

路線形状設計支援システム

近畿日本鉄道(株) 技術研究所

○上田 光男

“ “

正会員 後久 義昭

1. まえがき

鉄道や道路の線形改良・高架化工事の基本設計では、複雑な地理的制約条件に合う線形の代替案を作成して検討する必要がある。特に仮線等では制約条件が厳しく、反向・複心などの複雑な曲線を利用するケースもあり、線形計算や周辺地理との数値的およびビジュアルなチェックは大変面倒である。このような路線形状設計を支援するCADシステムの条件としては、会話型で手軽に多数の比較代替案を検討でき、平面・縦断・横断面線形を関連づけて計算できることが望ましいが、市販のシステムはいずれも機能的に不充分で総合的検討には不向きである。また線形改良工事では片側から従来の線形に“すりつけ”ていく方法もとられており、従来の単心曲線を主体とするIP法(後述)だけでは対処しにくいケースもある。そこで、グラフィック入出力機器を備えたコンピュータ(EWS)を利用し、関連地形や構造物による制約条件を考慮して、線分・円弧・緩和曲線などの線形要素からなる平面線形、縦断線形、横断の形状・位置を総合的に設計するための独自の「路線形状CADシステム(略称GLINE)」を開発した。

2. システムの概要

このシステムの概念を図1に示す。主な機能は平面線形・縦断線形・横断面形状高さの各計算機能であり、データファイルを介してそれぞれ関連づけられる。各計算結果は、サブシステムにより計算書や図面として出力される。地図は独自の入力機能の他、当社の地図情報システムのデータを引用して作成でき、平面線形は地図上に展開できる。また作成した線形データを地図情報システムに送り、様々な目的の図面を編集、出力できる。

3. 平面線形の作成

3-1 地図情報システムとのインタフェース

地図を考慮して平面線形を展開し、地形や構造物との位置関係をビジュアルでかつ数値的にチェックできる。また用地杭など測量に基づく座標値の正確な地図データを利用して数値チェックを高精度に行なえる。

3-2 IP法による平面線形作成

平面線形の始点・IP(Intersection Point)・終点など線形を定める基準となる折線の“端点”の位置と、曲線区間の円弧半径(m)・緩和曲線の種類(3次放物線・サイン半波長曲率連続曲線・クロソイド曲線を考慮)と長さ(m)を指定すると各曲線区間の形状・位置を算出しそれら曲線区間を直線でつなぎ平面線形を生成する機能である。曲線区間として単心曲線の他、複心曲線と反向曲線も利用できる。緩和曲線は、曲率ゼロの始点を原点とする局所座標における式(1)~(5)を利用している⁽²⁾。

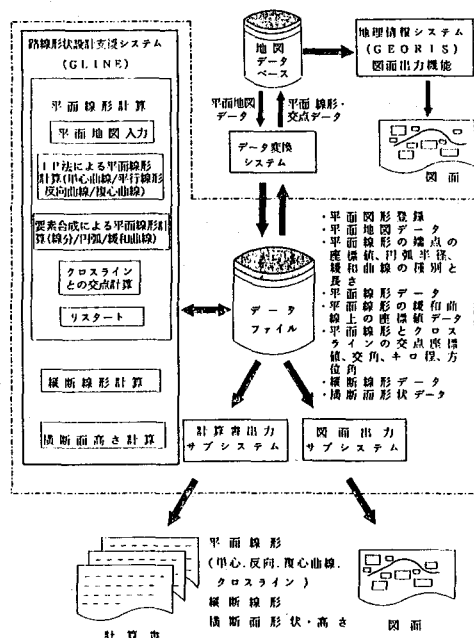


図1. 路線形状設計支援システムの概念

$$3 \text{ 次曲線 } y = \pm x^3 / (6 \cdot R \cdot X) \quad \dots (1)$$

$$\text{サイン半波長曲線 } y = \pm \{x^2 / (4 \cdot R) - X^2 / (2 \cdot \pi^2 \cdot R) \cdot (1 - \cos(\pi \cdot x / X))\} \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \text{クロソイド曲線 } x &= 1 \cdot (1 - \theta^2 / 10 + \theta^4 / 216 - \theta^6 / 9360 + \dots) \\ y &= 1 \cdot (\theta / 3 - \theta^3 / 42 + \theta^5 / 1320 - \theta^7 / 75600 + \dots) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$\text{ただし } \theta = \pm l^2 / (2 \cdot R \cdot L)$$

$$\text{複心中間 3 次曲線 } y = \pm \{x^2 / (2 \cdot R_1) + x^3 / (6 \cdot R \cdot X)\} \quad \dots (4)$$

$$\text{複心中間サイン半波長曲線 } y = \pm \{x^2 / (4 \cdot R_0) - X^2 / (2 \cdot \pi^2 \cdot R) \cdot (1 - \cos(\pi \cdot x / X))\} \quad \dots (5)$$

3-2-1 “端点”の入力方法

平面線形の始点・終点・IPなど“端点”の位置の入力方法は、次の3とおりとした。①、点の直接的定義による。（座標値のキー入力、既設平面線形の“端点”の重複利用、図形表示エリア上の任意点のヒットなど。）②、半直線を定義し、次に距離を数値入力する。（半直線は、始点と方位を指定。方位はもう一点の定義、方位角の入力、ヒットした図形要素の方位の利用など。）③、2本の直線を定義してそれらの交点をとる（直線は①による始終点の直接的定義、①による点と②による方位の指定、ヒットした直線図形要素自体などにより定義する。）これらは、“端点”座標値データ・既設平面線形データ・地図データを利用するかどうかに応じて選択する。

3-2-2 単心曲線の生成

3-2-1で定義されたIPに対し、円弧半径(m)・始点側および終点側緩和曲線の種類・長さ(m)を指定することにより、これら条件と前後の直線との位置関係に適合する曲線区間の始点・終点、円弧長(m)等を算出し単心曲線を生成する。

3-2-3 複心曲線と反向曲線の生成（図2参照）

曲線区間の始点の位置（方位は直前の端点の位置により定まる）と次の直線区間（曲線区間終点接線）上の一点の位置（方位は直後の端点の位置により定まる）を3-2-1の方法で入力し、二つの円弧半径(m)と緩和曲線の種類・長さ(m)を指定する。指定条件から緩和曲線の形状は確定できるので、曲線区間の始終点方位角の差と曲線区間始点～次の直線区間（曲線区間終点接線）間距離に基づく二つの制約を満たす二つの円弧中心角(rad)を有意な範囲で探索し、複心曲線と反向曲線を生成する。

3-2-4 平面線形の変更（修正）

平面線形を定めるために利用した“端点”の位置・種類、曲線区間の円弧半径(m)、緩和曲線の種類・長さ(m)を部分的に変更（追加と削除も含む）して、平面線形を会話形式で容易に修正できる。

3-2-5 平行線形の作成

元になる平面線形上の各点の法線上で一定間隔離れた点の集合として生成される線形を平行線形と呼ぶ。元の線形と間隔（オフセット）(m)を指定し、線分・円弧・緩和曲線ごとに平行線形を作成する。局所座標で、緩和曲線または複心中間緩和曲線を

$$y = \pm f(x) \text{ または } x = g(l), y = \pm f(l)$$

とし、オフセット h の符号を進行方向右側を+、左側を-とすると、平行線形上の点 (x_h, y_h) は(6)・(7)式となる。

$$x_h = x + h \cdot \sin \theta \quad y_h = \pm f(x) - h \cdot \cos \theta \quad \dots (6)$$

$$\text{ただし、} \theta = \tan^{-1}(dy/dx) \quad \text{または}$$

$$x_h = g(l) + h \cdot \sin \theta \quad y_h = \pm f(l) - h \cdot \cos \theta \quad \dots (7)$$

$$\text{ただし、} \theta = \tan^{-1}(dy/dl \cdot dx/dl)$$

なお、h を $h(x)$ 、または $h(l)$ とすれば拡幅線形となる。

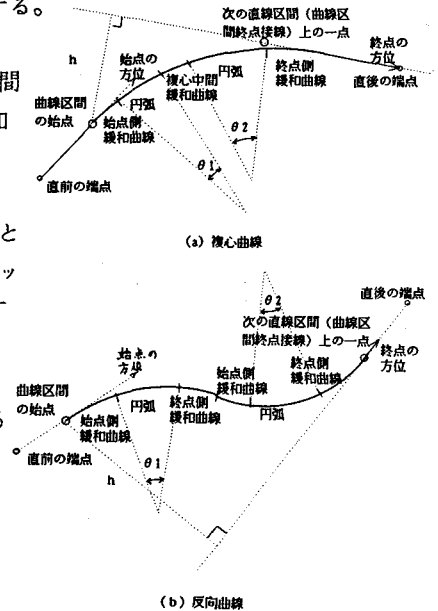


図2. 複心曲線と反向曲線

3-3 要素合成法による平面線形作成

まず地図データと既設線形を考慮して平面線形の始点(位置と方位)を指定し、次に平面線形要素の種類(線分・円弧・緩和曲線を考慮)・長さ(m)・半径(m)などを指定し順次に平面線形要素をつなぎ、最後に既設線形の要素にすりつけることができる。従来の手作業においてカーブ定規を使用して試行錯誤的に線形を描いてゆくイメージで生成できるのが特徴である。

3-3-1 平面線形の始点の位置と方位の指定

平面線形の始点の位置と方位は、地図データと既設線形を利用できるよう次の3とおりの方法で指定できるようにした。①、直線(線分)を定義する。②、既設平面線形要素と、その要素始点からの長さ(m)を指定する。③、指定のクロスラインとの交点の位置を利用する。②または③による場合の方位は接線方向(逆方向も含む)とし、②と③で指定した点を通る法線上で指定距離(m)だけ離れた点も指定できる。

3-3-2 平面線形要素の種別の指定

平面線形要素の種別は、線分・円弧・緩和曲線・複心中間緩和曲線から選択でき、その種類に応じて長さ(m)、半径(m)などを指定すると、その形状・位置が算出される。

3-3-3 平面線形要素の属性変更(修正)

作成中の最新の平面線形要素に限り、その長さ(m)・半径(m)などを変更できる。

3-3-4 平面線形の“すりつけ”

作成中の平面線形の最新の要素(線分または円弧に限定)から、線分・円弧または緩和曲線を用いて既設平面線形の指定要素(線分または円弧に限定)につなげる。すりつけに使用する平面線形要素の種類と平面線形要素の始点または半径を指定すると、それらを考慮して方位が連続するよう、すりつけ線形要素の形状・位置を探索する。

3-4 平面線形とクロスラインとの交点の計算

3-2、3-3の機能により作成した平面線形に対し任意のクロスライン(横断線)を定義し、それらとの交点の座標値・交角(度)・平面線形のキロ程(m)を算出できる。その方法は、各線形要素の数式(局所座標)とクロスライン(直線)との交点の探索による。クロスラインの定義は、その種類を考慮し、以下の5とおりの方法とした。①、直線の定義。②、基準平面線形上の任意のキロ程にたてた法線。③、基準平面線形上の任意の区間で任意の間隔でたてた法線。④、任意の点を通る基準平面線形の法線。⑤、他の平面線形の要素変化点を通る基準平面線形の法線。

また、位置関係のチェックのために、平面線形要素の長さ(m)・始点方位角(度)、平面線形上の二つのクロスラインとの交点間の長さ(m)、クロスライン上の二本の平面線形との交点間距離(m)、交点の座標値・平面線形のキロ程(m)・交角(度)を随時に参照できる。なお、緩和曲線の平行線形要素の長さは、数式から直接には得られないので数値積分公式を利用している。

3-5 作業結果の保存

平面線形作成の作業結果はデータファイルに保存され、サブシステムを利用して結果を図面および計算書として出力できるほか、作業を一時中断した後に継続して再開(リスタート)でき、追加・修正・削除など設計変更・類似設計にも応用できる。

4. 縦断線形の作成

縦断線形とは、平面線形のキロ程に対する高さの変化を表わすものである。図3に、関連データと共に描いた縦断線形図の一例を示す。

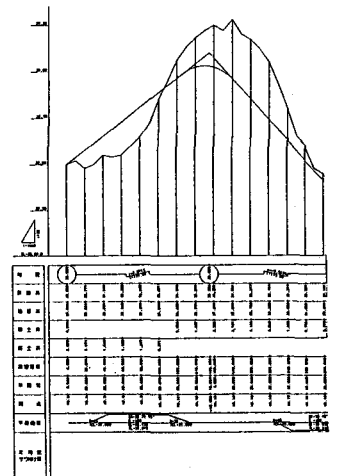


図3. 縦断線形図

4-1 データ入力と縦断線形計算

縦断線形の始点と勾配変化点を、平面線形のキロ程(m)と高さ(m)、または勾配(鉄道では $^{\circ}/\infty$ 、道路では%)と平面上の長さ(m)で指定する。次に、各勾配変化点の前後に縦曲線(円弧を2次放物線で近似した曲線)をあてはめ縦断線形を生成する。鉄道では縦曲線半径を入力すると曲線長は算出される。道路では設計速度を入力すると曲線長(m)と曲線半径(m)が算出される。また、曲線長(m)または曲線半径(m)の直接入力もできる。

4-2 計画高と縦距の算出

4-1で作成した縦断線形に基づき、平面線形の始点を最初とする指定間隔の測点、各縦曲線の始点と終点、平面線形要素の変化点、その他指定キロ程の計画高(m)を算出する。また、各縦曲線の縦距(等勾配線との高低差)(m)を指定間隔で算出する。



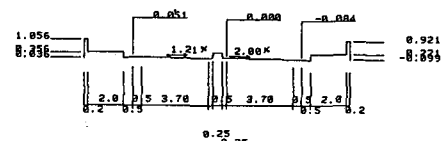
(a) 標準断面入力画面

5. 横断面形状・高さの作成

曲線区間に横断片勾配をつけ、平面線形上の指定測点と任意キロ程の横断面形状・高さを算出する機能である。道路の単心曲線区間を対象とした。

5-1 平面線形との対応を考慮したデータ入力

平面線形を指定し、標準断面図(図4(a))を参照して直線部の断面寸法(m)と横断勾配(%)を入力する。次に、横断片勾配のある曲線区間(円弧)を指定し片勾配



(b) 算出された横断面の参照

図4. 横断面形状・高さ

(%)と設計通過速度(km/h)を入力する。なお、曲線区間を拡幅するなら円弧の拡幅量(m)と緩和曲線の拡幅種別(1次または4次)と拡幅方向(内方または外方)を指定する。測点は縦断線形の指定値とする。

5-2 直線～曲線間の横断片勾配のすりつけ

上りと下りの横断片勾配は、各円弧の指定片勾配から直線区間の標準勾配へ、緩和曲線区間あるいは直線と円弧の等長な区間ですりつけられる。すりつけ長(m)は、その曲線区間の設計通過速度(km/h)に対応する法令規定の最大すりつけ率(すりつけの高さと長さの比率の上限値)を越えないように設定される。ここですりつけの高さ(m)は、標準断面の横断勾配(%)・曲線区間の指定片勾配(%)・車道幅員(m)から算出される。横断片勾配の変化は直線的であるが、水平に近い平面が長く続き排水を悪くしないようにしている。各測点または指定点のキロ程(m)に応じ、“すりつけ”を考慮して上下別に片勾配(%)が算出される。

5-3 指定横断面の高さの算出

測点・指定位置の縦断線形計算による高さ(m)、指定横断面における上下別拡幅量(m)を考慮した幅員(m)・片勾配(%)から、横断面形状・高さ(m)が算出され、片勾配(%)とともに画面上で参照できる(図4(b))。

6. まとめ

一般普及の平面・縦断・横断線形設計システムを利用しても厳しい地理的制約条件下で各データに関連づけ総合的に設計するには煩雑な作業を伴っていた。我々は地図データを有効利用し平面・縦断・横断の路線形状設計全般をビジュアルかつ高精度で効率良く行なえる総合CADシステムを開発した。複心・反向曲線のほか平行線形も生成でき、曲線定規による手作業に近いイメージでの設計も可能となり、短時間に多くの比較代替案が作成でき、地図情報システムにより目的別の高品質な図面も作成できる。今後は現業での使用を通してリファインしてゆきたい。

参考文献

- (1) 堤、田中、後久「線形図形処理システム」近鉄技報 VOL. 16 1985
- (2) 神谷進「鉄道曲線」交友社 1982.7
- (3) 上田、中島、後久「路線形状設計システム－反向曲線と複心曲線の利用－」近鉄技報 VOL. 22 1991