

景観を考慮した曲面部材の数値化

Evaluation of a Bridge with Complicatedly Curved Surfaces

鬼頭 省吾* 萩原 勝世** 蒲山 泰明***
Shohgo KITOHO Katsuse HAGIWARA Yasuaki KABAYAMA

Summary

Some bridges with complicated shapes, which had been designed considering vision of viewers and passerby, have recently been constructed. Whatever the shapes are complicated, each component is made of plane plate. Numerical data of each component shall be generated for NC machine.

This paper reports a computer system for generating numerical data.

1. まえがき

最近になって、鋼橋の分野でも機能とか経済性といったことだけでなく、橋を見たり利用したりする人の心に何かを訴えるような形、デザインがより重視された橋梁が多く建設されるようになってきた。従来からも架橋地点の景観を考慮して構造形式が決定されているが、構成部材の断面はおおむね矩形かI形が採用されている。一方、デザインが重視された設計では、断面形状に曲線が採り入れられかつ断面寸法が部材長手方向に変化するような部材となることが多い。

部材の形状がどのようなものであっても、部材は鋼板部品を集成して造られるので、製作にあたってはすべての部品について平面に展開した形状と寸法を求める必要がある。展開の難易は部材形状によって異なり、一般的には曲線が多い程難しくなる。当社でもひと昔前までは原寸床上に実寸図を描き、図解法によって展開していたが、現在は電算で処理している。電算で処理するためには所要点の座標値を求めておかなければならない。

ここでは、辰巳新橋のアーチリブを例にして、デザイン重視の設計をどのように数値化しているかを紹介するものである。

2. 座標計算

(1) 計算システム

当社で現在稼働している製作情報処理システムは、大別すればMIPSONとGIMSである。前者はRC床版でかつ腹板が鉛直の鉸桁および箱桁専用システムであり、後者はその他の鋼床版やアーチ形式に適用される汎用システムである。鋼床版ニールセン形式である辰巳新橋にはGIMSを適用した。

GIMSの概要は前報¹⁾で報告したが、現在も改良や機能の補充を続けている。座標計算は本システムの最も上流に位置する部分であり、図-1に示すように設計における線形計算の出力である線形座標ファイルにもとづいて、製作に必要なポイントを補充した構造座標ファイルおよび全ポイントのキャンバー値を含む製作座標ファイルを生成する。製作座標ファイルはレコード数が膨大であり、かつ展開システムを初めとする下流のシステムから何度もアクセスされるので、直接編成ファイルとしている。

(2) 座標値が必要なポイント

GIMSシステムの中で最も労力を要するのは、必要なポイントを補充して構造座標ファイルを作成することである。設計における線形計算で座標値が与えられる点は、一般的には桁橋であれば主桁中心と腹板上縁、アーチで

* 千葉工場生産設計部次長

*** 千葉工場生産設計部生産情報課係長

** 千葉工場生産設計部生産情報課課長

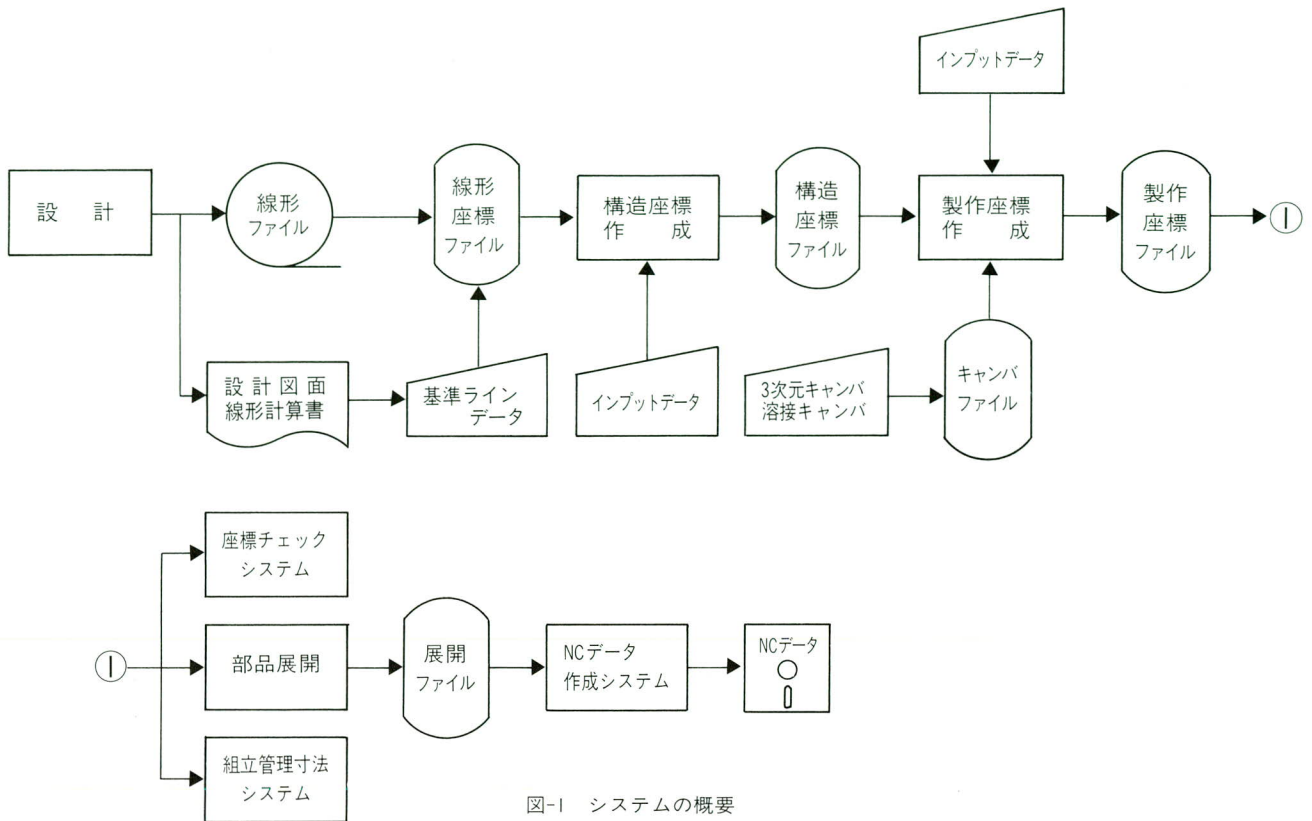


図-1 システムの概要

あればアーチ軸心の各格点位置だけである。製作にあたってはこれにもとづいて下記のような点の座標値を求める必要がある。

(a) 部材軸方向のライン

- フランジ、腹板の縁端
- 縦リブ、水平補剛材の中心線
- 縦継ぎ線、ナックルライン
- 断面に曲線がある場合は、多角形近似曲線をなすための補助ライン

(b) 部材軸に直角方向の横断線

- ダイアフラム、垂直補剛材位置
- 板継ぎ、現場継手およびナックル点
- 曲率半径が小さい平面曲線、縦断曲線の場合は、多角形近似曲線をなすための補助点

辰巳新橋のアーチ部材については、設計図で座標が与えられたアーチ軸心を基準ラインとして、図-2に示すラインを補充した。

(3) 座標の計算方法

補充ラインの設定方法としては、既存ラインを基準ラインにとりそれとの関係を入力する方法を採っている。平面座標、縦断座標について各々数種類の計算方法を組

み合わせてパターン化している(参考文献¹⁾)。

辰巳新橋の中でも下弦材部分は鋼床版多室箱桁であったので既存の計算メニューで処理が可能であったが、アーチ部分は特異な形状であり、かなりの工夫を要した。以下ではアーチ部分に的を絞って述べることにする。

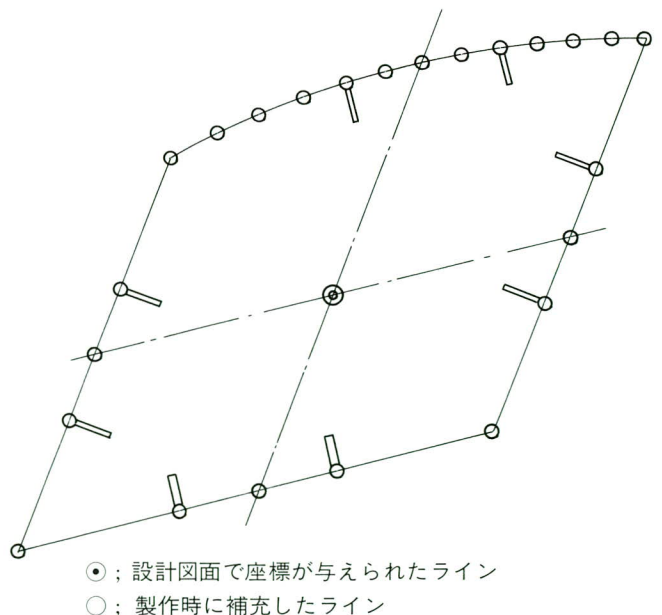


図-2 製作に必要なラインの補充

(a) 線形要素

辰巳新橋アーチ部の座標計算をするにあたっての線形要素は次のようである (図-3、図-4)。

- ① 軸心線は2次放物線である。
- ② 腹板高は、アーチクラウンにおける $H_w=1400\text{mm}$ から下弦材との接合部直上のダイアフラムにおける $H_w=1800\text{mm}$ まで、アーチ軸心線に沿って直線変化する。
- ③ 腹板間隔は $B=1600\text{mm}$ 一定
- ④ 断面形状の定義方法 (図-4)
 - アーチクラウンにおいてアーチ軸心2点を通り、ライズが 200mm なる円を設定する。この円と内外腹板面の交点の高低差を Δh とする。
 - 内外腹板の高低差 Δh はアーチ軸心線に沿って直線的に減少し、下弦材との接合部直上のダイアフラムにおいて $\Delta h=0$ とする。
 - アーチ軸心線の法平面上において、腹板高低差 Δh で中心が $X-Z$ 面上にある円を定義し、この円と腹板面との交点の点列を腹板中心線とする。
 - 上フランジは上記で定義した円を平行移動した円弧、下フランジは腹板下縁を結ぶ直線とする。
 - 横支材の腹板上下縁はアーチリブのフランジにすりつく2次放物線とする。

(b) 計算手順

- ① アーチ軸心線上のポイントを補充
設計図面で与えられたケーブル定着部の座標値からスプラインを設定し、2.(2)(b)に述べた点の座標値を求めた。アーチでは曲線を多角形で近似し得るポイント間隔は一般的に 500mm 程度のものである。 1m まで広げると折線であることがやや目につくことが多い。

- ② 腹板高を計算
補充された点を含む全点についてアーチ軸心線に沿う曲線長を求め、比例計算により各点の腹板高を計算する。

- ③ 内外腹板の高低差を計算
最初にアーチクラウンにおける円を設定し、この円と内外腹板面との交点の高低差を求めておき、②と同様にして各点における高低差を計算する。

- ④ 円の中心座標と半径を計算
アーチ軸心線上の点 $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ を原点とする小座標系 (u, v, w) を考える。図-5に示すように、 u 軸にはアーチ軸心線の接線ベクトル、 v, w 軸は法平面上にあって v 軸にはアーチ軸心線を含む平面の法線ベクトルをとる。

円の中心 $\bar{O} (V_c, W_c)$ 、円とアーチリブ内側腹板の交点を

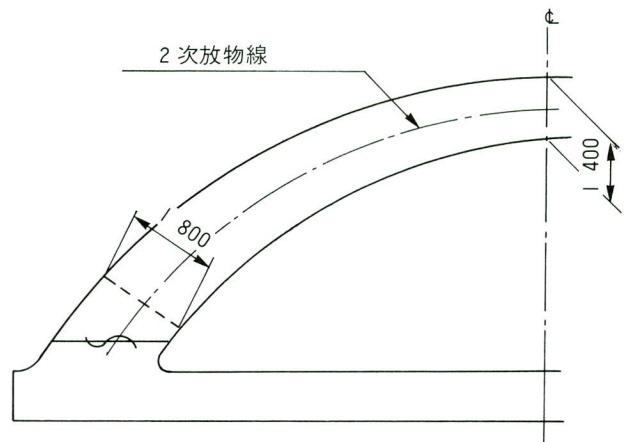


図-3 アーチリブの腹板高

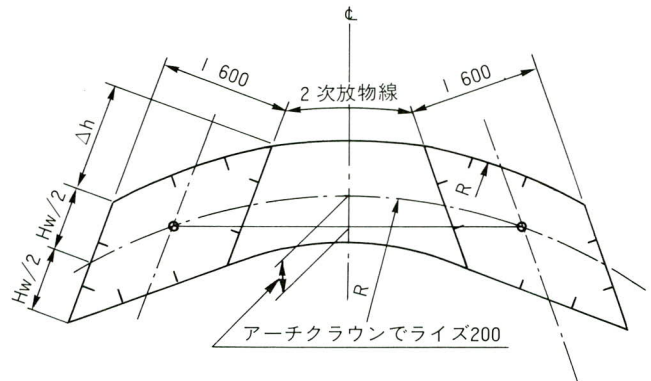


図-4 断面形状

$P_1 (v_1, w_1)$ 、外側腹板との交点を $P_2 (v_2, w_2)$ とすると図-6を参照して次式が成立する。

$$(v_1 - v_c)^2 + (w_1 - w_c)^2 = R^2$$

$$(v_2 - v_c)^2 + (w_2 - w_c)^2 = R^2$$

$$v_c^2 + w_c^2 = R^2$$

$$w_1 - w_2 = \Delta h$$

$$v_c = m w_c + n$$

最後の式にある係数 m, n は接線ベクトル (u 軸) の方向余弦 (a_x, a_y, a_z) と法線ベクトルの方向余弦 (b_x, b_y, b_z) および円の中心の y 座標を用いて次式で表わされる。

$$m = a_x b_y b_z / (a_x^2 b_y^2 + a_z^2)$$

$$n = (y_c - y_0) / b_y$$

上記連式方程式を解いて各点の小座標系における座標値が求まる。これを大座標系に変換して各点の x, y, z 座標値を得る。なお、円の中心は橋軸中心線上にある

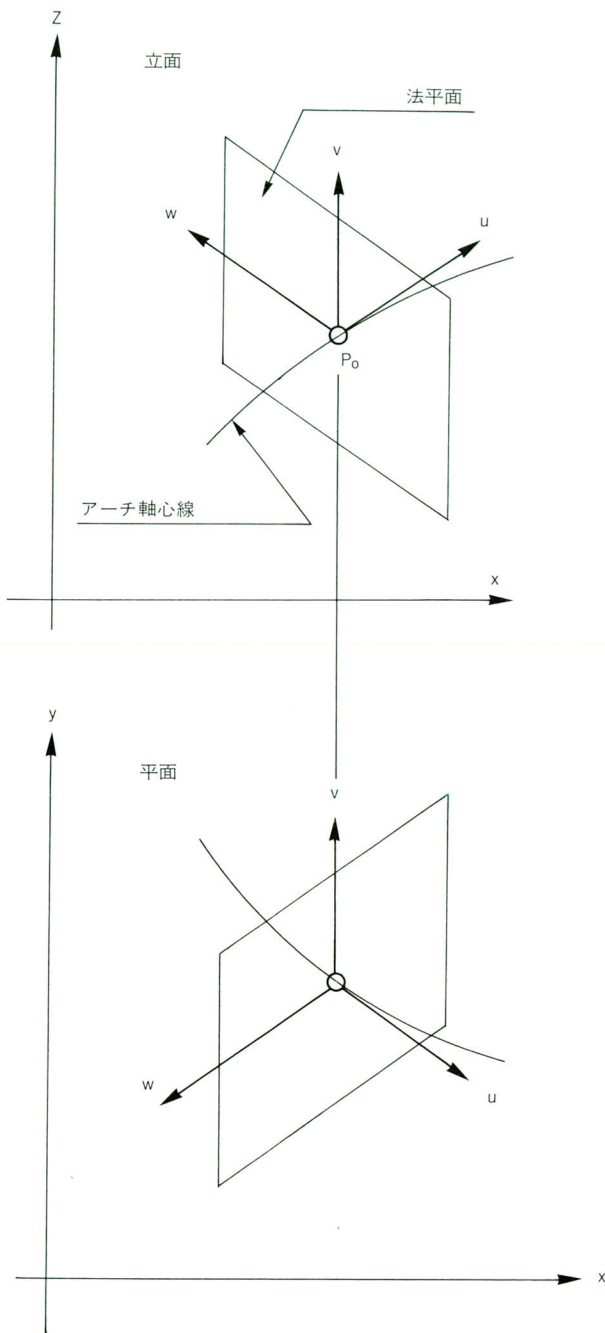


図-5 法平面上の小座標系

として $y_c = 0$ として計算した。

⑤ 上フランジ上の点の座標値

上フランジ上の点の座標値は次の条件から計算する。

- アーチ軸心線の法平面上にある。
- アーチ軸心線がなす面と平行な面上にある。
- したがって、各点は上記2平面の交差線上にある。
- ④で設定した円と平行面との交点から、交差線に沿って $hw/2$ の位置にある。

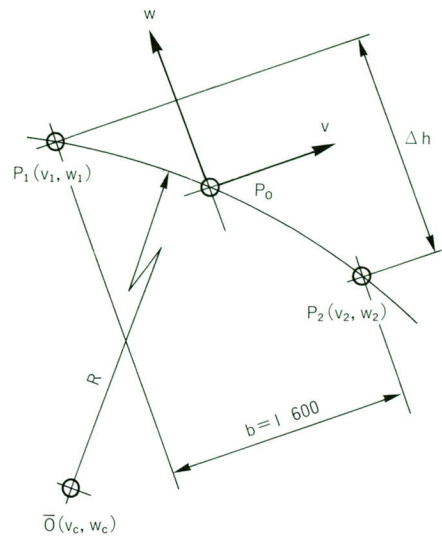


図-6 法平面上の点

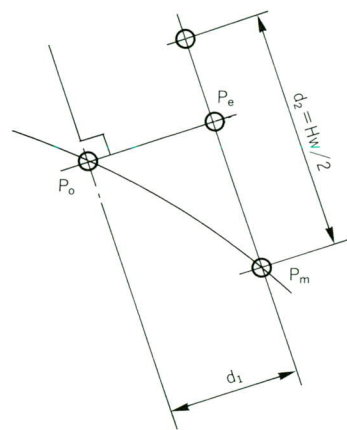


図-7 上フランジ上の点の計算

上記条件より図-7の記号を用いて以下のように計算する。

点 $P_l(x_l, y_l, z_l)$

$$x_l = d_1 b_x + x_o$$

$$y_l = d_1 b_y + y_o$$

$$z_l = d_1 b_z + z_o$$

点 $P_m(x_m, y_m, z_m)$

$$(x_m - x_o)a_x + (y_m - y_o)a_y + (z_m - z_o)a_z = 0$$

$$(x_m - x_l)b_x + (y_m - y_l)b_y + (z_m - z_l)b_z = 0$$

$$(x_m - x_c)^2 + (y_m - y_c)^2 + (z_m - z_c)^2 = R^2$$

これを解いて点 $P_m(x_m, y_m, z_m)$ が求められる。

点 $P_n(x_n, y_n, z_n)$

$$(x_n - x_o)a_x + (y_n - y_o)a_y + (z_n - z_o)a_z = 0$$

$$(x_n - x_l)b_x + (y_n - y_l)b_y + (z_n - z_l)b_z = 0$$

$$(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2 = d_2^2$$

この連立方程式の解が点 P_n の座標 (x_n, y_n, z_n) である。上式中 (a_x, a_y, a_z) 、 (b_x, b_y, b_z) は④と同様に各々接線ベクトル、法線ベクトルの x 、 y 、 z 軸方向の方向余弦である。

下フラジは腹板間が直線であるので、上記と同様にして腹板下縁の座標を求め、腹板間は比例計算するだけである。

⑥ アーチリブ間の化粧板

両アーチリブの内側腹板上とフランジ縁端部の4点の座標にもとづいて、 y 方向の勾配がフランジの横断勾配に一致するような2次曲線を設定して各点の座標値を計算した。

GIMSシステムでは一般的に完成時の座標を求めて構造座標ファイルを作成した後、キャンバー計算をして製作座標ファイルを作成している。構造解析が立体モデルで行われた場合のキャンバーは3次元で示される。現在のGIMSでは3次元キャンバーと部材軸周りの振り回転を処理できるが、本橋のアーチリブは完成時の座標にキャンバー値をあらかじめ加算しておく方法をとった。

3. 平面展開

各ライン、横断線の3次元座標値にもとづいて、部品ごとに平面に展開して部品の加工寸法を求める。加工寸法にはキャンバーの他に溶接変形も加えられる。GIMSでは、溶接変形のうちのキャンバー成分はキャンバーの一種と考えてキャンバー計算時に考慮し、長手方向と幅方向の収縮成分は展開時に処理している。

(1) フランジ、ウェブ

フランジ、ウェブの展開は下記の手順による。

- ① 隣り合う2本のラインと横断線に囲まれる小区画は一平面上にあると仮定し、これを最小単位の展開要素として平面に展開した状態での4点の座標を求める。最初は第1、第2ラインと第1、第2横断線に囲まれた要素を展開する。座標値は第1ラインと第1横断線を原点とし、第1ラインを x 軸とする座標系で表わす。
- ② 同一横断線間にある隣接要素を展開して4点の座標値を求め、直前の要素と共有される2点の座標値が直前の要素と一致するように移動して接合する。これを最後のラインまで繰り返して一横断線間の全幅に渡る展開中区画を作成する。
- ③ 続いて、隣接の横断線間について上記と同様にして

中区画を作成し、第一ラインと最終ラインの2点を直前の中区画との共有点と考えて、2点の座標値が一致するように移動して直前の中区画と接合する。

- ④ 以上を最後の横断線まで繰り返すことにより1つの部品を展開することができる。

本橋のアーチリブ上フランジのように、幅方向と長手方向の双方ともに直線でない場合は図-8に示すように中区画の接合部においてスリットが生ずる。この解決方法として、部材組み立て時の状態に合うように、部品断面の主軸周りに曲げ変形が生ずるという考え方を採り入れた。部品の板厚は一様であると仮定して主軸を計算し、展開図上に主軸線を設定する。接合部の全節点の座標値を主軸線上の値に移すことによって中区画の接合部を一致させることができる(図-9)。

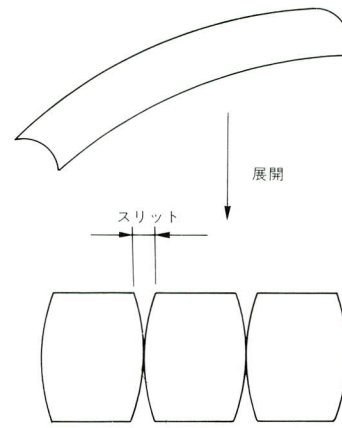


図-8 湾曲部品展開時のスリット

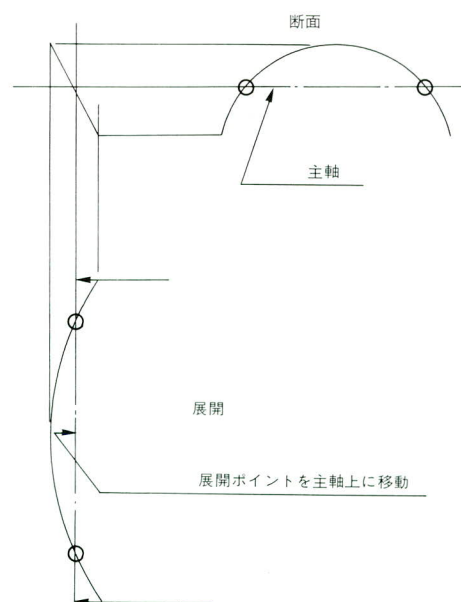


図-9 スリットの処理

(2) 断面の展開

1つの断面を構成する点はすべて同一平面上にあると仮定する。同一直線上にはない任意の3点から平面を定義する。平面の法線ベクトルの方向余弦を (a_x, a_y, a_z) とすると次の連立方程式が成立する。

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$$

$$(x_2 - x_1)a_x + (y_2 - y_1)a_y + (z_2 - z_1)a_z = 0$$

$$(x_3 - x_1)a_x + (y_3 - y_1)a_y + (z_3 - z_1)a_z = 0$$

ここに、 $(x_i, y_i, z_i)_{i=1, 2, 3}$ は3点の座標値である。この式から方向余弦 (a_x, a_y, a_z) が求められる。

X軸と法線ベクトルのX-Y面投影のなす角を θ 、X-Y面と法線ベクトルのなす角を φ とすると、その余弦、正弦は次式で表わされる。

$$\cos \theta = a_x / \sqrt{a_x^2 + a_y^2}, \quad \sin \theta = a_y / \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

$$\cos \varphi = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}, \quad \sin \varphi = a_z$$

平面上の任意の点 (x_0, y_0, z_0) を原点とし、法線ベクトルを u 軸、 $x-y$ 面に平行な v 軸をもつ (u, v, w) 座標系を考え、断面上の点 (x, y, z) を (u, v, w) に変換すると、

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{Bmatrix}$$

で表わされる。この u, v, w が断面上の点の展開後の座標そのものである。断面上のすべての点の一つの平面上にあれば、すべての点で $u = 0$ になるはずであるから、この値を元の座標値の正誤のチェックに用いることができる。

4. むすび

デザインが重視された橋梁の製作について、辰巳新橋のアーチリブを例にして、部品展開までの処理方法を述べた。展開に続いてNCマーキングとNC切断データを作成し、さらに組み立て、仮組み立て管理寸法図票を作成したが、これらの処理方法は一般的な橋梁の場合と大差ないのでここでは割愛した。形状が複雑で寸法が変化するような部品の加工にはNC工作機械が最も威力を発揮する。これを従来のシナイや型板で表現しようとするれば、相当工夫してもかなり複雑なものになるろう。

どんなデザインの橋梁であっても製作者の立場で考えれば、要は如何にして部品寸法を決めるかにかかっていると云ってもよい。部品寸法を決定するための基になるのは構造各部位の座標である。したがって、趣興を凝らしたデザインであっても、座標を計算するためのアルゴリズムが確定され得る条件が明示されれば、製作は可能であろう。

電算システムの面から見てもこれらの橋梁は一品料理とならざるを得ない。今後も増加傾向にあることを考えると、一品料理を如何に手際よく料理するかということ、および得られた結果の合理的な検証方法を考慮したシステムとする必要がある。これらを課題として今後も努力していくつもりである。

<参考文献>

- 1) 鬼頭ほか3名：桁橋の製作情報システム、宮地技報 No.6、1990

1994.6.25受付