

高波による海岸鉄道の線路被害の再現実験

Hydraulic Model Test on Damage Mechanism of Coastal Railway Tracks by High Waves

室蘭工業大学大学院 博士前期課程 ○学正員 村上 樹生 (Tatsuki Murakami)
 室蘭工業大学大学院 教授 フェロー 木村 克俊 (Katsutoshi Kimura)

1. はじめに

海岸沿いを走る鉄道は高波浪時に越波の影響によって列車の運休が発生することがある。さらに高波浪が継続することにより、道床部が流出し、線路が押し流されているケースも確認されている。太平洋岸に位置するH線においては過去に多くの高波被害を受けており、このうちK海岸では2015年1月8日の高波被害により、当該区間の営業が休止された。本研究ではK海岸を対象として、道床が流出し、線路が押し流されるまでの被害メカニズムを水理模型実験によって明らかにすることを目的とする。

2. 現地の状況

写真-1にK海岸における越波による線路の滑動状況を示す。列車の進行方向約10mの区間で道床が流出し、線路が岸側に1m程度押し流されている。この被害は現地において護岸前面の消波ブロックが沈下したことにより越波が増大したため、発生したと推測される。また近隣の波浪観測地点のデータを用いて分析した結果、線路の被害が発生した時点の波浪条件を $T_0' = 13\text{ s}$ 、 $H_0' = 4.0\text{ m}$ と推定した。

3. 実験の方法

3.1 越波実験

2次元造波水路(長さ24.0m、幅0.6m、深さ1.0m)において1/30勾配の海底地形と縮尺1/30の護岸模型を作



写真-1 線路の滑動状況

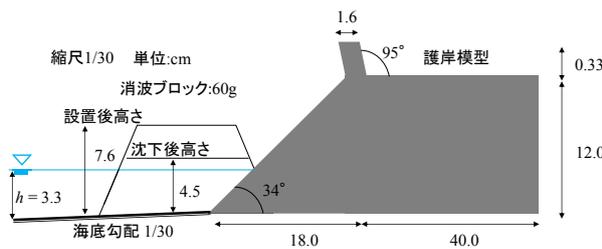


図-1 消波ブロック設置後の護岸の形状

成した。実験はすべて不規則波(150波1波群)を用いており、現地換算で周期 $T_0' = 13\text{ s}$ 、波高 $H_0' = 0.75, 1.50, 2.25, 3.00, 3.75, 4.50, 5.25\text{ m}$ の7パターンとした。護岸模型は「消波ブロック設置後」、「消波ブロック沈下後」、「消波ブロックなし」の3種類とした。このうち「消波ブロック設置後」の断面形状を図-1に示す。消波ブロックは60gを使用し、消波工の高さは「消波ブロック設置後」を2層厚の7.6cm、「消波ブロック沈下後」を1層厚の4.5cmとする。これらの構造条件に対して、越波流量と線路位置での流速を測定した。

3.2 段波実験

2次元造波水路(長さ9.0m、幅0.6m、深さ0.4m)内に図-2に示す縮尺1/4の線路模型を設置した。枕木は木製とコンクリート製の2種類を用いた。線路のレールは高さ3.5cmのI形鋼、枕木は長さ50cm、高さ4.5cmの直方体である。また道床に使用した砕石の粒径は20mm~60mmである。実験において水路内に敷き詰めた高さ5.5cmの道床の中に枕木を埋め込み、線路を敷設した。そこへ段波を作用させ、道床の流出と線路の滑動状況を確認した。さらに線路位置に流速計を設置し、各貯留水

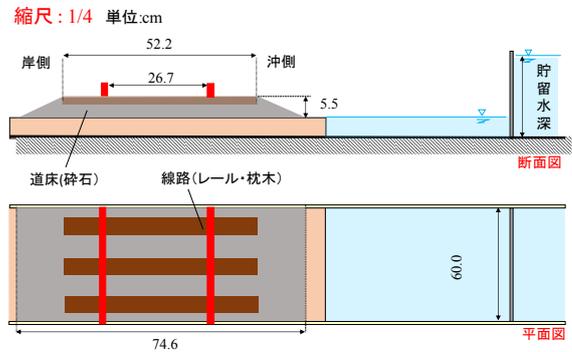


図-2 段波実験の線路模型

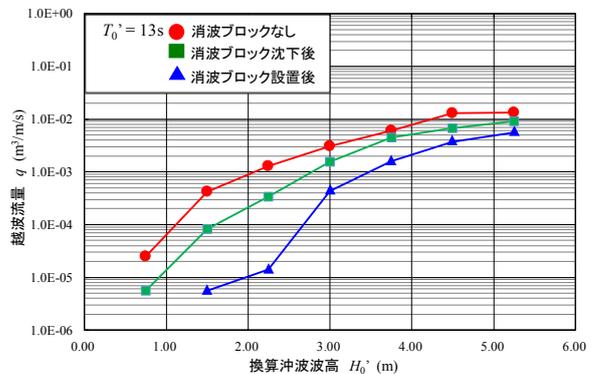


図-3 護岸形状による越波流量

深に対する流速を計測した。なお、段波は水路端部に設置したピット内に水を溜め、ゲートを急開することで発生させている。

4. 越波特性

図-3 に換算沖波波高と越波流量の関係を示す。消波ブロックの状況による越波流量の違いが明瞭となっている。今回被害が発生した消波ブロック沈下後においては、 $H_0' = 1.50 \text{ m}$ から越波飛沫が発生し、 3.00 m から越流が生じていることが明らかとなった。

越波実験により再現した $T_0' = 13 \text{ s}$, $H_0' = 3.75 \text{ m}$ の不規則波群中の 1/25 最大波に着目し、これと同じ時間波形を有する流れを段波実験で再現した。この時の貯留水深は 40 cm となった。線路被害が発生した 1 時間には上記の 1/25 最大波に相当する波が合計 12 回作用していた。

5. 線路に働く流体力

道床が流出した後の線路の滑動を再現するため、枕木を道床に埋め込まない状態で段波を作用させた。図-4 に流れによる抗力と摩擦力の関係を示す。線路に働く力 F_w と流速 U の関係は以下の式で表すことができる。

$$F_w = 1/2 C_D \rho U^2 dl \quad (1)$$

ここで C_D は抗力係数、 ρ は水の密度、 dl は枕木の側面の面積 $d_1 l_1$ を 3 本分足した面積とレールの面積 $d_2 l_2$ の和とする。また枕木に作用する摩擦力は以下の式で表すことができる。

$$F_R = \mu Mg \quad (2)$$

ここで μ は摩擦係数、 M は質量、 g は重力加速度とする。 $F_w = F_R$ のとき線路は安定、 $F_w > F_R$ のとき線路が滑動することを示す。

滑動実験では貯留水深を徐々に大きくし、線路の変位を測定した。木製の線路は貯留水深 31 cm の段波で滑動を始め、コンクリート製の線路は 47 cm で滑動を始めた。

図-5 に線路の重量と流速の関係を示す。図中の丸のプロットは線路の安定、三角のプロットは滑動を示している。2 次曲線は抗力係数 C_D を変化させた理論値を示し、 $C_D = 1.5$ を実線、 2.0 を点線、 2.5 を一点鎖線で描き、実験値との比較を行った。コンクリート製の線路は、抗力係数が $C_D = 2.0 \sim 2.5$ となるのに対し、木製の線路は $C_D = 2.5$ 以上となり、小さな流速で滑動を生じる。その理由は段波作用時に線路が一部浮上し、摩擦力が低下するため、滑動しやすくなることが考えられる。

6. 線路の被害特性

写真-2 は貯留水深 40 cm の段波に対して、道床が流出し、線路が滑動するまでの状況を示している。写真の右が沖側、左が岸側で、上から順に段波作用前、9 波作用後、12 波作用後の被害状況を示す。9 波作用後には道床の岸側の部分で碎石の流出が生じたが、沖側の部分ではあまり変化は見られなかった。道床は波が碎石の間を透過するため、岸側から被害が拡大すると推測される。線路は 12 波作用後に滑動し、前述した越波実験における 1/25 最大波の作用波数と一致した。ここで再現した越流により、K 海岸では線路の滑動が発生しており、越波流量は $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ となる。平野ら¹⁾は道床の流出限界となる越波流量を $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ と示しており、本研究では $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ で線路の滑動が生じることを明らかにした。

7. まとめ

- (1) 現地で確認された線路の滑動被害は越波流量が $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ において発生したことが明らかとなった。
- (2) 線路に作用する抗力と摩擦力の関係式を導き、木製およびコンクリート製の枕木を使用した滑動実験により、その妥当性を確認した。
- (3) 不規則波群中の代表波に相当する流れを複数回作用させることで、現地における線路の被害を再現した。

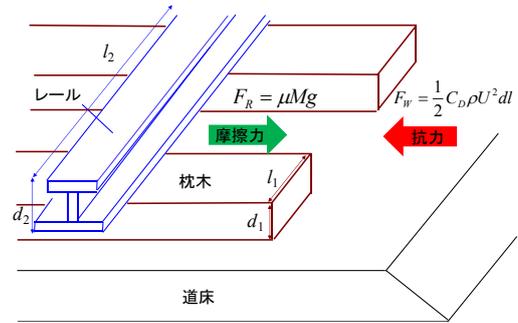


図-4 線路に働く抗力と摩擦力の関係

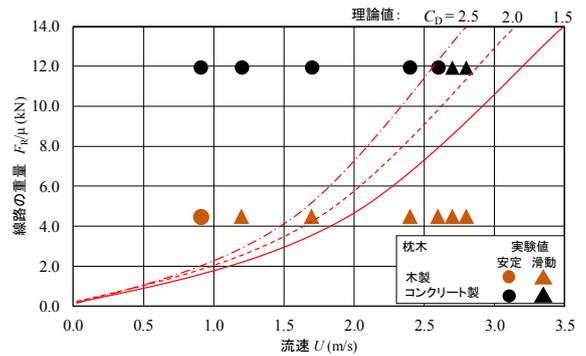


図-5 線路の重量と流速の関係

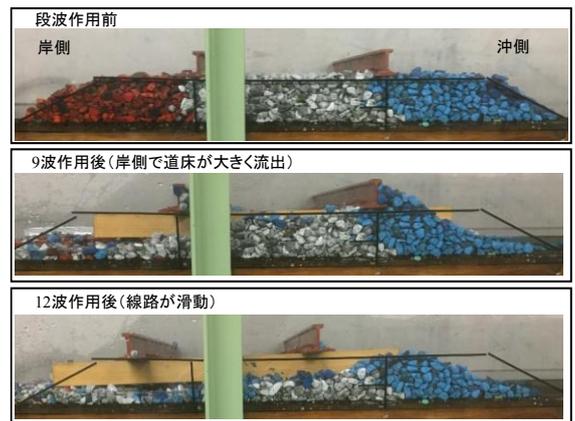


写真-2 線路の被災メカニズム

参考文献

- 1) 平野夕焼, 木村克俊, 越智聖志, 高橋幹夫, 浜口正志: 海岸鉄道の高波による運行限界とその対策に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, I_688-I_693, 2013.