

電子計算機を利用した国鉄構造物の新しい設計法

国鉄・構造物設計事務所 正員○西亀達夫 正員 黒河内浩
正員 近藤時夫 正員 田村浩一
正員 田島二郎

1. はしがき

国鉄における構造物については設計の能率化および保守管理の合理化の見地から、非常に古い時代から標準化が行なわれてきた。特に昭和40年度から開始された第3次長期計画にあたり膨大な工事を限られた要員で遂行しなければならない現況にあり、工事の能率化が叫ばれてきた。

そこで国鉄では構造物設計事務所において、設計頻度が高い構造物に対して表-1に示すように標準設計を作成した。

表-1 土木構造物標準設計の種別

しかしこれらの標準設計の使用状況を工事局の代表的工区について調査した結果、一般の線増工事では標準設計およびその修正設計がけた、カルバート、擁壁などでは60~95%程度使用されているが、都市内工事ではその割合が10~60%と低いことがわかった。これは現地の条件による諸寸法の制約がきびしいために特定の条件の組合せを考慮した現在の標準設計の件数だけでは十分でないことを示している。

従つて標準設計の徹底をはかるためには、互換性を考慮すべき特殊な構造物を除いて設計条件を細分し、その件数を更に著しく増さなければならない

が、この結果ほとんど使用されない図面もあらかじめ準備するという不経済を生ずる。

なお設計法の基準となる建造物設計基準規程および設計標準は、技術の進歩に伴つて改正される運命にあるので、これらの設計法が変わるたびごとに標準図を作成しなおすことも容易ではない。

国鉄の今後の主要な工事は都市線増、新幹線などが予想されるので、以上述べたような標準設計図の作成とその適用にあつての問題を解決するためには、電算機を徹底的に利用した新しい標準設計法を採用する必要がある。

2. 電算機利用による自動設計・製図

2.1 作業の流れ

当事務所においては電算機利用の範囲を拡大し、電算に肩代りできる設計業務は極力それによるこ

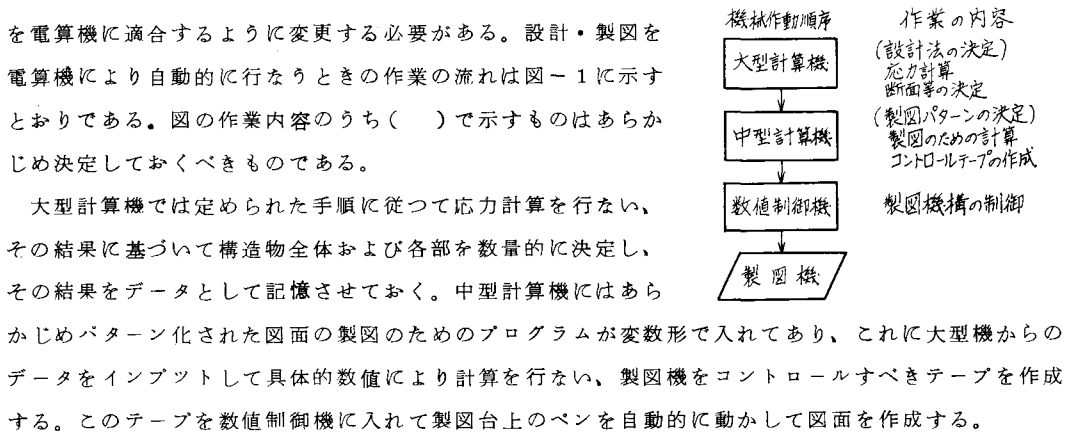
構造種別	形式および内容	標準図
鋼 げ た	トラフ、Iビーム($l=2.2\sim6.7^m$)、上路、下路、プレートガーダー($l=8.2\sim46.8^m$)、合成けた($l=12.9\sim40.0^m$)、歩道、工事けた($l=6.0\sim22.0^m$)、	378 ^件
ト ラ ス	上路、下路($l=46.8\sim77.5^m$)、連続($l=3\sim63^m$)、	35
R C けた	スラブ($l=2\sim12.7^m$)、丁形けた($l=7\sim25.2^m$)、Hビーム埋込けた($l=7\sim12.9^m$)、高らん、	121
P C けた	上路けた($l=15.8\sim50^m$)、下路けた($l=40\sim45^m$)、	69
R C 高架橋	3.8 ^m 単線、複線、直、曲、($R=400^m$)、	10
R C カルバート	単純版式、ボックス・メン(スパン)2 ^m 、(橋)2 ^m $\sim$ 5 ^m 、4 ^m 架道橋、	35
橋 台	上路プレートガーダー用	1
橋 脚	R C、P C、鋼けた用 甲形、躯体諸元表	(201)
橋 脚	R C、P C、鋼けた用 矩形、円形、小判形、躯体諸元表	1
橋 脚	R C、P C、鋼けた用 矩形、円形、小判形、躯体諸元表	(415)
橋 脚	R C、P C、鋼けた用 矩形、円形、小判形、躯体諸元表	(2208)
けた 産	P C けた用	72
土 苗	土苗壁、L形、控壁擁壁	74
土 苗	土苗壁、L形、控壁擁壁	1
監 土、他	土工定規、線路側溝、下水渠	1
果かえこ線橋	2 $\sim$ 3線またぎ、巾3 $\sim$ 5 ^m	6
こ線道路橋	入道橋、道路橋(2等橋) 2 $\sim$ 4線またぎ	38
検査坑、他	検査坑、洗滌床、洗滌台	19
果降場、他	コンクリート擁壁、コンクリートブロック、けた式	—
ほ 装	駅前広場、果降場、通路、貨物積卸場、他	—
ず い 道	待避所、断面、変換工、排水工、道床コンクリート、坑門	14

()内は寸法諸元表の件数を示す。

計 875
(2824)

とにして、職員の技術的能力を新しい設計法の確立にむける方針をとっている。このためには従来から用いられてきた設計法を電算機に適合するように変更する必要がある。設計・製図を電算機により自動的に行なうときの作業の流れは図-1に示すとおりである。図の作業内容のうち()で示すものはあらかじめ決定しておくべきものである。

図-1 自動設計、製図の作業の流れ



大型計算機では定められた手順に従って応力計算を行ない、その結果に基づいて構造物全体および各部を数量的に決定し、その結果をデータとして記憶させておく。中型計算機にはあらかじめパターン化された図面の製図のためのプログラムが変数形で入れてあり、これに大型機からのデータをインプットして具体的数値により計算を行ない、製図機をコントロールすべきテープを作成する。このテープを数値制御機に入れて製図台上のペンを自動的に動かして図面を作成する。

2.2 設計法の標準化

設計計算を一貫して電算化するためにはまず設計の方法を標準化しなければならない。従来の設計基準では荷重、計算方法、許容応力度などの要点のみが示されており、設計の前提になる諸条件、計算の流れ、計算結果の設計図への反映、細部設計などについてはそのつど設計者が慎重に判断して定めることが多かった。しかし使用頻度の高い設計を電算機におきかえるためには、従来からの方法を再検討して各種判断の基準を定式化し、また既存の知識を利用して最も適当な設計手順を定める必要がある。例えばPQけたの自動設計では3に述べるように既存の標準設計の知識を十分に活用して非常に能率のよい計算法を定めることができた。

2.3 製図の自動化

土木構造物を造るためには計算結果を図面化しなければならないが、設計ひん度の高い構造物に対しては製図まで一貫して電算機を利用し、途中の人手を省くのが得策と思われる。

(1) 図面のパターン化 設計計算で得られた構造物は一般に平面、側面、断面等の図面で表わされるが、それをどのように表現するかをあらかじめ決めておかなければならない。同種の標準図が既にできているときは、それらの図面から共通の形のもものが集められるのでパターン化が容易である。

パターンを決定するときは、例えば桁の平面図ならなるべく各支間のもの全部に適用できるようにして、プログラムには汎用性をもたせる方がよいのは当然である。しかしあまり範囲を拡大して断面形の異なるものまで多く含ませると、プログラムが複雑となつて必ずしも得でないこともある。

(2) 製図のための計算 中型計算機では、例えば各点の座標を求めるような製図のための計算を行なつて、数値制御のためのテープを作成する。そこでここでは必要最小限の計算を行なわせて他の計算はなるべく大型機ですませるのがよい。しかしこれは原則であつて、計算種別と計算機の種別との関係にはまだ工夫すべき問題が残っている。

(3) 製図の自動制御 製図機構の自動制御の基本的考え方は図形の各交点の座標を定めて、それらの点を順次直線、曲線などで結ぶことである。従つて製図のための計算としてはまず画くべき図形の各点の座標計算が必要であり、各点の相互関係はすべて数式化しておかなければならない。その

関係式を上手に組み合わせて如何にして少ない式で全点の座標を計算させるかということと、これらの点をどのような順序で結んで製図時間を最少にするかということが、最も能率よいプログラムを作成するための要件である。

なおこのように製図してみると、構造物や材料の種類に応じて同一パターン内でも更に小さい同一パターンが現われることが多い。例えばPCけたのケーブル締結部、溶接記号、寸法線の矢印などである。これらは通常パターン化してサブプログラムにする必要がある。その結果同一パターンが繰り返して現われる場合はコーディングのときにDOステートメントを用いることができて便利である。これらの小パターンをどのように上手にまとめるかということもプログラム作成上重要な問題である。

コントロールテープ作成のためのプログラム用言語としてはFortranを使っている。これは現在の国鉄の計算機種を考慮したものであるが、将来はたとえばAPTのような自動製図用の言語が使えような電算機を導入して、製図用プログラム作成の能率を上げる必要がある。

図面には数字・英字のほかに日本文字が用いられている。数字・英字の種類には限界があるが、日本文字は漢字・仮名など多種多様であるから、使用する文字の範囲を限定し、材料表その他も含めて従来と余り異なつた印象を与えない図面を作成するよう工夫が必要である。

3. コンクリート構造物への電子計算機の導入について

3.1 電子計算機利用の具体的内容

電子計算機に計算させる内容には種々あるが、利用度が高く当所の職員の手数が大きく省けるものをまずとりあげることとして、I形および箱形の単線上路直角単純PCけた（スパン15～60m）の設計、製図の自動化からとりかかった。

この内容は次節で述べるが、自動設計プログラムについてはI形および箱形の単線上路直角PCけたはすでに完成し、PC下路けた、PC斜角けた、RCカルバートを目下作成中である。自動製図プログラムについてはI形の単線上路直角PCけたはすでに完成し、箱形の単線上路直角PCけた、I形の単線上路斜角PCけた、RCカルバートを目下作成中である。

3.2 PCけたの自動設計製図

(1) PCけたの自動設計計算 設計を電子計算機に行なわせるために、どのような方法、内容とするかには種々の考え方があるが、今回は許される範囲内で変数を最少限におさえ、過去の経験から得られている知識を極力利用して、その範囲内で自由度の高いプログラムを作成することにした。

すなわちI形にするか、I形なら主けたを何本にするかといった構造形式の決定や断面の概略寸法の仮定は設計者が行なうようにした。このため最初に与えた構造型式については計算過程で断面寸法が修正されて必要最少限の断面がアウトプットされるが、他の構造型式にした場合に、より経済的な断面が求められる可能性がありうるという問題がある。従つて、これらの判断にあたつては、かなりの経験と知識が要求されることになる。

(2) PCけた設計計算の手順 今回作成したPCけた自動設計の適用範囲とフローチャートは、表-2および図-2のとおりである。表-3に示すインプットデーターを入力することにより、まずスパン中央断面の曲げ応力度の計算を行ない、断面が過少または過大な場合には断面形状を修正して適当な断面を算出し、この断面に対してケーブル配置を行なう。フローチャート中の E_{pmax} はスパン

中央におけるP Oケーブル図心位置の上限値、Jはケーブル番号、N(1)は所要ケーブル本数、Kは応力検断断面番号、NUは上縁定着ケーブル本数、 α 、 β は断面の判定条件である。

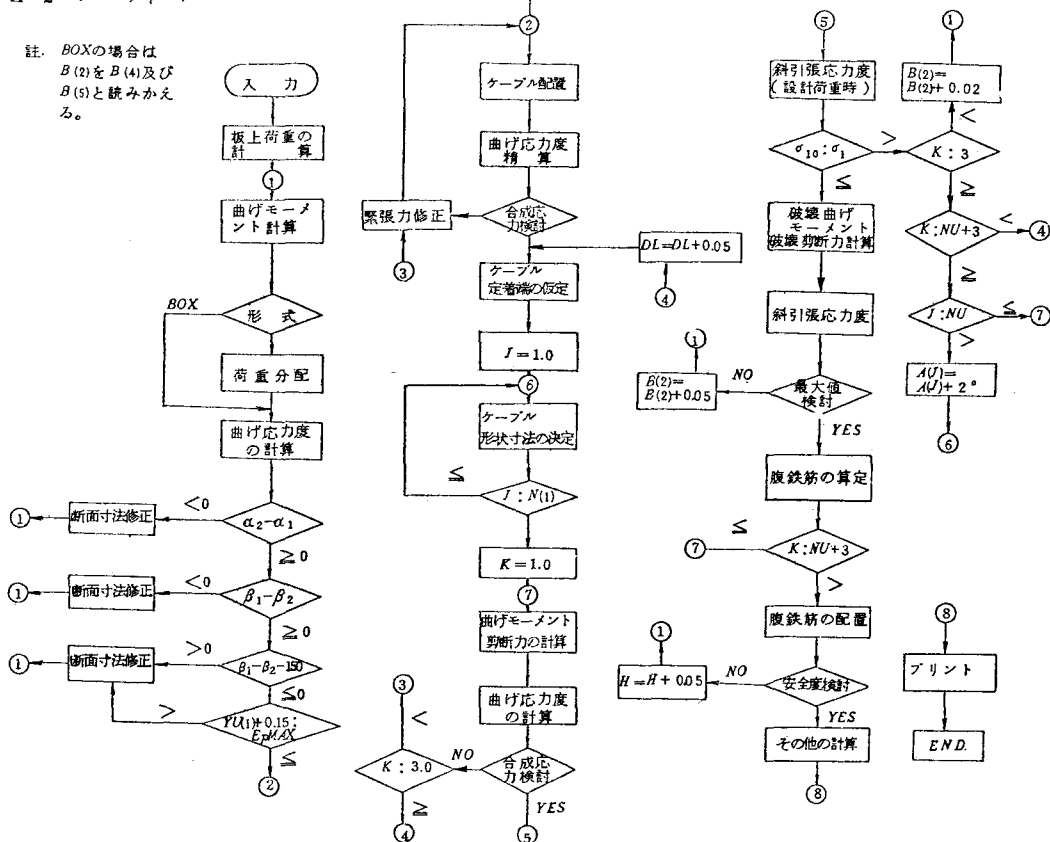
表-2 適用範囲

活荷重	KS荷重, N荷重
スパン	15~60m
形式	ポストテンション単線上 路鉄道橋
構造	I形2,3,4主けたおよび 箱形けた
線形	直線および $R=800$ m 以上の曲線
軌道構造	有道床
コンクリート	普通および軽量コンクリート
主ケーブル	12- ϕ 7, 12- ϕ 8, 12- ϕ 24
PC鋼棒	3種および4種 ϕ 24
鉄筋	SR24

表-3 入出力データ

入力データ	出力データ
1. 活荷重, スパン8分点の曲げモーメントおよびせん断力	1. 入力データ
2. 衝撃係数	2. 設計条件
3. スパン	3. 断面寸法, 断面諸元
4. 概略断面の寸法	4. PCケーブルの形状寸法
5. 版上荷重の寸法	5. 荷重分配係数
6. 構造形式, 2主けた, 3主けた, 4主けた, 箱形けたの別	6. 各設計断面の曲げモーメント, せん断力
7. PC鋼線の径, 12- ϕ 7, 12- ϕ 8, 12- ϕ 24の別	7. 各設計断面の曲げ応力度
8. PC鋼棒の種類, 3種, 4種	8. のせん断応力度, 斜引張応力度
9. コンクリートの種類, 普通, 軽量	9. の腹鉄筋の径, 所要間隔
10. コンクリートの強度, 主けたコンクリート, 中埋めコンクリート	10. 腹鉄筋の配置間隔
11. クリーフ係数	11. 床版の設計曲げモーメント
12. 乾燥収縮度	12. 床版のPC鋼棒配置間隔
13. 横けたの位置	13. 横けた設計曲げモーメント
14. 横けたの幅	14. PC鋼線の応力, 導入時, 設計荷重時
15. けた端はね出し部分の寸法	15. 緊張計算結果 $\mu=0.2$, $\mu=0.4$
	16. たわみ量
	17. 箱形断面の所要鉄筋量
	18. コンクリート体積
	19. PC鋼材量

図-2 フローチャート

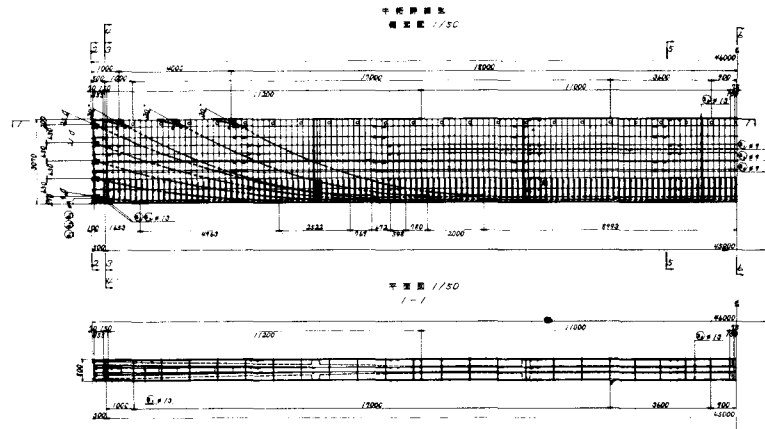


(3) PCけたの自動製図 自動製図にあたって、設計計算のためのインプットデーターを入力すれば設計計算と製図計算とを一貫して行ない、続いて自動製図機が設計図を作成するという一連の自動作業が理想である。しかし電子計算機の設置場所、容量等の関係もあり、特に設計計算および製図計算のプログラムがそれぞれ非常に大きくなつて一貫した計算が不利なので、別々に計算することにした。ただし、設計計算のアウトプットは、プリントとカードパンチの両方として、このカードを製図計算のインプットに用いるようにしている。

(4) PCけた自動製図の手順 自動製図の手順としては、自動設計計算のアウトプットデーターのうちから、図面作成に必要なデーターを自動製図のためのインプットデーターとして入力し、製図のための計算を行なわせて製図命令をパンチした紙テープを作成し、この紙テープによつて自動製図機に命令を伝えて必要な設計図を作成することになる。図-3は、自動製図にしたものの一例である。自動製図のプログラムでは、類似図形ごとに製図命令をつくるプログラム(サブルーチン)を作つておき、主プログラム

によつてこれらのサブルーチンを適当に組み合わせることによつてまとつた図面が製図されるようにした。サブルーチンとして、軸方向筋のサブルーチン、腹鉄筋のサブルーチン、PCケーブルのサブルーチン、けた外形のサブルーチン、寸法線のサブルーチンなど約130を作つた。

図-3 自動製図の一例



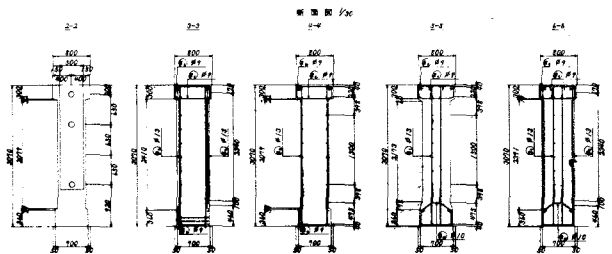
3.3 PCけたの自動設計製図の問題点

(1) 自動設計について

自動設計プログラムは相当大きくなり、PCけたの場合30K程度になつたため、CDC、G-20の容量16Kを

超過するので、これを使用するためには特殊な手法によらざるを得ず、そのためプログラム作成に余分の手数を要し、また計算時間が長くなる欠点があつた。この解決方法としては記憶装置を増設すればよいが、多額の経費を要することでもあるので、プログラムを小さくするのがよい。このためには

(i) 入力データーをできるだけ多くする。特に幾何学的な問題で、判定条件が多岐にわたり設計者



の経験による判断にまかせた方が有利なものは、入力データーとした方がよい。

④ 変数の種類を整理して、できるだけ少なくするとともに、プログラムの一部のみしか使用しない変数で記憶場所を終始使用するような無駄はしないようにすべきである。

このほか、P O けた独自の問題であるが、P O ケーブルの配置および定着位置を定めるにあたり、応力の条件と幾何学的条件とを一義的に満足して定める方法がないことや、P O 主ケーブルと横締めケーブルの競合を避けなければならないため、プログラム作成上いろいろと苦心した。

(2) 自動製図について 自動製図は設計計算と一貫して自動的に行なうのが理想であるが、現在当所がとっている方式は、製図計算のためのインプットデーターカードを入れる時と、自動製図機へ製図命令紙テープを入れてやる時に人手が介入するほか、製図のための計算時間に対して紙テープにパンチする時間が非常に長いので、人手を省くような方式をとるとともに、電子計算機とせん孔機とはオフラインとするか磁気テープ方式にするなどの方法によつて能率を高める必要がある。

さらに、自動製図のための計算はほとんど座標計算であるためプログラムが大きくなるので、プログラムを小さくするために入力データーを多くするとか、図形のサブルーチン化を適切に行なうなどの工夫が必要である。

4. 鋼鉄道橋

鋼鉄道橋設計における電子計算機の利用は、先づ手数のかかる応力計算から始められ、昭和35年より、ローゼ桁の影響線、平行弦連続ワーレントラスの影響線、格子桁の計算などのプログラムが作られて実用に供された。なお同時に設計断面を求める場合に比較的手数がかかり、設計の頻度も高いものに対する設計プログラムとして合成桁の設計プログラムも開発された。

当時の計算機はBendix G・15（現在のODC社）で容量も小さかつた為、上記合成桁の設計も主桁の各断面、垂直補剛材の間隔、ジベルの間隔などを求めるまでであつたが、製図に到るに際し之に加える計算量は少く、設計の能率向上に役立つところが大きであつた。

鋼鉄道橋の特徴として計算を機械的に行なうに当つて有利な点は、桁の構造が比較的統一されておることである。すなわち設計計算に当つては、継手ごとに異なつた疲労を考慮した許容応力度を用いるなど複雑な面もあるが、部材の構成は、大きな活荷重を多数繰返して受け、振動、腐食などの影響もあつてきびしい条件のもとにあるため、長い経験によつて逐次改善された一定の方式によるものが大部分であることである。また、列車走行上からの線路の曲率が大きいこと、線路位置（載荷位置）が線として与えられることなども構造が簡単に行なえる理由となる。

従つて、設計の自動化は、一定化された計算の自動化から、現在は自動製図にまで到るべく作業が進められている。

鋼鉄道橋の種類は表-1に示したように多種に分類されているが、合成桁、上路プレートガーダー、下路プレートガーダー、トラスと、設計種別のうち主要な部分を占めるものの主要部材の設計、次いでプレートガーダーおよびトラスの横構、プレートガーダーの対傾構の設計などが準備された。

電子計算機適用の方針としては、設計事務所に電子計算機が未だ設置されていないので、現状では計算量の多いものから、という方針はとられていたが、ここに自動製図にまで及ぼすため、上記のプログラムのほか、こまかい各部にまでわたつて設計プログラムを作る必要が生じている。

その一例を上路プレートガーダーの対傾構の計算とつてみよう。端対傾構では、横荷重を支点に伝達するために使用する部材の大きさ、連結リベットの計算を要するが、中間対傾構の場合には、部材を山形鋼でX形に組むと決めれば、桁高と桁巾とから決まる部材の長さにより部材の細長比に対する制限を考慮すれば、あとは部材片相互の関係位置、リベット締めなどを考えて諸寸法を製図しつつ決めていくだけである。

これを、すべての値（線およびリベット位置など）を自動的に出すためには、例えば次のような人が行なえば適当に寸法をにらんで、あるいは $\frac{1}{2}$ 程度の大きな図を小部分書いて簡単に決めることができる部分でも、次のようなテクニックを工夫してプログラミングしなければならないことが生ずる。

すなわち、図-4において、対傾材と支材および補剛材のすき間（通常10mm程度になるように製図している）が7～17mmになるようにAX、AYの値を定め、さらにそれが数値として5mmとびの値になるようにする方法として、

(1) まず $X1 = 60$ 、 $Y1 = 60$ と仮定し、部材のすき間DX、DYを計算し、DXからX1を修正し、これから再びDX、DYを計算してY1を修正する。これを各々2回繰返して $X1, X2$ を決定する（この方法によると2回で十分である）。

(2) この場合、部材のすき間から12mmを減じ、これに0.2を乗じた結果を切捨てて整数にし、さらにこれを5倍したものを $X1$ 、 $Y1$ から引くと5mm

とびの値となり、かつすき間が7～17mmの間になる。

これは唯一箇所のリベット位置の決定についてであるが、図面を仕上げるためには、部材が集まる所ですべてこのような工夫を要することになる。

このような作業の積重ねによつて、定形化された設計図が完全自動設計にまで達することができる。

しかし、何如に構造各部が標準化されたとは云え、上路プレートガーダー、合成桁などはまだしも、斜角、道床式までを含んだ下路桁となると、各部の寸法を自動的にすべて求めることは、手数の上で大変な作業である。従つて、現在の方針としては、下路桁などでは先づ主桁、床桁など、設計上些少のミスも好ましくない主要部材の自動化から、というような順を追いたいと考えている。

電子計算機を用いた全体を通しての自動設計と、構造部分の標準図を予め準備することとが、設計

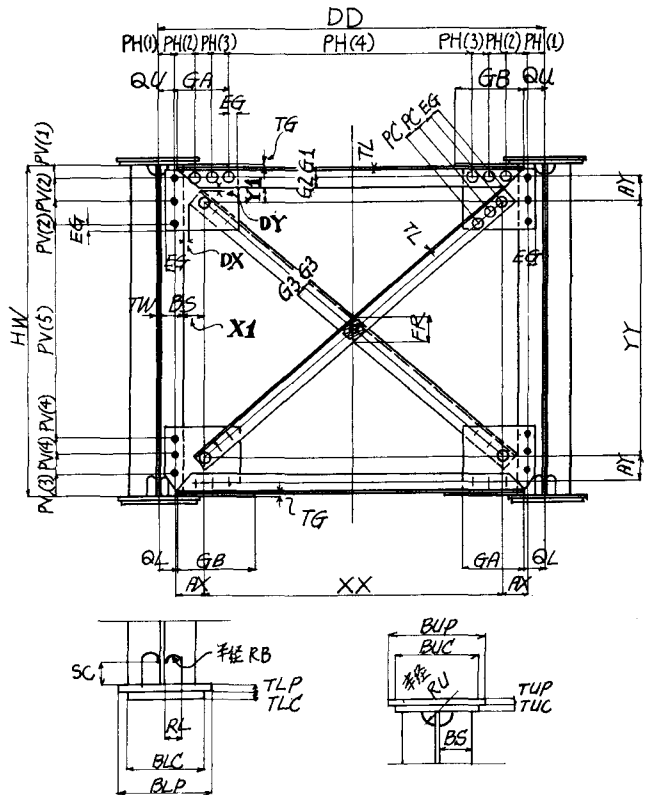


図-4 上路プレートガーダーの中間対傾構

の能率化に対する大きな方策のひとつと考えている。

5. 分岐器

当所内で実施されている軌道の分岐器設計に関しては、最近、レールの新規格Nレールへの変更に伴い、分岐器も新標準設計が行なわれることになり大きな設計替えが実施されてきた。その初期には先にでき上った片開分岐器を基準とし、方向を振分ける振分分岐器、曲線中に敷設する内外方分岐器などの分岐器の各種変形計算に電子計算機が使用され、結果が共通図面とその中の数表で示されて設計の能率化に大いに役立った。ただしそれらの設計図は、いわゆる一品目一図面でないので、現地の敷設や保守上は多少不便であった。

現在はその設計替えの後期で特殊設計の時期であり、各地の線増計画、駅構内改良計画などに直接関連してシーサスクロッシング(S C)の設計依頼が多く寄せられている。S Cは線路の渡線を二つ交ささせて二重渡線としたもので、狭い用地を有効に利用できる配線である。ごく普通形をした標準S Cは線路中心間隔と番数による種別があるが、特に設計依頼の多い特殊S Cは例えば図-5の一般図に示すように上記の他にS C構成の分岐器に変形が入るもので非常に多くの種類を生じ、類似の標準S Cに準拠するが細部が変更され、現地でレール曲げ、穴あけなどを行なつて敷設し保守する関係で個々に示方し図示することが必要となる。今回この多種類の特殊S Cの設計に対処することを契機とし、自動設計が計画された。設計は4つの分岐器および中央のダイヤモンドクロッシングを基本形として扱い、その諸元を基礎データとし、番数別、左右別、振分率別、変形分岐器の位置別、線路中心間隔別などの組合せにより変化する中間レール長、基本形内のレール長、レール曲げ縦距、スラックのつけ方、レール穴あけ位置、ガードレール、絶縁継目位置などを電子計算機により計算できるようにされた。さらにその計算

結果より電子計算機を用いて作成される制御テープを介して自動製図機を数値制御し、図-5のような線路一般図、線路中心測量略図に相当するスケルトン、スラックのつけ方、レールの曲げ方、レールの穴あけ位置などの図が製図されるよう考えられている。

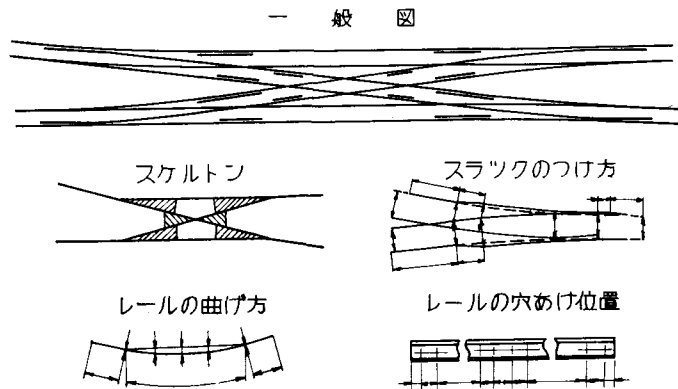


図-5

S Cで行なわれる方法は片開、両開、振分、内外方分岐器など単独分岐器の一般図設計にも適用できるし、時間のかかる細部設計も今後定形化を進めれば自動設計に転嫁させる余地が生じよう。

一般の分岐器設計検討の段階でも変断面レールの複雑な計算などを取扱うので電子計算機の使用は効率がよいことが明らかであり、今後積極的に用いられることが期待されている。