

未固結地盤陥没メカニズムの検証

Verification of Cave-in Mechanism in Unconsolidated Ground

久野 春彦 (くの はるひこ)

(財)電力中央研究所 上席研究員

塩 竈 裕 三 (しおがま ゆうぞう)

(財)電力中央研究所 主任研究員

小早川 博 亮 (こばやかわ ひろあき)

(財)電力中央研究所 主任研究員

末 永 弘 (すえなが ひろし)

(財)電力中央研究所 主任研究員

1. はじめに

ここ数年、未固結地盤地表部において地表面が陥没する事象が散見されている。このような事象のいくつかは、道路トンネルや上下水道・配水管における、建設時の設計ミス・施工不良による事故、あるいは戦争中の防空壕や鉱山の廃坑の坑壁が崩れることによる浅所陥没など、原因が比較的明瞭である。

一方で、それらのいずれにも該当しないような一見して原因が特定できない陥没事象も生じており、筆者らはこれらの陥没事象の解明に取り組んできた。

まず、これらの陥没事象が地盤内のどのような状況を反映した結果生じているものであるかを確認するため、陥没が発生した履歴のある地点でトレンチ調査を実施し、直接地盤内を観察した¹⁾。その結果、この事象が未固結地盤内のパイプ状の空隙や地盤の裂かを通した土砂流出の結果である可能性が見出された。これを受けて、このパイプや裂かによる土砂の流出現象の発生条件や、パイプの形成と土砂流出のメカニズムについてその普遍性を検証すべく、地形・地質調査、トレンチ調査、土質試験、電気探査、地下水調査などの各種調査・探査を実施して、事例検討を増やすとともに、室内模型実験により現象を再現した。

本報告では、陥没事象の原因の一つと考えられるパイピングによる土砂流出メカニズムの概要について、これまでの検討結果をもとに、地形・地質との関連性や地盤の堆積環境と陥没メカニズムに重点をおいて紹介する。

2. パイピングによる陥没メカニズムと、対象とする陥没の特徴

上述したように地表部の陥没事象には、地下に伏在している空洞（例えば防空壕や鉱山の廃坑、トンネルなどの地下空洞、以下人工的地下空洞と記す）自体の崩壊や壁面崩落などの明瞭な変状を伴わない、人工的地下空洞と上部地盤における陥没との因果関係が不明瞭なものが存在する。この人工的地下空洞との因果関係が不明瞭な地表部の地盤陥没事象のうち筆者らが検討した事例では、自然斜面に発生する土壌パイプを介した地表面の陥没事象^{2),3)}との類似性が認められた。そして人工的地下空洞を起因として地下から地表部近傍まで形成されたパイプ

のような穴あるいは孔隙を介した土砂流出により、地表部直下で空洞が形成され陥没に至るとい、パイピングによる陥没メカニズムが推定された¹⁾。

対象とした陥没事例には、以下のような共通する特徴、あるいは傾向が認められた。

① 陥没の形態

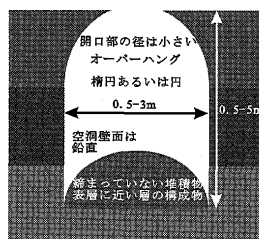
地表部に出現する陥没は、直径・深さともに数十 cm 程度のものから、直径 3 m、深さ 5 m 程度のものまでさまざまであるが、その平面的形状は楕円形あるいは円形をなす。陥没の壁面はほぼ鉛直で、表面は滑らかであり、地表部に向かってややオーバーハングするような形をなす（図—1、写真—1）。

② 発生のタイミング

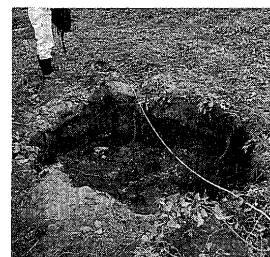
陥没事象の発生は、台風や集中豪雨など大量降水の気象災害に関連して発生するケースが多いが、必ずしもその直後に発生するわけではない。また陥没空洞の容積や陥没の壁面の性状から推定して、1回の降雨により瞬時に形成されたものではなく、長い歳月を経て、最終的な地表部の開口が台風や集中豪雨などの大量降水時に生じているものと推定される。

③ 発生する場所

淘汰の悪い（粒径が不均質で様々な形状の礫から構成されるような）未固結堆積物が厚く堆積しているような谷あい、あるいは谷の出口付近、あるいは河川敷などで発生する傾向がある。地表の現況は田畑などの耕作地か未舗装の道路など。陥没が生じた場所の近傍には湧水、ため池、井戸などの地下水の存在を示すものが分布する。



図—1 対象とする陥没の形態



写真—1 陥没の一例

3. 地形・地質の違いによる陥没メカニズムの相違性・共通性

このようなパイピングによる土砂流出が、地表部にお

ける陥没事象の一つのメカニズムであることを検証するために、自然地盤を対象とし、国内に広く分布する、土石流堆積物分布地域、河川（河床あるいは段丘）堆積物分布地域、扇状地堆積物分布地域で生じた陥没例をそれぞれ1地点ずつ3地点抽出し、それぞれにおいて陥没メカニズムの相違性・共通性の検証を行った。

3.1 対象陥没箇所付近の地形・地質概要

上述した3地点のそれぞれについて、陥没穴の周辺の地盤の状況を直接的に観察することを目的としたトレンチ調査を実施し、地盤の状況を確認した。

① 土石流堆積物分布域

土石流堆積物が分布する範囲に発生した陥没は、二級河川に流下する小支沢中に位置する。陥没発生箇所付近では、堆積物が厚く分布し1/6程度のやや急峻な河川勾配からなる。

小支沢沿いには、数100 m 上流域から供給された土石流堆積物が数 m 規模の厚さで堆積（一部溪流堆積物を挟在）している。土石流堆積物は淘汰の悪い粗粒な砂礫と粘性土からなり、粒度組成から石分混じり土質材料に分類される。それらの砂礫に混じって木幹などの有機物も多く含まれる。土石流堆積物の多くは粘性土を多く含むことから透水性は低い。それに対して一部挟在する溪流堆積物は、淘汰は良いが連続性に乏しい薄い砂層などからなり、それらは比較的透水性が高く、宙水を形成している。さらに地表付近にはより近傍の斜面から供給された崖錐堆積物が分布し、それらを表土（一部耕作土）が覆う。

② 河川（河床あるいは段丘）堆積物分布地域

河床堆積物あるいは段丘堆積物が分布する範囲に発生した陥没は、二級河川（全長30 km 程度の河川）の中下流部に位置し、本川の河床と河岸段丘の境界部付近にあたる。陥没が発生した箇所付近より上流5 km 付近までは1/30～1/40程度の河川勾配であるが、それよりも下流側では1/70程度で非常に緩い河川勾配となる。

現河床堆積物および段丘堆積物は、粒径50 cm 程度以下の粗粒堆積物（巨礫～粗粒砂程度を主体：礫は円～亜円礫を主体とする）からなり、粒度組成から岩石質材料に分類される。それらを耕作土が覆う。河床および段丘堆積物にはチャンネル構造は認められるが、比較的連続性は良い。また耕作土層を除けば、粘性土をほとんど含まないことから、全体的に透水性は高い。

③ 扇状地堆積物分布地域

扇状地堆積物が分布する範囲に発生した陥没は、河川勾配が比較的急な二級河川（全長10 km 程度の河川）が、一級河川が形成した盆地に流下（合流）する、河川勾配の変化点付近に位置し、河岸段丘上にあたる。陥没が発生した箇所より上流側では、1/20～1/30程度の河川勾配であるが、陥没箇所付近より下流では1/60程度で非常に緩い河川勾配となる。

扇状地堆積物は、直径がメートル級の巨礫を含む淘汰の悪い粗粒堆積物（巨礫～細礫、粗砂程度を主体：礫は亜円礫～亜角礫を主体とする）からなり、粒度組成から

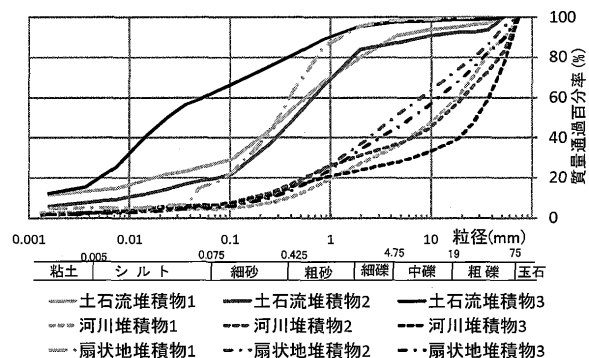


図-2 対象地盤の粒径加積曲線

岩石質材料に分類される。それらを崖錐堆積物と表土（一部耕作土）が覆う。扇状地堆積物は層構造が明瞭ではなく、またチャンネル構造が認められ、層の連続性は悪い。表土層を除けば、粘性土をほとんど含まず、粗粒な堆積物を主体とすることから、全体的に透水性は高い。

以上の各対象地盤の粒度組成を図-2に示す。なお、試料は $D_{max}=75$ mm に対する尖頭粒度試料である。

3.2 トレンチ調査結果によるパイピングの相違性・共通性

ここでは一例として土石流堆積物分布地域で実施したトレンチの壁面の観察結果を示す（口絵写真-1，口絵写真-2）。トレンチ調査を実施した三つの堆積物分布地域ともに、地表の陥没箇所の陥没の底面よりも地下深部の地層には、乱れやずれは認められず、一部裂かや空隙が存在するのみであった。口絵写真-1，口絵写真-2に示すように、土石流堆積物分布域の陥没では、崖錐堆積物層には裂かや変形が認められているものの、それよりも深部の地層には乱れは認められず、空洞は崖錐堆積物層と表土（耕土層）の境界付近に形成されたことが確認された。崖錐堆積物層の裂かには耕土層（トレンチ展開図では焦げ茶色に塗色、写真では黒色）が染み込んだような産状が認められ、またその深部延長ではφ2～3 cm 程度の円筒状のパイプが地下深所に向けて連続していた（口絵写真-3）。またトレンチ掘削時点では地表に陥没空洞として顕在化していない（地表に開口していない）陥没空洞（以下、人工的地下空洞と区別するために伏在陥没空洞と記す）が存在した。その伏在陥没空洞の下底周縁部には高角度の開口割れ目（裂か）が存在し、軟らかい耕土（細粒粒子）を挟むことが確認された。これより、崖錐堆積物と耕土層の境界部付近に形成されている伏在陥没空洞は、裂かやパイプを通じて、締まりの悪い地表付近の未固結堆積物の粒子を地下深部へ流出し形成されたものと推定された。

扇状地堆積物分布域におけるトレンチ調査結果においても、先に述べたように陥没穴底面より深部の堆積物層には乱れが認められないことから、土石流堆積物分布域と同様のメカニズムでの陥没が発生したことが推定された。扇状地堆積物分布域における、陥没底面より深部地盤の堆積物の観察では、口絵写真-4に示すような石積みのような構造（礫と礫の間に空隙を有し、基質に相当する細粒分が欠落した隙間）が認められ、送水により透水性

報 告

が非常に高いことが確認された。同様に河床堆積物分布域においても、石積みのような構造が認められ、それが人工的地下空洞まで連続していることが確認された。地層自体に乱れが無く、石積みのような構造の透水性が非常に高いことを総合し、この石積みのような構造が、土石流堆積物における堆積物の裂かや円筒状のパイプに相当する土砂流出経路であると推定された（以下このような構造のパイプをインターロック構造と記す）。

以上に示したトレンチ調査結果から、地下深所に存在する人工的地下空洞周辺から、地表付近に形成されたものと同等の大きさの空洞が徐々に上昇してくるような陥没（あるいは瞬時に引き込まれる浅所陥没のような陥没）とは異なり、パイプにより人工的地下空洞周辺に土砂を流出させ地表近くに空洞を形成するような陥没のメカニズムが存在していることが検証された。そして、構成している土質材料の違いにより、経路となるパイプの構造が異なることが確認された。

4. パイピングによる土砂流出のメカニズム

以下に、前述の陥没現象を検証するために実施した室内実験と電気探査による調査結果について述べる。

4.1 室内模型実験

一般の山地においては地中流路（パイプ）が多数存在し、表土の極めて浅いところから、表土と下層土の境界周辺、さらに下層の風化基盤内へパイプが発達していることが考えられ、また地中で飽和流が存在する場には何らかの流路があり、地中では雨水の一樣流は存在しないとみたほうが良いと考えられている⁴⁾。筆者らも同様の現象が人工的地下空洞上部の未固結地盤内で生じていると推定し、簡単な模型実験を実施して浸透経路の形成および透水性状の変化について検討した。

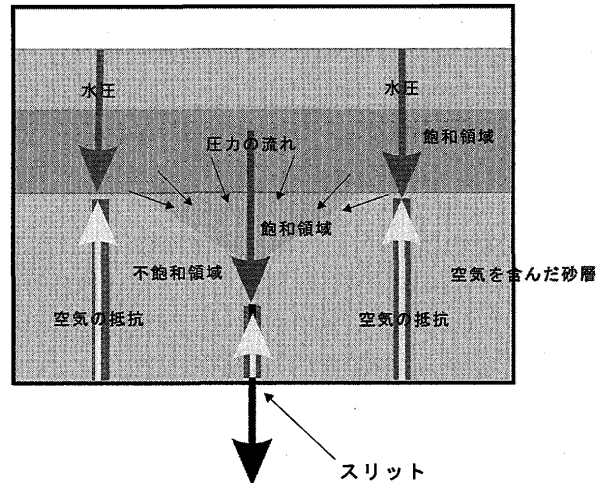
(1) 実験方法

水槽（長さ28.5 cm×幅6 cm×高さ17 cm）の底面に1～8 mm 幅（可変）のスリットを設け、珪砂4号、6号、7号とカオリンを混合して材料を作り、それを水槽に充填（高さ12 cm 程度）し、上部に設置した降雨装置から水槽上面に様に散水して、水の浸透時間および形成される経路について観察した⁵⁾。

(2) 実験結果

不飽和状態で表層から散水した場合、カオリンの含有量により浸透速度に違いがあるが、水槽下部のスリットから水が流出するまでに十数分～1時間以上の時間がかかること、流出後は流速が速くなりカオリンを含む濁水が流出することが確認された。流出する濁水の濁りが減少するまで連続的に散水を実施した後に、着色した水を散水したところ、数秒で着色水が水槽下部スリットから流出することが確認された。また試験終了後の水槽内材料には湿潤した領域と乾燥した領域が存在することが確認され、不飽和領域内に飽和領域が局所的に形成されたことを確認した。

この実験では模型の境界条件や、材料の特性などに影響される部分が大きく、例えば透水係数や流速などの値



図—3 模型実験における浸透経路の形成メカニズム

には意味を持たないが、不飽和領域の中に局所的な飽和領域が形成され、かつその飽和領域内には不飽和領域の数十～数百倍の流れが生じる可能性があるという結論を得た。

(3) 実験結果の考察

模型実験の結果、試料を詰めた水槽に水を上部から供給した場合、水槽内の試料中に不飽和領域と飽和に近い領域が形成され、さらに飽和に近い領域の中には局所的に流れの速い領域（以下、水みちと記す）が形成されることが明らかとなった。この実験から、底部にスリットが無い場合は、上部から供給された水の水圧と試料粒子間に含まれる空気圧が釣り合う（バランスする）ため浸透が抑制されるが、スリットが存在する場合は、空気が底部のスリットから水槽外に排出されるため、水はスリットに向かって移動しやすくなると考えられる。その場合、図—3に示すようにスリット直上近傍ではスリットに向かう水や空気の流れが強く、スリットから離れた場所では流れがほとんどない状態となる。この結果、スリット直上近傍には飽和に近い領域が形成され、スリットから離れた場所には不飽和の領域が残され、それらが水槽内で共存するものと考ええる。また水槽内に飽和に近い状態の場所が形成された後には、この飽和に近い状態の場所を水が流れて水みちとみなせる状況になることを意味し、地盤中においても、同様に飽和に近い状態が形成されやすい環境には、水みちが形成されやすいことを示していると推定される。

4.2 高速三次元比抵抗電気探査による検証

模型実験から、局所的に形成された飽和領域内を高速に移動する水があり、その水が地盤の細粒分を流出させることが推定されることから、不飽和地盤内の高速に移動する水の動きを捉えるために、高周波数正弦波を用いた二極法専用の高速三次元電気探査装置^{6),7)}を開発し、それを現場に適用した。

(1) 計測および検討方法

計測では、1～2.5 m 間隔で平面的に配列した電極により、まず自然状態での地盤の比抵抗分布を測定（これを初期値とする）した。そして、散水を行いながら、3

～4分の間隔で連続的な計測を実施した。散水においては、集中豪雨に相当する量の水をまいた後に、電気伝導度をやや高めた水を用いて散水を行った。

計測データをもとに3次元インバージョン解析を実施し、初期値に対する散水中の比抵抗分布の変化率で解析結果をとりまとめた。

なお、散水を伴う3次元電気探査に先立って2次元電気探査を実施し、別途実施されたボーリング調査結果と整合を図りながら、対象地域における基盤面の位置を推定した。

(2) 計測結果の考察

計測は3.2節で紹介したトレンチ掘削箇所それぞれ実施したが、ここではその中から扇状地堆積物分布域における計測結果のうちの一断面（口絵写真－5）を用いて計測結果を述べる。対象地域では、ボーリング調査により、地表下5～6m付近に基盤岩となる古第三系の凝灰質砂岩が分布すること、および基盤上に地下水位が存在することが確認されている。

さて、計測結果によると、地表から散水された水は、比較的透水性の高い扇状地堆積物中を浸透して、地表下4m程度の深度まで浸透していることが比抵抗値の変化率から読み取れる。一方、トレンチ調査によりインターロック構造のパイプが確認された位置付近においては、比抵抗の変化がほとんど認められず、それよりもさらに深部（5m程度）の基盤面付近で大きな変化領域が出現することが確認された。

インターロック構造のパイプはトレンチ調査の節で述べたように非常に高い透水性を有しており、地表から浸透してきた水がインターロック構造のパイプを経由して、地下深部に運ばれ、浸透した先の基盤面付近に分布が確認されている地下水流と交わることで、滞留した結果と推定された。

模型実験では、不飽和領域内に飽和に近い領域が形成されると、その飽和に近い状態の場所を水が流れて水みちとみなせる状況になることが結論として得られたが、それと同様の現象が陥没発生箇所周辺の堆積物中でも生じていることが現地計測の結果からも確認された。

よってパイピング等による不飽和領域内の水みち形成により地表付近に伏在陥没空洞が形成されるメカニズムが存在することが推定された。

5. ま と め

陥没発生箇所における各種フィールド調査および室内

模型実験結果を総合することにより、以下の検証結果を得た。

- ① 地下深所に大気圧と同等の圧力状態の場所が存在する場合には、地表からの浸透水が優先的に流れる場所が形成され、不飽和領域に局所的な飽和に近い領域が形成され、そこが水みちとなること、
- ② 堆積物を構成している材料により、水みちの構造が異なり、石分混じり土質材料では裂かや円筒状のパイプが、岩石質材料では石積みのようなインターロック構造の空隙が、土砂を流出させる水みちとなること、
- ③ 陥没には、人工的地下空洞から徐々に地表部付近に形成されるような規模の空洞が上昇するようなメカニズムとは別に、パイピングによる水みちの形成により、地下深部から地表部の間には、規模の大きな空洞が存在せずに、地表部付近で伏在空洞が形成されるようなメカニズムが存在しうること。

今後は、このようなメカニズムで成長している伏在空洞を探査する技術の開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 久野春彦・塩竈裕三・小早川博亮・上原史洋・小角亨・高瀬信一：トンネル経過地上部未固結地山の陥没メカニズムの検討，日本応用地質学平成18年度研究発表会講演論文集，pp. 429～432, 2006.
- 2) 北原 曜：森林土層中の水移動におけるパイプ孔隙の特性に関する研究，森林総研研報，Bull. For. Prod. Res. Inst. No. 367, pp. 63～115, 1994.
- 3) 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編：水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—，古今書院，1996.
- 4) 塚本良則：森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—，朝倉書店，1998.
- 5) 久野春彦・塩竈裕三・小早川博亮・鈴木浩一・末永弘：トンネル経過地上部未固結地山の陥没メカニズムの検討（その2），日本応用地質学平成19年度研究発表会講演論文集，pp. 177～178, 2007.
- 6) 鈴木浩一・塩竈裕三・久野春彦・小早川博亮・末永弘：超高速電気探査装置による未固結地盤中の地下水流動モニタリングへの適用，日本応用地質学平成19年度研究発表会講演論文集，pp. 119～120, 2007.
- 7) 鈴木浩一・塩竈裕三・久野春彦・東 儀則：超高速電気探査装置の開発—未固結地盤中の地下水流動モニタリングへの適用，物理探査，Vol. 60, No. 6, pp. 515～526, 2007.

（原稿受理 2009.5.25）