

開リフ鋼床版の構造特性

北工学部 正員 能町純雄
北見工業大学 同 大島俊之

1. まえびき

鋼床版の研究はこれまで W. Pelican u. M. Esslinger¹⁾ による直交異方性板としての研究, Homberg²⁾ の方法による格子構造としての研究²⁾, 及び J. G. Bouwkamp and G. H. Powell³⁾ の論文にある桁板構造としての研究⁴⁾ など多くの研究がなされてきた。

本論文は鋼床版のデッキプレートと肉縦リフに桁板構造解^{5), 6)}を適用して, 両者の断面変形を考慮した解法について, 鋪装の破壊の問題, 鋼床版の構造特性などについて検討を加えたものである。本論文では肉縦単純支持の種々な構造について, 主としてデッキプレートが橋軸直角方向の力の伝達に着目して計算した。数値計算例として, 鋼床版の一般的肉縦リフの断面について計算例と, 現在工事中の釧路・常呂橋の断面についての計算例を示し, 寸法模型実験による結果と比較を行う。

2. 理論概要⁴⁾

桁板要素の軸方向の剪断流 T, 圧縮力 S, 断面方向の曲げモーメント M, 剪断力 X に于ける節点の変位と変換式を, 厚さ t の 2r, 2r+1 個の要素について次式を用いる。

$$\bar{T}_{2r, 2r+1} = \frac{N}{\delta} (z \ddot{u}_r + \ddot{u}_{2r+1}) + (S_{2r, 2r+1} - S_{2r+1, 2r}) / h \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} G t h (\ddot{u}_r + \ddot{u}_{2r+1}) + G t (\ddot{u}_{2r+1} - \ddot{u}_r) = S_{2r, 2r+1} - S_{2r+1, 2r} \quad (2)$$

$$\bar{T}_{2r+1, 2r} = \frac{N}{\delta} (z \ddot{u}_{2r+1} + \ddot{u}_r) - (S_{2r, 2r+1} - S_{2r+1, 2r}) / h \quad (3)$$

$$S_{2r, 2r+1} = \frac{N}{h^2} (v_r - v_{2r+1}) + \frac{G t}{2} (\ddot{u}_r - \ddot{u}_{2r+1}) + \frac{G t h}{\delta} (z \ddot{u}_r + \ddot{u}_{2r+1}) \quad (4)$$

$$S_{2r+1, 2r} = \frac{N}{h^2} (v_{2r+1} - v_r) - \frac{G t}{2} (\ddot{u}_{2r+1} - \ddot{u}_r) - \frac{G t h}{\delta} (z \ddot{u}_{2r+1} + \ddot{u}_r) \quad (5)$$

$$M_{2r, 2r+1} = 2K (2\theta_r + \theta_{2r+1} - 3\Delta w_r / h) \quad (6)$$

$$M_{2r+1, 2r} = 2K (2\theta_{2r+1} + \theta_r - 3\Delta w_r / h) \quad (7)$$

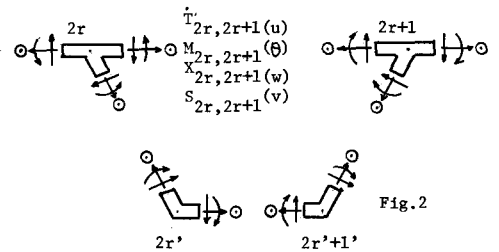
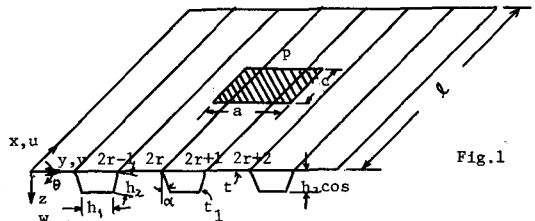
$$X_{2r, 2r+1} = X_{2r+1, 2r} = -\frac{6K}{h} (\theta_r + \theta_{2r+1} - 2\Delta w_r / h) \quad (8)$$

他の要素についても同様の式を適用し, 各節点について式をとり, 16本の式を得る。(図2参照)。

さらに部材回転角(リフ)の $R_{2r, 2r}$, $R_{2r+1, 2r+1}$, $R_{2r, 2r+1}$ の3個の未知数について, 2本の角方程式と1本の層方程式を求め, 節点 2r に関する3つ方程式と, 節点 2r+1 に関する3つ方程式の和と差をつくって, 変位 Δv と ∇v ($\Delta v = v_{2r+1} - v_{2r}$, $\nabla v = v_{2r+1} + v_{2r}$) で表現しなおし, さらに肉縦リフの下側 $2r$, $2r+1$ に関する未知量と部材回転角を消去すれば, 次の8本の基本微分差分方程式を得る。これらの式を, 橋軸方向に Fourier 変換, 橋軸直角方向に Fourier 定積分変換して⁷⁾ 各節点の変形量以求えられる。

$$\begin{aligned} & \frac{h_2}{2} (N_1 + N_2) \nabla \ddot{u}_r + \frac{N_1 h_2}{12} (\Delta_r \nabla \ddot{u}_{r-1} + 6 \nabla \ddot{u}_r - \Delta_r \ddot{u}_r) - \frac{N_2 h_2}{6} \nabla \ddot{w}_r + \frac{G t h_2}{4} (\Delta_r \nabla \ddot{v}_r - \Delta_r \ddot{u}_{r-1}) \\ & + \frac{G t h_2}{2 h} (\Delta_r \nabla \ddot{u}_{r-1} - \Delta_r \ddot{u}_r) + \frac{3 K}{h \cos \alpha} (\Delta_r \nabla \theta_r - \Delta_r \ddot{\theta}_{r-1}) - \frac{6 K}{h^2 \cos \alpha} (\Delta_r \nabla w_{r-1} - \Delta_r \ddot{w}_r) = \sec \alpha \nabla p_r \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & h_2 \left(\frac{N_1}{\delta} + \frac{N_2}{2} \right) \Delta \ddot{u}_r + \frac{N_1 h_2}{12} (\Delta_r \nabla \ddot{u}_r - \Delta_r \ddot{u}_{r-1} + 2 \Delta \ddot{u}_r) - \frac{N_2 h_2}{6} \Delta \ddot{w}_r + \frac{G t h_2}{4} (\Delta_r \nabla \ddot{v}_{r-1} - \Delta_r \ddot{v}_r) - 2 \frac{G t h_2}{h} \Delta \ddot{u}_r \end{aligned}$$



$$= z N = E t h (v = 0), \quad K = \frac{E t^3}{12 h},$$

$$\dot{v} = \frac{dv}{dx}, \quad \Delta w_r = w_{2r+1} - w_{2r}.$$

$$+ \frac{Gt h_2}{2h} (\Delta_r \nabla \dot{U}_r - \Delta_r^2 \dot{U}_{r-1} - 4 \Delta \dot{U}_r) + \frac{3K}{h \cos \alpha} (\Delta_r^2 \nabla \theta_{r-1} + 4 \nabla \theta_r - \Delta_r \Delta \theta_r) - \frac{12K}{h \cos \alpha} (\nabla \theta_r - \frac{2}{h} \Delta W_r) \\ - \frac{6K}{h^2 \cos \alpha} (\Delta_r \nabla W_r - \Delta_r^2 \Delta W_{r-1} - 4 \Delta W_r) - \frac{12K_1}{h_1 \cos \alpha} (\gamma_1 - 2\beta_1 \gamma_1 - 2\beta_2) \nabla \theta_r - \frac{12K_1}{h_1 \cos \alpha} (\gamma_2 - 2\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_3) \Delta W_r = \sec \alpha \cdot \Delta P_r \quad (10)$$

$$\circ \frac{N}{2h} (\Delta_r^2 \nabla U_{r-1} - \Delta_r \Delta U_r) + \frac{Gt}{4} (\Delta_r \nabla \dot{U}_r - \Delta_r^2 \dot{U}_{r-1}) + \frac{Gt h}{12} (\Delta_r^2 \nabla \ddot{U}_{r-1} + 6 \nabla \ddot{U}_r - \Delta_r \Delta \ddot{U}_r) + \frac{Gt h}{2} \nabla \ddot{U}_r \\ + \frac{6K_2}{h_2} \sec \alpha (1 + \gamma_1 - 4 \alpha_1 \gamma_1 - 4 \alpha_2) \nabla \theta_r + \frac{6K_2}{h_2} \sec \alpha (\gamma_2 - 4 \alpha_1 \gamma_2 - 4 \alpha_3) \Delta W_r - \frac{3K}{h} (\Delta_r^2 \nabla \theta_{r-1} + 4 \nabla \theta_r - \Delta_r \Delta \theta_r) \tan \alpha \\ + \frac{6K}{h^2} \tan \alpha (\Delta_r \nabla W_r - \Delta_r^2 \Delta W_{r-1} - 4 \Delta W_r) + \frac{12K}{h} \tan \alpha (\nabla \theta_r - \frac{2}{h} \Delta W_r) = -\tan \alpha \cdot \Delta P_r \quad (11)$$

$$\circ \frac{N}{2h} (\Delta_r \nabla U_r - \Delta_r^2 U_{r-1} - 4 \Delta U_r) + \frac{Gt}{4} (\Delta_r^2 \dot{U}_{r-1} - \Delta_r \dot{U}_r) + \frac{Gt h}{12} (\Delta_r \nabla \ddot{U}_r - \Delta_r^2 \ddot{U}_{r-1} + 2 \Delta \ddot{U}_r) - \frac{2N}{h^2} \Delta U_r \\ + \frac{Gt h}{2} \nabla \ddot{U}_r + \frac{6K_2}{h_2} \sec \alpha (1 + \delta_1) \Delta \theta_r - \frac{3K}{h} \tan \alpha (\Delta_r \nabla \theta_r - \Delta_r^2 \theta_{r-1}) + \frac{6K}{h^2} \tan \alpha (\Delta_r^2 \nabla W_{r-1} - \Delta_r \Delta W_r) = -\tan \alpha \cdot \nabla P_r \quad (12)$$

$$\circ \frac{N}{12} (\Delta_r^2 \nabla \ddot{U}_{r-1} + 6 \nabla \ddot{U}_r - \Delta_r \Delta \ddot{U}_r) + \frac{1}{2} (N + N_1 + 2N_2) \nabla \ddot{U}_r - \frac{h_2}{2} (N_1 + N_2) \nabla \ddot{W}_r + \frac{Gt}{4} (\Delta_r \nabla \ddot{U}_r - \Delta_r^2 \ddot{U}_{r-1}) \\ + \frac{Gt}{2h} (\Delta_r^2 \dot{U}_{r-1} - \Delta_r \dot{U}_r) = 0 \quad \text{--- } U_3 \quad \circ \frac{N}{12} (\Delta_r \nabla \ddot{U}_r - \Delta_r^2 \ddot{U}_{r-1} + 2 \Delta \ddot{U}_r) + \frac{1}{2} (N + N_1 + 6N_2) \Delta \ddot{U}_r \\ - h_2 (\frac{N_2}{2} + \frac{N_1}{2}) \Delta \ddot{W}_r + \frac{Gt}{4} (\Delta_r^2 \nabla \ddot{U}_{r-1} - \Delta_r \Delta \ddot{U}_r) - \frac{2Gt}{h} \Delta \dot{U}_r + \frac{Gt}{2h} (\Delta_r \nabla \dot{U}_r - \Delta_r^2 \dot{U}_{r-1} - 4 \Delta \dot{U}_r) = 0 \quad \text{--- } (14)$$

$$\circ K (\Delta_r^2 \nabla \theta_{r-1} + 6 \nabla \theta_r - \Delta_r \Delta \theta_r) + (6K + 4K_2 - 12K_2 \alpha_2 + 2K_2 \delta_1 - 12K_2 \alpha_1 \gamma_1) \nabla \theta_r + (2K_2 \delta_2 - 12K_2 \alpha_1 \gamma_2 - \frac{12K}{h} \\ - 12K_2 \alpha_3) \Delta W_r - \frac{3K}{h} (\Delta_r \nabla W_r - \Delta_r^2 \Delta W_{r-1} - 4 \Delta W_r) + (C_{2r, 2r+1} + C_{2r+1, 2r}) + (\bar{C}_{2r, 2r+1} + \bar{C}_{2r+1, 2r+2}) = 0 \quad \text{--- } (15)$$

$$K (\Delta_r \nabla \theta_r - \Delta_r^2 \theta_{r-1} + 2 \Delta \theta_r) + (2K + 4K_2 + 2K_2 \delta_1) \Delta \theta_r - \frac{3K}{h} (\Delta_r^2 \nabla W_{r-1} - \Delta_r \Delta W_r) + (C_{2r+1, 2r} - C_{2r, 2r+1}) \\ + (\bar{C}_{2r+1, 2r+2} - \bar{C}_{2r, 2r+1}) = 0 \quad \text{--- } (16) \quad \text{--- } \text{--- } L \quad N_1 = Et_1 h_1, \quad N_2 = Et_1 h_2, \quad \bar{N} = Et_1 h, \quad K_2 = \frac{Et_1^3}{12 h_2},$$

$$K_1 = \frac{Et_1^3}{12 h_1}, \quad \bar{K} = \frac{Et_1^3}{12 h}, \quad \alpha_1 = (\frac{6K_2}{h_2} - \frac{12K_1}{h_1} \sin \alpha) / \bar{K}_1, \quad \alpha_2 = 24 K_1 \sin \alpha / (h_1^2 \bar{K}_1), \quad \alpha_3 = 24 K_1 \sin \alpha / (h_1^2 \bar{K}_1),$$

$$\bar{K}_1 = \frac{24 K_2}{h_2} + \frac{48 K_1 h_2 \sin^2 \alpha}{h_1^2}, \quad \beta_1 = -2 h_2 \sin \alpha (\frac{6K_2}{h_2} - \frac{12K_1}{h_1} \sin \alpha) / (h_1 \bar{K}_1), \quad \beta_2 = -12 K_2 \sin \alpha / (h_1 \bar{K}_1),$$

$$\beta_3 = \frac{1}{h_1} - \frac{2 h_2 \sin \alpha}{h_1 \bar{K}_1} \cdot \frac{24 K_1 \sin \alpha}{h_1^2}, \quad \gamma_0 = 12 K_1 \beta_1 + 12 K_2 \alpha_1 - 6 K_1 - 4 K_2, \quad \gamma_1 = (2 K_2 - 12 K_1 \beta_2 - 12 K_2 \alpha_2) / \gamma_0,$$

$$\gamma_2 = -12 (K_1 \beta_3 + K_2 \alpha_3) / \gamma_0, \quad \Delta_r^2 \nabla f(r) = \Delta_r^2 f(r) + \Delta_r^2 f(r-1), \quad \Delta_r \nabla f(r) = \Delta_r f(r) + \Delta_r f(r-1), \quad \Delta_r f(r) = f(r) - f(r-1).$$

3. 数値計算例。

(C, $\bar{C}$ は荷重項。)

1) 一般断面に F3 計算: $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.0$, $G = 8.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $l = 300 \text{ cm}$, $t = t_1 = 10 \text{ mm}$, $h = \bar{h} = 30 \text{ cm}$, $h_1 = h_2 = 20 \text{ cm}$, $\alpha = 14.48^\circ$, $M = 45 \text{ 項}$, 中央部分荷重 ($P = 8 \text{ kg/cm}^2$, $a \times c = 50 \times 20 \text{ cm}^2$).

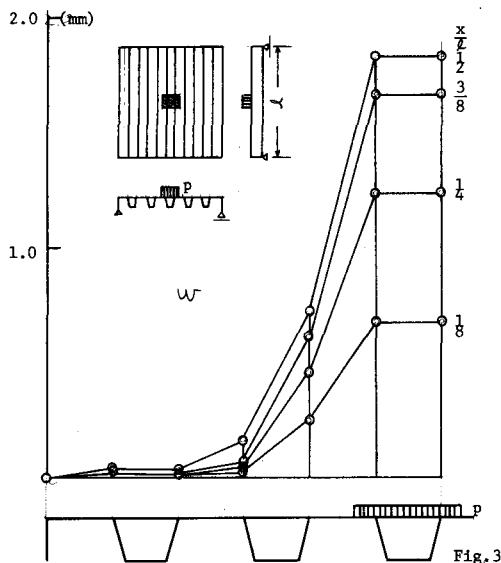


Fig. 3

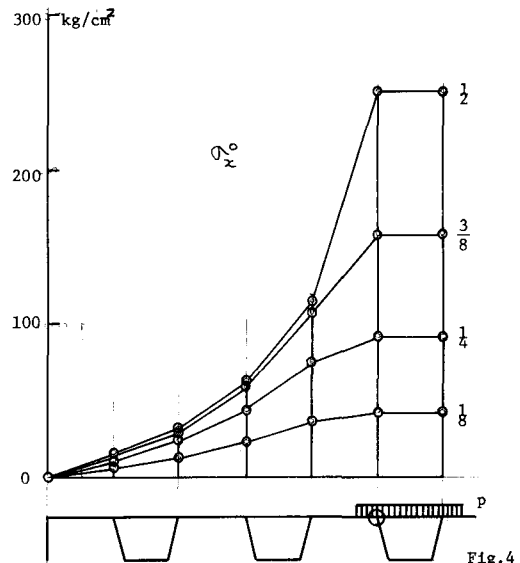
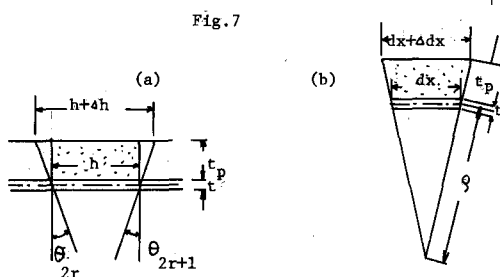
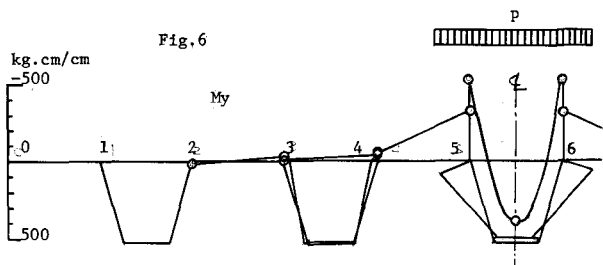
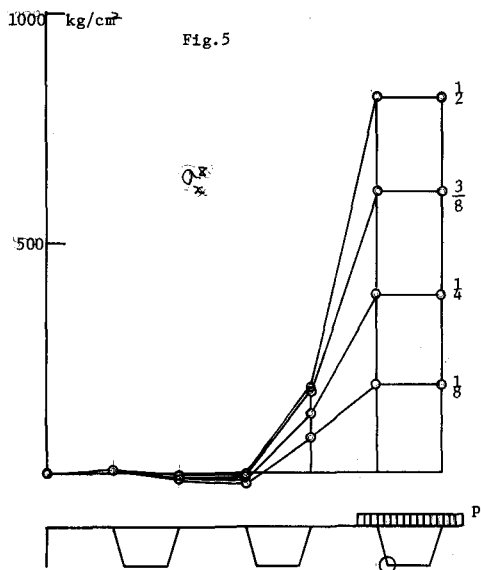


Fig. 4

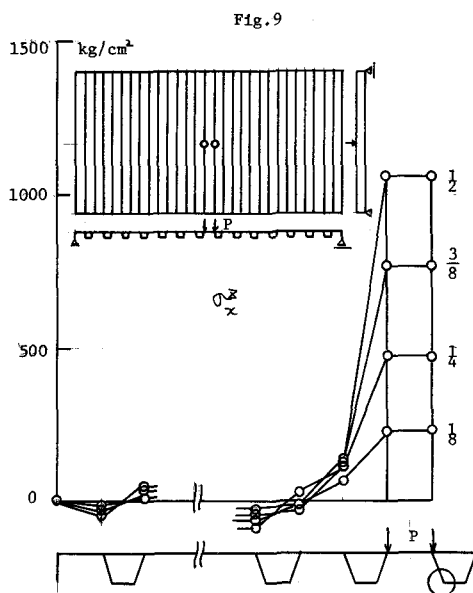
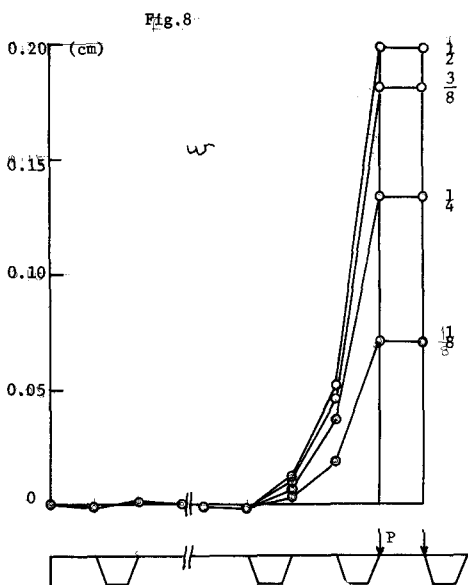


鋪装表面の引張歪の計算のためとて、二通りの方で考えられる。鋪装を弾性体とし、アスファルトと一体となつて変形するものとする（これは鋪装の破壊をこつて、支持条件とともに安全側の仮定）、Fig. 7 (a) のようにアスファルトの左の角に着目して $\varepsilon_\theta = (\theta_{2r+1} - \theta_{2r}) \cdot t_p / h$ となる場合 $\varepsilon_{\theta, \max} = 0.9480 \times 10^{-3}$ となる。

一方断面方向の曲げモーメントに着目して、その曲率の関係から微小部分の比例関係より、Fig. 7 (b) のように $\varepsilon_k = \frac{12 M_y}{E t^3} t_p$ を得る。== ΣM_y に節点の両側の負の曲げモーメントを代入して、その平均をとると、 $\varepsilon_{k, \max} = 1.670 \times 10^{-2}$ となる。一方文献 (8) においてアスファルトの低温時の破断歪は $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ と与えられている。

2) 梁橋の断面による計算：

本橋は三径間連続鋼桁梁橋であるが、その箱桁と橋桁にはさき述べた部分について、次の断面諸元により同じ単純支持として計算した。 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.0$, $G = 8.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $l = 287.5 \text{ cm}$, $t = 12 \text{ mm}$, $t_1 = 8 \text{ mm}$, $h = 32 \text{ cm}$, $h_1 = 28 \text{ cm}$, $M = 45 \text{ 噸}$, 中央より集中荷重 P である。図には左の角と右の角の応力について示すため、アスファルトの最大応力 $\sigma_{x, \max} = 227 \text{ kg/cm}^2$ とおいた。



4. 実験結果との比較

板の断面と理論と実験の比較を行なった。 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu=0.0$, $G=8.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $l=150 \text{ cm}$, $t=t_1=1 \text{ mm}$, $h=h_1=10 \text{ cm}$, $h_2=8.06 \text{ cm}$, $h_3=8 \text{ cm}$, $M=20 \text{ 個}$, 中央に集中荷重 $P=1 \text{ ㏍}$ 。

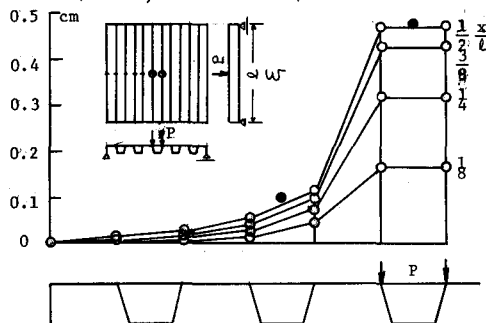


Fig. 10

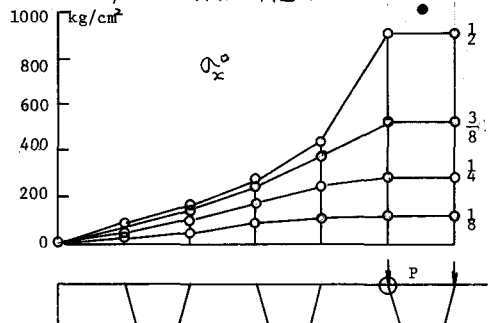


Fig. 11

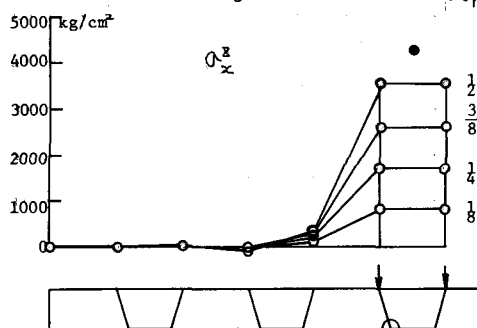


Fig. 12

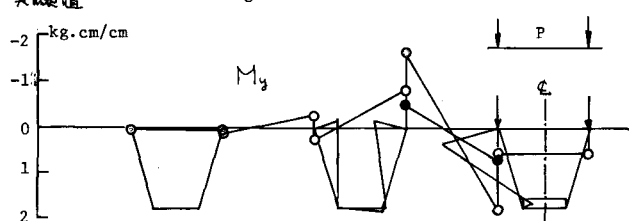


Fig. 13

(断面方向の曲げモーメントはデッキプレート上面にストレーンゲージを貼って測定した。)

5. あとがき

以上の数値計算例を通してタイヤ荷重が集中的にリブに作用する場合、荷重がリブとリブに隣接するリブの合計3本のリブにほぼ均等に支持力傾向があり、これは文献3)でもその傾向が見られる。

数値計算例1)にある鋼板の破壊の原因となる鋼板表面の引張歪に付いて考察した。(文献9)参照)

理論と実験の比較は文献3)を合せて考えると、実験値は一般に理論値の $1/2 \sim 1/3$ の値を示す。しかし、車荷リブの近くに主桁のような剛性大きな部材があるとその部材に負の断面方向曲げモーメントが集中する傾向があるの注意を要する。

鋼板の経済設計についても若干の考察を行なったが、これは別の機会に発表した。¹⁰⁾

最後に実験模型をいただいた土木建設院先生、また実験の資料をいただいた創路学園の竹田俊明係長に感謝致します。

本論文の数値計算はFACOM 230-75, 東大 HITAC 8800/8700, 工見工大 OKITAC 4500 を使用して行なった。

参考文献

- 1) 国弘, 藤原: 土木研究所報告 137号の1 (1969)
- 2) 渡辺昇: 格子桁梁の理論と計算 (技報堂)
- 3) J.G. Bouwkamp and G.H. Powell: Structural Behavior of an Orthotropic Steel Deck Bridge (1967) ユウエニ技研
- 4) 能町, 大島: 土木学会第30回年次学術講演会講演集, 工部 (1975)
- 5) 能町: 土木学会論文集 第146号 (1967)
- 6) 尾崎: 土木学会論文報告集 第179号 (1970)
- 7) Nomachi and Matsuoka: Proc. of the 20th Japan National Congress for Appl. Mech. (1970)
- 8) 菅原, 工藤, 有福: 土木材料 III (アスファルト) 井立出版 (1974)
- 9) 南郷, 小島, 坪内: 鋼床板舗装の形態: 土木技術資料 17-3 (1975)
- 10) 能町: 鋼床板のデッキプレートに極限強さについて: 土木学会北海道支部技術資料 第15号 (1959)