



転石を模擬した剛体の振動特性による根入れ深さの 推定方法

深田, 隆弘
橋元, 洋典
澁谷, 啓

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 68(2):I_337-I_344

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003313>



転石を模擬した剛体の振動特性による根入れ深さの推定方法

Estimation Method for In-soil Penetration Depth of Rigid Body Simulating Boulder by Vibration Characteristics

深田隆弘*・橋元洋典**・澁谷 啓***

Takahiro FUKATA, Yosuke HASHIMOTO, Satoru SHIBUYA

* 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)

**神戸大学大学院 博士課程前期課程 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

*** Ph.D,博士 (工) 神戸大学大学院 教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

A huge number of boulders rest on slopes along the railway. In an attempt to evaluate the degree of rockfall risk of these boulders effectively and quantitatively, basic experiments, together with eigenvalue analyses by 3-D FEM, were performed for revealing the vibration characteristics of the rigid bodies simulating boulders. When the natural frequency of the rigid body, together with its shape exposed above the ground level and the ground strength, is known, the in-soil penetration depth of the rigid body may reasonably be estimated.

Key Words: rockfall, vibration characteristics, boulder, in-soil penetration depth

1. はじめに

鉄道沿線斜面に存在する多数の転石の落石危険度を効率的かつ定量的に判定し、危険度の高い転石に対して適切な措置を施すことが、落石災害に対する鉄道の安全・安定輸送を維持していく上で重要である。

落石の発生形態には、転石型(転落型)とはく落型の2種類のタイプがある¹⁾²⁾。前者のタイプは、鉄道関係では転落型、道路関係では抜け落ち型もしくは転石型という名称が用いられている。本論文では、転石という語句を多用することから、前者のタイプを転石型と呼ぶことにする。

図-1の例に示すように、転石型落石は、「岩塊より軟質な物質(マトリックス)中に岩塊が埋まっている地山で、マトリックス部が選択的に風化浸食されて、岩塊が浮き出し落下するもの」¹⁾である。

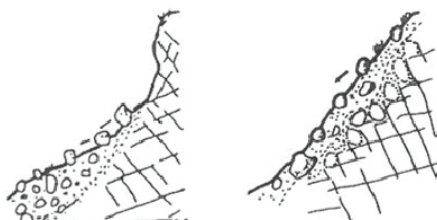


図-1 転石型落石の例²⁾

本論文ではこの転石型落石を対象とし、転石を地盤中に根入れを有する剛体に模擬し、その振動特性を把握して落石危険度の判定に結びつける方法を検討する。そのため、

重量や寸法の異なる剛体を地盤の固さや根入れ深さを変えて埋設し、ハンマー打撃時に測定する加速度波形から剛体の固有振動数を算定する基礎的な実験(以下「実験」という。)を実施した。またこの実験結果を3次元有限要素法による固有値解析で再現し、実験や解析から判明した地盤中に根入れを有する剛体の振動特性から、落石危険度に関係が深い転石の根入れ深さの実用的な推定方法を提案する。

なお振動特性を利用した落石危険度の判定方法は、道路分野でも開発・改良が進められている³⁾⁴⁾。この方法は沿線の交通振動などを振動源とした微動計測によることを基本としているが、本検討ではハンマー打撃することで転石の固有振動数を直接測定することが特徴である。またはく落型落石は、「節理、層理、片理などの岩目から岩塊がはく離し、落下・滑落するもの」¹⁾で、このタイプの落石については、別途遠隔非接触で岩塊の振動を計測して安定性評価を行う研究を進めている⁵⁾⁶⁾。

2. 実験概要

2.1 供試体と実験土槽

実験で用いた供試体は、コンクリート(呼び強度24, W/C=60%)で製作した。供試体の寸法や重量は、鉄道における落石災害の実態から、重量が2kN程度までの発生件数が多い⁷⁾こと、さらに形状の影響を調べるために寸法を変えて多くのケースの実験が行えることから、図-2に示すとおり直方体で、供試体Aが0.3m×0.4m×0.5m, 1.38kN, 供試体Bが0.3m×0.4m×0.8m, 2.21kNの2種類とした。

また実験土槽は、2つの供試体を同時に並べて実験ができるとともに、境界の影響を受けない十分な大きさとして縦2m×横3m×深さ2mとした。これは後述する解析モデルの地盤領域を意識した大きさとしている。この土槽に基礎地盤を高さ1m構築した後に、供試体を水平に設置し、順次根入れ部の地盤を構築しながら振動計測を行う。なお土槽本体は、鋼製山留め材と合板によって強固に作製している。

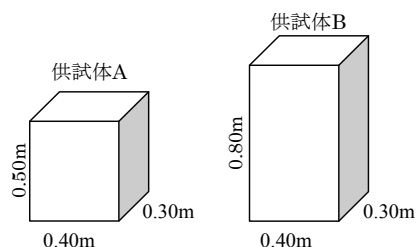


図-2 供試体

2.2 地盤材料の特性

基礎地盤および根入れ地盤として使用した材料の特性および粒径加積曲線は、表-1、図-3 とおりで、工学的分類は礫まじり細粒分質砂 (SF-G) である。

表-1 地盤材料の特性

土粒子の密度	ρ g/cm ³	2.719
自然含水比	W_n %	19.1
礫 (2-75mm)	%	7
砂 (0.075-2mm)	%	73
シルト分 (0.005-0.075mm)	%	15
粘土分 (<0.005mm)	%	5
最大粒径	mm	26.5
均等係数	U_c	14.1
曲率係数	$U_{c'}$	5.64
50%粒径	D_{50} mm	0.157
20%粒径	D_{20} mm	0.0768

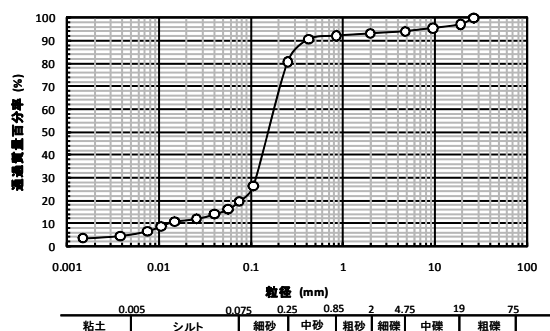


図-3 地盤材料の粒径加積曲線

2.3 実験ケース

地盤の固さは、小型FWD試験機による地盤反力係数(平板载荷試験相当値)で管理する。小型FWD試験機は、重錘を自由落下させて衝撃荷重を加え、内蔵する速度計または加速度計とロードセルから得られた変位量と荷重により地盤反力係数を算定する機器で、可搬式で狭隘箇所での測定に適したものである。実験で目標とした地盤固さは、軟：40～50MN/m³，中：70～80MN/m³，硬：100MN/m³以

上の3種類である。これら所定の固さをもつ地盤を製作するためにあらかじめ予備的な締固め試験を行い、地盤材料の撒き出し厚100～150mmや振動プレート60kg級による転圧回数などの締固め条件を定めた。地盤構築後、実際に測定した地盤反力係数の値は、表-2に示すように、軟：47.6MN/m³，中：79.1MN/m³，硬：146MN/m³である。

根入れの条件は、根入れ比 d/h_0 (d :根入れ長, h_0 :露出高さ)が0, 1/3, 1となる3種類とした。供試体を縦に置いたり横に置いたりすることによって、根入れ比を変えずに根入れ長や露出長が異なるケースの実験を行うことができる。

実験は地盤種別の軟から順次行うこととし、撒き出し各層ごとに地盤反力係数を測定管理しながら根入れ地盤を構築していく。そして根入れ比を変化させた一連の実験が終了すると根入れ地盤を撤去し、基礎地盤を0.1mすきとり、地盤反力係数が大きく変化していないことを確認して次の締固め条件で異なる地盤種別の根入れ地盤を構築する。また地盤の固さが異なる実験ケースの場合には所定の固さとなるよう基礎地盤からすべて作り直した。

この手順の繰り返しにより実施した実験ケースは、表-2のとおり、供試体A, Bの2種類、地盤種別が軟, 中, 硬の3種類、根入れ比が0, 1/3, 1の3種類の組み合わせとなる。

表-2 実験ケース

供試体	地盤反力係数 k_{v30} (MN/m ³)			根入れ比 (d/h_0)
	種別	目標値	構築結果	
A	軟	40-50	47.6	それぞれ 0, 1/3, 1 の3ケース
	中	70-80	79.1	
	硬	100以上	146	

2.4 加振および振動計測方法

加振および振動計測の方法の概要を、図-4に示す。供試体の上面に加速度計を取り付け、座標は常に供試体底面の短辺方向(x)、長辺方向(y)、鉛直上方(z)とした。そして供試体露出側面の中心付近を x , y の各方向にゴムハンマーで打撃し、その時の加速度波形をAD変換器に通して記録する。なお、根入れ部分も含めた供試体全体の重心位置より上部を打撃する場合であれば、測定される固有振動数は打撃位置にそれ程依存しないことを確認している。また振動計測に使用する機器の仕様は、表-3のとおりである。

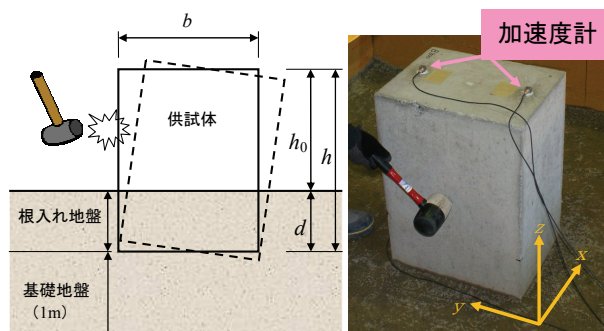


図-4 実験方法の概要

表-3 計測機器の仕様

計測機器	仕 様
加速度計	圧電式、プリアンプ内蔵型、3 軸型、 振動数範囲 3-5,000Hz
AD 変換器	16 チャンネル同時サンプリング 周波数 88.2kHz/ch(MAX) 増幅 1-100 倍

振動計測のシステム化については、接道条件や作業条件が必ずしも良好でない鉄道沿線斜面で使用することを考慮し、チャージアンプを不要としたプリアンプ内蔵機器の採用などシンプルかつコンパクトな構成としている⁸⁾。

ハンマー打撃は 10 回程度行い、そのうち安定して記録された 5 つ程度の加速度波形を切り出し、1 波ずつ高速フーリエ変換(FFT)して、フーリエ振幅が最大値となる卓越振動数の平均値を供試体の固有振動数とする。また加振にゴムハンマーを用いたのは、鋼製ハンマーと比べて打撃時に岩塊との接触時間が長く、小型のものでも比較的大きな衝撃力が得られることと、測定対象となる 10-80Hz 程度の振動数領域において安定した衝撃力を岩塊に加えることができるためである。

図-5 に、測定記録した加速度波形と FFT 処理を行って固有振動数を算定する手順を示す。

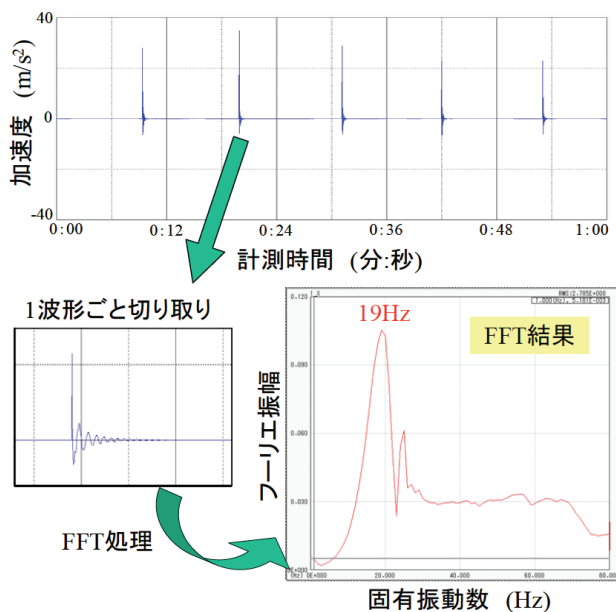


図-5 加速度波形と固有振動数の算定

2.5 実験結果

2.3 実験ケースで説明した、地盤種別 3 種類、根入れ比 3 種類に加えて、図-6 に示すように供試体 A, B の設置方法に違いをもたせた 4 種類、さらに打撃方向が x, y の 2 方向となるので、実験の結果得られる固有振動数のデータ数は、全体で 72 個となる。

地盤中に根入れを有する剛体の固有振動数は、剛体の形状、周辺地盤の固さ、根入れ深さなどに関係があることが推測される。そこで、まず供試体、地盤の固さおよび根入れ比の違いによる固有振動数についてまとめる。

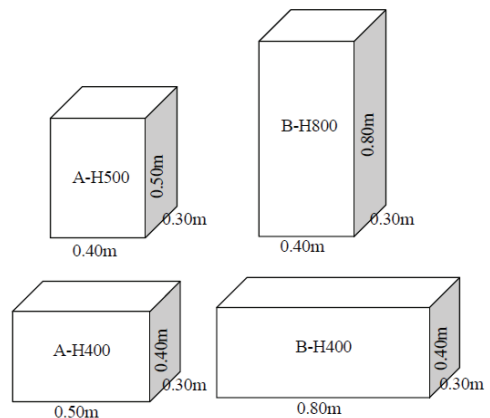
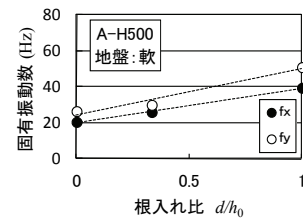
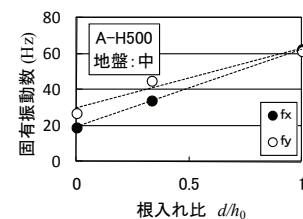


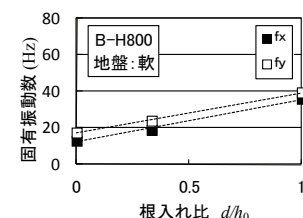
図-6 供試体の設置方法と表記



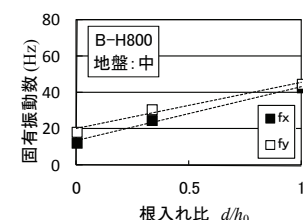
(1) A-H500, 地盤：軟



(2) A-H500, 地盤：中



(3) B-H800, 地盤：軟



(4) B-H800, 地盤：中

図-7 根入れ比と固有振動数の関係(実験結果)

供試体 A を高さ 0.5m となるように設置(図-6「A-H500」と表記)し、0.3m の短辺方向に打撃した時を x 方向の固有振動数 f_x 、0.4m の長辺方向に打撃した時を y 方向の固有振動数 f_y とする。同様に供試体 B を高さ 0.8m となるように設置(「B-H800」と表記)した時の根入れ比と固有振動数の関係とあわせて図-7 に示す。これらはいずれも地盤軟と中のケースについての結果である。なお地盤硬のケ

ースやその他の A-H400 や B-H400 のケースの結果については、図-7 と同様の傾向であるため省略した。固有振動数は根入れ比 d/h_0 に相応して大きくなるとともに、地盤の固さによっても増大していくことが分かる。また供試体 A と B の違いは重量と高さであるが、地盤の固さが同条件の場合、供試体 A の固有振動数の方が全体的に大きくなっている。いずれの結果も、根入れ比が大きくなると固有振動数が大きくなり、線形近似することができる。

3. 3次元有限要素法による固有値解析

3.1 解析モデルと計算条件

地盤中に根入れを有する剛体の固有振動数を解析的に求めるため、供試体と地盤をモデル化して3次元有限要素法による固有値解析を行う。地盤領域の大きさは水平・鉛直方向ともに供試体半幅の3倍程度を確保する必要⁹⁾があるため、実験土槽と同じ寸法である、縦2m、横3m、基礎地盤1m+根入れ地盤の高さとした。境界条件は、底面については水平・鉛直とも固定支持、側面については面外方向の変形のみ拘束した支持条件とし、供試体と地盤のはく離は無視している。

また実験を再現する固有値解析結果を得るためには、地盤の振動モードの影響を受けていない剛体の1次モードの固有値を抽出すればよい。ここで供試体 A, $d/h_0=0$, $E=15.0\text{MPa}$ の解析ケースの時、固有振動数は $f_x=16.2\text{Hz}$ (ただし地盤密度 $\rho_s=15.8\text{kN/m}^3$) , $f_x=16.6\text{Hz}$ (同 1.00kN/m^3) , $f_y=16.7\text{Hz}$ (同 0.01kN/m^3) , $f_y=16.7\text{Hz}$ (同 0kN/m^3) となるように、地盤密度に関係なくほぼ一定値となることがあらかじめ確認できたので、解析結果の固有振動数は地盤の振動モードの影響を受けない密度 0 の場合の値を便宜上採用している。なおこのような解析上の工夫によって、数多くアウトプットされる振動モードと固有値の計算結果の中から容易に剛体の1次モードの固有値のみを抽出することができるようになった。

次に実験での地盤固さの確認は、平板载荷試験相当値としての k_{30} を小型 FWD 試験機により測定している。任意の幅を持つ剛体の底面に対する地盤反力係数、およびその地盤反力係数と地盤の変形係数の関係はそれぞれ次式(1)、(2)で表される¹⁰⁾。さらに、平板载荷試験などの比較的大きなひずみレベルから算定された静的な変形係数に対して、微小なひずみレベルに対応した動的な値は2倍程度の値で評価することが行われている¹¹⁾。

$$k_v = k_{v30} (B_v/0.3)^{-3/4} \quad (1)$$

$$E_0 = B(1 - \nu^2)k_v I_p \quad (2)$$

$$E = 2E_0 \quad (3)$$

ここに、 k_v : 地盤反力係数 (MN/m^3)

k_{v30} : 载荷板直径 30cm の地盤反力係数 (MN/m^3)

B_v : 剛体の換算幅 ($B_v=(a \times b)^{1/2}$, m)

E_0 : 地盤の変形係数 (MPa)

B : 载荷幅 (m)

ν : ポアソン比 (一般に 0.3)

I_p : 形状係数

式(1)~(3)から地盤反力係数を変形係数に換算すると、 $E_0(\text{軟})=7.5\text{MPa}$, $E_0(\text{中})=12.5\text{MPa}$, $E_0(\text{硬})=23.0\text{MPa}$ となり、2倍相当値はそれぞれ $E(\text{軟})=15.0\text{MPa}$, $E(\text{中})=25.0\text{MPa}$, $E(\text{硬})=46.0\text{MPa}$ となる。固有値解析モデルの一例(A-H500, 根入れ比 $d/h_0=0$ のケース)を図-8に示す。

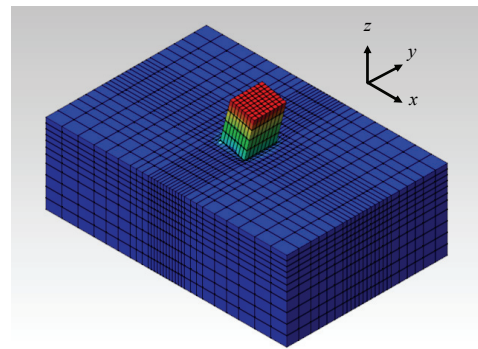
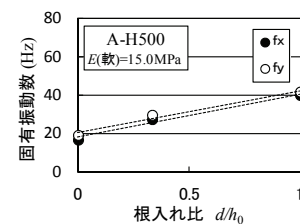
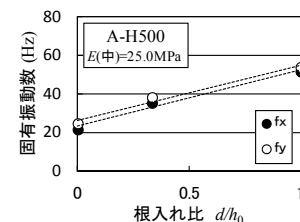


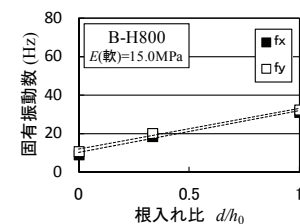
図-8 固有値解析モデル(A-H500, $d/h_0=0$)



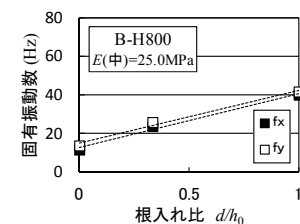
(1) A-H500, $E(\text{軟})=15.0\text{MPa}$



(2) A-H500, $E(\text{中})=25.0\text{MPa}$



(3) B-H800, $E(\text{軟})=15.0\text{MPa}$



(4) B-H800, $E(\text{中})=25.0\text{MPa}$

図-9 根入れ比と固有振動数の関係(解析結果)

3.2 解析結果

図-7 で示した実験結果の整理と同様に、解析結果についても根入れ比と固有振動数の関係を図-9 に示す。図-7 と図-9 を比較すると、解析結果においても実験結果と同様に根入れ比と固有振動数が線形関係にあることが分かる。また固有振動数の値についても再現できている。

3.3 実験と解析の適合性

固有値解析の結果得られた固有振動数と実験で測定された固有振動数の相関を図-10 に示す。プロットはそれぞれの凡例が示す実験ケース（表記は図-6 参照）において、地盤の変形係数を2倍相当の $2E_0$ とした場合である。そしてこれらは、太線で線形近似することができる。

一方、図が煩雑となるためプロットはしていないが、変形係数を E_0 とした場合には、一点鎖線の近似線となる。このように2倍相当値である $2E_0$ で地盤を評価することにより、固有振動数の解析結果と実験結果との適合性が良いことが分かる。

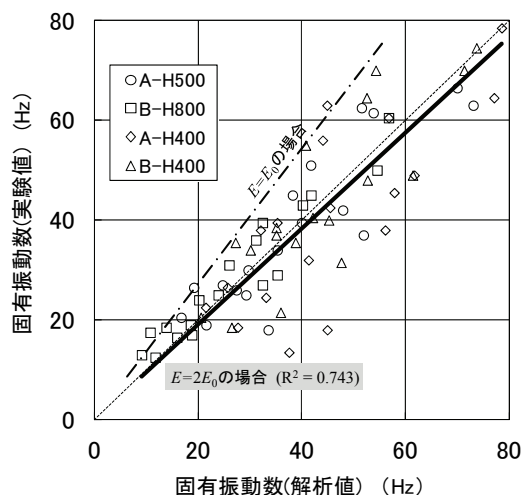


図-10 解析と実験の固有振動数の相関

以上のとおり、供試体と地盤を実験条件と同等の寸法でモデル化し、便宜上密度を0とし地盤の振動モードを発現させないようにすること、加えて地盤の変形係数を微小ひずみレベルに対応した動的値として静的値の2倍相当で評価することにより、実際の現象を解析的に再現することができる。ただし実験結果にはばらつきがあるため、以後の検討および考察は主として解析結果に基づいて行うこととする。

3.4 地盤の変形係数と固有振動数の関係

まず、地盤の変形係数と剛体の固有振動数の関係について考える。地盤をばねとみなすと、ばね定数 K 、質量 M の質点系の固有振動数は式(4)のように表すことができ、さらに地盤反力係数 k_v と剛体の底面積 $A(=a \times b)$ 、重量 W 、重力加速度 g を用いて書き直すことができる。そして地盤反力係数は、式(2)から地盤の変形係数 E に変換することができ、地盤をばねと考えた時の基本となる固有振動数と

して、式(5)のとおり Q_1 を定義しておく。この Q_1 を横軸に、そして縦軸に解析結果の固有振動数をとると、図-11に示すとおり、 Q_1 と固有振動数の関係がすべて原点を通る直線となることが分かる。ただし図-11はA-H500の根入れ比0, 1/3, 1で、 x および y 方向に打撃したケースの解析結果である。したがって地盤中に根入れを有する剛体の固有振動数は、比例定数 α と基本となる固有振動数 Q_1 を用いて、式(6)のように表すことができる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_v A}{W/g}} \quad (4)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EA g}{B(1-\nu^2)I_p W}} \quad (5)$$

$$f = \alpha \cdot Q_1 \quad (6)$$

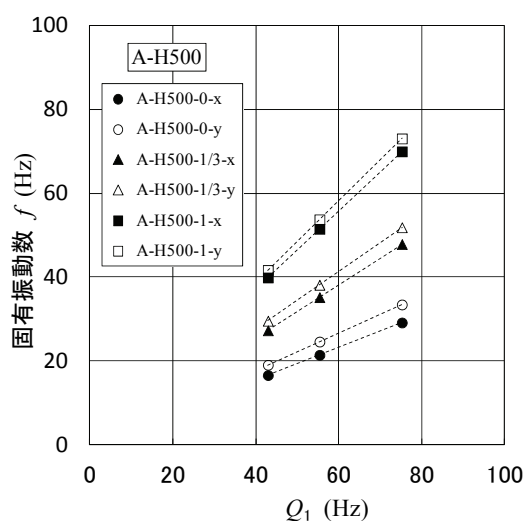


図-11 Q_1 と固有振動数の関係

表-4 Q_1 と固有振動数の関係における定数 α の値

ケース	α	ケース	α
A-H500-0-x	0.388	A-H400-0-x	0.465
A-H500-0-y	0.445	A-H400-0-y	0.556
A-H500-1/3-x	0.636	A-H400-1/3-x	0.695
A-H500-1/3-y	0.689	A-H400-1/3-y	0.765
A-H500-1-x	0.930	A-H400-1-x	0.955
A-H500-1-y	0.971	A-H400-1-y	0.974
B-H800-0-x	0.267	B-H400-0-x	0.486
B-H800-0-y	0.315	B-H400-0-y	0.644
B-H800-1/3-x	0.545	B-H400-1/3-x	0.713
B-H800-1/3-y	0.592	B-H400-1/3-y	0.831
B-H800-1-x	0.916	B-H400-1-x	0.966
B-H800-1-y	0.954	B-H400-1-y	0.998

なおA-H500以外のケースについても、 Q_1 と固有振動数には同様の比例関係となり、その場合の各ケースにおける定数 α は、表-4に示す値となる。

3.5 剛体の形状と固有振動数の関係

次に、剛体の形状と固有振動数の関係について考える。地震時に墓石のような根入れのない剛体が転倒した事例

から、その時の地動加速度を推定するための考察¹²⁾や研究¹³⁾が報告されている。これは剛体の高さ h_0 と地震動の卓越方向幅 b により得られる縦横比 b/h_0 が剛体の静的な転倒条件に関係していることに基づいている。すなわち剛体の形状を代表する縦横比と安定度との間には高い相関があることが推測されるため、この縦横比と剛体の固有振動数の関係について検討した。 b/h_0 , $(b/h_0)^{1/2}$, $(b/h_0)^2$ など、縦横比を基本としたいいくつかの特性値を検討したところ、式(7)に示す無次元量 Q_2 が、根入れのない場合の固有振動数と高い相関を有することが分かった。

$$Q_2 = \sqrt{\frac{(b/h_0)^2}{(b/h_0)^2 + 1}} \quad (7)$$

ここに、 b : 剛体の打撃方向の幅 (m)
 h_0 : 根入れなしの剛体の高さ (m)

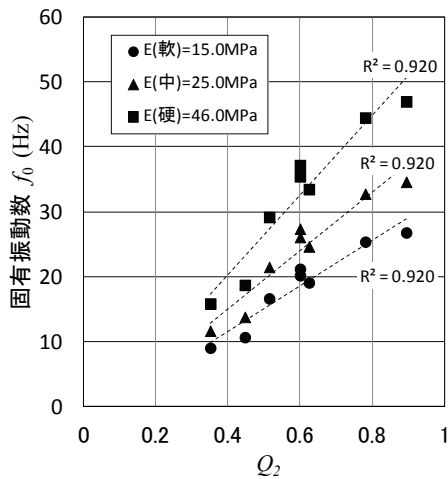


図-12 縦横比に係る Q_2 と固有振動数の関係

この縦横比に係る無次元量 Q_2 と固有振動数の関係を、図-12 に示す。ここで、この縦横比に係る Q_2 の物理的な意味を考える必要がある。今、半無限弾性地盤上にある剛体のロッキング振動について、根入れがない場合の振動数方程式は、式(8)に示す Y および Θ についての同次方程式の係数の行列式を 0 に等置した式として得られる¹⁴⁾。(ただし参考文献中の記号は本論文におけるものに置き換えた。その他の新たに出てくるものとしては、 M : 質量、 n : 固有円振動数、 k_s : 水平地盤係数、 k_v : 鉛直地盤係数、 J : 重心まわりの質量の慣性モーメントである。)

$$\begin{aligned} (abk_s - Mn^2)Y - \frac{abh_0^2k_s}{4}\Theta &= 0 \\ -\frac{abh_0k_s}{2}Y + \left\{ \frac{ab^3k_v}{12} + \frac{abh_0^2k_s}{4} - Jn^2 \right\}\Theta &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)において、簡略のために水平地盤係数 $k_s=0$ とすると、振動数方程式は式(9)となり、これを n について解くと、ロッキング振動の第一次の固有振動数は $n=2\pi f$ の関係を用いて書き直して、式(10)となって式(7)で定義した値 Q_2 が係数として出現する。

$$MJn^4 - \frac{Mab^3k_v}{12}n^2 = 0 \quad (9)$$

$$f = \sqrt{\frac{(b/h_0)^2}{(b/h_0)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_v ab}{M}} \quad (10)$$

ここで、前出の式(4)と対比させて考えれば、基本となる固有振動数に係数として係る Q_2 には何らかの意味があるものと思われる。しかしながら現時点では以上のような着想はもっているものの、具体的な解釈を与えるだけの根拠は持ち合わせていないので、今後の検討課題としておく。

3.6 考察

便宜上密度を 0 とし地盤の振動モードを発現させないようにすることによって根入れを有する剛体の固有値解析が容易となった。また地盤のひずみレベルを考慮して変形係数を静的値の 2 倍相当で評価することにより、実験結果と解析の適合性が良いことを示した。

そして実験および解析を通して、根入れを有する剛体の固有振動数は、根入れ比、地盤の変形係数、剛体の形状を代表する縦横比などと関係があることが分かった。これらのことから、地盤中に根入れを有する剛体の挙動は複雑な非線形現象ではあるが、いくつかの説明変数により固有振動数の推定式を作成することができると考えられる。

4. 重回帰分析による根入れ深さの推定式

4.1 根入れ深さの推定式

これまで、図-13 (左) に示すような地盤中に根入れを有する剛体の固有振動数について検討してきた。ところが実際には根入れ深さは不明であるので、剛体の振動特性、すなわち測定される固有振動数を利用して、この根入れ深さを推定する方法を考える。そこでまず図-13 (右) に示すように、地表の露出部分に着目してみる。この露出部分に関しては、寸法 a, b, h_0 や重量 W 、地盤の変形係数 E を把握することは可能である。そして露出部分を根入れ 0 とみなし、これまでの実験および解析結果の考察から、その時の剛体の固有振動数を地盤の変形係数に関係した基本となる固有振動数 Q_1 や剛体の形状に関係した無次元量 Q_2 を用いて、3 章の解析結果を重回帰分析することにより固有振動数を式(11)で近似する。

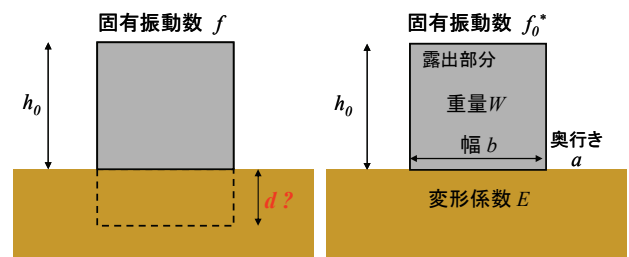


図-13 地盤中に根入れのある剛体

$$f_0^* = 0.719 Q_1 \cdot Q_2 + 0.745 \quad (11)$$

ここで、 f_0^* は露出部分で根入れ0とみなした剛体の固有振動数、 Q_1 および Q_2 は前出の式(5)および式(7)で定義したものである。なお式(11)の重回帰分析の相関係数は $R^2=0.986$ である。確認のため根入れがないケースでの固有振動数 f_0 の解析結果と式(11)から算定できる固有振動数 f_0^* の関係を図-14に示す。

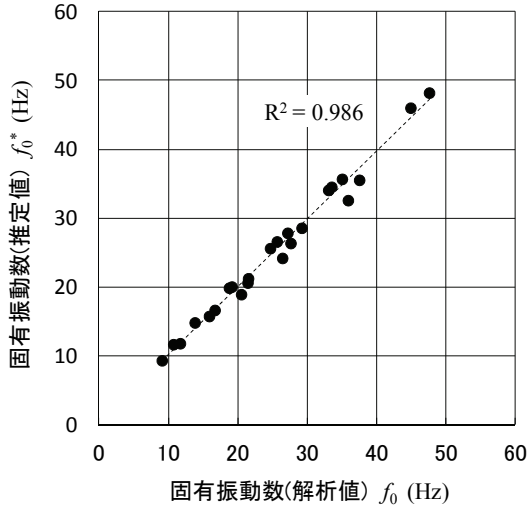


図-14 固有振動数の相関（解析値と推定式）

次に図-7や図-9に示したように、根入れ比 d/h_0 と固有振動数には線形関係があることが分かっているため、根入れがある状態での固有振動数 f と露出部分を根入れ0とみなした時の固有振動数 f_0^* の比を用いて、根入れ深さの推定長を式(12)のとおり定式化した。なお、この推定式の相関係数は、 $R^2=0.939$ である。このように、転石まわりの地盤の変形係数や露出部分の寸法を把握し、式(11)により露出部分の固有振動数 f_0^* を算定し、式(12)における固有振動数 f を実測により求めることで、根入れ深さ d を推定することが可能となる。

$$d = 0.396 \frac{f}{f_0^*} - 0.394 \quad (12)$$

4.2 推定式の検証

根入れ深さを推定した具体的な計算例として、A-H400の根入れ比1/3、地盤(中): $E=25.0\text{MPa}$ 、 x 方向打撃のケースを考える。このケースでは、根入れ長 $d=0.1\text{m}$ 、露出長 $h_0=0.3\text{m}$ 、 $W=1.38\text{kN}$ となり、各方向の長さ $a=0.5\text{m}$ 、 $b=0.3\text{m}$ となるので、 $A=a \times b=0.15\text{m}^2$ 、 $b/h_0=0.3/0.3=1$ となる。したがって、式(5)および(7)から $Q_1=59.363$ 、 $Q_2=0.707$ が求まり、露出部分を根入れ0とみなした剛体の固有振動数が式(11)により $f_0^*=30.9\text{Hz}$ と算定される。この f_0^* の値と根入れがある状態での固有振動数 $f=41.3\text{Hz}$ を式(12)に代入すれば、根入れ深さの推定長が $d=0.135\text{m}$ と得られる。この時、根入れ深さの実長 0.1m との差はプラス 0.035m である。

このようにして求めた根入れ深さの実長と式(11)による推定長の相関を図-15に示す。相関係数は $R^2=0.939$ と比較的高くなるが、推定式で算定した根入れ深さは次の誤差を有している。すなわち、推定長が実長より小さくなるものとして、実長 0.4m に対し推定長 0.318m でマイナス 0.082m となるものが誤差最大である。また逆に、推定長が実長より大きくなる最大のものとしては、実長 0.2m に対し推定長 0.252m でプラス 0.052m となるものがあつた。つまり推定式(11)は、最大でも $\pm 10\text{cm}$ 程度の誤差であるといえる。さらに図-16は x 方向打撃時の固有振動数から算定した根入れ深さ d_x と、同じく y 方向打撃時の固有振動数から算定した根入れ深さ d_y を個別に求め、その誤差を検証したが、 d_x と d_y の平均をとることにより、図-16に示すように、根入れ深さの実長と平均推定長は最大でも 0.038m となり、誤差が $\pm 5\text{cm}$ 程度の高い精度で根入れの推定が可能になる。

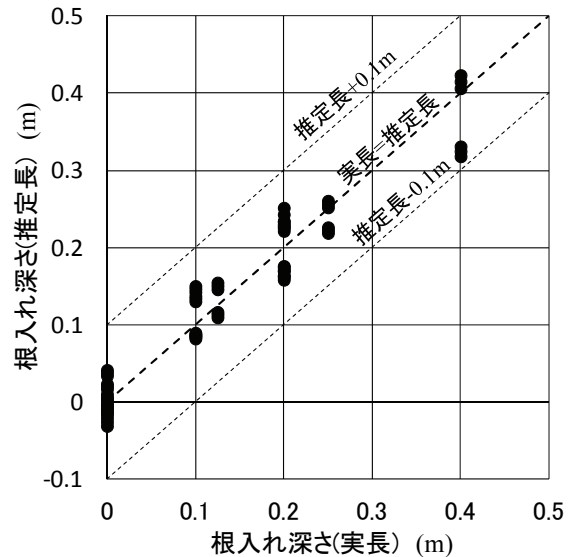


図-15 根入れ深さの相関（実長と推定長）

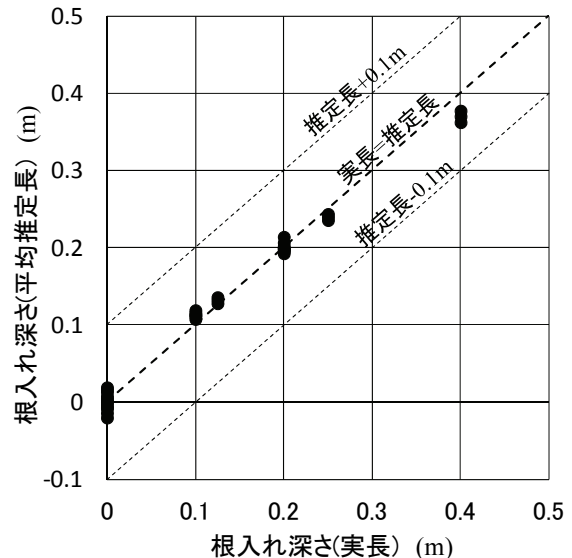


図-16 根入れ深さの相関（実長と平均推定長）

5. 結論

本論文により得られた知見を以下にまとめて記す。

- (1) 転石を地盤中に根入れがある剛体に模擬し、重量や寸法の異なる供試体を作成して地盤の固さ、根入れ深さなどの条件を変えて固有振動数の測定実験を行った。実験で行った固有振動数の測定方法は、打撃に使用するゴムハンマーやシステム構成がコンパクトであるため、実斜面においても十分使用可能である。
- (2) 剛体や地盤をモデル化して固有値解析（3次元有限要素法）を行い、実験結果を再現することを試みた。地盤中に根入れを有する剛体の固有振動数は、静的に測定した平板載荷試験相当値に対して、動的なひずみレベルに対応する2倍相当値を用いて地盤を評価することによって、実験と解析の結果の適合性が良くなることを示した。
- (3) 地盤中に根入れを有する剛体の振動特性は非線形性の高い挙動を示すと考えられるが、地盤の変形係数や剛体の形状に関して定義した Q_1 や Q_2 などと相関が高いことを示し、これらを説明変数とした回帰式によって剛体の固有振動数を算定できることを示した。
- (4) また、露出長と根入れ深さから定まる根入れ比と剛体の固有振動数が線形関係にあることから、剛体の露出部分を根入れ0とみなして算定した固有振動数と根入れがある状態での実測固有振動数の比をパラメータとして、根入れ深さの推定式を提案した。
- (5) 提案する根入れ深さの推定式では、根入れの実長との相関は比較的高いが、誤差が最大で±10cm程度生じる場合がある。しかしながら、2方向からの打撃により計測した固有振動数によって算定した推定根入れ深さを平均化することにより、誤差±5cm程度の精度で地盤中の根入れ深さを推定することが可能となる。

6. おわりに

本論文で提案した推定式の精度を高めるためには、より多くの解析的検討が必要となる。また実斜面における転石への適用に当たり、傾斜地盤における転石の振動特性の把握や複雑な岩塊の形状近似方法などについて今後検証していく予定である。さらに鉄道における落石危険度の評価は、現場技術者が転石の状況（例えば転石まわりの地盤の固さや局所的な浸食の有無など）を目視することにより判断している。振動特性のみによる評価方法ではなく、従前から行ってきた検査の着眼点も加味した総合的な危険度評価方法へと発展させていくことが重要であると考えている。

付記：本研究の一部は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」（研究題目：遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価法，共同研究者：鉄道総合技術研究所，岐阜大学，応用地質(株)，西日本旅客鉄道(株)）によるものである。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，pp.2-4，1999.3.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，pp.7-9，2000.6.
- 3) 緒方健治，松山裕幸，天野淨行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，No.749 /VI-61, pp.123-135, 2003.12.
- 4) 竹本 将，藤原 優，横田聖哉，三塚 隆，甲斐国臣，岡本 栄：落石危険度振動調査法を用いた現地調査および判定システムの開発—落石の危険度を現地で判定するシステムの開発—，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9.
- 5) 斎藤秀樹，大塚康範，上半文昭，小嶋謙一，村田 修，馬 貴臣，沢田和秀，八嶋 厚，深田隆弘：遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価に関する基礎実験，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9.
- 6) 斎藤秀樹，大塚康範，馬 貴臣，沢田和秀，上半文昭，村田 修，深田隆弘：遠隔非接触振動計測による岩塊の安定性評価に関する検討，第46回地盤工学研究発表会，2011.7.
- 7) 深田隆弘，森 泰樹，澁谷 啓：線路への影響評価に基づく落石リスクマップの作成手法，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 68，No. 1，pp.199-212，2012.3.
- 8) 深田隆弘，泉並良二，森 泰樹：斜面上転石の振動計測を目的としたシステム構築と計測結果に関する考察，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9.
- 9) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，p.191，1996.3.
- 10) 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・抗土圧構造物），p. 129，2000.6.
- 11) 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・抗土圧構造物），p. 88，2000.6.
- 12) 物部長穂：地震上下動に関する考察並びに振動雑論，土木学会誌，第10巻，第5号，1924.10.
- 13) 望月利男，小林計代：単体の運動から地震動加速度を推定するための研究—単体の動的挙動の解析—，日本建築学会論文報告集，第248号，pp.63-70，1976.10.
- 14) 小坪清真：土木振動学，森北出版，pp.106-109，1984.9.
(2012年3月8日 受付)