

鋼床版床組の最適設計の実用化に関する研究

PRACTICAL STUDY ON THE OPTIMIZATION
OF STEEL BRIDGE DECKS

山田 善一*・大宮司 尚**

By Yoshikazu YAMADA and Hisashi DAIGUJI

1. ま え が き

コンピューターの大型かつ高速化に伴い、トータルシステムによる橋梁の設計、製作の省力化の試みも一部では成功し、システム化の傾向は、年々強くなっていくと考えられる。トータルシステムの中での一貫作業として、橋梁の自動設計などを経験に基づいて、許容応力度設計で行った場合、でき上がった構造物の設計が最適であるという保証は、必ずしも得られない。したがって、構造物の最適設計の重要性も指摘され²⁾、以来多くの研究者によって実用化が試みられてきたが、橋梁の実設計の手法として本格的な役割を果たすまでにはいたっていないようである。

一般に、橋梁は移動荷重を受ける不静定構造物が多く、最大および最小の断面力を計算するために、変位法などの数値的な解析を用いた影響線解法などが要求される。最適設計のために、非線形計画法と、有限要素法などの行列を用いた解法を組み合わせるような場合は、制約条件式群を簡単に設計変数の関数で表わすことが困難になり、したがって、計算時間も飛躍的に増加する。橋梁は、多種少量生産ということを見ると、個々の設計に対して、最適設計のため膨大な金額を費やすことができないのが実情である。したがって、今後最適設計を実用化していくためには、Suboptimization など^{3),4)}を効果的に用いながら、可能な限り行列演算などの数値解析を省略して、計算時間を減じていく必要がある。

斜張橋、アーチ橋、鋼床版桁橋などの基本線形が与えられた場合、主として経験や試算で決定される塔と桁の剛比、アーチリブと桁の剛比、横桁間隔などの最適値を決定するための実用的手法の開発は、未知の分野として残されている。したがって、最適化の手法を用いて、計

画設計の段階で、機能的にバランスのとれた構造物を設計するためのデータを得ることができれば、従来までの許容応力度設計と組み合わせることによって、より合理的な設計ができるようになると考えられる。

本研究では、鋼床版桁橋の床組の配置と概略断面を、最適設計の手法によって求め、次に許容応力度設計によって最終的な断面を決定する方法を開発した。

鋼床版の輪荷重解析には有限帯板法を用い、最適化のための非線形計画法には、Powell の直接探索法による SUMT を用いた。鋼床版の応力は、横桁間隔一定のもとでは、主として横桁と縦リブの曲げ剛性比によって変動する。縦リブの曲げ剛性が一定の場合は、横桁断面 2 次モーメントの関数で近似的に応力や変位を計算できることがわかり、演算時間を非常に短くすることができた。

以下、2. でモデルの設定および応力解析の概要について述べ、3. で定式化を行い、4. で数値計算結果について考察する。

2. 構造物のモデル化および応力解析

(1) 鋼床版床組のモデル化

橋梁の鋼床版は、平板と直交する格子状の補剛ばりとして構成された連続体構造物であり、そのままでは解析が困難であるので、解析に当たって次のような仮定を設定する。

(a) 縦リブ付鋼床版を弾性的に支えている横桁は、不等沈下のない主桁によって支えられているものとする。

(b) 縦リブ付鋼床版は直交異方性板とする。

(c) 橋軸直角方向には直交異方性板、横桁ともに断面一定とする。

図-1 は鋼床版床組をモデル化したものである。

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 M.S. (株) 春本鉄工所設計係長

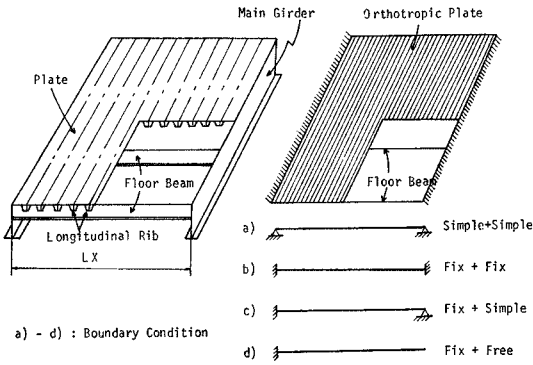


図-1 鋼床版床組のモデル化

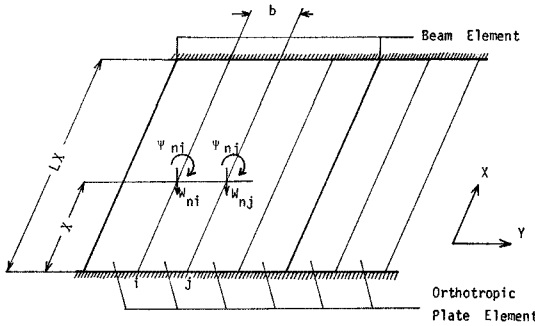


図-2 帯板モデルと節線変位

(2) モデルの応力解析

応力解析の方法については文献 7) に詳述してあるので、ここでは最適設計に必要な数式だけを列記する。

図-2 に示されるように、帯板の面外方向の変位は、未定係数 W_{ni} , ψ_{ni} , W_{nj} , ψ_{nj} を用いて次式で近似される。

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ W_{ni} + \psi_{ni}y + y^2 \left(-\frac{3}{b^2} W_{ni} - \frac{2}{b} \psi_{ni} + \frac{3}{b^2} W_{nj} - \frac{1}{b} \psi_{nj} \right) + y^3 \left(\frac{2}{b^3} W_{ni} + \frac{1}{b^2} \psi_{ni} - \frac{2}{b^3} W_{nj} + \frac{1}{b^2} \psi_{nj} \right) \right\} T_n(x) \dots\dots\dots(1)$$

$T_n(x)$ は表-1 に示すものを用いる。また、未定係数 W_{ni} , ψ_{ni} , W_{nj} , ψ_{nj} は帯板剛性マトリックス表-2 を利用して求められる。ここで、

$$A = \left(-\frac{3}{b^2} W_{ni} - \frac{2}{b} \psi_{ni} + \frac{3}{b^2} W_{nj} - \frac{1}{b} \psi_{nj} \right) \left. \vphantom{A} \right\} \\ B = \left(\frac{2}{b^3} W_{ni} + \frac{1}{b^2} \psi_{ni} - \frac{2}{b^3} W_{nj} + \frac{1}{b^2} \psi_{nj} \right) \left. \vphantom{B} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

とおき、Pelikan Esslinger の公式⁶⁾により直交異方性板の曲げ剛性係数 D_x , D_y , D_{xy} が求まると、直交異方

性板のたわみと断面力は次式で与えられる。

a) 鉛直たわみ (図-2 i, j 線上)

$$\left. \begin{aligned} \delta_i &= \sum_{n=1}^{\infty} W_{ni} T_n(x) \\ \delta_j &= \sum_{n=1}^{\infty} (W_{ni} + \psi_{ni}b + b^2A + b^3B) T_n(x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

b) 橋軸直角方向の板の曲げモーメント

$$M_x = -D_x \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} = -D_x \sum_{n=1}^{\infty} \{ W_{ni} + \psi_{ni}y + y^2A + y^3B \} T_n''(x) \dots\dots\dots(4)$$

c) 橋軸方向の曲げモーメント

$$M_y = -D_y \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} = -D_y \sum_{n=1}^{\infty} (2A + 6By) T_n(x) \dots\dots\dots(5)$$

またヤング係数を E , 横桁の断面 2 次モーメントを I_B とすると、横桁の曲げモーメントは次式のようにになる。

$$M_{TX} = -EI_B \sum_{n=1}^{\infty} W_{ni} T_n''(x) \dots\dots\dots(6)$$

3. 定式化

(1) 定式化のための前提条件

本論文で取扱う最適設計を行うためには、次のような前提条件が必要となる。

- (a) 鋼床版の床組作用だけを考慮しており、主桁作用は考慮しない。
- (b) 鋼床版の材質ならびに許容応力度は、設計者によって与えられるものとする。
- (c) デッキプレートならびに縦リブの断面も設計変数とすることができるが、この論文においては、横桁の断面のみを設計変数としている。

(d) 最小コストの定式化は行わないので、最小コストについては、設計者が算出された最小鋼重、溶接長、継手形状、施工性などを考慮して決定する必要がある。

(e) 図-3 は鋼床版橋の床組自動設計のマクロフローチャートである。この方法では、まず鋼床版の横桁を単純支持と考え、最適横桁間隔と概略断面を決定し、最終的に任意支持鋼床版の解析プログラムで詳細断面を決定する方法となっている。このフローチャートでわかるように、最適設計の結果は詳細設計を行うための基本データとして重要な意味をもつものである。

(2) 最適化手法の検討





比較的大規模な構造物の最適設計によく用いられる手法として、次のものがあげられる。

- a) Sequential Linear Programming (SLP)³⁾

- b) Variable Metric Method を用いた SUMT^{8),9)}
- c) Powell の直接探索法を用いた SUMT

これらの手法と有限帯板法を組み合わせた場合の問題点を、主として計算時間の点から考察する。

表—1 固有関数

Boundary Condition	λ_n	Limit of $\lambda_n L$	$T_n(x) \quad n=1,2,3,\dots,n$
a) 	$\frac{n\pi}{L}$	None	$\sin \lambda_n x$
b) 	$\lambda_1 = 4.7300408/L$ $\lambda_2 = 7.8532046/L$ $\lambda_3 = 10.9956078/L$ $\lambda_4 = 14.1371655/L$ $\lambda_5 = 17.2787596/L$ \vdots $\lambda_n = \frac{(2n+1)\pi}{2L}$	$\lambda_n L < 30$ $\lambda_n L > 30$	$\frac{\sin \lambda_n L - \sinh \lambda_n L}{\cosh \lambda_n L - \cos \lambda_n L} (\cosh \lambda_n x - \cos \lambda_n x)$ $+ \sin \lambda_n x - \sinh \lambda_n x$ $-\cos \lambda_n x + \sin \lambda_n x$
c) 	$\lambda_1 = 3.9266023/L$ $\lambda_2 = 7.0685827/L$ $\lambda_3 = 10.2101761/L$ $\lambda_4 = 13.3517688/L$ $\lambda_5 = 16.4933614/L$ \vdots $\lambda_n = \frac{(4n+1)\pi}{4L}$	$\lambda_n L < 30$ $\lambda_n L > 30$	$\frac{\sinh \lambda_n L - \sin \lambda_n L}{\cosh \lambda_n L - \cos \lambda_n L} (\cosh \lambda_n x - \cos \lambda_n x)$ $+ \sinh \lambda_n x - \sin \lambda_n x$ $\cos \lambda_n x - \sin \lambda_n x$
d) 	$\lambda_1 = 1.8751041/L$ $\lambda_2 = 4.6940911/L$ $\lambda_3 = 7.8547574/L$ $\lambda_4 = 10.995407/L$ $\lambda_5 = 14.1371684/L$ \vdots $\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L}$	$\lambda_n L < 30$ $\lambda_n L > 30$	$\frac{\sin \lambda_n L + \sinh \lambda_n L}{\cos \lambda_n L + \cosh \lambda_n L} (\cos \lambda_n x - \cosh \lambda_n x)$ $+ \sinh \lambda_n x - \sin \lambda_n x$ $\cos \lambda_n x - \sin \lambda_n x$

有限帯板法における未定係数を決定するための剛性マトリックスは比較的自由度が高く、かつノンゼロ要素によるバンド幅が非常に狭いという性質がある。したがって、変位を求める過程で、バンドマトリックスの形状が破壊されるような手法は適していないと考えられる。たとえば、変位を求めるために逆マトリックスを求めなければならないと仮定すると、ノンゼロ要素が全体に広がって、正方行列と帰してしまうことになり、記憶容量、計算時間ともに著しく増加することになる。したがって、Gauss の直接法などにより、ノンゼロ要素のみの取扱いだけで変位が求まることが重要である。

以上のことを考慮して、鋼床版の最適設計には、制約条件式群の影響係数²⁾や、探索方向を決定するために、目的関数の勾配^{8),9)}を求める必要のない Powell の直接探索法を用いた SUMT が適していると考えられる。一般の橋梁においても、剛性マトリックスのノンゼロ要素によるバンド幅は非常に狭くなるので、直接探索法による SUMT が適していると考えられる。

表—2 帯板の剛性マトリックス

$\frac{13b}{35}\lambda_n^4 D_x TTX + \frac{12}{b^3} D_y TTY$ $+ \frac{24}{5b}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$	$\frac{11b^2}{210}\lambda_n^4 D_x TTX + \frac{6}{b^2} D_y TTY$	$\frac{9b}{70}\lambda_n^4 D_x TTX - \frac{12}{b^3} D_y TTY$	$-\frac{13b^2}{420}\lambda_n^4 D_x TTX + \frac{6}{b^2} D_y TTY$
	$+\frac{2}{5}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$	$-\frac{24}{5b}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$	$+\frac{2}{5}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$
	$\frac{b^3}{105}\lambda_n^4 D_x TTX + \frac{4}{b^3} D_y TTY$ $+\frac{8b}{15}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$	$-K(1,4)$	$-\frac{b^3}{140}\lambda_n^4 D_x TTX + \frac{2}{b^3} D_y TTY$ $-\frac{2b}{15}\lambda_n^2 D_{xy} TTX$
SYN.		$K(1,1)$	$-K(1,2)$
$TTX = \int_0^L \left(\frac{dT_n(x)}{\lambda_n dx} \right)^2 dx$			
$TTY = \int_0^L (T_n(x))^2 dx$			
$TTXY = \int_0^L \left(\frac{dT_n(x)}{\lambda_n dx} \right)^2 dx$			$K(2,2)$

(3) 設計変数

図—4 におけるように、鋼床版支間 $LX(m)$ と鋼床版長 $LY(m)$ は最初から与えられた定数である。この研究の目的は、 $LX(m) \times LY(m)$ の直交異方性板を支持する最適横桁本数を決定し、そのときの最適横桁断面を決定しようというものである。

今回の研究では縦リブの寸法諸元 図—5 (a) は一定と考え、SUMT で決定する未知の設計変数には次の2つを選んだ。

- a) 横桁ウェブ高 $HX(m)$
- b) 横桁フランジ面積 $AX(m^2)$

逆梯形縦リブの断面寸法は、道路橋示方書 (昭和48年2月)

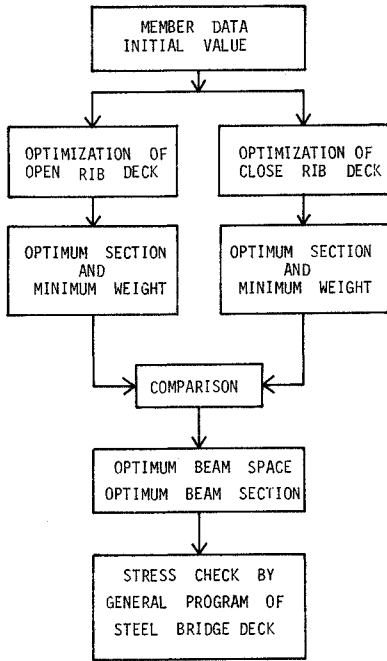


図-3 床組自動設計フローチャート

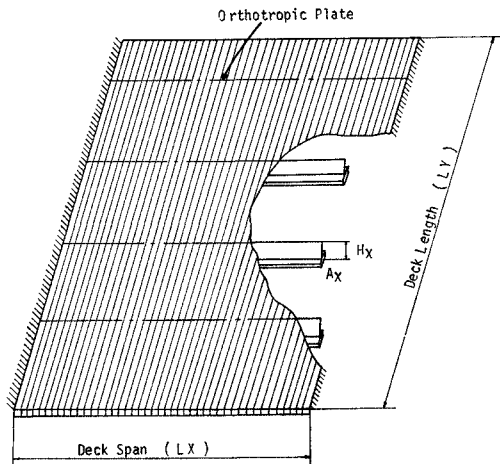
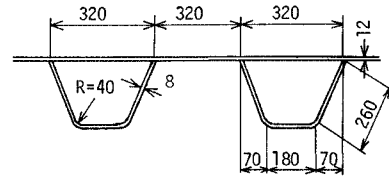


図-4 床組配置図

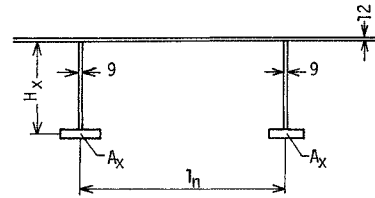
の最小板厚の規定 8(mm) とデッキプレートの最小板厚の規定 12(mm) によって決定される要素が多いと考えられたので、最適設計の対象からは除外した。

(4) 目的関数

縦リブの断面寸法を一定としたことにより、目的関数は横桁の総重量となる。図-4 に示すように、断面一定の直交異方性板をフランジ断面積 $Ax(m^2)$ 、ウェブ高 $Hx(m)$ 、ウェブ厚 9(mm) の横桁 NT (本) で支持すると、目的関数は次式で表わされる。



a) Longitudinal Rib



b) Floor Beam

図-5 鋼床版断面寸法

$$f(X) = NT \cdot (AX + 0.009 HX) \cdot LX \cdot 7850 \text{ (kg)} \dots\dots\dots (7)$$

ここで LX (m) は鋼床版支間である。

(5) 制約条件

本研究では、最適設計の演算時間に一番大きな影響を与えると考えられる、横桁の断面力と変位、縦リブの断面力と変位を制約条件に選んだ。

a) 載荷方法

横桁の応力算出のための荷重には輪荷重と死荷重、縦リブに対しては死荷重の影響は小さいので、輪荷重のみを考慮することにした。

載荷方法としては、図-6 に示すように、横桁は着目する横桁の着目点に最大の応力が生じるように、橋軸直角方向に可能な数だけの後輪荷重を載荷させた。縦リブについては、縦リブ着目点を橋軸直角方向に切断する線上に沿って、可能な数だけの後輪荷重を載荷させた。横桁ならびに縦リブの着目点は支間中央とした。

b) 行列演算の処理手順

図-6 (a), (b) に示すように、横桁間の直交異方性板は自動的に 4 個の帯板に等分割され、部材番号と節線番号との対応づけ、ならびに荷重の載荷は自動的に行われる。したがって、横桁の本数を増加させるごとに節線数が 4 本増加するので、6 本の場合は 42 元の連立方程式を解けばよいが、11 本の場合は 84 元の連立方程式を解かねばならないことになる。

いま横桁応力を算出するために、図-6 (a) の節線 17-18 上に輪荷重が載荷されたときの荷重ベクトルを $\{R_1\}$ 、変位ベクトルを $\{u_1\}$ 、また、縦リブ応力を求めるために、節線 21-22 上に輪荷重が載荷されたときの荷重ベクトルを $\{R_2\}$ 、変位ベクトルを $\{u_2\}$ とする。これ

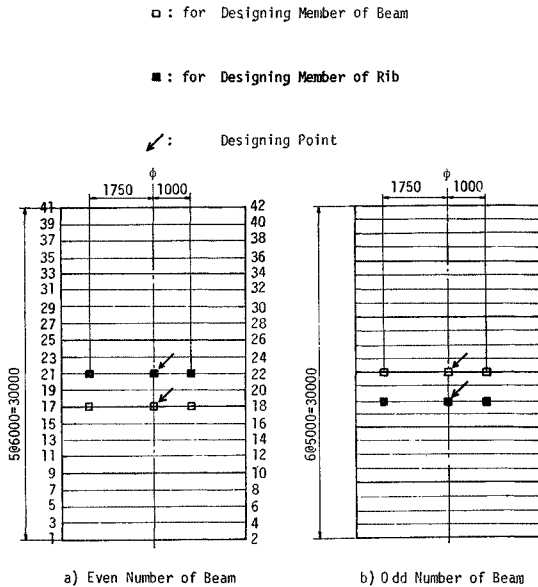


図-6 帯板番号のセットと荷重方法

らの $\{R_1\}$ と $\{R_2\}$ は同時荷重ではないので、2つのつり合い方程式 8 (a), 8 (b) を解かねばならないが、鋼床版全体の剛性マトリックス $[K]$ は共通であるということに着目すると、横桁変位と縦リブ変位を求める処理を式 (9) によって同時に行うことができる。

$$[K]\{u_1\} = \{R_1\} \dots\dots\dots(8 \cdot a)$$

$$[K]\{u_2\} = \{R_2\} \dots\dots\dots(8 \cdot b)$$

$$[K]\{\{u_1\}, \{u_2\}\} = \{\{R_1\}, \{R_2\}\} \dots\dots\dots(9)$$

式 (9) のように、変位ベクトルと荷重ベクトルを並列して演算を行うと、 $\{u_1\}$ と $\{u_2\}$ が求まるタイミングが同じになり、演算時間も約半減されることになる。

c) 活荷重たわみの制約

縦リブの支間は横桁間隔、横桁の支間は主桁間隔とする。活荷重たわみの制限は、横桁については、横桁支間の $1/500$ 以内、縦リブについては、図-7 に示すように、縦リブ支点位置からのたわみが縦リブ支間 l_n (m) の $1/500$ 以内となるようにした。たわみの制限については道路橋示方書 (昭和 48 年 2 月) のプレートガーダーに関するたわみの制約を適用した。縦リブのたわみに支点変位を加えた値を用いると、横桁の断面はほとんどこの縦リブたわみに関する制約で決定されることになる。縦リブと横桁は相互作用によって輪荷重を支えており、縦リブがたわむと同時に横桁もたわむ。したがって、縦リブ

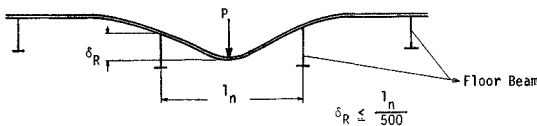


図-7 縦リブのたわみ

の全体のとわみから縦リブを支えている点の横桁のとわみを差し引いた値を用いたほうが妥当であると考えられる。

d) 着目点の変位および断面力の線形近似

有限帯板法と最適化手法との組み合わせでは、Powell の直接探索法を用いたほうが、最も計算時間の短縮を期待できることがわかったが、各探索のたびに有限帯板法による解析を行ったのでは、最適設計の実用化はとうてい望むことができない。

今回の研究では、横桁間隔一定のもとでは、主として鋼床版内の断面力は、縦リブと横桁の剛比の大きさで変化することに着目した。さらに、縦リブの曲げ剛性を一定と仮定すると、横桁断面 2 次モーメントの関数として断面力や変位を近似できることを確かめた。図-8 は初期設計変数 (AX_0, HX_0) によって決定される横桁断面 2 次モーメントを 10% ずつ減じていったときの着目点の変位や曲げモーメントを、有限帯板法で求めてプロットしたものである。図-8 (a) において $N=7$ の曲線が乱れているのは、初期設計変数の与え方に注意を払わなかったためである。縦リブの変位は全体変位であり、横桁のとわみを差し引く前のたわみである。この図からわかるように、着目点の変位や曲げモーメントは、段階的に横桁断面 2 次モーメントの線形的な関数で表わしても問題ないものと考えられる。さらにラグランジュの補間公式を用いて曲線近似を行うと、より正確な近似解が求まるであろう。

初期設計変数における横桁断面 2 次モーメント I_0 に対応する縦リブと横桁の曲げモーメントを、 MR_0, MT_0 、変位を $\delta_{R_0}, \delta_{T_0}$ とし、それから横桁の断面 2 次モーメントが 10% ずつ減少していくときの曲げモーメント (MR_1, MR_2, \dots, MR_i)、(MT_1, MT_2, \dots, MT_i)、変位

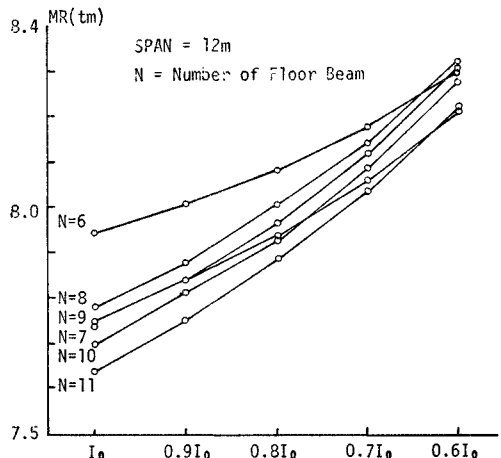


図-8 (a) 横桁断面 2 次モーメントと縦リブ曲げモーメントの関係

$(\delta R_1, \delta R_2, \dots, \delta R_i), (\delta T_1, \delta T_2, \dots, \delta T_i)$ が有限帯板法によって求められているものとする。いま最適化が開始され、新しい設計変数における横桁の断面2次モーメントが I_x になり、その I_x が $0.9I_0$ と $0.8I_0$ の間にあ

るとすると、着目点の曲げモーメントとたわみは次式で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} MR_X &= MR_1 + (MR_2 - MR_1) \cdot SLX \\ MT_X &= MT_1 + (MT_2 - MT_1) \cdot SLX \\ \delta T_X &= \delta T_1 + (\delta T_2 - \delta T_1) \cdot SLX \\ \delta R_X &= \delta R_1 + (\delta R_2 - \delta R_1) \cdot SLX \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

ここで $SLX = \frac{(0.9I_0 - I_x)}{0.1I_0}$ である。

e) 制約条件式ならびに修正目的関数

式(10)で設計変数の変化に伴う断面力と変位が近似的に決定される。ここで縦リブの材質 SS 41, 横桁の材質 SM 50 材は設計者が与えるものとする。縦リブの下フランジの断面係数を $ZRL(m^3)$, 横桁下フランジの断面係数を $ZTL(m^3)$, 縦リブ支間 $Ln(m)$, 横桁支間 $LX(m)$, SS 41 材の曲げ許容応力度を 1400 kg/cm^2 , SM 50 材の曲げ許容応力度を 1900 kg/cm^2 とすると、制約条件式群は次式で表わされる。

(a) 縦リブ下フランジの曲げ応力に関する制約

$$g_1(X) = \frac{14000 \cdot ZRL}{MR_X} - 1 \geq 0 \dots\dots\dots(11)$$

(b) 横桁下フランジの曲げ応力に関する制約

$$g_2(X) = \frac{19000 \cdot ZTL}{MT_X} - 1 \geq 0 \dots\dots\dots(12)$$

(c) 横桁の活荷重たわみに関する制約

$$g_3(X) = \frac{LX}{500 \cdot \delta TX} - 1 \geq 0 \dots\dots\dots(13)$$

(d) 縦リブの活荷重たわみに関する制約

$$g_4(X) = \frac{Ln}{500 \cdot \delta RX} - 1 \geq 0 \dots\dots\dots(14)$$

式(7)と制約条件式 $g_1(X) \sim g_4(X)$ を用いて、修正目的関数は次式で表わされる。

$$f(X, \Gamma_k) = NT \cdot (AX + 0.009HX) \cdot LX \cdot 7850 + \Gamma_k \sum_{i=1}^4 \frac{1}{g_i(X)} \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $\Gamma_k = 100 \sim 0.001$ である。設計変数の大きさにあまり大きな差があると不都合を生じるので、計算上の設計変数としては、 $X_1 = AX, X_2 = HX/100$ が用いられている。変数の差が大きいと数値解析上 Local Optimum に収束する可能性が大きい。

4. 数値計算結果と考察

(1) 数値計算結果

鋼床版の一般寸法および後輪荷重(輪帯幅 0.5 m, 接地長 0.2 m, 重量 8 t) の橋軸直角方向配置を 図-9 に示す。鋼床版支間は 4.8~16 m まで7ケースについて、橋軸方向の長さ 30 m の部分を取り出し、横桁本数を 6

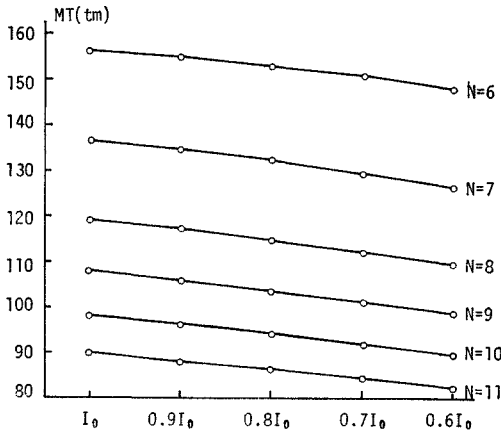


図-8 (b) 横桁断面2次モーメントと横桁曲げモーメントの関係

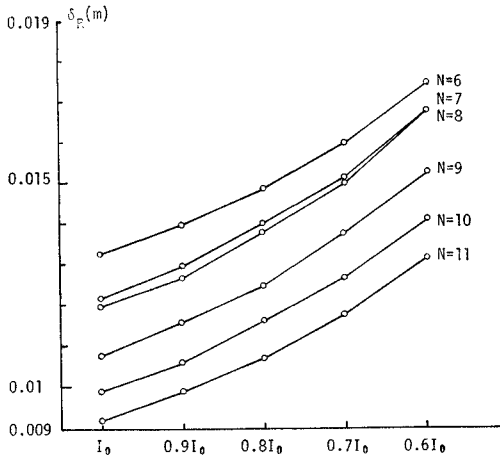


図-8 (c) 横桁断面2次モーメントと縦リブ変位の関係

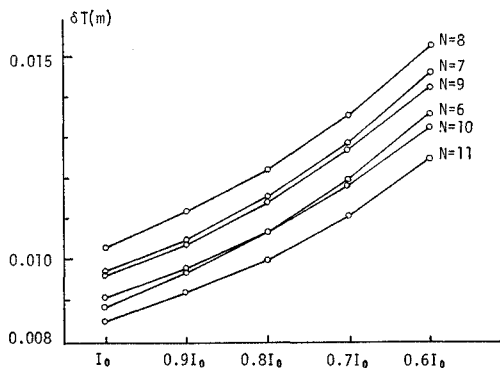


図-8 (d) 横桁断面2次モーメントと横桁変位の関係

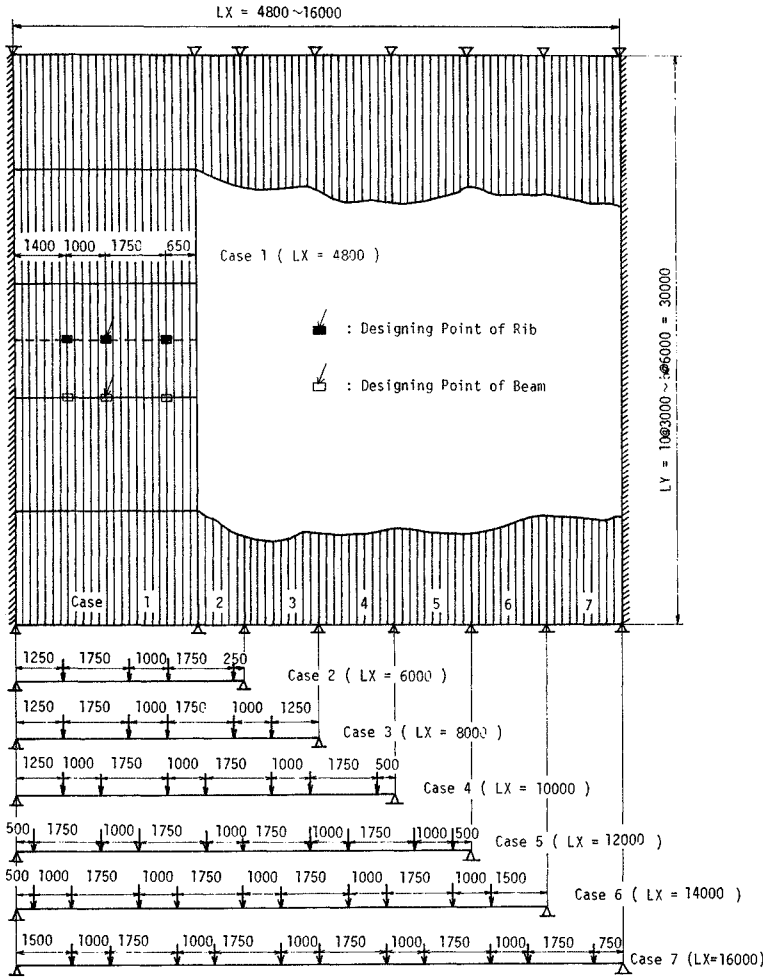


図-9 鋼床版の基本寸法と載荷図

本から 11 本まで変化させ、それらの横桁が等間隔で並べられるときの最適横桁断面を決定し、横桁の総重量を比較して最適横桁間隔を決定した。

図-10 は最適設計プログラムのフローチャートである。各横桁間は自動分割され、各帯板や横桁の節線番号や部材データは自動的に作成されるので、設計者は直交異方性板の剛性係数、鋼床版の支間、輪荷重データなど数枚の基本データをインプットするだけで、床組の最適配置や断面が求まる。設計変数の初期値は横桁本数 6 (本) (横桁間隔 6 m) のときのみ与え、横桁本数が増加して n 本から $n+1$ 本になったときの設計変数の初期値には、 n 本における最適値を用いた。図-10 の NL は横桁本数の下限、 NU は上限であり、下限と上限は設計者が決定しなければならない。

表-3 (a)~(g) は、図-9 に示す鋼床版床組について最適設計を行った結果である。Case 1~7 に至るほとんどの最適解が横桁の Fully Stress で決定されている。

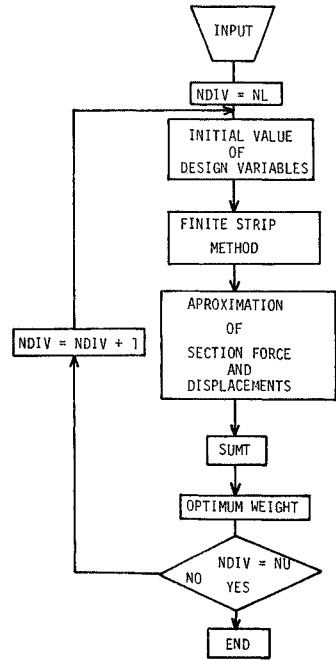


図-10 最適設計フローチャート

たわみは横桁応力に比べて安全側にあることが証明された。図-11 は各ケース、各横桁本数ごとの最小鋼重をプロットしたものである。これらの重量は補剛材の重量を考慮しない値であるので、最小製作費を与える配置は、さらに工場溶接、現場溶接、現場継手の状況などを設計者が判断して決定する必要がある。

(2) 考察および結論

本研究における結論としては次の点があげられる。

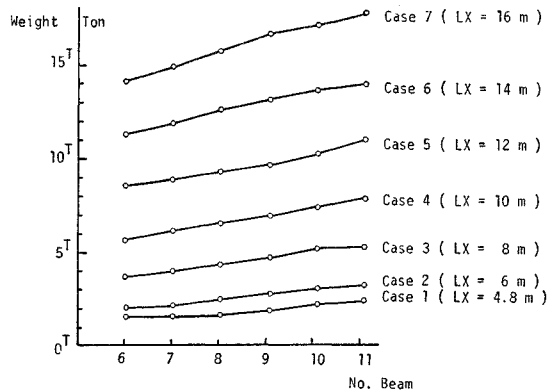


図-11 横桁本数と最小鋼重の関係

表-3 最適設計結果

(a) 支間=4.8 m								
横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0100	0.0004	0.0014	0.0024	0.0033	0.004
	計算結果	$HX_0(m)$	1.00	0.67	0.48	0.34	0.24	0.18
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0004	0.0014	0.0024	0.0033	0.0040	0.0036
	計算結果	$HX(m)$	0.67	0.48	0.34	0.24	0.18	0.18
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.2871	0.2933	0.2769	0.2240	0.1548	0.1401
		$g_2(X)$	0.0012	0.0011	0.0001	0.0014	0.0025	0.0015
		$g_3(X)$	15.6528	2.4786	1.3902	0.6945	0.2308	0.1741
		$g_4(X)$	1.8734	2.2453	2.5110	2.5741	2.5318	2.7378
		初期値(t)	4.707	1.718	1.732	1.856	2.052	2.324
計算結果(t)	1.473	1.515	1.637	1.849	2.112	2.149		

(b) 支間=6.0 m								
横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0100	0.0021	0.0029	0.0038	0.0045	0.0041
	計算結果	$HX_0(m)$	1.00	0.60	0.45	0.32	0.25	0.24
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0021	0.0029	0.0038	0.0045	0.0041	0.0040
	計算結果	$HX(m)$	0.60	0.45	0.32	0.25	0.24	0.22
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.2498	0.2271	0.1893	0.1285	0.1074	0.0819
		$g_2(X)$	0.0018	0.0002	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001
		$g_3(X)$	9.1341	1.6023	0.864	0.3942	0.3230	0.2194
		$g_4(X)$	1.7487	1.9692	2.1292	2.1636	2.362	2.5119
		初期値(t)	5.369	2.487	2.600	2.864	3.179	3.239
計算結果(t)	2.133	2.273	2.546	2.860	2.943	3.108		

(c) 支間=8.0 m								
横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0100	0.0033	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054
	計算結果	$HX_0(m)$	1.00	0.73	0.62	0.50	0.39	0.31
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0033	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054	0.0043
	計算結果	$HX(m)$	0.73	0.62	0.5	0.39	0.31	0.34
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.1909	0.1735	0.1413	0.0838	0.0211	0.0349
		$g_2(X)$	0.0002	0.0011	0.0011	0.0001	0.0004	0.0002
		$g_3(X)$	4.1912	1.5385	1.0371	0.6079	0.2652	0.4320
		$g_4(X)$	1.5226	1.7524	1.9309	1.9806	1.9813	2.3059
		初期値(t)	7.159	4.366	4.542	4.845	5.200	5.645
計算結果(t)	3.742	3.977	4.309	4.679	5.131	5.090		

(d) 支間=10.0 m								
横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0100	0.0044	0.050	0.0040	0.0044	0.0051
	計算結果	$HX_0(m)$	1.00	0.86	0.69	0.71	0.60	0.47
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0044	0.0050	0.0040	0.0044	0.0051	0.0042
	計算結果	$HX(m)$	0.86	0.69	0.71	0.60	0.47	0.50
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.1449	0.1277	0.1262	0.0807	0.0215	0.0209
		$g_2(X)$	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000
		$g_3(X)$	2.4223	1.2750	1.2670	0.9175	0.5416	0.5943
		$g_4(X)$	1.3210	1.5393	1.8373	1.9354	1.9499	2.1953
		初期値(t)	8.948	6.667	7.057	7.324	7.639	8.069
計算結果(t)	5.714	6.173	6.508	6.873	7.333	7.469		

(e) 支間=12.0 m

横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0150	0.0025	0.0029	0.0039	0.0044	0.0047
	計算結果	$HX_0(m)$	1.50	1.37	1.17	0.93	0.78	0.66
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0025	0.0029	0.0039	0.0044	0.0047	0.0049
	計算結果	$HX(m)$	1.37	1.17	0.93	0.78	0.66	0.62
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.1700	0.1538	0.115	0.0634	0.0158	0.0003
		$g_2(X)$	0.0000	0.0004	0.0007	0.0001	0.0001	0.0545
		$g_3(X)$	4.5089	2.1860	1.540	1.0821	0.7611	0.6922
		$g_4(X)$	1.4149	1.6366	1.7767	1.8448	1.9108	2.0790
		初期値(t)	16.108	9.805	10.091	10.367	10.680	11.033
計算結果(t)	8.404	8.830	9.218	9.610	10.037	10.846		

(f) 支間=14.0 m

横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0150	0.0036	0.0035	0.0033	0.0037	0.0037
	計算結果	$HX_0(m)$	1.50	1.47	1.32	1.21	1.04	0.94
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0036	0.0033	0.0033	0.0037	0.0037	0.0039
	計算結果	$HX(m)$	1.47	1.32	1.21	1.04	0.94	0.83
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.1857	0.1909	0.1834	0.1491	0.1197	0.0882
		$g_2(X)$	0.0000	0.0007	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
		$g_3(X)$	3.1673	2.0291	1.7349	1.3640	1.1158	0.8705
		$g_4(X)$	1.3220	1.5900	1.8306	1.9592	2.1018	2.1990
		初期値(t)	18.792	12.930	13.479	14.028	14.355	14.720
計算結果(t)	11.079	11.798	12.467	12.918	13.381	13.802		

(g) 支間=16.0 m

横桁本数		6	7	8	9	10	11	
設計変数	初期値	$AX_0(m^2)$	0.0150	0.0070	0.0065	0.0062	0.0062	0.0060
	計算結果	$HX_0(m)$	1.50	1.30	1.16	1.05	0.93	0.84
設計変数	初期値	$AX(m^2)$	0.0070	0.0065	0.0062	0.0062	0.0060	0.0052
	計算結果	$HX(m)$	1.30	1.161	1.05	0.93	0.84	0.84
制約条件満足度目的関数		$g_1(X)$	0.1426	0.1264	0.1071	0.0745	0.0468	0.0478
		$g_2(X)$	0.0005	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
		$g_3(X)$	2.1299	1.3204	1.0797	0.8357	0.6528	0.6493
		$g_4(X)$	1.1378	1.3103	1.5003	1.6066	1.7631	1.9558
		初期値(t)	21.477	16.446	17.030	17.673	18.264	18.830
計算結果(t)	14.100	14.904	15.705	16.433	17.116	17.681		

(a) 例題で用いた逆梯形閉断面縦リブを有する鋼床版については、横桁間隔 3~6m の範囲では、横桁間隔を大きくするほど経済的な設計となる。横桁間隔を広くすることによって、溶接線長を短くでき、また、現場継手を少なくできるので、製作費を減少させることができ、疲労に対する耐荷力の減少も防ぐことができる。

(b) 鋼床版の支間が広がると、横桁本数の増加に伴う鋼重の増加は著しくなる。

(c) 支間の大きい鋼床版では横桁本数の増加につれて縦リブの変位は増加し、縦リブ応力も増大する。その理由は、横桁剛性の減少に伴い、鋼床版の全体変位が増加するからであろう。剛性の小さい横桁を密に並べるこ

とは、不経済になるばかりでなく、危険側の設計になるという興味深い結果が得られた。

(d) 1ケースの最適設計に要するコンピューターの実行時間は、IBM 360-65 を用いて約 40 秒程度であった。1ケースの最適設計を終了するために、40~80 元の連立方程式を 420 回解いているにもかかわらず、実行時間が短い理由の 1 つは全体の剛性マトリックスの半バンド幅がわずか 4 列であるということである。また第 2 の理由は制約条件式を横桁断面 2 次モーメントの線形的な関数で近似できたことにより、マトリックス演算を大幅に減少させることができたからである。

(e) この研究の成果で得られた電算プログラムを用いると、今まで長時間を費やしていた鋼床版の設計が、わずか数枚のインプットデータを作成するだけで、きわめて容易に行われるようになる。今後、最適設計の実用化が成功していけば、経験の浅い設計者でも、機能的にバランスのとれた設計を、迅速に行うことが可能となるであろう。

(f) ここで与えられた最適設計の結果は、Global Optimum へ収束しているという保証はない。図-11 の曲線が乱れているのは解が Local Optimum へ収束した可能性が強い。現在のところ、必ず Global Optimum へ収束する手法は開発されていないようである。したがって、ここで用いた最適設計の手法は、あくまでも計画設計、あるいは概略設計の段階で、詳細設計を行うためのデータを得るために用いられるべきであると考えられる。

(g) 表-3 (a) 横桁本数 6 本の場合の AX の値が非常に小さく出ているのは、桁形状やせん断応力に関する制約条件が考慮されていないからである。それらの制約条件は演算時間に大きな影響を与えないので、今回の研究対象からは除外した。

(3) 今後の課題

Powell の直接探索法を用いた SUMT で最適設計を行おうとする場合、制約条件式を簡単な式で近似できれば、設計変数や制約条件式の数が少々増加しても計算時間は長くかからない。したがって、連続桁、格子桁、アーチ橋、斜張橋などの断面力や変位を、部材の剛比の関数として近似できれば、これらの構造物の概略設計に関しても、最適設計の重要度が増すであろう。このよう

な問題についても研究を続けている。

5. あとがき

以上、鋼床版の断面力や変位を部材断面 2 次モーメントの関数として表わすことにより、最適設計の実用化を試みた。SUMT に関する収束の問題など疑問点は残るが、計画設計の段階における最適化手法としては優れた方法であるといえる。現時点では、人間の有する種々の判断力と、自動設計に必要なすべての要求を満たした実用的な最適化手法は見当たらないので、下部工まで含めた全体計画の費用の最適化を行うことは、経済的に困難と考えられる。したがって今後は、最適設計を行って最もメリットのある問題から重点的に取り上げ、実用化していくことが必要であろう。

おわりに、本研究に必要な SUMT のプログラムの作成に協力していただいた京都大学大学院博士課程在学中の古川浩平氏ならびに、適切な助言をいただいた同大学助教授 渡辺英一氏、(株)春本鉄工所設計部長 魚谷義彦氏に深謝します。

参考文献

- 1) J. コワリック, M.R. オスボーン: 非線形最適化問題 (山本, 小山訳), 培風館。
- 2) Schmit, L.A.: Structural Synthesis 1959~1969 A Decade of Progress, Japan-U.S. seminar on matrix methods of structural analysis and design, August, 1969.
- 3) 奥村敏恵・大久保禎二: Suboptimization による鋼連続桁の最適設計, 土木学会論文報告集, 第 215 号, pp. 1~14, July, 1973.
- 4) 杉本博之: トラス構造物の実用的最適設計に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 208 号, pp. 23~31, December, 1972.
- 5) 国広哲男・藤原 稔: 直交異方性版理論による鋼床版実用設計法, 建設省土木研究所報告, 137, 昭和 44 年 8 月。
- 6) Pelikan, W. and M. Esslinger: Die Stahlfahrbahn Berechnung und Konstruktion, M.A.N. Forschungsheft, No. 7, 1957.
- 7) 山田善一・大宮司 尚: Finite Strip Method による任意支持鋼床版の解析, 橋梁と基礎, Vol. 8, pp. 6~13, No. 5, 1974.
- 8) 構造設計への非線形最適化手法の応用に関する研究報告, 日本鋼構造協会誌 Vol. 9, No. 93, pp. 5~76, 1973.
- 9) SUMT による構造の最適設計について, 日本鋼構造協会誌 Vol. 7, No. 66, pp. 47~69, 1971.

(1974. 6. 10・受付)