

基盤に強制変位入力した場合の地表面に設置した物体の飛び跳ねに関する
数値解析的検討

Numerical simulation of jumping of object set on ground due to inputting forced displacement at bedrock

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
大阪市立大学
神戸大学

○名誉会員
正員
学生員
フェロー
名誉会員

岸 徳光
小室 雅人
瓦井 智貴
園田恵一郎
櫻井 春輔

(Norimitsu Kishi)
(Masato Komuro)
(Tomoki Kawarai)
(Keiichiro Sonoda)
(Shunsuke Sakurai)

1. まえがき

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、阪神・淡路地域の建物や社会基盤施設に甚大な被害を及ぼした。また、ドンドンと上方への突き上げがあった、ベットやピアノ、金庫等がジャンプして動いた¹⁾、あるいは電車が横倒れせずに脱線していた(大開駅に繋がるトンネル内で共著者の櫻井が確認)等の聞き取り調査や、コンクリート橋脚の輪切りひび割れの発生、橋脚上端あるいは下端付け根部の圧壊の事案も多数見られ、横揺れでは説明ができないような現象も多数発生している。

このように、金庫や電車等の重量物が突き上げによってジャンプしたという聞き取り調査結果がある一方で、重

量物は重力が作用していることから飛び跳ね等の現象は起きないとする考え方もある。

本研究では、このような現象を数値解析的に検証することを目的に、地下鉄大開駅中柱が倒壊した地点の地層を用い、地表面上に長い重量物を想定して幅1m、高さ0.5m、長さ10mで重さが約40tonの鋼材が置かれている場合に対して、基盤部に上方への強制変位を入力した場合の時刻歴応答解析を試みた。なお、本研究では、入力継続時間を5msとし、変位速度を0.5m/sから最大4m/sまで変化させた場合について検討を行った。

2. 数値解析の概要
2.1 数値解析モデル

図-1には、数値解析モデルを示している。図示のように、解析では地表面から深さ44.3mに位置する基礎岩盤までの地盤を考慮し、幅方向には10m、奥行き方向には40mの領域を考慮し、中央部に鋼材を配置し、幅方向と

表-1 地層の物性値一覧

	密度 (g/cm ³)	弾性 係数 (MPa)	せん断 波速度 (m/s)	ポア ソン比 ν
地盤1	1.90	99.3	140	0.333
地盤2	1.90	110.8	140	0.488
地盤3	1.90	164.0	170	0.493
地盤4	1.90	204.9	190	0.494
地盤5	1.90	326.1	240	0.490
地盤6	2.00	647.7	330	0.487
地盤7	2.10	1543.5	500	0.470

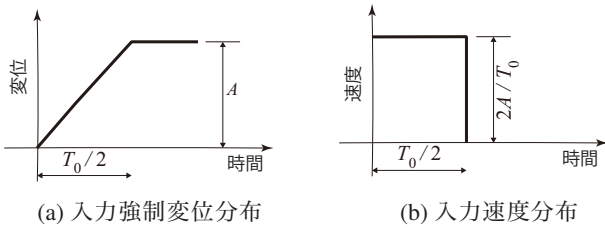


図-2 入力波形

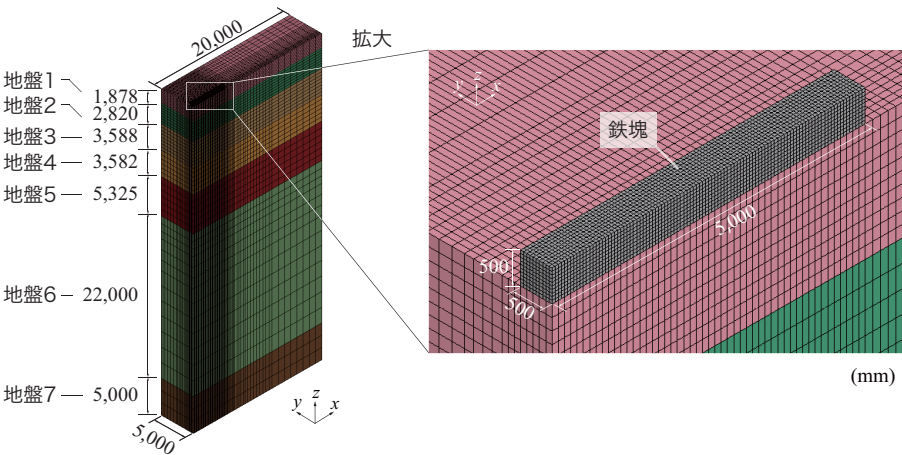


図-1 解析モデルの要素分割状況

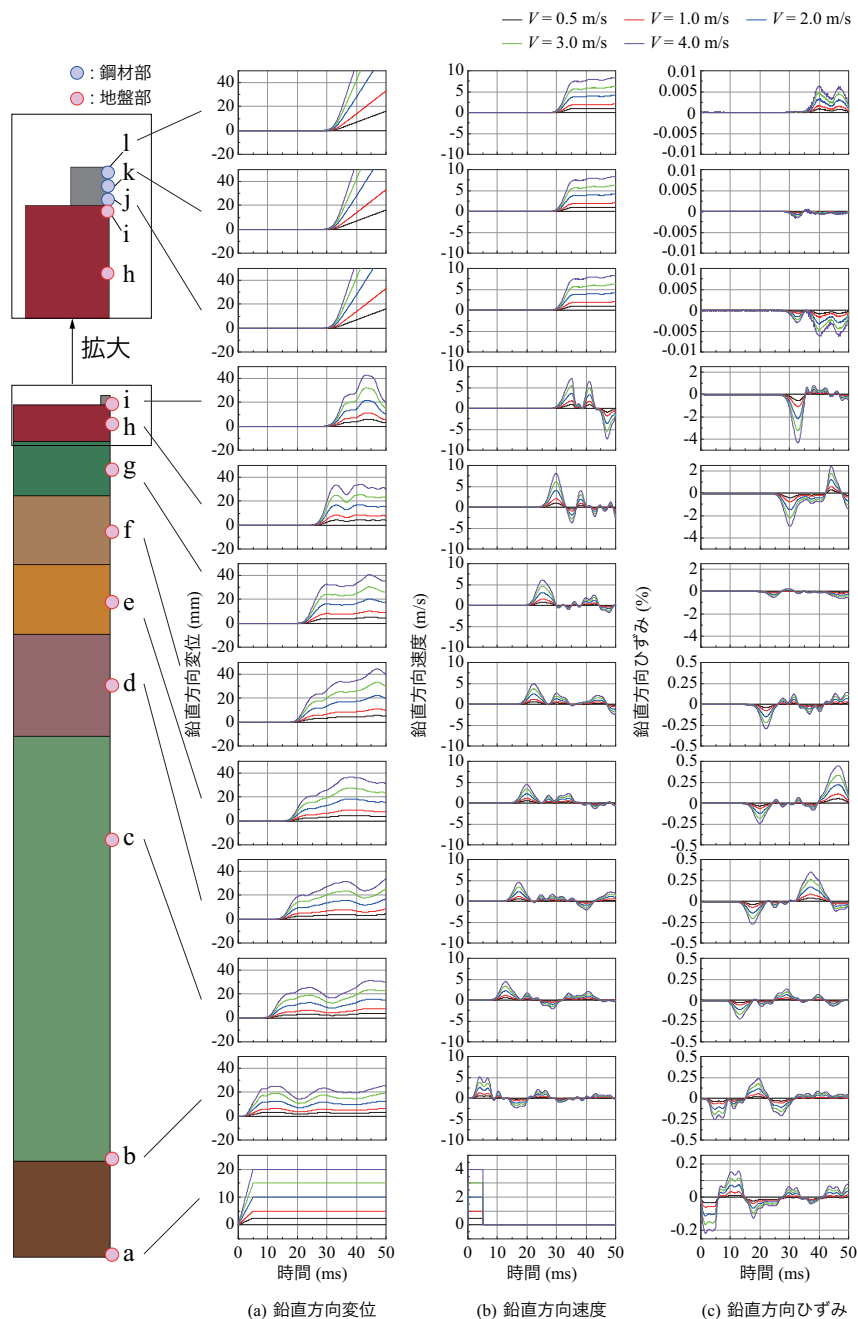


図-3 各点における鉛直方向変位、粒子速度、軸方向ひずみの時刻歴波形

奥行き方向の対称性を考慮して四半分の断面をモデル化することとした。

境界条件に関しては、対称面の節点は法線方向変位を拘束している。また、地盤端部及び基礎岩盤部には無反射境界を設定している。なお、数値解析には自重を考慮し、スプリングバックを施している。減衰定数は、入力変位の継続時間が後述のように5 msであることより、鋼材の動的挙動への影響が小さいものと判断し、考慮していない。

2.2 材料構成則

鋼材は弾性体と仮定した。また、単位体積質量 ρ_s 、弾性係数 E_s 及びポアソン比 ν_s は公称値を用い、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$ とした。

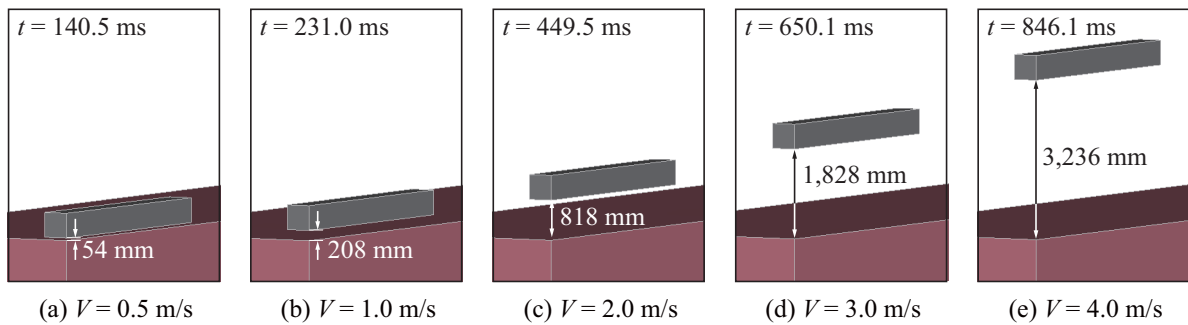
なお、地盤部に関しては、均一な層状であることから全て弾性的に挙動するものと仮定し、物性値は当時のボー

リング調査結果に基づいてモデル化²⁾し、表-1のように決定している。

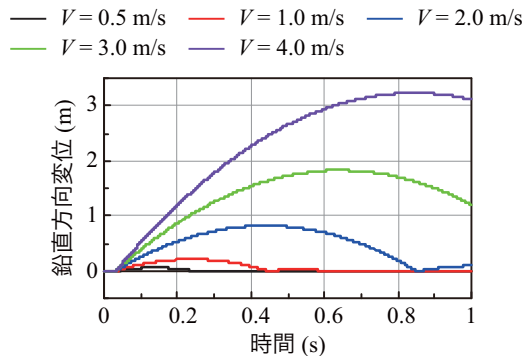
2.3 数値解析ケース

数値解析は、図-2(a)に示しているように、強制変位による入力波動の周期を T_0 とし、基盤レベルに同一速度で半周期に相当する時間 ($T_0/2$) だけ上方に変位させる(変位量は A となる) ことにより行っている。従って、その時の変位速度 V は、(b) 図のように $V = 2A/T_0$ となる。

本研究では、このような条件下で、入力速度の大きさによる影響を検討するために、強制変位の継続時間 ($T_0/2$) を $T_0/2 = 5 \text{ ms}$ とし、変位速度 V を最小 $V = 0.5 \text{ m/s}$ 、最大 $V = 4 \text{ m/s}$ として種々変化させた場合について検討を行うこととした。なお、本数値解析は、構造解析用汎用コード LS-DYNA (Ver. R9)³⁾ を用いて行った。



図－5 最大飛び跳ね時における鋼材の変位状況



図－4 鋼材の飛び跳ねの時間的な推移状況

3. 数値解析結果及び考察

図－3には、変位速度を変化させた場合の载荷初期から50 ms間における土中及び鋼材中を伝播する鉛直方向変位、粒子速度、及び軸方向ひずみの波形分布を比較して示している。以下簡単に考察を行う。

(a)図の鉛直方向変位波形を見ると、変位波形は基盤から地表面まで各地層の伝播速度に対応して立ち上がり時間が遅れて応答していることが分かる。

鋼材が接している地表面上の節点とその直上の鋼材の節点の変位波形を見ると、地表面では入力初期から約 $t = 35$ ms経過後に約5 ms程度の間はほぼ一定値の変位分布を示している。しかしながら、鋼材の節点ではその後も単調に増加していることから、鋼材は地表面から離れて上方に推移していることが分かる。鋼材部の着目節点である j, k, l 点での変位波形が類似していることから、鋼材は剛体的に飛び跳ねていることが推察される。

また、地表面部は、 $t = 50$ ms前後から上方に変位していることから、鋼材が飛び跳ねた後に自由表面状態に至っていることが推察される。

(b)図の粒子速度波形において、特に第1波目の波動の伝播状況を見ると、基盤から地表面まで変位波形に対応した性状を示していることが分かる。地表面上の i 節点での波形を見ると、 $t = 35$ ms前後で急激に零レベルまでの減少傾向を示すのに対して、鋼材の節点では減少傾向を示さずほぼ一定の値を保持しており、明らかに地表面と鋼材とは異なった性状を示していることが分かる。地表面の粒子速度が減少傾向を示したのは、鋼材が地表面から離れ、地表面が自由表面状態に至り上向きの反射波が下方に伝播したことによるものである。また、鋼材が一

様な値を示したのは単調に上方に推移したことによるものと判断される。

(c)図のひずみの波形分布を見ると、基盤部では粒子速度に対応したひずみ波形を示していることが分かる。その後、圧縮ひずみは各地層の伝搬速度に対応して地表面まで伝播している。また、地表面に接している鋼材の節点では地盤から圧縮ひずみが確実に伝播していることが確認できる。鋼材の上表面の節点では $t = 35$ ms前後まで零ひずみを示していることから、下からの圧縮ひずみを打ち消すように反射波としての引張ひずみが生成され下方に伝播しているものと推察される。

図－4には、各変位速度に対して1 sまでの鋼材の飛び跳ねの推移状況を比較して示している。図より、変位速度の大きさに対応して飛び跳ねの高さも増加傾向にあることが分かる。また、鋼材には重力加速度も付加されていることにより、最大高さに達した後徐々に落下する状況が示されている。特に、変位速度が $V = 2$ m/sの場合には、地盤に着地後リバウンドしている状況が確認できる。

図－5には、各変位速度に対する、鋼材の最大飛び跳ね時の変位状況を拡大率を1として示している。図より、いずれの変位速度に対しても鋼材全体が同程度に飛び跳ねることが明らかになった。重量物の場合においても、変位速度が $V = 1$ m/sで200 mm程度飛び跳ねることより、直下型地震時における突き上げによって電車は脱線する可能性のあることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、直下型地震時における重量物の飛び跳ね現象の再現解析を行うことを目的に、全重量が約40 ton、幅1 m、高さ0.5 m、長さ10 mの鋼材を地表面に置き、基盤に継続時間が5 msで変位速度を種々変化させた場合の数値解析を実施した。その結果、変位速度が0.5 m/s程度の場合においても飛び跳ねの傾向を示し、変位速度の増加に対応して飛び跳ね量も大きくなることが明らかになった。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災の調査報告(紀要特別号)資料：初期上下動の証言集，1991年1月，大阪市立大学工学部
- 2) 神戸高速鉄道東西線大開駅災害復旧の記録，平成9年1月，佐藤工業株式会社
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.