建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究

- 不確定性のライフサイクル評価へ及ぼす影響 -

LIFE CYCLE DESIGN FOR BUILDING STRUCTURES

- Effects of uncertainties -

大森 博司^{*1}, 小林 春之^{*2}, 内藤 雅子^{*3}

Hiroshi OHMORI, Haruyuki KOBAYASHI and Masako NAITO

Recently, the environmental impact has been required to be explicitly taken into account in a life cycle design of building structures besides the initial economical efficiency, which has been ordinarily required up to the present days. Consequently, it is important not only to design the building structures so as to be safe as well as economical at the initial stage of completion of the building but also to pay attention and take into account the total behaviors of the designed and constructed building structures during all stages of their life cycles. The former paper by the authors has proposed the way to deal with the life cycle design of building structures with consideration of a hierarchy according to the ranks of building construction systems by using genetic algorithms as the optimization scheme with respect to both ecology and economy for evaluations. Present paper proposes the way to realize the life cycle evaluation of building structures with consideration of the uncertainties in repair cycles.

Keywords: life cycle design, repair cycle, uncertainties, Optimization, Genetic Algorithm

ライフサイクルデザイン, 修繕周期, 不確定性, 最適化, 遺伝的アルゴリズム

1 序

近年の地球環境問題の深刻化に伴い, 建築分野においても持続可能な発展を援護する資源の用い方をすべきであるという認識が高まっている。日本建築学会が提唱する「百年建築」はこの流れに沿ったものである。¹⁾このように, 従来の建築構造物の設計において用いられてきた, 初期投資費用の多寡のみに偏重しない, 現在および将来に亘って経済的かつ環境配慮に優れたものを追求する新しいパラダイムが求められている。

一方, 近年遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) 等の最適化手法を用いて建築構造物の設計を支援する設計支援の手法が提案されている。そのような手法は, 従来熟練した専門家の経験や勘を必要としていた建築構造物の設計に, 計算機の力を生かすものであり, これにより, 施主や設計者等の意思決定者は, 数学的な裏づけを伴う合理的な設計案を得ることができる。

持続可能な建築構造物の設計手法として, 最適化手法を援用したライフサイクルデザイン (Life Cycle Design, LCD) 手法の研究は近年いくつか報告されている^{2), 3)}。そこでは, 建築物の構成要素や, 維持保全計画を設計変数として最適化を行うことにより, 従来の建築構造物の設計案よりもサステナブルな建築構造物を提案できるとしている。これらの研究では, 多くの場合建築構造物の全寿命における種々の事象が特定できるものとして評価が行われている。しかしながら, 建築構造物の LC の多くのステージは設計時よ

りなお将来における事象であり, 本来確定的な評価はなし得ない。建築構造物の LC 評価が有する不確定性がその評価値にどのような影響をもたらすかを知ることは設計者や施主等の意思決定者にとって興味深いところであろう。

本論文では, まず既報³⁾で提案した LC 評価手法について概説し, 建築構造物を確定的に取り扱って最適化手法を用いた場合の設計例を示す。そして, その設計例に対し, 不確定性を考慮した LC 評価を行った場合の LC 評価値の変化を考察することで, 設計要素の持つ不確定性の LC 評価に及ぼす影響について明らかにすることを試みる。

2 確定的なライフサイクル評価手法

建築構造物を企画・設計・施工し, その建築構造物を維持管理して, 最後に解体・廃棄するまでの, 建築構造物の全生涯に要する費用の総額を, 建築構造物の LC コスト (Life Cycle Cost, LCC) といい, 全生涯において発生する CO₂ 排出量の総量を建築構造物の LCCO₂ という。本論文では, 建築構造物の評価尺度として LCC を用いるが, LCCO₂ についても同様の手法で評価可能である。

2.1 イニシャルコスト

イニシャルにおける部材 i のコスト評価 $C_{0,i}$ は, 素材 j を使用する部材 i の重量 W_{ij} を用いて次式で算定される⁴⁾。

$$C_{0,i} = \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (1)$$

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*2 竹中工務店 修士 (工学)

*3 トヨタテクニカルディベロップメント 修士 (工学)

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Takenaka Corporation, M. Eng.

Toyota Technical Development Corporation, M. Eng.

ここに

c_j : 素材 j の製造および流通に関する単価

よって、建築構造物全体のイニシャルコスト C_0 は、次式で算定される。

$$C_0 = \sum_i C_{0,i} = \sum_i \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (2)$$

2.2 ランニングコスト

ランニングコストの評価は、部材別のイニシャルコスト評価に、劣化関数により算定される部材別の修繕率 r_{ik}^* を乗ずることによって算出する⁵⁾。時刻 t における部材 i の k 回目の修繕に関するコスト C_{ik} は、次式で算定される。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3)$$

ここに

ν : 割引率

γ^q : 修繕率とコストとの関係を示すパラメータ

部材 i の修繕を期間 $t_{p,i}$ ごとに周期的に行うとすると、式 (3) は次式のようになる。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^{k \cdot t_{p,i}}} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (4)$$

ここでは、 $\nu = 0$, $\gamma^q = 1$ として評価を行う。

よって、部材 i の時間軸において累積したコスト C_i は、次式で算定される。

$$C_i = \sum_{k=1}^{n_i} C_{ik} \quad (5)$$

ここで、修繕回数 n_i は建築構造物の寿命 t_l と部材 i の修繕周期 $t_{p,i}$ を用いて次式で表現できる。

$$n_i = \left\lceil \frac{t_l}{t_{p,i}} \right\rceil - 1 \quad (6)$$

ただし、 $\lceil \cdot \rceil$ は Ceiling 関数を表現しており、 $\lceil x \rceil$ の場合 x 以上 $x+1$ 未満の整数を表す。1 を減じているのは、イニシャルとの重複を避けるためである。

2.3 構法的序列による階層化の考慮

構法的序列による階層化³⁾ とは、建築構造物を構成する部位の順序関係を示す概念である。これは LC 評価の観点から言えば、建築構造物を造る順序であり、修繕のし難さの順序でもある。式 (5) に示したランニングコストは、構法的序列による階層化の観点から見て支持側の部材の修繕の影響を考慮していない。被支持側の部材は支持側の部材の修繕によってシナリオに制約を受ける。一般に支持側の部材の修繕をするためには被支持側の部材は交換せざるを得ない。例えば、構造躯体とその仕上材がある時、構造躯体の修繕を行うためには仕上材を破棄する必要がある。

LC 評価 を適切に行なうためには、支持側の部材の修繕を行う際に被支持側の部材は除去される現象を把握することが望まれる。以降、支持側の部材、例では構造躯体を構法的に上位、被支持側の部材、同例では仕上材を構法的に下位と呼ぶこととする。図 1 に構法的序列による階層化によるシナリオの制約の様子を示す。 t_p^u は構法的序列第 u 位部材の修繕周期を、 $t_{stopover}^{u:u-1}$ は構法的序列第

図 1 構法的序列による階層化を考慮したシナリオ

$u-1$ 位部材の修繕周期中の第 u 位部材の $\left\lceil \frac{t_p^u}{t_p^{u-1}} \right\rceil$ 回目の修繕後から時刻 t_p^{u-1} までの時間を示す。

構法的第 u 位の部材 i がそれより上位の第 $u-1$ 位の部材の修繕周期 t_p^{u-1} 中に発生するコスト $C_i^{u:u-1}$ は式 (4) を用いて次式で表現できる。

$$C_i^{u:u-1} = \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} \quad (7)$$

ここで、第 u 位部材 i の修繕回数 $n_i^{u:u-1}$ は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

$$n_i^{u:u-1} = \left\lceil \frac{t_p^{u-1}}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (8)$$

建築構造物の躯体を構法的序列第 1 位とすると、躯体の修繕周期 t_p^1 すなわち建築構造物の寿命 t_l 中に発生する第 u 位の部材 i のランニングコスト C_i は次式で算定できる。右辺最終項はイニシャルとの重複を避けるため減じている。

$$C_i = \prod_{x=1}^{u-2} n_i^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=1}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n_i^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:1}} C_{ik} - C_{0,i} \quad (9)$$

ここで、修繕回数 $n_i^{a:b}$, $n_{stopover,i}^{a:b}$ ($a > b$) は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

$$n_i^{a:b} = \left\lceil \frac{t_p^b}{t_{p,i}^a} \right\rceil - 1 \quad (10)$$

$$n_{stopover,i}^{a:b} = \left\lceil \frac{1}{t_{p,i}^a} \left\{ t_p^b - \left(\left\lceil \frac{t_p^b}{t_{p,i}^a} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_p^a \right\} \right\rceil - 1 \quad (11)$$

よって、建築構造物全体の時間軸において累積したランニングコスト C_r は、上式を用いて次式で算定される。

$$C_r = \sum_i C_i \quad (12)$$

2.4 ライフサイクル評価

建築構造物は全供用期間に亘って多種多様なコストが発生するが、本研究では建築構造物全体のイニシャルコスト C_0 に、時間軸において累積した修繕によるランニングコスト C_r を加算したものを、建築構造物の LCC とし、 C_{lc} で表す。

$$C_{lc} = C_0 + C_r \quad (13)$$

2.5 評価対象期間の考慮

本研究において時間的なパラメータである躯体の耐用年数を操作するため、躯体の耐用年数すなわち建築構造物の寿命が異なる代替案を比較する必要が生じる。

建築構造物の寿命の異なる複数の設計案を比較するためには、LCC だけでなく、確定値として評価対象期間 $t_{eval}^{(4)}$ を設定し、評価対象期間中に建築構造物が繰り返し利用されるとして、拡張した LCC を用いて評価することが望まれる。評価対象期間を構造的序列による階層の第 0 位とすれば、 $t_{eval} = t_p^0$ として式 (13) は式 (9) を用いて次式のように拡張される。ただし次式では、LC 評価期間全体を対象とするため式 (9) におけるイニシャル評価の重複は考慮する必要はない。

$$C_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} n^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:0}} C_{ik} \right\} \quad (14)$$

3 不確定性を考慮したライフサイクル評価手法

LCD を行う設計者は、設計時に修繕シナリオを提案する。しかしながら、建築構造物の寿命は一般に一所有者の使用期間よりも長いものであり、また、多数の人々が関与するものであるため、修繕シナリオが提案通りになされない可能性がある。本節では、このような修繕周期が不確定であると考えた場合の LC 評価手法を説明する。

3.1 修繕確率の考慮

Kong ら⁷⁾ は修繕の不確定性を考慮した場合の評価手法を次のように提案している。

任意の修繕確率、すなわちある時刻に修繕を行う確率の確率分布が確率密度関数 (probability density function, PDF) によって表現されるものとする。確率の評価を行う際に、連続変数である確率密度関数を用いると複雑になるため、離散変数に対応する確率関数 (probability mass function, PMF) によって置換した修繕時刻の確率質量関数によって計算する。連続変数であるものを離散変数に置換する場合には、離散化方法によって評価値が変化するため、離散化方法は重要である。

相対時間の任意変数 $T_i (i = 1, \dots, n)$ の分布が既知であるとする。時間 T_i における修繕 i の発生確率は離散的な時間軸で表現することができる。これに合わせて連続的な確率密度関数を確率関数に変換する。 T_i は相対時間で表現されたものであるため、絶対時間の表現 T_i^* に変換する。 T_i^* は次式のように表現することができる。

$$T_i^* = T_1 + T_2 \cdots + T_i = \sum_{j=1}^i T_j \quad (15)$$

まず T_1^* と T_2^* の 2 回の修繕について考える。2 回目の修繕が時刻 t_2^* で行われる場合の確率関数は次式のように定義される。

$$P[T_2^* = t_2^*] = P_{T_1, T_2}[t_1, t_2] = P(T_1 = t_1 \text{ and } T_2 = t_2) \quad (16)$$

ここで、時刻 t_L^* に 2 回目の修繕が行われる確率は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} P[T_2^* = t_L^*] &= \sum_{\text{if } t_1+t_2=t_L^*} P_{T_1, T_2}[t_1, t_2] \\ &= \sum_{\text{all } t_1, t_2} P_{T_1, T_2}[t_1, (t_2 = t_L^* - t_1)] \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $P[T_2^* = t_L^*]$ は時刻 t_L^* において 2 回目の修繕が行われる確率を表し、 $\sum_{\text{if } t_1+t_2=t_L^*}$ は $t_1 + t_2 = t_L^*$ を満たす全ての場合の総和を意味する。式 (17) では結合確率質量関数を用いて評価できる。 n 回目の修繕を行う一般的な場合は次式のように表現することができる。

$$\begin{aligned} P[T_n^* = t_L^*] &= \sum_{\text{if } t_1+\dots+t_n=t_L^*} P_{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n}[t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n] \\ &= \sum_{\text{all } t_1, \dots, t_n} P_{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n}[t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, (t_n = t_L^* - \sum_{i=1}^{n-1} t_i)] \end{aligned} \quad (18)$$

この場合においては任意変数である $T_1, T_2, \dots, T_n$ に基づいた結合確率関数が必要となる。

図 2 は時刻 t_L^* における異なった修繕シナリオの確率分布関数を表している。ここで、修繕シナリオとは更新周期の集合、すなわち各修繕時刻を示したものである。修繕行為を確定的に扱う場合には対象モデルに対する修繕シナリオは 1 つに決定されるが、ここでは不確定性を考慮するために修繕シナリオは複数存在する。単位時間の倍数で表される時刻 t_L^* でのそれぞれの修繕確率は簡単に計算することができる。ここで、ある修繕は 1 回のみ行われるため、ある時刻における修繕確率は単位時間あたりの期待修繕回数となる。この時刻 t_L^* での単位時間あたりの期待修繕回数は時刻 t_L^* での修繕確率を重ね合わせることで評価できる。たとえば、 $P_{R_2}(t_L^*) = 0.2$ 、 $P_{R_m}(t_L^*) = 0.1$ であり、時刻 t_L^* でのその他の全ての修繕確率は 0 であるとする、その場合の時刻 t_L^* での単位時間あたりの期待修繕回数は 0.3 である。全ての修繕サイクルを考慮した場合、時刻 0 から t_L^* までの単位時間あたりの期待修繕回数を評価するために、時間 $(0, t_L^*)$ における期待累積修繕回数 $E[N_i(t \leq t_L^*)]$ は次式で評価できる。

$$E[N_i(t \leq t_L^*)] = \sum_{\text{all } i} P[T_i^* \leq t_L^*] = \sum_{\text{all } i} \sum_{\text{all } t \leq t_L^*} P[T_i^* = t] \quad (19)$$

上記のようにして得られたある時刻の期待修繕回数とその修繕における評価値を乗ずることにより、ある時刻での期待修繕評価値を

図 2 Probability of any rehabilitation cycle⁷⁾

得ることができる。これを評価対象期間すべてについて累積することで、期待 LC 評価値を得ることができる。

3.2 構法的序列による階層化の考慮

Kong らの手法は仕上材のない土木構造物に対するものであり、これを建築構造物に適用するためには、構法的序列の考慮が必要である。以下、構法的序列を考慮した評価手法を述べる。

まず、上位に存在している 2 部材、つまり部材 $i-2$ および部材 $i-1$ について構法的序列を考慮した場合を示す。部材 $i-2$ および部材 $i-1$ の構法的序列を考慮しない場合の年当たりの期待修繕回数は図 3 に示したようになる。

図 3 各部材の修繕確率

ここで、構法的序列の影響が生ずるのは部材 $i-2$ の修繕時期である 48 年から 52 年の部分である。この間、部材 $i-1$ の修繕はない。しかし、部材 $i-1$ は、部材 $i-2$ の修繕に伴って更新されているため、部材 $i-1$ の次の修繕はこの時刻から計算を行わなければならない。部材 $i-2$ の 1 回目の修繕を行った後の部材 $i-1$ の 1 回目の修繕の修繕確率は次式により求められる。

$${}_{i-2,1}P_{i-1,1}(t=66) = P_{i-2,1}(t=48) \cdot P_{i-1,1}(t=66-48) = 0.05 \cdot 0.1 \quad (20)$$

ここで、 ${}_{i-2,1}P_{i-1,1}$ の左下添え字の左側の $i-2$ は影響を考慮した部材を、右側の 1 は影響を受けた部材の 1 回目の修繕の影響を考慮しているということを示している。右辺には左下添え字はないが、これはどの部材の影響も考慮していないことを示している。また、左辺、右辺共に右下添え字の左側の $i-1$ は修繕確率を考えている部材を、右側の 1 は影響を受けた後の 1 回目の修繕であるということを示している。式 (20) は部材 $i-2$ と部材 $i-1$ についての一般的な場合について示すと次式のようにになる。

$${}_{i-2,m}P_{i-1,n}(t) = P_{i-2,m}(T_{i-2,m}) \cdot P_{i-1,n}(t - T_{i-2,m}) \quad (21)$$

ここに、

- m : 部材 $i-2$ の修繕回数
- n : 部材 $i-1$ の部材 $i-2$ の m 回目の修繕からの修繕回数
- $T_{i-2,m}$: 部材 $i-2$ の m 回目の修繕を行った時間

上式を適用し、部材 $i-2$ の修繕の影響を考慮した部材 $i-1$ の年当たりの期待修繕回数は図 4 のようになる。図 4 において白で示した部分が部材 $i-2$ の修繕により強制的に更新される確率である。

次に部材 $i-2$ 、部材 $i-1$ および部材 i の 3 部材の場合について述べる。部材 i は構法的序列において最下位であるために部材 $i-2$ および部材 $i-1$ の影響を共に受ける。3 部材についての構法的序列を考慮した場合は、部材 $i-2$ の影響を受けた部材 $i-1$ 部材について構法的序列の考慮を行うことで部材 i は上位 2 部材

図 4 部材 $i-1$ の修繕確率 (構法的序列を考慮した場合)

の影響を考慮した評価を行うことができる。したがって、図 4 に示した部材 $i-1$ の修繕確率の部材 i への影響を考えればよい。部材 i の部材 $i-1$ の修繕後の修繕確率は式 (21) を用いて計算を行うことで、評価を行うことができる。しかし、部材 i と部材 $i-1$ は同時期に修繕を行うことがある。例えば部材 i と部材 $i-1$ は共に 20 年で修繕を行う可能性がある。部材 $i-1$ の 20 年目に修繕を行う前に、部材 i の修繕を行っているという場合と部材 i を 20 年目以降に修繕する可能性が存在する。そのため、これらの確率を評価しなければならない。まず、部材 i の修繕よりも前に修繕を行う場合は次式によって評価することができる。

$$\begin{aligned} {}_{i-1,1}^{\text{before}}P_{i,2}(t=20) &= P_{i,2}(t=20) \cdot P_{i-1,1}(t>20) \\ &= P_{i,2}(t=20) \cdot \sum_{t>20} P_{i-1,1}(t) \\ &= 0.37 \times 0.3 \\ &= 0.111 \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 ${}_{i-1,1}^{\text{before}}P_{i,2}$ の左上添え字の before は部材 $i-1$ の 1 回目の修繕より前に部材 i の修繕を行う確率であることを示している。部材 i を部材 $i-1$ の修繕よりも前に修繕を行う確率である式 (22) を時刻 T の場合について一般化すれば次式で表される。

$$\begin{aligned} {}_{i-1,m}^{\text{before}}P_{i,n}(T) &= P_{i,n}(t=T-T_{i-1,m-1}) \cdot P_{i-1,m}(t>T) \\ &= P_{i,n}(t=T-T_{i-1,m-1}) \cdot \sum_{t>T} P_{i-1,m}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $T_{i-1,m-1}$ は部材 $i-2$ の $m-1$ 回目の修繕を行った時刻を示している。

次に、部材 $i-1$ の修繕によって修繕を行う前に更新される部材 i の修繕確率について示す。20 年目の例については次式で表せる。

$$\begin{aligned} {}_{i-1,1}^{\text{after}}P_{i,2}(t=20) &= P_{i,2}(t \geq 20) \cdot P_{i-1,1}(t=20) \\ &= \sum_{t \geq 20} P_{i,2}(t) \cdot P_{i-1,1}(t=20) \\ &= (0.37 + 0.30 + 0.09) \times 0.4 \\ &= 0.304 \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 ${}_{i-1,1}^{\text{after}}P_{i,2}$ の左上添え字の after は部材 $i-1$ の 1 回目の修繕の後に修繕を行うはずであった部材 i の修繕を行う確率を示している。式 (24) を時刻 T の場合という一般的な場合について

次式に示す。

$$\begin{aligned} \text{after}_{i-1,m} P_{i,n}(T) &= P_{i,n}(t \geq T - T_{i-1,m-1}) \cdot P_{i-1,m}(t = T) \\ &= \sum_{t \geq T - T_{i-1,m-1}} P_{i,n}(t) \cdot P_{i-1,m}(t = T) \end{aligned} \quad (25)$$

これらのことを考慮し、部材 $i-1$ の影響を考慮した部材 i の時刻 T における単位時間あたりの期待修繕回数 $E[i-1 N_i(T)]$ は次式により求めることができる。

$$E[i-1 N_i(T)] = \sum_{all m} \sum_{all n} i-1,m P_{i,n}(T) + \sum_{all m} \sum_{all n} \text{before}_{i-1,m} P_{i,n}(T) \quad (26)$$

これを図 5 に示す。ここで、灰色で示してある部分は部材 $i-1$ の修繕が行われたことによる影響を示しており、白色で示してある部分は部材 $i-2$ の修繕が行われたことによる影響を示している。また、灰色および白色の部分で示してある部分の上部に黒色で示してある部分は、式 (23) によって求めた上位部材の修繕よりも前に部材 i を修繕を行う確率である。このように構法的序列を考慮した際には、上位部材と下位部材の修繕が重なった場合には上位部材の修繕よりも前に下位部材を修繕を行う確率の分だけ修繕確率が増加する。

複数の部材が存在する場合には、まず構法的序列の最上位の部材の修繕確率を決定し、次に構法的序列の上位より 2 番目の部材について最上位の部材の影響を考慮した修繕確率を決定する。そして、順々に部材の影響を考慮した修繕確率を決定すれば全ての部材の修繕確率を得ることができる。ここで、2 部材について修繕時期が重なっていない場合には式 (21) を用い、修繕時期が重なっている場合は式 (23) によって上位に存在する部材の修繕前に下位部材の修繕を行う確率を求める必要がある。よって、式 (21) と式 (23) を用いることで修繕周期の不確定性を考慮した LC 評価を行うことが可能になる。各修繕に対する修繕確率にその修繕コストを乗ずることで各修繕における期待修繕コストの評価が可能となる。そして、評価対象期間内の全修繕に対する期待修繕コストを累積することにより、修繕周期の不確定性を考慮した場合の期待 LCC を得ることができる。

図 5 部材 i の修繕確率 (構法的序列を考慮した場合)

4 不確定性の影響

本節では修繕周期の不確定性が建築構造物の LCC に及ぼす影響を評価する。まず、解析対象を設定し、対象構造物の LC 評価を確定的に扱った場合の LCD を行い、選択された修繕シナリオと構成要素において修繕周期の不確定性を考慮した LC 評価を行う。

4.1 確定的なライフサイクルデザイン

本研究では、宗本ら⁶⁾の用いた図 6 に示す標準的な規模の独立住宅を評価対象モデルとして設定する。

まず、建築構造物の LC 評価期間に内在する不確定性を考慮しない LCD を行う。建築構造物は、各部材に何を用いるかという構成要素と、いつ修繕を行うかという修繕シナリオとが決定されれば、設計がなされるものと想定する。図 6 に示す標準的な規模の独立住宅に対し、構成要素と修繕シナリオを設計変数とし LCC 最小化問題を次式で定式化する。制約条件として、木造躯体とコンクリート打ちの壁体などの現実的でない構成要素の組み合わせを考慮する。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \text{fitness}_{LCC} \\ &\text{subject to} \quad g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{fitness}_{LCC} \equiv C_{eval}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \prod_j \gamma_j \quad (28)$$

ここに

- C_{eval} : 評価対象期間の LCC
- g_j : 制約条件
- $\mathbf{c}$: 空間的設計変数 (部材の組合せおよび単価)
- $\mathbf{t}_p$: 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- γ_j : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

図 6 問題対象

表 1 GA パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

図7 LCC 推移 : Test LCC

4.2 解析結果

GA を用いて LCC の最小化を行う。表 1 に最適化計算に用いた GA のパラメータを示す。

図 7 に LCC 最小化において得られた構成要素およびシナリオに従って生じる LCC の推移を示す。図中の棒グラフは年毎の修繕コストを、線グラフは修繕コストの累積を示している。以下この設計案を Test LCC と呼ぶ。

4.3 修繕周期の不確定性の影響

前節で行った LCD は、建築構造物の管理者が、設計者の提案した修繕周期に従って修繕行為を行うことを前提に LC 評価を行い、その評価値を基に最適化手法を用いたものである。本節では、Test LCC に対して修繕周期の変動が及ぼす影響を示す。

4.3.1 確率分布モデル

修繕周期の不確定性が建築構造物の LC 評価に及ぼす影響を調べるため、設計時に提案する修繕周期を平均値 μ とし、標準偏差を σ とした正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従って分布すると仮定する。正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は次式である。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (29)$$

本論文においては σ を 1 と仮定する。したがって、ここで用いる分布関数は $N \sim (\mu, 1)$ であり、 $\mu = 0$ の場合を図 8 に示す。

前述の通り、連続変数によって表現される確率分布では評価が困難になるため、図 9 に示すように離散変数によって表現される確率分布に変換して評価を行う。年毎の修繕確率を表 2 に示す。この変換は次式によって行った。

$$\begin{aligned} P(-2) &= \int_{-1}^{-1} f(x)dx, & P(-1) &= \int_{-1}^0 f(x)dx \\ P(0) &= \int_0^0 f(x)dx, & P(1) &= \int_1^1 f(x)dx \end{aligned} \quad (30)$$

図 9 に示すように、評価対象とする期間は 4 年に亘って分布すると考える。標準偏差が 1 の正規分布ではさらに期間を前後に 1 年増やして評価を行うことにしても、-3 や +2 年となる確率はいずれも 2 % とわずかであるため、評価対象とする期間は 4 年として考える。このような評価方法を以下 Case 1 とする。

また、確率分布モデルの相違による LC 評価値の相違を考察するために、同じ正規分布を仮定し、連続変数によって表現されている確率密度関数を離散変数に変換する式として、式 (31) を用いた場合の LCC を評価する。この場合の修繕確率を表 3 に示す。以下このような評価方法を Case 2 とする。

$$\begin{aligned} P(-1) &= \int_{-\infty}^{-1} f(x)dx, & P(0) &= \int_{-1}^1 f(x)dx \\ P(1) &= \int_1^{\infty} f(x)dx \end{aligned} \quad (31)$$

図8 標準正規分布 $N(0, 1)$

表2 修繕確率 (Case 1)

年	修繕確率
$\mu-2$	0.15866
$\mu-1$	0.34134
μ	0.34134
$\mu+1$	0.15866

表3 修繕確率 (Case 2)

年	修繕確率
$\mu-1$	0.15866
μ	0.68268
$\mu+1$	0.15866

図9 確率分布モデル (Case 1) 図10 確率分布モデル (Case 2)

図11 LCC と確率 (Case 1)

図12 各年の期待修繕コストと期待累積修繕コスト (Case 1)

図13 LCC と確率 (Case 2)

図14 各年の期待修繕コストと期待累積修繕コスト (Case 2)

4.3.2 確率モデルの相違がライフサイクル評価値へ及ぼす影響

Case 1 の LCC 50 万円毎の確率を図 11 に示す。また、各年における期待修繕コストと期待累積修繕コストを図 12 に示す。Case 2 の LCC とその確率を図 13 に示す。また、各年の期待修繕コストと期待累積修繕コストを図 14 に示す。

Case 1, Case 2 のいずれにおいても構造体が LC 期待値に及ぼす影響が大きかった。図 12 および図 14 における 100 年付近での期待修繕コストは、更新周期が 100 年である構造体の修繕周期がばらついた場合に発生するコストである。修繕周期を不確定的に扱った場合は、LCC はばらつきを有し、期待 LCC が大きくなるため、設計段階での修繕計画通りに修繕を履行する努力が建築構造物の利用者に必要であることが分かる。

Case 2 では、Case 1 と比較して、各部材についてシナリオの選択の幅が少なくなったため、シナリオの総数が少なくなった。しかし、シナリオの総数が減ることで、各シナリオの発生確率は高くなった。シナリオが変わることによって、上位部材の修繕の前に下位部材の修繕が行われる確率や、上位部材の修繕が評価対象期間内で行われる確率が低くなったため、期待修繕コストが小さくなった。LCC の分布形状が異なることで、生じうる LCC が変化し、また、構造的序列を考慮したことにより確率の高くなる部分が変化する。例えば、正規分布を 3 つに分割した Case 2 では、4 つに分割した Case 1 よりも、上位部材の修繕に伴う下位部材の更新が減少するため、期待 LCC が小さい方へ分布している。したがって、分布を離散変数に変換する方法が LC 評価に影響を及ぼすため、離散方法は慎重に決めなければならないといえる。

5 結

本論文では、建築構造物の設計時に提案した修繕シナリオが実行されない場合を考慮した LC 評価手法を提案し、独立住宅を例に修繕周期の不確実性が建築構造物の LC 評価に及ぼす影響を考察した。

建築構造物の構法的序列を考慮した場合、修繕周期の不確実性は LC 評価値を増大させる圧力として働くといえた。このため、設計時に提案された建築構造物の維持保全シナリオを守ることは重要であるといえる。それゆえ、建築構造物の設計、運用、修繕、改修といった各ライフステージに関わる多種多様な人々の合意形成が、健全な建築ストックを保有する社会の育成には欠かせないものであると言える。

また、本論文では、確率分布のモデル化の方法によって建築構造物の LC 評価値が変化することを示した。現時点では修繕周期の確率分布形それ自体が不明確であり、データの整備が望まれるものの、このことは、確率分布が既知であっても、LC 評価を行う際のモデル化の方法にも注意が必要であることを示している。

本論文で示した不確実性の評価手法は修繕周期が守られない場合に生じるリスクを定量的に意思決定者に示すのに有益である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：気候温暖化への建築分野での対応（1997 年 12 月 2 日、会長声明全文）、建築雑誌、Vol. 113, No. 1417, pp. 90-91, 1998.
- 2) 弥田俊男、宗本順三、吉田哲、高野俊吾：独立住宅モデルの建材選択システムに伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題 - 住宅建材の選択システムへの GA 適用の研究 -, 日本建築学会計画系論文集, No. 524, pp. 77-84, 1999.

- 3) 大森博司、野田賢：遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究、日本建築学会構造系論文集, No.601, pp.181-188, 2006.
- 4) 日本建築学会：建物の LCA 指針～温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール～, 2006.
- 5) 建築・設備維持保全推進協会：「建築躯体・部材・設備等の耐用年数調査」報告書, 1998.
- 6) 宗本順三、鈴井修一、張本和芳、吉田哲、高野俊吾：独立住宅モデルの建材選択に伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題 - その 2. GA を用いた「標準問題の建物モデル」への住宅建材・工法選択システム -, 日本建築学会計画系論文集, No. 551, pp. 85-92, 2002.
- 7) Kong, J.S. and D.M. Frangopol: Evaluation of Life-Cycle Maintenance Cost of Deteriorating Structures, Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 5, pp. 682-691, 2003.

(2007年10月5日原稿受理、2008年1月28日採用決定)