

3. B-C モデルに基づくモンテカルロシミュレーション方法の提案

橋の性能を明らかにするためには、Reference Period（以下、この資料では「参照期間」という）中に橋が置かれる状況を設計状況として網羅的に考慮し、橋の状態を評価する必要がある。本章では、荷重体系を部分係数化するための理論背景を整理し、本研究で用いるモンテカルロシミュレーション方法を提案する。

3.1. シミュレーション方法の概要

本研究では、荷重の同時作用過程を考慮するために B-C モデルに基づくモンテカルロシミュレーションを用いて、参照期間（例えば 100 年の間）に時々刻々と変化する同時作用に対して、あらゆる断面に発生する断面力とそこに占める各作用の寄与分の内訳の時々刻々の変化を把握する。はじめに、B-C モデルに基づき一定時間間隔で状況を離散化し、確率過程としての荷重同時載荷についてのモンテカルロシミュレーションを実施し、代表的な断面（以下、「着目断面」という）における断面力について参照期間中の最大値を求める。この参照期間中の最大値は 1 つの標本値であるので、参照期間中の最大値を適切に評価するためには、参照期間中の最大値についての標本依存性をなくす必要がある。そこで、100 年間のモンテカルロシミュレーションを複数回繰り返して、各断面の断面力 100 年最大値分布（極値分布）を作成する。そして、着目断面ごと、断面力の種類ごとに、特定の非超過確率、およびその前後の範疇にある断面力標本を抜き出して、各標本における荷重組合せと各荷重の寄与率を抽出する。荷重係数は断面力標本の各荷重寄与分を、各荷重の特性値を載荷したときに発生する断面力で除したものとす。次に、これを複数の橋梁・断面に対して行う。以上から、荷重組合せと荷重係数の膨大なリストを作成したのちに、代表的な荷重組合せと対応する組合せごとの荷重係数値を絞り込む。このようにすれば、従来の荷重組合せによる場合に比べて、荷重組合せの確率・統計的な説明性も高くできると考えられ、また 2.1.3.(1) にまとめた ISO2394 で想定している検討方法の 1 つとしても合致すると考えることができる。

また、荷重組合せごとに、求めた最大値分布の変動係数の大小に応じて 100 年最大値分布の中で目標とするフラクタイル値を変え、結果としてこれまでの道路橋示方書で設計した場合と同等諸元の部材が設計されるように調整できることもここで提案する方法のメリットの 1 つである。

3.2. 部分係数キャリブレーションの理論背景

3.2.1. 橋の耐荷性能と想定する照査式

(1). 橋の耐荷性能

橋の耐荷性能を、参照期間の任意の時刻における同時作用に対して、使用目的との適合性や構造物の安全性を確保しているときに発揮すべき橋または部材の状態が適切な信頼性で達成されることと定義する。橋の耐荷性能の達成度については、以下の 2 通りの説明が考えられる。しかし、ある橋の性能を評価するための設計状況として網羅できる荷重組合せを抽出するためには「ある橋」に着目することになるので、本研究における部分係数のキャリブレーションは前者 A を念頭に行う。

- A. 任意の橋について、例えばある 100 年（参照期間）を設けて任意の時刻における状況を複数組の外力で考え、各 100 年をサンプル（標本）として見たとき、ある照査式を満足しない 100 年の標本数が複数の 100 年間のうち一定の割合以下であること
- B. 例えば 100 年間（または参照期間）時々刻々と変化する一組の状況にある複数の橋について、1 回でも照査式を満足しないことがある橋が、複数の橋のうち一定の割合以下の数であること

なお、「一定の割合以下」とは、個々の照査項目や材料の特性に応じて異なり、それぞれ少なくともこれまでの許容応力度法による設計において達成されていた水準に等価であるように設定する。

(2). 想定する照査式

本章で想定する照査式を式 (3.2.1) および式 (3.2.2) とする。

$$\varphi \cdot R \geq \sum S (\gamma_i \cdot P_i) \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

$$\varphi \cdot R \geq \sum S (\gamma_{pi} \cdot \gamma_{qi} \cdot P_i) \quad \dots\dots\dots (3.2.2)$$

ここに、R : 抵抗値

S : 応答値 (組合せ荷重による荷重効果)

P_i : 作用の特性値

φ : 抵抗係数

γ_i : 荷重係数 (=γ_{pi} · γ_{qi})

γ_{pi} : 荷重組合せ係数

γ_{qi} : 荷重ばらつき係数

許容応力度法においては、抵抗係数や荷重係数ではなく、これらの部分係数をひとくくりにしてあるとも解される全体安全率が用いられている。さらに、許容応力度法では、表 3.2.1 に示すとおり、考慮される荷重の組合せに応じて許容応力度の割増係数が考慮されている。許容応力度の割増係数の定量的な根拠は明確でなく、従来の標準的な材料や構造に対して経験的に設定されてきたものと考えられる。しかし、表 3.2.1 に示す許容応力度の割増係数は、設計状況の検討を行う立場からは、荷重組合せの発生頻度を考慮し、荷重ごとの内訳比率は別にしても、組み合わせた結果の規模についてのみ着目したときについて、他の組合せと同じ同時発生確率相当の組合せ荷重規模に換算するための係数と解釈できる。また、荷重を単純和することの不合理について許容値を緩和しようとするものとも解釈できる。

このように、これまでの道路橋示方書で考慮されていた「許容応力度」「許容応力度の割増係数」「その他照査基準ごとに設定される安全余裕」は、橋の性能との関連性について信頼性の観点からの意味合い (生起確率や考慮されている不確実性の程度等) は明らかにされていない。部分係数のキャリブレーションを行うにあたり、鋼構造またはコンクリート構造、ならびに、上部構造または下部構造で共通に用いることができる荷重係数を設定する必要があり、表 3.2.2 に示すように許容応力度の割増係数については荷重係数の中で反映されるような検討方法を考える必要がある。

表 3.2.1 過去の道路橋示方書における各編の許容応力度の割増係数

荷重の組合せ	II 鋼橋編		III コンクリート 橋編	IV 下部構造編	
	鋼部材	RC 部材		鉄筋・無筋 コンクリート	鋼構造
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重	1.00		1.00	1.00	
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重 +温度変化	1.15		1.15	1.15	
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重 +風荷重	1.25		1.25	1.25	
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重 +温度変化+風荷重	1.35		1.35	1.35	
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重 +制動荷重	1.25		1.25	1.25	
主荷重+主荷重に相当する特殊荷重 +衝突荷重	1.70	1.50	1.50	1.50	1.70
活荷重及び衝撃以外の主荷重 +地震の影響	1.50		1.50	1.50	
風荷重	1.20		1.20	—	
施工時荷重	1.25		1.25	1.50 (1.25)	
活荷重及び衝撃以外の主荷重 +地震の影響+温度変化の影響	1.70		1.65	1.65	1.70

表 3.2.2 安全率の配分について

安全率	安全率の配分
許容応力度の割増係数	<u>作用側</u> で考慮 内訳は明確ではないが、過去の経緯から作用の組合せ結果の頻度調整の意味が大きい（考慮する荷重の数により発現頻度が変化し、組合せ数が増加すると稀な発現頻度となり、かつ、特性値の規模を保ったままとみなせる足し合わせはさらに稀である）。
部材や橋の状態や材料特性に依存する安全率	<u>抵抗側</u> で考慮
その他の安全率	<u>抵抗側</u> で考慮 作用と抵抗との間にとる安全余裕であるが、本検討では便宜上抵抗側で取り扱うこととする。

3.2.2. 構造物・部材の形状や死荷重、その他永続荷重のばらつきと荷重係数

構造物・部材の形状や死荷重に関係する不確実性として、

- ・その時々調達における使用材料、材料製造ライン等の違い
- ・材料の性質を部材の挙動に反映させる場合のモデル誤差（例えば鉄筋量や部材断面寸法に応じて、同一コンクリート部材中でもクリープ挙動や乾燥収縮挙動に空間分布があることが知られている）¹⁾²⁾。
- ・型枠等の製作精度などに伴う寸法の違い

などがある。このようなばらつきを表すための死荷重やその他永続荷重のばらつきは、

- ・建設された構造物、部材の標準的な単位体積重量に対する実際の構造物の単位体積重量の違い
- ・クリープや乾燥収縮のパラメータの標準値に対する実際の材料試験値のばらつき
- ・材料試験値を基に部材が受ける長期荷重を予測するときに含まれるモデル誤差

などである。すなわち、死荷重、その他永続荷重の統計量は、一定のプロセスと施工管理の下で作られた橋や部材について、計算によって得られる死荷重やその他永続荷重の特性値と実測値の比の統計量に等しい。

このような特性値各々に対して一定の荷重係数を乗じることにより、死荷重やその他永続荷重の設計値が得られる。本研究では、一定の基準のもとで設計し、一定の品質規格を満足した材料を調達し、適切に施工した橋や部材の死荷重やその他永続荷重が、それぞれの設計値を上回ることを一定の割合以下になることを保証するように荷重係数を決定する。例えば、死荷重であれば荷重係数は以下の式(3.2.3)のとおり設定される。

$$S_{Dd} = \eta_D \cdot \gamma_D \cdot S_{Dk} = \eta_D \cdot (1 \pm k \cdot V_{SD}) \cdot S_{Dk}, \quad \gamma_D = 1 \pm k \cdot V_{SD} \quad \dots\dots\dots (3.2.3)$$

- ここに、 S_{Dd} : 死荷重の設計値
- γ_D : 死荷重の荷重係数
- V_{SD} : 死荷重の変動係数
- k : 確からしさを設定するための係数
- η_D : 変動作用と組み合わせるときの補正係数

3.2.3. 完成後の構造物に作用する変動作用の組合せとばらつき

橋は完成後または供用開始後に、大きさや組合せが時々刻々と変化する各変動作用の同時載荷を受ける。作用が橋に与える影響度を測る手法に決まったものは無いが、影響度は橋や部材の構造にも依存する。したがって、本研究では荷重を評価する上での参照期間を 100 年としたときに、参照期間中に各変動作用が時々刻々と与える影響を各部材の発生断面力の履歴として評価する。

各変動作用が橋に与える影響を評価する方法として、例えば式(3.2.4)のような考え方があ

$$S_d = \sum S_{di} = \sum \gamma_i \cdot S_i = \sum \{(1 + k \cdot V_i) \cdot S_i\}, \quad \gamma_i = 1 + k \cdot V_i \quad \dots\dots\dots (3.2.4)$$

- ここに、 S_d : 設計作用
- γ_i : 変動作用 S_i の荷重係数
- V_i : 変動作用 S_i の参照期間中の最大値分布の変動係数
- k : 信頼性水準を調整するための係数

例えば、米国 AASHTO 基準では式(3.2.4)の考え方が用いられているが、荷重組合せは従前の許容応力度法で考慮されていたものから変わっておらず、許容応力度法のときの限られた荷重組合せに対

して各荷重の最大値同士を重ね合わせることが設計の与条件とされている。しかし、この方法の問題点は 2 点ある。まず、安全側に評価された設計作用の単純重ね合わせになるので、考慮する作用の種類が増えるほど現実の同時載荷状況とはかけ離れて、過大評価を与えることである。次に、橋が置かれる状況の信頼性を直接的に説明できないことである。言い換えると、荷重組合せの結果として橋が置かれる同時載荷状況や橋に実際に生じる応答の水準が参照期間中にどの程度の頻度で生じ得るものかについて明らかでない。また、このような方法は、それまでの永い経験に基づいて適宜に修正が加えられてきた従来の体系が確保していると考えられる安心を基本に、大幅な変更を加えることに対しては慎重な考え方であるが、方法論としては経験ベースであることから、経験の乏しい形式や規模の橋では、それぞれの部材が分担する各荷重の寄与度やそれに応じて各荷重のばらつきが部材に与える影響の感度が従来形式と異なってくる可能性に対しては適用し難い。

これに対して、本研究では参照期間中の任意の時刻において橋が置かれる状況を、同時載荷状況や同時載荷に対する応答規模の発生頻度に説明性を持たせて作用の組合せを表現する。したがって、荷重係数のキャリブレーションにおいては、荷重組合せをあらかじめ限定することなく、また各荷重組合せにおいて荷重係数を 1 または 0 とするかどうかではなく、参照期間中に部材に大きな断面力が生じるときの各荷重の内訳と寄与率を係数として特定できるような方法を用いる必要がある。方法論としても、経験に乏しい形式や規模の橋であっても同様にシミュレーションが行え、最も厳しい応力状態をもたらす荷重同時載荷状況の概略をつかめる点で優れている。なお、これは設計基準が従来の荷重組合せや最近の橋梁の構造諸元、不具合などその他の事実や経験的判断、割切りを考察して荷重組合せや係数を与えることを否定するものではない。

3.2.4. 各橋梁の信頼性指標の評価

任意の橋において 100 年間（または参照期間）の任意時刻の状況に対して、照査式を満足しないことが一定の割合以下であることを評価するときの確率過程や統計的性質の考慮の枠組みを表 3.2.3～表 3.2.5 にまとめる。このとき、永続荷重も変動荷重も確率過程として扱うときの荷重組合せについて検討しようとする、表 3.2.4 または表 3.2.5 で扱うことが考えられる。

表 3.2.4 と表 3.2.5 の違いの概念図を図 3.2.1 に示す。断面力 100 年最大値分布から目標とするフラクタイル値に対応して抽出される断面力標本の中の各荷重の大きさの内訳を見たとき、断面力としての確率水準を揃えるので、当該橋の死荷重の確率水準が異なれば断面力標本に含まれる変動作用の確率水準も異なることが考えられる。したがって、表 3.2.5 のように 100 年間のシミュレーションを複数回繰り返すときに参照期間（100 年）ごとに異なる死荷重値を確率的に与えて、それに対して参照期間中の変動作用の確率過程を与えたシミュレーション 100 年間分を 1 度実施し、各断面の断面力最大値標本を抽出し、次に、同じ橋梁に関して、死荷重値を確率に基づき更新したうえで、新たな変動作用の確率過程を与えたシミュレーションを実施するという過程の繰り返しを行うことで、当該橋梁の断面力の 100 年最大値分布を作成することも考えられる。この場合には、3.2.1. に述べた「B. 例えば 100 年間（または参照期間）時々刻々と変化する一組の状況にある複数の橋について、1 回でも照査式を満足しないことがある橋が、複数の橋のうち一定の割合以下の数であること」を達成することで、「A. 任意の橋について、例えばある 100 年（参照期間）を設けて任意の時刻における状況を複数組の外力で考え、各 100 年をサンプル（標本）として見たとき、ある照査式を満足しない 100 年の標本数が複数の 100 年間のうち一定の割合以下であること」を近似していることになる。表 3.2.4 の方法であっても、「A. 任意の橋について、例えばある 100 年（参照期間）を設けて任意の時刻における状況を複数

組の外力で考え、各 100 年間にサンプル（標本）として見たとき、ある照査式を満足しない 100 年の標本数が複数の 100 年間のうち一定の割合以下であること」に関して、検討対象橋梁数を増やすことで十分に信頼できる荷重係数値が見いだせると考えられるが、試算橋梁数（シミュレーションの着目断面の総数）が限定される場合には表 3.2.5 の方法による方が対象橋梁数の不足を補えるものと考えられる。したがって、本研究では表 3.2.5 の方法によって荷重係数を求める。

表 3.2.3 橋の性能評価の考え方（案 1）

荷重係数の算出		抵抗係数の算出
<ul style="list-style-type: none"> ● 死荷重（および長期荷重）の統計量は、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋を集めたときの重量のばらつき。 ● 荷重係数は $(1 \pm k V_{SD})$ 	橋を架橋した時点で決定される統計量	部材強度の統計量： <ul style="list-style-type: none"> ● 異なる地点・機関で行われた載荷試験データと設計式の比のばらつき ● 材料試験片・試験体の実際の強度と規格値の比のばらつき すなわち、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋の部材を集めたときの強度のばらつき。
シミュレーションを、以下の手順で実施 <ul style="list-style-type: none"> ● 変動作用のみを考慮して、当該橋の断面力 100 年最大値をもとめる。変動荷重が時々刻々作用する状況をシミュレーション。 ● 100 年最大値分布をつくるための各 100 年のシミュレーションは複数回実施。 ● 各断面力について、100 年間最大値が一定のフラクタイル値以下とならないような荷重標本を抽出した結果を用いて、各荷重の荷重係数を決定 	架橋後の変動作用の同時載荷状況	
設計荷重は、 （あるフラクタイル値の死荷重） + ...（その他永続荷重）... +（あるフラクタイル値の組合せ変動作用） として決定されたものを利用 （荷重組合せに応じて、変動作用については目標とするフラクタイル値を変更）	信頼性水準の設定	抵抗係数は、 <ul style="list-style-type: none"> ● 当該地点で同じ図面に基づいて 1 回だけ架けることを前提に、 ● どんな部材でも一定以上のフラクタイル値以上の強度が得られるように決定されたものを利用。 （※ 部材強度の設計は、死荷重、死荷重+活荷重、死荷重+活荷重+温度...、並びに地震を含む組合せなど、組合せによらず同じ抵抗係数を用いることを指向。）

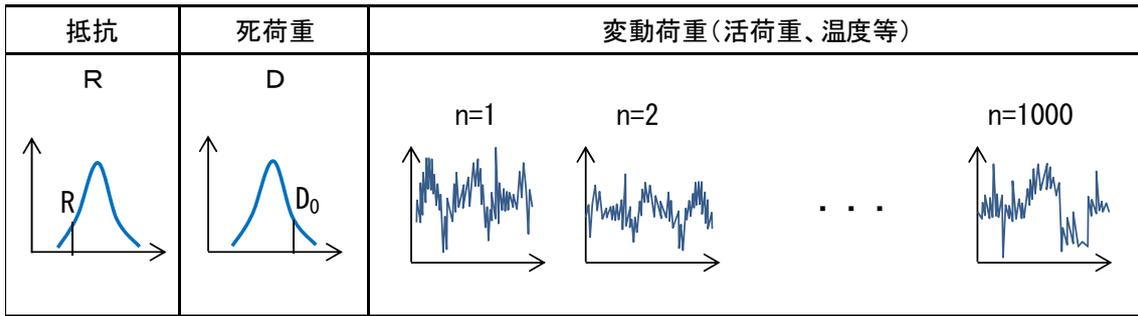
表 3.2.4 橋の性能評価の考え方 (案2)

荷重係数の算出		抵抗係数の算出
<ul style="list-style-type: none"> ● 死荷重 (および長期荷重) の統計量は、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋を集めたときの重量のばらつき。 ● 荷重係数は $(1 \pm k V_{SD})$ ● 荷重組合せに関する低減係数は別途以下のシミュレーション結果に基づき決定。 	<p>橋を架橋した時点で決定される統計量</p>	<p>部材強度の統計量：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 異なる地点・機関で行われた載荷試験データと設計式の比のばらつき ● 材料試験片・試験体の実際の強度と規格値の比のばらつき <p>すなわち、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋の部材を集めたときの強度のばらつき。</p>
<p>シミュレーションを、以下の手順で実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該橋梁の死荷重を確率的にひとつ決定。 ● 当該橋の断面力 100 年最大値をもとめるときには、そこにその他の変動荷重が時々刻々作用する状況をシミュレーション。 ● 100 年最大値分布をつくるための各 100 年のシミュレーションは複数回実施。ただし、死荷重は、橋を架橋した時点で決定される量であるため、全 100 年の死荷重は一定。 	<p>架橋後の変動作用の同時載荷状況</p>	
<p>荷重係数 (組合せ係数) は、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該地点で同じ図面に基づいて 1 回だけ架けることを前提に、 ● 完成した構造なりの死荷重や長期荷重を考慮して、 ● 一方では各回の橋が受ける荷重の確率過程 100 年分を複数回シミュレーションした結果に基づき、 ● 各断面力について、100 年間最大値が一定のフラクタイル値以下とならないような荷重標本を抽出した結果を用いて、決定されたものを利用 <p>(荷重組合せに応じて、目標とするフラクタイル値を変更)</p>	<p>信頼性水準の設定</p>	<p>抵抗係数は、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該地点で同じ図面に基づいて 1 回だけ架けることを前提に、 ● どんな部材でも一定以上のフラクタイル値以上の強度が得られるように決定されたものを利用。 <p>(※ 部材強度の設計は、死荷重、死荷重+活荷重、死荷重+活荷重+温度...、並びに地震を含む組み合わせなど、組合せによらず同じ抵抗係数を用いることを指向。)</p>

表 3.2.5 橋の性能評価の考え方 (案 3)

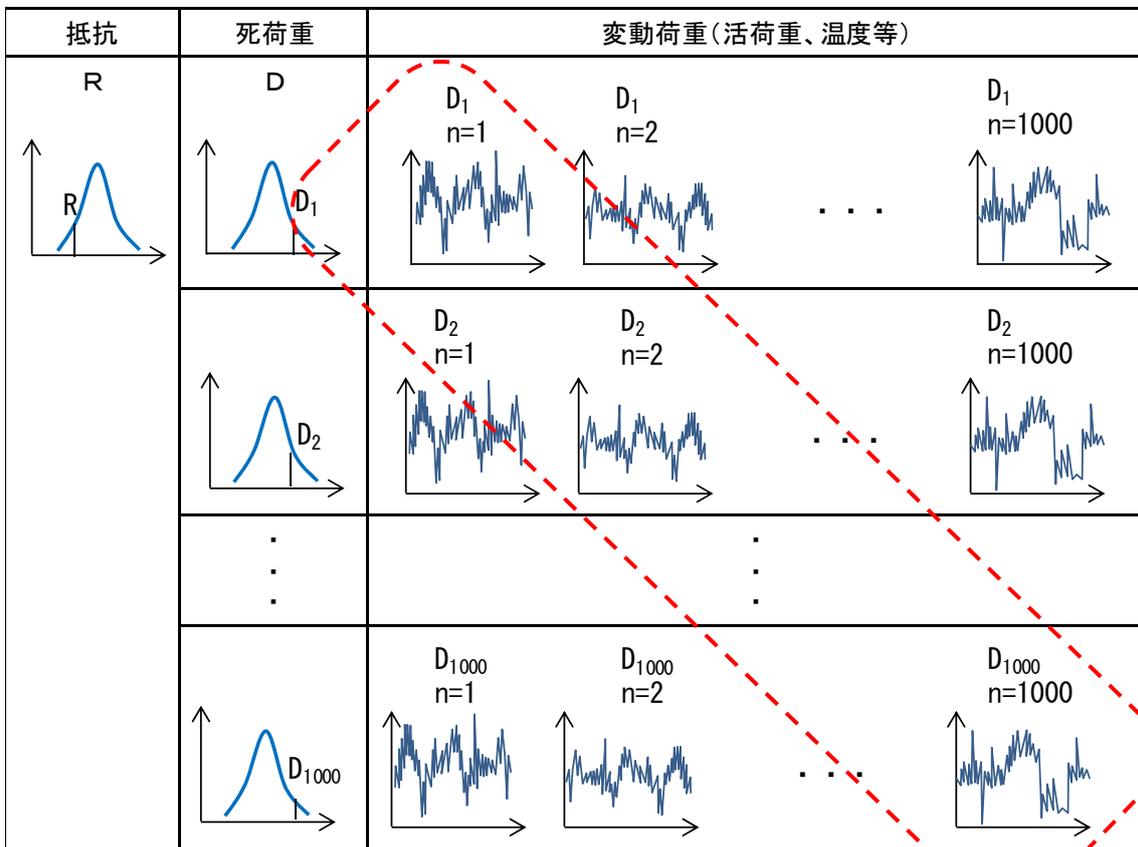
荷重係数の算出		抵抗係数の算出
<ul style="list-style-type: none"> ● 死荷重 (および長期荷重) の統計量は、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋を集めたときの重量のばらつき。 ● 荷重係数及び組合せに関する低減係数は別途以下のシミュレーション結果に基づき決定。 	<p>橋を架橋した時点で決定される統計量</p>	<p>部材強度の統計量：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 異なる地点・機関で行われた載荷試験データと設計式の比のばらつき ● 材料試験片・試験体の実際の強度と規格値の比のばらつき <p>すなわち、一定のプロセスで調達・施工管理して作られた橋の部材を集めたときの強度のばらつき。</p>
<p>シミュレーションを、以下の手順で実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該橋の断面力 100 年最大値をもとめるときには、時刻 $t=0$ の当該橋梁の死荷重を確率的に与え、そこにその他の変動荷重が時々刻々作用する状況をシミュレーション。 ● 100 年最大値分布をつくるための各 100 年のシミュレーションは複数回実施。死荷重も、100 年ごとに異なる値を確率的に与える。 	<p>架橋後の変動作用の同時載荷状況</p>	
<p>荷重係数 (組合せ係数) は、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該地点で同じ図面に基づいて、シミュレーション回数回だけ架橋する場合も想定し、 ● それぞれの回に完成した構造なりの死荷重を考慮して (その他の長期荷重については全 100 年で同一とした)、 ● 各架橋回の橋が受ける荷重の確率過程は 100 年分を複数回シミュレーションし、 ● 当該橋梁の各断面力について、100 年間最大値が一定のフラクタイル値以下とならないような荷重標本を抽出した結果を用いて、死荷重係数も含めて決定されたものを利用 <p>(厳密には、各発生死荷重に対して、複数回 (X 回) の 100 年をシミュレーションしたうえで、次の発生死荷重なりのシミュレーションに移行するという、X 回×X 回のシミュレーション回数が必要)</p> <p>(荷重組合せに応じて、目標とするフラクタイル値を変更)</p>	<p>信頼性水準の設定</p>	<p>抵抗係数は、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 当該地点で同じ図面に基づいて 1 回だけ架けることを前提に、 ● どんな部材でも一定以上のフラクタイル値以上の強度が得られるように決定されたものを利用。 <p>(※ 部材強度の設計は、死荷重、死荷重+活荷重、死荷重+活荷重+温度...、並びに地震を含む組み合わせなど、組合せによらず同じ抵抗係数を用いることを指向。)</p>

(表 3.2.4 の捉え方)



ある橋の参照期間 100 年間に對する信頼性指標を求める場合

(表 3.2.5 の捉え方)



本研究のシミュレーションで実施

ある地点に 1000 回橋を架けた場合も考慮して
参照期間 100 年間に對する当該橋の信頼性指標を求める場合

図 3.2.1 表 3.2.4 と表 3.2.5 の違いの概念図

3.3. 荷重の重ね方および組合せ断面力の評価方法の提案

3.3.1. シミュレーションの手順

ある橋梁に対してシミュレーションを行うときの手順を以下に示す。また、これらの手順のイメージを図 3.3.1、シミュレーションのフローを図 3.3.2 に示す。

- ① 各種荷重の発生頻度や強度分布などの統計的性質のデータベースを作成する。
- ② 各橋に対して、100 年の間、荷重は①でデータベース化した統計的性質に基づきモンテカルロシミュレーションでランダムに発生させることで、同時載荷状況の時系列確率過程を与え、100 年間における断面力の発生状態を算出する。この結果から、全ての着目断面毎にその 100 年間で最大の断面力と断面力の内訳としての荷重組合せおよび断面力に占める各種荷重の寄与分を保存する。
- ③ ②を複数回（例えば 1,000 回）繰り返す。
- ④ 着目断面、着目断面力の種類ごとに複数個（例えば 1,000 個）の 100 年最大値から断面力 100 年最大値分布を作成する。
- ⑤ 各着目断面と着目断面力について、予め設定する非超過確率の範囲内にある断面力 100 年最大値標本を抽出する。そして、全ての着目断面と着目断面力の 100 年最大値分布から抽出した 100 年最大値標本について荷重組合せおよび各荷重の寄与分をリスト化する。
- ⑥ 100 年最大値標本の作用別断面力と作用の特性値を載荷した時の断面力の比率を荷重係数として算出する。そして、膨大なリストから類似・重複するものは統合したり、ある荷重組合せを考慮することで安全側となってしまうような荷重組合せを取り除くことで、荷重組合せと荷重係数を絞り込む。

【荷重の重ね合わせ（同時載荷）の模式図】

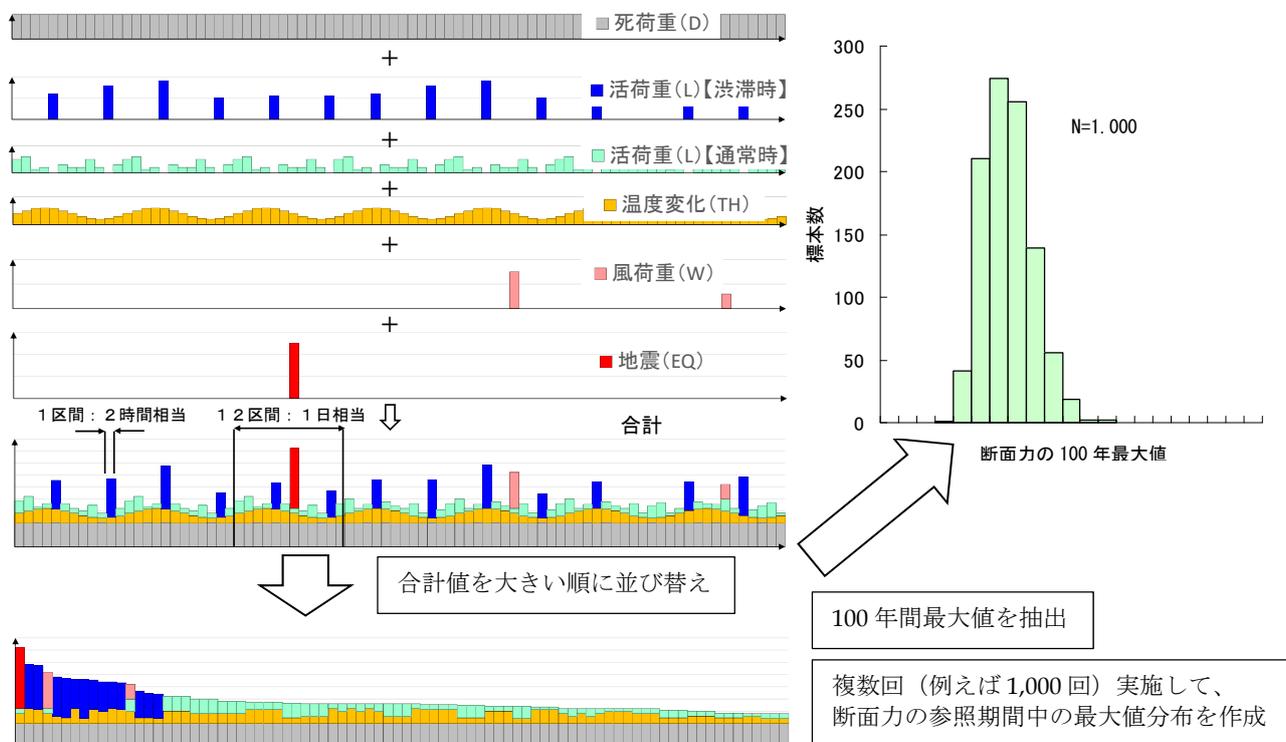


図 3.3.1 シミュレーションのイメージ図

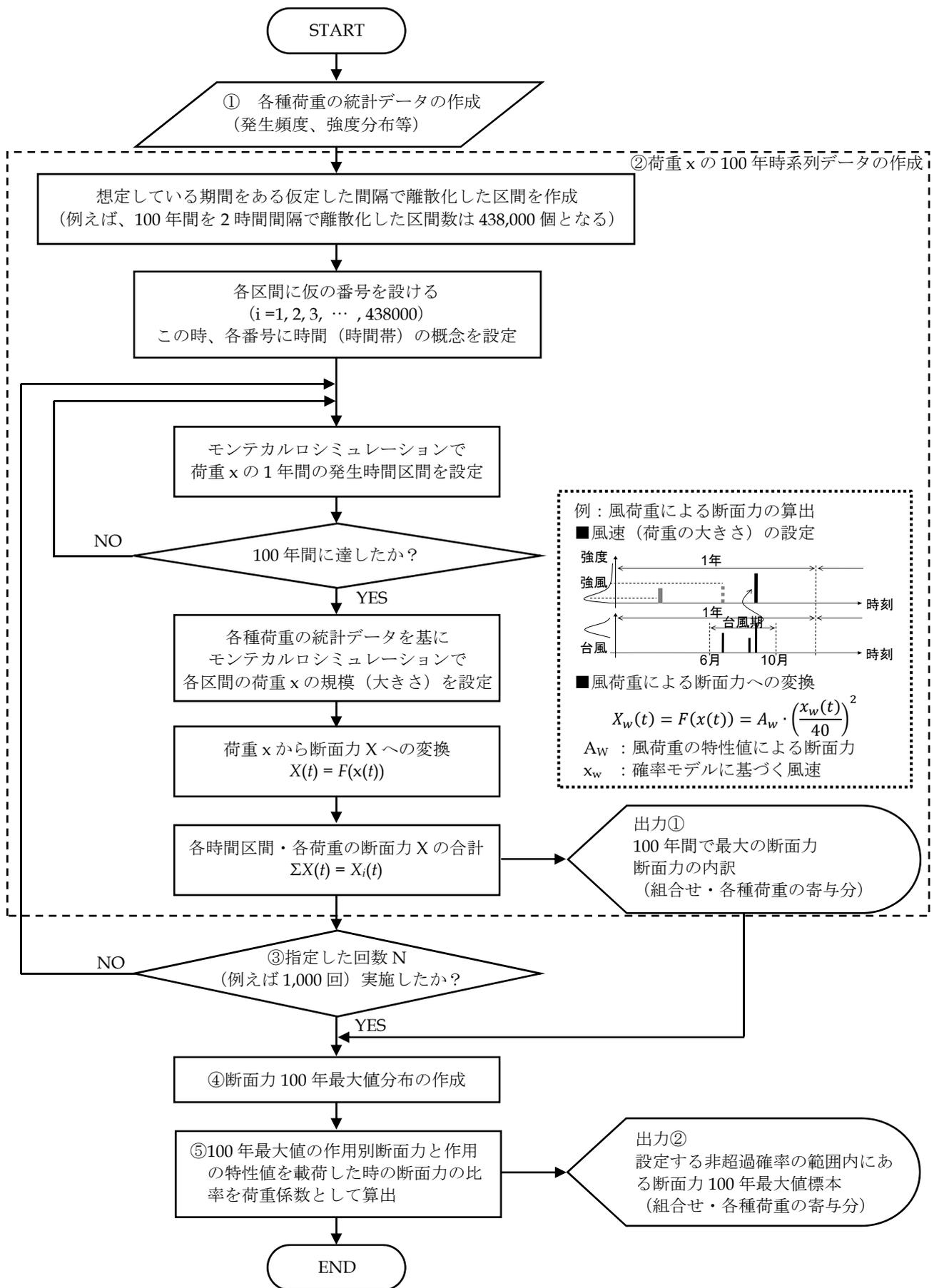


図 3.3.2 シミュレーションのフロー

3.3.2.1 橋あたりのシミュレーションの回数

本研究におけるシミュレーションは、参照期間 100 年を一定時間間隔で離散化する。そして、ある時刻における各種荷重は独立した確率量とし、その値はモンテカルロシミュレーションによって与える。

後述の 4.3.~4.6.に示す各種荷重の発生頻度の整理結果から、荷重の継続時間は 2 時間程度を見込めばよいと考えられる。そのため、本研究で用いる B-C モデルは 1 年間を 4,380 区間（1 区間は 2 時間相当）とし、参照期間 100 年間を 438,000 区間に分割するものとした。また、これを 1,000 回繰り返すことを前提とする。

以下では、100 年間の最大の断面力、および各荷重の最大値を 100 年間×1,000 回のシミュレーションで把握できるかという観点で、時間分割数の妥当性を確率・統計的に考察する。

(1). 参照期間中の各荷重の最大値を求めるのに必要な標本数の理論値

モンテカルロシミュレーションにて、それぞれ指定する確率分布を持つ乱数の生成が行うが、モンテカルロシミュレーションから得られる 100 年最大値分布の精度は、標本の大きさ n が大きくなるにつれて上昇する。この精度は解の変動係数 COV によって評価できる³⁾。

大きさ n の標本によって確率 P を推定する場合、標本平均 \bar{p} は確率 P の不偏推定量として示される。また、 \bar{p} の標本分散は式 (3.3.1) のように与えられる。

$$\sigma_{\bar{p}}^2 = \frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n} \dots\dots\dots (3.3.1)$$

したがって、モンテカルロシミュレーションにおける大きさ n の標本から推定された標本平均 \bar{p} の変動係数 COV は式 (3.3.2) のようになる。

$$COV(\bar{p}) = \sqrt{\frac{(1-\bar{p})}{n\bar{p}}} \dots\dots\dots (3.3.2)$$

モンテカルロシミュレーションから得られる解の変動係数 COV を得るためには、同じシミュレーション過程を繰り返す必要があり、標本の大きさが n であるシミュレーションを N 回繰り返すことになる。その N 回のシミュレーションの平均と標準偏差から解の変動係数が推定される。式 (3.3.2) を用いて標本の大きさ n を持つモンテカルロ解の誤差を評価すると、標本平均 \bar{p} の推定値に許容される誤差を仮定することで、必要とされるモンテカルロシミュレーションの標本の大きさ n を求めることも可能となる。

$$error(\%) = 200 \sqrt{\frac{1-\bar{p}}{n\bar{p}}} \dots\dots\dots (3.3.3)$$

モンテカルロ解の誤差(error)を 1%と仮定した場合に、必要とされるモンテカルロシミュレーションの標本の大きさ n は式 (3.3.4) のようになる。例えば、標本平均 $\bar{p} = 0.50$ として求めると 40,000 回の解が得られる。

$$error(\%) = 200 \sqrt{\frac{1-\bar{p}}{n\bar{p}}} = 200 \sqrt{\frac{1-0.50}{n \cdot 0.50}} = 1(\%) \quad \therefore n = 40,000 \quad \dots\dots\dots (3.3.4)$$

(2). 100年間の時間分割数

例えば文献によれば、米国やノルウェーにおける構造物の設計基準が規定する許容破壊確率は 10^{-5} ~ 10^{-3} 程度のオーダーといわれているようである⁴⁾。モンテカルロシミュレーションを用いて、構造物の破壊確率のような非常に小さな値（例えば、 10^{-4} のオーダー）を対象とした数値計算を行う場合、非常に小さな値に対して十分な精度の推定値を得るためには、標本の大きさ n は少なくとも破壊確率の逆数の10倍程度を必要とする⁵⁾。このような標本数の考え方を参考に、モンテカルロシミュレーションの標本の大きさ n を式 (3.3.4) の10倍程度とすると、参照期間100年を400,000区間以上で表すこととなる。本研究で用いる時間分割数は438,000区間であることから、式 (3.3.4) を基に算出した時間分割数を確保している。

(3). シミュレーションの繰り返し回数

供用中に橋が置かれる状況は多岐にわたる作用の無数の組合せの連続であり、これらの全てを対象に設計でそれぞれを考慮することは不可能である。したがって、橋の性能を評価する上で支配的となる状況を抽出して設計で考慮するために、荷重とその組合せは橋の要求性能を照査する上で最も不利となり得るようにそれらを組み合わせたものとする。そこで、荷重シミュレーションにおいては、荷重そのものの大小ではなく、参照期間中に時々刻々と各作用が発生している時の着目断面の発生断面力が最大となった時をもって、当該部材が最も不利な状況におかれているものとみなす。しかし、1回の荷重シミュレーションで算出される断面力は標本依存性を有する。そこで、荷重シミュレーションを十分な回数実施することで、十分な数の標本から断面力最大値分布を作成し、確率・統計的な観点からも当該部材が最も不利な状況におかれている時の荷重の組合せと大きさの代表的な値を抽出することで、標本依存性を排除するものとした。

6章の、荷重組合せ・荷重係数を推定するためのモンテカルロシミュレーションでは、シミュレーションで得られた標本について、ある着目する確率水準の標本だけでなく、その断面力値 $\pm 10\%$ の標本も同等の確率水準の標本として抽出して分析している。このため、そこまで厳格に誤差評価をする必要はないと考えられるが、仮に式 (3.3.4) に示したモンテカルロ解の誤差(error)を1%とした場合、シミュレーションの繰り返し回数 N はモンテカルロ解の誤差の逆数の10倍として1,000回が必要となる。そこで、本研究では参照期間100年を1,000回繰り返して断面力最大値分布を作成するものとした。

(4). 各種荷重のシミュレーション回数の位置づけ

ここでは、後述の4.3.~4.6.に示す各種荷重の発生頻度の設定を基に、シミュレーションにおいて極値を取りこぼす可能性を確認しておく。

1). べき乗による推定法

べき乗による推定法は、1回の事象が起こる確率と構造物の参照期間内における非超過確率の関係がべき乗に従うと仮定するものであり、式 (3.3.5) の関係が成り立つ⁶⁾。

$$F_{max}(x) = [F(x)]^N \dots\dots\dots (3.3.5)$$

- ここに、 x : ある1回の事象が発生した時の構造物の応答値
- F : 1回の事象が起こる確率に関する累積分布関数
- $F(x)$: 1回の事象の非超過確率

F_{max} : 1回の事象が参照期間中に発生する確率の累積分布関数
 $F_{max}(x)$: 参照期間における非超過確率
 N : 参照期間における事象の発生頻度

式 (3.3.5) の関係を用いて、例えば参照期間 100 年での非超過確率 95%に相当する事象の発生確率は式 (3.3.6) から算出することができる。ここで、発生確率 $F(x)$ を算出するためには、対象とする事象の発生頻度（例えば 1 日あたりの発生頻度）の設定が必要となる。

$$F_{max}(x) = 0.95 = [F(x)]^{100 \times 365 \times n} \dots\dots\dots (3.3.6)$$

ここに、 n : 1 日あたりの事象の発生頻度

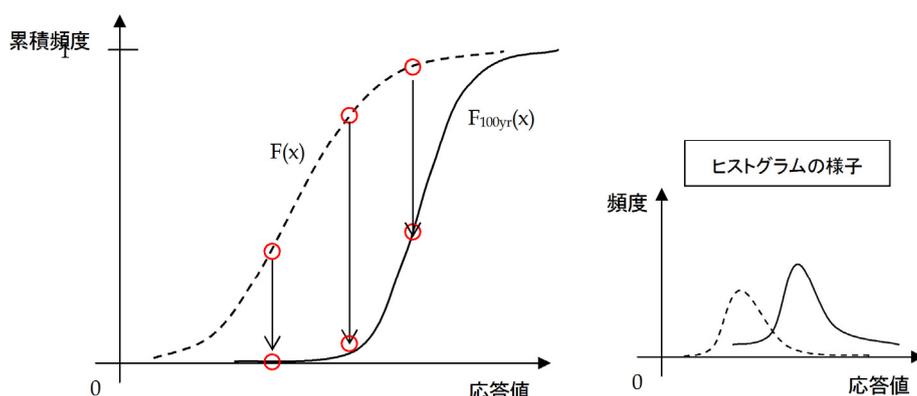


図 3.3.3 べき乗による推定法のイメージ

表 3.3.1 に 1 回の事象の発生確率に関する累積分布関数 F として日最大値分布、月最大値分布、および年最大値分布を仮定した場合の 1 回の事象の非超過確率 $F(x)$ の算出結果を示す。ここで、表 3.3.1 に示すシミュレーションの区間数は、1 回の事象の非超過確率 $F(x)$ の逆数であり、参照期間 100 年での非超過確率 95%に相当する事象を算出するのに必要となる時間分割を示している。

表 3.3.1 べき乗による推定法を用いたシミュレーションの区間数の算出

	発生頻度 (1日あたり) n [回]	参照 期間 [年]	参照期間の 非超過確率 $F_{max}(x)$	1回の事象の 非超過確率 $F(x)$	シミュレーション の区間数 [個]
日最大値分布	1.000	100	0.95	0.999998595	711,594
月最大値分布	0.033	100	0.95	0.999957257	23,395
年最大値分布	0.003	100	0.95	0.999487199	1,950

2). 各種荷重の計算回数の確率統計的な位置付け

後述の 4.3.~4.6.に示すシミュレーションで発生させる各種荷重の発生頻度を基に、べき乗による推定法を用いてシミュレーションにおける時間軸の離散化数（必要区間数）の確率統計的な位置付けを調べた結果を

表 3.3.2 に示す。ここに、シミュレーションでの必要区間数は、参照期間 100 年の非超過確率 95%値あるいは 99%値に相当する値を算出するための必要区間数を算出したものである。また、シミュレーションでの発生区間数は、100 年×1,000 回のシミュレーションの中で発生する B-C モデルの区間の個

数を算出したものである。

この結果から、シミュレーションにおける各種荷重の発生区間数は参照期間 100 年の 99%値を算出するのに必要となる区間数の 10 倍程度を確保していることとなる。つまり、参照期間 100 年の非超過確率 95%値あるいは 99%値が 100 年×1,000 回の中で複数回発生するような区間数を確保していることから、本検討における参照期間 100 年の断面力最大値分布の算出結果は各種荷重の極値を取りこぼす可能性は十分小さいと判断した。

表 3.3.2 シミュレーションにおける区間数

(a) 参照期間 100 年間での非超過確率 95%値の算出に必要な B-C モデルの区間数

	発生頻度 (1日あたり) n [回]	参照 期間 [年]	参照期間の 非超過確率 Fmax(x)	1回の事象の 非超過確率 F(x)	シミュレーション での必要区間数 [個]	シミュレーション での発生区間数 [個]	発生区間数 / 必要区間数	
活荷重	2.000	100	0.95	0.999999297	1,423,188	73,000,000	51.29 倍	
地震の影響	0.033	100	0.95	0.999957257	23,395	1,200,000	51.29 倍	
観測値	温度変化の影響	1.000	100	0.95	0.999998595	711,594	36,500,000	51.29 倍
	風荷重	0.033	100	0.95	0.999957257	23,395	1,200,000	51.29 倍

(b) 参照期間 100 年間での非超過確率 99%値の算出に必要な B-C モデルの区間数

	発生頻度 (1日あたり) n [回]	参照 期間 [年]	参照期間の 非超過確率 Fmax(x)	1回の事象の 非超過確率 F(x)	シミュレーション での必要区間数 [個]	シミュレーション での発生区間数 [個]	発生区間数 / 必要区間数	
活荷重	2.000	100	0.99	0.999999862	7,263,439	73,000,000	10.05 倍	
地震の影響	0.033	100	0.99	0.999991625	119,399	1,200,000	10.05 倍	
観測値	温度変化の影響	1.000	100	0.99	0.999999725	3,631,720	36,500,000	10.05 倍
	風荷重	0.033	100	0.99	0.999991625	119,399	1,200,000	10.05 倍

【参考文献】

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]、pp.105-108、2012
- 2) 高梅克彦、浜田純夫：クリープ・乾燥収縮モデルのばらつき感度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20、No. 2、pp. 697-702、1998
- 3) 伊藤學、亀田弘行監修：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善株式会社、2007
- 4) 星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986

- 5) 室津義定、米澤政昭、邵曉文：システム信頼性工学、共立出版株式会社、1996
- 6) (社) 日本道路協会：限界状態設計法分科会荷重検討班第一次報告書、1986