

伏び管の破損に伴う軌道への簡易な影響度判定手法

仲山 貴司* 大原 勇* 三輪 陽彦* 松丸 貴樹**

Method for Determining the Degree of Impact on the Track
due to the Damage of a Submerged Pipe in a Railway Embankment

Takashi NAKAYAMA Yu OHARA Akihiko MIWA Takaki MATSUMARU

When small-diameter pipes buried in railway embankments are damaged, there is concern that the surrounding ground may loosen, leading to a decrease in ground reaction forces and track settlement. In this study, we calculated the distribution of subgrade reaction coefficients on the roadbed surface when a pipe is damaged, and created an impact assessment chart that can easily determine the impact on the track based on the depth and diameter of the damaged pipe. The validity of the calculation method for the distribution of subgrade reaction coefficients has been verified by means of model tests and field tests.

キーワード：維持管理, 伏び, 盛土

1. はじめに

鉄道の盛土には、導水を目的とした小口径の横断管（以下、伏び管）が埋設されているが、これらは主に路線建設時に埋設されたものであり、長い経年を有するものが多く、また多くの伏び管は陶管から構成されている^{1) 2) 3)}。伏び管が経年に伴い破損すると、周囲の地盤に緩みが生じ、図1のような路盤面の地盤反力の低下および軌道の沈下につながる懸念されるため、定期的な検査・補修が日々実施されている。しかしながら、数量が多いことに加え、盛土法面の草木の繁茂（図2）が位置の特定を難航させることから、全数の伏び管の検

査を一巡させるために膨大な時間を要している。

そこで本研究では、伏び管の検査の優先度や頻度などを検討するためのツールとして、伏び管の深度と管径を図中にプロットすることで、軌道への影響度合いを簡易に判断できる影響度判定チャートを作成した（図3）。

このチャートは、伏び管に関する種々の条件を変更した路盤面の地盤反力係数分布を計算で求め、列車荷重を載荷したときの沈下量を整理して作成したものであり、地盤反力係数分布計算方法の妥当性については、室内実験および現地試験で検証している。

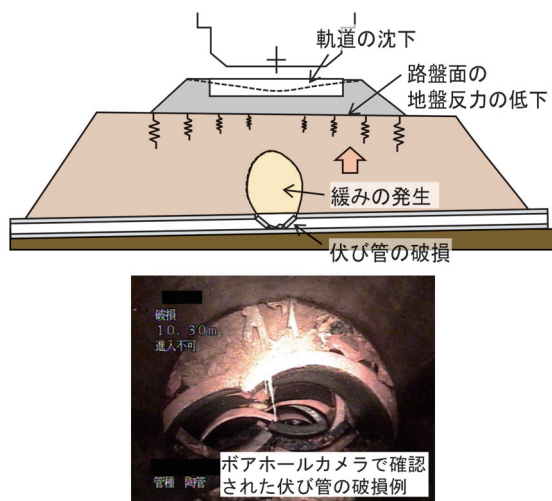
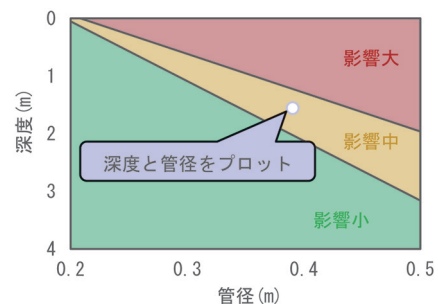


図1 伏び管の破損時に懸念される軌道への影響



図2 伏び管の位置特定を難航させる草木の繁茂



※小、中の境界：軌道の沈下量6mm（整備基準値の40%）
※中、大の境界：軌道の沈下量10mm（整備基準値の70%）

図3 伏び管の影響度判定チャート

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 構造物技術研究部 基礎・土構造物研究室

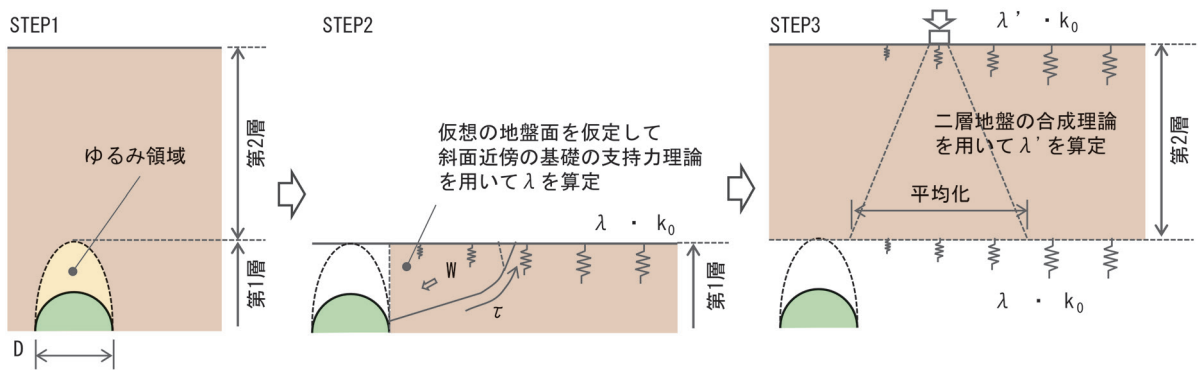


図4 地盤反力係数の計算方法

2. 路盤面の地盤反力係数の計算方法

2.1 計算方法の仮定

本研究では、伏び管破損時の路盤面の地盤反力係数の分布の計算に図4の方法を適用できると仮定した。

具体的には、STEP1として、ゆるみ領域上端を境界として地盤を2層（境界下側：第1層，境界上側：第2層）に分ける。次にSTEP2として、第1層上面の地盤反力係数比 λ （原地盤の地盤反力係数 k_0 を1としたときの比率）の分布を、伏び管端部を起点に仮想地盤面があると仮定した安定計算結果より求める。最後にSTEP3として、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° で広げた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し、路盤面の地盤反力係数比 λ' を求める⁴⁾。

STEP2については、鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）⁵⁾に示されている斜面近傍の基礎の設計に関する計算方法^{6) 7)}を応用している。これは、斜面近傍の極限支持力が平地上よりも小さくなることに着目し、斜面近傍の極限支持力と水平地盤上の極限支持力の比を求め、これを地盤反力係数の補正係数とする経験則である。

この計算方法は、これまでにも線路下横断工事における簡易工事桁の設計⁸⁾や、トンネル同士が極めて近接する場合のシミュレーション解析手法⁹⁾のために構築した方法を応用したものである。いずれも地盤掘削時の地盤反力係数分布を求めるものであるが、本研究では、伏び管破損時においても地盤反力係数の低下は同じメカニズムで生じると考え、適用を試みた。

2.2 模型実験（降下床実験）との比較検証

本研究ではまず、降下床実験と呼ばれる模型実験によって算出方法の妥当性を検証した。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

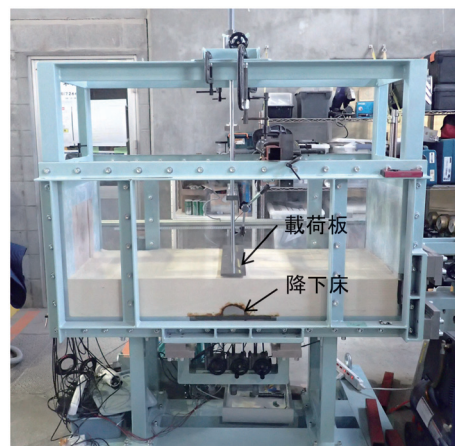


図5 降下床実験装置

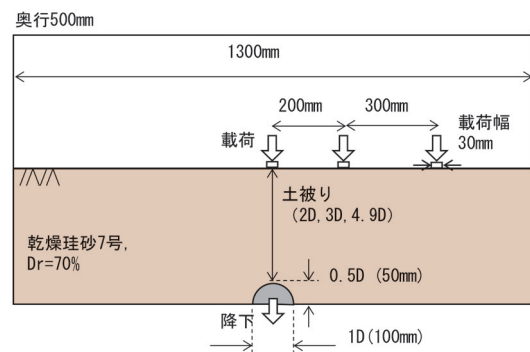


図6 実験条件

れてきた¹⁰⁾。本研究では、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、地表面を平板载荷することで地盤反力係数を測定した。

図5に実験装置の写真、図6に実験条件を示す。地盤には乾燥状態の珪砂7号を用い、相対密度70%を目標に突き固めることによって作成しており、土被りを変えた3ケースの実験を実施した。

管中心からの水平距離と地盤反力係数比の関係を図7に示す。同図には、地表面の平板载荷から得られた実験結果と、前述した算出方法を用いた計算結果を合わせて

示しており、これらが概ね一致していることがわかる。

この結果から、本研究では、伏び管破損時の路盤面の地盤反力を算定する場合においても、前述した算出方法が適用できる可能性は高いと考え、次節の現地試験との比較検証を実施することとした。

2.3 現地試験との比較検証

現地試験では、ボアホールカメラにて損傷が確認された伏び管が存在する3地点で実施した。表面波探査で盛土内の状況を把握するとともに、小型FWD試験で路盤面の地盤反力係数の分布を測定した。このうち、盛土のせん断波速度の速い2地点では、伏び管直上の路盤面に地盤反力係数の低下はみられず、これら2地点よりせん断波速度が遅い、残りの1地点において地盤反力係数の低下がみられた。これらの調査結果の詳細（盛土のせん

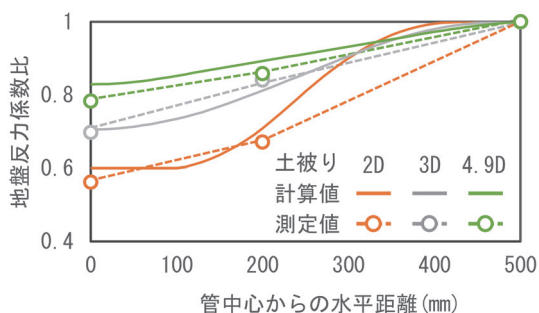


図7 地表面の地盤反力係数比の分布

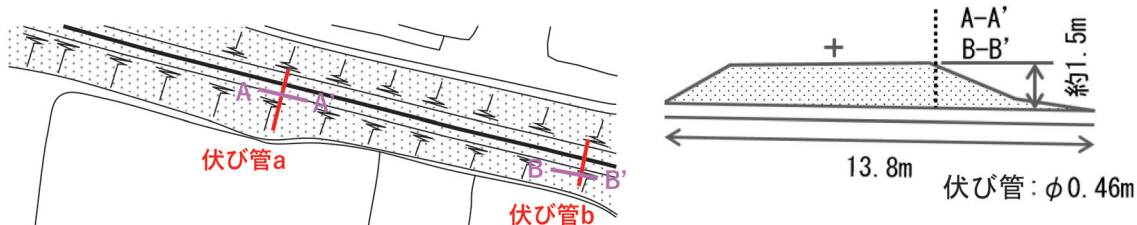


図8 伏び管の埋設位置（地点1）

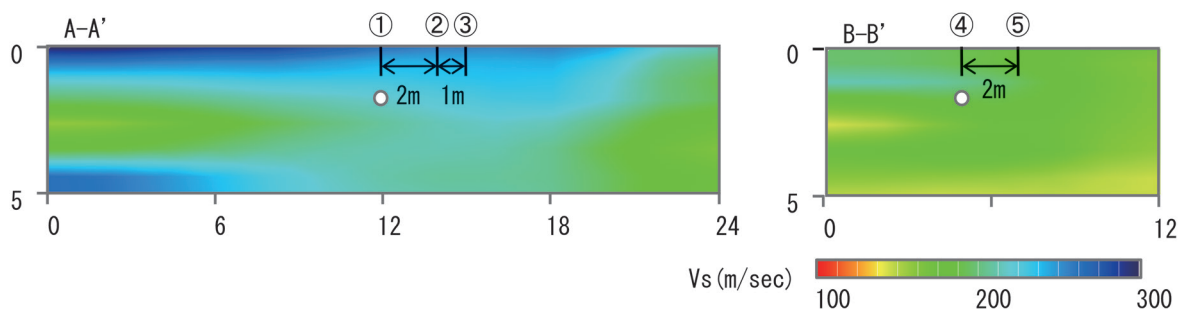


図9 表面波探査結果（地点1）

表1 小型FWD試験結果（地点1）

調査位置	①	②	③	④	⑤
K30 値 (MN/m ³)	69.0	71.1	67.4	80.7	81.0

断波速度の速い2地点のうちの1地点（地点1）、せん断波速度が遅い地点（地点2）と、前述した算出方法の検証結果を以降に示す。

2.3.1 現地試験結果（地点1）

近傍に伏び管が2本あり（図8）、それぞれに対して表面波探査、小型FWD試験を実施した。

図9に表面波探査の結果を示す。表面波探査は、伏び管直上を中心として横断方向に側線（図8中のA-A'、B-B'）を設けて実施した。この結果から、地表面にはせん断波速度が速い層が分布していることがわかる。

表1に小型FWD試験の結果を示す。伏び管の直上と周辺で明確な違いは確認されなかった。K30換算値はおおむね70MN/m³以上であり、鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）¹¹で要求されるK30換算値を満足している結果であった。

2.3.2 現地試験結果（地点2）

地点2にも伏び管が2本あり、伏び管aは土被りが大きい、陶管Bは土被りが小さい（図10）。なお、当該箇所は廃線区間（軌道、地上設備が撤去され、伏び管は残置されている状態）であった。

図11に表面波探査の結果を示す。この結果から、地表面にはせん断波速度が遅い層が分布しており、伏び管bはその層内に位置していることがわかる。

表2に小型FWD試験の結果を示す。K30換算値は伏び管b直上で小さい値を示しており、測定位置③と比較

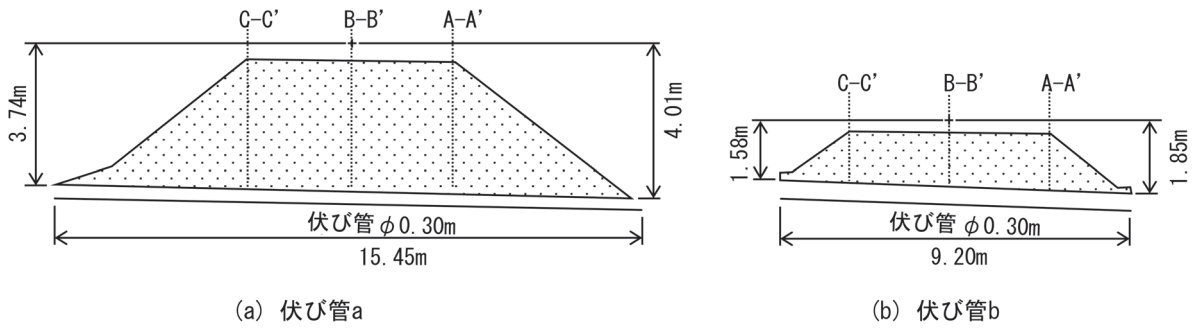


図 10 伏び管の埋設位置 (地点 2)

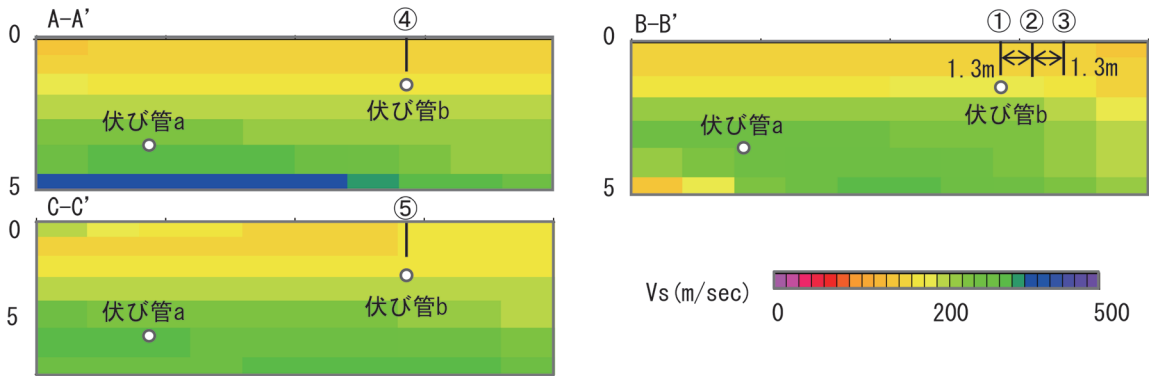


図 11 地表面探査結果 (地点 2)

表 2 小型 FWD 試験結果 (地点 2)

調査位置	①	②	③	④	⑤
K30 値 (MN/m ³)	30.3	84.6	104.5	167.1	176.7

すると約 70% 低下していることが確認された。

2.3.3 計算値との比較

図 12 に、地盤反力係数の低下がみられた現地試験 (地点 2 の伏び管 b) について、現地試験結果と前述した計算方法による計算値の関係を示す。この図から、計算値は 1~2 割ほど小さな値を示していることがわかる。なお、地盤反力係数の低下がみられなかったその他の現地試験結果についても、伏び管の直上では周辺地盤と比べて 2 割程度の地盤反力係数比となる計算結果であった。これらの比較から、改良の余地は残るものの、図 4 の計算方法は実際の地盤反力係数の低下を安全側に計算できると判断できる結果が得られた。

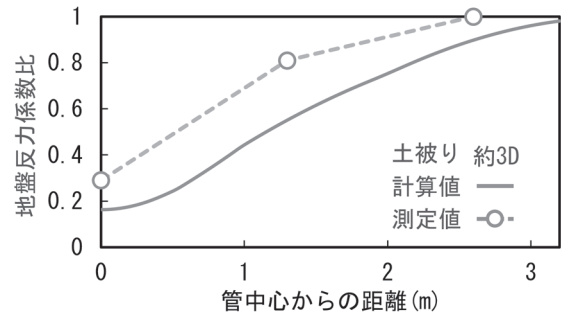


図 12 現地試験結果 (地点 2) と計算値の関係

3. 影響度判定チャートの作成

図 13 には、影響度判定チャートの作成のため、パラメータスタディの基本条件を示す。列車荷重については EA-17 とし、継目直下の場合も想定されることから、レール剛性については無考慮とした。伏び管の径は 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。なお、伏び管軸方向の損傷長さは有限

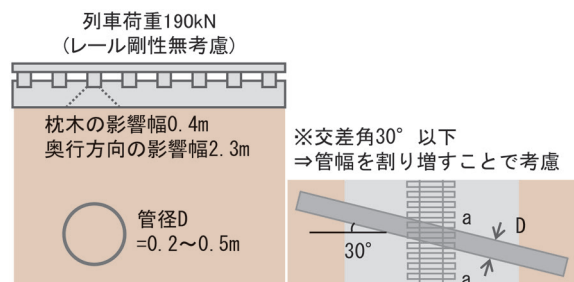


図 13 基本条件

表3 影響度判定チャートを作成した土質区分

土の種類	群分類	γ_t (kN/m ³)
土質3 (粒度配合の悪い砂礫, 砂質土等)	GF, GF-S, GFS SF, SF-G, SFG	16
土質4 (粘性土等)	ML, CL, MH, CH OL, OH, OV, Pt, Mk VL, VH1, VH2	14

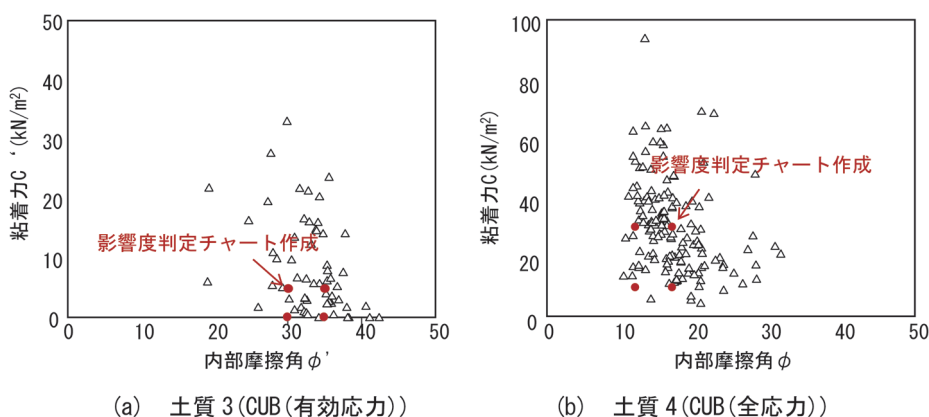
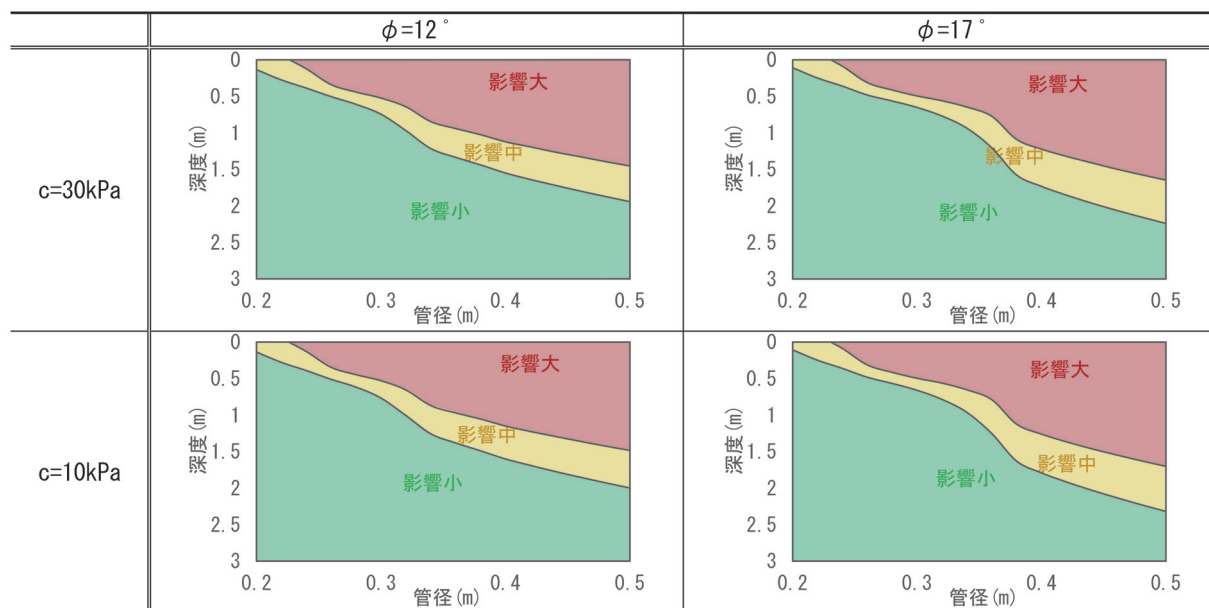


図14 内部摩擦角および粘着力の設定

表4 影響度判定チャートの一例 (土質4)



であると考えられるものの、計算では全損した場合を想定した。軌道沈下量の閾値は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)¹⁰⁾である15mmの0.4倍として6mm, 限界値②は0.7倍として10mmとした。

地盤物性値について、鉄道盛土においては、性能ランクに応じて材料の種類を規定したうえで、施工時の締固め密度比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において要求されるK30値(70MN/m³)とした。また、単位体積重量については、安全側に表3に示す土質3, 土質4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、対象が既設盛土であることを考慮し、それぞれの土質から構成される既設盛土材料の室内試験結果(図14)から概ね平均値を下回る値を複数設定した。

表4に地盤条件ごとに作成した影響度判定チャートの一例を示す。なお、限界値①未満を影響小, 限界値①

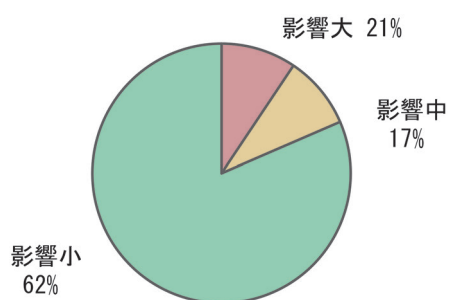


図 15 文献 3 の伏び管のデータに対する各影響の割合

以上かつ限界値②未満を影響中、限界値②以上を影響大として図化した。いずれの場合も管径が大きいほど、あるいは深度が浅いほど軌道への影響が大きくなる。いずれの場合も粘着力と内部摩擦角が小さい方が影響大の領域が大きくなるのがわかる。

また、実際には盛土の粘着力と内部摩擦角が不明である場合が多いため、表 4 に示したチャートの影響大、影響中を全て包含するように、統合したチャートを作成した (図 3)。

なお、地盤反力係数比の算定方法において、部分的な破損である場合についても安全側の評価となっている。そのため、過度に安全側となっている可能性も示唆されたため、文献 3 に示される JR 九州管内の伏び管のデータ (8730 箇所) をプロットし、各影響度合いを整理した (図 15)。この結果、影響大の割合が 21%、影響中が 17%、影響小が 62% と絞り込みができていることを確認している。

4. まとめ

本研究で、得られた成果を以下に示す。

- (1) 模型実験の比較検証を通して、伏び管損傷時の路盤面の地盤反力係数分布の計算に、既往研究の計算方法が適用できる可能性が高いことを確認した。
- (2) 現地にて地表面探査と小型 FWD 試験を実施し、実際の地盤反力係数の分布を把握するとともに、計算方法はこの分布も安全側に計算可能であることを明らかにした。
- (3) 伏び管の検査の優先度や頻度などを検討するためのツールとして、伏び管に関する種々の条件を変更したパラメータスタディを実施し、軌道への影響度を簡易に判断できるチャートを作成した。

ただし、影響度判定チャートは、使用している計算方法が 2 割程度の安全側の結果が算出されるものであることや、計算条件などが安全側の設定となっていること

から、更に深度化することでより精度の高い影響度合いを推定できる余地が残される。また、現場での使用においては影響範囲の境界線を直線で示すほうが実用的であるため、現在チャートの修正に向けて取り組んでいる。

さらに、本チャートはあくまでも損傷直後の影響度合いを表したものであり、損傷後に長期的な降雨による影響を受けて管内への土砂の吸出しがある場合には影響度合いが変化する可能性がある。現在、これについても取り組んでいるため、成果が得られ次第、今後報告していく予定である。

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) 鈴木紀夫: 伏びの管理, 新線路, Vol.56, No.4, pp.26-28, 2002
- 3) 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, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-328, 2022
- 4) 大原勇, 仲山貴司: 鉄道盛土内の伏び管損傷時の軌道への影響判定手法, JREA, Vol.66, No.10, pp.47374-47377, 2023
- 5) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 丸善出版, 2012
- 6) 木村孟, 藤井齊昭, 斎藤邦夫, 日下部治: 砂中の浅基礎の支持力に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.319, pp.97-104, 1982
- 7) 毛戸秀幸, 前田良刀, 上原精治, 日下部治: 斜面上直接基礎の実用的な支持力評価法の提案, 土木学会論文集, Vol.403, pp.147-156, 1989
- 8) 仲山貴司, 板谷創平: 線路下横断工事における簡易工事桁の構造解析手法, 施設研究ニュース No.353, pp.3-4, 2020
- 9) 仲山貴司, 三輪陽彦, 清水達貴: トンネル同士が極近接する工事の影響予測解析法, 鉄道施設協会誌, Vol.62, No.4, pp.54-57, 2024
- 10) 足立紀尚, 木村亮, 岸田潔, 伊藤浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明, 土木学会論文集, Vol.694, pp.277-296, 2001
- 11) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 丸善出版, 2007