

# 鉄道盛土の陥没災害の予防に関する数値シミュレーションを用いた基礎的な検討

日本工営（株） 正会員 ○太田 敬一

## 1. 本検討の概要と目的

鉄道盛土の陥没災害は列車の運行に支障を及ぼす事象であり、陥没の機構を踏まえた予防は重要な取り組みと考えられる。本稿では数値シミュレーションを用いて、盛土内に分布する空洞が陥没に至る要因を想定し、空洞の発達による陥没のプロセスをシミュレーションし、鉄道盛土の陥没に達する条件を検討した。

## 2. 検討方法

盛土の陥没に至るまでの条件を数値シミュレーションで把握するため、シミュレーションの設定条件として、以下に示す盛土材の吸出し方法、盛土材などのモデル方法、および材料特性などを設定した。

### (1) 盛土材の吸出し方法の設定

盛土材の吸出しは、陶管を流れる地下水による盛土材の流出、また盛土に浸潤した地下水が陶管へ流れる際に地下水と共に流出するものと推定されるが、いずれのケースでも盛土材の陶管からの流出と考えられる。盛土材の流出の過程は、地下水や地盤の条件により異なると思われるが、ここでは設定するシミュレーションモデルの下面から地下水位が上昇し、それに伴い設定する盛土材の内、細粒分が陶管から流出することで盛土材の流出をモデル化することとした。

### (2) 盛土などのモデル化および数値解析手法の設定

本稿では鉄道盛土下の直径 50cm 程度の埋設物として陶管を想定した。上記に示したようにその陶管が破損し、陶管の周辺から盛土材の吸出しが発生するもの

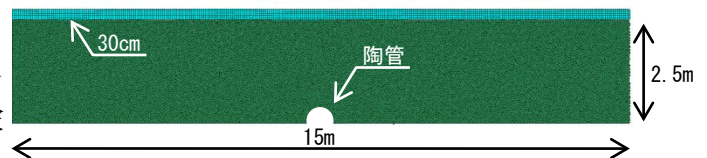


図1 盛土材と上部構造のモデル図

した。盛土材のモデルは、陶管からの盛土材の流出、移動のプロセスを把握するため、粒状体でモデル化した。モデル化に際しては、個別要素法（Distinct Element Method, 以下 DEM）<sup>2)</sup>、解析コードは PFC（Particle Flow Code, Itasca 社, 米国, 以下 PFC）を用いた。また盛土の上部構造に該当するバラスト、枕木、線路については、バラストの特性を考慮し DEM を用いた詳細なモデルの解析事例<sup>3)</sup>があるが、本稿は盛土材の挙動に着目する観点からそれら上部構造は一体化した構造体とみなし、連続体でモデル化した。モデル化に際しては、有限差分法（Finite Differential Method, 以下 FDM）、解析コードは FLAC（Fast Lagrangian Analysis Continua, Itasca 社, 米国, 以下 FLAC）を用いた。従来、PFC や FLAC ではそれぞれ連続体のモデル、離散化したモデルを同時に扱うことが出来なかったが、解析コードの高度化に伴い、粒状体、連続体のモデルを同時に扱う連成解析が可能となったため、ここでは PFC と FLAC の連成解析を実施した。図1は PFC でモデル化した盛土材と FLAC で作成した盛土材の上部構造のモデル図である。盛土材は 3.5m、上部構造は 30cm の高さでモデル化し、またそれぞれ奥行方向に 20cm の厚みを設定した。

### (3) 材料特性の設定

盛土材は既往の文献<sup>4)</sup>を参照し、この文献に示された「陥没の多い地域の粒径加積曲線」の通過重量百分率の割合を参考に、通過重量百分率が約 40% の 3mm、通過重量百分率が約 60% の 7mm、通過重量百分率が約 80% の 20mm の 3 粒径の粒子でモデル化した。先に示した盛土材の流出に際しては、ここで示した粒径 3mm を細粒分とし流出させることとしている。ただしこれらの粒子サイズで図1に示す規模でモデル化した場合、粒子数の関係上、解析不能となるため、ここでは総粒子数を約 10 万個とし、3 粒径の通過率の割合を保持したまま、粒径のサイズを調整した。盛土材の材料特性は既往資料<sup>3)</sup>と同等とし、盛土材以外の上部構造の材料特性は、ここでは盛土材の 2 倍程度の変形、強度特性としたが、この点は今後、別途検討を進める予定である。

### (4) 鉄道車両の通過に伴う荷重条件の設定

上部構造には時速 60km/h で走行する車両を想定し、車両の荷重を移動荷重として上部構造の上面に作用さ

せた。図2は移動荷重の設定状況であり、上部構造の上面に車両に相当する重量を設定した球体を移動させた。実際の鉄車両の通過時には、線路から枕木、バラストを通じ車両の荷重が分散し盛土材に伝達すると想定されるが、本稿では上部構造を連続体としてモデル化しており、上部構造に作用した荷重は分散し、盛土材に伝達することとなる。

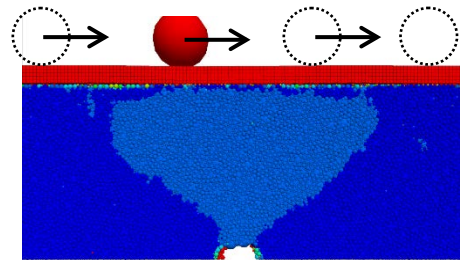


図2 移動荷重の設定

### 3. 検討結果

先ず設定した盛土材の安定性を把握するため、車両の荷重を作用させず、地下水により細粒分がモデル下面の陶管から流出し、地下水位の上昇に伴い徐々に空洞が発達することを想定し、細粒分の流出範囲を変化させた解析を実施した。その結果、図3に示すように、空洞の高さが1.5m程度までは空洞が発達しても上部構造に変状は生じないこと、その高さを越えると上部構造に変状が生じ陥没が発生することが分かった。つまりこのモデルは、車両の荷重条件によるものの、1.5m以下の空洞の高さで陥没が生じる特性を有したモデルであることが分かる。

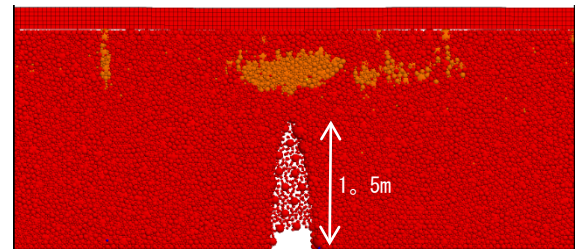


図3 車両の荷重が無い場合の空洞の発達

次に車両による荷重を作用させた場合の空洞の発達状況を図4に示す。図4上図は、地下水位が20cmに達した場合を想定し、陶管の幅の範囲でモデル底面から高さ20cm以下の細粒分を流出させた場合の解析結果である。盛土材内に発生する変位は、車両による荷重の影響を受け上部構造の下面から空洞に対し分布しているものの空洞周辺の変位とは干渉せず、よって車両は空洞に影響していないと言える。図4の中段は高さ25cm以下の細粒分を流出させた場合の解析結果であり、空洞周辺の変位と上部構造の下面の変位が干渉しつつある状況となっている。更に図4下図は地下水位を30cm以上の場合を想定し細粒分を流出させた場合の変位の分布であるが、上部構造の下面に空洞が発生するような状況となり、それに伴い上部構造にも沈下が生じている。従ってここで設定した盛土材、車両の荷重の条件下では、モデルの下面から地下水位が約30cm以上上昇した場合、空洞が発達しその結果、盛土材および上部構造に沈下および陥没が生じることとなる。よってこの結果を踏まえれば、盛土内の地下水位を計測し、地下水位が約30cmを超過した場合、鉄道車両の通行規制を検討することで、陥没による災害を未然防ぐことに役立てられると考えられる。

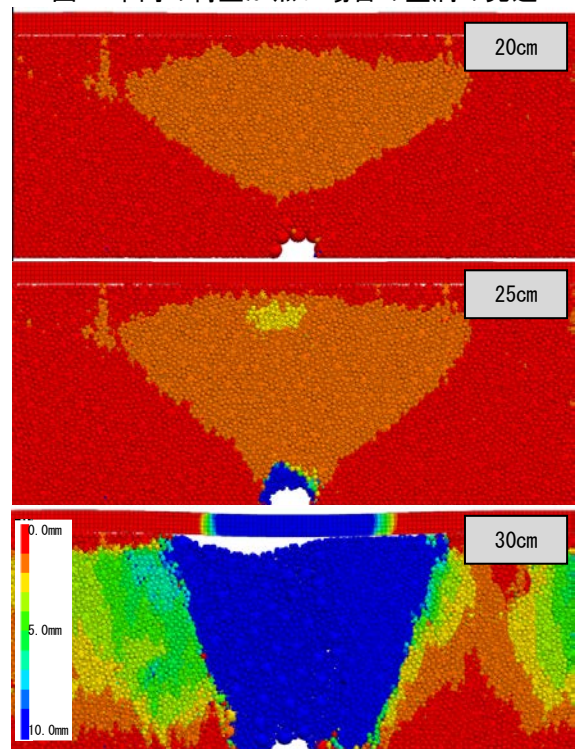


図4 車両の荷重を作用させた場合の変位分布

### 4. 今後の課題

本稿では地下水による盛土材の細粒分の流出を想定し、陥没に至る条件を示した。ここで示した解析結果を踏まえ、盛土材の材料特性を変化させた感度解析や、上部構造の材料特性について検討を進める予定である。

### 参考文献

- 1) 小林睦志, 泉並良二, 乾司, 三戸嘉之; 鉄道盛土における地中埋設管探査手法の検討, 土木学会第59回年次学術講演会論文集, pp. 177~178, 平成16年9月
- 2) 太田敬一, スレンソッキアン; 道路の路盤下に形成された空洞の規模の推定に関する解析的取り組み, 第57回地盤工学シンポジウム, pp. 199~202, 2012年
- 3) 河野昭子, 松島亘志; 離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 12, pp. 41~46, 平成26年12月
- 4) 黒山泰弘, 奥村忠雄, 佐藤渉, 武石朗; 路面下空洞が発生する素因に関する検討, 土木学会第56回年次学術講演会論文集, pp. 134~135, 平成13年10月