

単純合成桁設計製図の授業内容見直し

米 長 泰

Betterment of the lesson contents concerning Simply supported composite girder designing) 木子

Yasushi YONENAGA

(平成3年8月31日受理)

The lesson of the fifth grade students concerning civic designing is driven by the necessity of the contents betterment because of various matters.

So I challenged to my plan that students have wider range experiences within half so much time as before.

1. はじめに

当学科では高学年設計製図授業が土木関係と建築関係が半分ずつとなった。また従来4単位だった橋工学が2単位となり、残り2単位は建築計画に替ることになった。要するに筆者の授業時間はこの分野に関しては従来の半分になったわけである。

一方産業界では情報処理技術の進歩により、構造解析や設計製図の業務形態が大きく変貌しているの、このことも授業に反映させる必要に迫られている。そこで自分自身が学生に対し「従来の半分の時間で倍のことを浅く広く体験させる」という目標を立て、授業内容の刷新に取り組んだ。

2. 高学年生に対する設計論

本校の教育方針として低学年は描写主体の製図、高学年は計算や計画を伴う製図を指向することになっている。筆者は民間企業時代設計部門に携わっていたことでもあり、高学年はできるだけ製図作業を排除し、設計々算に主力をおくべきだと考えている。即ち授業名を「設計論」とすべきではないかと思う。実際本校機械工学科においては「設計法」という授業を実施している。

設計対象は従来どおり単純合成桁が一番手頃である。最初のRC床版設計は鉄筋コンクリート工学の集大成である。引続いての主桁設計には構造力学の基本である曲げモーメント・せん断力の計算はじめ

平面図形の計算や応力度計算がすべて含まれている。また関連事項として合成桁の下部構造や製作過程、現場架設、補修等の説明を加えると土質力学や土木施工も含まれる。従って学生は4年間で個別に学習した諸事項を総合して、しかも具体的な構造物によって演習するのであるから、最高学年の「設計論」は非常に重要な意味があるといえよう。

製図作業を省力化するためにはCADの導入が必要である。しかしCADだけに頼っていると完成させるためには手作業以上に時間がかかってしまう。従って学生が各自の設計条件をインプットすれば作画してくれるというソフトプログラムの助けが必要になってくる。そして製図省力により浮いた時間でコンクリート重量、塗装面積等を積算する方向へ振向けたい。学生の大半は公務員やコンサルタント、現場監督になるのだから、積算業務は大切な要素なのである。

また設計の専門家になる学生は少ないので、基本的な指導理念として「設計方法を覚え込ませる」のではなく、業務の出発点から終点迄「浅く広く体験させる」という方針で進めてゆきたい。積算の結果、自分の設計した橋がいくらで出来るのか、全額が出てくれば、学生は従来と違った視点での達成感が得られるものと期待している。

昨今は設計計算はパソコンによる自動設計ソフトが深く滲透している。学生用に簡易なソフトを用意し一部体験させる場面が得られれば望外の収穫となるだろう。また各大学は実務設計を軽視して局部的

単純合成桁設計製図の授業内容見直し

な精密研究の方向に進んでいるので、高専教育の持味を生かすためにも大切な授業である。

以上のことを一言で要約すると筆者が提唱する「設計論」となる。こんな欲張ったことを従来の半分の授業時間でどう実施してゆくかが、工夫を要するポイントである。

3. 教科内容改革の要点

授業は平成2年度から実施しつつある。おそらく数年間は施行錯誤を繰返しながら進まざるを得ないだろうが、大体の方針が固まったので要点を述べる。

(1) テキストの選択

社団法人日本橋梁建設協会「合成桁の設計例と解説」¹⁾を採用した。各企業設計専門家の共同執筆であること、実践的な設計々算書スタイルであること、また示方書の規則が解説されており、学生は自分の設計値を置換えればそのまま次のステップに進むことができる。(実際は予想以上にモタモタする)

(2) パソコンの利用

設計の中に荷重分配と呼ばれる格子理論が含まれている。テキストでは簡単な手計算で求めるように出来ているが、格子理論の原点にさかのぼり、不静定構造解析の n 元 1 次連立方程式

$$[A][X] = [B]$$

を導入し、パソコンを利用して解析するように変更した。勿論パソコンでも簡単に求めることができるが、土木構造物の解析基本のひとつである上記マトリックス方程式を体験させるのが狙いである。

(3) 自動設計ソフトの利用

主桁の断面算定は非常に頻雑なうえに全く似たような計算を6回実施するのが通例である。ここの関門を通過できずに1年間終わってしまう学生も少なくない。そこで1ヶ所だけはともかく手計算を体験させ、成功した学生は残りは自動設計ソフトの利用を許可するという方式を採用してみた。

断面ははじめ仮定値を設定して計算するのであるが、未熟な学生には仮定値がなかなか見当つかない。そこで筆者は自分の学位論文を引用し、独自の方法を提供することにした。次章で説明する。

(4) 積算業務

本来なら横桁や対傾構・横構・支承などすべてを設計しなければ積算業務は実施できない。しかしそんな時間的余裕はとて得られない。そこで主桁だけを中心に材料表を作成し、重量計算と塗装面積計算をする。全体の重量はある仮定で割増計算する。

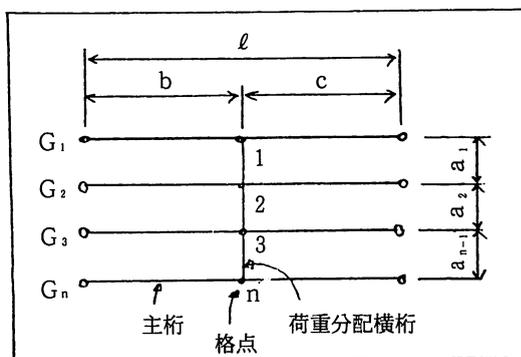


図1 一般格子桁

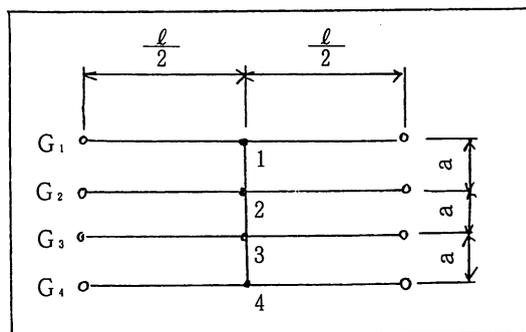


図2 解析モデル格子桁

金額は現在トン当たり100万円が相場とのことなので最後にご愛嬌に「オレの橋はいくらだ!」と実感させようという寸法である。

(5) 自動製図ソフト

本件だけはまだソフトが見つからず立往生している。企業のソフトは精密複雑高価で学生には不向きである。5章で触れるように筆者は企業時代、既に20年前にソフトの開発を実現している。当時の体験をベースに企業の力を借りるか学生に卒業研究として取組ませるか、何らかの方法で数年以内に条件を満たすソフトを入手したいと考えている。

4. 設計手法改善の要点

文献(1)をテキストにしているが、筆者独自の手法を織込んで、学生に寄り道させたり、スピードを早めさせたりしている。2~3の手法を紹介する。

4・1 荷重分配係数の解析

(1) 解析モデル

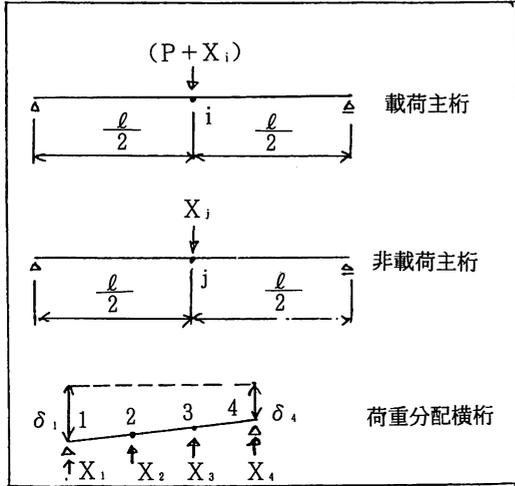


図3 主桁と横桁の荷重状態

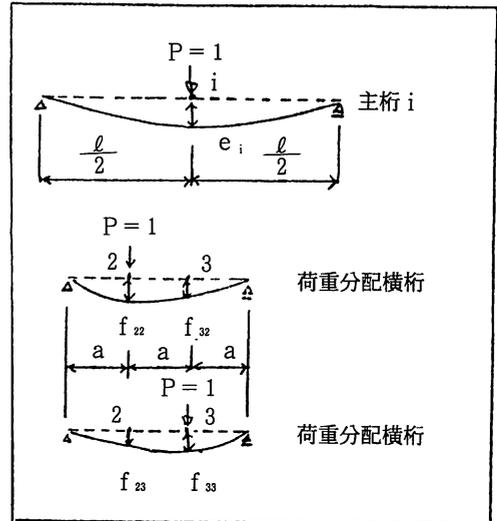


図5 主桁と横桁の変位係数

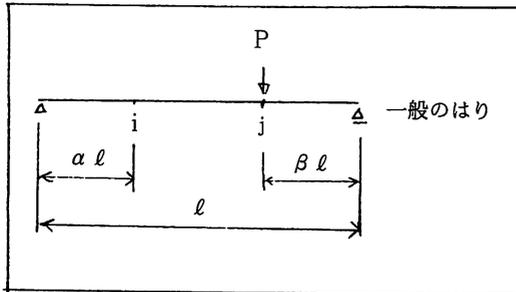


図4 単純支持ばりの変位

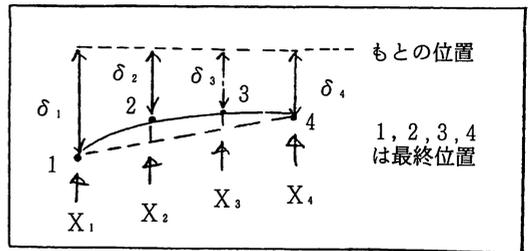


図6 横桁の最終状態

格子桁は図1に示すような一般格子桁と、図2に示すような標準型がある。標準型は主桁の支間中央に1本だけ荷重分配横桁が配置され、各主桁は等間隔である。図1の格子桁は多少存在するが、図2の標準型の方が力学上、また景観上バランスがとれており、実橋もこの方が圧倒的に多い。学生には4本主桁で課題を与えているので、それを解析モデルとする。主桁は単純支持支承である。

(2) 解析条件

- 主桁本数 $n = 4$
- 荷重分配桁 支間中央に主桁と直交し1本
- 主桁支間 l
- 主桁間隔 a
- 主桁断面2次モーメント 4本とも I
- (テキスト³⁾でも外桁と内桁の相連を無視)
 - 主桁ねじり剛性 ゼロ
 - 横桁断面2次モーメント I_0

なお従来の方法では格子剛度を仮定したうえで計算を進めている。本法ではこれに対応し、主桁と横桁の断面2次モーメント I と I_0 の比を10倍と仮定

して解析を進める。

(3) 主桁と横桁の荷重状態

荷重分配係数とは図2に示す桁子桁において、単位集中荷重 $P = 1$ を格点1~4に順次載荷し、そのときの主桁を下方へ変位させようとする負荷量のことをいう。即ち一種の影響線距である。

主桁と横桁は4個の格点で相互に変位を拘束されているから、全く同値の格点力が内力として互いに他に対し反対方向に作用する。主桁と横桁の荷重状態は図3のようになる。ここに X は格点力、 δ は格点変位を示す。

少し注釈すると、载荷主桁の X_i は必ずマイナスになり、主桁 i に隣接する主桁の X_i は必ずプラスとなる。

(4) 変位係数の計算式

図4に示す単純支持ばかりにおいて、 j 点に P を載荷したときの i 点の変位 δ_{ij} は式(1)で求められる。

$$\delta_{ij} = \frac{P l^3}{6 EI} \alpha \beta (1 - \alpha^2 - \beta^2) \quad \text{--- (1)}$$

これをもとに図5に示す主桁の変位係数 e_i と横

単純合成桁設計製図の授業内容見直し

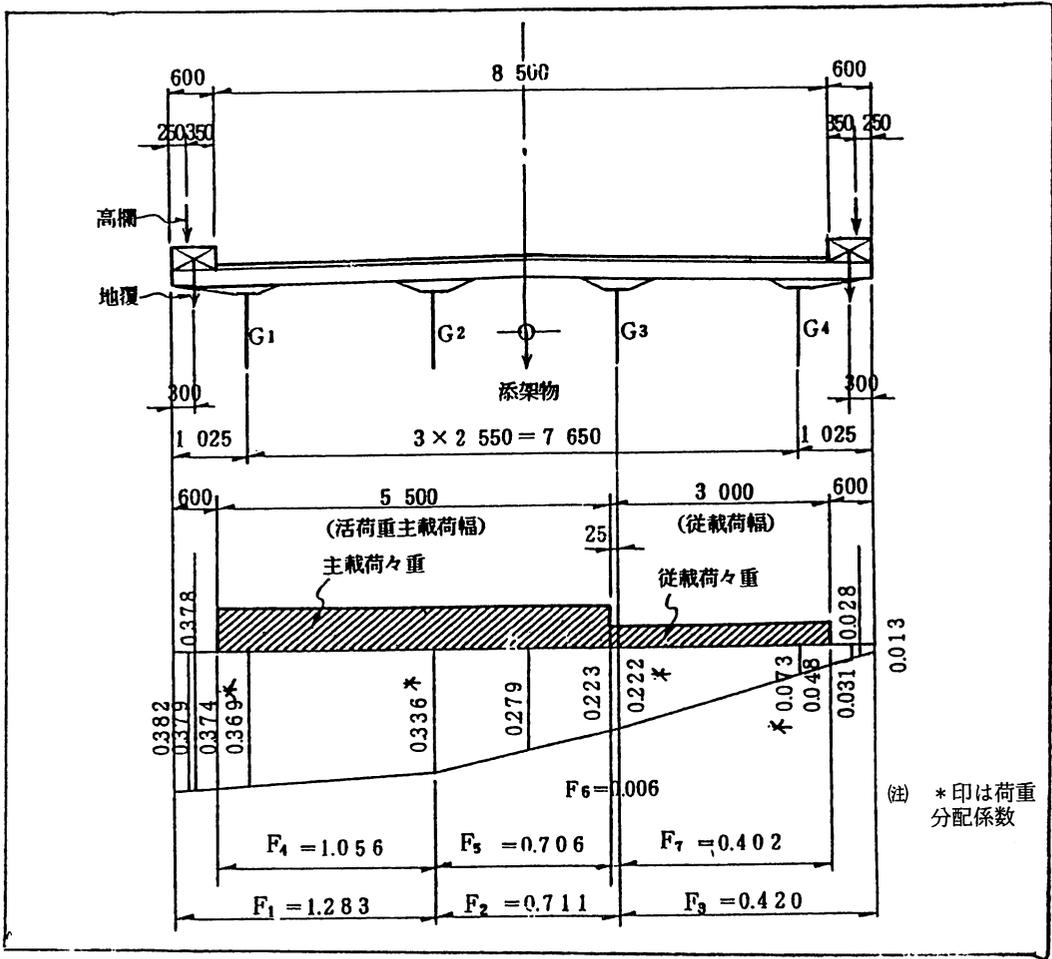


図7 荷重分配係数の応用例

桁の変位係数 f_{ij} を求めると式(2)となる。

$$e_1 = e_2 = e_3 = e_4 = e = \frac{l^3}{48EI} \quad (a = \beta = \frac{1}{2})$$

$$f_{22} = f_{33} = \frac{8a^3}{18EI_q} \quad (a = \frac{1}{3}, \beta = \frac{2}{3}, l = 3a) \quad \text{--- (2)}$$

$$f_{22} = f_{33} = \frac{7a^3}{18EI_q} \quad (a = \beta = \frac{1}{3}, l = 3a)$$

E: 鋼ヤング係数

(5) 拘束条件式

横桁に着目すると

$$\Sigma V = 0 \text{ より } X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 0 \quad \text{--- (3)}$$

$$\Sigma M = 0 \text{ より } 0 \cdot X_1 + 1 \cdot X_2 + 2 \cdot X_3 + 3 \cdot X_4 = 0 \quad \text{(4)}$$

次に主桁の変位は $P = 1$ として

$$\text{載荷主桁 } i \quad \delta_i = (1 + X_i) e \quad \text{--- (5)}$$

$$\text{非載荷主桁 } j \quad \delta_j = X_j e$$

次に横桁は最終状態が図6になることを勘案し

$$\text{格点2 } \delta_2 = \frac{2}{3} \delta_1 + \frac{1}{3} \delta_4 - (f_{22} + X_2 + f_{23} X_3) \quad \text{--- (6)}$$

$$\text{格点3 } \delta_3 = \frac{1}{3} \delta_1 + \frac{2}{3} \delta_4 - (f_{32} X_2 + f_{33} X_3)$$

式(5)と(6)等置すると条件式が2個追加され、方程式が確立する。格点力を X_{ij} と2元で表現すると方程式は式(7)で示される。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ -\frac{2}{3}e & e & f_{22} & f_{23} & -\frac{1}{3}e & X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ -\frac{1}{3}e & f_{32} & e & f_{33} & -\frac{2}{3}e & X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ 0 & 1 & 2 & 3 & X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{3}e & -e & 0 & \frac{1}{3}e \\ \frac{1}{3}e & 0 & -e & \frac{2}{3}e \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{--- (7)}$$

式(7)は学生には少し高度かも知れないが、サフィックスに特徴があるので理解し易い。

(6) 荷重分配係数の計算

計算目的である荷重分配係数 q_{ij} は式(8)によって与えられる。

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + X_{11}) & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & (1 + X_{22}) & X_{23} & X_{24} \\ X_{31} & X_{32} & (1 + X_{33}) & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & (1 + X_{44}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

なお当然のことながら式(8)はレオンハルトの成果表と一致する。

(7) 教育のねらい

式(8)は実橋の設計で活用するが、事例を図7に示す。説明は省略する。本章で導いたマトリックスは筆者の学位論文¹⁰⁾がオリジナルである。実橋への適用例としては文献⁹⁾がある。

今から約30年昔になるが、独人レオンハルトが生涯を奉げて作成した成果表を、例外的な条件も含め、一瞬のうちに計算するコンピュータソフトを完成させたときは正に感無量であった。少し廻りくどいかも知れないが、格子理論基礎教育を兼ねて、学習のひとつこまに採用してゆく考えである。

4・2 主桁断面算定の簡易法

(1) 技術的な課題

合成桁の主桁は合成前と合成後の断面中立軸が離れるので、双方の設計曲げモーメントを単純に加算できない。また応力度照査としてRC床版クリープ・同乾燥収縮・同鋼桁との温度差等も実施のため計算が煩わしい。しかも鋼とコンクリートのヤング率比 n が各照査ごとに目まぐるしく変化する。また計算は主桁断面変化に応じ、外桁・内桁各3ヶ所、即ち6回も計算しなくてはならない。学生の半数はこの計算に明け暮れて1年間終ってしまう。

主桁計算に先立って鋼桁腹板高と上下フランジ寸法を仮定しなければならない。これには高度な技術的ノウハウを必要とし、従来100人の学者や設計者がそれぞれ100様の手法を身につけていた。(現在は

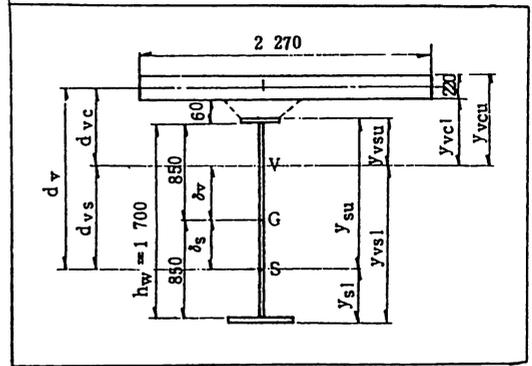


図8 合成桁主桁断面の一例

自動ソフトの時代) 筆者もそのうちのひとつに過ぎないが文献¹¹⁾に発表した厳密解をひながたとし、学生向けに超簡素な断面算定法を確立した。既に昨年度より授業に採用している。

(2) 合成前後曲げモーメントの一元化

合成桁主桁断面の一例を図8に示す。テキスト¹¹⁾16ページから引用したため具体的な数値が記入されているが、一般論としては全く関係ない。図からわかるように合成前図心Sと合成後図心Vは相当離れている。

合成前曲げモーメント M_1 と合成後曲げモーメント M_2 を一元化するひとつのアイデアを述べる。

文献⁹⁾に発表されている建設省資料は常識的な主桁断面を網羅していると思われるが、単位曲げモーメントをそれぞれに作用させて応力度を計算してみると、表1のようになる。 $\bar{\sigma}_{11}$ は合成前下フランジ応力度、 $\bar{\sigma}_{12}$ は合成後下フランジ応力度を示す。 $\bar{\sigma}_{11}$ と $\bar{\sigma}_{12}$ の比は0.65~0.8となっている。視点を変えてみると、合成前断面におおよそではあるが

$$[M_L] = M_1 + 0.73M_2 \quad (9)$$

なる曲げモーメントが作用したのと同価だとみなすことができる。同様に上フランジに対しては

$$[M_U] = M_1 + 1.3 \times 10^{-5} h^2 M_2 \quad (10)$$

表1 合成前後主桁断面の応力度係数

床板断面	上フランジ断面	ウェブ断面	下フランジ断面	$\bar{\sigma}_{11}$	$\bar{\sigma}_{12}$	κ_{z1}
2750×190	260×25	1700×9	500×32	3.546	2.629	0.741
2750×190	280×28	1900×9	550×32	2.840	2.161	0.761
2750×190	330×32	2000×9	630×32	2.326	1.842	0.792
3400×200	240×12	1200×9	380×28	7.884	5.084	0.645
3400×200	280×18	1300×9	440×28	6.041	4.226	0.700
3400×200	310×20	1500×9	480×28	4.686	3.388	0.729

数値をあたえるのが長所であるようだ。

(4) 主桁上下フランジ算定

主桁上下フランジの算定で当面必要なのは断面積である。従って便宜的にフランジを面積を有する点即ち「面積点」と考える。概念図を図10に示す。一旦フランジ面積を求めたあと、図11のように実断面に変換させればよい。

上下フランジの許容応力度を σ_{1a} 、 σ_{ca} と表せば単位曲げモーメント $M=1$ に対する応力度 $\bar{\sigma}_{11}$ と $\bar{\sigma}_{21}$ は

$$\bar{\sigma}_{11} \leq \frac{\sigma_{1a}}{[M_{U1}]} \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{21} \leq \frac{\sigma_{ca}}{[M_{U2}]} \quad (12)$$

図12を参考にこれより偏心距離が求められる。即ち

$$\phi = \frac{\bar{\sigma}_{21} - \bar{\sigma}_{11}}{\bar{\sigma}_{21} + \bar{\sigma}_{11}} \cdot h \quad (12)$$

次に上下の鋼桁端迄の距離は

$$y_L = h - \phi \quad (13)$$

$$y_U = h + \phi$$

所要フランジ断面積は次式で与えられる。

$$C = \frac{1}{h^2 - \phi^2} \left(\frac{10^5 y_L}{\bar{\sigma}_{11} A_w} + \phi^2 - \frac{h^2}{3} \right) \quad (14)$$

$$A_1 = tw (C y_U + \phi) \times 1.05$$

$$A_2 = tw (C y_L - \phi) \times 1.05$$

ただし A_w と tw は腹板の断面積と板厚である。また1.05は学生指導上の安全係数で、許容応力度 $2100\text{kg}/\text{cm}^2$ に対し $1950\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上になれば可としている。なお「面積点」や腹板高を $2h$ と表現する等により解析が著しく簡易になる。

(5) 計算例

【問】図13に示す断面に合成前死荷重 288tm 、合成後死活荷重 314.6tm が作用するとき鋼桁を設計せよ。

【解答】 $M_1 = 288\text{tm}$

$$M_2 = 314.6\text{tm}$$

$$[M_L] = M_1 + 0.73M_2 = 288 + 0.73 \times 314.6 = 517.7\text{tm}$$

図9より $2h = 170\text{cm}$ (腹板高)

$$[M_U] = M_1 + 1.3 \times 10^{-5} h^2 M_2 = 288 + 0.094 \times 314.6 = 317.6\text{tm}$$

$$\bar{\sigma}_{11} = \frac{\sigma_{1a}}{[M_L]} = \frac{2100}{517.7} = 4.056 \text{ kg}/\text{cm}^2 / \text{tm}$$

$$\bar{\sigma}_{21} = \frac{\sigma_{ca}}{[M_U]} = \frac{2100}{317.6} = 6.612 \quad "$$

$$\phi = \frac{\bar{\sigma}_{21} - \bar{\sigma}_{11}}{\bar{\sigma}_{21} + \bar{\sigma}_{11}} \cdot h = \frac{6.612 - 4.056}{6.612 + 4.056} \times 85 = 20.37\text{cm}$$

$$y_L = h - \phi = 85 - 20.37 = 64.63\text{cm}$$

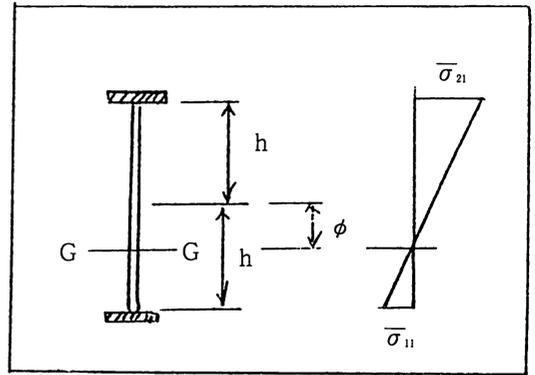


図12 応力度の関係

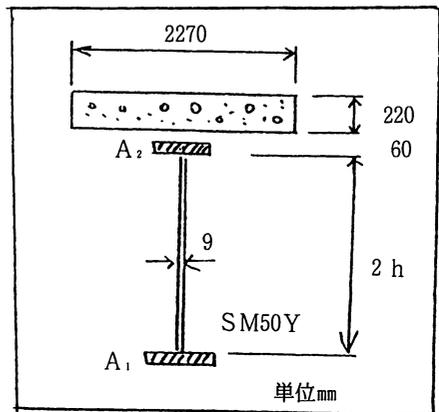


図13 設計例題断面

$$y_U = h + \phi = 85 + 20.37 = 105.37\text{cm}$$

これより

$$C = \frac{1}{h^2 - \phi^2} \left(\frac{10^5 y_L}{\bar{\sigma}_{11} A_w} + \phi^2 - \frac{h^2}{3} \right) = \frac{4.056 \times 170 \times 0.9}{85^2 - 20.37^2} + 20.37^2 - \frac{85^2}{3} = 1.238$$

$$A_1 = tw (c_{yU} + \phi) \times 1.05 = 0.9 \times (1.238 \times 105.37 + 20.37) \times 1.05 = 142.5\text{cm}^2$$

$$A_2 = tw (c_{yL} - \phi) \times 1.05 = 0.9 \times (1.238 \times 64.63 - 20.37) \times 1.05 = 56.36\text{cm}^2$$

結果 1 - Flg Pl 300 × 19 ・ SM50Y
 1 - Web Pl 1700 × 9 "
 1 - Flg Pl 510 × 28 "

以上のように学生にとって複雑怪奇な計算が非常に簡単な手計算で得られる。なお申し遅れたがフランジ形状は図11において t と u の比率は1:15前後であるから $t = \sqrt{A} \div 15$ とし、その近辺のマーケットサイズ(19mm, 22mm, 25mm等)を選ぶとよい。また例題はテキスト¹¹⁾から引用したもので、テキストの答が若干大きめであるが応力度にゆとりがありすぎることから、結果はピタリ一致とみなしてよい。

(6) 教育のねらい

どんな参考書をもて断面形状が決ってからの計算方法しか示されていない。従って前節の解法は最

単純合成桁設計製図の授業内容見直し

初の断面仮定のうえで極めて重要だと考える。前述のように従来6回詳細計算させるべきところ、1回だけとし、残りは前節の方法で断面形状を推定するに留める。これで設計論の授業は2ヶ月以上短縮できる。浮いた時間で積算業務を体験させようというハラである。20年前の学位論文が活用できるのだから指導にも思わず熱が入ってくる。

5. 今後の課題「CADソフト」

筆者はかつて単純合成桁のCADソフトを作成し土木学会シンポジウム[®]に発表したことがある。ただし使用機器がIBM大型機だったからパソコンにソフトできない。筆者は当時の体験をベースに

- (1) オフライン
- (2) 単独フロッピー形式のCADソフト
- (3) 学生が設計条件をインプットすれば作画してくれるような安価な製図機 or プロッター
- (4) ハード装置一式は一般のCAD教育にも利用できる

といったCADソフトを探している。現在専門メーカーが所有するものは高級すぎる。極論すればメーカーが10年前に利用し、現在廃棄しようとするのを譲り受けるぐらいで丁度よい。どこかにないものか。また別法として、ハードだけを購入し、ソフトは学生に卒業研究として取組ませるという手もある。

現在設計計算を完了し作図迄進める学生は皆無に近い。それが前章の簡易断面算定法と本章のCADソフトがあれば、全員に初期の計画から最後の積算迄、まさに一貫通貫で体験させるという理想的な授業が完成するのである。引続き実現に向けて努力してゆきたい。

6. おわりに

筆者は高学年の設計製図は「設計論」として、4年間習得した個別工学を復習し、応用し、集大成させるものとして重視している。本校は土木と建築双方の設計製図を取入れる教育方針である。この特長を生かし発展させるため、「従来の半分の時間で倍の体験を浅く広く行う」という理想像を描いた。そして既に一部実行しているの、苦勞しているポイントや今後各位から御助力いただきたい事項等を述べた次第である。

国内では橋工学が鋼構造工学に変わりつつある。筆者は鋼橋の他に鉄骨や鉄塔・水門扉等の教育が出来ればと前向きに解釈している。しかし実際には各大学で研究が深く進み局所的になったためとの事情も少なくないと伺っている。ともかく筆者は設計論を確立することが、高専らしい生きた実践教育に役立つものと確信している。

参考文献

- 1) 長谷川鏞一他, 合成桁の設計例と解説 社団法人日本橋梁建設協会 1987. 7.
- 2) 米長泰, 電子計算機による2, 3の橋梁構造解析と実務設計への適用に関する研究 学位論文東京大学 1970. 5.
- 3) 米長泰・島田喜十郎, 主ゲタ間隔の異なる連続格子合成ゲタの設計 土木技術20巻12号P. 45~51 1965.12.
- 4) 米長泰・多田安夫, 電子計算機による単純合成桁断面計算の一方法 土木技術19巻4号P. 5~13 1964. 4.
- 5) 道路橋標設計図2 建設省土木研究所1965頃
- 6) 米長泰, 橋梁の自動製図およびその周辺状況について 土木製図の自動化に関するシンポジウム 1 土木学会土木製基準改訂委員会編テキスト P. 47~53 1972. 9.