

土木構造物の最適形状設計への均質化法の適用事例

ハザマ 技術本部 エンジニアリング第3部 須田 清隆

○ ハザマ 技術本部 エンジニアリング第3部 内田 雅博

1.はじめに

構造物の設計過程において、その構造形状を決定することは重要な作業である。しかしながら、構造物の最適形状を求めるためには、様々な境界条件や荷重条件を考慮して、数多くの解析を実行することが必要となる。近年、計算力学の発展や、コンピュータ及びその周辺機器の整備が進んだことなどから、最適化手法を用いた構造物の最適形状設計が可能となってきた。形状最適化の過程には、何本の部材をどのように配置すれば良いのかを決定するような構造形態決定過程、構造形態が与えられた後に部材の結合位置などを決定する構造形状決定過程、構造形状が与えられた後に部材断面などの寸法を決定する構造寸法決定過程がある。この3つの最適化過程は、図-1に示すように、構造物の設計を行う作業の流れの中で、構造形態決定過程は概念設計段階に、構造形状決定過程は構造設計段階に、構造寸法決定過程は断面設計段階においてそれぞれ行われるのが一般的である。最適形状設計の試みは、構造形態決定過程よりも下流の段階で行われている事例が多く、本格的に構造形態決定過程に最適化手法を適用した事例は少ない。

本報では、概念設計段階における構造形態の決定を行う手法として、均質化法を用いた最適化手法について述べるとともに、その手法を土木構造物の最適形状設計に適用した事例を示す。

2. 均質化法による材料最適配置手法について

均質化法 (Homogenization method) の特徴は、設計領域が、図-2のように全体に小さい穴が無数に空いている多孔質体による周期性を持った構造をしていると仮定することによって、マクロ的な材料定数 (応力-歪マトリックス) を計算できるところにある⁽¹⁾。この均質化法を用いて、材料の最適配置を考える。

まず、設計領域を有限要素分割し、その各要素を構成する最小構造体の穴の大きさを示す a および b と、強さの方向を示す主軸の回転角 θ を、設計変数として図-3のように定義する。そして、使用する材料の量を決め、これを制約条件とする。目的関数として構造全体の平均コンプライアンス $\int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} \cdot d\Omega$ を選ぶ。

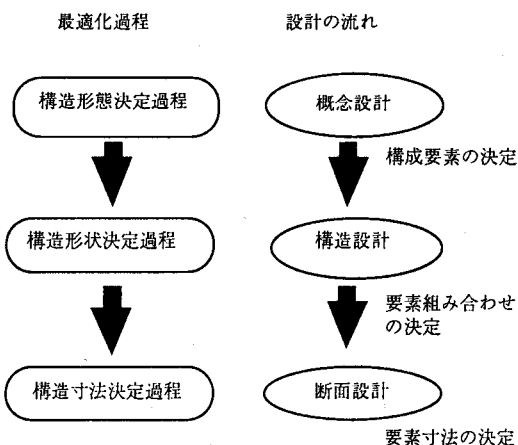


図-1 最適化過程と設計の流れ概念図

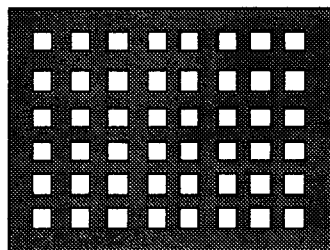


図-2 均質化法要素概念図

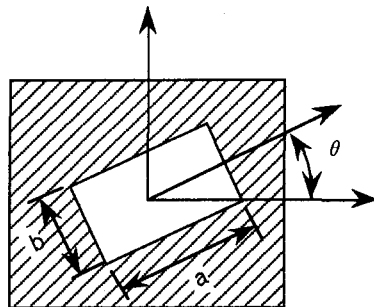


図-3 最小構造体概略図

最適化式は、次式のように表される。(2)

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} \rho f_i u_i d\Omega + \sum_{i=1}^N \int_{\Gamma} t_i u_i d\Gamma \\ \text{s.t. } & \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq \Omega_s \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 N は空間の次元数、 ρ は密度、 f は Ω に働く物体力、 t は境界 Γ 上の分布力、 Ω_s は使用できる材料の上限値を示す。

式(1)は、使う材料をある一定以下とする制約のもとで、平均コンプライアンスを最小とするような解を求めることを示している。ラグランジュの未定乗数を定義し、最適化規準法により繰り返し収束計算を実施することにより最適解を求めることができる。最終的に求った各要素における穴大きさ($a \times b$)を0~1に正規化して、構造体として必要な材料の密度として表示する。

3.土木構造物の形状最適設計への適用事例

2.に示した方法を用いて土木構造物の形状最適設計を行った事例を以下に示す。

(1) シールドトンネル特殊施工部の最適形状断面

面の設計

地下鉄の駅舎部をシールド工法によって施工する場合、2本の双設シールドトンネルの開口部を特殊セグメントで結合して駅舎部の施工空間を確保する方法が用いられる。その際、特殊施工部セグメントの形状は、様々な荷重条件に対して構造的に安定であると同時に、駅舎としての機能を果たすための空間が確保できるような形状でなければならない。このような条件を満足する最適な構造形状を求めるために形状最適化手法を用いて解析を行った。

解析対象となるシールドトンネルは、図-4に示すような、半径3.1mの双設トンネルで、その中心間隔は6.6mである。そして、図に示すような6.6m×10.0mの範囲を設計領域として設定し、その中で最適な構造形状を求めるための解析を行う。荷重条件としては、鉛直方向の土被り圧および水平方向の土圧・水圧を考慮して図-5のような状態を仮定する。また、荷重条件以外の制約として、駅舎部の設置空間の確保および線路部分の建築限界を満足させるために、駅舎中央部の中柱を形状最適化解析の対象としない固定領域とした。構造体として使用する領域を設計領域の30%として解析したところの最適構造形は、図-6に示すような結果となった。この結果は、シールドトンネル開口部は、駅舎部中柱に取り付け

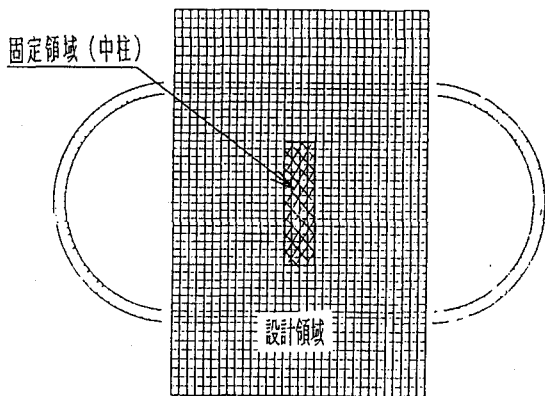


図-4 モデル図

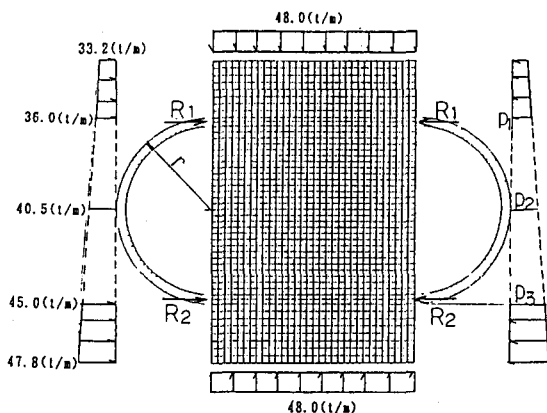


図-5 荷重条件

らたV字型の特殊セグメントによって支持することで、安定な構造とすることができることを示している。

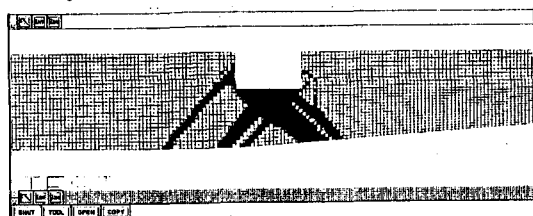
(2) 立坑基礎の支持構造形式の選定

軟弱地盤上にシールド発進立坑を建設する場合、施工時および完成時それぞれの場合の荷重に対して安定となるようにその支持構造形式を選定する必要がある。支持構造形式を検討するにあたっては、立坑に作用する荷重の評価を行うが、その荷重の数は多く、組み合わせも複雑である。このような荷重条件を考慮して支持構造形式を選定するのは、一般的に難しい。そこで、発進立坑の支持構造形式を決定するために、形状最適化解析を用いて最適な支持構造形式を求めることを試みた。

解析に用いたモデルは、図-7に示すように、幅4.5m、深さ2.5mの立坑を、厚さ約6.5mの軟弱地盤上に設置するものとする。また、軟弱層の下の基盤はトンネル発進方向に徐々に浅くなっている。一方、荷重条件は、鉛直方向に立坑の自重、浮力、水平方向に土圧、水圧およびトンネル軸方向に発生する軸力を考慮して、図-8のように仮定した。

形状最適化解析による結果を、図-9に示す。同じ荷重条件のもとで、構造体として使用する領域を設計領域の50%~10%の場合について解析を行った。構造体として使用する領域を減らしていくと、杭状の形状が出現し始め、構造体として使用する領域を10%とした場合には、斜杭のような形状が得られた。

上記のように、いろいろな荷重の組み合わせにおいても、最適な構造形状を解析的に求めることが可能であることがわかる。



CASE-3 (構造体として使用する領域30%)

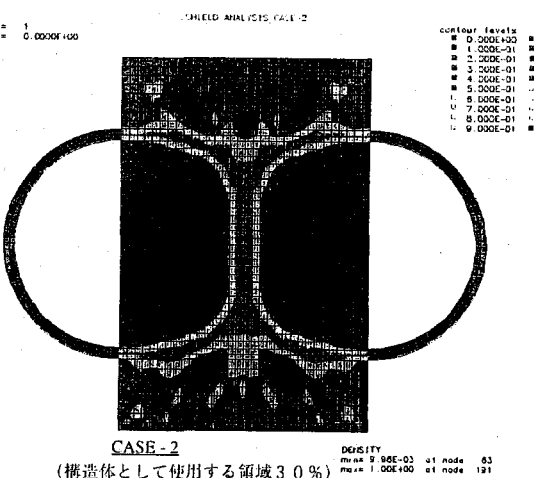


図-6 解析結果

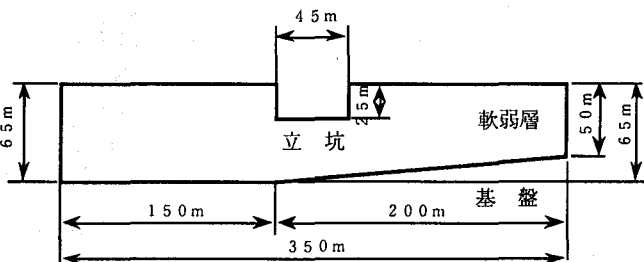


図-7 モデル図

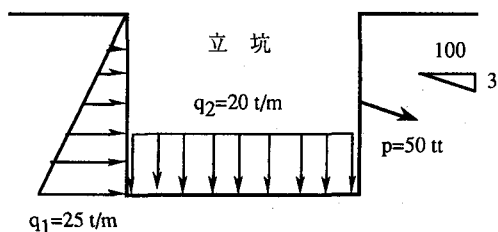
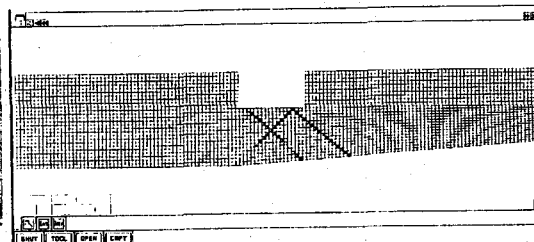


図-8 荷重条件



CASE-5 (構造体として使用する領域10%)

図-9 解析結果

(3) 施工段階を考慮した地盤掘削補強対策工の検討

構造物の安定性を評価する場合、その施工段階における応力状態も考慮しなくてはならない。完成時の安定した構造系に至るまでの施工途中における構造は一般に不安定であり、多くの場合、補強構造などによる構造物の安定化が必要となる。通常的设计では、全体の施工段階の影響は考慮せずに各段階ごとに、その荷重状態、構造形態を評価して、補強構造が決定されている。全施工段階を通して最も有効な構造形態を求めることができれば、効率的な補強対策工が可能となるはずである。以下に全施工段階を考慮して補強対策工の検討を行った事例を示す。

図-10に示すような3段階で地盤を掘削するモデルを用いる。地盤は軟らかい上層部と硬い下層部の2層構造とする。掘削に伴って掘削解放面には掘削相当応力を作用させる。解析手順として、まず、1次掘削、2次掘削、3次掘削それぞれの場合における地盤応力解析を行い、各要素ごとに全ステップを通して最大となる応力度を求める。そして、求められた最大応力度を用いて材料の最適配置を行う。この一連の流れを収束するまで繰り返すことによって、全ステップを通して最適な補強構造が得られる。

解析の結果、構造体として使用する領域が大きいたときには、掘削底盤付近全体を補強するような構造が得られているが、もっとその領域を小さくしていくとアンカー状の構造が現れてくる。

4. まとめ

構造形態の決定のための最適化手法の適用の試みは、まだ研究段階であるが、本報に示した均質化法を用いた手法は、有効な手段であり土木構造物の最適形状設計にも十分適用可能である。

本論文中に使用した解析結果は、(株)くいんとのOPTISHAPEに一部機能追加したものを用いて解析したものである。最後に、本論分の作成にあたって貴重な助言をいただいた(株)くいんとの石井氏に謝意を表す。

<参考文献>

- (1) J.M.Guedes;Nonlinear Computational Models for Composite Materials using Homogenization,P&D dissertation, Univ.of Michigan,1990.
- (2) K.Suzuki,N.Kikuchi;Shape and Topology Optimization Using the Homogenization Method, Comp.Meth.Appl.Mech.Eng.93(1991),pp291-318

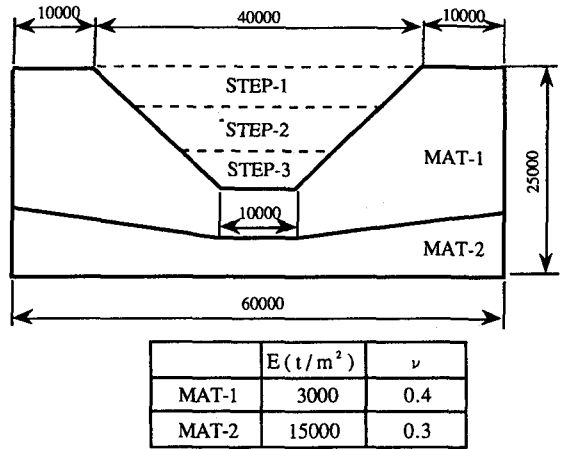
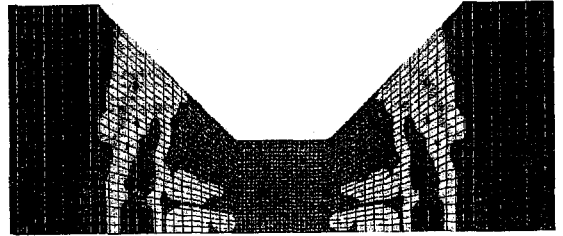
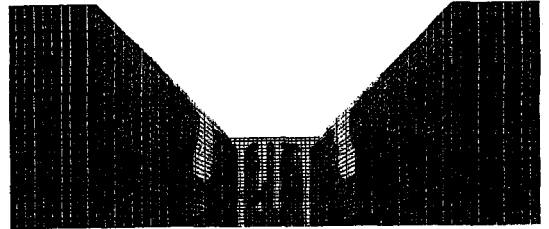


図-10 モデル図



CASE-1 構造体として使用する領域30%の場合



CASE-2 構造体として使用する領域10%の場合

図-11 解析結果