

I -62

橋梁マネジメントと最適化手法について

北海学園大学 正員 杉本博之

㈱シー・イー・サービス 正員 鹿 汴麗

1. まえがき インフラの整備が大分進み、新規の建設の需要が少なくなりつつある。今後の橋梁設計はより一層の長寿命化が要求される一方で、多数の既存の構造物、システムの維持・補修、補強、再生、あるいは架け替えという事業がますます大きなウエイトを占めてくると思われる。

橋梁の維持補修、補強、再生、あるいは架け替えに係わる、検査技術、解析技術、施工技術、及び関連のシステム工学的技術を総称して「橋梁マネジメント」という。

昨年（平成9年）、8月11日に野田追橋の陥没、あるいは、11月22日に100年経た支笏湖の山線鉄橋（旧名、湖畔橋¹⁾）の復元工事などの象徴的な出来事があったのは、偶然ではなく、時代が新規建設の時代から、既存の構造物、施設を限られた予算制約の中で有効に利用して行くという、橋梁マネジメントの時代に移行しつつあることを如実に示すものと考えられる。

橋梁マネジメントには、上記のように多くの分野が含まれるが、その過程は以下のように3段階に分けらる。①照査・評価基準の作成、及びその基準による橋梁のスクリーニング、②欠陥があると判定された各橋梁に対する複数の改良工事の選定、そのコスト、それによる寿命の推定、及び使用者の費用・便益の計算、及び③システム工学的アプローチによる各工事、各橋梁間の優先順位の決定。

これらは、どれか一つが確立すれば済むというものではなく、3つの段階それぞれが均衡を保ちながら発展し確立されて初めて「有効な橋梁マネジメントシステム」が構築されることになる。特に、往々にして上記の③の分野は軽視されがちであるが、公的資産の有効利用は、今後の土木工学の方向を考える時無視できないことの一つであり、他の2つの段階と同様に重要な分野と考えなければならない。

構造設計を例にとると、設計と解析は表裏一体であるにもかかわらず、設計法を意識しない高度な解析法の研究に多くの労力が割かれ、基本的なところで最適とは程遠い設計法が日常的に使用されていることがある²⁾。これは、解析の方が歴史的にはるかに長く、設計法を意識しない手法が確立してから最適化手法の研究が開始されたためにおきた不幸な現象と考えられる。しかし、橋梁マネジメントは比較的に歴史が浅く、解析手法自身の確立は勿論大切であるが、一方で、意思決定手法の現状を明確に理解することは、無駄のない照査技術、解析技術の確立にも資するところは大きいと考えられる。

本報告は、上記のような背景の下で、特に③の最適優先順位の決定に有効であろうと考えられる最適化手法に関して、現段階で解くことが可能な種々の最適化の問題の定式化を紹介、説明することを目的とする。

2. 橋梁マネジメント 橋梁マネジメントは、3段階から構成されることをまえがきにした。もう少し詳しく、今後必要なことを含めて書くと以下になる。

①膨大な数の橋梁を総て検討の対象とすることは不必要なことであるので、健全な橋と何らかの対応が必要な橋に分類する必要がある。そのための橋の健全度を判定する基準が必要となってくる。年数、重交通量、及び環境要因などをパラメータとする統計処理によって基準が作成され、実際の作業は専門家の目視による判断が尊重されると思われる。

②何らかの対応が必要と判断された橋梁において、床版、上部工、下部工それぞれにおいて、応急処置から例えば床版の架け替えなどのようにかなり抜本的な改良工事まで、取り得る選択は多数あると思われる

る。それらの選択肢を列挙し、その必要コスト、その選択肢が取られた場合の各部位の寿命予測がなされなければならない。この寿命予測にも①で用いられた統計処理されたデータが用いられる。また、橋梁の改良による重量制限の解除、あるいは、拡幅による車両制限の解除による遠回りをしなくて済む結果生まれる使用者の費用・便益の計算も必要となる。

③初期コスト、費用便益費、あるいは何らかの数値計画法による各工事、各橋梁間による最適優先順位の決定が行われる。一つの橋梁は、他の橋梁からまったく独立して道路上で機能しているのでなく、ネットワークを構成する道路上の施設として考える必要もあるから、単独に初期コストのみで優先順位が決められることは少なく、使用者への負担の少ない道路ネットワークの確保、年度予算、損傷度合いなど相互の関係を考慮して決められなければならないと考えられる。

また、長期的な費用・便益を考える場合は、現在の時点に換算した値を用いる必要があるから、社会的割引率³⁾ $[i]$ を考慮しなければならない。n年後の便益Bの現在の時点に換算した割引かれた価値B₀は

$$B_0 = B / (1 + i)^n \quad (1)$$

と表される。

上に記述されたいくつかの項目は、今後それぞれの機関において早急に確立されなければならない事であるが、以下では、③の意思決定に何らかの形で貢献できであろう最適化手法について、現在の状況を説明する。

3. 最適化手法の状況

いうまでもなく、橋梁マネジメントの目的は、橋の寿命を分単位、秒単位で求めることではない。限られた予算をいかにして有効に使う、橋を決して落とすことなく、不要な通行止めをすることなく、安全で快適な通行環境を保持することにある。例えば上記の3段階の場合で記述すると、何らかの対策工事はなされなければならない、その意思決定は合理的になされなければならない、意思決定の善し悪しは、健全度判定基準の善し悪し、対策工事に係わる種々の計算の善し悪し、そして意思決定法の善し悪しに関わり、どれ一つでも悪ければ、最終的な決定の質も悪くなるということである。

そのような観点から、最終的な意思決定に関わる最適化手法の現状、能力に関する理解を深めるのも今後の橋梁マネジメントのシステム作りに必要なことであると考えられる。

最適化手法は、連続量から構成される問題に関しては、比較的最近発表された、主双対内点法⁴⁾、離散量から構成される問題に関しては遺伝的アルゴリズム⁵⁾ (以下、GAと略する) により、従来より格段に応用の範囲を広げている。特に橋梁マネジメントにおいては、離散的な変数、あるいは関数が多いと予想されるので、GAの果たす役割は大きい。

最適化問題といっても、多くの種類があるが、以下に、現在解くことが可能である最適化問題の種類、関係する簡単な説明などを列挙する。

以下の記述で、関数最小化あるいは最大化という表現を用いるが、関数に符号をつければ最大化あるいは最小化問題になるので、これにより一般性は失われない。

また、いくつかの問題は、GAで解くことができるが、その時、問題を構成する目的関数、制約条件等の関数は、連続関数である必要も、閉じた形で与えられる必要もない。極端な場合、実験の観測値のようなものでもGAは対応できる。

(1) 制約条件のない関数最小化問題：

$$\text{○目的関数} : f(\{x\}) \rightarrow \min \quad (2.1)$$

$$\text{○設計変数} : \{x\} = \{x_1 \quad x_2 \quad x_3 \cdots x_n\} \quad (2.2)$$

この場合は、設計変数は、連続量でも、離散量でも解くことは可能である。連続量であれば、ニュートン法、あるいはニュートン法を基本にした手法⁷⁾ (BFGS等) で解かれ、離散量(制約条件のない組合せ最適化問題)であれば、GAで解くことができる。いずれの場合でも、設計変数に上下限值を設定することは

可能である。

(2) 制約条件のある最小化問題：

$$\bigcirc \text{目的関数} : f(\{x\}) \rightarrow \min \quad (3.1)$$

$$\bigcirc \text{制約条件} : g_j(\{x\}) \leq 0 \quad (j=1-m) \quad (3.2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i=1-n) \quad (3.3)$$

$$\bigcirc \text{設計変数} : \{x\} = \{x_1 \ x_2 \ x_3 \ \cdots \ x_n\} \quad (3.4)$$

ここで、 g_j ($j=1-m$) は制約条件、 x_i^L 、 x_i^U は設計変数 i の上下限值である。 m は制約条件の数、 n は設計変数の数である。

この場合は、設計変数は、連続量でも、離散量でも解くことは可能である。連続量であれば、SLP、SQP、GRG⁷⁾などの手法で解くことができる。また、最近主双対内点法が発表され、山下ら⁸⁾により、多数のベンチマーク的な問題を解いた結果、平均で3800の設計変数、2500の制約条件からなる非線形最適化問題が解かれたと報告されている。

変数が離散量（制約条件のある組合せ最適化問題）であれば、やはりGAで解くことができる。構造最適化問題等に広く利用されている^{6) 9) 10) 11)}。

(3) ナップザック問題：

これは、ある制約の下で、袋の中にどの程度物を詰めることができるかという問題で、以下のように定義される。

$$\bigcirc \text{目的関数} : f(\{I\}) \rightarrow \min \quad (4.1)$$

$$\bigcirc \text{制約条件} : g_j(\{I\}) \leq 0 \quad (j=1-m) \quad (4.2)$$

$$\bigcirc \text{設計変数} : \{I\} = \{I_1 \ I_2 \ I_3 \ \cdots \ I_n\} \quad (4.3)$$

ここで、設計変数の取り得る値は0か1で、1であれば実行し、0であれば実行しないことを意味する。

この問題は設計変数は離散量となり、GAの応用が可能である。近田ら^{12) 13) 14)}は、単年度の予算制約の下での橋梁補修計画にこの問題を応用した。

(4) スケジューリング問題(1)：道路整備順位決定問題

スケジューリング問題というと、巡回セールスマン問題が代表的であるが、その考え方は道路整備等の問題に応用できる。基本的な問題は次のように定式化できる。

$$\bigcirc \text{目的関数} : f(\{I\}) \rightarrow \min \quad (5.1)$$

$$\bigcirc \text{制約条件} : g_1(\{I\}) \leq 0 \quad (\text{年度予算の制約}) \quad (5.2)$$

$$\bigcirc \text{設計変数} : \{I\} = \{I_1 \ I_2 \ I_3 \ \cdots \ I_n\} \quad (5.3)$$

この問題の設計変数は、 n 個ある事業の番号であり、その順番を決めることになる。また、制約条件としては年度毎の予算制約が考慮される。

例えば、図-1¹⁵⁾は、任意に想定した道路ネットワーク上の20の工事箇所順番を、複数年度にまたがる予算制約の下で、想定したOD交通の流れの費用便益比最大を目的関数として解いたものである。

その他、首都高速道路の新設路線の建設順の最適化¹⁶⁾も同様な問題に属し、GAの応用により解くことが可能な問題となる。

(5) スケジューリング問題(2)：先行事業がある場合の事業順位決定問題

前記のスケジューリング問題と同じ順番付け問題であるが、年度毎の予算制約の他に、一般的にアローダイアグラムで表現される、部分的に先行事業の関係を有する場合のスケジューリング問題である。

基本的な問題は次のように定式化できる。

$$\bigcirc \text{目的関数} : f(\{I\}) \rightarrow \min \quad (6.1)$$

$$\bigcirc \text{制約条件} : g_1(\{I\}) \leq 0 \quad (\text{年度予算の制約}) \quad (6.2)$$

$$: g_2(\{I\}) \leq 0 \quad (\text{先行事業の関係}) \quad (6.3)$$

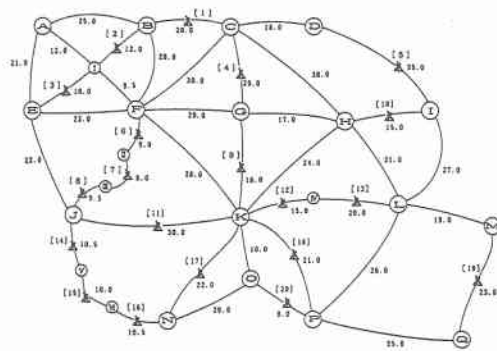


図-1 道路整備順位決定問題

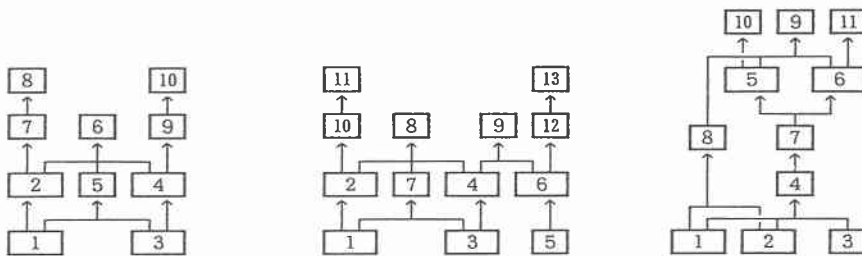
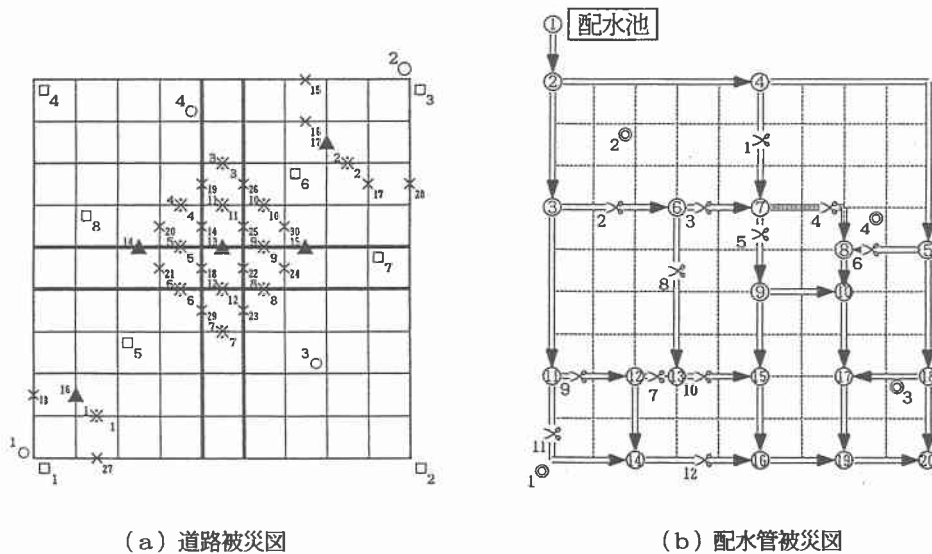


図-2 3プロジェクトのアロダイアグラム



(a) 道路被災図

(b) 配水管被災図

図-3 道路と配水管に同時に被災を受けた復旧問題

$$\text{○設計変数} : \{I\} = \{I_1 \quad I_2 \quad I_3 \cdots I_n\} \quad (6.4)$$

この問題の設計変数は、 n 個ある事業の番号であり、その順番を決めることになる。また、制約条件としては年度毎の予算制約の他に先行事業の関係が考慮される。

例えば、図-2はある公共団体が現在計画している3つのプロジェクトのアローダイアグラムであるとする。それぞれのプロジェクトにおいてそれぞれの先行事業の関係が設定され、総計で $10+13+11=34$ の事業の順番と予算を考慮した上での各年度への事業の配分を決める問題となる¹⁷⁾。目的関数は色々と考えられるが、各プロジェクトの達成による市民へのサービス度最大などを取ることができる。

この問題も、初期線列の構成を工夫することにより、GAの基本的なスケジューリング問題として定式化され、容易に解くことができる。

(6) 組合せ問題とスケジューリング問題の混合問題：震災復旧支援問題

設計変数が離散量の場合、(1)と(2)は組合せ最適化問題、(4)～(6)がスケジューリング問題となり、それぞれGAが有効に応用できる。GAは更に、それらが混合した問題にも応用可能となる。

基本的な問題は次のように定式化できる。

$$\text{○目的関数} : f(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2 \cdots \{I\}_K, \{J\}_K) \rightarrow \min \quad (7.1)$$

$$\text{○制約条件} : g_1(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2 \cdots \{I\}_K, \{J\}_K) \leq 0 \quad (7.2)$$

(各プロジェクト間の先行工事の関係)

$$\text{○設計変数} : \{I\}_k = \{I_1 \quad I_2 \quad I_3 \cdots I_n\}_k \quad (7.3)$$

$$\{J\}_k = \{J_1 \quad J_2 \quad J_3 \cdots J_n\}_k \quad (k=1-K) \quad (7.4)$$

これは、お互いに相関関係があり、部分的に先行工事の関係のある複数のプロジェクト内の工事の順番と担当する機関の配分問題として定義されている。各プロジェクト k 毎に、 $I_1 \sim I_{n_k}$ の n_k の工事があり、それぞれ適当な数の担当機関があり、それらの番号が $J_1 \sim J_{n_k}$ の値であり、各工事の担当機関を意味することになる。各プロジェクト間の工事には、部分的に先行工事の関係があり、あるプロジェクトに属する工事が終わらなければ他のプロジェクトに属する工事にかかれなければならないという関係が存在する。

目的関数はやはり各プロジェクトの完成による市民サービス最大などが考えられる。

図-3^{18) 19)}はこの問題の一例で、ある市に直下型地震が襲い、街の道路と水道の配水管に被害を受けた場合の復旧問題である。道路被害は、2種類(2層)あるとし、遮蔽物撤去と道路本体の補修工事である。遮蔽物がある場合は、その撤去が終わらなければ道路本体の工事にかかれなければならないことになる。また、水道管の被害の復旧については、復旧班の常駐場所から被害箇所までの道路が開通していなければ、やはり復旧工事にかかれなければならないことになる。

この問題も、線列の構成を工夫することにより、解くことが可能になる。また、市街地の除排雪計画問題も同様な定式化により解くことができる²⁰⁾。

4. あとがき 鋼材の降伏応力度は確かな値で、それを安全率 β で除して作られる構造物は、 β 倍の荷重には最低限耐え得ると漠然と考え、ほとんど間違いは無い。しかし、橋梁マネジメントにおいては、橋の降伏状態を表す指標が統計的な基準でさえもない状態で、まず橋は決して落としてはならないという大前提条件がある。山線鉄橋が示すように、鋼鉄は丁寧な維持補修(ペインティング)さえされれば永久的に使用可能な材料ではある。しかし、新規建設とは次元の違う限られた予算制約が課せられ、その中で安全で、できるだけ快適な通行環境を保持しなければならないという、従来の新規橋梁のための設計法とはかなり異なる環境の中で、種々の事業が遂行されなければならない。

今、米国では、橋梁マネジメントが大きな課題になっているが、橋の劣化は間違いなく進み、数年後にはわが国においても、やはり大きな課題となる。そのためには、健全度の判定のための基準の作成、維持・補修・架け替え工事に関わる、費用・便益、及び寿命の推定、そして最適な事業順位の決定法などの確立が急

がれる。橋梁は、一つの構造物として単独にあるのではなく、道路施設の一部として種々のレベルのネットワークの機能を支える一つの部品として考えることも必要で、最適な事業順位決定も重要、かつ複雑な問題となる。本報告は、そのための最適化手法について、その能力の現状と、解くことが可能な種々の問題パターンについて説明した。

最適化の問題は、組合せ最適化問題、スケジューリング問題、及びそれらの混合した問題の定式化及び具体的な応用例を説明した。応用例の中には、橋梁の維持補修に関するものもあるが、これらが、今後の橋梁マネジメントのニーズを総て満足するものではないが、またこれらが最適化手法の総ての定式化ではないことも明らかである。

参考文献

- 1) 杉本博之：支笏湖湖畔橋の歴史に関する一考察、土木学会北海道支部論文報告集、第49号、pp.59-62、1993.
- 2) SUGIMOTO, H. & LU B.: FULLY-STRESSED DESIGN OF FRAMED STRUCTURES WITH DISCRETE VARIABLES AND APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS, ADVANCES IN STRUCTURAL OPTIMIZATION, ASCE, pp.180-191, 1996.
- 3) 奥野信宏：公共経済学、岩波書店、1996.
- 4) YAMASHITA, H.: A globally convergent primal-dual interior point method for constrained optimization, Technical Report, Mathematical Systems Institute Inc., 1992.
- 5) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 6) 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、森北出版株式会社、1997.
- 7) 山田善一編著：構造工学シリーズ1 構造システムの最適化～理論と応用～、土木学会、1988.
- 8) YAMASHITA, H., H. YABE & T. TANABA: A Globally and superlinearly convergent primal-dual interior point trust region method, Technical Report, Mathematical Systems Institute Inc., 1997.
- 9) 杉本博之・鹿汴麗・山本洋敬：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.
- 10) 鹿汴麗・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.
- 11) 杉本博之・山本洋敬・笹木敏信・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.
- 12) 近田康夫・橋謙二・城戸隆良・小堀為雄：GAによる既存橋梁の補修計画支援に関する研究、土木学会論文集、No.513/I-31、pp.151-159、1995.
- 13) 近田康夫・木下真二：点検データに基づく橋梁補修計画立案へのGAの応用に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A、pp.593-600、1997.
- 14) 杉本博之・近田康夫：12)への討議・回答、土木学会論文集、No.543/I-36、pp.281-283、1996.
- 15) 田村亨・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応用、土木学会論文集、No.482/IV-22、pp.37-46、1994.
- 16) 杉本博之・田村亨・長濱裕朗：GAによる高速道路網の新設路線工事の順位決定について、第4回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.61-66、1995.
- 17) 古田均・杉本博之・井下泰具・横田哲也・広瀬彰則・中谷武弘：中長期事業計画問題へのGAの応用、構造工学論文集、Vol.44A、投稿中、1997.
- 18) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿汴麗：GAによるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A、pp.517-524、1997.
- 19) 杉本博之・片桐章憲・田村亨・鹿汴麗：震災復旧プロセスへのGAによる支援の試み、第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集、pp.295-298、1996.
- 20) 杉本博之・三宅正剛・高宮則夫・安江哲：市街地の除排雪計画へのGAの応用について、計算工学講演論文集、第2巻第2号、pp.669-672、1997.