

有限帯板法による舗装体を考慮した開きリブ鋼床版の局部応力解析について

北海道大学 正員 芳村 仁
 北海道大学 正員 葦沢 憲吉
 本四公団 正員 富田 大造

1. まえがき

近年、スパンの長い橋梁が架設されるようになり、死荷重の軽減のために鋼床版の採用が増加してきた。鋼床版構造はRC床版に比較して剛性が低く、車輪荷重に対して生ずる局部的な変形が鋼床版上の舗装体に悪い影響を与えることが考えられる。特に縦リブ上の表面には、橋軸直角方向に大きな引張りひずみが生ずるものと考えられるがこれを裏付ける研究は少ない。¹⁾ 車輪走行時には、アスファルト舗装体は弾性的挙動をすることが判っているので、本報告ではアスファルト舗装とデッキプレートが完全に付着して一体となって変形する、いわゆる二層板を開断面縦リブで補強した構造が実際の車輪荷重によりいかなる挙動をするかを考慮し、アスファルト表面のひずみについて検討を加えたものである。解析には、有限帯板法を二層板に拡張して計算を行なった。

2. 解析手法

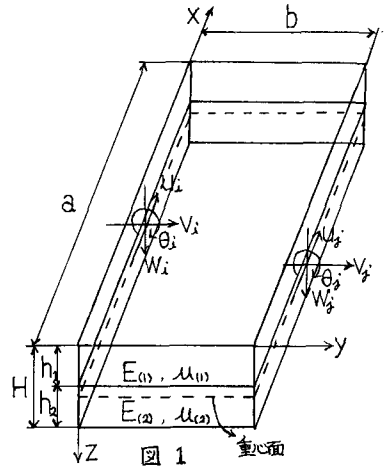
微小変形問題として扱い、次のような面外3次、面内1次の変位関数を仮定した有限帯板法により図1を参考にしながら二層板の定式化を行なう。ここで θ とは回転角であり、 $w_i(u_i)$ は x 方向の面外節線変位、 $u_i(u_i)$ 、 $v_i(u_i)$ は、 x 、 y 方向の面内節線変位である。

$$w = \sum_{m=1}^M \left[\left(y - 2\frac{y^2}{b} + \frac{y^3}{b^2} \right) \theta_{im} + \left(1 - 3\frac{y^2}{b} + 2\frac{y^3}{b^2} \right) w_{im} + \left(-\frac{y^2}{b} + \frac{y^3}{b^2} \right) \theta_{jm} + \left(3\frac{y^2}{b} - 2\frac{y^3}{b^2} \right) w_{jm} \right] \sin \frac{m\pi x}{a}$$

$$v = \sum_{m=1}^M \left[\left(1 - \frac{y}{b} \right) u_{im} + \frac{y}{b} u_{jm} \right] \sin \frac{m\pi x}{a}, \quad u = \sum_{m=1}^M \left[\left(1 - \frac{y}{b} \right) u_{im} + \frac{y}{b} u_{jm} \right] \cos \frac{m\pi x}{a} \quad \text{--- (1)}$$

次に二層板の帯板要素に関する全ポテンシャルエネルギー Π は面外と面内の連成は無いものとするとき次の式になる。ここで X 、 Y 、 Z は帯板要素表面における分布外力成分であり、 y 方向については一定と仮定し、 x 方向については仮定変位関数によって展開する。

$$\Pi = \int_0^a \int_0^b \left[D^* \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} - 2 D_u \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial v}{\partial y} - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right\} \right] dx dy + \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[B \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} + 2 B_u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} (B - B_u) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx dy - \int_0^a \int_0^b (Z w + Y v + X u) dx dy$$



ここで $D^* = D - C K_1 - C_u K_2$, $D_u^* = D_u - C K_2 - C_u K_1$
 $K_1 = (BC - B_u C_u) / (B^2 - B_u^2)$, $K_2 = (B C_u - B_u C) / (B^2 - B_u^2)$
 $D = E_{(1)} h_1^3 / 3 (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} (H^2 - h_1^2) / 3 (1 - \mu_{(2)}^2)$
 $D_u = E_{(1)} h_1^3 \mu_{(1)} / 3 (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} (H^2 - h_1^2) \mu_{(2)} / 3 (1 - \mu_{(2)}^2)$
 $C = E_{(1)} h_1^2 / 2 (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} (H^2 - h_1^2) / 2 (1 - \mu_{(2)}^2)$
 $C_u = E_{(1)} h_1^2 \mu_{(1)} / 2 (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} (H^2 - h_1^2) \mu_{(2)} / 2 (1 - \mu_{(2)}^2)$
 $B = E_{(1)} h_1 / (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} h_2 / (1 - \mu_{(2)}^2)$
 $B_u = E_{(1)} h_1 \mu_{(1)} / (1 - \mu_{(1)}^2) + E_{(2)} h_2 \mu_{(2)} / (1 - \mu_{(2)}^2)$

--- (2)

式中の $E_{(1)}, E_{(2)}$ はそれぞれ 1 層目、2 層目の弾性係数であり、 $\mu_{(1)}, \mu_{(2)}$ は 1 層目、2 層目のポアソン比である。また (2) 式において $E_{(1)} = E_{(2)}, \mu_{(1)} = \mu_{(2)}$ とおくと、厚さ H の一層板の全ポテンシャルエネルギーの式に一致することを確認されてある。この (2) 式に (1) 式を代入して停留値原理を用いると、2 層板の剛性マトリックスが誘導される。結果は次のような 8×8 の対称マトリックスとなる。

| | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | U_i | W_i | V_i | U_j | W_j | V_j | U_j |
| A_{11} | A_{12} | 0 | 0 | A_{15} | A_{16} | 0 | 0 |
| | A_{22} | 0 | 0 | A_{25} | A_{26} | 0 | 0 |
| | | A_{33} | A_{34} | 0 | 0 | A_{37} | A_{38} |
| | | | A_{44} | 0 | 0 | A_{47} | A_{48} |
| | | | | A_{55} | 0 | 0 | 0 |
| S Y M. | | | | A_{66} | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | A_{77} | A_{78} | |
| | | | | | | A_{88} | |

| | |
|--|---|
| $A_{11} = ab^3/210 k_m D^* + 2ab/15 k_m D^* + 2\alpha/6 D^*$ | $A_{38} = \alpha/8 k_m B + \alpha/8 k_m B \mu$ |
| $A_{12} = 1/420 ab^3 k_m D^* + \alpha/10 k_m D^* + \alpha/2 k_m D_u^* + 3\alpha/8 D^*$ | $A_{44} = ab/6 B + ab/12 k_m^2 (B - B \mu)/2$ |
| $A_{15} = -ab^3/280 k_m D^* - ab/30 k_m D^* + \alpha/6 D^*$ | $A_{47} = -A_{38}$ |
| $A_{16} = 13/340 b^3 k_m D^* - \alpha/10 k_m D^* - 3\alpha/8 D^*$ | $A_{48} = ab/12 k_m^2 B - \alpha/2 b (B - B \mu)/2$ |
| $A_{22} = 13/70 ab k_m D^* + 6\alpha/5 b k_m D^* + 6\alpha/8 D^*$ | $A_{55} = A_{11}$ |
| $A_{25} = -A_{16}$ | $A_{56} = -A_{22}$ |
| $A_{26} = 9/140 ab k_m D^* - 6\alpha/5 b k_m D^* - 6\alpha/8 D^*$ | $A_{66} = A_{22}$ |
| $A_{33} = \alpha/2 b B + ab/6 k_m^2 (B - B \mu)/2$ | $A_{77} = A_{33}$ |
| $A_{34} = -\alpha/8 k_m B + 3/8 \alpha k_m B \mu$ | $A_{78} = -A_{34}$ |
| $A_{37} = -\alpha/2 b B + ab/12 k_m^2 (B - B \mu)/2$ | $A_{88} = A_{44}$ |

ここで $k_m = \frac{\pi^2 EI}{\alpha}$

(3)

3. 表面ひずみ式

アスファルト層内に発生するひずみの最大値は常に上表面にある。この表面ひずみは鋼床版の場合、面外変位によるものと面内変位によるものを合成したものであり、2 層板では次式のようになる。

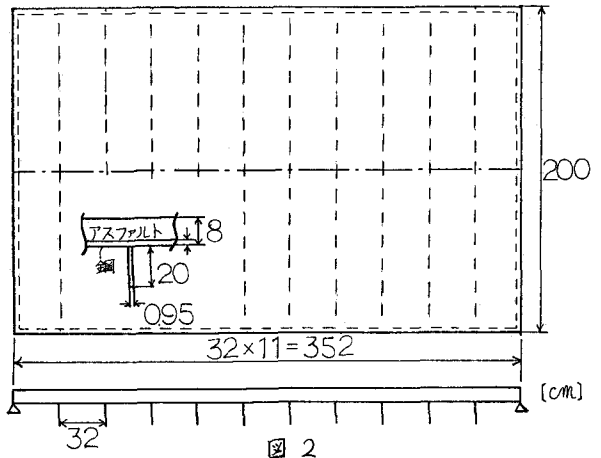
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \nu_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_1 & -K_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -K_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C-C\mu}{B-B\mu} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, 2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}^T \quad (4)$$

ここで $\varepsilon_{x0}, \varepsilon_{y0}$ はおのおの x, y 方向の表面ひずみであり、 ν_{xy0} は表面におけるせん断ひずみを表わしている。(4) 式に (1) 式を代入したものに各要素の節線変位を代入すると、表面ひずみが求まる。

4. 計算例

4.1 解析モデル

アスファルト層のひびわれの原因となるのは橋軸直角方向の引張りひずみであると思われるので、ここでは実際に鋼床版舗装部にクラックが発生した鋼床版を解析モデルとして、中央断面におけるアスファルト表面の橋軸直角方向のひずみ分布曲線の計算を行なった。橋の解析モデルは図 2 のとおりで、車線は鋼床版の片持ち部に 1 部のみだが、局所解析においては 1 径間の主桁に囲まれた下り線を対象とし、スパン長は等間隔で配置されている横リブの間隔をとり $2m$ とする。なお支持



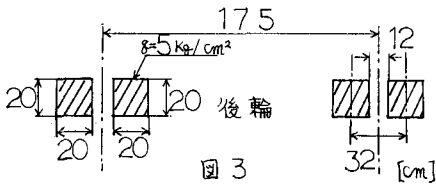


図3

条件は主桁、横リブともに単純支持として、四辺単純支持とする。

4.2 荷重系

自動車荷重の荷重モデルはなるべく現実に即したものを鋼床版に負荷することが理想であるので、道路橋示方書の丁荷重を使わずに、本解析では日本標準規格 (JIS D4202) を参考に輪荷重及び荷重面積の決定を試みた。この輪荷重とタイヤの実接地面積の関係は、舗装の構造、厚さ、種別、及び車種、タイヤの空気圧、種類などによって著しくばらつくことが報告されているが、本解析においてはJISに基づき大型車に使われている10.00-20-14PRのタイヤを複輪として使用し、複輪の標準空気圧6.5 kg/cm²に対応する輪荷重と荷重面積をそれぞれ2つ、400 cm²とした。また接地面積の形は正方形とし、複輪間隔32 cm、軸距175 cmで、後輪がスパン中央に載荷された場合を想定し計算を行なった。(図3参照)

4.3 アスファルトの変形係数

アスファルト層の変形係数は、それが粘弾性体であることから、温度と載荷時間の関数として示される³⁾。この温度と載荷時間はアスファルト層の深さによって、その値が異なることが考えられるが、ここでは深さ方向には一定であるとする。本解析においては、アスファルトの変形係数は常温、高速時を想定して $E_a = 3000 \sim 10000 \text{ kg/cm}^2$ とし、ポアソン比は $\mu_a = 0.35$ とする。

5. 考察

計算結果は図4～図8のようになる。これらの結果から次のことが考察される。

(1) アスファルト表面にクラックが発生した場所は図5におけるA、B、C点の近傍であることが報告されている。輪荷重を車輻が車線のみはみださないように載荷した時、本解析法によりこれらの地点で顕著な引張りひずみが発生することが図5、6を見ればわか

$E_a = 10000 \text{ kg/cm}^2$

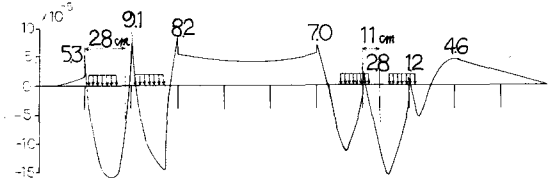


図4

$E_a = 3000 \text{ kg/cm}^2$

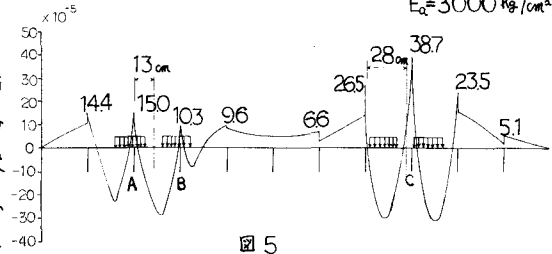


図5

$E_a = 3000 \text{ kg/cm}^2$

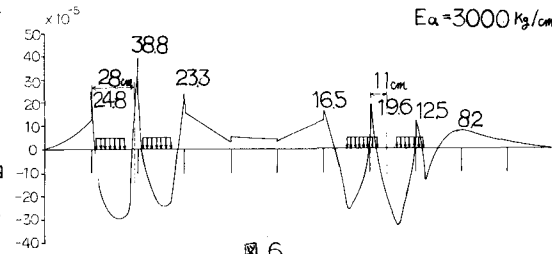


図6

$E_a = 3000 \text{ kg/cm}^2$
横リブ間隔の80%を
スパンに比す

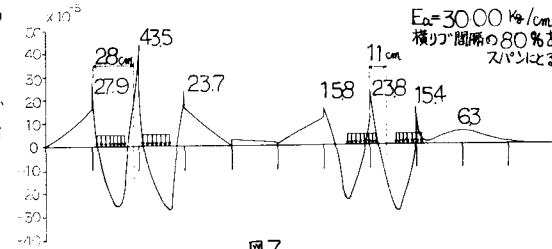


図7

$E_a = 3000 \text{ kg/cm}^2$
横リブ間隔の70%を
スパンに比す

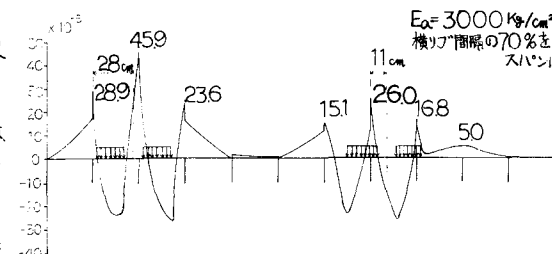


図8

り、クラックの発生事実をよく説明することができる。

(2) 複輪が縦リジをほとんどで載荷されるとリジ上に大きな表面引張りひずみが発生する。この現象は実接地面積によらず、車輪を包含する長方形面積として取扱っているT荷重の載荷においては起こりえない。よってアスファルトの表面引張りひずみを計算する際に、本解析法に使用した輪荷重系がより現実的であることを示唆していると思われる。

(3) 図4と図6を見れば、 $E_a = 3000 \text{ kg/cm}^2$ の場合、 $E_a = 10000 \text{ kg/cm}^2$ の場合に比較してより顕著な引張りひずみが発生するが、ひずみ曲線の形にその変化はない。このことからアスファルトの変形係数がひずみ曲線の傾向を変化するほど影響することはほとんどないと思われる。

(4) 実際には横リジ間隔の7割から8割をスパン長にとって計算した結果が正解に近似すると言われている。数値に中かあるのは横リジの剛性や拘束条件に左右されるからである。ここで図6,7,8を検討すると大きな変動はなく、スパン長にあまりこだわらなければならないことがわかる。これは設計上便利なことと思われる。

6. あとがき

この報告において、現実に行えるだけ即した鋼床版におけるアスファルト層表面のひずみの挙動を明らかにしようとしたが、アスファルト層のひびわれは繰り返し載荷を受けることによる疲労破壊であると推測されている。よって本解析法のような静的解析のみで設計上の判断を下すのではなく、現実に即した疲労破壊実験を併用することも重要であると思われる。なお計算には北海道大学大型計算機センターのFACOM 230-75を用いた。

参考文献

- 1) 蕪沢、芳村：舗装体を考慮した閉リジ鋼床版の局所解析について、北海道支部論文報告集 第33号
- 2) Y. K. Chang: Finite Strip Method of Elastic Slabs, ASCE, 1968, P1365~P1378
- 3) 笠原、岡川、菅原：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用、

土木学会論文報告集 第245号 P107