

単純合成桁の自動設計

三菱重工 K K 神戸造船所橋梁設計課 米長 泰

1. はじめに

道路橋における活荷重合成桁は鋼橋のなかでもつとも数多く製作される形式である。すでに建設省土木研究所および阪神高速道路公団において標準設計が遂行され、単純合成桁の基本的な設計方針と構造様式が確立されたのは周知のとおりである。また単純合成桁の多量発注と多量受注の傾向の継続は特に設計業務において機械的な作業手順の標準化をうながし、こゝに電子計算機の導入による作業能率の増大が時流の問題として大きくクローズアップされるに至つたのである。

電子計算機を利用した合成桁の設計々算はすでに数年前から行なわれており一部は実務にも取入れられているのであるがその内容は利用範囲が狭く、単に設計モーメントを与えて上下フランジの所要形状を算出するにすぎないものが圧倒的に多かつた。筆者もこの種の問題は数年前に研究論文を発表し、電算プログラムを作成した。(注1) その当時は単なる断面計算にとまらず設計モーメントの算出や補剛材間隔、たわみなどの計算にも範囲をひろげ、今日発表せんとする本論文の母体はすでに数年前から胎動しておつた次第である。

本論文で着目している単純合成桁は支間 20 m ~ 40 m 程度で各主桁で平行、また各横桁が主桁と直交するいわゆる標準タイプの合成桁を対象にしたものである。最近は高速道路において複雑な線形を所要されたものが多く、従つて橋梁自体も曲線桁や斜橋も数多く実施されていることは事実である。しかしながらそれら橋梁群はそれらの事情に即応した電算プログラムの開発が必要であつて、本論文において述べんとする標準形式はそれなりに一つの意義を有するものである。

本論文の目的は類似設計業務の標準化と機械化および設計成果の正確化と迅速化にあり、最小限のインプットデータによる最大限のアウトプットデータを得ることを立案するものである。本論文に付随して作成された電算プログラムでは、インプットデータとして橋梁の支間と幅員および橋の等級だけを必要とし、従来はむしろインプットデータとして与えられていた主桁間隔や腹板高さ、対傾構配置などいわゆる基本計画も電算によつて行なわれることになつている。設計々算書および材料表などの作成はもちろん電算が行なり。更に重要なことは原価計算の遂行である。合成桁の工場製作における諸元すなわち部材数、溶接延長、ガス切断長、塗装面積などの資料提供により科学的な根拠に基づく合理的な見積が迅速に行なわれるであろう。また本論文で対象外とした斜橋においても近似的に標準化すれば本プログラムも十分活用できる筈である。

(注1) 電子計算機による単純合成桁断面計算の一方法

多田一米長 土木技術 昭和39年5月

2. 合成桁断面計算の理論

合成桁の断面計算は一見やさしそうにみえてなかなかの難事である。そこで筆者は上下フランジを面積値を有する点——「面積点」とみなし、また単位曲げモーメントが作用したときの部材応力を応力係数 σ であらわした。このほか電子計算機によるいくつかの予備計算によつて断面性能を解析し従来行なわれていたいわゆる trial-and-error method にかえて、ほとんど厳密解に近い計算式を誘導することに成功した。

従来、合成桁の断面計算に関してはいくつかの論文が発表され、また現在ではいずれの電算センターでも断面計算のプログラムを有しており、この種の問題は普及度が進んですでに常識化されたものであるが、一計算方法を紹介する意味でその概要を述べたい。

(2-1) 単純桁断面性能の解析

図-1に示すようなI形断面においてつぎの条件が与えられるものとする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{腹板高さ} \cdots \cdots \cdots 2h \\ \text{腹板厚さ} \cdots \cdots \cdots t \\ \text{下フランジ断面積} \cdots \cdots \cdots A_1 \\ \text{上フランジ断面積} \cdots \cdots \cdots A_2 \end{array} \right\} \text{--- (1)}$$

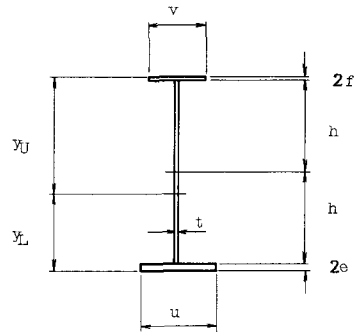


図-1

まず上下フランジの厚さ $2e$ 、 $2f$ を任意に仮定する。

たとえばフランジの厚さと幅の形状比を $1:15$ とすれば

$$e = \sqrt{\frac{A_1}{60}} \quad f = \sqrt{\frac{A_2}{60}} \quad \text{--- (2)}$$

となるであろう。

$$\text{鋼桁断面積} \quad B = A_1 + A_2 + 2ht \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{偏 心} \quad \delta = \{ (h+e)A_1 - (h+f)A_2 \} / B \quad \text{--- (4)}$$

$$J_0 = (2/3)th^3 + A_1(h+e)^2 + A_2(h+f)^2 \quad \text{--- (5)}$$

$$J_\delta = J_0 - B\delta^2 \quad \text{--- (6)}$$

$$\text{縁 距} \quad y_L = h + 2e - \delta \quad \text{--- (7)}$$

$$y_U = h + 2f + \delta \quad \text{--- (8)}$$

$$\text{断面係数} \quad Z_L = J_\delta / y_L \quad \text{--- (9)}$$

$$Z_U = J_\delta / y_U \quad \text{--- (10)}$$

実際のフランジ断面形状はかならずしも寸法比が $1:15$ にはならないので最初の仮定板厚に対して e および f の値が変動する可能性がある。さらに板厚として鋼板の市場板厚などを考慮するとき、 e 、 f の微小変位に対する断面係数 Z の変位量を数式化しておくて便利である。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Z_L}{\partial e} &= \frac{2 A_1 (h + e - \varnothing) y_L - J_{\varnothing} (2 - A_1 / B)}{y_L^2} \\ \frac{\partial Z_L}{\partial f} &= \frac{2 A_2 (h + f + \varnothing) y_L - J_{\varnothing} A_2 / B}{y_L^2} \\ \frac{\partial Z_U}{\partial e} &= \frac{2 A_1 (h + e - \varnothing) y_U - J_{\varnothing} A_1 / B}{y_U^2} \\ \frac{\partial Z_U}{\partial f} &= \frac{2 A_2 (h + f + \varnothing) y_U - J_{\varnothing} (2 A_2 / B)}{y_U^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

さて，断面の解析にあたり計算の便を図るため上下フランジを濃縮して腹板端に固定して，ある面積値を有する抽象的な点——「面積点」として考える。

与えられた曲げモーメント M に対する上下フランジの応力は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L &= M / Z_L \\ \sigma_U &= M / Z_U \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

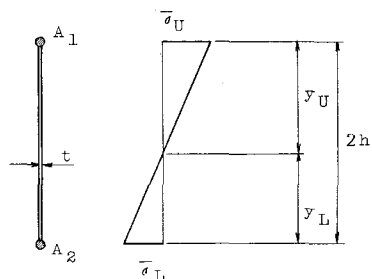


図 - 2

ここで単位モーメント $M = 1$ が作用したときの上下フラ

ンジ応力をそれぞれ $\bar{\sigma}_L, \bar{\sigma}_U$ とおけば

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_L &= 1 / Z_L \\ \bar{\sigma}_U &= 1 / Z_U \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

この $\bar{\sigma}_L$ および $\bar{\sigma}_U$ を「単位応力係数」と呼ぶ。この係数はフランジ許容応力を σ_{ta} および σ_{ca} としたときつぎの条件から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_L M &\leq \sigma_{ta} \\ \bar{\sigma}_U M &\leq \sigma_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

図 - 2 のごとく腹板形状 $2h \times t$ および単位応力係数 $\bar{\sigma}_L, \bar{\sigma}_U$ が与えられたとき

$$\left. \begin{aligned} y_L + y_U &= 2h \\ y_L \bar{\sigma}_U &= y_U \bar{\sigma}_L \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

これより

$$\left. \begin{aligned} y_L &= \frac{\bar{\sigma}_L}{\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_U} \cdot 2h \\ y_U &= \frac{\bar{\sigma}_U}{\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_U} \cdot 2h \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\text{偏心 } \varnothing = \frac{\bar{\sigma}_U - \bar{\sigma}_L}{\bar{\sigma}_L + \bar{\sigma}_U} \cdot h \quad (17)$$

K_1, K_2 を未知とし、腹板断面積を A_w として

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= K_1 A_w \\ A_2 &= K_2 A_w \end{aligned} \right\} \text{----- (18)}$$

とおけば
$$J_{\phi} = \frac{h^2 A_w}{3} (1 + 3 K_1 + 3 K_2) - \phi^2 A_w (1 + K_1 + K_2) \text{----- (19)}$$

ところで $J_{\phi} = y_L / \bar{\sigma}_L \text{----- (20)}$

重心の条件から

$$K_1 y_L = \phi + K_2 y_U \text{----- (21)}$$

(18)(21)式より K_1, K_2 を解けば、与えられた曲げモーメント M に対応する所要フランジ断面積を求めることができる。 すなわち

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{A_w}{2 h} (C y_U + \phi) \\ A_2 &= \frac{A_w}{2 h} (C y_L - \phi) \end{aligned} \right\} \text{----- (22)}$$

ただし
$$C = \frac{1}{h^2 - \phi^2} \left(\frac{y_L}{\bar{\sigma}_L A_w} + \phi^2 - \frac{h^2}{3} \right) \text{----- (23)}$$

以上の計算はフランジを面積点とみなしたときの計算式であり、フランジの板厚を加味した修正式は(11)式を利用して行われる。

(2-2) 合成断面への適用

合成前の応力係数を $\bar{\sigma}_{11}, \bar{\sigma}_{21}$ また合成後の応力係数を $\bar{\sigma}_{12}, \bar{\sigma}_{22}$ とし合成前後の曲げモーメントをそれぞれ M_1, M_2 にてあらわすものとする。両者の比をつぎのようにあらわす。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{12} &= K_{21} \bar{\sigma}_{11} \\ \bar{\sigma}_{22} &= K_{22} \bar{\sigma}_{21} \\ M_2 &= K_M M_1 \end{aligned} \right\} \text{----- (24)}$$

フランジの許容応力を σ_{10}, σ_{20} にてあらわすと次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{10} &\geq M_1 \bar{\sigma}_{11} (1 + K_{21} K_M) \\ \sigma_{20} &\geq M_1 \bar{\sigma}_{21} (1 + K_{22} K_M) \end{aligned} \right\} \text{----- (25)}$$

K_M は与えられた設計から求められるが断面剛比 K_{21}, K_{22} は一次計算の途次において仮定しなければならない。実際は K_{21} は0.7~0.75程度の値となるのでたとえば一次計算で $K_{21} = 0.73$ とにおいて計算し、つぎに確定した実断面で精算することができよう。

(25)式から求まる $\bar{\sigma}_{11}, \bar{\sigma}_{21}$ を第一近似として(24)式に代入すれば上下フランジ面積の第一近似値を求めることができる。この誤差を修正するために(11)式による断面係数の補正量を ΔZ_L および ΔZ_U にてあらわすものとする。この計算式の具体的な手順は文献(注1)を参照されたい。

つぎに乾燥収縮，クリープ，温度変化等による応力と許容応力の割増しなどにより各段階における許容応力の余裕度を ϵ_{10} および ϵ_{20} であらわせば，結局最終的な応力係数はつぎのようにあらわされることになる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{(1 + K_{Z1} K_M) M_1} \left(1 + \frac{\Delta Z_L}{Z_L}\right) (1 + \epsilon_{10}) \\ \bar{\sigma}_{21} &= \frac{\sigma_{20}}{(1 + K_{Z1} K_M) M_1} \left(1 + \frac{\Delta Z_U}{Z_U}\right) (1 + \epsilon_{20}) \end{aligned} \right\} \text{---(26)}$$

つぎに ϵ_{10} , ϵ_{20} の説明を補足する。

主荷重に対する上下フランジ応力を σ_{11} , σ_{12} , σ_{21} , σ_{22} , 乾燥収縮・クリープによる応力を σ_{13} , σ_{23} また温度差による応力を σ_{14} , σ_{24} とあらわせば，フランジの許容応力に対する作用応力の過不足はつぎのようにあらわされる。

主荷重に対して

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{12} &= \sigma_{10} - (\sigma_{11} + \sigma_{12}) \\ \Delta_{22} &= \sigma_{20} - (\sigma_{21} + \sigma_{22}) \end{aligned} \right\} \text{---(27)}$$

乾燥収縮，クリープに対して

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{13} &= 1.05 \sigma_{10} - (\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13}) \\ \Delta_{23} &= 1.15 \sigma_{20} - (\sigma_{21} + \sigma_{22} + \sigma_{23}) \end{aligned} \right\} \text{---(28)}$$

温度差に対して

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{14} &= 1.20 \sigma_{10} - (\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14}) \\ \Delta_{24} &= 1.30 \sigma_{20} - (\sigma_{21} + \sigma_{22} + \sigma_{23} + \sigma_{24}) \end{aligned} \right\} \text{---(29)}$$

これより ϵ_{10} , ϵ_{20} はつぎのようにして求められる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{10} &= \min \left\{ \frac{\Delta_{12}}{\sigma_{10}}, \frac{\Delta_{13}}{1.05 \sigma_{10}}, \frac{\Delta_{14}}{1.2 \sigma_{10}} \right\} \\ \epsilon_{20} &= \min \left\{ \frac{\Delta_{22}}{\sigma_{20}}, \frac{\Delta_{23}}{1.15 \sigma_{20}}, \frac{\Delta_{24}}{1.3 \sigma_{20}} \right\} \end{aligned} \right\} \text{---(30)}$$

3.

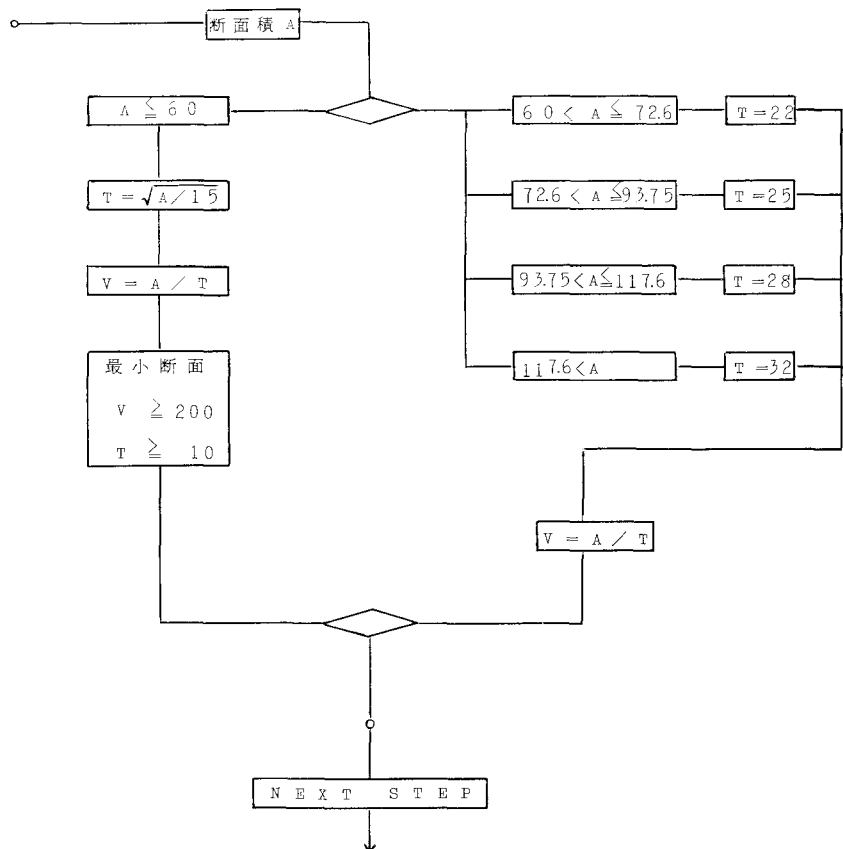


4. サブプログラム

本プログラムにはつぎのようなサブプログラムが含まれている。

- (1) 荷重分配係数による影響線面積の計算
- (2) 横桁曲げモーメント係数による影響線面積の計算
- (3) 床板協力有効幅の計算
- (4) 主桁所要フランジ断面積の計算
- (5) 横桁フランジ断面の形状寸法決定
- (6) 主桁下フランジ断面の形状寸法決定
- (7) マーケットサイズ板厚
- (8) 主桁上フランジ断面の形状寸法決定
- (9) 荷重分配計算における逆マトリックスサブルーティン

主桁の上下フランジ断面積が求められたのち形状寸法を決定する方法は上フランジと下フランジで微妙な相違がある。たとえば上フランジの場合のフローチャートはつぎのようになる。



5・各種作業の内容説明

「インプットデータ」としては前述のとおり橋長，幅員，等級，雪荷重の有無などを読込む。

「基本計画」では主桁本数，主桁間隔，対傾構間隔などを決定する。最近床板が厚くなつたので主桁間隔はなるべく 1^m 500以内におさえた方が得策である。

「床板計画」では床板モーメントの算出，床板厚の決定，主鉄筋の配置，従鉄筋重量などを計算する。「1次計算」ではまず格子剛度を $2=10$ と仮定して荷重分配計算をし適正腹板高を求める。腹板は 1^m 100～ 2^m 200の範囲とし板厚は9%とする。したがって溶接脚長などの関係からフランジ板厚は9%をこえないことが望ましくなる。現在のすう勢から勘案して主桁はSM50材を使用することに決定しても不具合はなく，その場合は許容応力をインプットデータとして必要としなくなるであろう。

「設計断面力」では曲げモーメントおよびせん断力の計算を行なう。

「補剛材」は端部・中間部・水平補剛材にわかれる。主桁の断面変化位置や継手位置と補剛材取付位置をラツプさせたくないので主桁設計の前に補剛材を設計することにしてある。

「主桁断面」では主荷重応力のほかクリープによる応力，降伏安全率などを照査する。またジベルは22 ϕ スタツドジベルとし最小断面は200 $\times$ 10と規定してある。

「現場継手」はSV41A- ϕ 22によるリベット配置，スプライスプレート寸法などを各板幅ごとにマニュアル化したものを電算に記憶させている。リベットを高力ボルトF11.Tに置換えもできる。

「横桁」は単に応力が十分な断面ではなく，橋体の有機的剛性を高めるため一定以上の格子剛度を有するような断面になるよう設計されている。

「2次部材」では横構・対傾構の設計を行なう。横構はCT鋼，対傾構はL材を主に用いる。

ガセツトプレートの大きさは骨組線の角度や部材のスキマなどから決定される。

「工場製作諸元」では溶接延長，塗装面積，ガス切断長，部材数，平均板厚などを構造別に算出し，原価計算および工程管理に必要な資料を提供するものである。

6. おわりに

本論文は標準タイプの合成桁を対象としたがインプット条件を複雑にすると例外構造への適用が可能となるであろう。また自動設計のつぎには自動製図の問題にも言及する必要があるであろう。単純合成桁でもこれから研究しなければならないことはまだまだ山積している。

本論文作成にあたり東京大学奥村教授に御指導をいたしたので感謝致します。

以上