

(43) 適応型成長構造物の提案と形態決定問題

ADAPTIVE METAMORPHOSIS BUILDING AND ITS SHAPE ANALYSIS

林 康裕*、護 雅史*、高橋 郁夫*

Y. Hayashi*, M. Mori* and I. Takahashi*

ABSTRACT; We propose an "Adaptive Metamorphosis Building (AMB)", which adapts itself to change in the society, environment around the building and demand on the building over its life span. It can alter its size, recycle its structural materials and change its functions or layout easily. Thus, its total life is longer than that of present buildings, and ideally, the AMB can be a semi-permanent building. Then, we introduce its design condition and needs(demand and requirement), which constraint the shape or development of the AMB. Finally, we study how to determine the structural shape so that its structural stability is maximized and the design conditions are satisfied.

KEYWORD; Adaptive Metamorphosis Building, Optimal Design, Shape Analysis

1 はじめに

現在、東京等の大都市圏においては廃棄物処理の問題が重要となっており、建築物の解体もその要因の一つである。目まぐるしく変化する社会、経済情勢、あるいは技術革新などの影響により、機能的に価値の低下した建築物は、構造的には利用可能であっても、再利用、増改築を繰り返すことなく解体を余儀なくされる例が少なくない。このような背景のもとで我々は、『適応型成長構造物』を提案し、これを実現することによりトータルなシステムとしての構造物の長寿命化と資源の再利用の促進を目指している⁽¹⁾。

本論文ではまず、適応型成長構造物の概要と適応型成長構造物に求められる種々の設計条件を整理する。次に、適応型成長構造物の設計段階における形態決定問題に焦点をあて、法規や構造物の計画的側面等から決まる増築、改築、補修等の時期や量を設計条件として、構造力学的に安定な構造物の成長過程を含め、構造物の形態をどのように決定すべきかを議論する。

2 適応型成長構造物

『適応型成長構造物』とは、社会・環境の変化や構造物に対する要求事項の変化に適応して、機能はもとよりレイアウト変更、部分的な増改築や構造部材の再利用が容易に行えるようにあらかじめ配慮された構造物で、そのライフスパンの間には図1のように構造物全体の形態をも変容させながら成長していく点に特徴がある。そして、その耐用年数は従来の構造物の最低数倍、理想的には原型はとどめなくとも永遠の寿命を有することが望ましい。しかし、耐用年数が長くなったり、要求事項の変化に応じた形態の変化を許容することによって、通常の構造物にはない(法規・計画・構造上の)設計条件が適応型成長構造物に課せられることになる。ここではまず、その設計に反映すべき条件を整理することにより、適応型成長構造物の特徴を浮き彫りにするとともに、実現のための必要条件を明確にする。

2.1 ライフサイクルと自己組織性

耐用年数が高々数十年の既存の構造物のライフサイクルにおいては、その保全や補修はトラブルの兆候が現れた後に、その診断と対処という形の、いわば後追的な対処方法がとられていることが多い。このような後

*清水建設(株)大崎研究室 : Ohsaki Research Institute, Shimizu Corporation

追的な対処方法では、とても大幅な供用年数の増加は望めない。これに対して適応型成長構造物は、最低でも数100年にも及ぶ耐用年数を有する長寿命構造物の側面を持っている。従って、適応型成長構造物の実現には、設計段階からそのライフサイクルそのものを設計することが不可欠である。そして、適応型成長構造物は、そのライフサイクルにおいてアメーバ的な自己組織化能力を内在するように設計されなければならない。適応型成長構造物の自己組織化能力は、(1) 構造形態の変化(解体、増築)、(2) レイアウトや機能の変更(改築、改築)、(3) 保全と補修、(4) 耐久性、(5) リサイクル性によって保たれる。つまり、適応型成長構造物は、成長(増築)・代謝(改築、補修、改築や用途変更)・排泄(部分的な解体)を効率よく繰り返して外的変化に適応できる柔軟性をもったシステムとする必要がある。そして、これらの因子をどの様に組み合わせて、適応型成長構造物のライフサイクルを設計するかが、供用期間を増加させる上で重要となると考えられる。なお、以上の5つの因子のうち、(1)の構造形態の変化については、いままで積極的に考慮されることがなかった因子であるとともに、我々が提案する適応型成長構造物のもっとも特徴的な因子である。構造形態とその発展プロセスを決定する方法論は、筆者等の最も興味のあるところであり、詳細については次節で議論する。

一方、構造物は、概略、図2のような構成要素に分けて考えることができる。このような個々の製品レベルでは、Product Lifecycle Assessment(PLA)という考え方が適用されることがある⁽²⁾。PLAは、適正処理困難物に対処する必要上生まれて来た概念であり、資源収集から製品の最終処分までを含めた総合的な環境影響評価を行うものである。ただし、建物のように多くの物質と製品で構成されている場合、PLAを総合的に判断するようなBuilding Lifecycle Assessment(BLA)のような考え方のもとで、総合的に判断される必要性がある。例えば、工業製品の長寿命化を実現するための一つの方法論として、材料自体の耐久性を高める方法がとられることが多い。しかし、複雑な社会システムの中で長寿命化するためには、構成部位ごとの耐用年数を増加させることが、必ずしも構造物全体の供用年数を増加させることにはならない。もちろん、材料や製品の耐久性が構造物のライフサイクルにおける順応性を阻害するものではない。耐久性が増して供用年数が増加

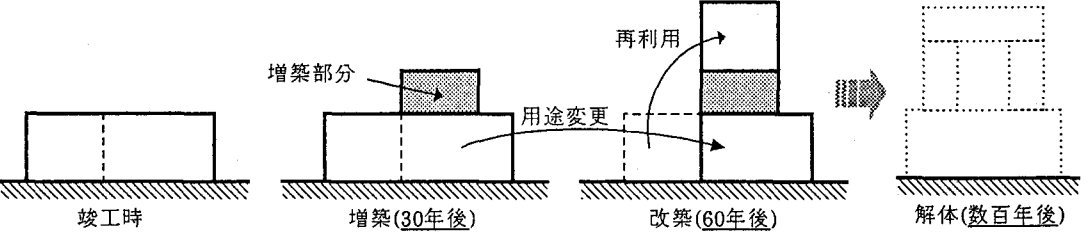


図1 適応型成長構造物の概念図

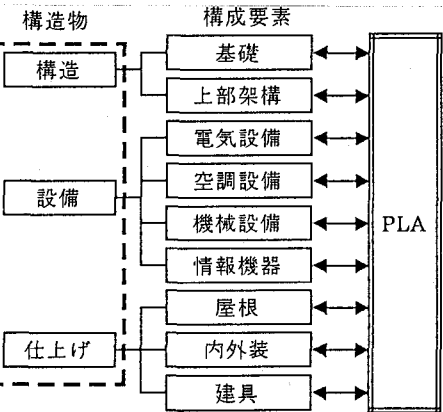


図2 構造物のPLA

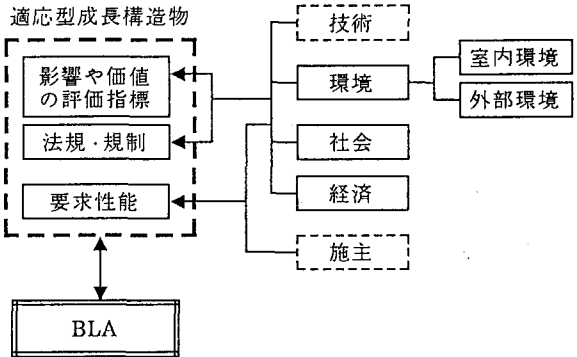


図3 適応型成長構造物のBLA

していれば、リサイクルの可能性は大となる。例えば、建築物群なども含めた大きな物質代謝系でのリサイクルが考えられるならば、個々の製品の耐久性が確保されている方がリサイクルの可能性は高まる。自己組織性に必要なことは、BLAを行う際の物質代謝系をできるだけ広く拡張して考え、総合的に判断することである。

2.2 自己組織性への影響因子

既往の適応型構造物は外力等に対する構造的な適合に限定されていることが殆どである。これに対して、適応型成長構造物は図3のように、将来の経済、社会、環境等の変化に対応できる、あるいは、適合しやすいものでなくてはならない。そこで、適応型成長構造物の自己組織化に対して影響を及ぼす因子のうち主要なものを考えておく。

[環境] 環境問題については、構造物の室内環境の制御技術の進歩に関するものと、構造物自体及びその使用者が構造物の周辺環境に対するインパクト評価に関するものの2つのカテゴリーに分類できる。特に、後者に関しては、(i) 資源の供給と処理、(ii) 環境の保全、(iii) 資源利用等のどの様な評価指標を採用するか、また、将来的により厳しくなるであろう法規や規制事項にどのように対応していくことができるかが重要となる。

[社会] 建物の用途に対する予測、使用者のライフスタイルやニーズの変化に対する対応能力を評価する必要がある。また、竣工時に存在しなかった法規が改築時に制約条件として考慮しなければならないファクターとなり得る。さらには、適応型成長構造物の実現には、税制、保険制度のありかたも重要な影響因子となると考えられる。

[経済] 建物やその敷地の価額予測評価手法、老朽化にともなう改築や補修等のメンテナンスコストの予測評価などが必要である。

以上のように、適応型成長構造物の自己組織性に影響を及ぼす影響因子は、適応型成長構造物に対する要求性能や法規や規制、影響因子や価値の評価指標の形に集約されるであろう。これらの影響因子は、時間とともに変化するものであり、その長期予測評価手法の開発が重要となる。

3 構造形態解析

構造物のライフスパン中の増改築・部分解体や再利用スケジュールを、構造物の概念設計の段階から立案するための方法論を確立することを最終目標として、以下のような形態決定手法を提案する。

3.1 問題の定式化

まず、図4に示すように建物を構造的に分割し、2次元平面応力状態の有限要素でモデル化する。要素厚さ d_j は要素位置における構造物の奥行きに相当するので、全ての要素寸法が等しいものと仮定すれば、構造物の要素位置における空間量に対応する。従って、以下では d_j を局所空間量と呼ぶ。モデル化は、全ての増改築ステップの構造物に対して同時に行う。図4で、 i は増改築ステップ、 $j(i)$ と $l(i)$ は i ステップにおける要素番号と自由度番号を意味する。また、 i ステップの期間は t_i であり、 P_l は節点外力である。

今、評価関数を各ステップの歪みエネルギー U_i の累積値とし、以下で説明するような制約条件等を考慮すれば、汎関数 J は次のように表される。そして、適応型成長構造物の形態すなわち空間分布は、次式によって表される汎関数 J を停留させる解 d_j として求められる。

$$J = \sum_i \alpha_i \cdot t_i \left(U_i(E_j, d_j, u_l) + \sum_l \lambda_l \{ P_l - F_l(E_j, d_j, u_l) \} + \mu_i (D_i - \sum_j d_j) + \sum_j f_j(d_j, d_j^L, d_j^U) \right) \quad (1)$$

ここで、 F_l は要素内力の等価節点力、 D_i は i ステップにおける適応型成長構造物の総空間量である。

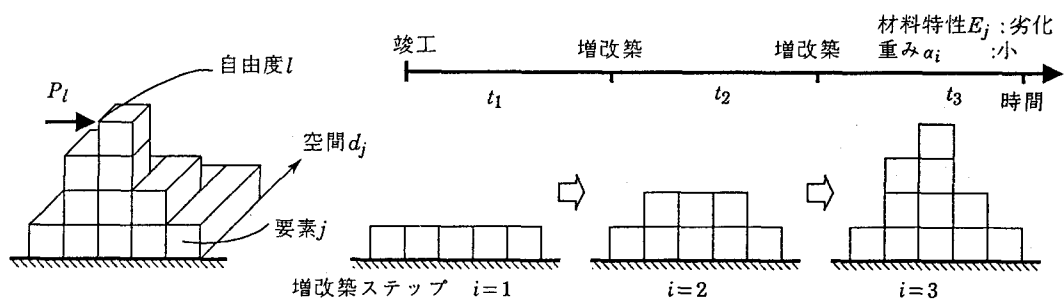


図4 適応型成長構造物のモデル化

[力の釣合い] 各増改築ステップでの節点における力の釣合は、Lagrange 乗数 λ_i を用いて、(1) 式の () 内第 2 項のように汎関数に取り込む。

[増改築プロセスと総空間量と局所空間量の制約条件] 適応型成長構造物の機能上必要となる総空間量 D_j 、局所空間量 d_j の分布 (空間の量と位置) と増改築時期 (すなわち t_i) は、すべて設計変数とすべきかもしれないが、本論文の定式化においては、 t_i と D_j はあらかじめ与えるものとした。そして、各ステップの総空間量に関する制約条件は、(1) 式 () 内の第 3 項のように Lagrange 乗数 μ_i を用いて汎関数にとりこまれる。一方、各要素位置の局所空間量 d_j については、2 節で述べたような法規や構造物の計画的側面から定まる制約条件が課せられる。(1) 式においては () 内の第 4 項のように、 d_j の制約条件として下限値 d_j^L と上限値 d_j^U を設け、この範囲外では歪みエネルギーが急激に増大するような関数形を持つ Penalty 関数⁽³⁾によって表現した。なお、これらの制約条件が停留解に与える影響については、別途、制約条件を変化させた感度解析等を行って最適形態に対する影響度を調べる必要があると考えられる。

[時間に関する重み α_i] 社会や経済等の変化の長期的予測を行うことは、現段階では非常に困難である。従って、設計段階に近い歪みエネルギー程重みを大きくし、不確定性の大きい遠未来程重みを小さくする必要がある。ここで (1) 式より明かなように、 α_i によって重み付けを行うことは、 t_i を見掛け上変えることに他ならない。

[材料特性の経時変化] 異なる増改築ステップにわたってに存続する要素については、 d_j を最初に構築された時点の d_j の従属変数とする。ただし、材料特性の経年劣化や地震等の災害による構造物の損傷に起因した材料特性の変化をモデル化する場合、例えば、 E_j を各時間区間における材料特性の期待値で代表させることが考えられるが、以下の計算例では簡単のために変化しないものと仮定した。

[再利用とユニット化] 材料レベルでの再利用については考慮しないが、あるまとまりを持った構造体の再利用を考慮する。具体的には、異なる増改築ステップ間で、局所空間量 d_j と材料特性 E_j を同じとなるように、再利用された構造体の d_j と E_j を再利用前の構造体の d_j と E_j の従属変数とすることによってモデル化できる。また、構造体のユニット化についても同様に、同一増改築ステップ内で局所空間量や材料特性が同じとなるように従属変数化することによってモデル化できる。

以上から本手法は、『適応型成長構造物』の最適化の評価基準として、2 節で論じたような社会、環境、経済等の設計要素を考慮した計画的側面から課せられる建築物の空間的制約条件や増改築時期をもとに、構造力学的に安定な空間分布を決定するものであるといえる。

3.2 数値計算例

増改築プロセスのモデルとしては、図 5 に示すような 3 種類のモデルを考えた。すべてのモデルの最終状態はいずれも 6 つの FEM 要素が上下方向に積まれた直線的な形状をしている。ただし、Model-A では最終形状

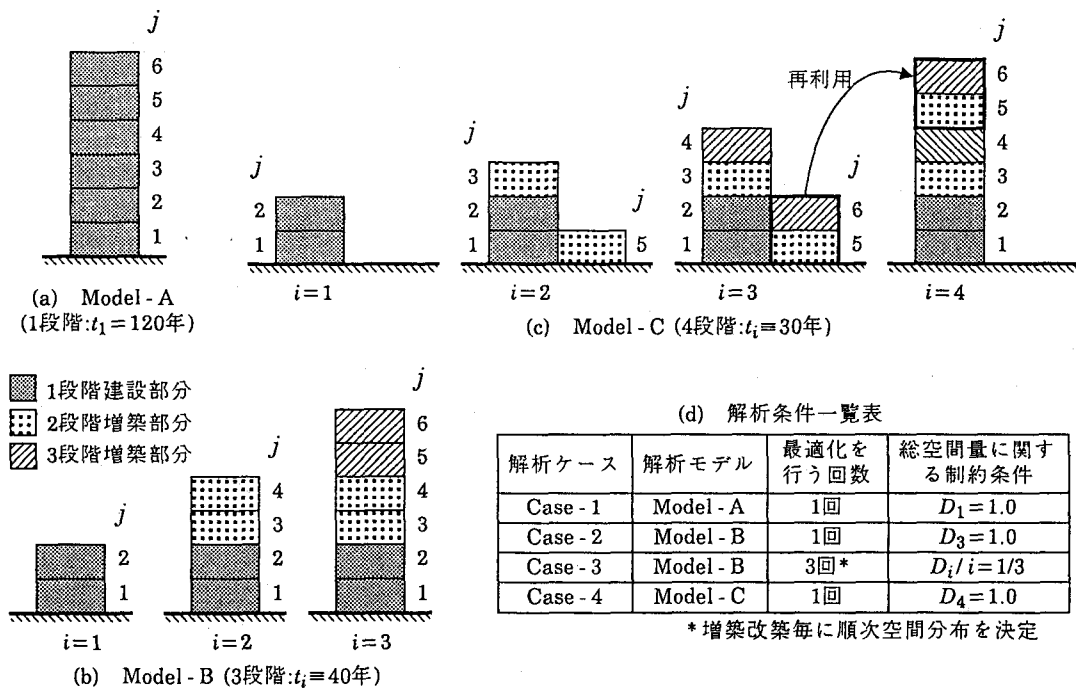


図5 解析モデル

を竣工時に実現し、その耐用年数の間その形状を保つのに対して、Model-BとModel-Cでは、徐々に増改築を行って最終形状に達するものである。Model-Cは、4段階目において構造体の再利用が行われている点に特徴がある。それぞれのFEM要素の境界条件は全て水平ローラーとして、水平方向の自由度だけを考えた。一方、それぞれの増改築モデルの総耐用年数は全て同じ(120年)とし、簡単のために、その間に材料特性の変化はないもの仮定した。また、最適化を行う際の d_j の初期値は全ての要素で同一とした。そして、各ステップにおいて構造物にかかる荷重は水平方向の節点力として与え、1FEM要素あたりに作用する外力が等しくなるように与えた。形態の最適化を行う際の総空間量の制約条件は、最終形状が決まればCase-2とCase-4の途中の増改築ステップの空間量は自動的に決定されるので、最終状態の D_i のみ制約した。Case-3については、各増改築ステップ毎の総空間量をあらかじめ与え、増改築毎に増改築部分についての空間分布を決定した。さらに本数値解析例では、簡単のために、全てのケースについて局所空間量の制約条件を課さなかった。なお、停留解が局所空間量の制約条件の範囲外になる場合には、境界値が停留値となる性質がある⁽¹⁾。

図6に得られた最終形状とその特性を比較して示す。まず、Case-1の空間分布は下層程大きくなっているが、これは上層から伝達されてくるせん断力が累積されてくるためであり、単位空間当りの歪みエネルギーでみると、その分布は一様となっている。言いかえると、制約条件がなく増改築がない構造物にとっては、単位空間当りの歪みエネルギーが等しくなるような形状がエネルギー的に最も安定している。また、Case-3はあらかじめ増改築によって増加する空間量を固定し、増築部分の局所空間量をその増改築ステップの歪みエネルギーが停留するように決定したものである。その結果、後続の増改築部分と接する要素($j=2, 4$)で歪みエネルギーが大きくなっており、Case-3のようなその場限りの形態決定法には無理があることが指摘できる。これに対して、(1)式に基づいて空間分布を決定したCase-2では、全てのステップで歪みエネルギーが過大とならないように途中の増改築ステップの形状が決定されるので、最終形状はModel-Aに比較的近い結果となり安定している。同様に、構造体の再利用も考えたCase-4においても、Case-2と同様に最終形状で歪みエネルギーが過大とならないように空間分布が決定されており、Case-2とCase-4は非常に近い結果となっている。

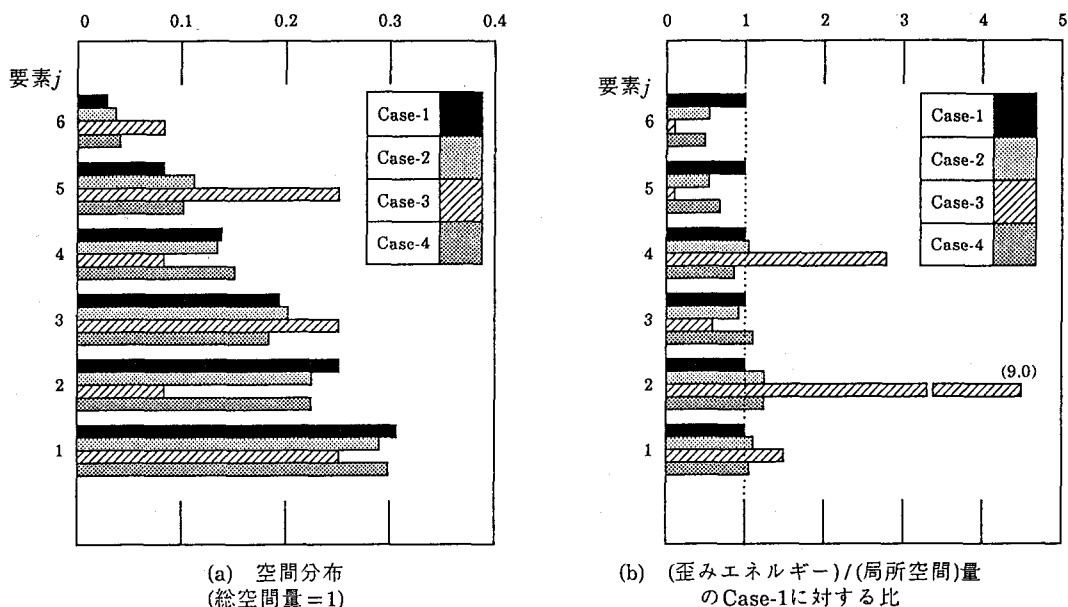


図6 最終状態の特性の比較

4 まとめと今後の課題

本論文では、時間の経過とともに変化する社会や環境に適応して構造体を自己組織し、成長しながら存続し続ける適応型成長構造物の基本的な概念を提案するとともに、その実現に不可欠な形態決定のための方法論を展開した。提案手法は、適応型成長構造物のライフサイクルにおいて機能上必要となる空間的な設計条件、材料特性の経時変化、構造体の再利用やユニット化を考慮できる手法である。

このような形態の最適化手法は、拡張等の形態変更を考慮した設計を行なう場合には不可欠な解析技術となると考えられる。しかし、非線形計画法によって得られる最適解は、多くの場合ある特殊な条件下での解に過ぎない。そして、現段階では、空間的な制約条件として考慮される環境的配慮や社会や経済状況の長期予測は、客観性と合理性を持って定めることが困難である。従って、予条件や制約条件が変化した時にどの程度構造形態を変更することができるのかの方がより重要となるはずである。

一方、本論文では構造的安定性の観点から、評価関数として歪みエネルギーを用いた。しかし、適応型成長構造物の評価関数としては、資源再利用性や省エネルギー性等の他の評価関数を取り入れた多目的最適問題としての取扱いが必要となるであろう。

以上のような観点から、今後とも本当の意味でよい構造物を社会に供給するための方法論の一つとしても、適応型成長構造物の形態決定問題を考えていきたい。

参考文献

1. 護雅史、林康裕：形態変化を考慮した構造物の最適化に関する研究(適応型成長構造物の実現にむけて)、日本建築学会大会梗概集、1992年8月
2. 末石富太郎他：環境科学シンポジウム1991、IV 都市代謝系の新しい評価規準、環境科学会誌5(2):pp.139-148、1992年
3. 今野浩、山下浩：非線形計画法、日科技連