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

－地震ハザードの考慮によるライフサイクル評価値の相違－

LIFE CYCLE DESIGN FOR BUILDING STRUCTURES

－ Consideration of seismic hazard －

内藤 雅子*, 大森 博司**, 蜂須賀 聖力***

Masako NAITO, Hiroshi OHMORI and Masakatsu HACHISUKA

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. However, there is various uncertainties in a life cycle of building structures, therefore it is necessary to expand it to the life cycle evaluation that considered those uncertainties. In particular, the effect caused by earthquakes which occurs during the evaluation period should be investigated. Present paper proposes the way to realize the life cycle evaluation of building structures with consideration of seismic hazard, and investigation of possible necessity of its effect is carried out through numerical examples.

Keywords: *Life Cycle Design, Seismic Hazard, Uncertainties, Optimization, Genetic Algorithm*

ライフサイクルデザイン, 地震ハザード, 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に貢献すべきであるという認識が高まっている。日本建築学会は建築構造物の耐用年数を延長させることが建築分野における二酸化炭素排出量の削減に効果的であり、わが国における建築構造物の寿命を3倍ないし100年に延長することを提唱している¹⁾。建築構造物の長寿化には、建設時の初期投資の多寡を偏重した建築構造物の設計ではなく、建設後の維持管理計画を含めた建築構造物のライフサイクル (Life Cycle, LC) を考慮した設計が必要である。建築構造物の LC を考慮した設計により長寿化が可能になり、従来の営繕的な維持管理ではなく戦略的な維持管理へとシフトすることで環境負荷低減やコスト低減が可能になると考えられる。

建築構造物の設計・建設・運用・修繕・廃棄といった 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。ところで、地震は建築構造物の LC に影響を及ぼす、不確定性を有する外的要因のひとつである。建築構造物の長寿化に伴い、建築構造物がその供用期間中に地震に遭遇する確率は大きくなり、これが建築構造物の LC 評価にどのような影響を及ぼすかは施主や設計者等の意思決定者にとって興味深い点であろう。

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。こうした手法は、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、近年、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) 手法の研究がいくつか報告されている^{2)–4)}。また、建築構造物の LC に内在する不確定性の影響の内、修繕周期の不確定性が LC 評価に与える影響を考察した研究が報告されている⁵⁾。本論文では、建築構造物の LC に影響を及ぼす不確定性の内、地震ハザードを考慮した LC 評価手法を提案し、その影響を考察する。

本論文では、まず既報⁴⁾で提案した LC 評価手法について概説し、次に地震ハザードを考慮した LC 評価手法を新たに提案する。そして、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に対し、地震ハザードを考慮した 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、地震ハザードが 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。

* トヨタテクニカルディベロップメント(株) 工修
** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博
*** 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

Toyota Technical Development Corporation, M. Eng.
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

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、建築構造物のライフサイクルコスト (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。以下本論文では、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)–6)}。

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

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。

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

本論文では建築物にかかるコストを部材コストで評価しているが、本来はさらに人件費などの検討が必要である。人件費などの不明確なコストの算出をいかにして行なうかは今後の課題であると考えられる。

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⁷⁾。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、 $[x]$ 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⁴⁾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、建築構造物を作る順序であり、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修繕シナリオに制約を受ける。修繕シナリオとは、建築構造物の設計時に計画される、建築構造物を構成する各部材の平均耐用年数に基づく修繕計画である。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 $u-1$ 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。

図 1 構法的序列による階層化を考慮したシナリオ

構法的第 u 位の部材 i を支持する第 $u-1$ 位の部材の修繕周期 $t_{p,i}^{u-1}$ 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 $n_i^{a:b}$, $n_{\text{stopover},i}^{a:b}$ ($a > b$) は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

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

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

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の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

本研究では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設計案を比較する必要が生じる。

寿命が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} 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。評価対象期間を構法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。

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

3. 地震ハザードを考慮した LC 評価手法

地震ハザードを考慮した LC 評価の流れを図 2 に示す。まず、日本全域の地震情報⁸⁾ から建築構造物の建設が予定されているサイトでの地震動強さを求め、考慮すべき地震を決定し、その発生確率を求める。また、サイトでの地震動強さから建築構造物に対する荷重効果を求め、建築構造物の応答を評価する。建築構造物の損傷を損傷率関数を用いて評価し、各損傷レベルに応じた修繕量を算出する。これに確定値として求められるイニシャル評価値と、地震が発生しない期間のランニング評価値を加えたものが地震が発生した場合の LC 評価値である。期待 LC 評価値は、評価対象期間中の全ての地震発生シナリオの生起確率と、各地震発生シナリオにおける LC 評価値を乗じたものの総和である。

地震調査研究推進本部⁸⁾ の提案している方法に従って地震をモデル化する。地震発生過程のモデルとしては、BPT (Brownian

図 2 地震を考慮した LC 評価の流れ

Passage Time) 分布と、Poisson 過程を用いる。サイトでの最大加速度、最大速度は、地震そのものの規模と、震源からサイトまでの距離、およびサイトの地盤によって推定する。本研究では、地震調査委員会が採用している司・翠川 (1999) による断層最短距離を用いた距離減衰式⁹⁾を用いる。個々の地震について求められた最大加速度、最大速度を用い、建築物荷重指針¹⁰⁾に基づき、地震による荷重効果を算定する。構造解析法は、荷重に対する静的応答についてのみ扱い、有限要素法 (Finite Element Method) を用いる。また、骨組構造物に対して立体解析による弾性応力解析を行う。

3.1. 修繕率の変更

一般的に、建築構造物を構成する部材のうち、構法的序列の下位にあるものほど地震の影響を受けやすい¹¹⁾。本研究では、地震が発生した場合にどの階層にまでその影響が及ぶかを推定し、地震発生直後に修繕シナリオにはない修繕が行われるものとする。なお、本研究では各部材の劣化関数は確定的に評価し得るものとしている。以下、地震発生時の修繕量の算定法を示す。

部材 i の時刻 t での残存性能値が $P_i(t)$ である場合の修繕量 $r_i(t)$ は次式で表される。劣化関数を図 3 に示す。

$$r_i(t) = 1 - P_i(t) \quad (15)$$

これを地震の影響を考慮した場合に拡張すると、時刻 $t = T_h$ に地震が発生した時の残存性能は $P_i(T_h)$ であり、地震の影響により部材 i の性能が $\gamma_i(T_h)$ 減少するなら、時刻 T_h に地震が発生した時の修繕量 $r_i(T_h)$ は次式で表される。この場合の劣化関数を図 4 に示す。

$$r_i(T_h) = 1 - P_i(T_h) + \gamma_i(T_h) \quad (16)$$

本研究では次式により $\gamma_i(t)$ を決定する。

$$\gamma_i(t) = \gamma_i + G(P_i(t)) \quad (17)$$

ここに、

- γ_i : 部材 i の劣化程度によらない一定の被害率
- $G(P_i(t))$: 部材 i の劣化程度により変化する被害率の重み

$\gamma_i(t)$ は地震動に対する建築構造物の応答を求めることによって決定する。

式 (15) および式 (16) を一般化すると、任意時刻 t における部材 i の修繕率は、時刻 t における残存性能 $P_i(t)$ 、地震による被害を表す係数 $\gamma_i(t)$ およびデルタ関数を用いた次式で表される。デルタ関数 $\delta(t)$ は $t = 0$ の時に 1 を、 $t \neq 0$ の時に 0 を返す関数であり、ゆえに次式は、時刻 t に地震が発生した場合、すなわち $t = T_h$ であった場合に $\gamma_i(t)$ が値を持つことを示している。

$$r_i(t) = 1 - P_i(t) + \gamma_i(t) \cdot \delta(t - T_h) \quad (18)$$

以上により、地震発生時刻と地震によって損傷を受ける部材、およびその損傷率を特定できれば、地震を考慮した LC 評価を行うことができる。

図3 劣化関数

図4 地震発生時

3.2. 損傷率関数

本研究では、最大層間変形角に基づいて地震の影響が及ぶ部位を表1のように仮定する¹¹⁾。

表1 躯体の修繕率と各部材の損傷関係¹¹⁾

Drift Angle	損傷レイヤ
$1/75 < \text{Drift Angle}$	躯体
$1/100 < \text{Drift Angle} \leq 1/75$	外壁壁体
$1/150 < \text{Drift Angle} \leq 1/100$	屋根下地材
	天井下地材
	床下地材
	外壁下地材
	内壁下地材 (外側)
$1/200 < \text{Drift Angle} \leq 1/150$	内壁下地材 (内側)
	内壁下地材 (内側)

本研究では、地震によって損傷を受けると想定された部材 i の地震による損傷率関数 γ_i に対数正規分布関数を用いる。対数正規分布関数の対数平均値に対応するパラメータ λ は文献¹¹⁾を基に定めた。また、対数標準偏差に対応するパラメータは既往の研究¹²⁾を参考に0.4とした。

3.3. 修繕シナリオの変更

本研究では、地震の損傷を受けた部材を更新した場合、その部材は地震発生時刻以降も計画時に定めた修繕シナリオに従って修繕を行うのではなく、その時点から図5のように地震発生後の修繕シナリオの変更を行うものとする。地震による損傷の修繕を考慮した建築構造物のランニング評価を以下のように定式化する。

図5 地震による修繕シナリオの変更

地震発生時に損傷を受けた部材は初期性能にまで回復させるものとする。すなわち、修繕周期 $t_{p,i}^u$ の第 u 位部材 i が、地震発生時刻 T_h の直後に修繕によって1まで性能を回復した場合、部材 i の次の修繕は時刻 $T_h + t_{p,i}^u$ に行われる。

すると、第 u 位部材 i の構法的序列の一つ上位に存在する第 $u-1$ 位部材の修繕期間中、 T_h 年目に地震が発生した場合、第 $u-1$ 位部材の修繕期間 $t_{p,i}^{u-1}$ 中の第 u 位部材 i の修繕回数 $n_i^{u:u-1}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} n_i^{u:u-1} &= \left(\left\lceil \frac{T_h}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \right) + 1 + \left(\left\lceil \frac{t_{p,i}^{u-1} - T_h}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \right) \\ &= \left\lceil \frac{T_h}{t_{p,i}^u} \right\rceil + \left\lceil \frac{t_{p,i}^{u-1} - T_h}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \end{aligned} \quad (19)$$

上式の第1項は第 $u-1$ 位部材の修繕期間開始時刻から地震発生時刻までの修繕回数であり、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。また、第2項の1は地震による損傷を回復するための修繕を表しており、第3項は地震発生後から第 $u-1$ 位部材の修繕期間終了時刻までの第 u 位部材 i の修繕回数を表している。地震による損傷を受けていない部材まで遡及して上式を適用すれば、地震の発生に伴う修繕シナリオの変更が可能になる。

3.4. 期待ライフサイクルコスト

地震 $\mathbf{x}$ の評価対象期間中の $\mathbf{k}$ 年目における地震発生確率 $P_{\mathbf{k}}[\mathbf{x}]$ が既知であれば、評価対象期間中の建築構造物の期待 LCC は次式で求められる。

$$\begin{aligned} E[C_{eval}] &= C_0 + \sum_{\mathbf{k}} \sum_{\mathbf{x}} \{P_{\mathbf{k}}[\mathbf{x}] \cdot C_r(\mathbf{k}, \mathbf{x})\} \\ &\quad + \prod_{\mathbf{k}} \prod_{\mathbf{x}} (1 - P_{\mathbf{k}}[\mathbf{x}]) \cdot C_r(\mathbf{k}, 0) \end{aligned} \quad (20)$$

ここに、 $E[C_{eval}]$ は評価対象期間中の LCC であり、 $C_r(\mathbf{k}, \mathbf{x})$ は地震 $\mathbf{x}$ が評価対象期間中の $\mathbf{k}$ 年目に発生した場合のランニングコストを表している。また、上式右辺の第3項は評価対象期間中に地震が発生しない確率とその場合のランニングコスト $C_r(\mathbf{k}, 0)$ の積である。

上式を用いて、評価サイトにおいて考慮すべき全ての地震の評価対象期間中の全組み合わせと発生確率を乗じ、また、それらの和をとることによって期待 LC を得ることができる。確定的な LC 評価と同様に、建築構造物の構成要素の単価の代わりに環境影響物質の排出原単位を用いれば、CO₂等の環境影響物質の期待 LC 排出量を評価することができる。

3.5. 確定的なライフサイクルデザイン

まず、地震ハザードを考慮しない場合の LCD を行う。設計変数として、構造材、非構造材の両方を含めた建築構造物の構成要素の取捨選択および各構成要素の修繕時期を操作する維持保全シナリオを考慮し、最適化手法には離散変数の最適化問題に優れた性能を発揮する GA を採用する。

本研究では、非構造材の組合せ、及び構造材の長期荷重による応力度、たわみ、柱接合部のディテールに関する制約条件を与える。さらに、地震ハザードを考慮しない LCD の際には、実用上有意な解を生成するため、通常構造設計の際に考慮する短期荷重による応力度に関する制約条件を追加する。

単一目的の最小化問題を次式で与える。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && C_{eval}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \\ &\text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

ここに

- C_{eval} : ライフサイクルコスト
- c : 構成要素の種類および組合せ
- t_p : 構成要素の維持保全シナリオ
- g_j : j 番目の制約条件

3.5.1. LCC 最小化による例題の設定

図 6 に示す標準的な規模の独立住宅を例題として LCC 最小化を行う。表 2 に解析の際に用いる GA のパラメータを示す。ここで LCC 最小化によって得られた設計解を LCC_{min} と呼び、 LCC_{min} を用いて地震ハザードの考慮による影響を考察する。

図 6 例題

表 2 GA パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

4. 地震ハザードの影響

本節では地震ハザードの考慮が建築構造物の LCC に及ぼす影響を評価する。まず、例題を設定し、対象構造物の LC 評価を確定的に扱った場合の LCD を行う。次いで、そこで選択された修繕シナリオと構成要素において地震ハザードを考慮した LC 評価を行い、LC 評価値を比較する。

4.1. サイトの設定

サイトとして長野市及び静岡を想定した LC 評価をそれぞれ行う。ここで、評価対象期間は 2006 年 1 月 1 日を起点とした 100 年間とする。長野では糸魚川-静岡構造線断層帯の影響が大きい。そこで、震源として糸魚川-静岡構造線断層帯北部・中部 (Itoigawa-N) と糸魚川-静岡構造線断層帯南部 (Itoigawa-S) の 2 つを考慮する。地震発生確率を図 7 に、地震動強さを表 3 に示す。静岡では南海トラフの地震を考慮する。地震発生確率を図 8 に、地震動強さを表 4 に示す⁸⁾。

4.2. 地震ハザードがライフサイクル評価に及ぼす影響

確定的な LCD によって得られた LCC_{min} のサイトを前節で示した長野及び静岡であると想定した場合の LC 評価を行う。

4.2.1. 長野

LCC 最小化に対し、想定する二つの地震が作用した場合の最大層間変形角を表 5 に示す。本研究では最大層間変形角が 1/200 を超

図 7 地震発生確率 (長野)

表 3 地震ハザード評価 (長野)

	PGA(cm/s/s)	PGV(cm/s)	Intensity
Itoigawa-N	425.68	39.90	5.4
Itoigawa-S	89.50	7.73	4.2

図 8 地震発生確率 (静岡)

表 4 地震ハザード評価 (静岡)

	PGA(cm/s/s)	PGV(cm/s)	Intensity
南海地震	35.06	4.66	3.9
東南海地震	205.67	21.12	5.1
想定東海地震	646.91	71.31	6.0

えると損傷が発生すると仮定しているため、糸魚川-静岡構造線断層帯南部で発生する地震はこの建築構造物に損傷を発生させないという評価結果になる。このため、想定する地震発生シナリオは 101 通りとなる。想定した地震発生シナリオを表 6 に示し、表 7 に期待 LC 評価値を示す。

表 7 において期待値評価 ($E[LCC]$, $E[LCCO_2]$) が確定的評価 (LCC , $LCCO_2$) を上回っているのは、糸魚川-静岡構造線断層帯北部・中部の地震の影響によるものといえる。図 10 に各シナリオにおける LCC を示す。図の横軸は地震発生年であり、縦軸は LCC である。図 11 に、各地震発生シナリオの生起確率を示す。図 12 に、各地震発生シナリオにおける LCC に、それぞれの地震発生シナリオが発生する確率を乗じたものを示す。図 12 の全ての値の和が期待 LCC である。図 9 に評価対象期間中に地震が発生しなかった場合の修繕シナリオ (No.0) と地震が評価対象期間の 9 年目に発生したと想定している地震発生シナリオ (No.10) における LCC の経年累積を示す。60 年において LCC が大きく変化しているのは、60 年で躯体の寿命に達するため、建て替えを行ったからである。図 9 から No.10 のシナリオでは 9 年目の地震によって修繕が必要になり、修繕計画の変更を行ったことでコストが増加している様子が分かる。

図 10 において、シナリオ No.21, シナリオ No.41 やシナリオ No.61 などの LCC の増加が少ない地震発生シナリオは、地震発生年と、地震によって被害を受ける部材の修繕周期が重なった場合である。また、No.20 や No.40 付近で値が変化しているのは、地震発生年と修繕周期が重なる部材の違いによる LCC の変化である。さらに、No.61 は建て替え年である 60 年に地震が発生するために

LCC が小さくなっている。この図から、地震の不確定性を考慮した建築構造物の LC 評価値は、地震発生確率や建築構造物の応答などに対して一定、若しくは線形に変化するのではなく、非線形な変動をするといえる。

表 5 最大層間変形角 (長野)

	1 階	2 階
Itoigawa-N	1/75	1/95
Itoigawa-S	1/359	1/454

表 6 地震発生シナリオ (長野)

地震発生シナリオ NO.	考慮する地震	発生回数
0	なし	0
1 - 100	Itoigawa-N	1

表 7 期待ライフサイクル評価 (長野)

LCC (yen)	30,789,300
E[LCC] (yen)	31,411,130
LCCO ₂ (kg-CO ₂)	506,612
E[LCCO ₂] (kg-CO ₂)	579,420

図 9 ライフサイクルコストの経年累積 (長野)

4.2.2. 静岡

30 年間に南海地震と東南海地震、若しくは東南海地震と想定東海地震、若しくはこれら 3 つの地震が共に発生した場合、半分の確率で連動すると予想されている⁸⁾。本研究では地震発生年が LC 評価値に大きな影響を示すが、上記の仮定に従って連動発生の評価を行うと地震発生年を特定できなくなるため、期待値計算においてはこれらの地震の連動を考慮しないこととする。

想定した各地震による最大層間変形角を表 8 に示す。同表より、南海地震はこの建築物に損傷を及ぼさないという評価結果になるため、損傷による修繕を考慮する地震は東南海地震、想定東海地震の 2 つになる。評価対象期間を 100 年とした場合、それぞれの地震の平均発生間隔に基づき、東南海地震は 2 回、想定東海地震は 1 回までの発生を考慮することとする。これらの地震の発生シナリオは膨大な数になる。

この中には非常に生起確率が低い地震発生シナリオが混在している。本研究では計算負荷低減のため、しきい値を設け、しきい値以下の生起確率である地震発生シナリオは建築物の期待 LC 評価値に影響を及ぼさないものとして計算しないこととする。指標とする指標値や、対象とする建築物の規模によってこの値は適宜定める必要がある。本研究では、しきい値を 1.0×10^{-5} とする。また、本研究では、しきい値を設けて生起確率が小さい地震発生シナリオを考察の対象外とした場合、その確率を地震が発生しなかった場合の確率に合算し、

全地震発生シナリオの生起確率の和が常に 1.0 となるようにする。

生起確率が 1.0×10^{-5} 以上である地震発生シナリオを考察の対象とした場合の地震発生シナリオの一覧を表 9 に、期待 LC 評価値を表 10 に示す。

各地震発生シナリオにおける LCC を図 13 に、各地震発生シナリオの発生確率を図 14 に、各地震発生シナリオにおける LCC に発生確率を乗じたものを図 15 に示す。図 13 において LCC は考慮する地震の発生回数が変わることで、LCC の分布に変化が起きている。長野での結果と同様に、考慮する地震の発生回数が同じでも地震発生年と修繕周期の重なる場合には LCC が小さくなっていた。また、地震発生シナリオには 0 年に地震が発生するシナリオが含まれており、この場合には LCC に影響を与えないこととしている。想定東海地震が 0 年以外の年に発生した場合は LCC が 4.5×10^7 (yen) 付近に分布するが、想定東海地震が 0 年に発生した場合には LCC は 3.2×10^7 (yen) 付近に分布する。東南海地震の発生による LCC の増加は、東南海地震の発生による LCC の増加よりも大きくなっている。これは、図 13 において東南海地震の発生回数が違う No.23,299 までのシナリオと No.23,300 からのシナリオでの LCC の変化に比べると想定東海地震の発生による LCC の増加の方が大きく変化していることから確認できる。

図 14 から東南海地震が 2 回起こる場合は確率が低い値となっているが、東海地震が 1 回起こる場合は東海地震が 2 回起こる場合と比べ確率が高くなっており、図 15 に示すように期待 LCC が大きくなっている。

表 8 最大層間変形角 (静岡)

	1 階	2 階
南海地震	1/918	1/1160
東南海地震	1/156	1/197
想定東海地震	1/49	1/62

表 9 地震発生シナリオ (静岡)

地震発生シナリオ	考慮する地震	発生回数
0	なし	0
1 - 23,299	東南海地震	2
	想定東海地震	1
23,300 - 26,150	東南海地震	1
	想定東海地震	1
26,150 - 26,168	想定東海地震	1

表 10 期待ライフサイクル評価 (静岡)

LCC (yen)	30,789,300
E[LCC] (yen)	38,300,506
LCCO ₂ (kg-CO ₂)	506,612
E[LCCO ₂] (kg-CO ₂)	711,204

図 10 地震発生シナリオ毎のライフサイクルコスト（長野）

図 13 地震発生シナリオ毎のライフサイクルコスト（静岡）

図 11 地震発生シナリオ毎の生起確率（長野）

図 14 地震発生シナリオ毎の生起確率（静岡）

図 12 地震発生シナリオ毎の期待ライフサイクルコスト（長野）

図 15 地震発生シナリオ毎の期待ライフサイクルコスト（静岡）

4.2.3. サイトの違いによる影響

図 10 と図 13 を比較すると、考慮する地震が 1 つである長野では地震の発生時期が LCC の変化の主な要因であったが、2 つの地震を考慮している静岡においては発生する地震の回数や地震動強さでも LC 評価値が変化することが分かる。また、図 11 と図 14 から、考慮する地震の数が多くなることによって地震発生シナリオが増大し、各シナリオの生起確率が小さくなることが分かる。図 12 に比べ、図 15 では期待 LCC が複雑になっており、複数の地震を考慮する際には各地震の地震動強さ及び生起確率をしっかりと把握する必要があると考えられる。

表 7 及び表 10 に示すように、サイトの違いによって同じ設計案であっても期待 LCC は変化するため、地震ハザードが建築構造物に与える影響を考慮する場合にはサイトの情報が重要であると考えられる。

5. 結

本論文では、地震ハザードを考慮した建築構造物の LC 評価手法を提案した。さらに、確定的な LCD 手法によって LCC 最小化を行なって得られた設計案に対して、地震ハザードを考慮した建築構造物の LC 評価手法を適用し、地震ハザードの考慮が LC 評価に与える影響を考察した。

建築物の LC 評価値は地震の影響を考慮することによって変化する。LC 評価値の変化は地震動強さと地震の発生年の影響を受けていた。地震による層間変形角が大きくなると、例え躯体は被害を受けなくても非構造材に被害が発生し、後の LC が変化し、LC 評価値の変化を引き起こしていた。このことから、構造設計において地震によって非構造材にどれほどの被害が出るかを考慮した設計をすることが重要であるといえる。また、部材の修繕時期と地震の発生年の関係が LC 評価に与える影響は大きく、地震を考慮した上での維持管理計画の必要性があると考えられる。

構造性能を高めるために必要なコストと地震の被害によって発生するコストはトレードオフの関係にあると考えられ、構造材・非構造材の両方を考慮した上で、さらに建築物の LC を考慮した設計が必要であると考えられる。本論文で提案した地震ハザードを考慮した LC 評価手法は、多くの仮定を要するが、建築物の LC を考慮した上での構造設計・材料設計を包括的に行うために活用できると考えられる。

本論文では、建築構造物の地震ハザードを期待値によって評価したが、施主や設計者等の意思決定者にとって必要な情報は、期待値だけでなく地震発生シナリオを考慮した場合に LCC がとりうる最大値であるかもしれず、建築構造物の設計、提案を行う際には、建築構造物の建設予定地における地震動強さ、地震発生確率、地震が発生した場合に LCC が示しうる値等の情報を総合的に示す必要があり、これを解りやすく伝えることは、建築構造物の設計者に課せられた課題と言える。

謝辞

本研究は地震調査研究推進本部の地震動予測地図データを基に作成しています。ここに感謝の意を表します。

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, 1999.10.
- 3) 宗本順三、鈴木修一、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, 2002.1.
- 4) 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, 2006.3.
- 5) 大森博司、小林春之、内藤雅子：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－、日本建築学会構造系論文集、No.627, pp.765–771, 2008.5.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会。
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>, 参照 2006-10-1.
- 9) 司宏俊、翠川三郎、断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No. 523, pp. 63-70, 1999.9.
- 10) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、丸善株式会社、2004.
- 11) 日本建築学会、非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、2003.
- 12) 福島誠一郎、矢代晴美、リスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方、日本建築学会構造系論文集、No. 567, pp. 197-204, 2003.5.

(2008年10月10日原稿受理、2009年2月25日採用決定)