

I-6 鋼床版の最小重量設計に関する一考察

室蘭工業大学 学生員 沢田達夫
 室蘭工業大学 正 員 杉本博之
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 昶

1. まえがき

今日、我国においては鋼床版を用いる設計例が年々増加している。鋼床版は構造各部の死荷重による断面力を減少させ、また主構造としても働くなどその構造的優位性のため、支間の長い橋や主桁高さの著しく制限される橋で有効に用いられている。特に、縦リブは従来の開リブ（バルブプレート、平鋼など）に代わって、軽量化や経済性などから閉リブ（逆台形Uリブ）の使用が多くなりつつあり、橋面積では70～80%を占めるに至っている。¹⁾ 現在、JSS 規格など^{2),3)}では縦リブ断面に逆台形Uリブを指定しているため、今後さらに普及するものと思われる。

そこで、本報告においては閉リブにはこの逆台形Uリブを、そして従来の開リブでは平鋼を選んで最適設計の観点から経済的な縦リブ断面形状等、鋼床版の設計を検討した。ただし、現在の縦リブの使用傾向を考慮して、間隔は標準的な32cmを中心にして変化させた。支間に関しては、閉リブでは、2～4m、開リブでは、2～3mを検討した。また、板厚は閉リブでは6mmが一般的であるので、6mmと8mmを検討した。開リブの場合には板厚を設計変数としたが、道示⁴⁾で規定する最小板厚8mmに加えて6mmも検討した。

2. 構造モデル及び解析

本報告で設計の対象とした構造モデル及び解析を以下に説明する。

2-1 構造モデル

本報告では、図-1に示すような鋼床版の主桁と横リブで囲まれたデッキプレートと縦リブから構成される構造モデルを解析の対象とする。ただし、支持条件は四辺単純支持と仮定する。また、主桁間隔は4.8mで一定とした。

2-2 構造解析

本報告における解析手法としては有限帯板法（Finite Strip Method）⁵⁾を使用し、ストリップは橋軸方向に分割して解析を行った。変位関数は以下のように仮定した。

1) 面外変位

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x) \cdot \sin \frac{\mu_m}{b} y \quad (1)$$

$$\theta(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \theta_m(x) \cdot \sin \frac{\mu_m}{b} y \quad (2)$$

$$\text{ここで、} w_m(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3$$

$$\theta_m(x) = -\frac{d w_m(x)}{d x} = \alpha_2 + 2\alpha_3 x + 3\alpha_4 x^2$$

$$\mu_m = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, m\pi$$

2) 面内変位

$$u(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} u_m(x) \cdot \sin \frac{\mu_m}{b} y \quad (3)$$

$$v(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} v_m(x) \cdot \cos \frac{\mu_m}{b} y \quad (4)$$

$$\text{ここで、} u_m(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x, v_m(x) = \alpha_3 + \alpha_4 x$$

上記の変位関数は図-2に示す板要素に関して、次に記す境界条件を満足するものとする。

$$y=0, b \text{ で}$$

$$w(x, y) = 0$$

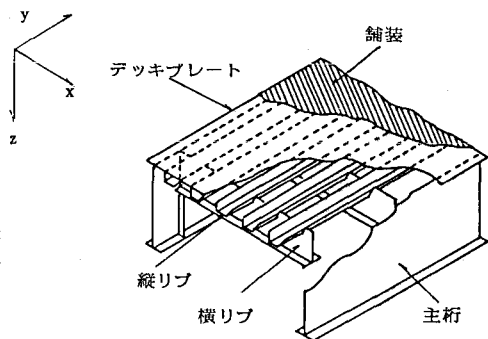


図-1 構造モデル

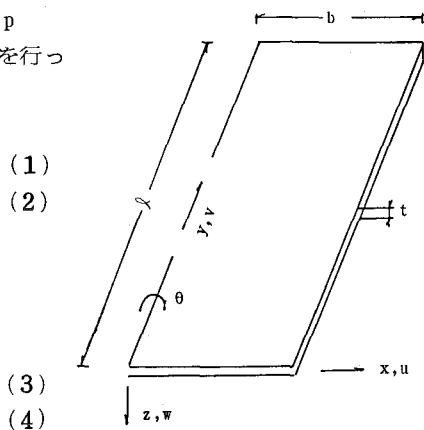


図-2 有限帯板要素

$$M_y = - \left(D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0$$

$$u(x, y) = 0$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$$

$$\text{ここで、} D_y = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}, D_1 = \frac{\nu Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

この変位関数をもとに仮想仕事の原理を適用して、各剛性マトリックスを誘導し、それらを重ね合わせて最終的な板要素剛性マトリックスを作成した。

縦リブのたわみは $w(x, y)$ を用い、応力は次式によって求めた。

$$\sigma_y = - \frac{E}{1-\nu^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m}{\lambda} v_m \sin \frac{\mu_m y}{\lambda} \quad (5)$$

輪荷重 (T 荷重の後輪荷重) の载荷状態は図-3 の通りである。ただし、縦リブの死荷重は影響が小さいので無視した。⁶⁾ また、級数は 20 項まで計算した。

3. 最適設計

本報告における最適設計手法を以下に説明する。

3-1 設計変数

1) 閉リブ 閉リブを用いた最適設計における設計変数は、図-4 (a) で示される A_c, B_c, H_c の三つとした。また、道示等で規定されるデッキプレートの最小板厚 t_b を考慮し、これを次式により計算した。

$$t_b = 0.0035 \times \max(A_c, C_c - A_c) \quad (\text{cm}) \quad (6)$$

ただし、 $t_b \geq 1.2$ (cm)

ここで、図-4 における黒丸は固定点で、白丸は移動点である。

2) 開リブ 開リブの場合の設計変数は、図-4 (b) で示される H_o, t_o の二つとした。

3-2 制約条件式

制約条件式には、閉リブ、開リブとも主桁支点を除いた各節点の応力とたわみを考慮した。ただし、デッキプレート、縦リブとも鋼材には、北海道の施工指針³⁾で標準とされている SM41 を使用したため、許容曲げ応力度は 1400 (kg/cm^2) で計算を行った。また、たわみの制約には、道示のプレートガードに関するたわみの制約を適用した。

$$(\text{応力}) \quad |\sigma_i| \leq 1400$$

$$(\text{たわみ}) \quad |\delta_i| \leq \frac{L}{500} \times 100$$

ここで、 σ_i : 各節点の曲げ応力 (kg/cm^2)

δ_i : 各節点のたわみ量 (cm)

L : 縦リブの支間長 (m)

また、最適解が施工不能なものになってしまっても意味がないので、本報告では通常の溶接に支障をきたさないために、縦リブ間隔は 10 cm 以上とし、主桁と縦リブの最小間隔は 20 cm とした。⁷⁾

3-3 目的関数 目的関数は、デッキプレート重量と縦リブ重量を加えた総重量とした。

3-4 最適設計法 最適設計法には、汎用最適化プログラム ADS (Automated Design Synthesis)^{8), 9)} 中の Powell の逐次 2 次計画法^{10), 11)}を使用した。

4. 計算結果

本報告で計算した閉リブ、開リブの各パラメーター、板厚 t (cm) (ただし、開リブの場合は板厚の制限値)、縦リブ本数 N 、支間長 L (m) の全 22 ケースの組合せを表-1 に示した。またそれらの計

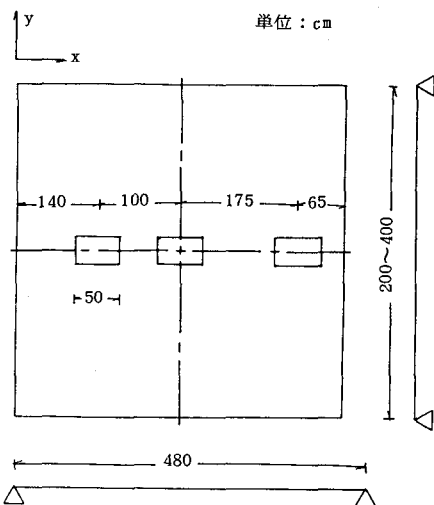


図-3 輪荷重の分布

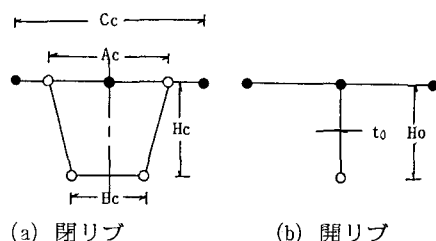


図-4 縦リブ断面

算結果を整理し、得られた結果を図-5 鋼重と縦リブ本数、図-6 最適閉リブ形状に示した。ただし、図-5の点線は開リブを表わし、また図-6の点線は JSS 規格の縦リブ 形状 (320×240×6-40と320×260×6-40) を表している。

5. 考察及び結論

以上の計算結果から、以下に考察と結論を述べる。

5-1 閉リブと開リブの比較 現在、縦リブの設計では、開リブよりも閉リブを使用する傾向にある。これは閉リブの方が縦リブ支間を長くとることができ、横リブ本数が少なくすみ、鋼重を減らすことが可能であるためと思われる。¹²⁾

そこで、図-5において縦リブ支間一定で各ケースを比較すると、どのケースにおいても閉リブを採用した方が鋼重を小さくできた。つまり縦リブ支間一定の時にも閉リブの方が鋼重を小さくでき経済的なリブ形式であることが確認できた。

したがって、現在の閉リブ多用の傾向は最適設計の観点からも経済的であると言える。

5-2 閉リブ形状 閉リブ (逆台形リブ) については、昭和55年/月に日本鋼構造協会 (JSSC) により規格化が行われ、既に寸法、形状などが JSS 規格として統一されているが、本報告ではこの規格形状が合理的なものかどうかを検討した。図-6によれば JSS規格は各ケースにおける、特に N=5と9で、最適閉リブ形状にはほぼ一致し、合理的な形状であることが確認できた。

したがって、この規格縦リブは形状最適化の観点からみても合理的であると言える。

5-3 縦リブ間隔 本報告で採用した幅員4.8mの鋼床版では、図-5からわかる通り一般的な32cmの縦リブ間隔に最も適切な本数配置 (閉リブ: N=7、開リブ: N=4) において鋼重が最も小さくなっている。

したがって、剛性の小さい縦リブを上記の一般的な間隔より密に配置 (閉リブ: N=9、開リブ: N=8) することは不経済であることがわかった。

また、縦リブ間隔を広げて剛性の大きい縦リブを配置 (閉リブ: N=5、開リブ: N=10) したとしても、道示で規定されるデッキプレートの最小板厚が12mmより大きくなるため、鋼重が大幅に増加し、さらに不経済な設計となることがわかった。

5-4 縦リブ板厚 開リブの最適化において、板厚は各ケースとも最小板厚 (道示では8mmと規定してあるが、閉リブとの比較のためもあり、6mmも計算した。) に収束した。また、図-5より最小板厚6mmと8mmでは前者の方が鋼重を小さくできた。同様に閉リブの最適化においても、6mmの板厚を採用した方が鋼重を減らすことができた。

したがって、縦リブの設計では、板厚を厚くして形状を小さくするよりは、板厚を薄くして形状を小さくした方が経済的であることがわかった。

5-5 縦リブ応力とたわみ 閉リブ、開リブとも全ケースにおいて最適解は下フランジ応力の制約条件がより支配的になって収束しており、たわみは支配的になっていないことがわかった。

5-6 解析回数と時間 一ケースの最適設計に要した平均構造解析回数と平均CPU時間は、閉リブの場合には60.7回で4分23秒であり、開リブの場合では36.2回で2分25秒であった。ただし、解析には室蘭工業大学情報処理教育センターのFACOM M-170Fを使用した。

	t	N	L		t	N	L
1	6	5	2	1	6	10	2
2	6	5	3	2	6	10	3
3	6	5	4	3	6	14	2
4	6	7	2	4	6	14	3
5	6	7	3	5	6	18	2
6	6	7	4	6	6	18	3
7	6	9	2	7	8	10	2
8	6	9	3	8	8	10	3
9	6	9	4	9	8	14	2
10	8	7	3	10	8	14	3
				11	8	18	2
				12	8	18	3

(b) 開リブ

表-1 パラメーター
鋼重 (kg/cm)

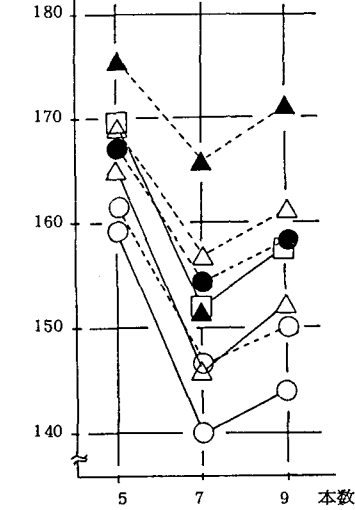
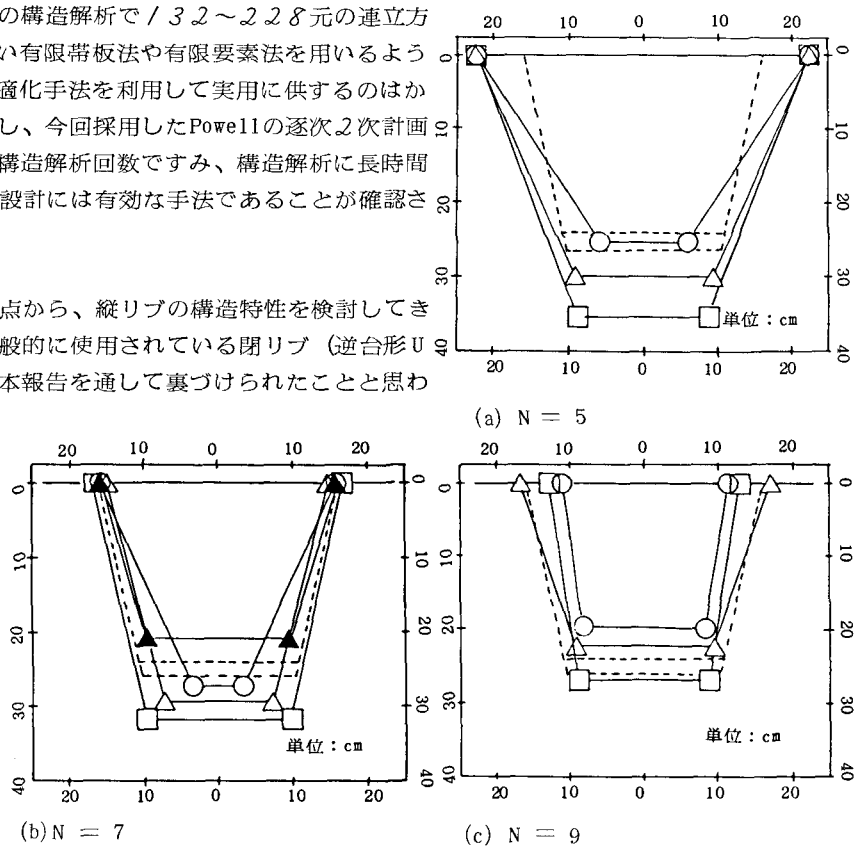


図-5 鋼重と縦リブ本数

本報告のように一回の構造解析で / 32 ~ 228 元の連立方定式を解かねばならない有限帯板法や有限要素法を用いるような設計では、一般の最適化手法を利用して実用に供するのはかなり困難である。しかし、今回採用したPowellの逐次2次計画法では、かなり少ない構造解析回数ですみ、構造解析に長時間を要する構造物の最適設計には有効な手法であることが確認された。

6. あとがき

以上、最適設計の観点から、縦リブの構造特性を検討してきたが、結局現在最も一般的に使用されている閉リブ（逆台形Uリブ）の経済的な事が本報告を通して裏づけられたと思われる。



図—6 最適閉リブ形状

7. 参考文献

- 1) 土木学会橋床構造の進歩調査分科会：鋼床版の発展と現状、土木学会誌、1982、9。
- 2) 日本鋼構造協会規格鋼床版用U形鋼、JSSC、1983、4。
- 3) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計及び施工指針、1983、8。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書。同解説（Ⅱ。鋼橋編）、1980、2。
- 5) Cheung, Y. K. : Finite Strip Method in Structural Analysis, Pergamon Press, 1976。
- 6) 山田善一、大宮司 尚：鋼床版床組の最適設計の実用化に関する研究、土木学会論文報告集、第233号、1975、1。
- 7) 土木学会本四連絡橋鋼上部構造研究小委員会、本州四国連絡橋公団：鋼床版設計要領（案）、鋼床版現場施工基準（案）、1979、7。
- 8) Vanderplatts, G. N., Sugimoto, H. and Sprague, C. N. : ADS-1, A New General-Purpose Optimization Program, Proc. AIAA/ASME/ASCE/AHS 24th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Lake Tahoe, Nevada, May 2-4, 1983。
- 9) Vanderplatts, G. N. and Sugimoto, H. : Numerical Optimization Technics for Mechanical Design, International Symposium on Design and Synthesis in Tokyo, July 11-13, 1984。
- 10) Powell, M. J. D. : Algorithms for Nonlinear Constraints that use Lagrangian Function, Mathematical Programming, Vol. 14, No. 2, 1978。
- 11) Powell, M. J. D. : A Fast Algorithm for Nonlinear Constrained Optimization Calculations, Report DAMTP77/NA2, University of Cambridge, England。
- 12) 渡辺 昇、大島 久：鋼床版設計実例の全国調査と鋼床版の経済設計、橋梁と基礎、1976、9。