

DPを用いた鉄道路線設計の三次元最適化モデル

A Three-dimensional Optimization Model for Railway Alignment Design Based on DP

叶 霞飛** 青島 縮次郎***

by Xiafei YE and Naojiro AOSHIMA

1. はじめに

近年、計算技術とコンピュータ技術の進歩に伴って、コンピュータの支援により、鉄道整備の低コスト化を目的とする等の、鉄道路線設計の最適化モデルを構築することが重要な課題となっている。そうした中で、これより本研究において扱おうとする鉄道路線設計の最適化とは、ある総合的な評価指標を最小にするような三次元空間における鉄道路線の位置を決めることとしている。

さて、当該分野に関連する既往研究は、鉄道・道路を問わず、大きく2つに分けられる。一つは、上述の設計問題を平面線設計と縦断線設計の二段階に分けて解決しようとするものである（例えば、参考文献^{1)・2)}）。この種の手法は、路線設計に影響する要因を比較的簡単にモデルに反映させることができることに特徴があるが、しかし平面線形として放物線で表していることや、平面線設計の良さを、縦断線設計との関連を考慮せずに、路線の長さのみで評価していること等から、実務における平面線設計と縦断線設計の関連を踏まえた最適な路線設計案を得る保証はなかったと言えよう。もう一つは、路線の平面・縦断両線形を一括して最適化させるものである（例えば、参考文献^{3)・8)}）。その中で、鄧域才ら³⁾、Chew, E. P. ら⁴⁾は、路線設計の最適化問題を制約付きの非線形計画問題として定式化し、そして三次元空間における最適な路線設計案を標準的な非線形最適化技術によって決定しようとするようなモデル

を提案している。これらのモデルは新たな数学的展開を示した理論的な研究成果ではあるが、しかし実務における路線設計問題への適用から考えると、目的関数と制約条件の具体的な定式化の複雑さ等の問題点が残されている。一方、OECD Road Research Group⁶⁾、李方⁷⁾は、目的関数の具体的な定式化を避けることが可能となるような、DPを用いた道路路線設計の最適化モデルを提案している。しかし前者のモデルでは、道路平面線形を線分からなる折線で表しているため、実務における路線設計とはかけ離れたものとなっている。また後者のモデルでは、路線設計代替案の評価に必要となる縦断設計線として、すべての代替案に対して、路線の始・終点の縦断設計標高を結ぶ勾配線という仮想的な設計線を用いるため、山区以外の地域における道路路線設計問題に適用することが難しい状況になっている。これに対し、筆者ら⁸⁾は、実務における鉄道路線設計の最適化を、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により実現しようとするようなアプローチを既に提案している。しかし本方法は、理論的に大域的最適な鉄道路線設計案を得ることが可能とはなるが、求解に要する計算時間という点から見ると、必ずしも望ましいものとなっていないのが現状である。

そこで本研究では、以上の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定式化を回避し、実務における鉄道路線設計の取扱い方を考慮に入れ、かつ大域的最適解を得ることができるような、鉄道路線設計最適化の三次元DPモデルを提案する。なお、本モデルは筆者らが開発したアプローチ⁸⁾の効率性を改良するためのモデルとしても位置づけられる。

*キーワード：鉄道計画、路線設計、DP

**学生員 工修 群馬大学大学院博士後期課程 工学研究科

***正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科

(〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

(Tel. 0277-30-1650 Fax. 0277-30-1601)

2. 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建設コストと運営コストを含む総合コスト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。そして現実最適鉄道路線設計案を探すためには、既往研究^{3), 4)}のような三次元モデルを踏まえた、実用的なモデルの構築が必要となるのである。

そこで本研究では、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^{1), 2)}ではなく、総合的なコストによって実務における最適な平面・縦断両線形を同時に決定することに着目している。そして実用性の観点から、当該最適化問題における陽関数形式の数学的定式化を回避し、かつ大域的最適解を得ることを可能にするために、偏導関数を基礎とする最適化方法^{3) - 5)}を用いずに、DPという手法¹⁰⁾を導入する。ここでは、平面線形として、一組の線分からなる線形⁶⁾を用いずに、平面円曲線、平面緩和曲線、及び線分からなるような実務における鉄道平面線形（但し、制約処理の時のみ、平面緩和曲線を考慮する）を用いるところに本研究の特色がある。また、当該路線設計最適化問題にDPを適用する際、状態ベクトルの次元障害の回避等の観点から、対象鉄道路線の長さを、各平面円曲線の終点を境界に、N区間に分けることにする。そうすることにより、一般に隣合う平面円曲線終点の空間位置間の縦断設計線は必ずしも一本の勾配線にならないため、各隣合う平面円曲線終点の空間位置間の各路線代替案に対応する最適な縦断設計線を決める必要がある。これに関して、仮想的な縦断設計線⁷⁾を用いずに、筆者らが提案した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⁸⁾、及び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⁹⁾を用い、対象区間における最適な鉄道縦断設計線を高速に決めるところに本研究のもう一つの特色がある。

3. 目的関数の定式化と制約条件

(1) 目的関数の定式化

三次元空間における鉄道設計線（ここでは平面緩和曲線と縦断曲線を考慮しないこととする）は平面設計線における折線の交点位置ベクトル(X, Y)と平面円曲線半径ベクトルR、及び縦断設計線における勾配変更点の位置ベクトルDと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。ここでこれらのX, Y, R, D, Zを本最適化問題において求めようとする変数とする。そして本研究では2.で述べたような建設コストと運営コストを含む総合コストを目的関数とするため、一般に当該最適化問題は次式(1)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \min \quad & G(X, Y, R, D, Z) \\ & = A(X, Y, R, D, Z) \\ & + \sum_{t=1}^T B_t(X, Y, R, D, Z) / (1 + \Omega)^t \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \min \quad & G(X, Y, R, D, Z) \\ & = A(X, Y, R, D, Z) \\ & + \sum_{t=1}^T B_t(X, Y, R, D, Z) / (1 + \Omega)^t \end{aligned}} \right\} \quad (1)$$

s. t. $X, Y, R, D, Z \in \text{制約集合}$

ここに、

$G(X, Y, R, D, Z)$: 総合コスト (万円)

$A(X, Y, R, D, Z)$: 建設コスト (万円)、本研究ではすべての投資を対象路線の最終完成年度で行うと仮定する。

$B_t(X, Y, R, D, Z)$: 第t年度の運営コスト (万円/年)

Ω : 割引率

T: 鉄道設備の耐用年数による計算期間であり、一般的には運営開始年度から30年間とされる¹¹⁾。

$X: (X_0, X_1, \dots, X_N)^t$

$Y: (Y_0, Y_1, \dots, Y_N)^t$

$R: (R_1, R_2, \dots, R_{N-1})^t$

$D: (D_1, D_2, \dots, D_M)^t$

$Z: (Z_1, Z_2, \dots, Z_M)^t$

N+1: 始点、終点を含む平面設計線

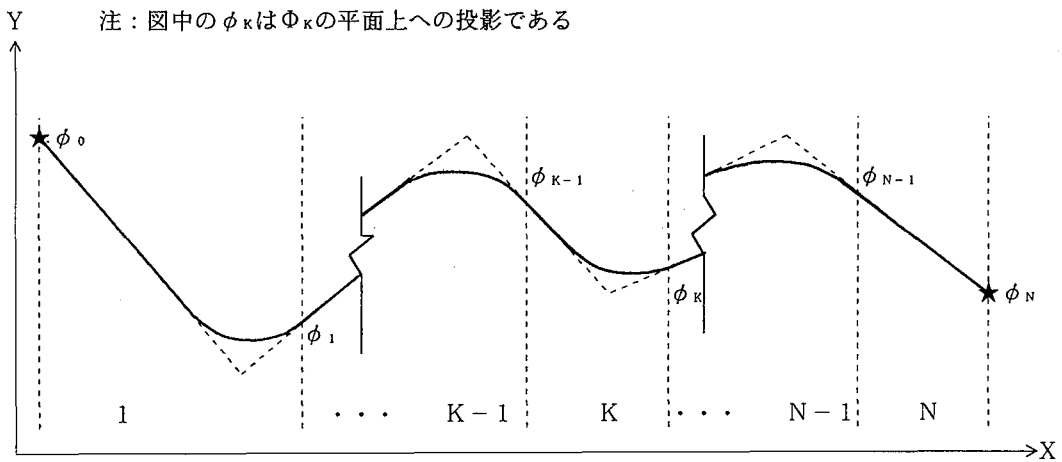


図-1 鉄道平面設計線略図

における折線交点の数

$N-1$: 平面円曲線の数

M : 縦断設計線における勾配変更点の数

しかし、実際は式(1)における目的変数 G と設計変数間との関係を陽関数の形で表すことはほぼ不可能な状況にあるので、上述のような問題を解析的な最適化手法により解くのは非常に困難であると思われる。そのことから、本研究では、次に示すような目的関数の構造を考慮に入れ、大域的最適解を得ることが可能となる最適化手法であるDP¹⁰⁾を導入することとした。

さてここで、本鉄道路線設計の最適化問題にDPを適用するために、各平面円曲線の終点を境にし、鉄道路線の長さを N 区間に分け(図-1を参照)、そして第 K 区間の始点と終点の空間位置をそれぞれ Φ_{K-1} と Φ_K (図-1では Φ_K の平面上への投影を ϕ_K で表す)で表すと、対象路線の総コスト G は各区間のコストの総和として次式(2)のように表すことができる。

$$G(X, Y, R, D, Z) = \sum_{K=1}^N G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K) \quad (2)$$

ここに、

$$G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = A_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K) + \sum_{t=1}^T B_{t,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) / (1 + \Omega)^t \quad (3)$$

となる。但し、

$$A_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = \sum_{m=1}^5 A_{m,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) \quad (4)$$

となる。ここに、 $G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ 、 $A_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ 、 $B_{t,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ はそれぞれ K 番目の鉄道路線設計区間における総合コスト、建設コスト、及び t 年度目の年間運営コストである。また、 $A_{m,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ ($m=1, 5$)はそれぞれ K 番目の鉄道路線設計区間における軌道や鉄道沿線の建築物等に関する建設コスト、盛土や切土等に関する土工コスト、橋梁に関する建設コスト、トンネルに関する建設コスト、及び土地買収に関するコストである。さらに、それらの具体的な表現式は次のとおりである。

$$A_{1,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = L_K \cdot C_S \quad (5)$$

$$A_{2,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = \sum_{i=1}^{1K} (C_{i-1} \cdot S_{i-1} + C_i \cdot S_i) \cdot \Delta W X_i / 2 / 10^4 \quad (6)$$

$$A_{3,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = \sum_{r=1}^{RK} (e_r \cdot h_r^2 + f_r \cdot |h_r| + g_r) + \sum_{p=1}^{PK} C_p(Z_p) \cdot Q_p \quad (7)$$

$$A_{4,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K) = \sum_{j=1}^{TK} C_T(LT_j) \cdot LT_j / 10^4 \quad (8)$$

$A_{5,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$

$$= \sum_{i=1}^{1K} (C_{m,i-1} \cdot W_{i-1} + C_{m,i} \cdot W_i) \cdot \Delta W X_i / 2 / 10^4 \quad (9)$$

($K=1, 2, \dots, N$)

ここに、

K : 路線始点からの路線設計区間の番号

L_K : K 番目の路線設計区間の長さ (km)

C_s : 軌道、鉄道沿線の建築物等に関するキロ当たりの建設コスト (万円/km)

i : K 番目の路線設計区間始点からの横断面の番号

C_i : i 番目の横断面部の土工コストの単価 (円/㎡)

S_i : i 番目の設計横断面面積 (㎡)

$\Delta W X_i$: $i-1$ 番目の横断面と i 番目の横断面間の距離 (m)

I_K : K 番目の路線設計区間における横断面の数

r : K 番目の路線設計区間始点からの橋脚、または橋台部の番号

e_r, f_r, g_r : 地形・地質のタイプに対応して、主要な橋梁のタイプとスパンごとに、予め最小自乗法で求めた r 番目の橋脚、または橋台の建設コストに関する係数

h_r : r 番目の橋脚、または橋台部の設計標高と地面標高との差 (m)

R_K : K 番目の路線設計区間における橋脚、橋台の数

p : K 番目の路線設計区間始点からの橋梁の番号

Z_p : p 番目の橋梁のスパン (m)

$C_p(Z_p)$: スパン Z_p の梁の単価 (万円/1 径間)

Q_p : p 番目の橋梁の径間数

P_K : K 番目の路線設計区間における橋梁の数

j : K 番目の路線設計区間始点からのトンネルの番号

$C_T(L_{T,j})$: 第 j 本目のトンネルの施工単価 (円/m)

$L_{T,j}$: 第 j 本目のトンネルの長さ (m)

T_K : K 番目の路線設計区間におけるトンネ

ルの数

$C_{m,i}$: i 番目の横断面部の地価 (円/㎡)

W_i : i 番目の横断面部の鉄道用地幅 (m)

さらに運営コストについては、次式 (10) に示すような計算式¹¹⁾ を取り入れることにする。

$B_{t,K}(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$

$$= 365 \cdot \xi_K \cdot (N H_t + \eta N K_t) / 10^4 + L_K \cdot C_{B,t} / 10^4 \quad (10)$$

ここに、

$N H_t$: 第 t 年度の貨物列車の片道列車本数 (本/日)、当該年度の貨物輸送量の予測値により決められる。

$N K_t$: 第 t 年度の旅客列車の片道列車本数 (本/日)、当該年度の旅客輸送量の予測値により決められる。

η : 貨物列車に対する旅客列車の走行費換算係数

L_K : K 番目の鉄道路線設計区間の長さ (km)

$C_{B,t}$: t 年度目のキロ当たりの設備 (軌道、路盤、橋梁、トンネル、建物等) 保守費 (円/km・年)

ξ_K : K 番目の路線設計区間において一本の貨物列車が往復一回走行にかかる走行費 (円/本) であり、そして当該区間において一本の貨物列車が片道一回走行にかかる走行費 ε_K は次式 (11) によって求められるため、 $\xi_K = \sum \varepsilon_K$ となる。

$$\varepsilon_K = \sum \mu_i \cdot \tau_i + 0.0122 \sum \alpha \cdot (\rho + \theta) \cdot a / 10^3 \quad (11)$$

ここに、

μ_i : 勾配 i の縦断設計区間において一本の貨物列車キロ当たりの走行費 (円/本・km)

τ_i : K 番目の路線設計区間における縦断設計勾配 i の勾配長 (km)

α : K 番目の路線設計区間に対し列車の力行区間における各平面円曲線 (円弧) の中心角の和 (度)

ρ : 機関車の重量 (トン)

θ : 貨物列車の牽引定数 (トン)

a : トンキロ当たりの力学的運動エネルギーに関する保守費 (例えば、牽引モーター、主発電機等の保守費用) (円/トン・km)

ここで単価に関しては、現場で鉄道新線を設計し

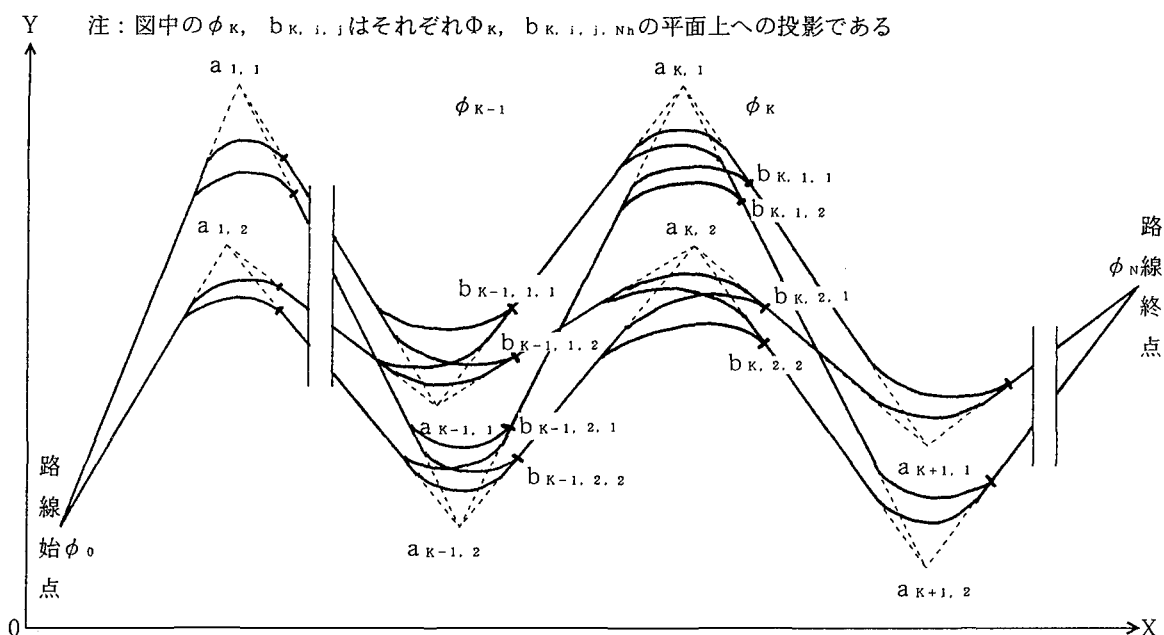


図-2 本研究におけるDPモデルの構築図例

ようとする際に、事前に構造物等の真の単価値を決めることが非常に難しいと考えられるので、本モデルではその取り方として、路線設計の前に、対象地域の地形や地質等で類似している在来線の単価を整理し、その値を地形・地質のタイプごとにモデルへ付与していくこととした。つまり、本モデルでは地形・地質状況からの影響を考慮しつつ、構造物等に対して異なった単価を与えることにしたのである。

(2) 制約条件

鉄道路線設計における制約条件には縦断線設計に関する制約と平面線設計に関する制約との2種類があるが、本モデルで取り扱っている制約条件は次のとおりである。即ち、鉄道縦断線設計に関しては、主に最大勾配制約、最大隣勾配代数差制約、勾配変更点間の最小勾配長制約、及び縦断曲線と平面緩和曲線間の競合回避制約を含むが、その処理については鉄道縦断線設計の最適化モデルにおいて解決される。また、鉄道平面線設計に関しては、最小円曲線半径制約、平面緩和曲線間の最小直線長制約、平面緩和曲線間の最小円曲線長制約、避けるべき区域の制約等を考慮しているが、具体的な定式化については筆者らによる既往研究⁸⁾を参照されたい。

以上のような目的関数の定式化を行い、そして本

最適化問題にDPを適用することにより、最適な鉄道路線設計案を決めるための設計変数ベクトル X , Y , R , D , Z は次の4. に示すように、 Φ_K ($K=1, 2, \dots, N$) を介して決めることができる。

4. 本三次元DPモデルの定式化と求解

(1) 鉄道平面設計線代替案の作成

鉄道平面設計線（ここでは平面緩和曲線を考慮しないことにする）は各平面折線の交点位置とそれに対する平面円曲線半径によって決められる。本研究では、実務における最適な鉄道路線設計案を求めるため、設計技術者の経験と能力を活かすこととする。即ち、本モデルは設計技術者によって提案される各折線交点位置の初期値と各円曲線半径の望ましい値をベースとするものである。そしてそれらと各折線交点位置の可能な変動範囲に基づき、図-2に示すような対象路線計画範囲内におけるすべての平面設計線代替案を作成する（但し、図-2は各折線交点位置の代替案が二つしかない場合の図例である）。

(2) DPモデルの定式化

図-1に示したような鉄道路線設計線の N 区間をDPにおける N 段階とすると、当該鉄道路線設計の

最適化問題はDPにおけるN段階決定過程とみなすことができる(図-2を参照)。もし各折線の交点位置の代替案をJ個(図-2の例ではJ=2である)とすると、本研究では、K番目の路線設計区間終点の代替案、即ちすべての折線($a_{K,i}, a_{K+1,j}$) ($i, j = 1, 2, \dots, J$)上の $a_{K,i}$ から最も離れているような平面円曲線の終点(即ち当該折線上にくるすべての平面設計線代替案の共通点になり、代替案評価の基準点となる)における空間変数を Φ_K で表し、第K段階における状態と見なす。そして上述のような各平面円曲線終点における路線設計の縦標高の計画値の数をNH個とすると、変数 Φ_K のとり範囲は $J \times J \times NH$ 個の元からなる集合となり、これを U_K で表すこととする。ここで、図-2を例にあげると、

$$\Phi_K \in U_K = \{b_{K,1,1,Nh}, b_{K,1,2,Nh}, b_{K,2,1,Nh}, b_{K,2,2,Nh}; Nh=1, 2, \dots, NH\} \quad (12)$$

となる。但し、 $b_{K,i,j,Nh}$ は折線($a_{K,i}, a_{K+1,j}$)上の、K番目の路線設計区間終点の代替案の一つとなるような平面円曲線終点の三次元空間における位置を表すものである。

また、状態 Φ_K に行けるような状態変数 Φ_{K-1} 全体の集合を $V_K(\Phi_K)$ として定義する。ここで、図-2の中の一例を示すと、次のとおりである。即ち、

$$V_K(b_{K,1,1,NhK}) = \{b_{K-1,1,1,Nh}, b_{K-1,2,1,Nh}; Nh=1, 2, \dots, NH\} \quad (Nh K=1, 2, \dots, NH) \quad (13)$$

となる。ここで、第K段階における状態 $\Phi_K \in U_K$ から路線始点までの最適な路線設計に対応する総合コストを $f_K(\Phi_K)$ とすると、その $f_K(\Phi_K)$ と一時点前の段階における $f_{K-1}(\Phi_{K-1})$ の間には次の関係式(即ちDPの関数方程式)(14)が成り立つ。

$$f_K(\Phi_K) = \min_{\Phi_{K-1} \in V_K(\Phi_K)} \{G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K) + f_{K-1}(\Phi_{K-1})\} \quad (K=1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

但し、 $f_0(\Phi_0) = 0$ である。また $G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ は状態 Φ_{K-1} から状態 Φ_K への総合コストである。

(3) 制約条件の処理

本モデルでは、第K段階における状態 Φ_{K-1} から状

態 Φ_K への代替案が3.(2)に示した平面線設計に関する制約条件を満たさない場合、その段階における総合コストの増量 $G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ を無限大として取り扱うことにする。

(4) 第K段階における状態間の総合コストの計算

上述のDP関数方程式(14)における $G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ は次に示すように求めることができる。

まず、平面線設計に関する制約条件を満たしたような、ある $\Phi_{K-1} \sim \Phi_K$ 区間の平面設計線に対し、筆者らが提案したデジタル地形モデル⁸⁾を用い、当該平面設計線に対応する地形縦断線及び各横断面部の横地形勾配を求める。

次に、当該 Φ_{K-1}, Φ_K の2点に対応する縦設計標高をそれぞれ Z_{K-1}, Z_K とする場合、上述の地形情報をベースに、筆者らが提案した鉄道縦断線設計の最適化モデル⁹⁾を用い、当該 $\Phi_{K-1} \sim \Phi_K$ 区間の平面設計線に対応する最適な縦断設計線を決める。

さらに、当該 $\Phi_{K-1} \sim \Phi_K$ 区間の平面設計線、及びそれに対応する最適な縦断設計線に基づき、式(3)~(11)により、状態 $\Phi_{K-1} \sim$ 状態 Φ_K 区間の路線代替案の総合コスト $G_K(\Phi_{K-1}, \Phi_K)$ が得られることになる。

言及すべきことは、もしある $\Phi_{K-1} \sim \Phi_K$ 区間の始・終点の設計標高を結ぶ斜線の勾配が許された最大勾配よりも大きくなった場合、それに対応する縦断設計線はどうしても最大勾配の制約を満たさないため、当該区間における縦断線設計の最適化を行う必要がないということである。そして本モデルでは、このような $\Phi_{K-1} \sim \Phi_K$ 区間の路線代替案の総合コストも無限大として取り扱うことにする。

(5) 最適な鉄道路線設計案の求解

上述のDPの関数方程式(14)より、すべての $\Phi_K \in U_K$ に対し、各 $f_K(\Phi_K)$ の値を $K=1, 2, \dots, N$ の順に計算し、最終的に $f_N(\Phi_N)$ の値を求める。この $f_N(\Phi_N)$ は与えられた条件下での最適値である。それから、上の過程と逆に、 $K=N, \dots, 2, 1$ の順に、各段階における最適政策(即ち各段階における、上述の意味での円曲線終点の最適案)を求めることができる。そうすることにより、全体的な鉄道路線設計の最適案が得られることになる。しかし、ここで

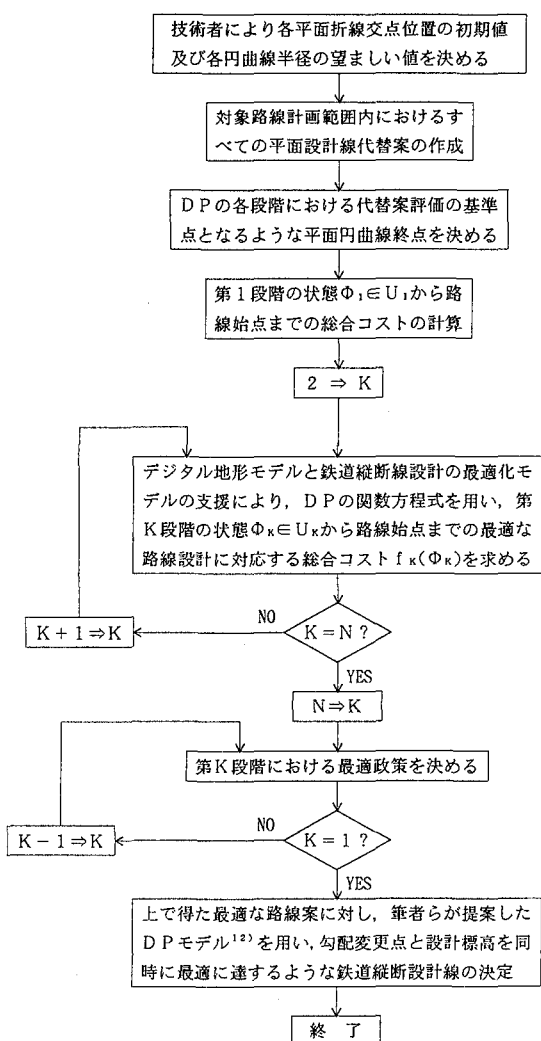


図-3 本三次元DPモデルのフロー

得た鉄道路線案は必ずしも最適な勾配変更点を得る保証がないため、本研究ではさらに、上で得た結果をベースとし、筆者らが提案したDPを用いた鉄道縦断線設計の最適化モデル¹²⁾を用い、勾配変更点と設計標高が同時に最適に達するような鉄道縦断設計線を決めることになる。

以上、本三次元DPモデルのフローを示したのが図-3である。

5. 本三次元DPモデルの検証

本研究で提案した三次元DPモデルを検証するために、ケース・スタディとして、中国において手

業で設計され、かつ設計の品質が非常に良いと考えられている、ある在来線の一部分を取り上げ、本モデルを適用した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、曲線は七つである。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 $A_{1,K}$ の中に含めている）。

- ①許された平面円曲線半径の最小値:400m
- ②平面緩和曲線長:100m
- ③許された平面緩和曲線間の円曲線長の最小値:20m
- ④許された平面緩和曲線間の直線長の最小値:60m
- ⑤許された縦断設計線の最大勾配:6%
- ⑥許された最大隣勾配代数差:6%
- ⑦許された隣勾配変更点間の最小勾配長:400m
- ⑧トンネル、橋梁、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」¹³⁾に従って決める。
- ⑨軌道、建築物、土地買収などに関するキロあたりの建設コスト:800万円/km
- ⑩土工コスト:切土100円/m³、盛土60円/m³
- ⑪デジタル地形モデルにおける格子のサイズ:50m×50m

- ⑫平面設計線における各折線交点位置の代替案数:

本モデルでは、各折線の交点位置の計画範囲を一定の間隔で分割し、次の図-4に示すような格子を作り、そして各格子交点の位置を平面設計線における当該折線の交点位置の代替案とする。今回は当該ケース路線を入れた地形図の幅が狭いため、各折線交点位置の計画範囲を100m×100mとした。そして、次の二つのパターン（図-4を参照）について検証を行った。

- ⑬各段階の代替案の評価基準点となるような平面円曲線終点における縦設計標高の変動範囲を4mとし、そしてその変動幅を0.5mとしたため、縦方向の格子点は9個となった。

- ⑭運営コストの計算期間:30年

- ⑮機関車の重量 ρ :135トン

- ⑯貨物列車の牽引定数 θ :4100トン

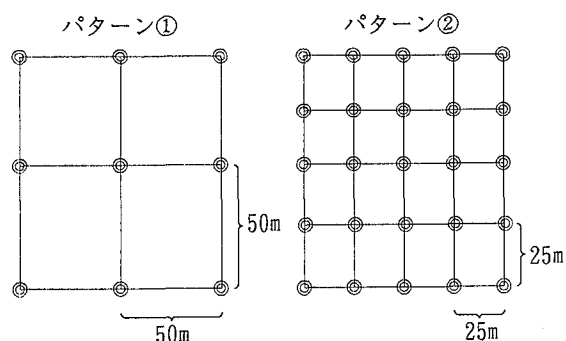


図-4 各平面折線の交点位置代替案格子の作成

表-1 各年度における NH_t 、 NK_t の設定

年 度	NH_t (本/日)	NK_t (本/日)
$t=1\sim5$	5	2
$t=6\sim7$	t	3
$t=8\sim9$		4
$t=10\sim30$	10	5

表-2 一本の貨物列車キロ当たりの走行費 μ_i

勾配 i (%)	一列車キロ当たりの走行費 μ_i (円*/列車・km)	勾配 i (%)	一列車キロ当たりの走行費 μ_i (円*/列車・km)
6	195.0	-1	51.2
5	171.4	-2	29.0
4	147.6	-2.36	21.0
3	125.0	-3	25.6
2	104.6	-4	29.8
1	86.4	-5	33.8
0	72.4	-6	38.0

*100円 $\approx$ 5元(1993年度)

⑰トンキロ当たりの力学的運動エネルギーに関する保守費 a :5.92(円/トン・km)

⑱貨物列車に対する旅客列車の走行費換算係数 η :0.5

⑲各年度における貨物・旅客列車の片道列車本数 NH_t 、 NK_t を表-1のように設定した。

表-3 ケースの計算結果

目的関数	設計手段別	手作業	本モデル	コスト節約(%)
	パターン別			
建設コスト	パターン①	6894.4	6464.6	6.23
	パターン②		6445.6	6.51
総合コスト	パターン①	11089.4	10646.2	4.00
	パターン②		10488.4	5.42

注:総合コスト=建設コスト+運営コスト

*100円 $\approx$ 5元(1993年度)

⑳当該ケース路線に対応する勾配 i の縦断設計線の一本の貨物列車キロ当たりの走行費 μ_i は表-2のようになる¹⁴⁾。

以上の計算条件をベースにし、本研究で提案している三次元DPモデルに相応する鉄道路線設計の最適化FORTRANプログラムを組み、HP9000/S730ワークステーションを用いて、対象ケース路線について本モデルの検証を行った。また、今回は特に、建設コスト、及び建設コストと運営コストを含む総合コストの2種類の目的関数について、それぞれその検証を行った。さらに、手作業による路線設計の結果と比較するために、最終のコストの計算は全く同じ精度及び同じ条件で行った。その計算結果は表-3に示すとおりである。

以上の計算の結果から次の点が考察される。

まず第一に、表-3の計算結果を見て分かるように、本三次元DPモデルを用いて鉄道路線設計の最適化を行うと、目的関数を建設コストにしても、総合コストにしても、手作業による高品質な鉄道路線設計案よりもコストが節約できることが明らかとなった。

第二には、パターン①よりパターン②のほうが良い結果につながるのが明らかとなったが、これは同じ計画範囲において、路線設計代替案の数が多ければ多いほど最適解の精度が高くなるという理論の裏付けになると思われる。

6. まとめ

本研究では、D Pを適用した鉄道路線設計最適化の三次元モデルを構築した。本モデルの特徴をまとめると、次のようになる。

1) 本モデルではD Pを用いることにより、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モデルは偏導関数を基礎とする最適化手法に基づく最適化モデルより実用化されやすいという長所を有している。

2) 本モデルを用い、鉄道路線設計の最適化を行うと、建設コストと運営コストを含む総合コスト、及び設計コストが節約できるし、設計の時間も大幅に短縮できることが分かった。

3) 本モデルでは、筆者らが提案した、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り、各段階における鉄道路線設計代替案の評価を正確かつ効率的に行うことができた。

4) 本モデルにより、理論的に大域的最適な鉄道路線設計案を得ることが可能となった。

5) 本モデルでは、設計技術者が提案した実務における各平面折線交点位置の初期値及びそれに対する各円曲線半径の望ましい値をベースとすることにより、状態変数ベクトルの次元を大いに節減できるし、実務における最適な鉄道路線設計案を効率的に決めることが可能となった。

参考文献

- 1) Amkeutz, Emde, Hamester : "EPOP-I(Entwurfsfindung und Optimierung im Strassenbau Benutzerhandbuch)" Beratende Ingenieure Heusch/Boesefeldt, Aachen, 1980
- 2) 呂益恕, 許玉德, 叶霞飛: 鉄路線路自動化優化設計的一種新方法, 上海鉄道学院学報, Vol. 9, No. 1, pp. 17~25, 1988
- 3) 鄧域才, 易思蓉: 鉄路新線平面縦断面同時優化設計方法, 西南交通大学学報, No. 2, pp. 1~7, 1988
- 4) Chew, E.P., Goh, C.J. and Fwa, T.F. : Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignment for highways, Transpn. Res., Vol. 23B, No. 5, pp. 315~329, 1989
- 5) 常新生, 詹振炎: 鉄路線路平縦面整体優化設計的研究, 長沙鉄道学院学報, Vol. 8, No. 3, pp. 11~16, 1990
- 6) OECD Road Research Group : Optimization of road alignment by the use of computers, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 1973
- 7) 李方: 山区道路平面線形的優化設計, 同済大学学报, Vol. 14, No. 1, pp. 27~39, 1986
- 8) 叶霞飛, 青島縮次郎, 宿良: 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, 土木情報システム論文集, Vol. 3, pp. 79~86, 1994
- 9) 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
- 10) 岩本誠一: 動的計画論, 九州大学出版会, 1987
- 11) 郝瀛: 鉄路選線設計, 中国鉄道出版社, 1988
- 12) 叶霞飛, 青島縮次郎, 宿良: D Pを用いた鉄道縦断線設計の最適化モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 12, pp. 665~672, 1995
- 13) 中華人民共和國鉄道部: 国家標準--鉄道路線設計規範, 中国鉄道出版社, 1987
- 14) 郝瀛: 鉄路選線設計, 中国鉄道出版社, 1980

D Pを用いた鉄道路線設計の三次元最適化モデル

叶霞飛・青島縮次郎

本論文では鉄道路線設計最適化の三次元D Pモデルを提案する。まず、鉄道路線設計の最適化問題を三次元空間における路線の最適決定問題として取り扱った。そして、実用的な観点から、目的関数の定式化と制約条件の処理などを容易なものにするために、D Pという手法を導入した。それに基づいて構築した本モデルは偏導関数を基礎とする最適化手法に基づくモデルより実用化されやすく、かつ理論的に大域的最適な鉄道路線設計案を得ることが可能となった。さらに、中国でのデータを用い、実際の鉄道路線設計問題に本モデルを適用した検証結果より、本モデルの有効性と効率性を確認した。

A Three-dimensional Optimization Model for Railway Alignment Design Based on DP

Xiafei YE, Naojiro AOSHIMA

This paper aims to develop a three-dimensional optimization model for railway alignment design based on Dynamic Programming. In the model, the optimization of railway alignment design is regarded as an optimization of 3-dimensional curves, and the formulation of optimization and the treatment of constraints are simplified by using DP. This model is more practically oriented than models based on optimization method of partial derivatives. In theory, the proposed model can give a global optimization solution. The proposed model is verified by data from P.R.China.
