

デジタル地形データと遺伝的アルゴリズムによる最適縦断設計の基礎的研究

Optimal Vertical Alignment Design by Digital Terrain and Genetic Algorithms

山崎元也¹ 本郷延悦² 今村博³ 比屋根一雄⁴ 飯尾淳⁵ 谷田部智之⁶ 加賀屋誠一⁷

By Motoya YAMASAKI¹, Teietyu HONGO², Hiroshi IMAMURA³, Kazuo HIYANE⁴, Jun IIO⁵, Tomoyuki YATABE⁶, and Seiichi KAGAYA⁷

1. はじめに

建設CALSとは、業務プロセス間や企業間で交換される情報を統一されたルールに基づいてデジタルデータとし、そのデジタルデータをコンピュータネットワーク上で共有することにより、事業執行を効率的に運用し、諸経費の節減を図ることで、コストの低減を実現する活動である。

日本道路公団（以下、JHと記す）では、建設CALSの導入に向け、①CAD(Computer Aided Design：コンピュータを利用した設計支援)による図面の電子化、②デジタル地形データ（地形情報をCADで利用しやすい3次元データで表現したもの）の開発を進めている。デジタル地形データの活用により、地形の面積計算や土量計算などの数値計算、横断図や縦断図の作成を迅速かつ正確に行うことができる。

道路設計では、概略工事費と土工量バランスだけを「コストの低減」として考慮するだけではなく、道路構造令や設計要領などの規定を満足しながら、トレードオフの関係にある経済性、安全性、快適性、環境負荷の低減、渋滞解消などの多くの評価項目について検討することが必要とされる。それには、多くの時間と労力を要するため、限られた代替案を道路設計者の経験に基づいて、評価および選定しているのが現状である。現在主として建設中の急峻な山岳地帯を通過する高速道路の線形設計（以下、線形設計と記す）においては、制約条件が厳し

*キーワード：計画基礎論、計画手法論、計画情報、情報処理

¹正会員、工修、日本道路公団 試験研究所（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1, TEL 042-791-1621(代), FAX 042-791-3717）

²正会員、日本道路公団 試験研究所

³財団法人 高速道路技術センター情報システム部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1, TEL 042-792-1842, FAX 042-794-0964）

⁴工修、株式会社三菱総合研究所 情報通信研究部
(〒100-8141 東京都千代田区大手町2-3-6, TEL 03-3277-0750, FAX 03-3277-3479)

⁵工修、株式会社三菱総合研究所 情報通信研究部

⁶工博、株式会社三菱総合研究所 情報通信研究部

⁷正会員、工博、北海道大学大学院工学研究科教授

(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目, TEL 011-706-6210, FAX 011-706-6211)

くなり、道路線形のわずかな変化が土工量に大きな影響を与えるため、経験豊富な道路設計者であっても、評価選定に多くの時間を要している。

そこで筆者らは、デジタル地形データと線形の設計条件から仮想道路モデルをつくり、線形設計のシミュレーション（模擬実験）を自動的に行うシステムについて研究を進めている。本研究では、検討する代替案の数を飛躍的に向上させ、さらに道路設計者が重視する評価項目をバランスの良く満足する代替案を短時間で推定することにより、道路設計者を支援するシステムを構築することを目標とした。

道路線形には平面線形と縦断線形があるが、本論文では、道路設計を支援するシステムの基礎的研究として、比較的評価しやすい「縦断線形」を対象とし、平面線形は変更しないものとした。これは、JHの道路概略設計レベルにおける線形設計では、平面線形は既に都市計画として決定されていること、現在、主として建設中の高速道路は山岳道路であるため、縦断線形を修正することにより道路概略設計が行なわれていることを考慮したものである。ただし、従来の設計手法に比べ高速に縦断線形の設計ができるところから、本システムで得られた縦断線形をもとに、既存の平面線形をCADで微修正することで効率的かつ優れた線形設計が可能となる。

また、縦断線形を評価する項目は複数あるが、これらのうち、JH設計業務で重要視される項目は、経済性を評価するための概略工費と土工量バランスである。本研究では、経済性のみならず、安全性も考慮した道路線形モデルを構築した。このモデルに基づき、縦断線形設計を組み合わせ問題の最適化として扱い、最適化問題を解く手法の1つである「遺伝的アルゴリズム」を適用し、線形設計のシミュレーションを行った結果、従来の道路設計者の経験と勘による方法で得た縦断線形とほぼ同等の縦断線形を得ることができた。このことから、経済性、安全性を縦断線形の評価項目とする縦断線形モデルの有効性が確認された。

本システムの全体構成を図-1に示す。図に示すように最適化手法で得られた縦断線形をもとに、既存の平面線形をCADで微修正することで効率的かつ優れた道路線形を設計することが可能である。

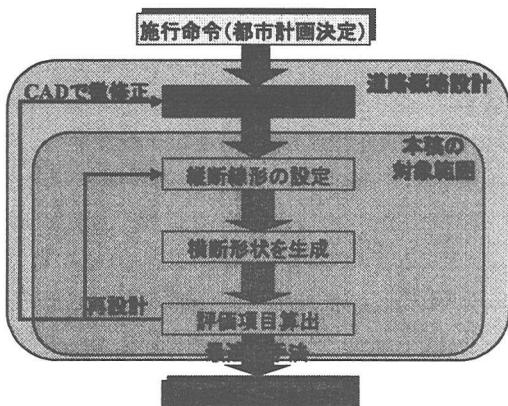


図-1 JH の設計フローと本システムの位置付け

2. 縦断線形の設計

道路線形とは、道路中心線が3次元空間に描く線の形状である。このうち、平面的にみた道路中心線の形状を平面線形といい、縦断的にみた道路中心線の形状を縦断線形という。

縦断線形を構成する要素を縦断線形要素といい、縦断勾配が一定となる直線と縦断勾配が変化する二次曲線の2種類がある。

縦断設計は、縦断線形要素の組み合わせの中から、制約条件を満足するものを選び出し、最も望ましいものを決定する作業である。

縦断線形設計は、次のようにして行われる。

- 地形図から平面線形に沿った、地盤高さ（現状の地形の標高）を一定間隔の距離で読み取る。
- 道路の延長方向に一定間隔の距離をとり、縦軸に読み取った標高を記入し、縦断図を作成する。
- 縦断図に国道や県道、河川など縦断線形をコントロールする点（コントロールポイント）を記入する。
- 直線や円弧を用いて、コントロールポイントを考慮しつつ、道路構造令や設計要領の規定を満足する縦断線形を想定し作図する。
- 想定した縦断線形により決まる、トンネルや橋梁、切土盛土および土工量バランス（切土盛土の構築で発生する土の移動のバランス）などについて、経済性や施工性の面から問題がないか検討する。
- 問題があれば、再度、縦断線形の設定をやり直す。

3. 縦断設計の最適設計

(1) 縦断線形の最適設計

縦断線形の「最適設計」とは、複数の道路縦断線形代

替案の中から与えられた制約条件（コントロールポイントや設計規格など）を満足し、縦断線形の評価（経済性、安全性、快適性、環境負荷の低減、渋滞解消など）が高い代替案を選定することである。設計者により重視する条件が異なるため、縦断線形は複数考えられる。そこで本論文では、最適縦断線形とは、ある制約条件が与えられ、この制約条件のなかで、複数の評価項目をパラメータとする評価が最も高くなる縦断線形と定義する。

縦断線形は、縦断勾配が一定となる直線と縦断勾配が変化する二次曲線の2種類から構成されているが、それぞれ区間長と勾配にさまざまな組み合わせが存在し、膨大な数となる。このため縦断線形の最適化は、「膨大な数の組み合わせの中から、最適なものを見出す」、組み合わせの最適化問題と考えることができる。

(2) 縦断線形のモデル化

多数の縦断線形をコンピュータによりシミュレーションし、それぞれの縦断線形を評価して、最適線形を探索するために、縦断線形を以下のようにモデル化する。

- 最大N個の直線と2次放物線により構成される。
- 直線と2次放物線が交互に現れる。
- 各区間の縦断曲線長を L_1, \dots, L_{2N} とする。
- 直線から放物線に変わる点の座標を (x_{2m}, z_{2m}) とし、その点における傾きを d_{2m} とする。同様に、放物線から直線に変わる点の座標を (x_{2m+1}, z_{2m+1}) 、傾きを d_{2m+1} とする。
- 各点では連続であるから、 $d_{2m+1} = d_{2m+2}$ が成り立つ。

放物線区間

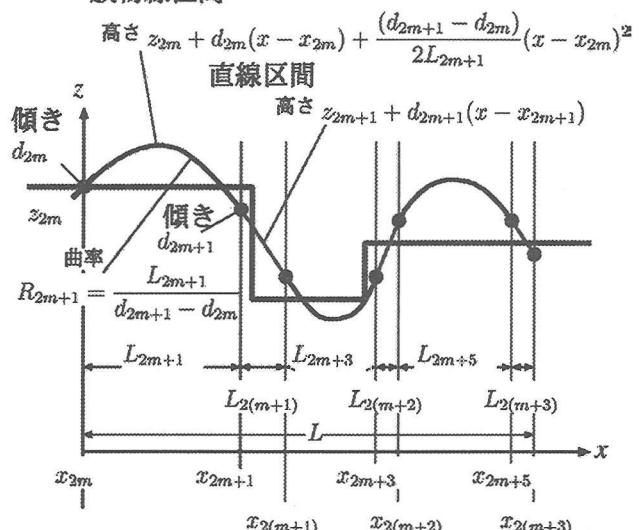


図-2 直線と二次曲線による縦断線形モデル

このようにモデル化された縦断線形を式で表すと、放物線区間、直線区間は以下のように表せる。

放物線区間 $[x_{2m}, x_{2m+1}]$ における高さ z は次式で与えられる。

$$z = z_{2m} + d_{2m}(x - x_{2m}) + \frac{d_{2m+1} - d_{2m}}{2L_{2m+1}}(x - x_{2m})^2 \quad (1)$$

このとき放物線の曲率 R_{2m+1} は、次式で近似できる。

$$R_{2m+1} = \frac{L_{2m+1}}{d_{2m+1} - d_{2m}}$$

また、直線区間 $[x_{2m+1}, x_{2m+2}]$ における高さ z は次式で与えられる。

$$z = z_{2m+1} + d_{2m+1}(x - x_{2m+1}) \quad (2)$$

このように、縦断線形は式(1)、(2)の2つの式で表すことができる。初期点では、既に設計されている隣接する線形に連続するように初期パラメータがあらかじめ与えられる。そのため、縦断線形は、以下の2種類のパラメータおよび初期パラメータで決定される。

1. 区間長 $L_i : L_1, \dots, L_{2N-1}$ ($2N-1$ 個)
2. 縦断勾配 $d_i : d_1, d_3, \dots, d_{2N+1}$ (N 個)
3. 初期パラメータ：初期点 (x_0, z_0) 、初期勾配 d_0

(3) 縦断線形の評価項目

本論文では、縦断線形を評価する際には、経済性を表現する評価項目として、概略工費、土工量バランスを考え、安全性として縦断曲線半径を用いて評価することを考える。

a) 概略工費

工費（連絡等施設費、諸経費含む）は、橋梁、トンネル、切土盛土の構築に要する金額である。この金額は通常、積み上げで算出する。コンピュータで計算すると膨大な時間を要することになる。そこで、従来の設計から得られる単位長さ当たりの平均的な工費を用いて、以下のように概略工費を算出する。

1. 構造物（橋梁、トンネル）の単位長さ当たりの工費を求める。
2. 縦断線形と地盤線との交点間を構造物延長とし、この構造物延長に各構造物の単位長さ当たりの工費を乗じる。
3. これらの合計を概略工費とする。

ただし、土構造物（切土、盛土）か、土以外の構造物（橋、高架橋、トンネル）になるかの判断規準として、工事施工および維持管理を考慮して以下のように定めた。

- 切土かトンネルかの判断基準

切土高さ（縦断線形の路面高さと現況地盤の差が負）が50m以上ならトンネルとし、中間点で縦断勾配が変化するクレストにする。

- 盛土か橋梁かの判断基準

盛土高さ（縦断線形の路面高さと現況地盤の差が正）が30m以上なら橋梁とする。なお、河川と交差する場合は必ず橋梁とする。

b) 土工量バランス

縦断線形により、切土量（地山を掘削して人工のり面を構築する際に発生する土の量）と、盛土量（谷などを埋めて道路本体を構築するのに必要な土量）は変化する。設定した縦断線形が地形に適合しない場合、捨土（余剰となった土砂を捨てる）や購入土（盛土が不足し、土砂を購入する）が発生し、工費が高額となる。このため、縦断線形設計では、切土量と盛土量のバランス（土工量バランス）をとることが重要となる。

実際の道路工事では、切土量と盛土量は、個々に算出されるが、切土した土量は、道路本体を構築するためにすべて盛土に利用するという基本的な考えがある。これを道路掘削（道路を構築するための掘削の意）といい、その土量を道路掘削土量と呼ぶ。本論文では、この道路掘削土量と捨土量あるいは客土量を小さくすることを目標にする。

c) 安全性

安全性については、直線に近いものほど評価が高くなるものとして、ここでは、縦断線形を構成する2次放物線のうち、最も曲線半径の小さいものの逆数を用いた簡易的な評価式として採用した。また、他の評価項目は金額をベースとした値であることに合わせるために、試行した上で適当な定数（ここでは、安全性評価定数と記す）を与えるものとする。

(4) 縦断線形の評価方法

前述の3つの評価項目を用いて、縦断線形を評価するために次のように定式化を行う。なお、概略工費に関わる各係数は、これまでの実績を考慮した表-1のような値を採用した。トンネル工費単価および橋梁工費単価については、高速道路調査会が実施している工事金額の全国的かつ年度別の調査を元に算出した。道路掘削単価については、既往設計結果から算出し、客土および捨土単価については、JHの工事実施計画積算単価表の値を採用した。さらに、安全性の評価には、最小縦断曲線半径以上となるようにしながら、かつ曲線半径が小さい場合には評価が悪くなるように、他の評価項目を参照しながら、安全性評価定数を決定した。なお、これらの値については、固定したものではなく、実際の値に応じて自由に変化させることができる。

- 構造物に関する評価関数 K_1

$$K_1 = \text{トンネル延長} * \text{トンネル工費単価} \\ + \text{橋梁延長} * \text{橋梁工費単価}$$

- 土工量バランスの評価関数 K_2

$$K_2 = \text{道路掘削土量} * \text{土工費単価} \\ + \text{重み} * \text{捨土土量} * \text{捨土単価} \\ + \text{重み} * \text{客土土量} * \text{客土単価}$$

- 安全性に関する評価関数 K_3

$$K_3 = \frac{\text{安全性評価定数}}{\text{縦断曲線半径の最小値} - \text{最小縦断曲線半径}[m]}$$

ただし、縦断曲線半径の最小値は、1つの縦断線形中にある複数の縦断曲線うち、最小となる縦断曲線半径を表す。

以上を合わせて、縦断線形全体の評価関数 K は、以下の式のように表せる。

$$K = w_1 K_1 + w_2 K_2 + w_3 K_3$$

ただし、設計する際に重視する項目がある場合には、それぞれの評価項目について重み w_1, w_2, w_3 を設定することが可能である。例えば、土工量バランスを重視する場合には、 K_2 における重み w_2 を1より大きくすることで対応する。ただし、設定した重みによっては適切な結果が得られないこともあるため、シミュレーションを繰り返す必要がある。

本論文では、この評価関数 K を最小にする縦断線形が最適な線形であるとする。つまり、最適縦断線形を設計することは、この評価関数 K の最小値を求める問題とすることができる。なお、土工量の算出には、これまでに筆者らが提案しているセル平均法および高速化のための土工量関数テーブルという手法を用いた（付録参照）。

表-1 縦断線形の評価用パラメータ

トンネル工費単価	60 (億円/km)
橋梁工費単価	60 (億円/km)
道路掘削単価	1,530 (円/m ³)
捨土単価	1,250 (円/m ³)
客土単価	1,060 (円/m ³)
安全性評価定数	2.0*10 ¹² (円・m)
最小縦断曲線半径	3000 (m)

将来、快適性（サービス指數）や環境負荷、渋滞解消といった評価を取り入れる場合には、金額に換算したものに重みを付け加えることになる。

4. 遺伝的アルゴリズム(GA)による縦断線形最適設計

(1) 評価関数の最適解探索の困難さ

ある評価関数を最適化するための手法として、これまで数多くの最適化手法が考案されてきている。本論文で扱う縦断線形最適化問題は以下の理由から、線形計画法やニューラルネットワークなどの手法では困難であった。

- 縦断線形の評価関数は非線形問題である。このためすべての最適化手法の中で最も利用され、かつ計算が高速な線形計画法が使えない。
- 切土盛土量の算出時に一定以上の高さになるとトンネルや橋梁になるため、評価関数は滑らかではなく不連続点が存在する。また、評価関数は複雑であるため局所的な最適解が多数存在する。このため近傍を探索し、より良い評価値に少しずつ近づいてゆくような、降下型の最適化手法では最

適解に到達できない。共役勾配法、非線形計画法、シンプレックス法などがこれに属する。

- 局所最適解を多数含む非線形問題に対し有効な手法として、ニューラルネットワーク (NN) やシミュレーテッド・アニーリング(SA)等がある。ニューラルネットワークを適用するには非線形問題を解析し、非線形方程式の形に変換する必要がある。このモデル化が縦断線形最適化問題では困難である。シミュレーテッド・アニーリングは最適解の探索能力で言えば非常に強力ではあるが、膨大な計算時間を要することと、やはりモデル化が難しいという問題がある。

縦断線形の最適設計は、前述したように、組み合わせ最適化問題に置き換えることができる。組み合わせ最適化問題は、一般に問題のサイズが大きくなると計算時間が指数関数的に増大する。このため特定の問題に関する解法は数多く開発されたが、汎用的な実用解法が存在しなかった。このため厳密な最適解が得られる保証はないが、良い近似解を高速に算出できる「遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms; 以下GAと記す)」^{1) ~ 8)}を採用した。

(2) 遺伝的アルゴリズムによる縦断線形最適設計の流れ

既に述べたように、GA では評価の対象となるものを遺伝子で表す必要がある。そこで、従来の縦断線形設計と遺伝的アルゴリズムによる最適縦断設計の対応を表-2 に示す。

設計で利用するパラメータはすべて遺伝子で表されるが、それぞれのパラメータには制約条件があり、それらを満たしつつ前述の評価関数に基づき各個体を評価して、最適解を探索する。

表-2 縦断線形設計と遺伝的アルゴリズムとの対応

縦断線形設計	遺伝的アルゴリズム
縦断線形要素(勾配、縦断曲線半径)	遺伝子
縦断線形	染色体
比較縦断線形の評価	各個体の適応度計算
比較縦断線形の絞り込み	適応度に基づく淘汰
比較縦断線形の再検討	交叉、突然変異
最適線形の決定	終了判定

(3) 遺伝子と染色体の決定(コーディング)

最適解を得るためにGAを利用するためには、縦断線形を構成する縦断勾配と縦断曲線長を遺伝子の形にする必要がある。複雑な遺伝子を用いても評価に影響を与えない場合があり、その場合には局所解に陥りやすい。そのため、計算効率を上げるためにも遺伝子は、できるだけ少ない数字で表現されるほうが良い。そこで、GAでよく用いられる、遺伝子を数ビット(bit)で表すことにする。まず、縦断勾配と縦断曲線長を以下の手順により、量子

化を行い、0と1からなるバイナリコード型の遺伝子で表すこととする。

法令あるいは設計時の制約から、曲線の区間長は300m以上になるものとして、また、縦断勾配は±4.0%以内になるようにした。

- 縦断延長方向には100m単位で変化するように分割（サンプリング）し、表-3に示すような対応表により、バイナリコード型の遺伝子に変換する（コーディング）。
- 縦断勾配についても、表-4のように0.1%単位で変化するものとして、遺伝子に変換する。

このように量子化されたパラメータを用いた場合には、各区間は、最大 6000m とした場合に、 $6000 / 100 = 60$ となり、 $2^6 = 64$ であるから 6 bit で表現できる。

また、縦断勾配は、-4.0% ~ 4.0% までを 0.1% 間隔で変更できるとすると、 $4.0 / 0.1 * 2 = 80$ となり、 $2^7 = 128$ であるから 7 bit で表現できる。

表-3 区間距離のコード化

区間距離	量子化	コード化
0	0	000000
100	1	000001
200	2	000010
:	:	:
3000	30	011110
:	:	:
6000	60	111100

表-4 勾配のコード化

勾配	量子化	コード化
-4.0	0	0000000
-3.9	1	0000001
:	:	:
-0.1	39	0100111
0.0	40	0101000
0.1	41	0101001
:	:	:
4.0	80	1010000

以上のことから、GAで必要な遺伝子のbit数は、以下のように求めることができる。

$$6 * (2N-1) + 7 * N = 19N - 6 \text{ (bit)}$$

例えば、図-2において、 $m=0$ 、 $N=3$ とした場合には、必要な遺伝子のbit数は、 $19 * 3 - 6 = 51$ bit となる。例えば、表-5のような合計51bitのコードにより個体1つが表現できる。

表-5 $N=3$ における個体の例

	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	d ₁	d ₃	d ₅
実際の値	300	600	1200	3000	900	4.0	-4.0	4.0
遺伝子列	000011	000110	001100	011110	001001	1010000	0000000	1010000
ビット数	6	6	6	6	6	7	7	7

このように、直線および2次放物線をそれぞれ量子化して遺伝子に割り当てる場合、全長が決まっているため、全ての遺伝子を使わない場合が考えられる。つまり、本来は可変長遺伝子であり、後半部分に不要な遺伝子が生じる場合があるが、遺伝子から縦断線形に変換した上で、対象とする範囲のみを評価しているため、不要な遺伝子が存在しても実際の評価には用いられないため、収束までの時間が遅くなるだけであり、性能的な問題は生じない。一方で、対象区間の全長よりも短い縦断線形の場合には、直線または2次放物線を延長した上で評価しているため、コーディングに関する問題は生じないと考えられる。

また、安全性を制約として実現すると、先にあげた設計基準や設計時の条件を満たさない致死遺伝子が生じる可能性があり、収束しない場合も考えられることから、安全性に関しては、他の評価項目と同様に金額ベースに換算することで評価できるようにした。ただし、安全性評価定数といった重みを単純に決めることはできず、試行錯誤が必要となる。多目的GAにより実現することも考えられるが、複雑になり得られた解を解釈することが難しいことから本論文では採用しなかった。

(4) 遺伝オペレータ

a) 淘汰における戦略

淘汰とは、「適応度の低い個体を減らし、適応度の高い個体を増やす」処理である。これを実現する方法（戦略と呼ばれている）としてさまざまな手法が提案されているが、本論文では、単純な確率分布に基づく選択方式である「ルーレット方式」を採用する。ルーレット方式は、以下の手順により各縦断線形の適応度に比例した割合で淘汰する方法である。

- ある世代における各個体である縦断線形の適応度を評価関数により算出し、それらの総計に対する割合を算出する。
- 適応度 f_i である個体 i が次の世代に残る確率 p_i は、次式で表される。

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j}$$

- 0から1までの一様乱数を個体数と同じだけ発生させる（ルーレットの針を回すこと相当）。
- 乱数の値により、残す個体を決定する。ルーレット方式では、適応度に比例して確率分布が決まるため、次の世代に生き残る可能性が高くなる。

表-6 一様交叉の例 ($N=3$ の場合)

縦断線形(親1)	000011	000110	001100	011110	001001	1010000	0000000	1010000
縦断線形(親2)	011100	001110	100011	000111	001111	1001100	0011110	1000011
マスク	1	0	0	1	1	0	1	1
縦断線形(子a)	000011	001110	100011	011110	001001	1001100	0000000	1010000
縦断線形(子b)	011100	000110	001100	000111	001111	1010000	0011110	1000011

b) 一樣交叉

2つの親の染色体を組み替えて子の染色体を作る操作である交叉には、いくつか種類があるが、本論文では「一様交叉」を採用している。一様交叉は複数個所でどちらの親の遺伝子を子に受け継ぐか決定する方法であり、以下のようないくつか手順で新たに子となる個体を生成する。

1. 0と1からなる「マスク」と呼ばれるビット列を確率に基づきランダムに生成する。
 2. 親である2つの個体、親1、親2から作り出される染色体を子a、bとする、「マスクの規則」に従って、親1、親2の遺伝子を子にコピーする。

表- 5 で示した個体を親の一つとした場合の一様交叉の例を表- 6 に示す。

c) 突然變異

単純に交叉のみを繰り返して、最適解を探索した場合には、初期状態で生成された各個体の組み合わせしか探索しないことになり、局所解に陥る可能性があるため、一定の確率で遺伝子を強制的に変化させる。ただし、変異確率が大きい場合にはランダムに探索することになり、探索範囲は広がるが、前の世代の特徴を失う、収束が遅くなるなどの弊害もあるため、一般には数%程度としておけば十分である。

d) 終了判定

GAの終了判定には以下のような条件を用いている。

1. 指定した世代まで生成された場合
 2. 適合度が変化しなくなった場合

この場合もあくまで確率的に収束しただけであり、最適な解であるとは限らない。

(5) 評価関数

既に述べたように、本論文では構造物に関する概算工費 K_1 、土工量バランスに関する概算工費 K_2 および安全性を金額に変換したもの K_3 に基づいて、縦断線形を評価している。そのための各工費に関する単価にあたる係数は、これまでの設計における実績のある値として、表-1を用いた。

5. 縦断線形の最適設計シミュレーション

(1) シミュレーションで使用したデジタル地形データ

本論文で提案した手法の有効性を検証するため、実際に

縦断線形設計で使用されたデジタル地形データでシミュレーションを行った。なお、シミュレーションの対象としては道路概略設計(1/1,000)の中からある約4.3kmの区間を用いた(表-7参照)。

表-7 シミュレーションの対象とする区間にに関するパラメータ

全区間長	4320m
測点数	216
初期点の計画高 z_0	15.0m
初期点における傾き d_0	4.00%

(2) シミュレーション

シミュレーションで得られる縦断線形との比較のため、あらかじめ、シミュレーション対象としたデジタル地形データを利用し、終点が固定されていない場合と固定されている場合を想定し、道路設計CADを用いて手作業により縦断線形設計を行い、縦断線形の評価関数である $K (=K_1 + K_2 + K_3)$ を算出した。ただし、安全性を金額に変換するための安全性評価定数を、 2.0×10^{12} としたが、多くの評価項目において、手作業による設計とシミュレーションの結果に基づいて、さまざまなパラメータについて試行した結果、得られたものである。

次に、同じデジタル地形データを用いて、表-8のようなパラメータをGAに与え、前述の縦断線形モデルに従い、最適縦断縦断線形を求めた。ただし、これらのパラメータはシミュレーションを試行して、よい結果が得られたものを採用している。

表-8 GA に関するパラメータ

個体数	500~2000
世代	100~300
交叉確率	90%
突然変異確率	5%

(3) シミュレーション結果

GAでは、最適に近いと考えられる解が得られるが、必ずしも同一の解になるわけではないので、そのうち評価の高いものを選択した。なお、最適線形算出には、個体数1000、世代数200とした場合に、収束までに約600秒を要した(Pentium III 800MHz/メモリ 256MB)。つまり、各世代の1個

体、縦断線形1つの設計につき約3ミリ秒かかることになる。シミュレーションされた縦断線形がGAにより収束する様子を図-3に示す。なお、100世代までに収束したため、図には100世代のものを示した。

この時、GAで得られた最適解は、表-9のようになった。終点が固定されていない、つまり終点を自由にしたと想定して手作業で設計した場合には、捨土が約122万m³発生する縦断線形であったが、GAで算出した縦断線形では、捨土が約2万m³発生し、構造物比率を変えることなく、捨土を減少させることができる縦断線形が得られたことになる。また、これまで扱ってきた線形では終端となる点に関しては、特に制約条件はなかったが、縦断を設計する際に、すでに両端の位置と高さが決まっていることもありうる。そこで、終端の位置を固定した場合についてGAによる縦断線形の設計を行った(図-4参照)。これにより、終点を固定せずに手作業により設計した縦断線形と比較すると、構造物の延長が大きく異なることから単純に比較することは難しいが、縦断線形全体の評価値について手作業により設計した線形に比較しても同等の結果が得られている。

表-9 GAによる最適線形と手作業による設計との比較

	GAによる最適縦断線形 (終点自由)	GAによる最適縦断線形 (終点固定)	手作業による縦断設計
トンネル延長(m)	0	0	0
橋梁延長(m)	760	700	761
構造物総延長	760	700	761
構造物に関する評価関数K ₁	45.6	42.0	45.7
盛土量(m ³)	1,341,016	1,070,803	672,014
切土量(m ³)	1,365,696	1,577,056	1,894,645
掘削土工量(m ³)	1,341,016	1,070,803	672,014
捨土量(m ³)	24,680	506,253	1,222,631
客土量(m ³)	0	0	0
掘削土工量(億円)	20.52	16.38	10.28
捨土費(億円)	0.31	6.33	15.28
客土費(億円)	0.00	0.00	0.00
土工量に関する評価関数K ₂	20.8	22.7	25.6
縦断曲線半径の最小値(m)	12,807	23,692	8,300
安全性に関する評価関数K ₃	2.04	0.97	3.77
縦断線形評価関数 K ₁ +K ₂ +K ₃	68.5	65.7	75.0

(4) 考察

終点を固定しない場合、つまり終点の高さを自由に設定できる場合には、捨土が少なくなるように調整することが可能であるが、終端を固定した場合には線形に制約が増えるため、捨土量を極端に減らすことができない。しかしながら、いずれの場合も手作業により設計された縦断線形と比較して捨土量が減る結果が得られている。

本手法では、安全性を表すパラメータとして縦断曲線半径に着目し、最小縦断曲線半径3,000mを制約条件として上

で線形を設計した。将来的には、縦断曲線半径や最急勾配などのパラメータから環境負荷などの複数の評価をバランス良く向上させる手法への改善が望まれる。

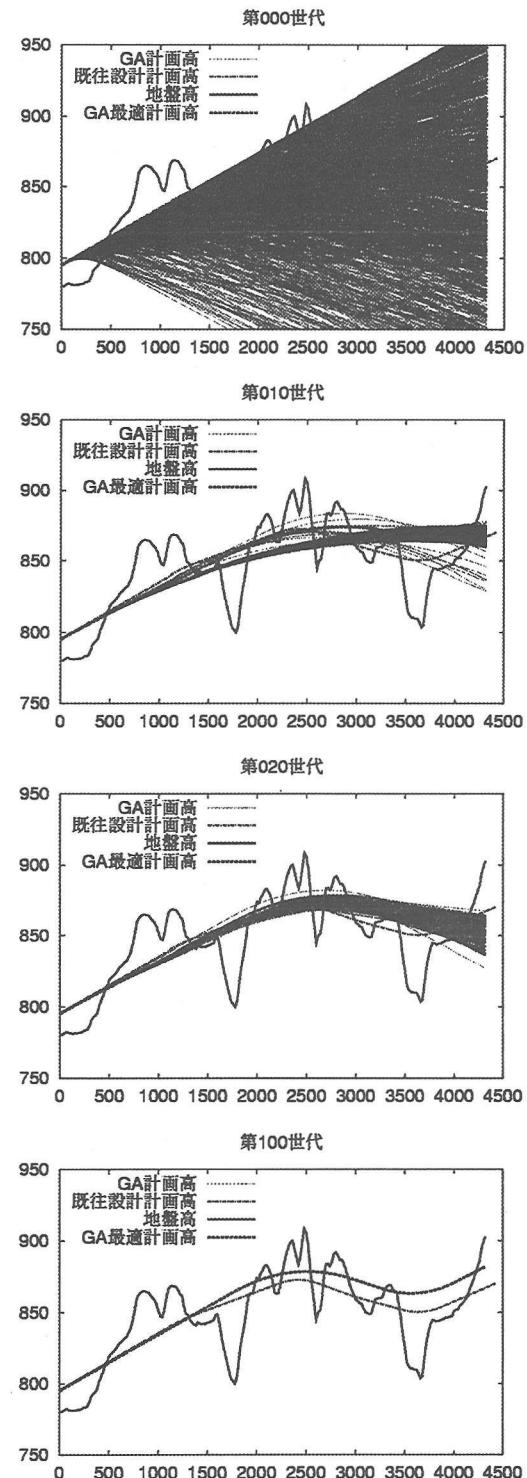


図-3 縦断線形がGAにより収束する様子(終点自由)

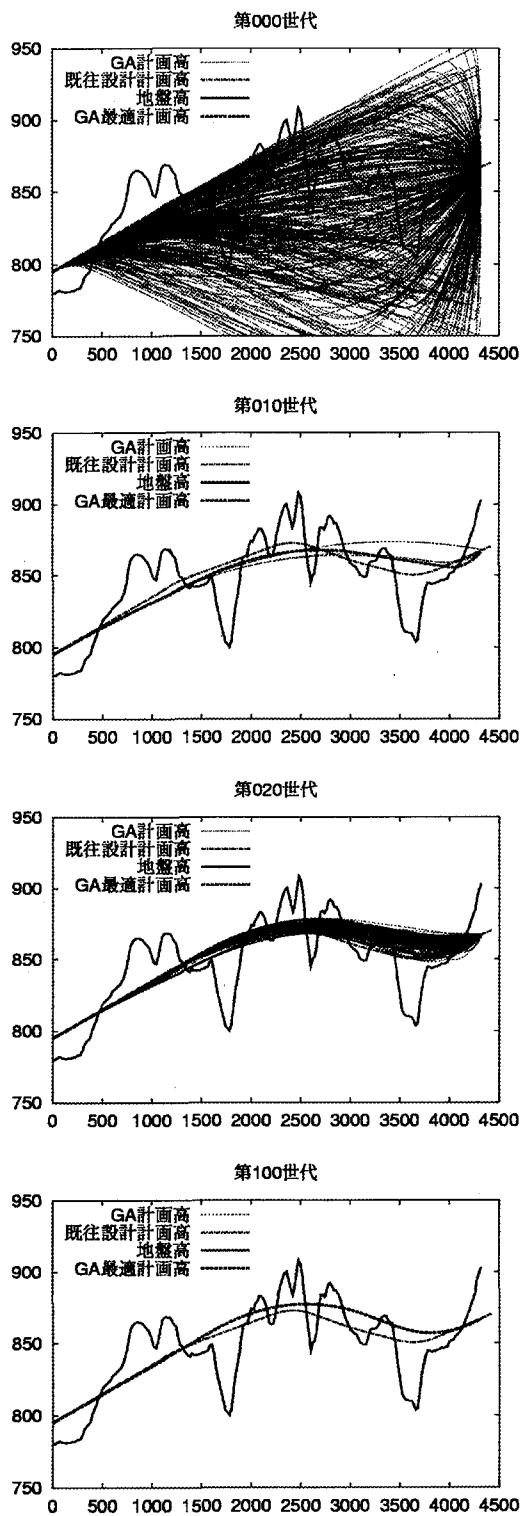


図-4 終点を固定した場合のGAによる縦断線形設計

6. 提案方式の効果とまとめ

最適縦断線形を見つけるためには、考えられるすべての縦断線形を検討する必要がある。しかし、CADで考えられるすべての縦断線形を検討すると膨大な時間と手間がかかる。

そこで、生物が環境に適応して進化する仕組みをコンピュータで模擬する遺伝的アルゴリズム(GA)を利用して、最適解に近い解を探索し、効率的な探索を可能にする手法を開発した。実際に高速道路の縦断線形設計に使用された延長約4.3kmの「デジタル地形データ」を用いてGAによる縦断設計シミュレーションを行い、その結果、道路設計者が行っている縦断線形の最適化をコンピュータで再現することができた。

実際の縦断設計では、①設計基準内の縦断勾配や縦断曲線半径を用いる、②土工量バランスを考慮する、③工費を小さくする、④安全性を考慮するという特徴があるが、今回提案した手法でも、こうした特徴を備えている。本論文では、従来の縦断線形の設計手法に比べ、以下のような成果が得られた。

1. GAを用いると、汎用パソコン上で、最適と推定される縦断線形を実用的な時間内で自動的に選定するシステムを実現できることが検証された。
2. 従来の概略設計と同レベルの縦断線形が得られた。
3. 縦断線形設計の経験が乏しい人でも、効率的に線形設計ができる。
4. 縦断線形設計をシミュレーションすることにより、短時間で膨大な数の縦断線形を評価することが可能になった。設計技術者はシミュレーション結果を比較検討し、評価項目に対するさまざまな重み付けを設定できるようになる。

7. 今後の課題

本論文は、当面のJHの実務設計業務を効率化することを目標として、縦断設計を最適化する為の基礎的手法の開発を行ったものである。今後の最終目標は平面線形と縦断線形を同時に最適化することであり、本手法を土台として平面線形の効率的なモデル化、および多様な平面線形に対する高速土工量計算法を開発し、GAによる平面縦断線形最適化システムを構築することが必要であると考えている。

また、今回は、経済性および安全性を評価の対象とした。実際のJHの設計では、快適性、環境負荷、渋滞解消、走行性便益、時間便益も考慮しており、GAによる最適化を行うためには、快適性、環境負荷、渋滞解消、走行性便益、時間便益を定量化する必要がある。これらはいずれも平均走行速度および予想交通量に係わる評価である。そこで、様々な縦断線形における平均走行速度をあらかじめ走行シミュレーションによって計算すること、そして、各評価項目を貨幣価値換算する手法を開発することが、より実用性の高い設計支援システムにするために必要である。

さらに、さまざまな地形の高速道路設計で実証実験を行い、精度をあげ、汎用性のあるシステムに改良してゆくことが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993
- 2) 古田均・杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
- 3) 南将行: ファジィ推論を用いた遺伝的アルゴリズムによる構造景観設計支援システムに関する研究, 京都大学大学院修士論文, 1994.
- 4) 賀建紅・渡邊英一・古田均: 遺伝的アルゴリズムを用いた鉄筋コンクリート床版の耐用性評価における知識獲得支援手法, 第48回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-541, pp.1230-1231, 1993.
- 5) 鹿汀麗・久保洋・杉本博之: GAによる複合体の最適材料選択に関する研究, 日本機械学会論文集(A編), 61巻, 584号, pp.115-120, 1995.
- 6) 杉本博之・山本洋敬・鹿汀麗: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.
- 7) 杉本博之・山本洋敬・笛木敏信・満尾淳: GAによる仮設鋼矢板土留工の設計最適化に関する研究, 土木学会論文集, No.474/VI-20, pp.105-114, 1993.
- 8) 田中亨・杉本博之・上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994.

付録 セル平均法

セル平均法は、断面を計算することなく、3次元の数値データ(X座標, Y座標, 標高)から直接、土工量を計算する手法である。

(1) 路線沿いメッシュ

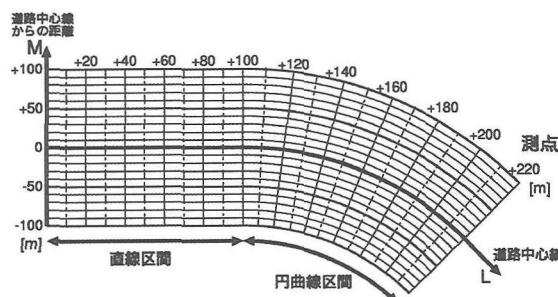


図-5 路線沿いメッシュ

土工量の算出を容易にするために、図-5のような道路の平面線形の中心線に直交し、中心線に沿ったメッシュ（以後、「路線沿いメッシュ」と呼ぶ）を考える。路線沿いメッシュの測点方向をL座標とし、法線方向をM座標とする。メッシュ間隔は測点方向(L軸)は横断面のピッチと同じ

20m、法線方向(M軸方向)は2mとする。縦断方向の範囲は道路の始点～終点である。横断方向の範囲は、7段の切土でも入るように±100mとする。

計算の高速化のために、カーブ区間も直線区間と同様に、一つのセル(メッシュの1マス)を20m×2mの長方形とみなす。この方法では、カーブの内側で土工量が実際よりも多めに、外側では少なめに計算される。しかし、円曲線の半径が十分に大きければ、その誤差は無視できる。また、道路中心線で対称な地形であればカーブの内外で誤差が相殺され、最終的な土工量の誤差は小さいと考えられる。

(2) セル内の平均地盤高の計算法

従来の縮尺1/1,000の地形図に相当するデジタル地形データは、標高1m間隔の等高線を数m間隔でデジタル化したポリライン(折線)データの集まりである。セル平均法では、ポリラインではなく各地点の標高を表すポイントデータの集まりであると考える。そして各セルの平均地盤高は図-6に示すように、セル内に存在する等高線頂点標高の平均値として計算する。

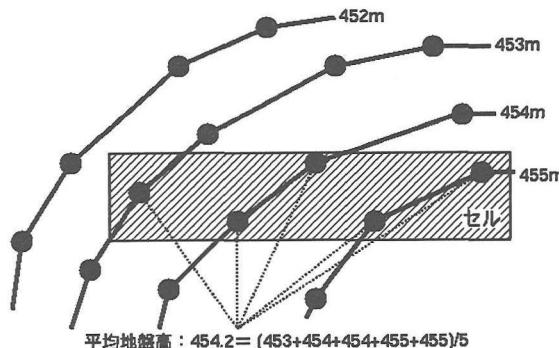


図-6 セル平均法

(3) 土工量算出のための土工量関数テーブル

縦断線形検討では、多数の縦断線形を生成し、その都度土工量が繰り返し計算される。つまり、各測点について、縦断計画高と縦断現況地盤高(道路中心線における現況地盤高さ)の差d[m]から土工量F(d)[m³]を高速に計算できる必要がある。平坦地であれば式として与えることができるが、地表の凹凸があるために毎回セルの縦断現況地盤高にアクセスしなければならない。

そこで、すべての20m区間について、盛土高(切土高)dをある間隔ごとに求め、土工量関数F(d)をあらかじめ数値計算しておく。図-7に示すように、dに基づいて切土量、盛土量が求まるような土工量関数が横断面ごとに生成できる。

そして、その結果を表-10のような土工量関数テーブルに格納する。この場合、dを1mとしている。このようにすれば土工量は、土工量関数テーブルにアクセスするだけで求めることができる。切土は7段49m、盛土は4段28m

までとした。

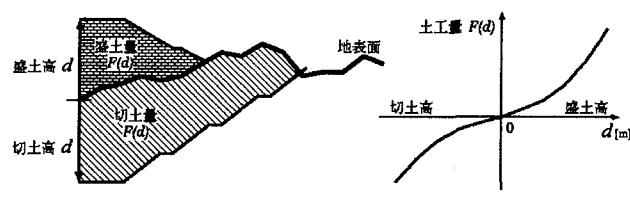


表-10 土工量関数テーブル (単位:m³)

測点	切土[m]								盛土[m]
	-49	...	-2	-1	0	1	2	...	
80+40									
80+60									
80+80									
:									
227+40									

図-7 土工量関数

デジタル地形データと遺伝的アルゴリズムによる最適縦断設計の基礎的研究

山崎元也, 本郷廷悦, 今村博, 比屋根一雄, 飯尾淳, 谷田部智之, 加賀屋誠一

道路線形設計の効率化のため, パソコン上の道路設計CAD (コンピュータ支援設計) を利用する方法が主流になりつつある。しかし, 現在の道路設計CADには, 設計者が与える制約条件に対し, いろいろな道路線形をシミュレーション (模擬実験) できる機能がない。筆者らは, パソコン上で短時間にシミュレーションを行え, 最適に近い道路縦断線形を探索できるプログラムを開発した。このプログラムにより, 道路設計CADの操作の専門的技能がない人や縦断線形設計の経験が乏しい人でも効率的に道路縦断線形設計を行うことが可能になる。この最適化手法は, 現在研究中の道路計画の最適化システムにおいて, 基礎的な手法となるものである。

Optimal Vertical Alignment Design by Digital Terrain and Genetic Algorithms

By Motoya YAMASAKI, Teietyu HONGO, Hiroshi IMAMURA,
Kazuo HIYANE, Jun IIO, Tomoyuki YATABE, and Seiichi KAGAYA

It has become usual recently using road design CAD (Computer Aided Design) on personal computers for efficient road alignment design. There is, however, no function to simulate various road alignments under given constraints by road designers. We developed a program for personal computers that enables us to find the almost optimal vertical alignment by short time simulation. This program makes it possible to design road vertical alignment more efficiently even for persons with a little experience of vertical alignment design or with no technical skill in operation of road design CAD. The optimization method used here will be a basis for the road planning optimization system currently under development.