

## 構造物境界部における軌道沈下対策

軌道技術研究部 軌道・路盤  
副主任研究員 桃谷尚嗣

### 1. はじめに

ボックスカルバートや橋台などのコンクリート構造物と盛土が接続する構造物境界部ではバラスト軌道の沈下が大きく、列車の乗り心地が悪くなり、軌道保守上の弱点箇所となることが多い。そのため設計標準では盛土を新設する際に、**図 1**に示すように、粒度調整砕石等を用いたアプローチブロックを設けることとなっている。しかし、供用されている既設の盛土の多くは、設計標準が整備される以前に建設されたアプローチブロックを持たない構造がほとんどであり、開業後数十年を経ても構造物境界部での軌道沈下が見られる。

既設の盛土にアプローチブロックを新たに設けるのは事実上困難であるため、対策としては路盤を強化するのが有効であると考えられる。しかしながら、構造物境界部の路盤に求められる性能についてはこれまで十分な研究が行われてこなかった。そこで、既設盛土の構造物境界部を対象として、軌道沈下を抑制するために必要な路盤構造について、動的解析および模型実験による検討を行った。さらに、構造物境界部において必要となる路盤厚さを定量的に評価する方法を提案した。

### 2. 動的解析による検討

構造物境界部の路盤の変形特性について検討するため、**図 2** および**表 1**に示す解析条件において NASTRAN による二次元動的 FEM 解析を行った。ここでは構造物境界部の構造として、「無対策」、「アプローチブロック」および「踏掛版」の比較を行った。踏掛版は道路舗装では構造物境界部に広く用いられているコンクリート版である。解析では輪重 80kN、軸配置は M 荷重を基本とし、10 両編成の荷重列をボックスカルバートから盛土の方向に 160km/h で移動させた。盛土の剛性については「盛土剛性大」と「盛土剛性小」の二種類を比較検討した。なお、「盛土剛性大」は新設線の盛土に相当し、「盛土剛性小」は粘性土を用いた既設線の盛土に相当する。

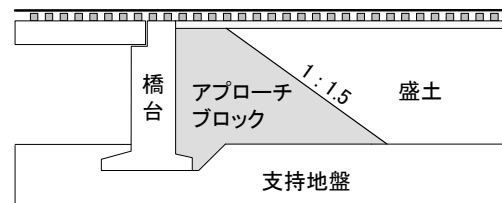


図 1 新設線における構造物境界部の例

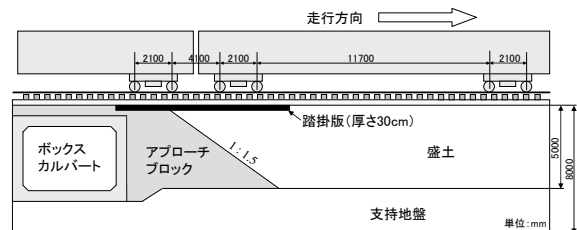


図 2 構造物境界部の解析モデル

表 1 動的解析に用いた物性値

要素	弾性係数 E(MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	密度 (t/m <sup>3</sup> )	備考
レール	210,000	0.3	7.9	梁要素 (50N)
まくらぎ	35,000	0.2	2.3	PCまくらぎ
軌道パッド	110MN/m (一締結あたり)			ばね要素
道床	100	0.4	1.6	バラスト
路盤	180	0.4	2.0	粒度調整砕石
盛土上部 (0-2m)	43	0.4	1.7	盛土剛性大
	15	0.4	1.2	盛土剛性小
盛土下部 (2-5m)	85	0.4	1.7	盛土剛性大
	30	0.4	1.2	盛土剛性小
支持地盤	50	0.4	1.3	
アプローチ ブロック	180	0.4	2.0	粒度調整砕石
ボックス カルバート	30,000	0.2	2.3	コンクリート
踏掛版	30,000	0.2	2.3	コンクリート

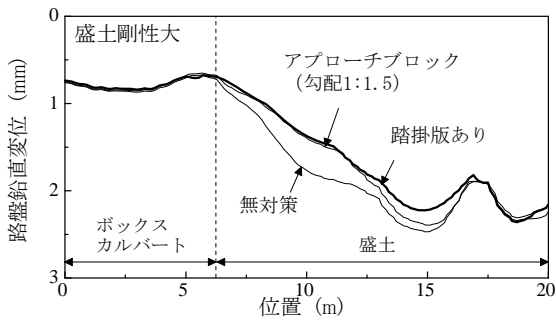


図 3 路盤表面の鉛直変位(盛土剛性大)

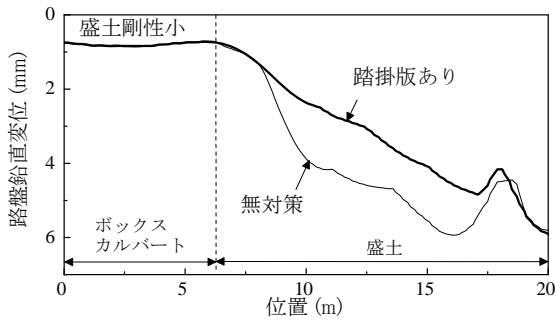


図 4 路盤表面の鉛直変位(盛土剛性小)

盛土剛性が大きい場合の列車走行による路盤表面鉛直変位を図 3 に示す。図より、踏掛版はアプローチブロックと概ね同等の性能を有することがわかった。盛土剛性が小さい場合の路盤表面鉛直変位を図 4 に示す。図より、剛性の小さい盛土の場合、踏掛版などの緩衝構造の効果がより明確に表れることがわかった。

つぎに、支持剛性の変化が輪重変動に与える影響を検討するため、LS-DYNA を用いて輪重変動を考慮した二次元動的 FEM 解析を行った。LS-DYNA の解析モデルを図 5 に示す。ここでは単純化のため、輪重 80kN に相当する質量を与えた車輪を 160km/h で走行させた。

解析の結果得られた輪重の波形を図 6 に、レール面の鉛直変位を図 7 に示す。無対策の場合は 25%程度輪重が減少した後に、20%程度の輪重増加が見られたが、アプローチブロックや踏掛版を用いて軌道支持剛性を滑らかに取り付けることで、輪重の増減を 10%以下に低減できることがわかった。また、アプローチブロックや踏掛版を設けることでレール面の鉛直変位も低減できることがわかった。これらの結果から、踏掛版を用いて路盤を強化することで、アプローチブロックを設置している場合と概ね同等の効果が得られる見通しを得た。

### 3. 移動荷重載荷試験による検討

構造物境界部における軌道沈下対策工法の効果を検討するため、図 8 に示す小型移動載荷試験装置<sup>1)</sup>を用いて、移動する列車荷重を再現した模型実験を行った。模型実験では車両長 20m、10両編成(40軸)の列車荷重を繰返し与えた。

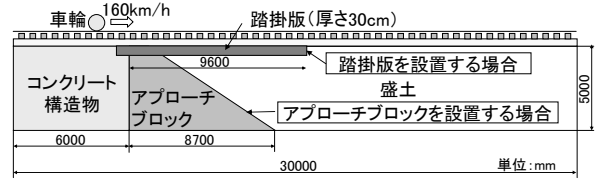


図 5 輪重変動を考慮した解析モデル

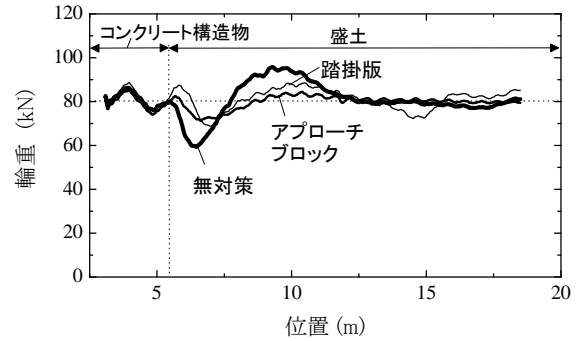


図 6 構造物境界部における輪重変動

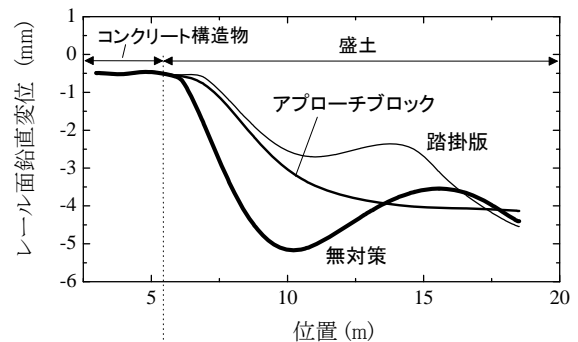


図 7 輪重変動に伴うレール面の鉛直変位

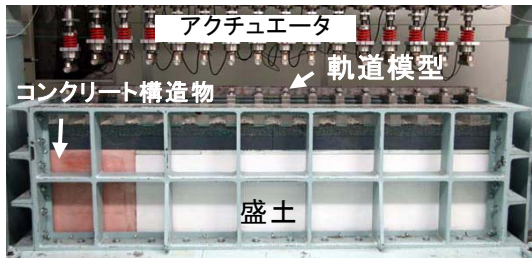


図 8 移動荷重載荷試験(無対策)

模型は縮尺 1/5 とし、実験条件は「無対策」に加え、図 9 に示すように、「アプローチブロック」、「踏掛版」、および「低弾性路盤」とした。「低弾性路盤」はバラストマットを重ねるなどの方法によりコンクリート構造物上の路盤を低弾性化することで、盛土との軌道支持剛性の差を低減させる方法である。

模型のコンクリート構造物はコンクリートブロックで作成し、盛土には EPS (発泡スチロール) を用いた。アプローチブロックおよび路盤は砂質礫を締め固め度 95% に締め固めて作成した。また、バラスト層には道床バラストの 1/5 相似粒度となるように調整した単粒度砕石を用いた。踏掛版はコンクリート製とし、低弾性路盤には厚さ 30mm のウレタンゴムを用いた。

「無対策」の場合のまくらぎ沈下量を図 10 に示す。載荷初期は盛土側の沈下量がやや大きくなるが、局所的な軌道沈下は見られない。しかしながら、50 編成目あたりから徐々に局所的な軌道沈下が現れ始め、200 編成目には大きな局所沈下が生じている。局所的な沈下が生じる位置ではまくらぎが荷重をほとんど受けない浮きまくらぎ状態となっており、まくらぎ沈下の大部分はバラストの流動に起因するものである。この実験では一定荷重で載荷を行っていることから、輪重変動のない場合においても、構造物境界部では局所的な軌道沈下が生じた。すなわち、走行速度が比較的 low 輪重変動が小さいような箇所でも構造物境界部では軌道沈下が生じることを示している。無対策の場合のまくらぎ沈下量を図 11 に示す。「アプローチブロック」の場合に沈下量が最も小さいが、「踏掛版」や「低弾性路盤」の場合においても局所的な軌道沈下の発生を回避しており、レールの折れ角としてはアプローチブロックとほぼ同等となることを確認できた。



(a) 「アプローチブロック」の模型



(b) 「踏掛版」の模型



(c) 「低弾性路盤」の模型

図 9 軌道沈下抑制工法の模型

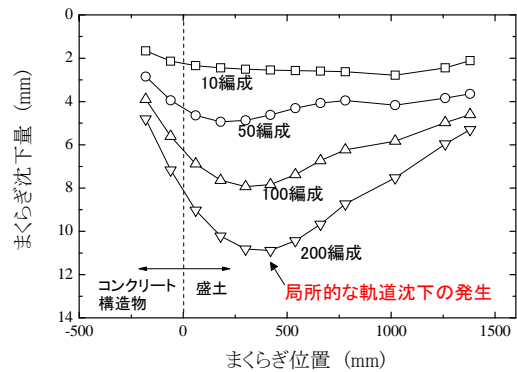


図 10 「無対策」のまくらぎ沈下量

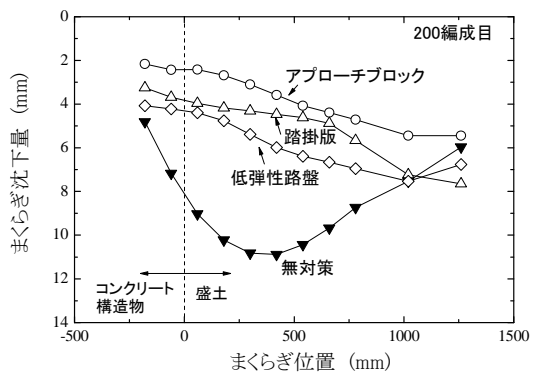


図 11 対策工によるまくらぎ沈下抑制効果

#### 4. 構造物境界部に必要な路盤構造

動的解析および移動荷重載荷による模型実験の結果から、構造物境界部の盛土上において、踏掛版（厚さ 30cm のコンクリート版）程度の路盤剛性を持たせると、アプローチブロックとほぼ同等の性能が得られることがわかった。

構造物境界部に必要な路盤構造を評価する方法として、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」における路床改良厚さの設計方法を参考に、多層弾性解析によって路盤表面の変位を比較した。

静止輪重 80kN に対して 1.5 倍の衝撃荷重が作用し、その 40% が載荷点直下の締結装置に作用すると仮定すると、レール締結に作用する荷重は 48kN となる。そこで、ここでは直径 75cm の範囲に 50kN の荷重が作用した場合の路盤表面の変位を評価した。多層弾性解析には GAMES<sup>2)</sup>を用い、解析条件は表 2 の通りとした。

路盤に粒度調整碎石、セメント安定処理（道路の上層路盤用）およびコンクリート版（踏掛版）を用いた場合の路盤の厚さと変位の関係を図 12 に示す。路盤を強化していない盛土上での変位が 3.18mm であるのに対して、アプローチブロックの場合は、0.43mm となる。路盤を強化することで、変位がアプローチブロックと同程度となれば、アプローチブロックと同等の性能が期待できる。たとえば、コンクリート版で路盤を強化した場合は厚さ 30cm で変位が 0.38mm となり、アプローチブロックと同等の性能となる。この結果は前述の動的 FEM 解析および模型実験結果の結果と整合性がとれる。また、セメント安定処理の場合は厚さを 60cm とすることで、アプローチブロックと同等の性能が得られる。

これらの検討結果から、路盤を強化する方法でアプローチブロックと同等の効果を得るためには、コンクリート版で厚さ 30cm、セメント安定処理で厚さ 60cm が目安となる。これらを目安として路盤剛性を増加することで、構造物境界部の局所的な軌道沈下を抑制できると考えられる。

#### 5. おわりに

アプローチブロックのない既設の盛土であっても、路盤を強化することでアプローチブロックと概ね同等の効果が得られることがわかった。しかしながら、現実的には夜間の間合いで作業することを考えると、剛性の高い構造を短時間に構築するのは難しい。そこで現在、構造物境界部を対象として、夜間の間合いで施工可能な路盤の強化工法について開発を進めている。

#### 参考文献

- 1) 村本勝己, 関根悦夫: マルチアクチュエータ方式移動載荷試験装置を用いたバラスト軌道の模型試験, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005
- 2) (社)土木学会編: 舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による舗装構造解析入門 GAMES(General Analysis of Multi-layered Elastic Systems)を利用して, 土木学会, 2005

表 2 多層弾性解析に用いた物性値

構造	弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比
盛土	24.3	0.3
アプローチブロック	180	0.3
踏掛版 (コンクリート)	30,000	0.2
路盤 (セメント安定処理)	3,000	0.2
路盤 (粒度調整碎石)	180	0.3

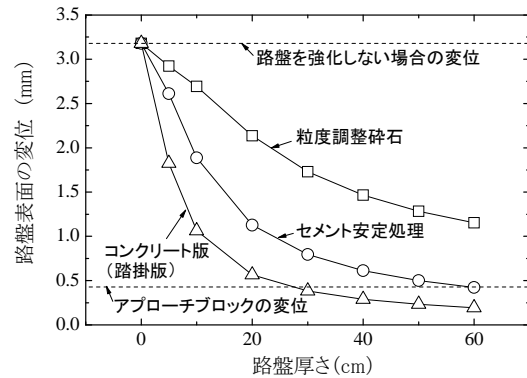


図 12 路盤厚さと路盤表面の変位の関係