

## I-11 コンピュータ支援による鉄道路線設計の最適化アプローチについて

## An Optimization Approach for Railway Design Using Computers

叶 霞飛\* 青島 縮次郎\* 宿 良\*

Xiafei YE, Naojiro AOSHIMA and Liang SU

【抄録】本論文では帯状方形格子状デジタル地形モデルを作成し、それをを用いて鉄道平面線設計と縦断線設計を同時に最適にするような最適化アプローチを提案する。このアプローチではランダム探索法を採用することによって、最適化問題の定式化と制約条件の処理などを簡略にしている。さらに、Bスプライン関数を用いた鉄道縦断線設計の最適化モデルと結び付けることによって、ランダム探索法が持つ冗長性を除去しようとするものである。事例研究として、中国での在来線を取り上げ、提案した最適化アプローチの適用性を検証する。

**[ABSTRACT]** This paper proposed an optimization approach for supporting the design of both railway line and railway vertical alignment. First the digital geographic model was developed, then the approach was developed based on the digital model. The proposed approach can be used to optimize the railway line and the railway vertical alignment simultaneously. In the approach, the treatment of the formulation of optimization and the constraints condition were simplified by using the random searching method. Further, by combining the model for the optimization of the railway vertical alignment based on the B-spline functions, that was previously proposed, the computation time problem of the random searching method was overcome. Moreover, the applicability of the approach was tested by comparing with the example that is really existing in China.

【キーワード】鉄道路線設計, 最適化, Bスプライン関数, ランダム探索法

**[KEYWORDS]** Optimization, B-spline function, Railway design, Random searching method

## 1. はじめに

鉄道路線設計は従来より、地形図などを用い、技術者の経験によって手作業で行ってきているのが実情である。しかしながら、処理量の多い計算や時間のかかる手作業では数多くの路線代替案に関する定量的な評価の検討を行うことは困難である。また、従来からの手作業に基づく処理計算では人間の計算能力や総合的な判断能力にも限度があり、最適な路線設計案を得ることができる保証はなかったと言えよう。このようなことから現在、計算技術とコンピュータ技術の支援によって、コンピュータを用いて自動的に最適な路線設計案を探すための鉄道路線設計最適システムの構築が重要な課題となっているのである。

さて、当該分野に関連する既往研究の主要なものを見ると、国内、国外を問わず、道路路線計画・設計に関するものが多い(例えば、参考文献<sup>1)~3)</sup>)。そして、

それらの方法の基本的な考え方は、三次元空間における路線の設計問題を二段階に分けて解決しようとするものである。即ち、まず初めに最適な平面設計線を決めた上で、その後に最適な縦断設計線を決めるということである。例えば、Amkeutz等<sup>1)</sup>はMonte-Carlo法に基づく道路路線設計の最適化手法を提案している。この方法はコンピュータで最適な道路路線設計を行おうとする先駆的な研究成果である。また、E. P. Chew等<sup>2)</sup>は平面・縦断の両線形を一括して決定する手法を提案した。この方法は新たな数学的展開を示した理論的な研究成果であり、本研究の立場から見れば最も注目すべきものである。但し、上記二編の論文はいずれも目的関数や制約条件の定式化において、十分な実用性を備えたものとなっていない。このほか、鉄道路線設計の体系的な最適化に関する研究については十分に進んでいないのが実情である。なお、鉄道路線設計の体系的な最適化モデルにおいて必要とされるデジタル地形

\* 〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1 群馬大学工学部建設工学科(Tel:0277-30-1650)

モデルについては、丸安等<sup>4)</sup>が計算処理上、比較的有効な方法を提案しているが、しかしこの方法は内挿点の探索の便宜さから見ると、さらに改良すべき点があると考えられる。

そこで、本研究では道路路線設計の最適化に関する研究成果を参考にしつつ、実用性の観点から最適化問題における陽関数形式の数学的な定式化を回避し、かつ平面・縦断設計線を一括して最適化させるような鉄道路線設計の最適化アプローチを提案する。また、その目標を実現するために、本研究では平面線設計と縦断線設計との関連を反映させるための、鉄道路線設計の特徴に基づく帯状方形格子状デジタル地形モデルも提案する。

## 2. 本研究の位置付けと問題の定式化

### 1) 本研究の基本的な考え方

鉄道路線の評価基準としては工事コスト、運営コスト、社会便益等のいろいろな項目を挙げることができるが、ここでは鉄道路線設計の最適化を、路線設計の直接的な評価基準である工事コストと運営コストの総和を最小にするような三次元空間曲線を決める問題であるとした。そして現実に最適な鉄道路線設計案を探すためには、既往研究<sup>2)</sup>のような三次元空間システムを踏まえた、実用的なアプローチの開発が必要となるのである。そこでその方法として、平面線設計と縦断線設計のそれぞれの最適化を交互に繰り返して行うことを考えるものとする。ここでは既往研究<sup>1)</sup>のように、異なった目的関数を用いて平面線設計と縦断線設計を独立に最適化させる枠組ではなく、総合的なコストによって平面線設計と縦断線設計との相互関連を踏まえた鉄道路線設計の体系的な最適化を狙うところに本研究の特色がある。そのため、本研究で提案する最適化アプローチは主にメインモデル（鉄道路線設計の体系的な最適化モデル）と、二つのサブモデル（鉄道縦断線設計の最適化モデルとデジタル地形モデル）から成っている。

まずメインモデルに関しては、手作業で鉄道路線設計を行うプロセスを考察した上で、実用的なアプローチの開発の観点から、目的関数の定式化と制約条件への対応が容易なランダム探索法<sup>9)</sup>を取り入れることとする。そして、長い計算時間を要するというランダム

探索法の欠陥を補うためにメインモデルへは、高速処理が可能であるという特徴を持つBスプライン関数を用いた鉄道縦断線設計の最適化モデル（このモデルの開発そのものは既発表<sup>9)</sup>なので本論での説明は割愛する）を導入する。また、平面線設計と縦断線設計との相互関連を反映させるために、鉄道縦断線設計の最適化モデルに対して平面線代替案に関する地形情報を提供するためのデジタル地形モデルが必要となってくるが、本研究では3.に示すように、コンピュータの容量と計算時間を省くことができるような、鉄道路線設計を対象とする帯状方形格子状デジタル地形モデルを用いるものとする。

### 2) 目的関数

本研究は基礎研究であることから、研究方法の本質を失わないように留意しつつ、次式(1)に示すような工事コストを目的関数とし、これを最小にすることもって最適化と考えるものとする。

$$G = G1 + G2 + G3 \longrightarrow \min \quad \text{---- (1)}$$

ここに、

G1: 軌道、鉄道沿線の建築物等に関する工事コスト (万円)

G2: 縦断設計線に関する土工、橋梁、トンネルなどの工事コスト (万円)

G3: 土地買収に関する工事コスト (万円)

G: 路線の総工事コスト (万円)

一方、鉄道設計線は平面線の折線の交点位置ベクトル(X, Y), 平面円曲線半径ベクトルR, 縦断設計線勾配変更点の位置ベクトルS, 及びそれに対応する設計標高ベクトルZなどによって決められるので、上述の路線総工事コストGと設計変数ベクトルX, Y, R, S, Zとの関係は次式(2)のように表すことができる。即ち、

$$G(X, Y, R, S, Z) = G1(X, Y, R) + G2(X, Y, R, S, Z) + G3(X, Y, R, S, Z) \quad \text{---- (2)}$$

ここに、

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^t, \quad Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)^t, \\ R = (R_1, R_2, \dots, R_{N-2})^t, \quad S = (S_1, S_2, \dots, S_M)^t, \\ Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_M)^t$$

となる。但し、Nは始点、終点を含む平面設計線の折線の交点数、N-2は平面円曲線数、Mは縦断設計線の勾配変更点数である。

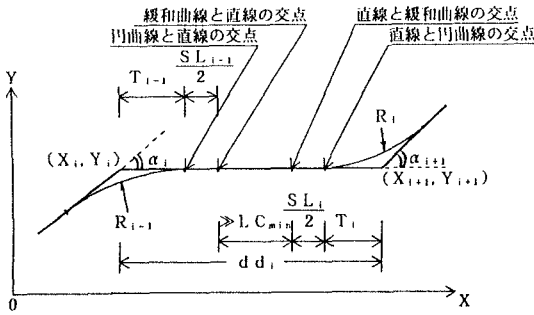


図-1 最小緩和曲線間直線長の制約

ここで、式(2)の右辺第一項G1は平面設計線にしか関連しないことになるので、それと説明変数ベクトルX, Y, Rとの関係を次のように陽関数の形で表すことができる(図-1を参照)。即ち、 $G1(X, Y, R) = L \cdot Cs$

$$= Cs \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2]^{1/2} + \sum_{i=1}^{N-2} (R_i \cdot \alpha_{i+1} - 2 R_i \cdot |\tan(\alpha_{i+1}/2)|) \right\} \quad \text{---(3)}$$

但し、Lは平面設計線の長さ(km)、Csは軌道、鉄道沿線の建築物等に関するキロ当たりの工事コスト(万円/km)、 $\alpha_i$ は第i-1番目の平面円曲線の中心角度(rad.)である。

一方、式(2)の右辺第二項G2については平面設計線が決められると、縦断線設計にしか関連しないことになるが、実際にG2と説明変数間の関係を陽関数の形で表すことは非常に困難である。また、G3については路線建設に必要な土地占有面積とそれに対応する単位面積当たりの土地買収価格(但し、地点によってその価格が異なる)との積であるが、その土地面積が縦断線の設計標高に関連するし、且つ路線の長さにも関わる。以上のような目的関数の構造を考察した上で、鉄道路線設計問題の最適解を探す直接探索法の一方法として、ランダム探索法を導入する。このようにすることにより、サブモデルとしての鉄道縦断線設計の最適化モデルとデジタル地形モデルとの支援によって、目的関数式(2)における総工事コストGと説明変数間の関係を陰関数の形でも把握することが可能となる。また次の3)に示すように、設計の制約条件を容易に処理することもできるようになる。

3) 制約条件<sup>8), 9)</sup>及びその処理

鉄道路線設計の制約条件には平面線設計に関する制約と縦断線設計に関する制約との二種類がある。その中で、縦断線設計に関する制約条件とその処理は筆者等による既往研究<sup>9)</sup>に示してある。そこで以下では、平面線設計に関する制約条件及びその処理について述べる。

a) 最小円曲線半径の制約

$$R_i \geq R_{min} \quad (i = 1, \dots, N-2) \quad \text{---(4)}$$

ここに、

$R_i$ : 平面設計線の第i番目の円曲線半径(m)  
 $R_{min}$ : 許可された平面円曲線半径の最小値(m)

もし、ある代替案における平面円曲線半径Rが許可された円曲線半径の最小値 $R_{min}$ より小さいならば、その円曲線半径Rを $R_{min}$ に代える。但し、橋梁、トンネル、駅部における特別な平面円曲線半径に関する制約についても考慮する。

b) 最小緩和曲線間直線長の制約

図-1に示すように、鉄道路線における直線と円曲線を滑らかに接続するために、中点が直線と円曲線の交点にくるような緩和曲線を挿入することになる(但し、本研究では制約処理の時のみ、緩和曲線を考慮する)。そして、i-1番目とi番目との緩和曲線間の最小直線長の制約は次のように表すことができる。即ち、

$$d d_i - T_{i-1} - T_i - (S L_{i-1} + S L_i) / 2 \geq L C_{min} \quad (i = 2, \dots, N-2) \quad \text{---(5)}$$

ここに、

$$T_i = R_i \cdot |\tan(\alpha_{i+1}/2)|$$

$$T_{i-1} = R_{i-1} \cdot |\tan(\alpha_i/2)|$$

$$d d_i = [(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2]^{1/2}$$

但し、 $L C_{min}$ は許可された緩和曲線間の最小直線長(m)である。

もし、式(5)が成立しないならば、当該路線代替案は放棄される。

c) 緩和曲線間の最小円曲線長の制約

$$R_i \cdot \alpha_{i+1} \geq L Y_{min} + S L_i \quad (i = 1, \dots, N-2) \quad \text{---(6)}$$

ここに、

$L Y_{min}$ : 許可された緩和曲線間の円曲線長(m)  
 $S L_i$ : 第i番目の円曲線に対応する緩和曲線長(m)  
 もし、式(6)が成立しないならば、当該路線代替案は放棄される。

d) 境界条件

対象路線の始点、終点の座標は通常、予め与えられるので、本研究では始点と終点を固定変数として取り扱うこととする。

e) 橋梁やトンネル等の構造物による制約

鉄道路線設計においては、特大の橋梁は前後に曲線を入れて、河の部分を通る直線であつて直角に渡るのが軌道構造上、また保守上も望ましい。長大トンネルの場合、さらに使用上、そして施工上からもできる限り直線とすることが望ましい。もし曲線が避けられない場合には、一般に半径はなるべく大きいほうがよいが、必要以上に大きいと曲線長が長くなり、測量施工に厄介であることから、1000m程度が適当であると言われている<sup>9)</sup>。この点に関して本研究では最適化のアプローチの開発の際に、この原則に加えて、具体的な路線の計画範囲内の自然条件、及び異なるトンネル長に対応する曲線半径の取り方等について、設計専門家の経験をも考慮する。

f) 避けるべき区域の制約

鉄道路線設計を行う際に、不良地質地域や地震発生区域や移転不可能な天然記念物等が存在する区域には路線の通過を避けることが望ましいので、最適な鉄道路線案を探す際にもその原則に従わなければならない。本研究では、この種の制約を容易に満足させるために、避けるべき区域の種類によって、予めその範囲を数学的な曲線の形で表すことにする。ここでは楕円曲線を例にとり、この種の制約の処理方法を説明する。

まず、ある避けるべき区域を適当な楕円曲線で囲んでおく。そして、ある鉄道路線代替案における点(X, Y)に対し、もし次式(7)が成立しないならば、当該路線代替案は放棄される。

$$\frac{(X - a_0)^2}{a^2} + \frac{(Y - b_0)^2}{b^2} > 1 \quad \text{---(7)}$$

但し、(a<sub>0</sub>, b<sub>0</sub>)、2a、2bはそれぞれ楕円の中心点座標、長軸、短軸である。

本研究では上述のようなすべての制約条件を満たす路線代替案が比較可能な路線代替案ということになる。

3. 鉄道路線設計を対象とする帯状方形格子状デジタル地形モデルの作成とその適用

2. で述べたように、最適な鉄道路線設計案を決め

るための実用的なアプローチの一方法として、平面線設計と縦断線設計のそれぞれの最適化を交互に繰り返して行うことが考えられる。そのため、鉄道縦断線設計最適化のサブモデルに対して平面線設計代替案に関する地形情報等を提供するためのデジタル地形モデルが必要となってくる。鉄道路線のように帯状に長く、しかも曲がりくねっているデジタル地形モデルの作成に際して、路線に沿う方向と路線に直角な方向に地形点を配置することが計算処理上、比較的有効な方法であると言われている<sup>4)</sup>が、しかしこの方法は内挿点の探索の便宜さから見ると、さらに改良すべき点があると考えられる。そこで、本研究では鉄道路線設計の特徴に基づいて、鉄道路線設計の体系的な最適化モデルの一サブモデルとしての帯状方形格子状デジタル地形モデルを提案する。

本研究で提案するモデルでは、まず、予め方形格子を付した地形図で、すでに与えられた最初の鉄道路線案の方向に沿って、路線の可能な変動範囲内において、図-2のような幾らかの長方形の小区域を分布させる。それから、次の1)に示すルールに従って、これらの小区域を順に並べ、図-3のような帯状方形格子状デジタル地形モデル座標系S-Tを形成させる。そして、標高測定点(X, Y)に対応する標高は、その平面座標(X, Y)を帯状方形格子状デジタル地形モデルにおける座標(S, T)に変換し、標高測定点がどの格子上にあるかを判断した上で、さらに双線形挿間法を用いることによって求められる。そしてまた、直線近似法によりその横断面測定点における地形横断勾配が求められる。そのモデルを作成するフローチャートは図-4に示すとおりであり、以下がその具体的な処理手順である。

1) 小区域の分割

各小区域の分割は、予め方形格子及び最初の路線案をつけた地形図で行う。その際、計算処理上の便宜さより、その分割は次のルールに従わなければならない。

- a) 各小区域の四辺がそれぞれ、ある方形格子線に一致しなければならない。
- b) 各小区域の幅が等しくならなければならない。
- c) 路線の可能な変動範囲は各小区域からなる区域に属しなければならない。

以上の条件を満たした上で、各小区域の位置、長さ、方向(横方向または縦方向)を変えることによって、す

べての小区域の面積の総和をできる限り小さくしなければならない。もし必要ならば、隣合う小区域を部分的に重なり合わせることもできる。それから、小区域毎に、それぞれ一つの識別番号  $j$  ( $j = 1, \dots, L, L$ ) をつけておく。(図-2を参照)

2) 小区域の配列

本研究では内挿点探索の便宜さから、分割された横幅が等しい各小区域に対し、それに相応する番号によって、次々に小区域の長さの方向(縦方向の小区域の場合、時

計回りに回転させる)に沿って並べ、帯状方形格子状デジタル地形モデル座標系  $S-T$  が構成される(図-3を参照)。

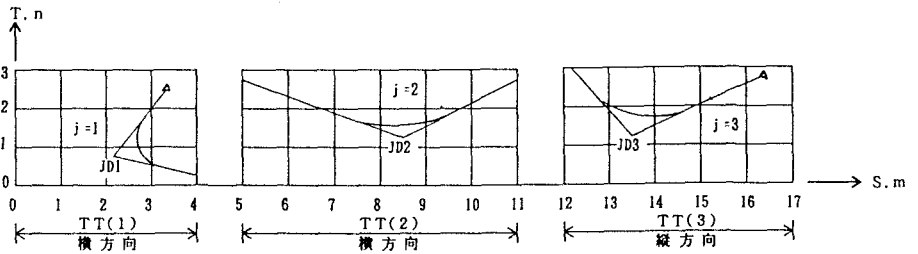


図-2 デジタル地形モデルにおける各小区域の作成

3) 各小区域情報

情報の抽出及び保存

各小区域(境界を含む)に対し、地形図からすべての格子点  $(m, n)$  の地形標高  $H_{m,n}$  を読み取り、保存しておく。そして、それぞれ各小区域の左境界が  $X$  軸における座標  $A_{j,1}$ 、右境界が  $X$  軸における座標  $A_{j,2}$ 、上境界が  $Y$  軸における座標  $A_{j,3}$ 、下境界が  $Y$  軸における座標  $A_{j,4}$  であるとして、それを記録する(図-2を参照)。またここで、次のような各小区域方向を表す変数  $M_j$  を定義する。

- $M_j = 0$  :  $j$  番目の区域は横方向小区域である。
- $M_j = 1$  :  $j$  番目の区域は縦方向小区域である。

4) 標高測定点  $(X, Y)$  の帯状方形格子状デジタル地形モデル座標系  $S-T$  における座標  $(S, T)$  への変換

a) 測定点  $(X, Y)$  がどの小区域に属しているかを判断する

もし、 $A_{j,1} \leq X \leq A_{j,2}$ 、かつ、 $A_{j,4} \leq Y \leq A_{j,3}$  ならば、その平面点  $(X, Y)$  は  $j$  番目の小区域に属している。

b) 測定点  $(X, Y)$  の  $S-T$  座標系における座標  $(S, T)$  を求める

①  $M_j = 0$  の横方向の小区域に対し、

$$S = SS(j) + (j - 1) \cdot D - A_{j,1} + X$$

$$T = Y - A_{j,4}$$

②  $M_j = 1$  の縦方向の小区域に対し、

$$S = SS(j) + (j - 1) \cdot D - A_{j,4} + Y$$

$$T = A_{j,2} - X$$

ここに、  
 $j$  : 標高測定点  $(X, Y)$  が属している小区域の番号  
 $D$  : 方形格子の幅( $m$ )

$SS(j)$  :  $j$  番目の小区域までの各小区域の長さの総和、即ち、

図-3 帯状方形格子状デジタル地形モデル座標系

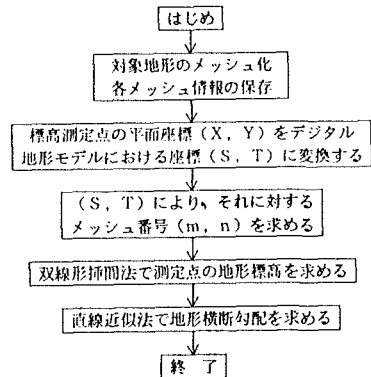


図-4 デジタル地形モデルの概略フロー

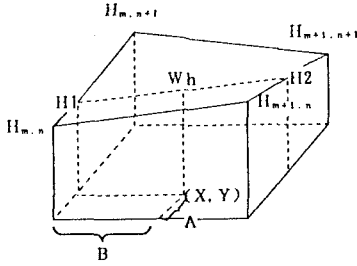


図-5 地形標高を求めるための双線形挿入法

$$SS(j) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{j-1} TT(i) & j \geq 2 \\ 0 & j = 1 \end{cases}$$

但し、

$$TT(i) = \begin{cases} A_{i,2} - A_{i,1}, & M_i = 0 \text{ の場合} \\ A_{i,3} - A_{i,4}, & M_i = 1 \text{ の場合} \end{cases}$$

5) 標高測定点(X, Y)に対する地形標高Whを求める

まず、上で得られた測定点(X, Y)のS-T座標系における座標(S, T)によって、それが属している方形格子の番号m, nを求める。即ち、

$$m = INT(S/D)$$

$$n = INT(T/D)$$

ここで、INT(X)は実数Xの整数部分を意味する。

次に図-5に示すように、与えられた測定点(X, Y)が属している方形格子の四隅の地形標高 $H_{m,n}$ ,  $H_{m,n+1}$ ,  $H_{m+1,n}$ ,  $H_{m+1,n+1}$ に対して双線形挿入法を適用することにより、その測定点の地形標高Whが次式(8)のように求められる。

$$Wh = (H_{m,n} \cdot (1 - A/D) + H_{m,n+1} \cdot A/D) \cdot (1 - B/D) + (H_{m+1,n} \cdot (1 - A/D) + H_{m+1,n+1} \cdot A/D) \cdot B/D \quad \text{---- (8)}$$

但し、

$$A = T - n \cdot D, \quad B = S - m \cdot D$$

以上に述べたように、この帯状方形格子状デジタル地形モデルを用いることにより、対象範囲内の平面点座標(X, Y)から、それに対応する地形標高Whを効率よく求めることが可能となる。

また、地形横断勾配 $\beta$ についてはまず、ある測定点(X, Y)における路線の横断方向に沿い、路線の両側2点ずつの地形点を取る。そして、測定点(X, Y)を含む5地形点の地形標高値より、直線近似法を用いること

によって、その測定点(X, Y)における地形横断勾配 $\beta$ を求める。但し、すべての地形横断勾配を片勾配と仮定する。

上述の考え方に従い、対象平面設計線代替案に対する地形縦断線とそれに対応する各地形横断測定点における横断勾配が得られる。そしてそれに基づき、鉄道縦断線設計の最適化を行うことが可能となる。

本デジタル地形モデルは鉄道路線設計に必要なない地形を考慮しないで済むので、コンピュータの容量と計算時間を省くことができる。そして、方形格子状に地形点を配置することにより、内挿及び内挿点探索が容易になるという利点がある。

4. 鉄道路線設計の最適化アプローチ

上述のように、本研究では実用的な立場から、三次元空間における鉄道路線設計を二つの互いに関連する鉄道平面線設計と鉄道縦断線設計を交互に繰り返して行うことにより実現しようとするものである。2.と3.の内容を踏まえ、本研究で開発した鉄道路線設計の最適化アプローチを図-6に示す。その具体的な処理手順を次に述べる。

ステップ1：設計技術者が経験と実際の地形状況に基づき、初期案としての最初の鉄道平面設計線の位置と計画範囲を設定する。そして、デジタル地形モデルと鉄道縦断線設計の最適化モデルの支援によって、最初の鉄道路線設計案の総工事コストを計算する。

ステップ2：ランダム探索法を用い、前ステージの平面設計線案の各折線の交点座標( $X_i$ ,  $Y_i$ )を無作為に変えて、それを本ステージの平面設計線案の各折線の交点位置とする。そして、各ステージの平面設計線案の各円曲線の接線長が変わらないと仮定して、それに対応する各平面円曲線半径Rを求める。もし、ある平面円曲線半径が $R_{min}$ より小さいならば、2.の3)に示してあるように、当該円曲線半径Rを $R_{min}$ に代える。それと同時に、当該円曲線の接線長も改めて計算する。そうすることにより、最小円曲線半径の制約条件を満たす新しい平面設計線代替案が作成される。

ステップ3：ステップ2で得られた本ステージの平面設計線代替案が制約条件(円曲線半径の制約を除く)を満たすかどうかを判断する。もし、それが制約条件を満たすならば、次のステップ4に行く。そうでない

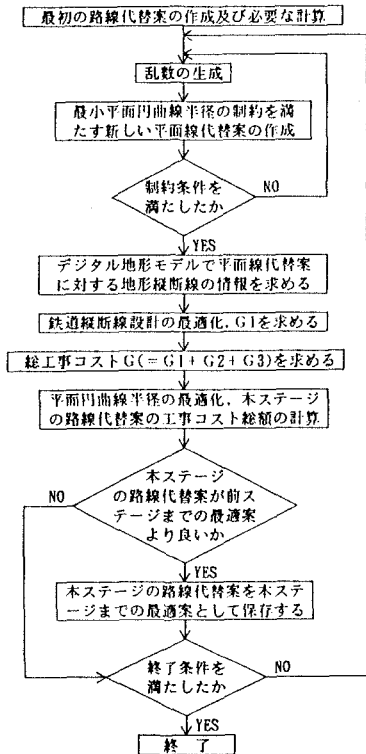


図-6 鉄道路線設計の最適化の概略フロー

場合、ステップ2にもどる。

ステップ4：3. に示してあるデジタル地形モデルを用い、制約条件を満たした平面設計線代替案に対応する地形縦断線と各横断面部の地形横断勾配を求める。そして、筆者等の既往研究<sup>5)</sup>に示してある、Bスプライン関数を用いた鉄道縦断線設計の最適化モデルを使い、鉄道縦断線設計に関する工事コストG1を求める。その工事コストG1と、平面設計線に関する工事コストG2及び土地買収費用G3とを総和し、当該路線設計代替案の総工事コストGを求める。

ステップ5：上述の路線設計代替案の各円曲線半径は各円曲線の接線長が変わらないとする条件の下で決められたものであるから、最適な路線設計案を得るためには、各ステージで最適な円曲線半径を探す必要がある。一方、円曲線半径の設計に関しては、設計基準<sup>9)</sup>によって定められた標準的な曲線半径シリーズ $R_k$  ( $k=1, \dots, 16$ )がある。そこで、本研究では、各円曲線半径の取るべき範囲を ( $R_{min}, \dots, R_{16}$ ) とする。そして、直接探索ルーチン<sup>7)</sup>の考え方に基づき、路線設計

の総工事コストGを最小にするような最適な円曲線半径を求める。

ステップ6：ステップ5で得られた本ステージの総工事コストと前ステージまでの最適案の総工事コストとを比較し、総工事コストの安いほうが本ステージまでの最適案として保存される。

以上のような繰り返しを終了条件が満たされるまで行う。終了条件に関しては、理論的には次のような基準がある。即ち、各変数 $X_i$ に対して、解が確率90%で誤差 $\delta_i$ 以下におさまるために必要な計算回数は

$$N(0.9) \approx 2.3 \prod_{i=1}^n \left( \frac{u_i - b_i}{\delta_i} \right) \quad \text{---- (9)}$$

となる<sup>6)</sup>。但し、 $b_i, u_i$ は変数 $X_i$ の下限と上限である。本研究における終了条件とは生成された鉄道路線設計代替案の数が上式(9)によって与えられた数値に達すると、その計算を終了するということである。最終のステージで得た最適案が、与えられた条件下での最適な鉄道路線設計案となる。

### 5. ケース・スタディ

本研究で提案した最適化アプローチの実用性を考察するために、ケース・スタディとして、中国において手作業で設計された、ある在来線の一部分を取り上げ、鉄道路線設計の最適化を行った。その結果の概要を次に述べる。

今回のケース・スタディに用いた対象路線は中国の南寧～防城間の丘陵地帯にあり、長さが約5kmであり、曲線は三つ、橋梁は1ヶ所、トンネルは1ヶ所である。また、その計算条件は次に挙げるとおりである(但し、中国における土地価格制度の特殊要因により、今回のテストでは土地買収に関するコストはG1の中に含めている)。

- ①許可された平面円曲線半径の最小値：400m
- ②緩和曲線長：100m
- ③許可された平面円曲線長の最小値：20m
- ④許可された平面緩和曲線間の直線長の最小値：60m
- ⑤許可された縦断設計線の最大勾配：6%
- ⑥許可された隣勾配最大代数差：6%
- ⑦駅部における最大制約勾配：2.5%
- ⑧許可された隣勾配変更点間の最小長：400m
- ⑨トンネル、橋梁、駅、曲線部などにおける縦断設計

線の最大勾配制約,及びトンネル,橋梁部などにおける平面円曲線半径の制約は中国国家標準「鉄道路線設計規範」に従って決める.

⑩軌道,建築物,土地買収などに関するキロあたりの工事コスト:800万円/km

⑪土工コスト:切取100円/m<sup>3</sup>,盛土60円/m<sup>3</sup>

⑫デジタル地形モデルにおける格子のサイズ:50m×50m

以上の計算条件をベースにし,本最適化アプローチに基づいて作った鉄道路線設計の最適化 FORTRANプログラムを用い,HP 9000/S 730コンピュータによって,対象ケース路線の検証を行った.その結果,本論文で提案した方法で自動的にアウトプットした総工事コストは9,420万円であった.一方,それと手作業による路線設計の結果とを比較するために,本アプローチと同様の計算方法によって求めた手作業による設計案の総工事コストは10,032万円であった.即ち,5kmの対象鉄道路線設計に対し,本アプローチによる設計案は手作業による設計案より総工事コストが612万円下がったことになる.

以上の計算の結果から次の点が考察される.

まず第一に,本アプローチを用いて鉄道路線設計の最適化を行うと,手作業に基づく路線設計より工事コストが節約できる.また,手作業による路線設計の品質は鉄道設計者の経験と能力によって多分に異なるわけであるが,本アプローチによる路線設計は鉄道設計者の経験と能力にそれほど左右されることなく,本手法に基づいてコンピュータで自動的に路線設計を行うことができ,その品質が保証される.

第二には,ランダム探索法を用いた本アプローチは手作業と比べると,設計にかかる時間が大いに短縮されるし,人件費も節約できる.また,最適化問題の陽関数形式の数学的な定式化を行う必要がないので,他の最適化方法より実用化されやすい.

## 6. 結論

本研究では鉄道路線設計の特徴に適應できる帯状方形格子状デジタル地形モデルを構築した上で,鉄道平面線設計と縦断線設計が一括して最適に達するような最適化アプローチを完成させた.その最適化アプローチの特徴を整理すると次のようになる.

1)本アプローチでは直接探索法の一つであるランダム探索法を用いることによって,本最適化問題の目的関数の定式化と制約条件の処理を容易なものにした.また,それに基づく最適化アプローチは他の最適化方法より実用化されやすいという長所を有している.

2)本アプローチを用い,鉄道路線設計を行うと,総工事コストと人件費が節約できるし,設計の時間も短縮できることが分かった.

3)本アプローチにおける縦断線設計の最適化モデルには,Bスプライン関数を用いた高速の鉄道縦断線設計の最適化モデルを用いることによって,ランダム探索法が持つ冗長性の除去を可能にした.

4)本研究ではサブモデルとして,鉄道路線設計の特徴に基づく帯状方形格子状デジタル地形モデルを提案した.このサブモデルはコンピュータの必要容量と所要計算時間を減らすという特徴を有している.

## 参考文献

- 1)Amkeutz, Emde, Hamster: "EPOP-I(Entwurfsfindung und Optimierung im Strassenbau Benutzerhandbuch)" Beratende Ingenieure Heusch/Boesefeldt, Aachen, 1980.
- 2)E. P. Chew, C. J. Goh, and T. F. Fwa: Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignment for highways, Transpn. Res, Vol. 23B, No. 5, pp. 315~329, 1989.
- 3)枝村 俊郎・長尾 克宏・笹川 耕司: 道路路線計画システムの開発, 土木学会論文集, No. 464/IV-19, pp. 83~90, 1993.
- 4)丸安 隆和・村井 俊治・大林 成行: 路線計画及び設計を対象とした帯状デジタルトレインモデルの作成, 写真測量, Vol. 10, No. 2, pp. 22~29, 1971.
- 5)叶 霞飛・青島 縮次郎・宿 良: Bスプライン関数を用いた鉄道縦断線設計の最適化モデル, 土木学会論文集, No. 488/IV-23, pp. 101~110, 1994.
- 6)今野浩・山下浩: 非線形計画法, 日科技連, 1978.
- 7)L. C. W. デイクソン著(松原正一訳): 非線形最適化計算法, 培風館, 1974.
- 8)岡田 宏 編著: 新体系土木工学 66 鉄道(I), 技報堂出版, 1980.
- 9)中華人民共和國鉄道部: 鉄道路線設計規範, 中国鉄道出版社, 1987.