管渠周辺地盤の粒度分布と空洞形状に着目した陥没災害の予防保全に向けた危険度 評価フローの提案

(Proposal of risk assessment flow for preventive maintenance of collapse disasters focusing on particle size distribution around underground buried pipe and cavity shape)

林英璃奈1,前田健一2,平子ともみ3,野村凌平4

- 1 名古屋工業大学大学院・工学専攻社会工学系プログラム・E-mail address 33415081@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院·社会工学専攻
- 4 名古屋工業大学大学院・工学専攻社会工学系プログラム

概 要

全国各地で地下埋設管の破損による空洞進展を起因とする陥没災害が多発しており、今後、地下インフラ の劣化によって、発生件数は増大すると考えられている。本稿では陥没災害を未然に防ぐ指標を作成する ため、土槽を用いて行った既往の実験結果をもとに陥没発生要因を分析し危険度評価フローを提案した。 その結果、管渠の欠損径に対する周辺地盤での95%粒径の比を用いて欠損閉塞の有無を予測した。また、 Kennyの指標を用いて周辺地盤の粒度分布から内部浸食の有無を判定し、Terzaghiの緩み理論を用いて空 洞周辺の緩み領域を推測した。これらの要因から地下空洞形状が判別できる。地下空洞進展後においては 空洞上地盤が耐力を失い陥没に至る際の基準を層厚と空洞形状の関係や周辺地盤の飽和度から予測するこ とで陥没発生時における危険度評価の提案を行った。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効率的な陥没の予防保全が可能となる。

キーワード:空洞,陥没,粒度分布,管渠,内部浸食

1. はじめに

近年,日本各地で下水管の破損を起因とする陥没災害が 年間約3,000件発生している。陥没災害はひとたび発生す れば人的・物的に甚大な被害をもたらす。老朽化した地下 埋設管が急増しているため,陥没災害の発生件数は今後増 大すると考えられる。また,各自治体では資金難や技術職 員の不足などにより,従来の対処療法的な対応から予防保 全型の対応への転換が求められている。しかし,陥没発生 の詳しいメカニズムは未だ明らかになっていないため,こ の解明を行うことが求められている。

陥没発生に至るまでに(1)欠損閉塞,(2)内部侵食,(3)空 洞側面の崩壊,(4)地盤の緩み,(5)空洞耐力等の要因が存在 している。本稿では,過去6年間にわたり行われた実験デ ータを用いて上記の各段階における支配的要因について 検討を行った。さらに,空洞上耐力等の要因を加えた陥没 発生に対する危険度評価フローを作成した。

本稿の流れを以下に記す。第2章において空洞形成過程 における欠損閉塞や内部浸食の発生の有無を粒度分布に 着目して考察した。第3章において Terzaghiの緩み土圧理 論¹⁾等を用いて空洞形成領域の予測を行った。第4章にお いて模型実験から得られたデータを基にして飽和度や空 洞形状,層厚比が空洞上地盤の耐力に及ぼす影響を考察し た。第5章では第2~4章で得られた知見から陥没発生に 対する予防保全に向けた危険度評価フローを作成した。

2. 粒度分布に着目した空洞形成過程の解明

2.1 実験概要

図1に使用土槽の概要図,表1に各土槽の寸法,図2に 各土槽に用いた試料の粒度分布,図3に欠損の様子を示す。 実験は飽和状態で行い,土槽底面部に下水管の模擬管渠を 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。なお,S7:3は珪砂7号と2号 を重量比7:3で混合した試料である。また,洗い山砂や 洗い改良土とは細粒分を取り除いた試料のことである。細 粒分を取り除くことで透水係数が大きくなり,施工後数十 年経過した実現場をより模擬できると考えられ,空洞進展 実験により適するといえる。図3中の円欠損は鋼管を想定



図 1 使用土槽の概略図表 1 各土槽の寸法



(a) 円欠損

(b) スリット欠損図 3 欠損の様子

した管の腐食による欠損を模擬しており、スリット欠損は 陶管における管の継ぎ目の欠損や閉塞不良の管を模擬し ている。ここで、各土槽のメリットとデメリットについて 簡単に説明する。まず、大型土槽では容積が大きいためよ り実規模に近い実験が可能である。しかし、実験準備に要 する労力が著しい。対して、小型土槽では容積が小さく準 備に要する労力が少ないため、様々な条件で実験可能であ る。デメリットとしては大型土槽や中型土槽と比べて横幅 が狭いため後述する空洞形状の一つである扇型空洞が発 生した場合は空洞の横幅が土槽の横幅を超えるため正確 な計測ができない(図 4)。



図 4 小型土槽における扇型空洞の発生

2.2 欠損部における閉塞発生有無

図5に大型土槽における代表的な実験結果を示す。 欠損 部の閉塞有無により空洞の形成領域が大きく異なること が確認された。図 5(a)のように欠損部において閉塞が生じ, ほぼ粒子が流出しなかったケース,図5(b),(c)のように比 較的大きい粒子により欠損部に閉塞が生じるが内部侵食 が発生したケース,図5(d)のように欠損閉塞も内部侵食も 発生せず欠損から粒子が流出するケースがあることが分 かった。ここで、図5、表2のように実験後の空洞形状に よって分類を行った。欠損閉塞の有無には欠損径と用いた 試料の粒度が関係すると考えられる。スリット砂防ダムの 設計指標2),3),4)を参考にすると、欠損部の閉塞に関しては、 欠損径 ds と地盤を形成する試料の 95% 粒径 D95 が大きく 影響しているといえる。95%粒径を採用した理由としては アーチの安定/不安定になる時の境界と模型実験の結果が 適合したためである。この境界は図6のように土粒子間の 節点をヒンジと捉えると、粒子数が 5 以上の場合にヒン ジが2つになり不安定となることから定めた。ここで, 95%粒径は大径粒子の流出を止めることはできるが小径 粒子の流出は防ぐことができないと考えられており, 小径 粒子の流出については次項にて検討する。図7に95%粒径 に対する欠損幅の比と空洞形状の関係を示す。図7より欠 損部の閉塞が生じる閾値は ds/D95=3 である。ds/D95<3 のと き欠損部において閉塞が生じ、3≦ds/D95のとき閉塞が生じ ないことが判明した。

2.3 内部浸食発生可能性の有無

前項において欠損部における閉塞発生有無を考えた。本 項では、閉塞発生後における内部浸食発生可能性の有無に ついて考察する。内部浸食が発生することで空洞や緩み領 域、粗粒化領域の拡大がみられる。粗粒化領域とは細粒分 が流出し粗粒分のみになった地下空洞の下に発生する範 囲である。この領域では地盤が本来持つ耐力を失う。

図8に内部浸食が発生した場合の様子を示す。小型土槽 と大型土槽において欠損閉塞後,一部の粒子が流出する内 部侵食が発生したケースが存在した。内部侵食は土粒子の 動き得る間隙があり、そこに透水力が作用することで間隙 内を土粒子が移動し発生すると考えられる。そこで、本項 では既往の実験において用いられた試料における粒子骨 格について内部侵食発生の可能性を考察する。試料の内部 侵食発生可能性について、Kennyの安定基準⁶⁾を用いて評



価を行った。図9に Kenny らの粒子流出に関する安定基準を示す。全体を1として、ある粒径Dの粒子が含まれる 質量分率をF,その4倍の粒径4Dの質量分率をF40とし

たとき, F に対する H(=F4D-F)の値が境界線のどこに位置 しているかにより粒子流出の有無を評価した。Kennyの基 準では流出する可能性のある小径粒子の最大質量百分率 は 30%以下(F≦30%)であるため,安定性評価の判定対象領 域を質量通過百分率が30%以下の範囲とした。既往の実験 に用いた試料について, Kennyの指標を適用した図が図10 である。図 10 において網掛け外の領域が判定対象領域で あり, H/F<1 となる不安定な粒子が存在する領域は黄色で ハッチングした。図 10 より, S6:4, 洗い改良土, 礫は F≦ 30%の範囲に H/F<1 となる不安定な粒子が存在すること が確認できる。また、改良土を見るとF≦30%の範囲にお いて1≦H/Fであり、不安定な粒子は存在しないことが分 かる。図 11 に実験終了後の様子を示す。図 11 より, Kenny の指標による安定性評価で不安定な粒子が存在した S6:4, 洗い改良土は空洞が形成され, 礫, 改良土に空洞が形成さ れなかったことが確認できる。ここで,不安定な粒子が存 在すると判断された場合について検討する。礫について, 内部侵食が発生し粒子が流出したにもかかわらず空洞が 形成されないという結果になった要因としては,不安定な 粒子の全体に対する質量百分率が 10%程度と小さかった ことが挙げられる。不安定な粒子の質量百分率が小さい場 合,これらの粒子はもともとの土粒子骨格の形成に寄与し ないため、内部侵食が発生しても空洞の形成には至らなか ったと考えられる。逆に、不安定な粒子の質量百分率が 30%と高い S6:4 や洗い改良土の場合には、これらの粒子が 土粒子骨格の形成に関係していたため, 内部侵食の発生に よりこれらの粒子が流出するとともに緩みと空洞が形成 されたと考えられる。さらに、それぞれ三日月型空洞と縦 型空洞であり空洞形状の異なる S6:4 と洗い改良土の粒度 分布形状を比較する。一般的に粒度分布の傾きを表す均等 係数 Uaが 10 以上である場合, 粒径幅が広いといえる。 S6:4 は Uc=3.9, 洗い改良土は Uc=31.5 であるため後者は粒 径幅が広い土である。よって、 粒径幅の広い洗い改良土を 用いたケースでは、内部侵食の発生により、複数の粒径が 流出したため、もともと安定であった粒子が不安定化し、 空洞の形成が促進されたと考えられる。



図 10 Kenny の指標を適用した安定性評価



図 11 実験終了時における土槽の様子

3. 緩み・空洞領域の予測

既往の実験結果から空洞の形成領域予測を行った。用いた土槽,実験条件は第2章と同様である。図12に管上水位と空洞上端部の関係を示す。図12より管上水位と空洞上端部の高さがおおよそ一致することが分かる。扇型空洞については欠損発生後,地盤内浸透流により空洞が拡大しその時の角度は15~25度で安定する。図13に概念図を示す。これは地盤内に水平方向と法面平行方向に浸透流が流れているためである。このように扇型空洞については地下水位を特定することで空洞領域の予測が可能である。三日月型空洞,縦型空洞では図14に示すTerzaghiの緩み土圧理論を用いた。これはシールド掘削に伴う地盤内の緩み範囲とトンネル上部に発生する緩みについて述べた理論である。緩み幅 *B*0 について,式(1)に示すようにトンネル内径 *R*0,内部摩擦角Øを代入し理論値を求め実測緩み幅との比較を行った。

$$B_0 = R_0 \cot(\frac{\pi/4 + \emptyset/2}{2})$$
(1)

三日月型空洞について、小型土槽において S6:4 を用い た実験結果を図 15(a)に示す。Roに欠損半径 2.5mm を代入 した場合、実測値は理論値よりかなり大きい値を示してお り、さらに、水位の増加に伴って、緩み幅は一定値に収束 することが判明した。また、実測値は欠損半径の 20 倍を 代入した値と近かった。対して図 15(b)に示すように洗い 改良土を用いて、Roに管渠半径 0.075m を代入した大型土 槽については理論値と実測値が近い値となった。この要因 として図 16 のように欠損上に土粒子のアーチが形成され るか否かが関係していると考えられる。小型土槽のように 欠損が比較的小さい場合、ゆるみに対する直接的な原因は 欠損ではなくその上部に形成されるアーチである。一方、 大型土槽のようにスリット欠損の場合はそれ自体が緩み の原因となると考えられる。このように Terzaghi の緩み理 論を用いて地盤内の緩み幅を予測する際には緩み理論に おけるトンネル内径を何とみなすかという点が重要であ り実務上でも考慮する必要がある。



4. 空洞上地盤の耐力評価

4.1 空洞耐力実験の概要

空洞が形成された後の空洞上地盤の危険度を評価する ため地盤条件と空洞条件を変化させ空洞耐力を測定した。 図17 に実験機の概要図を示す。

4.2 空洞耐力実験の実験結果

図18に飽和度と耐力の関係,図19に縦横比と層厚比の 関係を示す。なお、図19中のqは空洞上地盤の耐力、pは 交通荷重である。図 19 より相対密度の増加に伴い空洞耐 力が増大していることが確認できる。また、それぞれの相 対密度において,最適含水比となる飽和度で空洞耐力はピ ークの値を取り, 飽和度の低下・上昇とともに空洞耐力が 減少する。特に減少する範囲の飽和度は最適含水比となる 飽和度の±20%程度である。また、図 19 より空洞形状と 層厚比により空洞上地盤の耐力が大きく変化することが 確認できる。空洞が縦に偏平になる、あるいは、層厚比が 小さくなるほど空洞上地盤は耐力が小さくなるといえる。 また,図19中にq/p=1を表す近似曲線を示した。この近 似曲線より上にプロットされる空洞形状は空洞上地盤が 十分な強度を有しているとは言えず,危険であるといえる。 よって,縦軸に層厚比,横軸に縦横比を示したグラフに現 地調査などで得られた空洞形状をプロットし,式と比較す ることで空洞の安全性を判断できる。



5. 陥没発生に対する危険度評価

図 20 に示すように陥没災害は管渠に欠損が発生し、粒子が流出することで地下空洞が形成され、その後、空洞上地盤の耐力が失われることで発生すると考えられる。

本稿で得られた知見から図 21 のように陥没発生に対す る危険度評価フローを作成した。まず初めに、地下空洞の 形成について考える。第2章にて欠損部における閉塞発生 有無を検討した。その結果、3≦d√D95のとき閉塞が生じな いことが判明した。このとき、地表面にまで変状が到達す るため早急に対処するべき縦型空洞が発生する。ds/D95<3 のとき, 欠損部は閉塞されるが内部浸食が発生し, 空洞拡 大や緩み領域発生の可能性がある。そのため, Kenny の指 標を用いて粒子の安定性について考察する。1≦H/F であ る場合は不安定な粒子は存在せず、空洞は発生しない。反 対に, F≦30%の範囲において H/F<1 となる粒子が存在す る場合は内部浸食が発生する。ここで発生後の挙動は質量 百分率によって異なる。安全側で判断するとH/F<1となる 粒子の質量百分率が 30%未満の場合は不安定な粒子が粒 子骨格の形成に関与しないため,空洞が発生しない。 質量 百分率が 30%以上の場合はそれ自体が粒子骨格の形成に 関わっているため空洞が発生する。発生する空洞は縦型空 洞と三日月型空洞であるが、この二つを分ける指標として 均等係数 Uc が考えられる。一般的に粒度幅が広いとされ る U. が 10 以上である場合は多くの粒形の粒子が流出し, 安定していた粒子も不安定になるため縦型空洞となる。U. が10以下である場合は比較的少ない粒径の粒子が流出す るため空洞の下に粗粒化領域などが形成され三日月型空 洞となる。次に, 第3章にて緩み・空洞領域の予測を行っ た。これを行うことで空洞容積が判明し、危険度評価に役 立つ。扇型空洞では空洞の形成角度は 15~25 度になるこ とが確認されているため、地盤の水位条件を把握すれば、 空洞の形成領域を予測できる。三日月型空洞や縦型空洞に おける緩み・空洞幅の予測については Terzaghiの緩み土圧 理論が有効である。さらに、第4章にて空洞上地盤の耐力 について検討を行った。それ自体は地表面に変状が達する ことがない縦型空洞と三日月型空洞の危険度を予測する ために用いる。空洞上地盤の耐力が失われると地表面の変 状につながる。層厚比と空洞形状について t/(t+a)<0.6-0.1In(a/b)である場合は危険であるといえる。t/(t+a)>0.6-0.1In(a/b)である場合は地下空洞周辺地盤の飽和度で判定 する。最適含水比時の飽和度との差が20%以上ならば危険 度は中程度,20%以内ならば危険度は低いといえる。しか し,空洞上部地盤の飽和度や形状の変化によって危険度が 上昇する可能性もあるため, 定期的なモニタリングが重要 である。また,実現場においては空洞上に載荷される交通 荷重の評価が重要である。既往の研究 ⁷⁾より,繰り返し載 荷によって静的載荷のおよそ 3 割の荷重で陥没が発生す ることが判明しており、周囲の交通を加味した適切な荷重 の設定が重要である。具体的には,道路の規格ごとの耐荷 重や交通量の統計データ等を交えて吟味していく必要が

ある。

本稿で得られた知見を用いて陥没発生に対する危険度 を評価し、地下空洞に対して適切な対応を行うことが可能 である。陥没災害の効率的な予防保全につながる。ただし、 交通荷重の条件や水位条件など本稿では考慮しきれてい ない点も多くあるため、今後も定量的な評価をすることが 重要である。





(b) 空洞上地盤の耐力の決定

図 21 陥没発生に対する危険度評価フローチャート

6. まとめ

本稿では管渠における欠損の発生から陥没に至るまで, 各段階における支配的要因に着目しながら考察を行った。 その結果,陥没災害の予測には地盤工学内の様々な視点か ら評価を行う必要があることが分かった。これらを踏まえ, 以下に陥没発生に関する主な要因と空洞調査に関する提 案を記す。

- 1) 管渠周辺地盤の粒度分布により地下空洞の形成過程 は大きく異なる。欠損発生時の地盤内の土粒子径 D95 と欠損径 dsの比 ds/ D95 が 3 未満の時欠損が閉塞され る。欠損が地盤中の大径粒子により閉塞される場合, 大径粒子間の間隙を小径粒子が移動する内部侵食が 発生することで欠損上にゆるみや空洞が形成される 可能性がある。内部浸食は地盤内の耐力を失わせる 危険性があるため,発生の有無が重要である。その際 には,Kennyらの安定基準が有効である。また,移動 可能粒子の質量百分率により空洞形状が異なる。空 洞形状は本稿にて示した空洞形状の決定フローにて 予測することができる。
- 2) 地表面に変状が出ない空洞形成に関して、水位条件や Terzaghiの緩み土圧理論を用いることでこれらの空洞形成領域は予測可能である。また、層厚比や飽和度空洞形状などから本稿で示した空洞上地盤の耐力の評価により地下空洞の危険度を判定することが可能であると考えられる。
- 3) 地下空洞の危険度を判定し,陥没発生前までに優先 度を決定し,対応していくことが重要である。陥没発 生に至るまでの影響因子を確実にとらえるために, 実際の空洞調査時には周辺地盤の粒度分布形状や地 下水位,強度定数等のデータの収集・蓄積とこれらを もちいた分析を行い,常時更新していくことが重要 である。

参考文献

- シールド工法入門,シールド工法入門編集委員会,社団法 人地盤工学会,1992,261pp
- 2) 土石流·流木対策設計技術指針解説
- 池谷ら;スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実験的 研究,砂防学会誌第32巻3号,pp.37-44
- 4) 堀内ら;格子型砂防堰堤の格子上方から流出する土砂の制
 御に関する実験的研究,砂防学会誌第64巻1号,pp.11-16
- 5) 片出ら;巨礫粒径分布の砂防堰堤閉塞確率に及ぼす影響, 構造工学論文集 A pp.209-220
- Kenny, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omanege,
 G.N., and Ume, C.A.: Controlling construction sizes of granular filters, Can.Geotech J.22,1985
- 田坂ら: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.1423-1424,2017