管渠周辺地盤における空洞進展と陥没発生のメカニズム Mechanism of cavity development and depression occurrence in the ground surrounding sewer pipes

田坂晃一¹,河田真弥²,前田健一³,川田卓嗣⁴,渡辺完弥⁴

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 29415077@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

4 三菱電機株式会社

概 要

都市部を中心に、管渠の老朽化に起因する陥没が多数発生している。陥没発生過程に影響を与える因子は 様々であるが、どの条件がどの過程で影響を与えているかは明らかになっていない。そこで、本論文では 空洞が発生・進展し陥没に至るまでの一連のメカニズムを解明するため、模型実験を行った。その結果、 空洞の進展速度は、空洞周りの動水勾配や欠損位置に支配されていることがわかった。地下水位に傾斜が 見られる地盤内での空洞の進展は、管渠の直上だけでなく直上から離れた地点にむかって進展することも あり、予期しない地点での陥没も考えられ危険であるとわかった。さらに、形成された空洞上で輪荷重を 繰り返し載荷させることで、陥没直前に大きく地盤が変形し陥没に至ることが明らかになった。

キーワード:空洞, 陥没, 地下水流れ

1. はじめに

都市部をはじめとする全国各地で年間約3,500件の陥没 が発生しており,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,空洞が埋設管周辺に存在していることが報告¹⁾さ れており,既往の実験結果から,ある高さ以上の地下水位 が空洞進展に大きな影響を及ぼすことがわかっている^{2),3)}。 一方,空洞が地表面へ到達して陥没に至るためには,空洞 上の不飽和地盤の崩落が必要である。過去の実験結果から, 空洞上地盤に静的耐力より少ない輪荷重を繰返し載荷さ せることで,陥没が発生することが確認されている⁴⁾。

そこで、本研究では都市部における陥没現象の主な原因 である、埋設管周辺地盤中の空洞進展メカニズムの解明に 向けてモデル実験を行なった。さらに、そこで、本研究で は交通荷重が作用して陥没に至るまでのメカニズムを解 明するため、空洞上地盤の層厚と粒度分布に着目して輪荷 重載荷実験を行った。

2. 実験内容および実験方法

2.1 管渠の欠損位置が空洞の発達挙動に及ぼす影響を 調べる模型実験

図1に管渠周辺の陥没モデル実験機の概略図を示す。土

槽は幅 1200mm×高さ 800mm×奥行き 250mm とし、土槽下部 に外径 150mmの模擬管渠(上半円)を設置した。本実験で は、模擬管渠の先端 30mm の位置にある欠損形状を ϕ 30mm と ϕ 50mm,欠損位置を底面からの角度 θ =90度(以下,管 頂部と称す)と 30度(管側部)で比較検討を行なった。



図1 管渠周辺の陥没モデル実験の概略図

また, 試料は管路の埋戻しとして一般的に使用される山 砂を用いた。山砂の粒度分布は図2に示す。透水係数kは $k = 5.38 \times 10^{-5}$ m/sec である。供試体は締固め度を90%に調 整し, 飽和状態で作成した後。水位を下げ地盤内の傾斜が 落ち着くまで時間をおいた。



図2 実験で用いた試料の粒度分布

2.2 地下水面勾配が空洞の発達挙動に及ぼす影響を調 べる模型実験

前述の模型土槽(図1)を用いて、模擬管渠の先端 30mm の位置にある欠損形状を ϕ 50mm とし、欠損位置を底面か らの角度 θ =90°(以下、管頂部と称す)と θ =30°(管側 部)の2ケースについて、水槽の両側の水位を左右で変え ることで、地盤内の水位に傾斜をつけた。水位の傾斜を水 平(外水位管上 50cm, 50cm)、緩勾配(40cm, 60cm)と急勾配 (0cm, 50cm)の3ケースで比較し、計6ケースで、地盤内の 流水による空洞進展の違いを検証した。試料は前述の山砂 を用いた。

2.3 交通荷重による空洞上地盤の耐力および陥没発生 条件に関する模型実験

図4に輪荷重載荷実験の概略図を示す。供試体作成前に、 土槽下部に木枠を設置して空洞を成型した。供試体は、相 対密度 D=70%、含水比 w=14%の条件で締固めて作成した。 輪荷重を載荷させることで発生する轍を防ぐため、厚さ 0.5mm のゴム1枚と、その上に厚さ5mm、幅20mmのカ ットしたゴム23枚を約1.5mm間隔で接着したものを供試 体表面に敷いた。実験は、空洞直上で輪荷重を徐々に増や して陥没させる静的載荷と、往復周期6秒で陥没が発生し 土塊が落下するまで輪荷重の接地圧SをN回かける繰返し 載荷の2種類実施した。

表-1 に実験条件一覧,図4に実験で用いた試料の粒度分 布を示す。実験は,層厚または試料を変えたケースを実施 した。試料は,豊浦砂と管路の埋戻し土として一般的に使 用される山砂を用いた。







材料	粘着力 <i>c</i> (kPa)	最大粒径 D _{max} (mm)	均等係数 <i>U</i> c	層厚 t (mm)
豊浦砂	5 97	0 300	1.5	50
32 m 19	0.77	0.500	1.0	40
埋戻し土	10.98	4.75	8.8	40
(山砂)		19.0	10.1	40



図4載荷実験で用いた試料の粒度分布

3. 実験結果および考察

3.1 空洞の発達挙動に及ぼす欠損位置および地下水面 勾配の影響

図5に実験終了時の空洞の様子,図6に土粒子の累積流 出量の経時変化を示す。

まず,水位が水平である2ケースについて,図より,欠 損の位置が管頂部の場合では,空洞は欠損位置から左右対 称に進展した。欠損が管側部にある場合では,空洞は,欠 損位置の片寄っている方向へ大きく進展した。片寄って空 洞が進展した要因として,欠損部へ流れ込む水の流れに左 右で差が生じたためと考えられる。



図5 各ケースにおける実験終了後の様子

図6に土槽底部の間隙水圧計の経時変化を示す。図より, 管側部において水圧が開栓直後に欠損周辺に向かって急 激に減少していることがわかる。また欠損のある右側での 水圧差が左側に比べ傾きが大きくなっている。この動水勾 配の大きさが空洞の進展速度に影響を及ぼしているため, 欠損の片寄っている右側に大きく空洞が進展したと考え られる。

次に、欠損が管頂部の場合の3ケースにおいて、図5よ り、空洞は動水勾配に沿って形成された。このように空洞 が動水勾配と平行に進展していることから、空洞進展は、 地盤内の水の流れ方に大きく影響されるといえる。このた め、空洞の上部は管渠の直上から離れた地点へ進展してい くことが考えられる。また、緩勾配の場合、空洞の進展が 速い。これは、緩勾配の場合の片側の外水位が 60cm と高 いことが影響していると考えられる。

これに対し、管側部における水位の傾斜のケース(緩勾 配, 急勾配) では, 図 5,6 より空洞の進展は見られなかっ た。水位の高い緩勾配の場合においても、開始すぐに欠損 周辺に空洞の発生はあったが、進展はなかった。図8より、 管側部の緩勾配の水の流速は, 欠損が管頂部で水位が急勾 配である場合と同等であり, 欠損が管側部の場合では, 流 速が小さいことがわかった。また,空洞が進展するために は、欠損が管側部にある場合では、管頂部の場合より大き な外力が必要であるといえる。図8から空洞が進展すると きの流速は、0.01m/sec 以上であり、初期の空洞の発生に は流速が 0.006~0.01m/sec 以上であることが必要である といえる。実験試料の透水係数を関連させると、空洞の発 生時には透水係数の 110 倍以上の流速で管渠から水が流 出しているといえる。また,図9に流出した土粒子の質量 濃度の経時変化を示す。 図9より進行性のある場合の土 粒子の流出濃度は50~70%を推移していることがわかった。

3.2 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

図 10 に接地圧 Sと陥没までの繰返し載荷回数 Nとの関係を示す。この関係から、対数近似を用いて S-N曲線を作成した。図(a),(b)より,層厚を変化させても、静的耐力より少ない荷重を繰返し載荷させることで陥没が発生することがわかった。また、S-N曲線の式に着目すると,層厚の薄い方が自然対数に掛かる係数が小さな値を示している。これより,層厚が薄いほど,静的耐力に対しより少ない割合の荷重を繰返し載荷させることで陥没が発生するといえる。

図 11 に空洞中央の表面変位の経時変化を示す。ここで、 z はある繰返し回数 Nにおける表面変位、t は空洞上地盤 の初期の層厚を示す。図の縦軸は、これらのパラメータを 用いて正規化されたものである。図(a)の S=244kPaのケー スは N=3,600 回以上,(b)の S=177kPaのケースは N=3,950 回以上繰返し載荷させても陥没が発生しなかったケース である。図(a),(b)より,陥没が発生したケースのうち、 特に(a)の S=326kPa と(b)の S=212kPaのケースにおいて、 空洞中央の表面変位の変化に特徴がみられた。この特徴に ついて、まず載荷初期に締固めによって表面が大きく変位 した。その後,繰返し載荷を重ねるごとに表面変位は徐々 に進行した。陥没直前には,再び顕著な変位として表れそ の後陥没が発生した。これは,材料が繰返し荷重を受けて 破壊直前に大きな変位や亀裂となって表れる,疲労破壊に 似た現象である。



図7欠損管側部,水位水平のケースにおける間隙水圧計の経時変 化管渠欠損部へ流出する土粒子の質量濃度



図8管渠欠損部へ流出する水の流速の経時変化



図9管渠欠損部へ流出する土粒子の質量濃度



図 11 空洞中央の表面変位の経時変化

また,層厚によらず,表面が初期層厚に対し約13%変位 した時点で大きく変位が進行し,陥没時には約19%の変位 がみられた。今回使用した空洞形状は1つのみであるが, 今後更に空洞上地盤の層厚に対し地表面がどの程度変位 して陥没が発生するか調べることで,現地の路面沈下量の 調査による陥没進行度の評価につながり得る。陥没が発生 しなかったケースについては,載荷初期の締固め後の表面 変位にほぼ変化がみられなかった。しかし,図10の*S-N* 曲線より,更に多くの繰返し載荷をかけることで陥没が発 生すると考えられる。

図 10(b), (c), (d)より,静的耐力は材料の粒度分布が良 いほど大きくなることが確認できた。また、材料を変化さ せても,静的耐力より少ない荷重を繰返し載荷させること で陥没が発生することがわかった。一方, S-N曲線の式に 着目すると、材料の粒度分布が良いほど自然対数に掛かる 係数が小さな値を示しており, 繰返し載荷に弱いことが読 み取れる。特に、山砂(Dmax=4.75mm)のケースと山砂 (Dmax=19.0mm)のケースとの間で係数の値に大きな差が生 じている。この原因として,豊浦砂のような均一で細かい 材料は、繰返し載荷を受けても粒子が乱れにくいのに対し、 山砂のような大きな粒子が混ざっている材料は, 繰返し載 荷によって大きな粒子が動くことで亀裂が発生・進展しや すいためと考えられる。図11(c)より,材料を変化させて も図 11(a), (b) と同様の表面変位の変化がみられた。陥没 時には、表面が初期層厚に対し平均で約22%変位した。豊 浦砂より表面変位の割合が若干大きくなった原因として, 表-1 に示すように粘着力が山砂の方が大きく、変位に対 しねばったためと考えられる。

4. まとめ

管渠の直上だけでなく直上から離れた地点にむかって

進展することもあり,予期しない地点での陥没も考えられ 危険であるとわかった。交通荷重の繰り返しによって空洞 上部の地表面が疲労破壊に似たより早期に陥没に到る前 の空洞を発見するには,以下のことを留意する必要がある。

- 地下構造物により地下水位に傾斜が生じる地点の探 査などでは、管渠の直上だけでない広範囲な探査や 調査を行なう必要がある。
- 2) 管渠へ流出する地盤内土粒子の濃度が 50~70%を超 える場合には、空洞が進展している可能性が大きい。 今後、これらのデータの蓄積によって管渠内に堆積 する土砂特性によって、管渠の破損の有無や空洞の 進展の有無を推定できるようになると考えられる。
- 3) 空洞上地盤の層厚に対し、地表面がどの程度変位して陥没が発生するか調べることで、現地の路面沈下量の調査による陥没進行度の評価につながり得る。

参考文献

- 奥田みのり、中村治人、阿部匡彦::路面下空洞の発生状況 に関する考察(その7)、第50回地盤工学研究発表会、 pp.2217-2218,2015.
- 新井拓弥,前田健一,田坂晃一,高程鵬,佐藤弘瑛::水位 変動が及ぼす管渠周辺地盤の陥没挙動への影響,第51回地 盤工学研究発表会,pp.971-972,2016.
- 澤見英樹ら:管渠周辺地盤での空洞進展に及ぼす動水勾配の影響,第52回地盤工学研究発表会,2017.(投稿中)
- 田坂晃一ら:交通荷重を想定した管渠周辺の空洞進展に及 ぼす繰り返し載荷の影響,第51回地盤工学研究発表会, pp.2093-2094,2016.