

国鉄 鉄道技術研究所 正会員 安藤 勝敏
 東京大学 工学部 正会員 長谷川彰夫
 東京大学 工学部 正会員 西野 文雄

1. ま え が き

軌道保守の省力化を目的として開発されたスラブ軌道は、高架橋、トンネル等の剛性路盤上における省力化軌道として山陽新幹線以降の国鉄における軌道の基本構造になっている。これと併行して、土路盤上に敷設することを目的としてRA型土路盤上スラブ軌道をはじめ各種の省力化軌道が開発されてきた。これらの構造の要となる「舗装」の解析にあたっては、鉄道の特徴を考慮して、水平荷重に対する抵抗性、舗装に対する温度の影響について検討する必要がある。本報告は、舗装解析に不連続性を考慮した有限要素法（以下FEMと略称）を適用し、若干の力学的検討を行った結果についてのべる。

2. 不連続性を考慮した有限要素解析法

従来のRA型スラブ軌道の舗装に関するFEM解析は軌道スラブ、舗装および路盤をいずれも連続体として扱っている（図1-a）が、多層構造、列車振動および温度変化を考えれば、図1-bに示すような不連続性を考慮したモデルを導入するのが妥当である。一般に、不連続面の接触状態は σ が垂直応力、 τ がせん断応力、 μ が摩擦係数とし、粘着力を無視すると、次の三通りが考えられる。

- (1) 開口： $\sigma \geq 0$ （引張）
- (2) 滑動： $\sigma < 0$ （圧縮）， $|\tau| > |\sigma \cdot \mu|$
- (3) 固定： $\sigma < 0$ （圧縮）， $|\tau| \leq |\sigma \cdot \mu|$

上記のような「接触問題」をFEMで解析する方法は大別して二通りある。一つは不連続面における節点間の変位の適合条件および力のつり合い条件を剛性方程式の中に組み込む方法と、もう一つは不連続面に特殊な要素

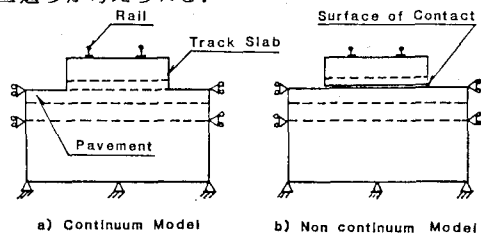


図1 解析モデル

を挿入する方法で、取り扱いの容易さ、汎用性の点から有利な後者を採用した。ここで用いた接合要素¹⁾は図2に示す長方形要素で、局所座標系 $(\bar{x}-\bar{y})$ における変位を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ とし、要素の上面を添字 t_0 、下面を添字 b_0 で表わすと、要素の任意点の変位は節点変位 $\{\bar{\delta}\}$ を用いて次のように仮定される。

$$\{\bar{u}\} = \begin{Bmatrix} \bar{u}_{t_0} \\ \bar{u}_{b_0} \\ \bar{v}_{t_0} \\ \bar{v}_{b_0} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\bar{x}/L & 0 & \bar{x}/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{x}/L & 0 & 1-\bar{x}/L & 0 \\ 0 & 1-\bar{x}/L & 0 & \bar{x}/L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{x}/L & 0 & 1-\bar{x}/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \end{Bmatrix} = [N]_0 \{\bar{\delta}\}_0$$

ひずみ-変位関係に相当する上下面の相対変位 $\{\epsilon\}$ 、応力-ひずみ関係に相当する応力 $\{\sigma\}$ は各々次式で示される。ここに、 k_s 、 k_n はジョイントのせん断方向、垂直方向の単位剛性である。

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{u}_t - \bar{u}_b \\ \bar{v}_t - \bar{v}_b \end{Bmatrix} = [B]_0 \{\bar{\delta}\}_0, \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_n \end{Bmatrix} = [D]_0 \{\epsilon\}$$

故に、剛性マトリックスは次式で示される。（ t ：厚さ）

$$[\bar{k}]_0 = t \int_0^L [B]_0^T [D]_0 [B]_0 d\bar{x} = \frac{Lt}{6} \begin{bmatrix} 2k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ 2k_n & 0 & k_n & 0 & -k_n & 0 & -2k_n & 0 \\ 2k_s & 0 & -2k_s & 0 & -k_s & 0 & 0 & 0 \\ 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & -k_n & 0 & 0 & 0 \\ 2k_s & 0 & k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2k_n & 0 & k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sym.

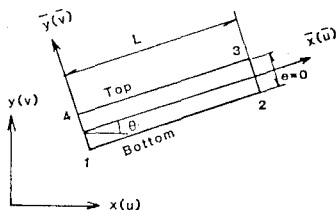


図2 接合要素

3. 解析例

(1) RA型スラブ軌道(アスファルト舗装)

平坦な舗装上にCAモルタルを介して軌道スラブを据付けるRA型スラブ軌道を想定し、輪重 $P=8\text{ tf}$ と横圧 $Q=6\text{ tf}$ を載荷した場合に摩擦係数 μ が舗装に与える影響を調べた。

図3は表層中の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ を示したもので、連続体モデル($\mu=\infty$)と比較して、不連続体モデルで $\mu=0.5$ の場合に軌道スラブ左端下近傍で滑动状態となり、数回の反復計算を経て応力は減少し、その分を中央部に分散させた結果となっている。最大値は軌道スラブ右端下に発生し、 $\mu=\infty$ に比べて $\mu=0.5$ の場合には4%程度増加する。次に、図4は横圧一変位曲線を示したもので、軌道スラブ自体の滑动に対する安全率は摩擦係数に大きく影響される。滑动に対する抵抗力はCase 2のように舗装表面に凹部を設けることで期待できる。

(2) コンクリート舗装

長さ10m、厚さ20cmの図5に示すような簡単なコンクリート舗装を想定し、温度勾配を有する舗装が自重と摩擦により変形を拘束される場合の解析を行った。図6は放物線状の温度勾配を与えた場合の解析例で、図中の丸印が吉本のはり理論²⁾、実線と破線が本解である。変形状態は吉本の解と若干異なるが、温度応力については $\mu=0$ の場合に近い。この結果、温度応力は摩擦係数によって大きく影響を受け、引張応力自体も相当厳しい値を持つ場合のあることが明らかになった。

4. あ と が き

RA型スラブ軌道の舗装解析において、不連続体モデルを採用したことにより表層中の最大せん断応力が連続体モデルと比べて数%増加することは、アスファルト混合物の許容応力度が明確にされていない現時点ではクリティカルなものではないが、今後、理論的設計法の発展と共に考慮すべき事項になると考えられる。また、軌道スラブの滑动に対する安全性の観点から舗装表面に凹部を設けておくのがよい。次に、コンクリート舗装においては、摩擦係数は温度応力に大きく影響を及ぼすことが明らかで、今後は季節変動と日変化による舗装の温度分布を把握し、最も厳しい条件により温度応力を算定する必要がある。

4. あ と が き

RA型スラブ軌道の舗装解析において、不連続体モデルを採用したことにより表層中の最大せん断応力が連続体モデルと比べて数%増加することは、アスファルト混合物の許容応力度が明確にされていない現時点ではクリティカルなものではないが、今後、理論的設計法の発展と共に考慮すべき事項になると考えられる。また、軌道スラブの滑动に対する安全性の観点から舗装表面に凹部を設けておくのがよい。次に、コンクリート舗装においては、摩擦係数は温度応力に大きく影響を及ぼすことが明らかで、今後は季節変動と日変化による舗装の温度分布を把握し、最も厳しい条件により温度応力を算定する必要がある。

参考文献

- 1) R. E. Goodman, R. L. Taylor, et al., "A model for the mechanics of jointed rock", *Proc. ASCE*, 94, SM3 (1968), pp. 637-659.
- 2) 吉本 彰: 道路工学(舗装編)、学献社、1979.

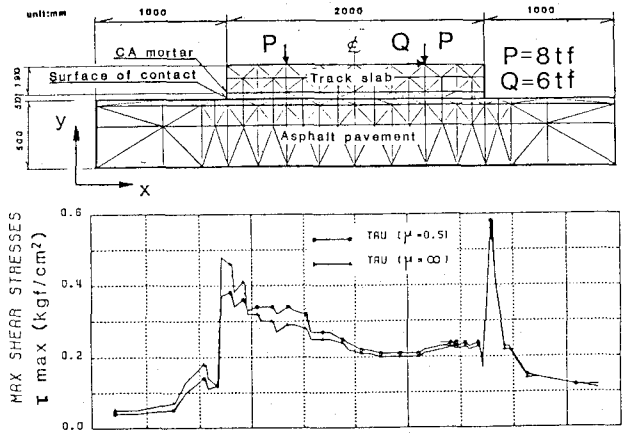


図3 表層中の最大せん断応力(RAスラブ) Case-1

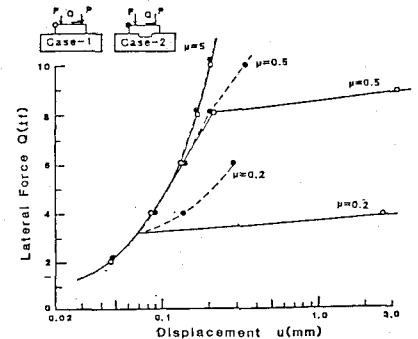


図4 横圧一変位曲線(RAスラブ)

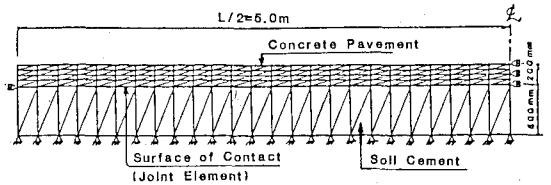


図5 分割図(コンクリート舗装)

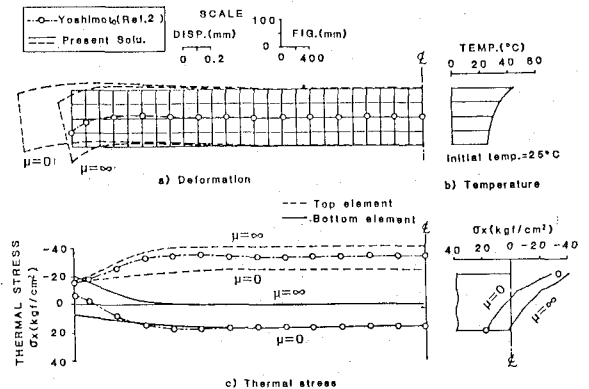


図6 変形図と温度応力(コンクリート舗装)