

# 線路下小口径管の破損および浸透水に起因した 鉄道盛土の沈下の簡易評価法

松丸 貴樹\*      佐藤 武斗\*  
嶋本 敬介\*\*    森 裕昭\*\*\*

## Conventional Evaluation Method for Railway Embankment Settlement due to Damage and Water Infiltration to Small-diameter Pipe Under Track

Takaki MATSUMARU      Taketo SATO  
Keisuke SHIMAMOTO      Hiroaki MORI

Small-diameter pipes installed in railway embankments are often affected by seepage water when they are damaged, which causes soil outflow and leads to track settlement and cave-ins. In this study, we investigated pillars buried in railway embankments and conducted model experiments to understand the decrease in ground reaction force around the pipes. We also developed a numerical analysis method that takes into account the decrease in ground reaction force and calculated the degree of impact of pipe damage caused by seepage water on track settlement. The results are illustrated in a chart that classified the magnitude of the impact.

キーワード：伏び，盛土，沈下，浸透水，影響度判定チャート

### 1. はじめに

鉄道盛土には、土構造物の排水や、周辺環境の生活や産業での活用のための導水を目的とした小口径横断管（以下、「伏び」と記す）が埋設されている。これらは鉄道盛土の建設時に埋設されたものがほとんどであり、長い経年を有するものも多い。これまで、伏びを有する鉄道盛土では軌道変状や陥没が発生することで、列車の運行に大きな影響を及ぼす事例が多々報告されている。一方、鉄道事業者は土構造物の維持管理として定期的に伏びの検査・修繕を実施しているが、数量が多いことや盛土のり面での草木の繁茂が伏びの位置の特定を難航させることから、全数の伏びの検査を一巡させるために膨大な時間を要している。伏びに関する種々の条件（管径や土被り、盛土条件など）に応じて軌道への影響度合いは異なると考えられ、検査にかかるリソースを適切に配分できるよう、軌道への影響度を定量的に評価できる手法が求められていた。

大原ら<sup>1)</sup>は、伏びの破損を想定し、その直上の盛土で地盤反力が低下するものと仮定し、数値解析モデルを用いて軌道への影響度を算定し、伏びの緒元に応じた影響度をチャートして取り纏めている。この研究では、管径が大きいほど、土被りが小さいほど伏びが軌道変位に及ぼす影響が大きく算定されており、これまでの軌道変状や陥没の発生とは概ね整合しているものと考えられる。しかしながら、このチャート作成時は伏びに破損があることのみを想定している。伏びに破損があることでその後の伏びの供用過程において、浸透水の影響を受けることによって盛土内へより水が浸透することや、逆に盛土材料を伏び内に引き込み盛土から流出させる可能性も考えられる。また、このような事象は伏びに目立った破損がなくても、例えば軽微なクラックや、伏び設置段階から設けられている継手を介しても生じる可能性がある。鉄道以

---

\* 構造物技術研究部 土構造研究室  
\*\* 構造物技術研究部 トンネル研究室  
\*\*\* 元 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

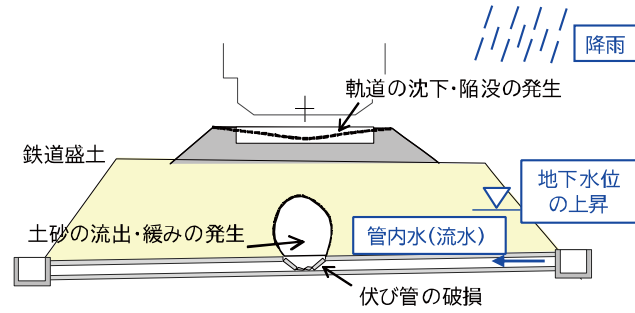


図1 損傷した伏びに及ぼす浸透水の影響

外の分野では、これまで下水道の分野において埋設管を対象とした土砂の吸出しや流出のメカニズム解明を意図した研究は多く実施されている<sup>2)3)</sup>。これらは地下水位面以下に位置する管渠を対象としているが、鉄道盛土の伏びの小口径管は集水地形等を除くと地下水位面以浅の不飽和盛土内での吸出し・土砂流出現象に着目する必要があることや、管径も小規模なものが多い特徴がある。

図1には、損傷を有する伏びに対する浸透水が及ぼす影響のイメージを示す。伏びが破損すると、その直上の盛土の一定領域で土砂の流出が生じると考えられる。その上で、降雨の浸透や盛土内での地下水水位の上昇、あるいは伏びを流れる管内水の影響によってこの領域が拡大し、場合によっては軌道の沈下や陥没の発生につながると考えられる。本研究では、このような伏びに対して浸透水が与える影響を把握するとともに、これに起因する軌道の沈下予測に活用する地盤反力係数の低下のモデル化を行い、軌道への影響度を伏びの諸元に基ついで判断できるチャートの作成を行った。

## 2. 実際の鉄道盛土での伏びの試掘調査

### 2.1 対象盛土の概要と調査内容

実際に伏びが埋設されている鉄道盛土を対象として、試掘および各種調査・試験を実施した。対象とした盛土では廃線となり軌道が撤去されており、盛土内部に伏び（陶管）が2本埋設されている。試験実施箇所の写真を図2に、断面図を図3に示す。伏びA、Bはいずれも陶管であり、伏びAは過去の全般検査で特に変状が確認されていない一方で、伏びBは過去の全般検査で変状（ひび割れ）が確認されている。調査時の天候は雨天ではなく、管内水の水位は概ね図3中に示す位置にあることを確認している。また、いずれの伏びも支持地盤より上部の盛土内に位置している。

試掘を進めながら、掘削深度および線路方向の離れを変えて小型FWD試験による $K_{30}$ 値の計測と、試料採取を行って粒度試験に活用した。

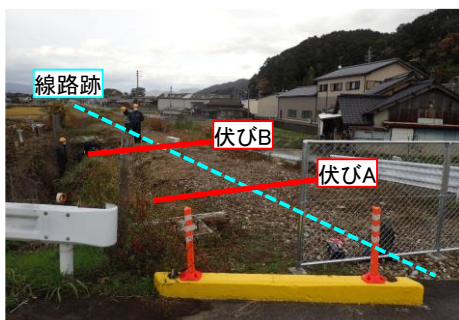


図2 現地試験実施箇所

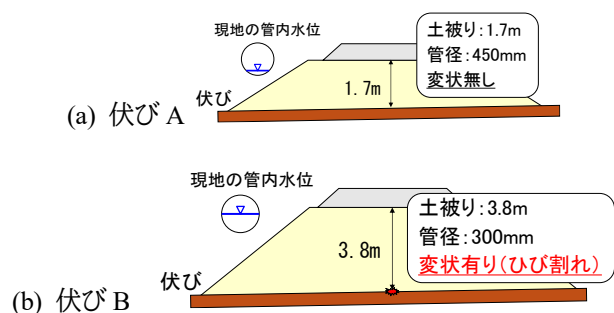


図3 試掘対象の伏びの断面図



図4 伏びの掘削状況

2.2 試掘・調査結果および考察

2.2.1 試掘調査による伏びおよび周辺盛土の状況

伏び A・B 周辺の掘削状況を図 4 に示す。まず伏び A では、左側に継手部の拡大写真を示すが、陶管の継手部周辺において数 cm 程度の小規模な空洞が存在することを確認した。また、右側に陶管継手部を覗くような方向の写真を示すが、継手部においては拳が入る程度の隙間があることも確認された。継手部周辺の小規模な空洞は、継手部の隙間から盛土材料が管内へと流出することで形成・拡大した可能性が考えられる。また、伏び周辺の一定の領域には、周囲の盛土材料とは性質の異なる粘性土が存在し、この粘性土により伏びが被覆されている状況であることを確認した。この粘性土は伏び B 掘削時にも同様にその存在を確認している。2 本の限られた伏びに対する調査結果であるため他箇所の伏びがどのようになっているかは不明であるが、伏びの敷設の際に管内の水の流出を防ぐ目的で粘性土による被覆がなされた可能性が考えられる。

伏び B 周辺では継手部には破損が見られ、管中央位置にひび割れが入っていることを確認した。過去の全般検査の結果と整合しており、掘削深度が伏び側面まで到達した時点で管内水がひび割れ部から流出することを確認した。この調査結果は、伏び B の管内水位が上昇した際に管内水が管外へと流出する可能性や、地下水位上昇時に盛土内の土砂が管内に流出する可能性があることを示唆している。ただし、目視で確認を行った範囲では伏び B 周辺に空洞は確認されなかった。

2.2.2 小型 FWD 試験および粒度試験の結果

伏び A, B 直上の盛土にて実施した小型 FWD 試験から得られた  $K_{30}$  値の分布を図 5 に示す。本図は線路方向の断面図として示しており、横方向は伏び中心位置からの線路方向の離れを示している。図中の伏び A・B の黒および赤で示した測点では盛土材料の採取を行い、後述の粒度試験を実施した箇所に相当する。伏び A では、深度方向および線路方向の離れによる  $K_{30}$  値の大きな変化はなく、いずれの箇所でも  $120\text{MN/m}^3$

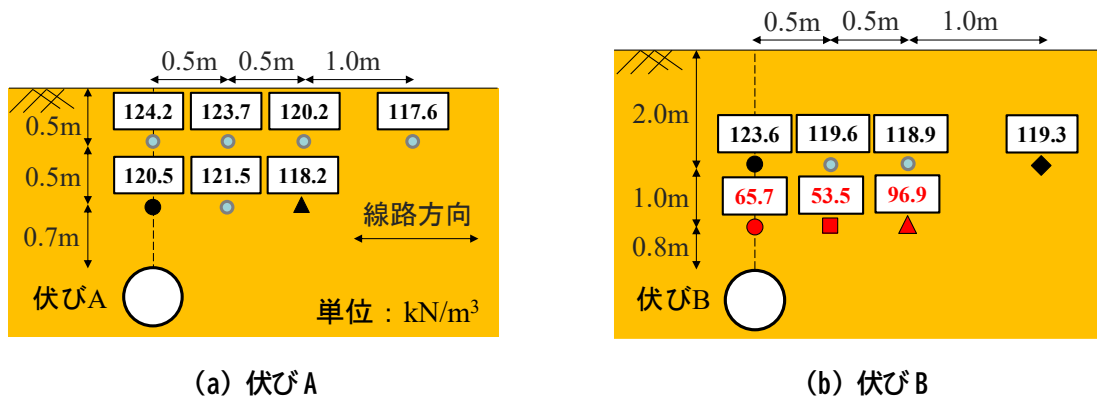


図5 小型 FWD 試験による  $K_{30}$  値の分布

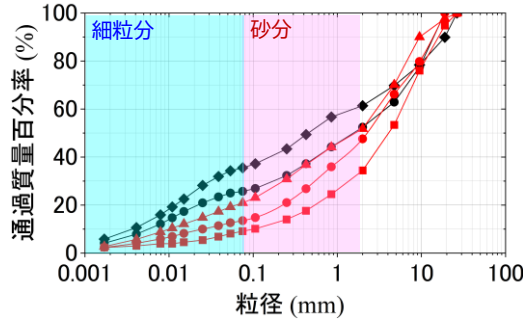


図6 伏びB周辺で採取した盛土材料の粒度試験結果

程度の値となっていた。伏びAでは(1)で示したように継手部等で小規模な空洞が確認されたものの  $K_{30}$  値の変化がなかったことを踏まえると、小規模の空洞程度であれば地盤反力に及ぼす影響は小さいものと推察される。一方で伏びBでは図5(b)に示すように、深度3mにおいて深度2mと比較すると  $K_{30}$  値が低下していることが確認された。その低下は線路方向に伏びに近い位置ほど顕著であり、深度2mの位置での  $K_{30}$  値と比較すると5割程度の値となっている。

次に、伏びBで採取した各箇所の盛土材料の粒度分布を図6に示す。図中の赤いプロットは深度3m、黒いプロットは深度2mで採取した試料の分布を示しており、その記号が図5(b)の位置に対応する。伏びB直上の深度2mおよび3mで採取した盛土材料のうち、伏びBに近い深度3mの粒度分布(●や■)は深度2mの粒度分布(◆)と比較して、砂分(図中赤色の範囲)および細粒分(図中青色の範囲)の割合が減少していることが確認され、その減少は伏びBにより近い位置で大きくなっていることがわかる。また、深度2mでも伏びBに近い位置(●)においては、深度3mほど顕著なものではないが砂分および細粒分が減少している。これらの試験結果から、伏びBでは伏びに近い位置ほど砂分および細粒分が吸出しにより減少していることを示しており、これに伴う盛土の密度低下が生じることで小型FWD試験での  $K_{30}$  値の低下に繋がったものと考えられる。

### 3. 模型実験による地盤反力係数低下の把握

#### 3.1 模型実験の概要

実験模型の概要図を図7に示す。実験土槽は幅、奥行き、高さそれぞれ600mmであり、高さ100mmの位置に開口部付きの伏び模型を土槽側に固定可能な構造となっている。また、土槽背面底部にはコックを設けており、土槽内への注水や土槽内の水位確認のためのマンメータの設置が可能である。地盤の構築には東北珪砂6号を用い、支持層として鹿島珪砂2号を用いた。どちらも締固め密度比  $D_r=90\%$  (乾燥密度  $\rho_d=1.461\text{g/cm}^3$ ) で構築した。含水比は、鹿島珪砂については気乾状態、東北珪砂については1%とした。東北珪砂の層厚300mmの範囲については、図中に緑色の線で示すように50mmごとに色砂を敷き均し、土槽正面の亚克力面からの地盤の変状を可視化した。実験時の計測として、地盤内に土壌水分計を、地表面にレーザー変位計を、土槽背面底部にマンメータを設置し、それぞれ飽和度、地表面の鉛直変位、盛土内水位の計測を行った。

実験は2ケース実施しており、Case1は管内水の影響を確認するための流水実験、Case2は盛土内水位の影響を確認するための注水実験とした。これは、別途実施した模型実験により伏び直上地盤での沈下量の把握を試みたところ<sup>4)</sup>、図1に示す浸透水の要因のうち降雨については非常に大きな降雨強度であっても地下水位が形成されずほとんど沈下は生じることがなかった一方で、地下水位や管内水の影響によって沈

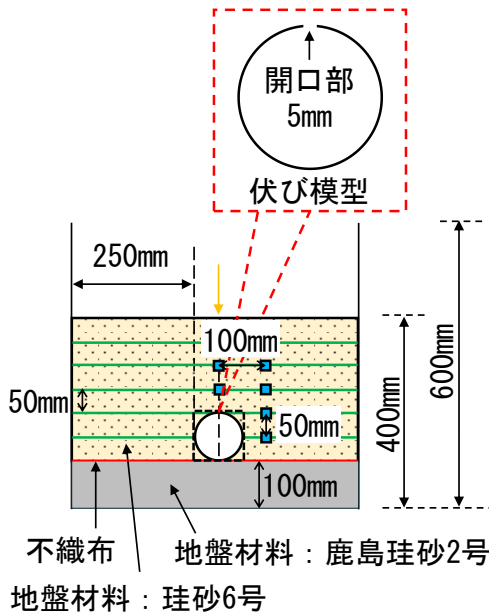
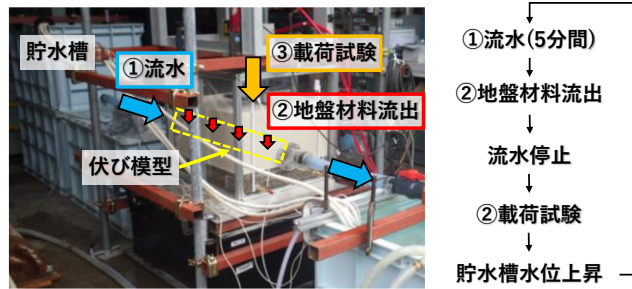
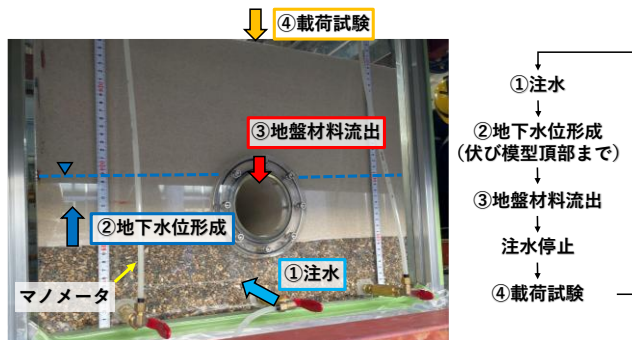


図7 実験模型の概要図



(a) Case1



(b) Case2

図8 各ケースの実験の実施状況

下が見られたためである。管内水については、実際に流水として伏びに影響を及ぼすためここでは流水実験として試験を行うこととした。

両ケースの試験の実施状況を図8に示す。Case1では別途貯水槽を設け、伏び模型と貯水槽をホースで接続することにより、管内が満水の状態で水が流れる状況(流水)を模擬した。実験中は貯水槽の水位を一定に保持しながら5分間の流水を継続し、流水を停止させた後に地表面での载荷試験を実施した。この流水・载荷試験を1サイクルとして、貯水槽の水位を徐々に上昇させながら、流水・载荷試験のサイクルを6回繰り返した。なお、载荷荷重は列車荷重を1/4スケールで模擬し、文献1を参考に所定の路盤圧力(15.7kPa)となる106Nを目標とした。一方、Case2では土槽背面底部のコックと貯水槽をホースで接続し、貯水槽の水位を上昇させることで土槽内への注水を行った。盛土内水位を開口部付近まで上昇させ、地盤材料の流入や空洞の形成を確認しながら、注水を停止し载荷試験を実施することとし、この注水・载荷試験のサイクルを9回繰り返した。なお、载荷荷重はCase1と同様とした。

### 3.2 実験結果および考察

#### 3.2.1 各ケースの挙動

両ケースの载荷試験によって得られた荷重-変位関係を図9に示す。Case1では流水開始前に実施した载荷①が最も载荷時のピーク変位が小さく、载荷回数を重ねるごとに変位が増加していることが確認できる。実験時には流水によって地盤材料が管内へと流入していることが目視によって確認されており、その影響によって伏び模型上部にゆるみ領域が形成され、地表面の位置においても変位が増加したものと考えられる。ただし、流水による地盤材料の管内への流入は、伏び模型周辺に空洞が視認できるほど顕著ではなく、载荷⑤~⑦では载荷に応じて変位の増加がむしろ小さくなっており、これらの载荷では流水による土砂流出よりも繰り返し载荷を行ったことによる地盤の密実化の影響の方が大きいものと考えられる。

一方 Case2 では、Case1 と同様に注水実験前に実施した荷重①の変位が最も小さく、荷重回数を重ねるごとに変位が増加していることが確認できる。ここで、(a)と比較して初期荷重の変位が小さいのは、模型構築時の不陸の影響等によって Case1 で見られた初期荷重時の大きな変位増分を取り除くことを目的に、プレロードを実施しているためである。荷重を経るごとに変位が増加している要因としては、地盤内水位が伏び模型開口部まで到達し、水が開口部から管内へと流入する際に、浸透破壊が生じることで地盤材料を巻き込んだためである。変位の増加が顕著な荷重⑩については、極端な管直上の空洞の発生は見られなかったものの目視で盛土内水位の影響による地盤材料の流入が急激に増加したことが確認されたサイクルであり、地盤内空洞が拡大した際の影響の大きさを表している。本ケースにおける変位の増加については、この空洞が形成・拡大し、その上部にゆるみ領域が形成された影響が大きいものと考えられる。

### 3.2.2 地盤反力係数の低下

荷重初期に対する地盤反力係数の低下度合いを試験の進行に対する時刻歴として図 10 に示す。地盤反力係数の算出は、100N 荷重時における荷重圧力を得られた変位で除して算出した。地盤反力係数の低下は、流水の影響よりも盛土内水位の影響の方が顕著であることを確認し、荷重⑨から⑩の段階で地盤反力係数が初期の 1/10 程度となっている。一方で、流水の影響についても地盤反力の低下度は最大で 5 割程度となっており、2 章で示した現地計測の結果と概ね整合している。このことから、伏びに破損が発生した際には、浸透水の影響を受けることで地盤反力係数が小さくなっていくものと考えられ、この影響が拡大していくことで軌道の変状や線路陥没へと繋がるものと推察される。

今回の実験では、単粒度の珪砂を用いて模型地盤を構築しており、伏び模型からの地盤材料の流入が極めて発生しやすい条件下での実験であると考えられる。実際の鉄道盛土での地盤反力係数の低下は、盛土材料の特性の影響を大きく受けるが、条件によっては地盤反力係数が大きく低下し得ることを試験結果は示唆している。

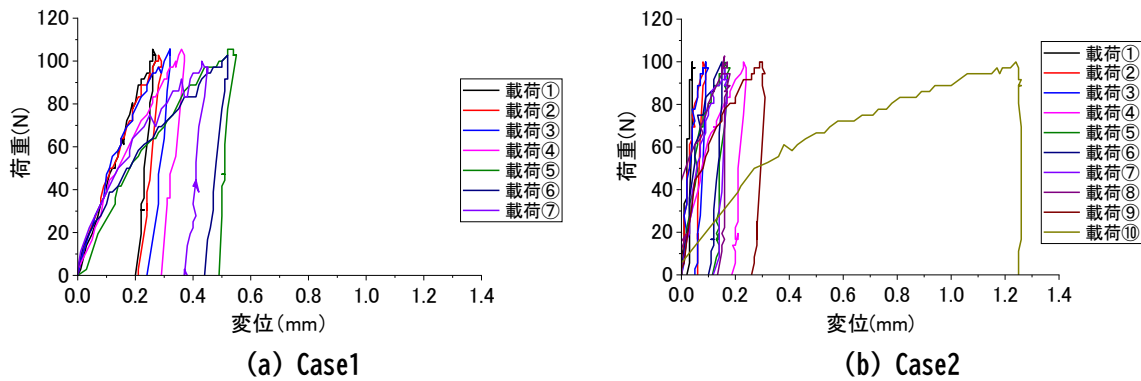


図 9 荷重試験で得られた荷重～変位関係

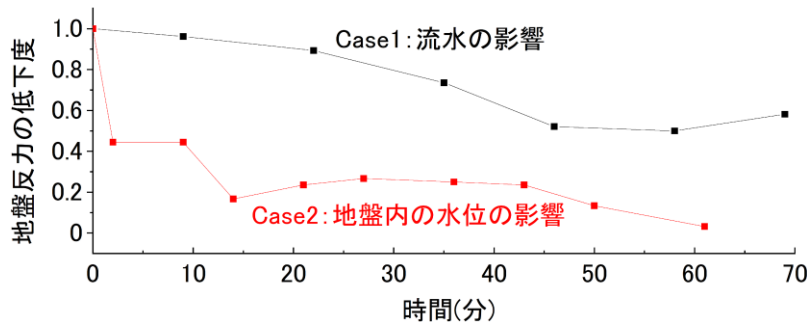


図 10 地盤反力係数の低下

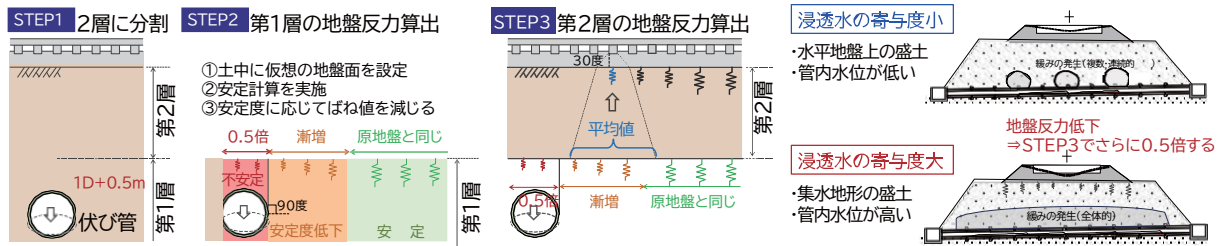


図 11 浸透水の影響を受ける伏びの地盤反力係数低下のモデル化

## 4. 地盤反力係数低下のモデル化と軌道への影響度判定チャートの作成

### 4.1 地盤反力係数低下のモデル化

数値解析では文献1で示した方法をもとに、盛土表面の地盤反力係数比の低減比を算定することとした。浸透水の影響を受ける伏びの地盤反力係数の低下を表現するモデルを図11に示す。以下ではこの低減を算定する各ステップの内容を示す。

- ・STEP1：ゆるみ領域上端を境界として盛土を2層（境界下側：第1層，境界上側：第2層）に区分する。
- ・STEP2：第1層上面の地盤反力係数比（初期の地盤反力係数を1としたときの比率）を、伏び端部を起点に90°の斜面があると仮定して斜面上の基礎理論から求める。
- ・STEP3：第2層上面のある位置にまくらぎを想定し、まくらぎ端部から30°の範囲に応力が伝播するとして、この範囲にある第1層上面の地盤反力係数比を平均化する。

なお、STEP2において、斜面近傍の基礎理論は鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>5)</sup>に示されている、斜面近傍の極限支持力と平地上の極限支持力の比による地盤反力係数の補正係数の算定方法である。文献1ではこれを伏びの破損により緩みが生じる第1層において、伏びに隣接して90°の斜面があるとして適用した。

また、STEP3における30°の根拠としては、文献1において、直接基礎が不完全支持層下面で支持される場合の設計鉛直支持力の算出方法として、直接基礎から30°に広げた範囲で地中応力の分散を考慮していることから設定している。

浸透水の影響は、伏びに対する寄与度を大小で区分し考慮することとした。寄与度小については、主に水平地盤上に立地する盛土で管内水位が管径の半分以下となるような状況を想定している。2章で示した実際の鉄道盛土での試掘調査での小型FWD試験による地盤反力係数低下の結果を踏まえて伏び直上の緩み領域を1D+0.5mの範囲とし、その大きさを伏びのない箇所の地盤反力係数に対して0.5倍とした。また、寄与度大については集水地形に立地する盛土等で管内水が常時多い、あるいは盛土内に地下水位が形成されやすいような状況が該当すると考えられる。鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）土構造物（盛土・切土）<sup>6)</sup>に示される不安定要因になるとされる盛土として、片切片盛、切盛境界、落込勾配点、谷渡り盛土、傾斜地盤上の盛土等でも影響が大きい場合と考えることが望ましい。模型実験の結果から、地表面付近で地盤反力係数も低下が確認されたことを踏まえ、盛土表面での地盤反力係数を0.5倍することとした。

### 4.2 影響度判定チャートの作成

#### 4.2.1 解析条件

伏びの管径、土被りおよび盛土の物性に着目し、軌道への影響を簡易評価するためのチャート（影響度判

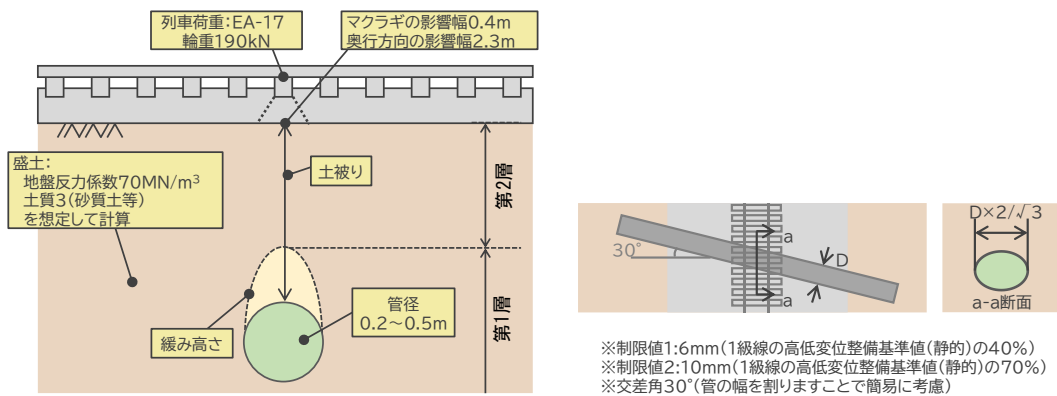


図 12 影響度判定チャートの作成条件

定チャート)を作成した。図 12 に計算の作成条件を示す。列車荷重については EA-17 の最大値とし、継目直下の場合も想定されることから、マクラギに軸重 190kN が作用する条件での計算とした。伏びの径は 0.2~0.5m とし、線路と斜角を有することも想定し、交差角 30° を考慮した。

盛土の物性値については、鉄道盛土においては性能ランク<sup>7)</sup>に応じて材料の種類を規定したうえで、施工時の締固め密度比と地盤反力係数 ( $K_{30}$  値) に管理基準値を設定し、盛土の品質を確保している。そこで盛土の地盤反力係数については、在来線の盛土で一般的に適用される性能ランク II において要求される  $K_{30}$  値 (70MN/m<sup>3</sup>) とした。また、斜面近傍の基礎理論では、すべり面の極限釣合い状態を上界の定理を用いて解くために内部摩擦角  $\phi$  および粘着力  $c$  が必要であるが、その値としては鉄道盛土に用いる土質区分のうち相対的に土質が悪く軌道変位量が大きく算定されると想定される土質 3 (粒度配合の悪い砂礫, 砂質土等) を対象とすることとし、粘着力および内部摩擦角については既設鉄道盛土を対象とした既往の土質 3 の土質試験の平均値とした<sup>8)</sup>。

具体的な手算定順としては、ある土被りおよび管径の条件のもとで、地盤反力係数比算定モデルを活用して算出した地盤反力係数および所定の列車荷重を載荷し軌道沈下量を算出する。なお、繰返し載荷による累積沈下の増加等も考えられるが、本検討では考慮していない。この計算を様々な土被りと管径の条件で実施し、得られた軌道沈下量が限界値以下となる管径および土被りを求めてチャート化した。ここで、軌道沈下量の限界値は 2 段階を設定し、限界値については在来線の整備基準値 (1 級線, 高低変位, 静的値)<sup>9)</sup>である 15mm を基準とし、ここでは限界値①は 6mm, 限界値②は 10mm とした。

#### 4.2.2 作成した影響度判定チャート

作成した影響度判定チャートを浸透水の寄与度の大小に区分して図 13 に示す。管径および土被りを変えて軌道の沈下量を算定し、沈下量の閾値を 6mm および 10mm とし、それぞれを影響小・中・大の 3 区分として整理した。管径や土被りが増加すると、軌道への影響大の範囲が大きくなる傾向となっている。図中には鉄道事業者が有する伏びと、過去に鉄道盛土で陥没災害を招いた伏びについて示している。浸透水の寄与度が大きい場合のチャートではほとんどの陥没事例が軌道への影響大と判定された範囲で発生しており、作成したチャートが過去の陥没災害を捕捉できていることがわかる。一方、浸透水の寄与度が小さい場合のチャートでは閾値となる線が上部にシフトしており、影響小・中に含まれる事業者が有する伏びが伏びの全数量に対してそれぞれ 10%・17%含まれることを確認した。

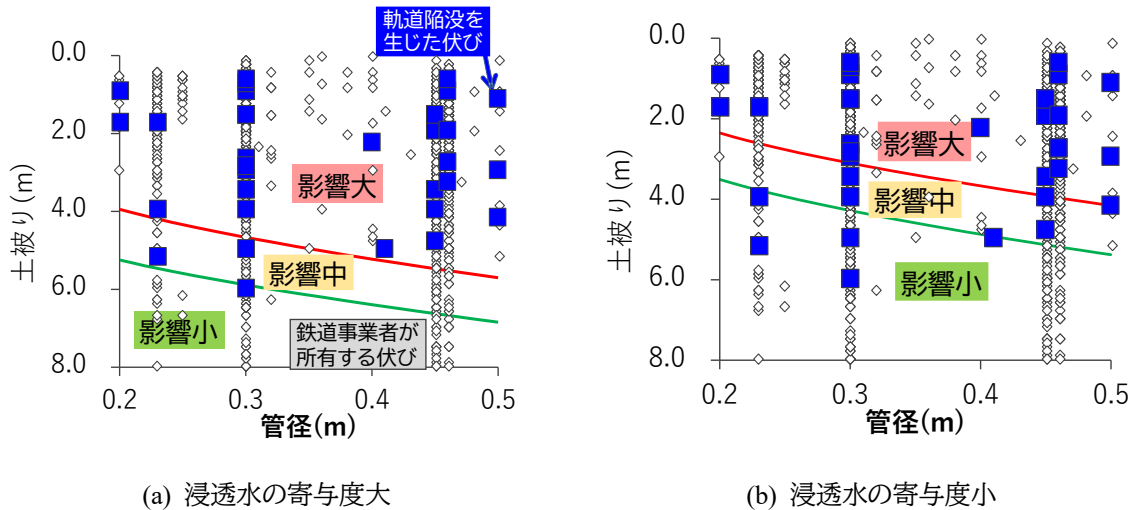


図 13 伏びが軌道に及ぼす影響度判定チャート

## 5. まとめ

本研究では、損傷を有する伏びへの浸透水が与える影響度を把握するとともに、これに起因する軌道の沈下予測に活用する地盤反力低下のモデル化を行い、軌道への影響度としてチャートを作成した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 陶管を有する鉄道盛土の試掘調査を行い、ひび割れや管周辺の空隙が存在するとともに、周辺地盤から細粒分が流出し、地盤反力が低下していることが確認された。
- 2) 模型実験によって、管内の流水や周辺地盤の地下水の上昇による土砂が管内に流出し、地表面の地盤反力が初期の半分程度にまで低下することがわかった。
- 3) 浸透水の影響度の大小に応じ、伏びの損傷が軌道沈下に及ぼす影響度を算定し、影響度を 3 段階に区分したチャートを作成した。

## 文 献

- 1) 大原勇, 仲山貴司, 三輪陽彦, 松丸貴樹, 杉山健太, 池島傑, 井上太郎: 伏び管の破損が鉄道盛土路盤部の地盤反力特性に及ぼす影響の評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.81, No.25, 24-00240, 2025
- 2) 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊: 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.349-361, 2010
- 3) 桑野玲子, 大原勇: 路面下空洞の生成・拡大メカニズムと陥没危険度の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.4, pp.307-317, 2021
- 4) 松丸貴樹, 佐藤武斗, 森裕昭, 天野友貴, 竹川遊大: 鉄道盛土内に埋設された小口径管からの土砂流出を模擬した降雨浸透・注水試験, 第 59 回地盤工学研究発表会講演概要集, 25-9-4-03, 2024
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 丸善出版, 2012
- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)土構造物(盛土・切土), 丸善出版, 2007
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物), 丸善出版, 2007
- 8) 富田佳孝, 佐藤武斗, 松丸貴樹, 高木翔太: 既設盛土の耐震診断における盛土材料の簡易強度評価法, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.3, pp.317-327, 2024
- 9) 鉄道総合技術研究所: 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007