

(7) 沈埋函の海上コンクリート打設スケジューリング

CONCRETING SCHEDULE OF IMMersed TUBE AT SEA

岸 光男*, 森山健児**

Mitsuo KISHI and Kenji MORIYAMA

*工博 大阪府立大学助教授 工学部海洋システム工学科 (〒 599-8531 堺市学園町 1-1)

** (株)構造計画研究所 (研究当時, 大阪府立大学工学部学生)

An immersed tunnel can be constructed by connecting immersed tubes. The steel shell of the tube is fabricated in a dry dock. Usually the concreting work is accomplished there. Although the concreting work at sea is possible, it is not easy to keep the tube straight. In this paper we investigate the concreting schedule at sea for immersed tubes. The tube consists of many cells, and it takes some days to finish concreting. We try to find the optimal schedule for the concreting work minimizing the tube deflection. The scheduling variable takes binary values; so that the optimization is a combinatorial (or discrete) optimization. Simulated annealing method is introduced for the combinatorial optimization. Numerical examples are provided to demonstrate the applicability of the proposed method for immersed tubes.

Key Words: scheduling, concreting at sea, immersed tube, simulated annealing

1. まえがき

海底トンネルに用いられる沈埋函は、一般に造船所のドック内で製作・コンクリート打設され（陸上コンクリート打設）、敷設現場まで曳航され、沈設・埋め戻しされる¹⁾。陸上コンクリート打設は、構造精度の確保が容易である反面、現場まで沈埋函を曳航するのを手間どらせる。

そのため、現場まで函体鋼殻を曳航したのち、海上で鋼殻内の隔室にコンクリートを打設する工法も考案されている（海上コンクリート打設）。ただし、沈埋函の各区画へのコンクリート打設の手順によっては、許容範囲をこえるたわみが構造に生じたままコンクリートが硬化してしまうおそれがある。

本研究では、沈埋函の海上コンクリート打設スケジューリングについて最適化を試みる。沈埋函の構造変位・浮力作用については、バネ支持1次元梁としてモデル化する。打設スケジュールの最適化については、シミュレーテッドアニーリング法を用いる。

2. 沈埋函のモデリング

2.1 沈埋函

沈埋函の鋼殻の断面構造の例を図-1に示す。鋼殻内の鋼板で囲まれた隔室区画にコンクリートが打設されていく。そのコンクリートには、高い流動性と材料分離抵抗性とが求められる。高流動コンクリートは時間とともに性状が急激に変化するため、陸上コンクリート打設といえども綿密な管理が必要とされる。

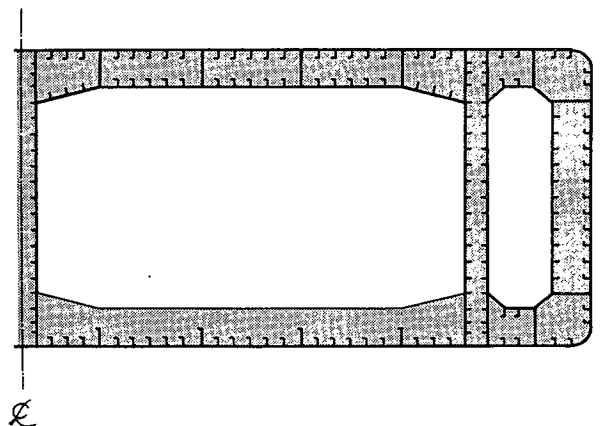


図-1 沈埋函の断面構造

沈埋函は、基本的に一樣断面の函体である。そのため、静穏な海上で、しかもコンクリート性状が変化しない短期間のうちに全区画へのコンクリート打設を終了できるなら、たとえば長さ方向(縦方向)の喫水を等しく保つ(構造を変形させない)ことは困難ではない。

現実には、海上コンクリート打設を短期間に終えることはむずかしい。したがって、各区画へのコンクリート打設の手順によっては、構造が大きく変形したままコンクリートが硬化してしまうおそれがある。

海底で既設函との連結に要求される許容たわみ誤差は、函体長さ 80 ~ 100m あたり、20 ~ 25mm 以内であるという。

2.2 沈埋函のモデル

ここでは、沈埋函は一樣断面で縦方向に長い函体であ

るとして、海上コンクリート打設による構造変位・浮力作用をバネ支持1次元梁にモデル化する(図-2)。

沈埋函の各区画に逐次コンクリートを打設していく過程では、構造にたわみが生じる。ある区画にコンクリートを打設した時点では、コンクリートは単に荷重である。コンクリートが硬化するにつれて、たわみが残ったまま、その区画の剛性が増加していく。

梁モデルでは、コンクリート硬化によるたわみ残留について、剛性が増した状態で同等なたわみを生じさせるモーメントを区画に作用させることで処理する。

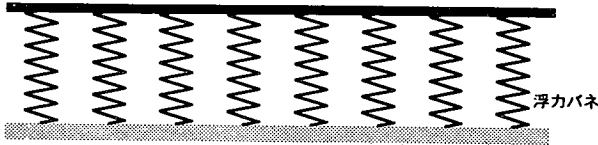


図-2 バネ支持1次元梁モデル

3. コンクリート打設スケジューリングの最適化

3.1 シミュレーテッドアニーリング法による最適化

焼きなましを結晶組織のエネルギー準位の最小化の技術とみなすことができる。その焼きなましのアナロジーから、システム最適化のアルゴリズムとしてシミュレーテッドアニーリング(simulated annealing)法^{2), 3)}が考え出された。

シミュレーテッドアニーリング法では、確率的なゆらぎを用いることで局所解からの脱出と大域最適解への到達の可能性を期待する。最初のうちはゆらぎを大きく与え、徐々にゆらぎ小さくしていく。ゆらぎの大きさをパラメタ T でコントロールするなら、そのパラメタは温度と呼ばれる。

シミュレーテッドアニーリング法のアルゴリズムを表-1に示す。なお、 X は最適化の変数ベクトル、 k は繰り返しの回数である。

シミュレーテッドアニーリング法について次の大局最適化の定理が制限つきで証明されている²⁾。

$$\lim_{T \rightarrow 0} \lim_{k \rightarrow \infty} \text{Prob} [X^{(k)} \in S_{opt}] = 1 \quad (1)$$

ここで、 S_{opt} は評価関数の最適値を与える状態の集合である。

式(1)は、状態遷移を無限回繰り返しながら温度 T を0にまで冷却していくという操作を意味している。現実にはそれは不可能であり、状態遷移を有限回繰り返す中で温度を下げていくことになる。これによって、シミュレーテッドアニーリング法は、最適解に近い解(近似解)を求めようという近似アルゴリズムに変容する。

温度 T の調整方法をクーリングスケジュール(cooling schedule)と呼び、たとえば

$$T^{(k)} = T^{(0)} / \ln(k+1), \quad k=1, 2, \dots \quad (2)$$

が代表的である。ここで $T^{(0)}$ は初期温度である。

3.2 コンクリート打設スケジューリング問題

コンクリート打設に関連して、連続桁RC床版の打設計画に関する研究⁴⁾がある。それによれば、さまざまな評価基準や制約条件のあることがわかる。

とくに橋梁などでは、以下の項目があげられる。

- a) 構造の最終たわみと計画たわみとの誤差が許容値以下となるようにする。
- b) 先行打設されたコンクリートに発生する引張応力度が許容値以下となるようにする。
- c) 打ち継目は欠陥が生じやすいので、その数をできるだけ少なくする。

沈埋函の海上コンクリート打設の場合、上記の a) がとくに重要である。また、各区画は隔室であるため、コンクリート打設を隣接連続的に行なう必要はなく、c) は除外される。

本研究では、コンクリート打設スケジューリング問題を単純化して、以下のように定式化する。ただし、沈埋函は $2n$ 個の区画に分けられており、縦方向に前後対称にコンクリートを打設していくものとする。

$$\text{Find } X = [X_{ij}] \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n$$

$$\text{Such that } f(X) \rightarrow \min. \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \sum_i X_{ij} = 1 \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq c \quad i=1, \dots, m \quad (5)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

表-1 シミュレーテッドアニーリング法のアルゴリズム

- ① 最適化の変数の初期状態ベクトル $X^{(0)}$ 、初期温度 $T^{(0)}$ (>0) を設定する。
- ② $k=0$ から始めて、以下のステップを繰り返す。
- ③ $X^{(k)}$ の近傍に新しい状態 X' を発生させる。
- ④ 評価関数 E について、 $\Delta E = E(X') - E(X^{(k)})$ を算出する。
- ⑤ 確率 p で $X^{(k+1)} = X'$ とし、確率 $1-p$ で $X^{(k+1)} = X^{(k)}$ とおく。 p は $\Delta E/T^{(k)}$ の減少関数である。
- ⑥ 温度を少し下げて $T^{(k+1)}$ にする。
- ⑦ ステップ③へいく。

ここで、 X は $\{0,1\}$ の2値変数 X_{ij} からなる $m \times n$ 行列であり、 $X_{ij}=1$ は i 日目に区画 j へコンクリート打設することを意味する。目的関数 f は構造のたわみ誤差であり、 c は1日当たりのコンクリート打設可能区画数(片側)である。なお、コンクリートの引張応力度に関する制約条件を考えていない。

コンクリート性状は材令に応じて変化していく。全区画への打設工事完了までに要する時間と比較して、コンクリートの硬化時間が短いほど、沈埋函の各部にたわみ残りやすくなる。以下では、極端な仮定として、コンクリートは打設後1日で硬化するものとする。

4. 数値計算例

全長120mの沈埋函を想定し、海上コンクリート打設スケジューリングの最適化計算を行なう。片側区画数 $n=8$ 、1日当たりのコンクリート打設可能区画数 $c=1$ とする。すなわち、工事日数 $m=8$ ということになる。他の構造諸元や材料特性については、実機データを参考にして設定を行なった。

目的関数である構造のたわみ誤差 f として、最終状態での各節点(1区画は両端を含め3節点)のたわみ誤差の絶対総和をとることにする。

スケジューリング問題の最適化にシミュレーテッドアニーリング法を用いる場合、表-1のアルゴリズム中のステップ③に工夫が望まれる。すなわち、変数行列 X の現在の状態の近傍に新しい状態を発生させるとき、それが制約条件式(4)および式(5)を満足する可能解であってほしい。そのために、ここでは可能解 X の任意の2行、任意の2列を交換していくという技法を用いる。

(1) 近似解

近似アルゴリズムを用いているため、真の最適解が得られるという保証はない。得られた近似解の1例を図-3に示す。予想されるとおり、コンクリート打設順序を分散させることが好結果に結びついている。なお、図-3の喫水スケールは不統一である。

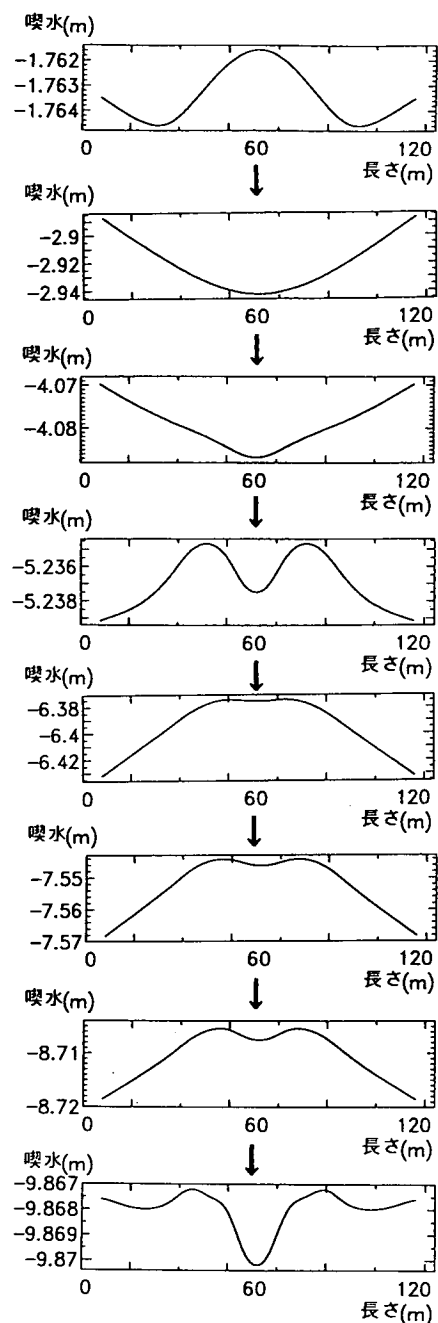
1つの近似解を得るまでに要する状態遷移の回数は、クーリングスケジュールの初期温度に依存する。ここでは、30回程度の状態遷移で収束するように、初期温度を設定した。

(2) 最悪解

参考のため、たわみ誤差の最大化も試みた。図-4に結果の1例を示す。そこでは、中央部から端部に向けて隣接連続的にコンクリートを打設している。これも容易に予想がつく。

(3) 解の分布

最適化計算をとおして、目的関数の値が同等な近似解を多数個観測した。そこで、モンテカルロ法によって可能解を1000個発生させ、その分布を調べてみた。図-5に結果を示す。図中、たわみ誤差の絶対総和が0.15以下であるような解は、いずれも実機の許容たわみ誤差を



打設順序 5 3 4 1 7 8 6 2



図-3 コンクリート打設の近似解

軽くクリアする。そのような解を許容解と呼ぶなら、解集合に占める許容解集合の割合は大きいといえる。

沈埋函の実機は多数の小隔壁に分割されており、コンクリート打設順序を分散できるなら、許容解を得ることはむずかしくない。このような問題では、最適解の探索に過度に慎重にならずともよい。シミュレーテッドアニーリング法や確定的アニーリング法⁵⁾などの近似アルゴリズムが実用的な解法となる。

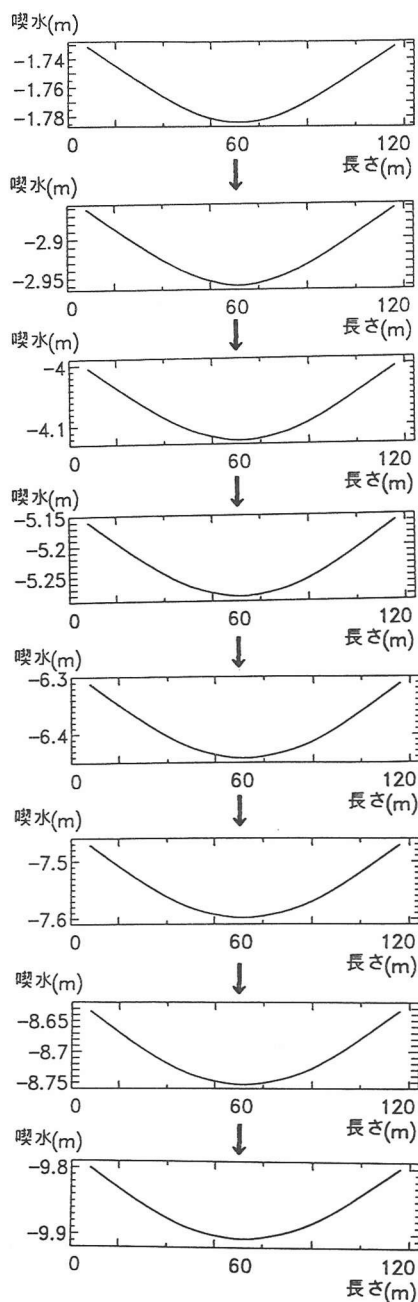


図-4 コンクリート打設の最悪解

5. あとがき

沈埋函の海上コンクリート打設スケジューリングについて、シミュレーテッドアニーリング法により最適化を試みた。以下に結論を述べる。

- このスケジューリング問題には、近似解が多数存在する。解集合に占める許容解集合の割合は大きい。
- 構造に残るたわみを小さくするには、各区画へのコンクリート打設順序を分散させればよい。
- シミュレーテッドアニーリング法は、この種のスケジューリング問題に対して実用的な解法となる。

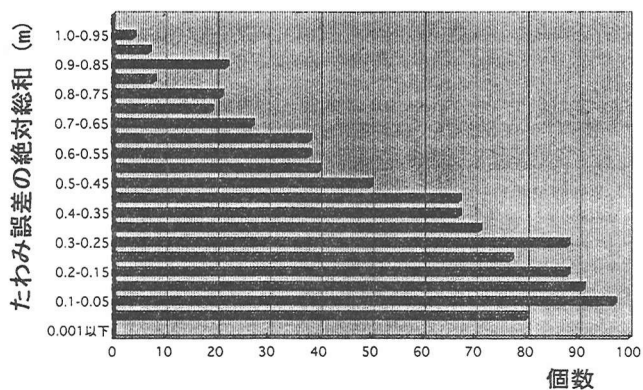


図-5 モンテカルロ法による解の分布

最後に、関西設計(株)安藤 彰、小嶋良一の両氏から本研究の動機づけを得たこと、また日立造船株式会社堺工場には沈埋函製作現場見学の許可をいただいたことを記し、感謝します。

参考文献

- 運輸省第三港湾建設局神戸港湾震災復興事務所：神戸港島トンネル-沈埋函製作工事(その3), 1996.
- Aarts, E. and Korst, J.: Simulated Annealing and Boltzmann Machines, John Wiley & Sons, 1989.
- 日本機械学会編：工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法, 技法堂出版, pp.159-204, 1996.
- 三上市蔵ほか：土木構造物の知識情報処理に関する調査研究, 土木学会関西支部共同研究グループ報告書, pp.110-120, 1994.
- 上田修功ほか：確定的アニーリング-もうひとつのアニーリング, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp.689-697, 1997.