。
- 3) 空洞形成後は空洞上の地盤特性によって陥没発生の危険度が異なり、空洞上地盤が最適含水比となる飽和度で最も高い耐力を有する。また、耐力は飽和度の上昇・下降によって減少するため、空洞形成後においては、空洞上部地盤の飽和度を把握することが重要である。
- 4) 空洞耐力は空洞上地盤の材料にも依存し、粒形幅の狭い地盤材料においては粒形が小さいほど耐力は大きい。また、粒径の大きい地盤材料を用いた場合は飽和度の変化によらず耐力が小さい。
- 5) 空洞上部の耐力は、層厚の増加に伴って増加する。空洞面積が一定の場合、空洞幅が長く横に扁平な形状を持つ空洞ほど耐力は低く、空洞高さが大きく縦に扁平な形状の空洞ほど耐力が高い。そのため、実際の現場においても横に広がった空洞が発見された場合、優先的に補修を行うべきであると

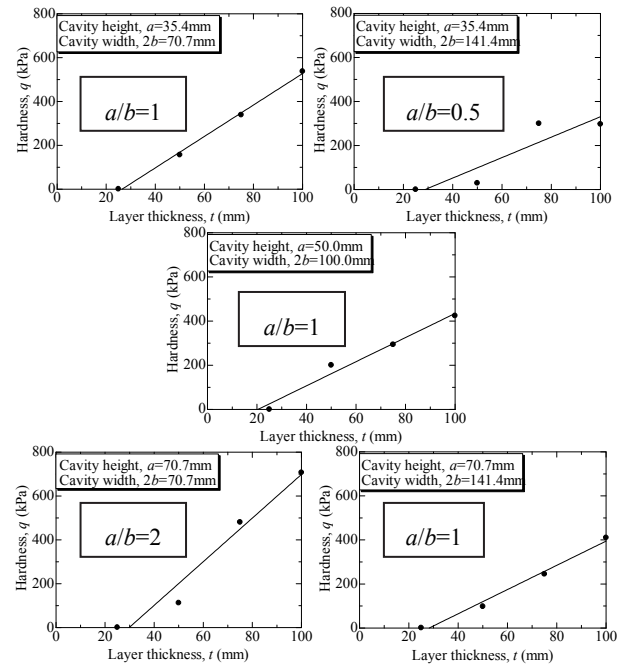


図 10 異なる空洞形状における層厚と空洞耐力の関係

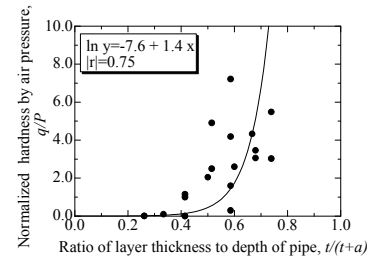


図 11 層厚比と耐力の関係

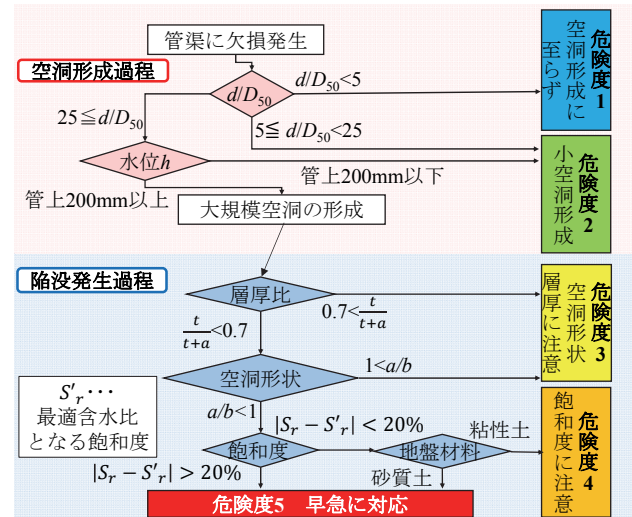


図 12 陥没発生の危険度評価フロー

考えられる。さらに、層厚比  $t/(t+a)$  について  $0.7 < t/(t+a)$  であると空洞形状によらず耐力が大きい。

#### 参考文献

- 1) 澤見英樹ら：管渠欠損部における水の流れに着目した地盤の空洞進展挙動，平成28年度土木学会中部支部研究発表会，pp. 297-298
- 2) 田坂晃一ら：空洞上地盤の層厚と粒度分布に着目した繰返し載荷による管渠周辺の陥没挙動，第52回地盤工学研究発表会，pp.1423-1424