

繰返し衝撃荷重下の砕石層の変形挙動に関する模型実験とDEMシミュレーション

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 河野 昭子
筑波大学 正会員 松島 亘志

1. はじめに

繰返し荷重下の道床バラスト層の沈下特性に関しては、これまで実物大試験から模型試験まで、様々な実験的研究が行なわれているが、荷重周波数 - 載荷・除荷の速度 - の影響に着目した実験は、繰返し高周波荷重の制御が難しいことなどから、ほとんど行われていない。そこで本研究では、ステッピングモータを用いた繰返し衝撃載荷試験装置を開発し、荷重振幅一定下で、荷重周波数の異なる繰返し載荷試験を行い、沈下特性に与える影響を検討した。



図1 繰返し衝撃載荷試験機

2. 繰返し載荷実験

2-1 試験機：試験機は図1に示す通りで、載荷部は、ステッピングモータの回転によってネジ棒が上下する仕組みとなっている。ステッピングモータは、制御用ロードセルによって設定荷重を感知し、回転・反回転する。載荷周波数は、最大2kNの載荷で約2~55Hzまで制御可能となっている。

2-2 供試体：本試験では、図2に示すサイズの粒子層を構築した。試料は安山岩砕石と鋼球で、安山岩砕石は、図3に示す実バラストの1/3の相似粒度に調整した。鋼球は、6通りのサイズの鋼球を砕石の粒度と同程度になるようにブレンドした。供試体の間隙比は、砕石で0.615、鋼球で0.621であった。

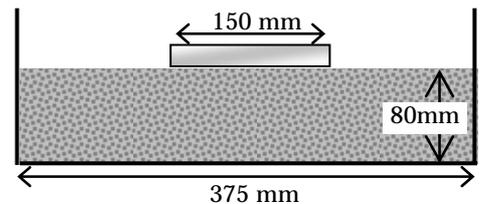


図2 供試体

2-3 載荷条件：図4に繰返し荷重の入力波形を示す。ここで、載荷間隔は0.5秒(2Hz相当)とし、一波の荷重周波数(載荷速度)は、5Hz相当、20Hz相当、50Hz相当の3通りとした。荷重振幅は、砕石ケースで1kN、鋼球ケースでは0.2kNとした。

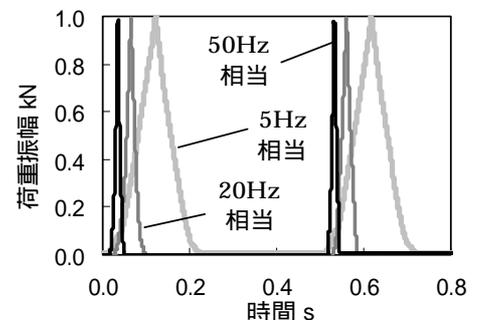


図4 入力荷重波形例

2-4 実験結果：実験結果より、載荷回数と残留沈下量の関係を、砕石ケースを図5に、鋼球ケースを図6に示す。図より、砕石と鋼球では、同じ載荷50回目の沈下量でも10倍近い差異があり、荷重振幅を、鋼球は砕石の1/5にしたことも考慮すると、支持力に大きな差があると言える。

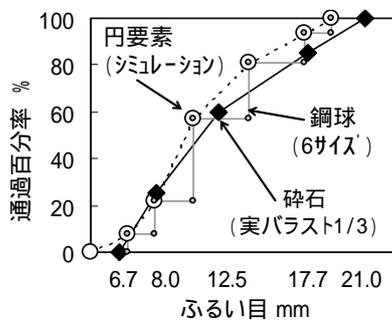


図3 試料の粒度分布

ここで、図5、6の載荷回数-残留沈下曲線を式(1)で近似して得られる沈下進み係数について、砕石ケース2セット、鋼球ケース5セットの実験結果から得られた値を図7に示す。

$$y = (1 - e^{-x}) + x \cdots (1) \quad \text{ここで、} y \text{ は残留沈下、} x \text{ は載荷回数である。}$$

図7より、沈下進み係数は、試料が砕石でも鋼球でも、一波の荷重周波数が大きいほど大きくなる傾向が見られる。

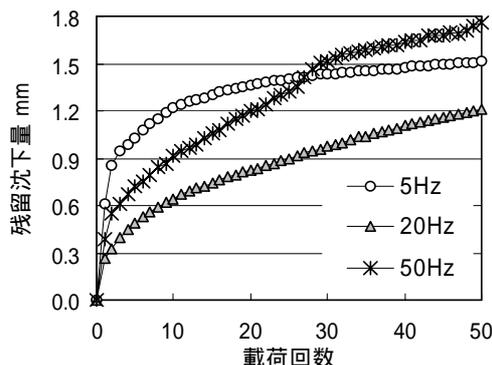


図5 載荷回数-残留沈下の関係の例(砕石)

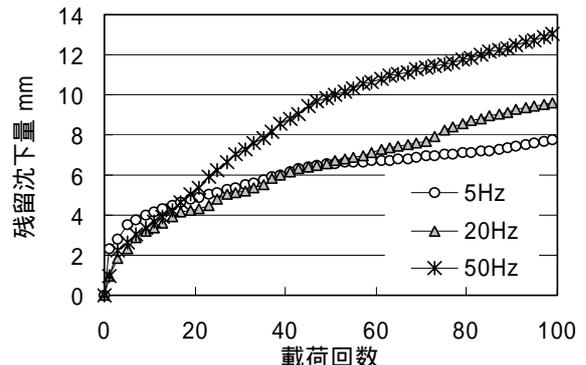


図6 載荷回数-残留沈下の関係の例(鋼球)

3. DEMによる繰返し荷重シミュレーション

実験結果より、繰返し荷重下の粒子集合体の沈下過程において、一波の荷重周波数が影響することが示されたが、ここでは、DEMによる繰返し荷重シミュレーションを行い、粒子の挙動を観察する。

3-1 モデルと荷重条件：円要素モデルを用いて、2で述べた鋼球を用いた実験の5Hzと50Hzの場合の再現シミュレーションを行う。供試体サイズおよび荷重条件は実験の鋼球ケースと同様とするが、荷重回数は50回とする。円要素の粒度については、実際に用いた鋼球は粒径が6通りであるが、鋼球が供試体の奥行方向に3次元的に配列することで、任意の2次元断面では、各サイズ間の径もあることを考慮し、図3に示す通りに調整した。

3-2 パラメータ：DEMシミュレーションに用いるパラメータを表1に示す。ここで、法線方向の粒子間バネ係数Knは、式(2)に示すヘルツの接触理論の近似式を用いて、Eに鋼球のヤング率 $2.0 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ 、 ν に鋼材のポアソン比0.28、Pに荷重板直下の各粒子が受ける最大荷重を代入して求めた。接線方向の粒子間バネ係数Ksは、式(3)に示す弾性係数Eとせん断弾性係数Gの比によって算出した^{*1)}。粒子間の減衰係数は、式(4)で、鋼球の反発係数 e_b を0.8^{*1)}、mを円要素の最小質量、kを上述のバネ係数として算出した。粒子間の摩擦係数は、鋼球の一般的な値を参考にして^{*1)}0.35とした。

$$Kn = \frac{4b}{3\pi(\delta_i + \delta_j)} \dots \text{式(2)}$$

ここで $\delta_i = \frac{1-\nu_i^2}{E_i\pi}$ $\delta_j = \frac{1-\nu_j^2}{E_j\pi}$ $b = \sqrt[3]{\frac{3(1-\gamma^2)r_i r_j P}{2E(r_i + r_j)}}$

$$Ks = \frac{G}{E} Kn = \frac{Kn}{2(1+\gamma)} \dots \text{式(3)}$$

$$e_b = \exp\left(-\frac{h\pi}{\sqrt{1-h^2}}\right) \quad h = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \dots \text{式(4)}$$

3-3 シミュレーション結果：繰返し荷重シミュレーション結果より、荷重回数と残留沈下量の関係を図8に示す。図6の実験結果と比較すると、シミュレーション結果の50回目の残留沈下量は、50Hzの結果では実験結果と同程度であるが、5Hzの結果では実験結果の約2倍であり、定量的には実験結果と差異がある。一方、初期荷重において5Hz荷重で沈下が大きいため、またの値において50Hzの場合の方が5Hzより大きい点においては、実験結果と同様の傾向が得られた。

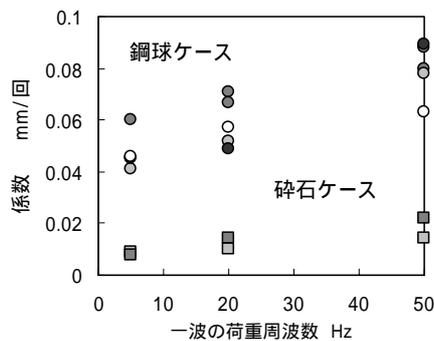


図7 沈下進み係数

表1 DEMパラメータ

粒子間バネ係数	法線方向	$2.21 \times 10^7 \text{ N/m}$
	接線方向	$8.63 \times 10^6 \text{ N/m}$
粒子間減衰係数	法線方向	$377 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
	接線方向	$236 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
表面摩擦係数		0.35

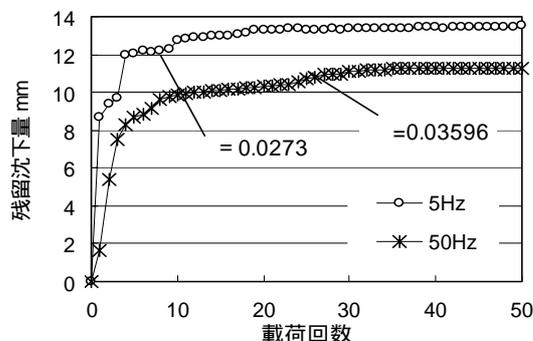


図8 荷重回数-残留沈下量の関係 (DEM)

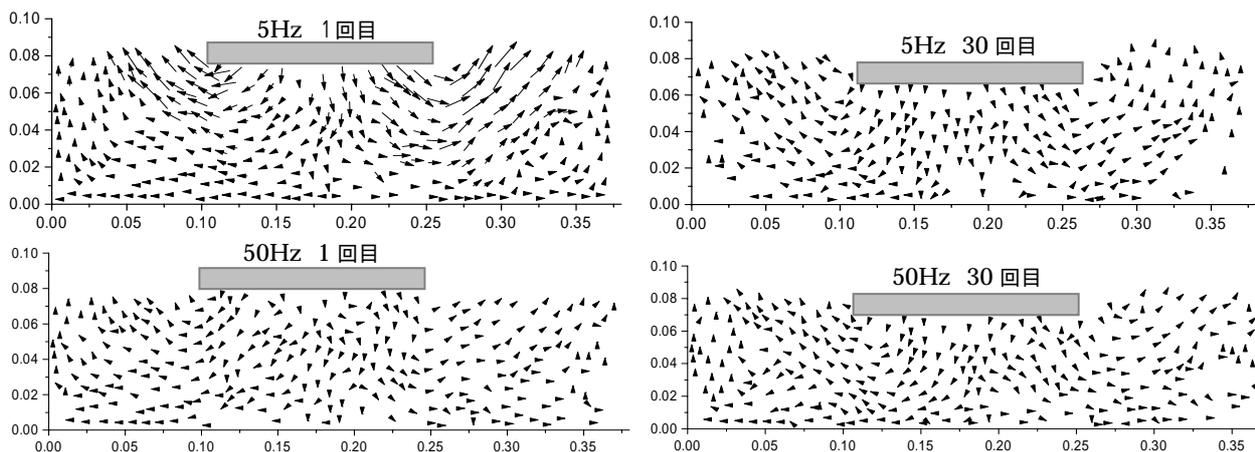


図9 荷重1回目および30回目の粒子の移動

次に図9に、荷重周波数5Hzと50Hzにおける荷重1回目と30回目における粒子の移動を示す。これより、荷重1回目では、5Hzの場合の粒子の移動が、50Hzに比較して著しく大きい。また荷重30回目では、粒子の移動は同程度だが、50Hzの場合の方が、移動する粒子が多い。

4. おわりに

模型実験とDEMにより、繰返し荷重下の粒子層の沈下特性に、荷重の周波数が影響すること、その影響が、初期沈下と漸進沈下の過程において異なることが明らかとなった。この影響が何によるものかについての検討は、今後の課題とする。

参考文献 1) 粉体シミュレーション入門, 粉体工学会 編, 2001年