

# 鉄道盛土における 埋設管損傷時の軌道影響評価に関する研究

大原 勇<sup>1</sup>・三輪 陽彦<sup>2</sup>・仲山 貴司<sup>3</sup>・松丸 貴樹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: ohara.yu.98@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: miwa.akihiko.53@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: matsumaru.takaki.35@rtri.or.jp

鉄道盛土下には、主に排水を目的とした横断埋設管が設置されており、埋設管に破損が生じると周囲の地盤の緩みや軌道変位に繋がる可能性も考えられる。そのため、鉄道事業者による伏び管の定期的な検査により安全性が確保されているものの、伏び管の数が膨大であることなどから、検査には多大な労力を要している。そこで本研究では、伏び管の検査の省力化に資する知見を得ることを目的に、伏び管の破損を模擬した降下床実験の結果に基づき、伏び管破損時の地表面の地盤反力係数比を算定する手法を構築したうえで、伏び管の管径および深度をもとに軌道への影響を簡易評価できる影響度判定チャートの試案を作成した。前者については、伏び管の破損を模擬した降下床実験結果と概ね一致することを確認した。後者については、管径が大きいほど、あるいは深度が浅いほど軌道への影響が大きくなる傾向が確認された。

**Key Words:** trapdoor tests, ground reaction coefficient, underground pipe

## 1. はじめに

鉄道盛土下には、主に排水を目的とした横断埋設管(以下、伏び管)が数多く設置されている。それらの多くは路線建設時に設置されたものと推測され、鉄道事業者による点検で劣化の進行等による破損事例(図-1)が報告されている(例えば1,2)。

ここで、図-2に示すように、伏び管に破損が生じると周囲の地盤に緩みが進展し、軌道変位に繋がる可能性も考えられる。そのため、従来鉄道事業者により伏び管の定期的な検査・補修が実施され、安全性が確保されてきている。しかし、伏び管の数が膨大であること、周囲の草木により位置の特定に時間を要することなどから、検査には多大な労力を要している。

多数の伏び管を安全かつ効率的に維持管理するためには、伏び管の破損による軌道への影響を定量的に評価し、影響の程度を勘案した検査を行うことが重要と考えられるが、その定量的な影響評価手法は確立されていない。



図-1 伏び管の破損例

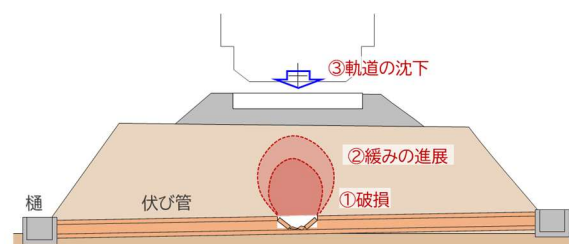


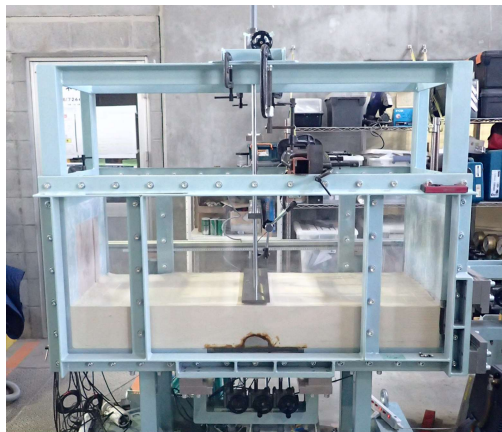
図-2 伏び管の破損状況(模式図)

そこで本研究では、伏び管の検査の省力化に資する知見を得ることを目的に、破損を模擬した降下床実験の結果に基づき伏び管破損時の地表面の地盤反力係数比を算定する手法を構築した。そのうえで、この算定手法の結果を用いて、伏び管の管径および深度をもとに軌道への影響を簡易評価できる影響度判定チャートの試案を作成した。

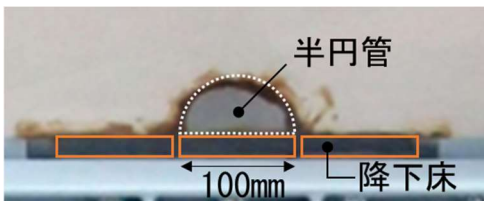
## 2. 降下床実験

筆者らは伏び管破損時における地表面の地盤反力係数の把握を目的として、降下床実験を実施している<sup>3)</sup>。

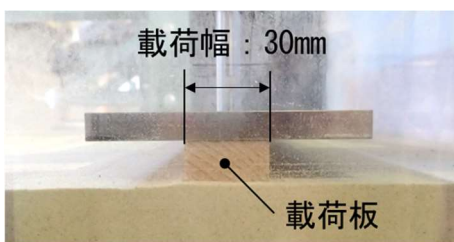
降下床実験とは、土槽内に模型地盤を構築したのち土槽底面の一部（降下床）を静的に降下させるものであり、従来、トンネル掘削による周辺地山の緩みの模擬を目的として広く実施されてきた<sup>例えは 4)</sup>。筆者らはこの実験を応用し、半円管を降下することで伏び管の破損直後の状態を模擬したのち、地表面の地盤反力係数を測定した。



(a) 全体（載荷時）



(b) 降下床付近



(c) 載荷板付近（載荷時）

図-3 実験装置

図-3に実験装置の写真を示す。土槽底部に設けられた3枚の降下床のうち、中央の1枚には伏び管を模した半円管（直径 100mm）を取り付けた。また、載荷にあたっては幅 30mm の載荷板を使用した。具体的な実験手順としては、図-4 に示す通り、まず半円管を 5mm まで段階的に降下させることで地盤に緩みを発生させ、その後、半円管の直上からの水平距離が 0mm, 200mm, 500mm の3箇所において地表面の平板載荷試験を実施した。実験ケースは土被りをパラメータとした計 4 ケース（1D, 2D, 3D, 4.9D）である。模型地盤は乾燥珪砂7号を相対密度 70%を目標に突き固めることによって作成した。

本研究では、図-5に示す平板載荷時の荷重-変位曲線を整理することで図-6を得た。具体的な計算方法は以下の通りである。

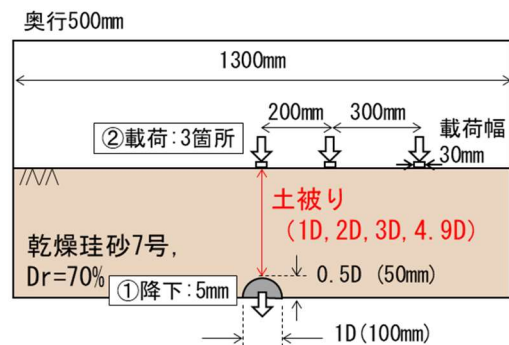


図-4 実験手順および実験ケース

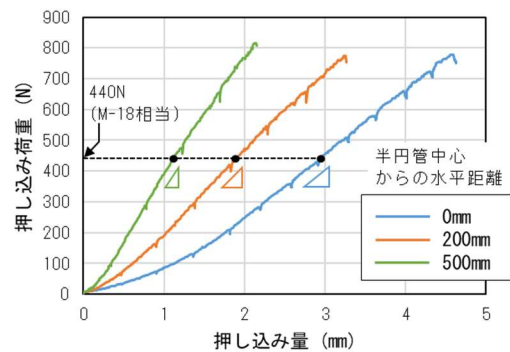


図-5 荷重-変位関係（平板載荷，土被り 2D）

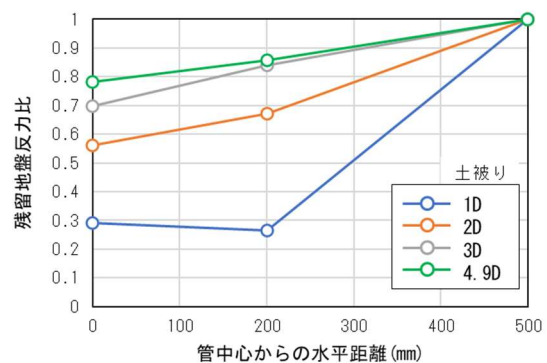


図-6 地表面の地盤反力係数比の分布

- [1] 荷重-変位曲線において、押し込み荷重 440N における接線剛性として地盤反力係数を求める。
- [2] 半円管からの水平距離 500mm を不動点とし、水平距離 500mm における地盤反力係数に対する比率として地盤反力係数比を計算する。
- ここで[1]について、押し込み荷重 440N は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」<sup>9)</sup>において、電車または内燃動車の荷重における標準列車荷重の一例として示されている M-18 荷重の輪重 180kN を実験スケールに換算することにより求めた。

### 3. 地盤反力比算定モデル

#### (1) 計算手順

本研究では、伏び管破損時の地盤反力を図-7に示すモデル（以下、地盤反力比算定モデル）を用いて評価した。具体的な計算手順は以下の通りである。

- [1] 伏び管の天端から管径 1D 分上方を境界として地盤を 2 層（境界上側：第 1 層，境界下側：第 2 層）に分ける。ここで、第 2 層は伏び管の破損に伴い緩みが生じる領域，第 1 層は緩みが生じない領域と仮定する。
- [2] 第 2 層上面の地盤反力係数比（原地盤の地盤反力係数を 1 としたときの比率）の分布を、伏び管端部を起点に 90° の斜面があると仮定して斜面上の基礎の考え方<sup>9)</sup>から求める。なお、伏び管直上部の地盤反力係数比は 0 とする。
- [3] 第 1 層上面のある位置に枕木を想定し、枕木端部から 30° で広げた範囲に応力が伝播すると考える。第 2 層上面のうち枕木の応力の伝播範囲に含まれる部分の地盤反力係数比を平均化し，第 2 層の地盤反力係数比  $k_2$  とする。第 1 層の地盤反力係数比  $k_1$  については、緩みが生じない領域という仮定から 1 とする。
- [4] 以下の式に示すように、層厚に応じて  $k_1$ 、 $k_2$  を重みづけして足し合わせることで、地表面の地盤反力係数比  $k$  を求める。

$$k = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (1)$$

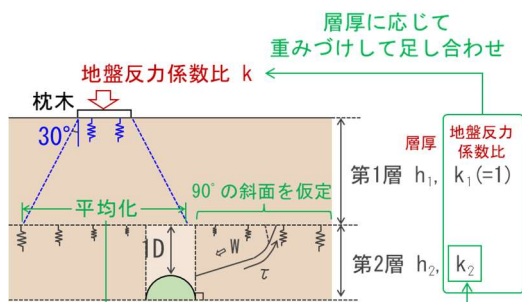


図-7 地盤反力算定モデル

- [5] 様々な枕木位置で[3]、[4]を行い、第 1 層上面の地盤反力係数比  $k$  の分布を得る。

ここで上記 [2] について補足する。日下部<sup>9)</sup>は、斜面近傍の直接基礎の支持力を上界値計算を用いて求める方法を示している。本研究では斜面地盤を直接対象とはしていないものの、伏び管の破損により緩みが生じる第 2 層において、伏び管直上の地盤反力係数を 0 とし、そこに隣接して伏び管端部を起点に 90° の斜面があると見立て、日下部の方法を適用した。

#### (2) 降下床実験との比較

上述の手順に沿って地盤反力係数比の分布を求め、降下床実験の結果<sup>3)</sup>と比較した。計算条件は表-1 に示す通りであり、全体的に降下床実験に合わせた物性値としている。なお奥行方向の影響長さについては、降下床実験が奥行方向に一樣な条件であったことを踏まえ、十分に大きな値とすることで実験と同様の 2 次元条件とした。

図-8 に地表面の地盤反力係数比を実験と計算で比較した結果を示す。土被り 2D 以上のケースにおいて計算値と実験値が概ね一致していることが分かる。また、土被り 1D の場合は管中心からの水平距離 200mm において計算値と実験値にやや乖離が見られる。この原因としては、土被りが 1D と比較的小さく十分なアーチ効果が作用しなかったことが考えられる。

表-1 計算条件

物性	単位	値	備考
枕木幅	m	0.03	降下床実験の載荷幅
奥行方向の影響長さ	m	-	十分に大きな値
管径	m	0.10	降下床実験の半円管の径
土被り	m	0.1, 0.2, 0.3, 0.49	降下床実験の土被り
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	17.0	降下床実験の 模型地盤の物性
粘着力	kN/m <sup>2</sup>	0	
内部摩擦角	°	34	

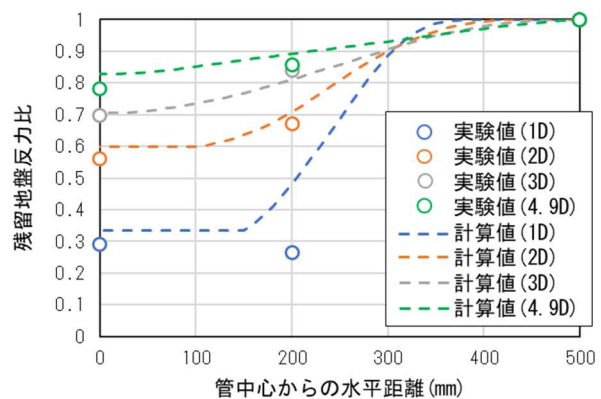


図-8 地表面の地盤反力係数比の分布



#### 4. 影響度判定チャート

##### (1) 作成手順

伏び管の管径と深度に着目し、軌道への影響を簡易評価するためのチャート（以下、影響度判定チャート）の試案を作成した。影響度判定チャートの具体的な作成手順は以下の通りである。

- [1] 地盤反力比算定モデルで算出した地盤反力係数および所定の列車荷重をもとに、図-9 に示す構造解析モデル（梁ばねモデル）を用いて列車荷重による軌道沈下量を算出する。
- [2] 様々な管径と深度のもとで[1]を実施し、管径および深度と軌道沈下量との関係を得る。
- [3] [2]で得られた関係をもとに、軌道沈下量が事前に定めた限界値となるような管径および深度を得る。
- [4] [3]をもとに危険度間の境界線を引く。

##### (2) 事例との比較

筆者らは過去に伏び管の損傷が確認された鉄道盛土を対象に地盤調査を実施している<sup>7)</sup>。本研究ではこの調査で得られた土質条件をもとに、上記の方法に則り影響度判定チャートを作成した。計算の入力条件は表-2に示す

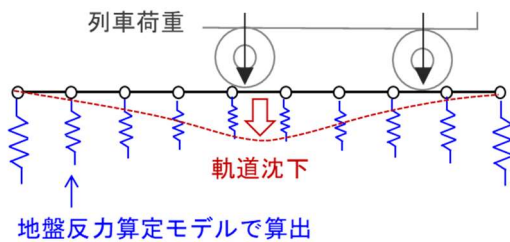


図-9 軌道沈下量の算出

表-2 計算条件

(a) 地盤反力係数比の算定

物性	単位	値	備考
枕木幅	m	0.24	
道床厚	m	0.2	
奥行方向の影響長さ	m	-	十分に大きな値
管径	m	0.2-0.5	パラメータ
土被り	m	0-3.0	パラメータ
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	15.65	現地試料を対象に
粘着力	kN/m <sup>2</sup>	19.50	別途実施した
内部摩擦角	°	34.38	土質試験の結果より

(b) 軌道沈下量の算定

物性	単位	値	備考
地盤反力係数(原地盤)	kN/m <sup>3</sup>	70000	性能ランク II <sup>9)</sup> 相当
輪重	kN	180	M-18 <sup>9)</sup> 相当

通りである。なお、奥行方向の影響長さは、実際の伏び管の場合は破損の軸方向の延長は有限であるものの、ここでは安全側の検討として十分に大きな値とした。

また、鉄道盛土の施工においては、性能ランクに応じて材料の種類を規定したうえで、施工時の締固め度と地盤の剛性に管理基準値を設定し、盛土の品質を確保している。そこで原地盤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<sup>9)</sup>において要求される K<sub>30</sub> 値 (70000kN/m<sup>3</sup>) とした。輪重については、降下床実験と同様に M-18 を想定して 180kN とした。

また、計算の簡単化のため、レール剛性については無考慮（安全側）とした。軌道沈下量の限界値を2段階設定し、限界値①は在来線整備基準値（1級線、高低変位、静的値）<sup>9)</sup>である 15mm の 0.5 倍として 7.5mm、限界値②は 0.7 倍として 10.5mm とした。

図-10 に作成した影響度判定チャートを示す。管径が大きいくほど、あるいは深度が浅いくほど軌道への影響が大きくなる傾向が分かる。一方、道路陥没の分野では、従来路面下空洞の短軸方向の長さ（空洞を鉛直方向に投影したときの縦断長さと横断長さのうち小さい方）と深度に着目した陥没危険度の評価が行われている<sup>10)</sup>。短軸方向の長さが大きいくほど、あるいは深度が浅いくほど陥没危険度が高い、としており、本研究の影響度判定チャートはこれと類似の傾向である。

また、図-10 には参考までに現地で確認された損傷した埋設管の事例をプロットしている。事例は「危険度：小」の領域にプロットされているが、このことは、現地の調査で伏び管の周辺地盤に明確な緩みが確認されなかったことと調和的である。

#### 5. まとめ

本研究では、伏び管の破損を模擬した降下床実験の結果をもとに、伏び管破損時の地表面の地盤反力係数を算定する手法を構築したうえで、伏び管の管径および深度

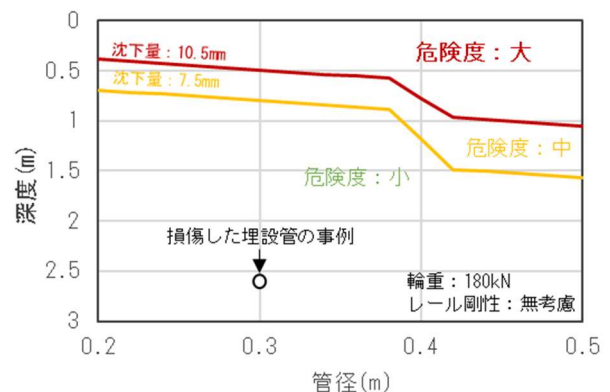


図-10 影響度判定チャート（案）

をもとに軌道への影響を簡易評価できる影響度判定チャートを試作した。得られた成果を以下に示す。

- [1] 伏び管破損時における地表面の地盤反力係数の分布を算定可能なモデルを作成し、伏び管の破損を模擬した降下床実験結果と概ね一致することを確認した。
- [2] 地盤反力比算定モデルをもとに、伏び管の管径と深度から軌道への影響度合いを簡易的に予測する影響度判定チャートを試作した。
- [3] 影響度判定チャートは、管径が大きいほど、あるいは深度が浅いほど軌道への影響が大きくなる傾向を示しており、道路陥没における陥没危険度評価と同様の傾向であった。
- [3] 影響度判定チャートに現地で確認された損傷した埋設管の事例をプロットしたところ、「危険度：小」の領域にプロットされ、現地の調査結果と調和的であることを確認した。
- [4] 影響度判定チャートを用いることで、埋設管の検査に濃淡を付けることが可能になり、検査の効率化につながる可能性があると考えられる。

ただし、今回提案した影響度判定チャートは、限界値の設定方法に議論の余地があるほか、盛土材料や締固め条件によって影響度判定チャートは異なると考えられることから、更なる検討が必要である。今後、粘土系の材料や含水させた材料を用いた降下床実験を実施するほか、現地試験や実物大試験により特に「危険度：中、大」の条件に着目して影響度判定チャートの検証を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 山田英機, 山本誠: 線路下横断伏び弱点箇所抽出基準の作成, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 212-214, 1998.
- 2) 田中智也, 浅倉朋訓, 山本和弘: 鉄道土木新常識 JR 西日本 線路下構造物(伏び)の維持管理, 新線路, Vol. 63, No. 9, pp. 51-53, 2009.
- 3) 大原勇, 仲山貴司, 三輪陽彦: 埋設管損傷時の地表面影響に関する降下床実験, 第 57 回地盤工学研究発表会, 2022.
- 4) 村山朔郎, 松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第187号, pp. 95-108, 1971.
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, pp. 34, 平成 16 年 4 月
- 6) 日下部治: 斜面上直接基礎の支持力評価に関する計算, 土と基礎, No. 325, 1985.
- 7) 杉山健太, 大原勇, 讃岐賢太, 松丸貴樹, 仲山貴司, 池島傑, 井上太郎: 鉄道盛土を横断する伏び管の実態調査及び地盤調査, 第 77 回土木学会年次学術講演会, 2022. (投稿中)
- 8) 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, pp. 46, 平成 19 年 1 月
- 9) 公益財団法人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, pp. 20, 平成 19 年 1 月
- 10) 国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所: 空洞判定実施方針(案), 2010.

(2022. 8. 26 受付)

## A STUDY ON EVALUATION OF THE EFFECT OF DAMAGED UNDERGROUND PIPE ON TRACK IN RAILROAD EMBANKMENTS

Yu OHARA, Akihiko MIWA, Takashi NAKAYAMA and Takaki MATSUMARU

Buried pipes are installed under railroad embankments mainly for drainage purposes and the damage to the underground pipe could cause loosening of the surrounding ground and track displacement. Although safety is ensured by periodic inspections by railway companies, these inspections are labor-intensive due to the huge number of underground pipes. In this study, we developed a method to calculate the coefficient of ground reaction force on the ground surface at the time of pipe failure based on the results of trapdoor tests simulating pipe failure, and developed an impact assessment chart, which can roughly evaluate the impact on the track displacement based on the pipe diameter and depth. The results of the former were found to be in good agreement with the results of trapdoor tests. The latter confirmed the effect on the track tends to increase with the increase in the pipe diameter or the decrease in the depth.