

鉄道道床多角形砕石粒状集合体の地震時の運動エネルギー特性

国立大分高専 学生員○ 河野 正寿
 国立大分高専 正員 相川 明

1. はじめに

砕石道床に外部より加えられた地震波のエネルギーは、道床内部にて、砕石の運動、ひずみ・応力等の内力、ブロックの衝突、摩擦力や粘性力、位置エネルギー等に変換されて消費される。本研究は、砕石道床の地震対策に役立てるため、地震時における砕石道床内部の局所的な運動を不連続変形法解析 (DDA) を用いて再現し、水平方向の動的荷重に対する道床内部の破壊進展と、砕石の運動エネルギー特性について検討するものである。すなわち、局所的な体積膨張と砕石運動に着目し、砕石の運動エネルギー量 (水平 E_x 、鉛直 E_y 、回転 E_r) を定量的に算出し、局所的な破壊進展と砕石運動の関係について調べた。

2. 解析モデルの作成と解析条件

砕石形状を測定し、DDAにより砕石を自由落下させ、振動締固めて道床横断面モデル (図-1) を作成した。底盤載荷点に $f = 1, 2, 4, 8$ Hz の正弦波地震 (加速度 $a = 200 \sim 500$ gal) 相当の水平変位波形 $x = \{a/(2\pi f)^2\} \sin(2\pi ft)$ を 2 秒間強制変位として加えて、軌道下部 (中心部) と道床側方部 (周辺部) の水平変位、鉛直変位、回転角、面積変化率の時刻歴応答 ($\Delta t = 0.5$ ms) を計算した。

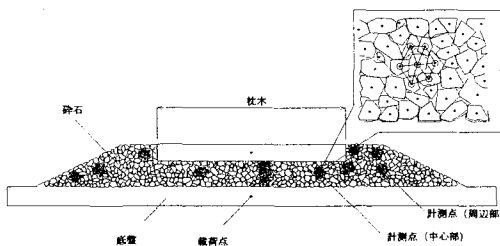


図-1 解析モデル図

3. 局所的な運動エネルギーの算出方法

計測点の変位時刻歴応答を微分し、速度 (v_x, v_y) と角速度 (ω) の時刻歴を求め、質量 m と回転モーメント I_{xy} を乗じて、運動エネルギー ($E_x = (1/2)mv_x^2, E_y = (1/2)mv_y^2, E_r = (1/2)I_{xy}\omega^2$) を求めた。さらに、運動エネルギーの時刻歴での平均値を mg で除して、砕石の大きさによる影響を基準化し、高さの次元 ($h_x = E_x/mg, h_y = E_y/mg, h_r = E_r/mg$) で運動エネルギー量を表示した。

4. 計測点ブロックの時刻歴応答特性

解析例として、4Hzにおける時刻歴応答を図-2～図-5に示す。入力波の周波数と加速度、および、道床の中心部と周辺部について比較すると以下の通りである。

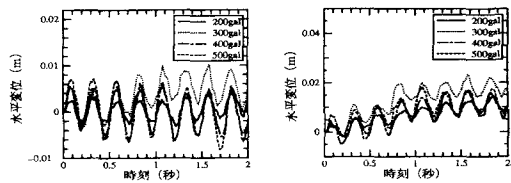


図-2 水平変位の時刻歴応答 (左:中心部, 右:周辺部)

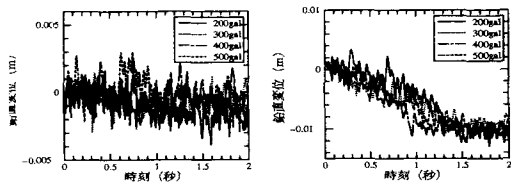


図-3 鉛直変位の時刻歴応答 (左:中心部, 右:周辺部)

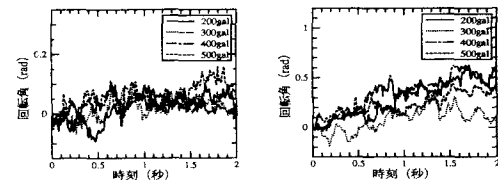


図-4 回転角の時刻歴応答 (左:中心部, 右:周辺部)

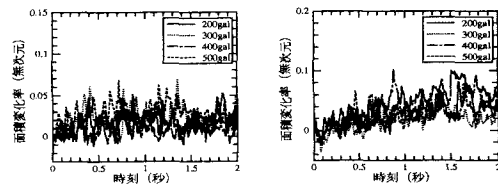


図-5 面積変化率の時刻歴応答 (左:中心部, 右:周辺部)

- (1) 水平変位についてはどの入力周波数でも、ほぼ入力した正弦波に近い波形となり、道床の中心部では、連続体のように全体が一体的な挙動となった。一方、周辺部では、概ね入力周波数に近い波形とはなったが、時間経過に伴い右方向へと移動した。
- (2) 鉛直変位については、周辺部の沈下量が中心部よりも大きくなった。これは、周辺部は中心部に比べて、

周囲のブロックの拘束が小さく、砕石が比較的自由に運動できるためと考えられる。また、水平変位に比べて、高周波の成分を多く含んでいる。

- (3) 回転角は、高周波の微小な変動を繰り返す、一方向への動きとなった。回転角の大きさは、周辺部の方が中心部よりも大きい。
- (4) 鉛直変位・回転角の結果から、面積変化率に含まれる高周波成分は、鉛直変位と回転角の高周波成分との関係性が高いものと推察される。

5. 計測点ブロックの運動エネルギー特性

計測点ブロックの運動エネルギーの時刻歴上での平均値 (h_x, h_y, h_r) を求め、それらの総和 ($h = h_x + h_y + h_r$) を求めた。図-6～図-9に、中心部・周辺部の運動エネルギー総量(単位 m)とその構成を示す。

図より、入力周波数の増加により、運動エネルギー総量は減少し、入力加速度の増加により、運動エネルギー総量は増加する傾向が見られる。これは、本解析では加速度を一定としたので、運動エネルギーの総量は入力周波数の2乗に反比例し、入力加速度に比例するためである。

また、中心部と周辺部を比べると、周辺部の方が運動エネルギー総量が大きくなった。これは、周辺部は周囲のブロックの拘束が小さく、砕石が比較的自由に動けるためであり、さらに沈下による位置エネルギーが運動エネルギーに変換された可能性がある。一方、中心部では、隣接ブロックとの摩擦や、砕石内部の歪みエネルギー等に消費される割合が大きいものと考えられる。

上述のように入力周波数の増加に伴い、運動エネルギーは減少するが、特に水平運動エネルギーの減少傾向は顕著である。それに対して、鉛直方向や回転の運動エネルギーの減少量はわずかであり、場合によっては増加している。

このことから、道床内部の破壊要因としては、低周波では、道床が全体として一体的に動くことによる水平変位の影響が大きく、一方、高周波になるにつれて、個々の砕石のランダムな挙動による鉛直方向と回転運動の影響が大きくなったものと考えられる。周波数に依存するこれらの挙動の差異は、砕石挙動に関する模型実験の結果¹⁾⁻²⁾に符合する傾向であり、本解析の妥当性を示している。

6. 結論

本研究で得られた知見について以下に列挙する。

- (1) 面積変化率は水平変位、鉛直変位、回転角の3つの要素からなり、入力周波数よりも高い周波数の応答

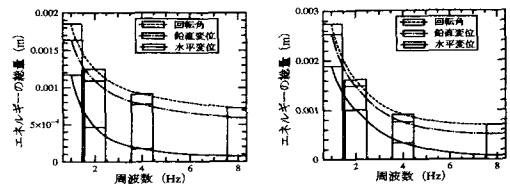


図-6 中心部の運動エネルギー総量 (左:200gal,右:300gal)

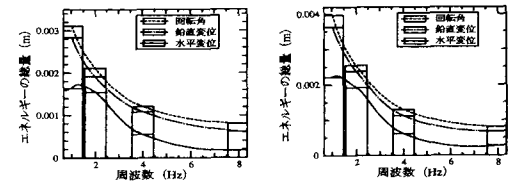


図-7 中心部の運動エネルギー総量 (左:400gal,右:500gal)

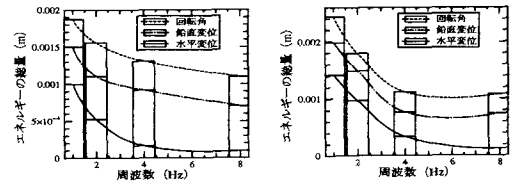


図-8 周辺部の運動エネルギー総量 (左:200gal,右:300gal)

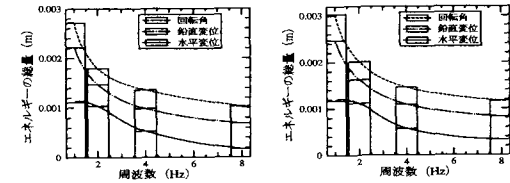


図-9 周辺部の運動エネルギー総量 (左:400gal,右:500gal)

が顕著であり、鉛直変位と回転角の発生量が、砕石道床内部における、軌道直下の破壊の要因として考えられる。

- (2) 入力周波数の増加に伴い、局所的な砕石の運動エネルギー総量および水平方向の運動エネルギー量については減少傾向にあるものの、鉛直方向および回転の運動エネルギー量は殆ど減少しない。
- (3) 道床内部の砕石の挙動の要因には、周波数によって差異があり、低周波では水平変位の影響が大きく、一方、高周波になるにつれて、鉛直変位・回転角の影響が大きくなる。

参考文献

- 1) C.Cholet,et.al.(2003) : Mechanical Behaviour of the Ballast using Discrete Element Methods, WCCR2003, pp.877-884.
- 2) Holger Kruse & Karl Popp(2002) : Model-Based Investigation of the Dynamic Behavior of Railway Ballast, System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade, pp.275-294.