

路線全体を対象とした鉄道盛土の地震時挙動評価のための基礎データ構築

○ [土] 鈴木 聡 [土] 坂井 公俊 [土] 小島 謙一 (鉄道総合技術研究所)

Fundamental data for evaluating seismic response of embankment for a whole railway

○ Akira Suzuki, Kimitoshi Sakai, Kenichi Kojima, (Railway Technical Research Institute)

In order to evaluate the seismic response of embankment for a whole railway, we conducted circular slip analysis that comprehensively changed the basic information of the embankment as a parameter, and constructed a database that arranged the information such as yielding seismic intensity. Then, we collected the case where the circular slip analysis of the railway embankment was carried out, and compared it with the database constructed by this study, the validity of the data was confirmed.

キーワード : 鉄道盛土の地震時挙動, 円弧すべり安定解析, ニューマーク法

Key Words : Evaluation of seismic response of railway embankment, circular slip analysis, Newmark method

1. はじめに

鉄道や道路といった線状構造物では、ある一箇所の損傷が全体機能の喪失につながる可能性がある。そのため、各構造物の耐震性能を把握した上で相対的に弱点となる箇所を抽出し、このような構造物から順に耐震補強を実施することにより、路線全体を俯瞰した上での効率的な耐震性能の向上につながると考えられる。

しかし、数百 km に渡るような鉄道路線を構成する構造物（橋梁、高架橋、盛土等）の数は膨大であり、これら全ての地震時性能を個別に把握するためには非常に多くの作業を必要とする。そのため、簡易な評価手法によって各構造物の性能を把握し、1 次的なスクリーニングを実施することが有効であると考えられる。この構造物の性能を簡易に把握することを目的として、多様な諸元を有する橋梁、高架橋群に対して、予め振動特性（降伏震度や固有周期）を評価しておき、この結果を構造物の諸元に紐つけたデータベースとして用意することで、このデータベースから類似構造物の結果を抽出することで、地震時性能を求める方法を提案¹⁾している。この方法は、主に高架橋を対象として実施されたものであるが、同様の検討を盛土に対しても適用可能であると考えられる。

盛土の地震時挙動を評価する手法としては、ニューマーク法による滑動変位量算定手法²⁾や、等価 1 自由度モデル³⁾と片側非線形モデル⁴⁾を組み合わせた滑動変位の簡易評価手法⁵⁾を適用することが考えられる。そのため、本検討では、盛土の基本的な諸元（高さ、法面勾配、盛土の物性値、上載荷重、天端幅）を網羅的に変化させるとともに、

これらの盛土に対して円弧すべり安定解析を実施することで、ニューマーク法に必要な情報を算出し、盛土の諸元と紐つけたデータベースを構築することを目的とする。

2. 盛土の地震時挙動評価のための基礎データの構築

2.1 円弧すべり安定解析

(1) 解析モデル

本章では、ニューマーク法に必要な情報を算定するため、盛土の基本的な諸元（高さ、法面勾配、盛土の物性値、上載荷重、天端幅）を網羅的に変化させた盛土に対して、円弧すべり安定解析を実施している。円弧すべり安定解析は、鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造標準²⁾（以下、土構造標準）に記されている修正フェレニウス法を用いるものとする。

設計で円弧すべり安定解析のモデルを設定する際には、測量データをもとにモデル形状を設定したり、土質調査結果から盛土を表層部と深部に区分けして物性値を設定したりといった詳細なモデル設定を必要とする。しかしながら、本検討では、図 1 に示すような盛土断面を簡略化したモデルで、一般的な鉄道盛土の諸元を網羅できるようにパラメータを設定している。こうすることで、ニューマーク法に必要な情報を簡易に算定することができるが、詳細にモデル化した事例と比較して、解析結果の精度が懸念される。そのため、両者の誤差についての検証を 3 章で実施するものとする。

一般的な鉄道盛土の諸元として、実際に存在している鉄道盛土を基本に、データベースとしてある程度幅を持たせてパラメータを設定している。具体的には、盛土高さ H は

1m~20mの1m刻み20種類、法面勾配 α は1.0~2.0の0.1刻み11種類、天端幅 B は6m, 10m, 12mの3種類を変化させた660種類の盛土形状を解析対象としている。盛土の物性値や盛土に作用する荷重の設定は、土構造標準²⁾や鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め標準⁶⁾(以下、土留め標準)に従って設定するものとする。盛土の物性値は、盛土材料ごとに設定されている土質1($\gamma_t=18\text{kN/m}^3$, $c=6\text{kN/m}^2$, $\phi=45^\circ$), 土質2($\gamma_t=17\text{kN/m}^3$, $c=6\text{kN/m}^2$, $\phi=40^\circ$), 土質3($\gamma_t=16\text{kN/m}^3$, $c=6\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$)の設計用値を用いる。盛土天端に作用する上載荷重 q は、在来線と新幹線の軌道荷重として、 10kN/m^2 , 15kN/m^2 の2種類を設定する。列車荷重は考慮しないものとする。

以上より、本検討で実施する盛土の円弧すべり安定解析は、3960ケース(盛土形状660種類×盛土の物性値3種類×上載荷重2種類=3960ケース)について実施する。

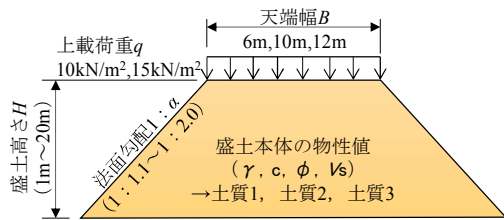


図1 本検討における解析モデル

(2) 円弧すべり安定解析における探索条件

円弧すべり安定解析では、降伏震度が最小となる円弧すべり線を算定するため、円弧中心位置と円弧半径を適切に設定することが重要である。本検討では、前項に示すように多くの計算ケースにおける円弧すべり安定解析を実施するため、円弧中心の探索範囲をかなり広域に設定することとした。(図2参照)具体的に言うと、円弧中心の探索は、水平方向と高さ方向について盛土高さの10倍の領域を0.5m間隔で実施するものとする。また、円弧半径は、0.1m間隔で盛土内を通るすべり線を探索するものとする。その際、表層部のすべりを解析結果から除外するため、盛土法肩から水平方向に2.0mの点a($aH+2, H$)と盛土天端端部の点b($aH+B, H$)の間を通るすべり線を探索してい

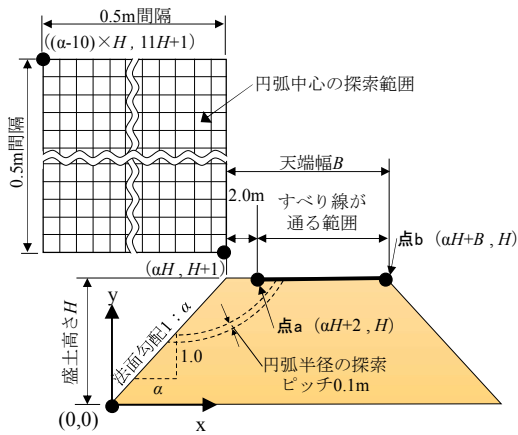


図2 円弧すべり安定解析における探索条件

る。円弧すべり計算におけるスライス幅は、最大のスライス幅が0.5mとなるように、盛土高さ $H/40$ で設定した幅とする。

2.2 基礎データとして整理する情報

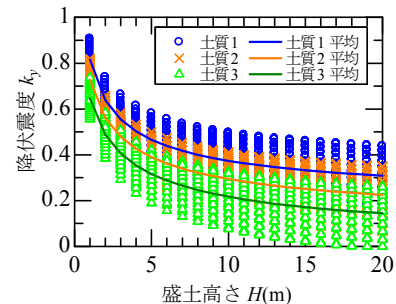
設計では、地震時における鉄道盛土の滑動変形量算定法として、ニューマーク法が一般的に用いられる。本手法は、円弧すべり安定計算により臨界すべり面を算定し、円弧すべり土塊の運動方程式を地震開始から終了まで逐次積分することによりすべり土塊の回転角を算定する手法である。²⁾ここでは、盛土の滑動変形量を算定する際の基本表現式⁷⁾から盛土の降伏震度 K_y と盛土起動力の特性値 $\chi(=(M_{DK}+M_{RK})/J)$ を鉄道盛土の地震時挙動評価のための基礎データとして整理する。盛土の滑動変形量を算定する際の基本表現式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \delta &= \dot{\theta} \cdot R \\ &= (K_h(t) - K_y) \frac{M_{DK} + M_{RK}}{J} \cdot R \dots\dots\dots (1) \\ &= (K_h(t) - K_y) \cdot \chi \end{aligned}$$

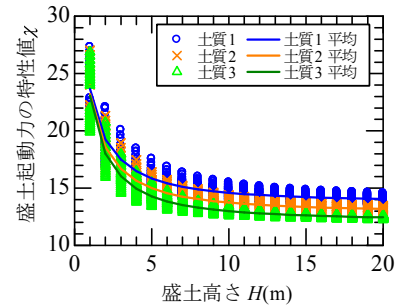
ここで、 δ : 滑動変形量, θ : 回転角, R : 円弧半径, J : 土塊の回転慣性モーメント, M_{DK} : 地震慣性力の基準滑動モーメント, M_{RK} : 地震抵抗力の基準滑動モーメント, $K_h(t)$: 時刻 t における地震動の水平震度, K_y : 盛土の降伏震度である。

2.3 解析結果

本節では、盛土高さ、法面勾配、盛土の物性値のパラメータの変化に伴う、降伏震度 K_y 、盛土起動力の特性値 χ の変化の感度を把握する。盛土の土質区分ごとに整理した K_y , χ と各指標の関係を図3, 図4に示す。図3, 図4より、降伏震度 K_y は、盛土が高くなるほど、また法面勾配が

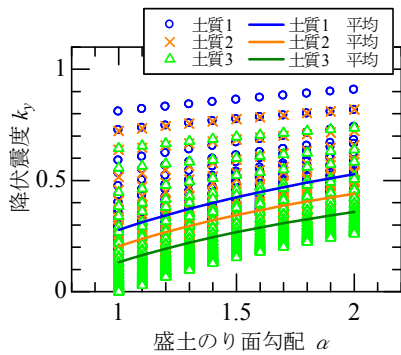


(a) 盛土高さ H と降伏震度の関係

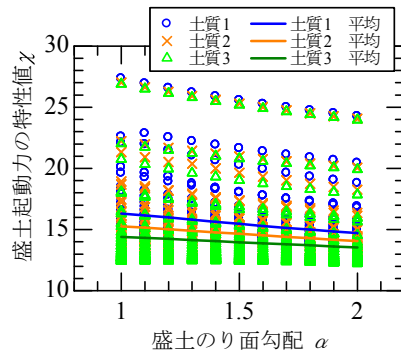


(b) 盛土高さ H と盛土起動力の特性値

図3 盛土高さごとの解析結果



(a) 盛土法面勾配 α と降伏震度の関係



(b) 盛土法面勾配 α と盛土起動力の特性値

図4 法面勾配ごとの解析結果

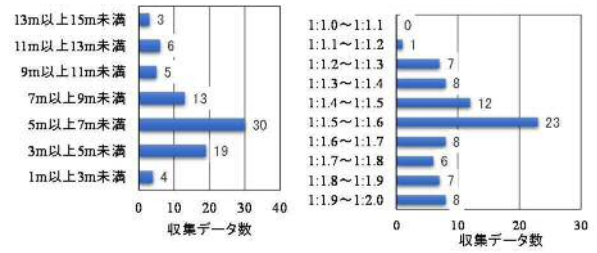
急になるほど小さくなる。盛土起動力の特性値 χ は、盛土が高くなるほど小さくなり、法面勾配に対しては感度が小さいものの、勾配が急になるほど大きくなる傾向がある。盛土の物性値に対しては、降伏震度 K_y 、盛土起動力の特性値 χ とともに、盛土が良質材料であるほど大きくなる傾向がある。

3. 構築したデータベースの検証

2章で構築したデータベースは、図1に示すように簡略化した盛土形状のため、詳細なモデルで検討を実施している設計事例との計算結果の乖離が懸念される。そのため、多様な諸元を有する鉄道盛土の設計事例を収集し、盛土の諸元とともに円弧すべり安定解析結果の整理を行った。そして、設計事例の整理結果と構築したデータベースについて、類似した盛土の諸元で比較を行うことで、構築したデータベースの精度を検証する。

3.1 設計事例の収集

収集した鉄道盛土の事例に対し、盛土の基本的な諸元(高さ、法面勾配、盛土の物性値、上載荷重、天端幅)とともに、円弧すべり安定解析結果から降伏震度 K_y 、盛土起動力の特性値 χ のデータを整理した。事例は全部で81データあり、盛土高さごとおよび法面勾配ごとのデータ数は、図5に示すとおりである。今回の事例は、全て土質3 ($\gamma_t=16\text{kN/m}^3$, $c=6\text{kN/m}^2$, $\varphi=35^\circ$) の設計用値を用いて検討を実施している。盛土天端に作用する上載荷重は、 10kN/m^2 を考慮している事例が46データ、 15kN/m^2 を考



(a) 盛土高さ (b) 法面勾配

図5 収集した円弧すべり安定解析事例

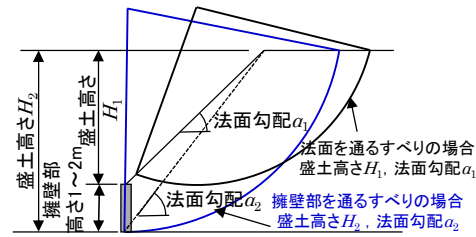


図6 収集した事例における盛土のすべり線の例

慮している事例が35データであり、列車荷重は考慮していない。なお、実際の盛土断面は、図1に示すような簡略化した形状ではなく、盛土の法先に腰土留めのある形状や、犬走りを設けた形状がある。腰土留めのある形状の盛土は、盛土上部を通る円弧すべりと、土留め壁を通る円弧すべりの両ケース検討を行っている。その場合については、両方のケースについて設計事例に加えて整理を行っている。その際の法面勾配の考え方は、図6に示すように、法面部を通る円弧の場合には、法肩から法先を結んだ勾配 α_1 とし、擁壁を通る円弧すべりの場合には、盛土法肩と擁壁下端を結んだ線の勾配 α_2 とした。また、犬走りを設けた形状の場合の法面勾配は、法肩から法先を結んだ勾配 α_1 とする。なお、収集した全ての事例におけるすべり線は、本検討における円弧すべり安定解析と同様に法肩から水平方向に2.0mの位置から探索するように設定している。

3.2 設計事例との比較

今回構築したデータベースによる評価結果(降伏震度 K_y^i 、盛土起動力の特性値 χ^i)と、設計事例の結果(降伏震度 K_y^d 、盛土起動力の特性値 χ^d)を比較すると、両者の結果は概ね調和的であり、 K_y^i/K_y^d は、0.7~1.2の範囲に、 χ^i/χ^d は、0.8~1.1の範囲に分布する結果となった。(図7、図8参照) それぞれについて平均値を算定すると、 K_y^i/K_y^d の平均は0.974、 χ^i/χ^d の平均は0.992であり、平均は1.0に近い値になっている。また、 K_y^i/K_y^d と、 χ^i/χ^d における誤差について、RMSを計算すると、 K_y^i/K_y^d は0.097、 χ^i/χ^d は0.037となっている。 K_y^i/K_y^d および χ^i/χ^d の誤差が大きい範囲における設計事例の円弧すべり計算結果(図5、図6の青枠内の結果)から、誤差が大きくなる要因が2つ挙げられる。1つ目の要因は、土留め擁壁の下端をすべり線が通っていることや、盛土法肩から2.0mの範囲について、盛土の物性値を低減($c=3\text{kN/m}^2$, $\varphi=30^\circ$)した表層部をモデル化して

円弧滑りを実施している事例のモデル化の違いである。この場合、盛土高さが低いケースほど誤差の影響が大きくなっている。2つ目の要因は、設計条件が特殊で、構築したデータベースより深い位置でのすべり線を探索しているケースである。このケースについては、検証する事例としてデータから省くことも考えられる。

以上より、今回構築したデータベースによる評価結果を使用する場合には、上記に示すような誤差があることを考慮する必要があるが、スクリーニングに用いるには有用である。

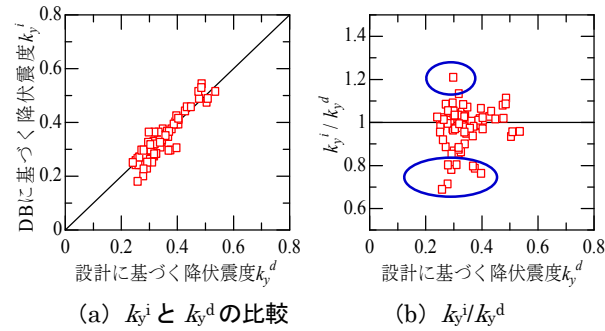


図7 降伏震度における比較

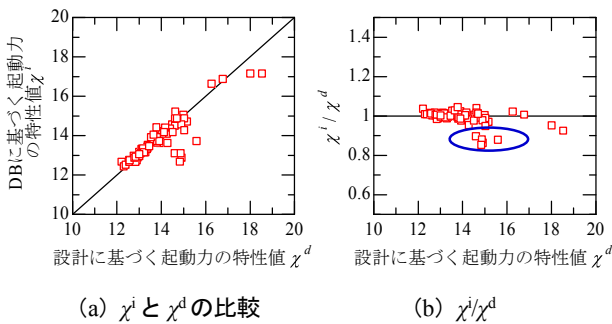


図8 盛土の起動力の特性値における比較

4. まとめ

本検討では、盛土の諸元にニューマーク法に必要な情報（降伏震度 K_y 、盛土起動力の特性値 χ ）を紐つけたデータベースを構築することを目的として、盛土の基本的な諸元（高さ、法面勾配、盛土の物性値、上載荷重、天端幅）をパラメータとして網羅的に変化させた円弧すべり安定解析を実施した。

そして、構築したデータベースの精度を検証するため、収集した多様な諸元を有する盛土の設計事例と比較を行った。構築したデータベースの評価結果と設計事例の結果を比較すると、 k_y^i/k_y^d および χ^i/χ^d の平均は 1.0 に近い値となった。また、それぞれの誤差について RMS を計算すると、 k_y^i/k_y^d は 0.097、 χ^i/χ^d は 0.037 となった。そのため、今回構築したデータベースによる評価結果を使用する場合には、上記に示すような誤差があることを考慮する必要があるが、スクリーニングに用いるには有用である。

今回構築したデータベースを用いて、盛土の性能に感度の大きなパラメータを抽出することで、これらの限られた

パラメータから簡易に性能を評価できるようになると考えられるため、今後検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 日野, 室野, 和田: インベントリーデータベースを用いた構造物のリスク評価手法の提案, 第 72 回年次学術講演会, pp.159-160, 2017.
- 2) 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), pp.63-152, 丸善出版, 2007.
- 3) 坂井公俊, 荒木豪, 室野剛隆: 等価 1 自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.174-186, 2017.
- 4) 澤田純男, 土岐憲三, 村川史朗: 片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3033-3038, 1998.
- 5) 坂井公俊, 荒木豪, 室野剛隆: 盛土本体と滑動部の動的応答を考慮した鉄道盛土の実用的な滑動変位量の算定手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 投稿中
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (土留め構造物), pp.55-85, 丸善出版, 2012.
- 7) 坂井公俊, 室野剛隆, 京野光男: 鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.3, pp.542-552, 2012.