

## 第 1 編 信頼性理論による現行設計の信頼性評価

# 第 1 編 信頼性理論による現行設計の信頼性評価

## 目 次

1. 概 要	1-5
2. 信頼性理論による部分係数設計法の概要	1-6
2. 1 信頼性設計	1-6
2. 2 部分係数キャリブレーションについて	1-12
3. 信頼性指標算出手法の整理	1-13
3. 1 信頼性指標算出手法について	1-13
3. 2 モンテカルロシミュレーションによる方法	1-13
3. 3 FORM による方法	1-15
4. 信頼性指標の試算例	1-19
4. 1 試算橋梁の諸元	1-19
4. 2 信頼性指標試算に用いる各統計データ、試算方針	1-27
4. 3 信頼性指標 $\beta$ の算出	1-28
4. 4 考察	1-37
5. 部分係数設計法について	1-38
5. 1 部分係数による設計法の概要	1-38
5. 2 設計値法による部分係数キャリブレーション	1-42
5. 3 その他のキャリブレーション方法	1-45
6. まとめ	1-46

## 1. 概 要

ISO（国際標準化機構）において策定された国際規格は、WTO（世界貿易機関）の政府調達協定により政府機関においてその遵守が求められている。ISO2349（構造物の信頼性に関する一般原則）では、構造設計に際して構造物および構造要素に要求される性能を適切な程度の信頼性を有しながら検証することとしており、信頼性設計の考え方が取り入れられている。

国土交通省では、これらの国際基準への整合に向け、「土木・建築にかかる設計の基本」（2002年）<sup>1)</sup>において、要求性能を満たすことの検証方法として信頼性設計の考え方を基礎とし、限界状態設計法の導入を進めることを定めた。現在、土木・建築分野の各種構造物の設計に係わる技術基準については、「土木・建築にかかる設計の基本」の考え方に沿って検討・改訂が進められて行くこととされており、道路橋示方書については、要求性能の明確化、充実化及びみなし仕様の充実化に向けた次期改訂のための調査検討が行われ、要求性能の検証方法として部分係数設計法の導入検討が進められている。しかし、これら信頼性を考慮した設計法の実務への適用に関しては、長年の実績のある許容応力度設計法との整合性の確保を含め照査書式や部分係数の設定方法等、検討すべき課題も多い。

本検討は、鋼橋を対象として、信頼性設計法の概要や信頼性指標算出手法、部分係数キャリブレーション方法等の調査を行い、信頼性設計に関する基礎的な知識を得るとともに、現行設計法を対象にした信頼性指標の試算を行うことによって、現行設計と信頼性設計との違いを把握し、信頼性設計に関する理解を深めていくものである。

## 2. 信頼性理論による部分係数設計法の概要

### 2.1 信頼性設計

#### 2.1.1 信頼性設計の概要と設計水準

1. において述べたように、「ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則」では、構造物設計に際して構造物および構造要素に要求される性能を信頼性理論に基づき検証することを基本としている。ここでは、設計実務者を主たる対象として、現在の構造物設計法の国際スタンダードである信頼性設計への理解を深めるための一助となることを期待して、当研究会における調査成果に基づき信頼性設計の概要について述べることにする。

構造物の信頼性設計とは、「限界状態を設定して、作用及び構造物の耐力が有する不確定性を考慮し、設計供用期間内に限界状態を超える状態の発生を目標とする信頼性の範囲内に収めることを意図した設計法」と言える。一般に、土木構造物は複雑な自然環境に固定され、長い耐用期間には様々な環境作用や荷重などの外乱にさらされることになる。当然、設計においてその影響が考慮されているにも関わらず、これらの外乱によって構造物が被害を受ける理由は、作用の持つ発生過程の不規則性と発生時点、継続時間、その大きさ等の統計的な不確定要因によるためである。設計荷重として極稀にしか発生しないような大きな荷重を想定して設計することは、経済性や現実性などの判断から困難であるため、実設計では妥当と考えられる荷重レベルを設定した上で、構造物の設計を行う。そのため、長い耐用期間の間には設計荷重を超過するような荷重が構造物へ作用することも起こり得る。一方、作用に対して抵抗側となる構造物の強度または耐力についても、構造材料の物性値の統計的変動や製作精度の変動性など様々な不確定要素により、やはり変動性を有する。

信頼性設計は、これらの作用側、抵抗側の各統計的変動による不確定要因を合理的かつ定量的に評価することで、構造物の限界状態に対する信頼性を一定レベル確保しようという設計法である。

表-1.1 信頼性設計の設計水準

設計水準	照査式	評価パラメータ	摘要
レベル 破壊確率による設計	$P_{fT} \quad P_f$	破壊確率	破壊確率 $P_f$ を直接照査
レベル 信頼性指標による設計	$T$	信頼性指標	確率密度の単純化により得られる信頼性指標による照査
レベル 部分係数設計法	$R_d \quad S_d$	設計用値	信頼度を与えるための部分係数を使った設計値による照査

信頼性設計は、その信頼性の評価方法に応じて表-1.1 に示す3つの設計水準がある。最も高位に属するレベル は構造物の破壊確率  $P_f$  によって、レベル は信頼性指標によって、最も簡易なレベル は部分係数 を用いた性能照査式によってそれぞれ評価される。

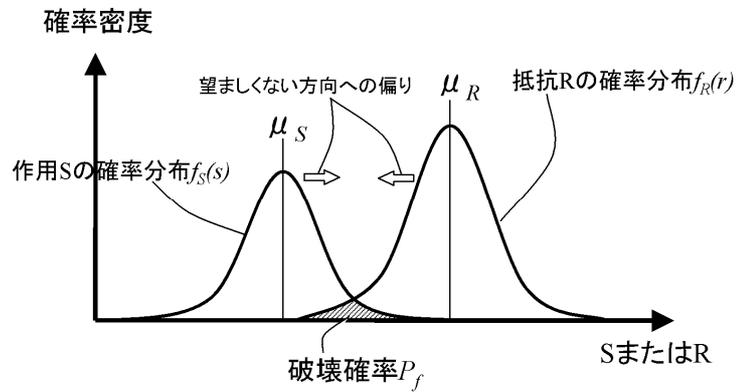
いま、例えば、作用・荷重側ともに設計上考慮すべき不確定要素が一つずつであり、作用側  $S$ ・荷重側  $R$  の不確定要素の統計データが図-1.1 a) のように与えられる場合を仮定する。設計上の応答値と抵抗値の仮定を  $\mu_S, \mu_R$  としたとき、これらの値が統計的に変動する可能性がなければ、常に  $S < R$  であり作用値が抵抗値を上回ることとはなく、恒久的に構造物は破壊しないこととなる。しかし、実際の構造物は図-1.1 a) に示すように作用側も抵抗側もバラつきを持っていることがほとんどであり、これらの統計的変動によって、それぞれ望ましくない方向への偏りが生じた場合に、作用値が抵抗値を上回る可能性が生じる。このとき、 $S > R$  となり構造物は破壊を起こす。この破壊確率を斜線で示した  $P_f$  として求めることができる。a) の基本モデルを基に、性能関数  $Z = R - S$  を定義し、性能関数  $Z$  の確率分布を示したものが図-1.1 b) である。このとき、 $Z < 0$  の領域の確率分布  $f_z(z)$  の積分値が同じく破壊確率  $P_f$  である。

レベル の信頼性設計法の評価に用いられる破壊確率の算出にあたっては、一般に、図-1.1 b) のような性能関数に基づいて同時確率密度関数を求め、これを多重積分する必要がある。しかしながら、実際の構造物は作用・抵抗ともに数多くの不確定要素があり、実際の性能関数は多次元かつ複雑な形状を示しており、これらの同時確率密度関数の定式化や高次の多重積分の実行などは困難を伴うことが多く実用的ではない（図-1.2）。

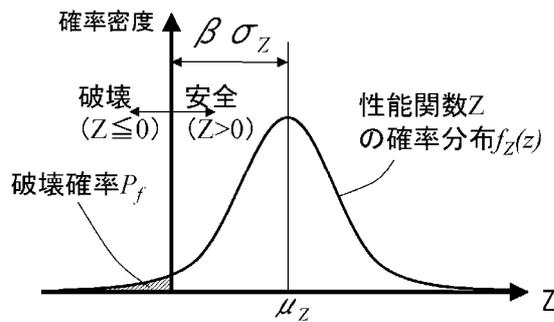
また、レベル 信頼性設計法においては、破壊確率と関連付けられる信頼性指標 を評価パラメータとしている。信頼性指標 の概念は図-1.1 b) に示すとおりであり、性能関数の平均値  $\mu_z$  から破壊点 ( $Z=0$ ) までの距離を表すパラメータである。レベル 信頼性設計法においては、複数の不確定要素を含む性能関数に対して、一般的に、確率密度を単純化した上で1次信頼性理論 (FORM; First-Order Reliability Method) 等の方法に基づき信頼性指標 の評価が行われる。

最も簡易なレベル 信頼性設計については、目標破壊確率  $P_{fT}$ 、または目標信頼性指標  $T$  に基づいて、作用と抵抗のそれぞれに対して部分安全係数を定め、それらの係数をもつ設計照査式に従って決定論的手法で設計を行う方法である。すなわち、破壊確

率または信頼性指標を介して，示方書の各係数値を決定することになり，示方書に規定された部分係数によって設計を行えば，目標とする信頼性は確保されるため，設計者は直接確率統計的手法を用いなくても設計が可能となる。次期示方書改訂では，このレベルの信頼性設計法である部分係数設計法が導入される見込みである。



a) 基本モデル



b) 信頼性指標の定義

図-1.1 信頼性理論の概要図

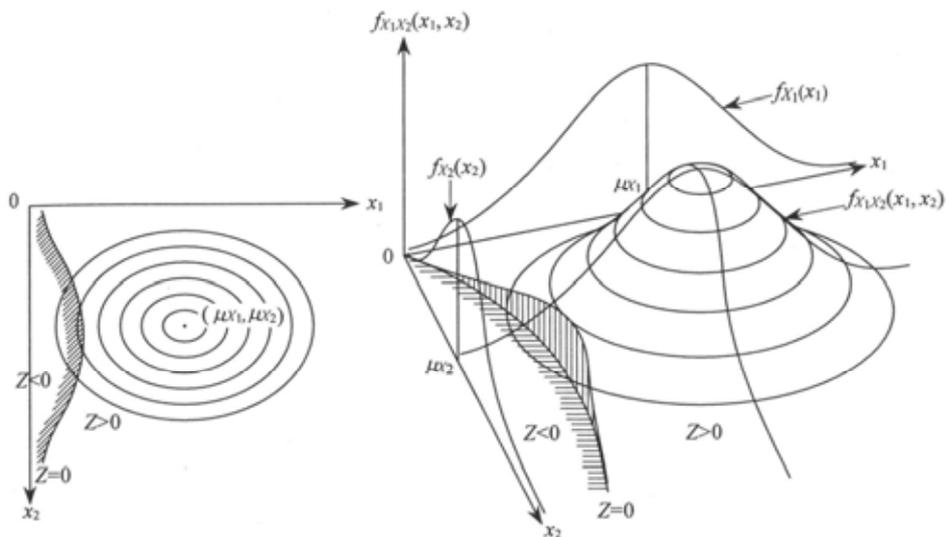


図-1.2 不確定要素が2変数の場合の破壊確率概念図<sup>2)</sup>

### 2.1.2 信頼性設計の手順

図-1.3 に信頼性設計の手順の一例を示す。前項で述べたように、信頼性設計は対象とする構造物に作用する荷重や適用する材料・部材強度に関する統計・確率分布を明確にした上で、限界状態に対する安全性を破壊確率もしくは信頼性指標で評価する。よって、設計にあたっては、対象とする限界状態を明確にするとともに、各種の不確定要因となる統計量を事前に調査・収集する必要がある。

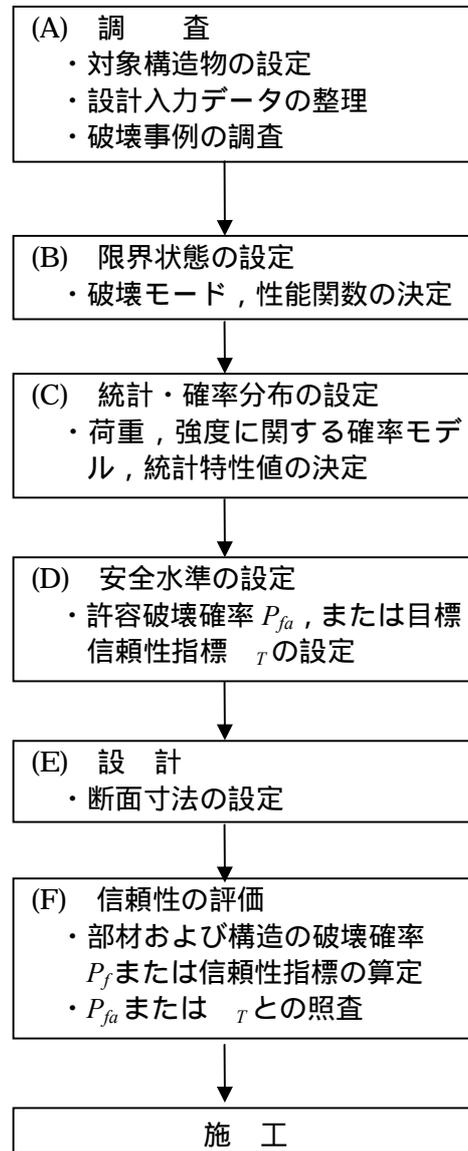


図-1.3 信頼性設計の手順例

### 2.1.3 安全水準の設定

構造物の信頼性設計を行うにあたって、対象とする限界状態と荷重・強度の統計分布が得られたとして、次に重要となることが、図-1.3の(D)安全水準の設定である。対象とする構造物に対して、どの程度の確率水準で破壊に対する安全性を担保させるかを設定する必要がある。表-1.2に安全水準の設定例<sup>3)</sup>を示す。安全水準の設定方法については、明確な方法はなく、各機関や対象構造物によって適用方法は異なるものの、最も一般的な方法としては、表-1.2の 現行設計示方書へのキャリブレーションに基づく方法が挙げられる。

現行示方書へのキャリブレーションに基づく方法では、現行の設計示方書に従って設計施工された解析対象と同種で、ほぼ同じ解析条件を有する複数の実在構造物の破壊確率を算定して、この値をもとに  $P_{fd}$  あるいは  $T$  を決定する方法である。この方法は、現行設計法による構造物が有する信頼度へ整合させること、すなわちキャリブレーションと呼ばれ、現行の設計示方書に従って設計・施工された構造物の有する信頼度が、歴史的な経緯からみて社会的にも十分に容認されており、経済性と安全性についてもある程度まで均衡がとれているとすることが前提となっている。また、この方法によれば、信頼度のレベルが整合されているので、今までに設計・施工された実在構造物と大きく異なるものは設計されないことから、多くの人から容認されることが期待でき、信頼性理論の設計への導入が容易になろうとする考え方もベースにあり、構造物信頼性理論、特に設計水準レベル 設計法を取り入れた数多くの設計示方書の改訂に際して、この方法が適用されている。

次期示方書において、レベル 信頼性設計法である部分係数設計法が導入される見込みは前述したとおりであるが、この部分係数の設定にあたって、この現行示方書とのキャリブレーションによって、現行相当の信頼性を有する構造物が設計されるよう、部分係数が設定される見込みである。

本報告書では、この道示改訂における部分係数キャリブレーションのうち、主に現行設計の信頼性評価方法について、手法の概要整理と信頼性指標の試算を行う。

表-1.2 信頼性設計における安全水準の設定例<sup>3)</sup>

方法	概要	問題点	適用例
事故統計に基づく方法	事故、損傷に関する統計資料に基づき破壊確率を求め、これを参考として許容破壊確率 $P_{fa}$ 、あるいは目標信頼性指標 $r$ を決定する方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>母数（対象とする構造物の総数）が定めにくいこと。</li> <li>事故の原因にはヒューマンエラー等による場合が多く、その影響を受け、設計段階での <math>P_{fa}(r)</math> を直接定めることが難しいこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>P_{fa}(r)</math> の決定の参考値として用いられている。</li> <li>ダムあるいは鉄道、高速道路の橋梁等に対して <math>P_f</math> を求めた事例がある。</li> </ul>
現行設計示方書へのキャリブレーションに基づく方法	現行の設計示方書により設計された種々の構造物、部材の $P_f()$ を求めて、その資料に基づき $P_{fa}(r)$ を定める方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>現行示方書が最適解を与えているという保証はないこと。すなわち、現行示方書が安全側過ぎるのではないか（危険側と危惧されることもある）という指摘があること。（<math>P_{f,i}</math> の評価が部材を対象とすることになる。）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ANSI, AISC など多くの示方書改訂はこの方法によっている。</li> </ul>
他の災害危険性との比較による方法	構造物の破壊に伴って予測される（1名）の死亡危険性を、自然災害あるいは他の人為災害による危険性と比べて、ある水準以下に設定する方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般の土木・建築構造物に適用できる評価式は未だ確立していないこと。</li> <li>統計データが、土木・建築構造物の種別に整理されず利用できないままには至っていないこと。</li> <li>事故は種々の原因によることから、設計段階での <math>P_{fa}(r)</math> を定めることが難しい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>石油化学産業における安全評価、また原子力発電所、LNG 施設、ダムなどの重要構造物の危険度評価に用いられている。</li> <li>建築・土木構造物では、構造物の用途、破壊によって生じる人的損失の可能性、さらに破壊予知の難易などを考慮したいくつかの評価式が提案されている。</li> </ul>
人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法	構造物の破壊に伴って予測される一人当たりの死亡率を低減させるのに要する費用の大きさを評価する方法（一つの生命を救うのに社会が支払う金額にはみずからある基準があるとするとする）	<ul style="list-style-type: none"> <li>では、生命の価値を評価することになることから、価値観の相違により容易に受け入れられないことがあること。</li> </ul>	

## 2.2 部分係数キャリブレーションについて

2.1.3において述べたように、次期示方書改訂において部分係数設計体系に移行するに際しての、現行示方書との部分係数キャリブレーション方法の一例と本報告書における整理内容について図-1.4に示す。

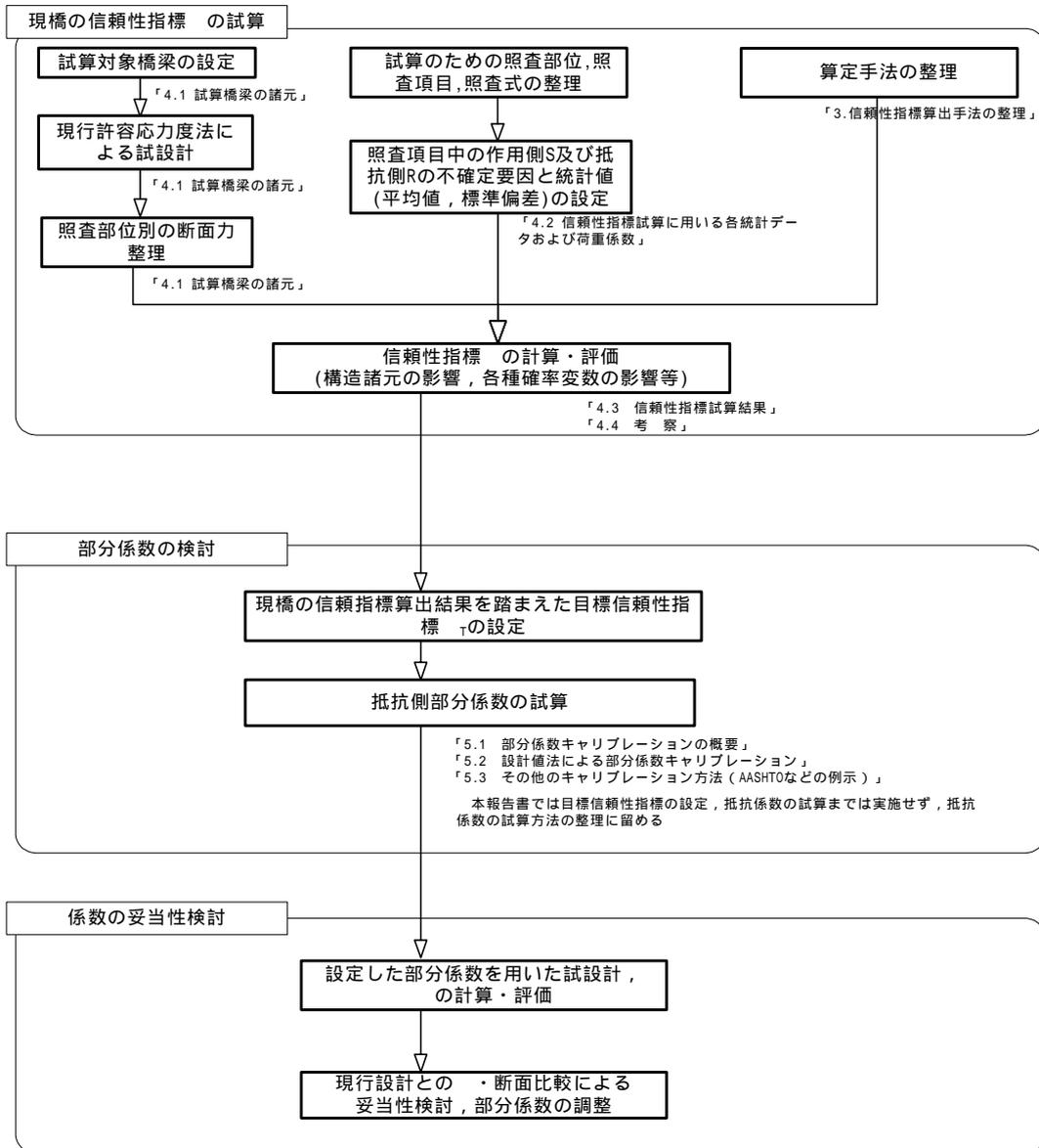


図-1.4 現行示方書との部分係数キャリブレーションフロー例

### 3. 信頼性指標算出手法の整理

#### 3.1 信頼性指標算出手法について

信頼性設計における信頼性指標の算出については、既往の研究において各手法が提案されている。ここでは、土木研究所資料「鋼道路橋の部分係数設計法に関する研究」の成果を引用し、汎用性が高いと考えられる数値実験法であるモンテカルロシミュレーションと近似理論解析によるFORM法を紹介する。なお、本研究会では、モンテカルロシミュレーション手法によって道示鋼橋編に従って設計された鋼桁橋の主桁を対象に、信頼性指標の試算を行っている。

#### 3.2 モンテカルロシミュレーションによる方法

モンテカルロシミュレーション(Monte Carlo Simulation)とは、乱数を用いて数多くの試行を繰返すことによって破壊確率  $P_f$  を直接求める数値実験手法である。ここで言う乱数は、ある指定された確率分布(例えば、正規分布)をもつ数列であり、実際にはコンピュータ内部で使われる擬似乱数を意味する。信頼性指標  $\beta$  を算出する際には以下の通り行う。まず、確率変数  $X_1, X_2, \dots, X_n$  の関数で表れる性能関数  $Z$  に対して、確率変数  $X_j$  の分布を設定し、確率分布に従った乱数を発生させ  $Z$  の値を求める。次に、これを  $N$  回繰返して  $Z_i$  の確率分布を作成し、この平均値  $\bar{Z}_i$  と標準偏差  $\sigma_{Z_i}$  により次式で表される信頼性指標  $\beta_i$  を求める。

$$\beta_i = \frac{\bar{Z}_i}{\sigma_{Z_i}} \dots\dots\dots (3.1.1)$$

ここで、乱数発生の方法について確率変数が互いに独立で正規確率に従う場合を例に述べる。平均値  $\bar{x}$ 、標準偏差  $\sigma_x$  を有する正規確率変数  $X_j$  の乱数は以下の手順で発生させることができる。

0 から 1 までの一様乱数  $a_1$  を抽出する。

次に、正規確率密度関数を用いると、その分布関数は、

$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\right\} dx \dots\dots\dots (3.1.2)$$

となる。したがって、 $F_x(x)$  で抽出した  $a_1$  を用いて

$$a_1 = F_x(x) \dots\dots\dots (3.1.3)$$

$F_x(x)$  の逆関数を用いて、 $x_1 = F_x^{-1}(a_1)$  としてサンプル  $x=x_1$  を抽出する。

この操作を試行回数  $N$  回繰返し行えば、正規確率分布に従う確率変数  $X_j=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  を作り出すことができる。これを性能関数に用いられている全ての確率変数について行う。

計算フローを図-3.1 に、信頼性指標  $\beta$  の算出方法の例を図-3.2 に示す。

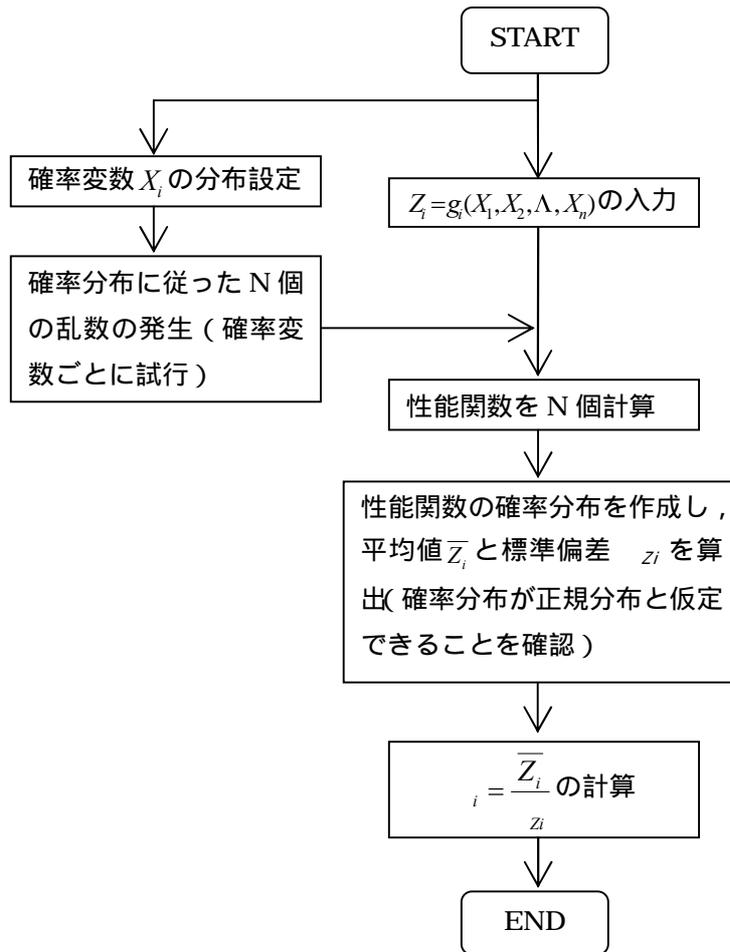


図-3.1 モンテカルロシミュレーションのフローチャート

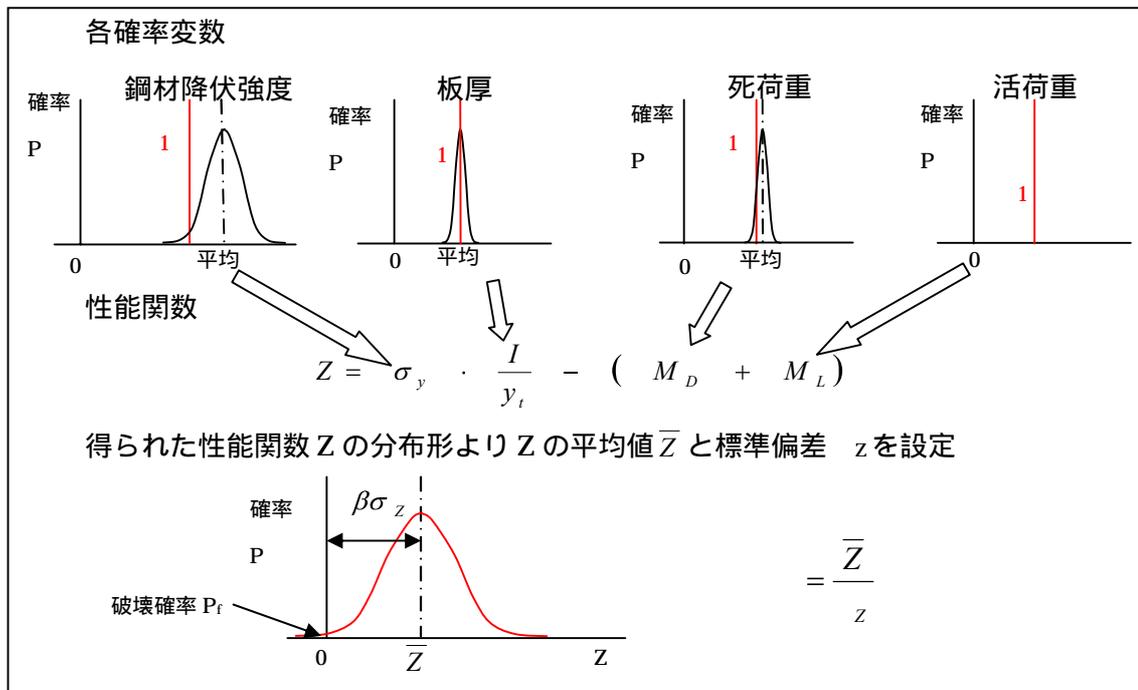


図-3.2 信頼性指標 の算出方法の例

### 3.3 FORMによる方法

ISO2394 に示されている FORM (First-Order Reliability Method) 法は、破壊点まわりでの一次の項までのテーラー展開近似を利用する方法であり、非正規確率変数が存在する場合に、破壊点で確率密度関数および累積分布関数の値が等しくなるような正規確率変数で近似して、正規標準座標系に変換した時の座標原点からの限界とする状態（破壊面）までの最短距離を求めることにより信頼性指標を算出するとともに感度係数が得られるものである。なお、性能関数  $Z$  に含まれる確率変数をすべて正規分布と仮定する。

FORM 法による解析手順の概要を以下にまとめる。

性能関数を

$$Z_i = g_i(X_1, X_2, \Lambda, X_n) \dots\dots\dots (3.2.1)$$

と定義する場合 ( $i$ : 照査部位, 項目別を意味する), 破壊点  $(x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*)$  (性能関数  $Z_i$  上の点) のまわりテーラー展開して、級数を一次の項で打ち切り、線形一次関数に近似する。

$$Z_i = g_i(x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*) + \sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (X_j - x_j^*) (X_k - x_k^*) \frac{\partial^2 g_i}{\partial x_j \partial x_k} \Big|_{x^*} + \Lambda$$

$$g_i(x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*) + \sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \dots\dots\dots (3.2.2)$$

ここで、 $(\partial g_i / \partial x_j |_{x^*})$  は、性能関数  $g_i$  の  $x_j$  に関する偏微分に  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*)$  を代入することによって得られる値である。

式(3.2.2)に含まれる確率変数の内、正規確率変数以外の確率変数が正規確率変数で近似(正規化近似)されたとすると、式(3.2.2)は正規確率変数の線形一次関数となるので、 $Z_i$  も正規確率変数になる。また、ここでは各確率変数は互いに独立な正規確率変数とする。

破壊点は、性能関数上の点 ( $Z_i = 0$ ) であるため、

$$g_i(x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*) = 0 \dots\dots\dots (3.2.3)$$

式(3.2.3)から、式(3.2.2)は以下の通りとなる。

$$Z_i = \sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \dots\dots\dots (3.2.4)$$

さらに、 $Z_i$  の平均値  $\bar{Z}_i$  と標準偏差  $\sigma_{Z_i}$  は以下のように求められる。

$$\bar{Z}_i = E[Z_i] = E \left[ \sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right] = \sum_{j=1}^n (E[X_j] - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) (\mu_{X_j} - x_j^*) \dots\dots\dots (3.2.5)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{Z_i}^2 &= E[Z_i^2] - E[Z_i]^2 \\
&= E\left[\left(\sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2\right] - E\left[\sum_{j=1}^n (X_j - x_j^*) \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right]^2 \\
&= \sum_{j=1}^n E[(X_j - x_j^*)^2] \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2 - \sum_{j=1}^n E[(X_j - x_j^*)]^2 \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2 \\
&= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2 \{E[(X_j - x_j^*)^2] - E[(X_j - x_j^*)]^2\} \\
&= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2 \sigma_{X_j}^2 \\
\sigma_{Z_i} &= \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2} \sigma_{X_j} \\
&= \sum_{j=1}^n \alpha_j \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right) \sigma_{X_j} \dots\dots\dots (3.2.6)
\end{aligned}$$

ここで,

$E[Z_i]$  :  $Z_i$  の平均値

$\mu_{X_j}$  : 確率変数  $X_j$  の平均値

$\sigma_{X_j}$  : 確率変数  $X_j$  の標準偏差

また,  $a_j$  は感度係数と呼ばれ, 次の式で定義される。

$$a_j = \alpha_j \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right) \sigma_{X_j} / \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right)^2} \sigma_{X_j} \dots\dots\dots (3.2.7)$$

信頼性指標  $\beta_j$  は  $\bar{Z}_i / \sigma_{Z_i}$  で定義されることから, 式(3.2.5)および(3.2.6)から求めると,

$$\beta_j = \frac{\bar{Z}_i}{\sigma_{Z_i}} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right) (\mu_{X_j} - x_j^*) / \sum_{j=1}^n \alpha_j \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*}\right) \sigma_{X_j} \dots\dots\dots (3.2.8)$$

となる。式の整理を行うと, 次式が得られる。

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \{ \mu_{x_j} - x_j^* - \alpha_j \beta_i \sigma_{x_j} \} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.2.9)$$

式(3.2.9)が、 $\left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right)$ の値によらず恒等的に成り立つためには、 $\{ \}$ 内の値が常に0でなければならないから、

$$\mu_{x_j} - x_j^* - \alpha_j \beta_i \sigma_{x_j} = 0$$

したがって、以下に示す3つの式を満たすように $x_j^*$ 、 $\beta_i$ を解くことにより破壊点が求められ、式(3.2.8)により信頼性指標 $\beta_i$ が算出される。

$$\left. \begin{aligned} &g_i(x_1^*, x_2^*, \Lambda, x_n^*) = 0 \\ &x_j^* = \mu_{x_j} - \alpha_j \beta_i \sigma_{x_j} : j = 1, 2, \Lambda, n \\ &a_j = \alpha_j \left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \sigma_{x_j} / \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right)^2 \sigma_{x_j}^2} : j = 1, 2, \Lambda, n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2.10)$$

正規化近似のフローを含めた破壊点および信頼性指標の繰返し計算のフローを図-3.3に示す。

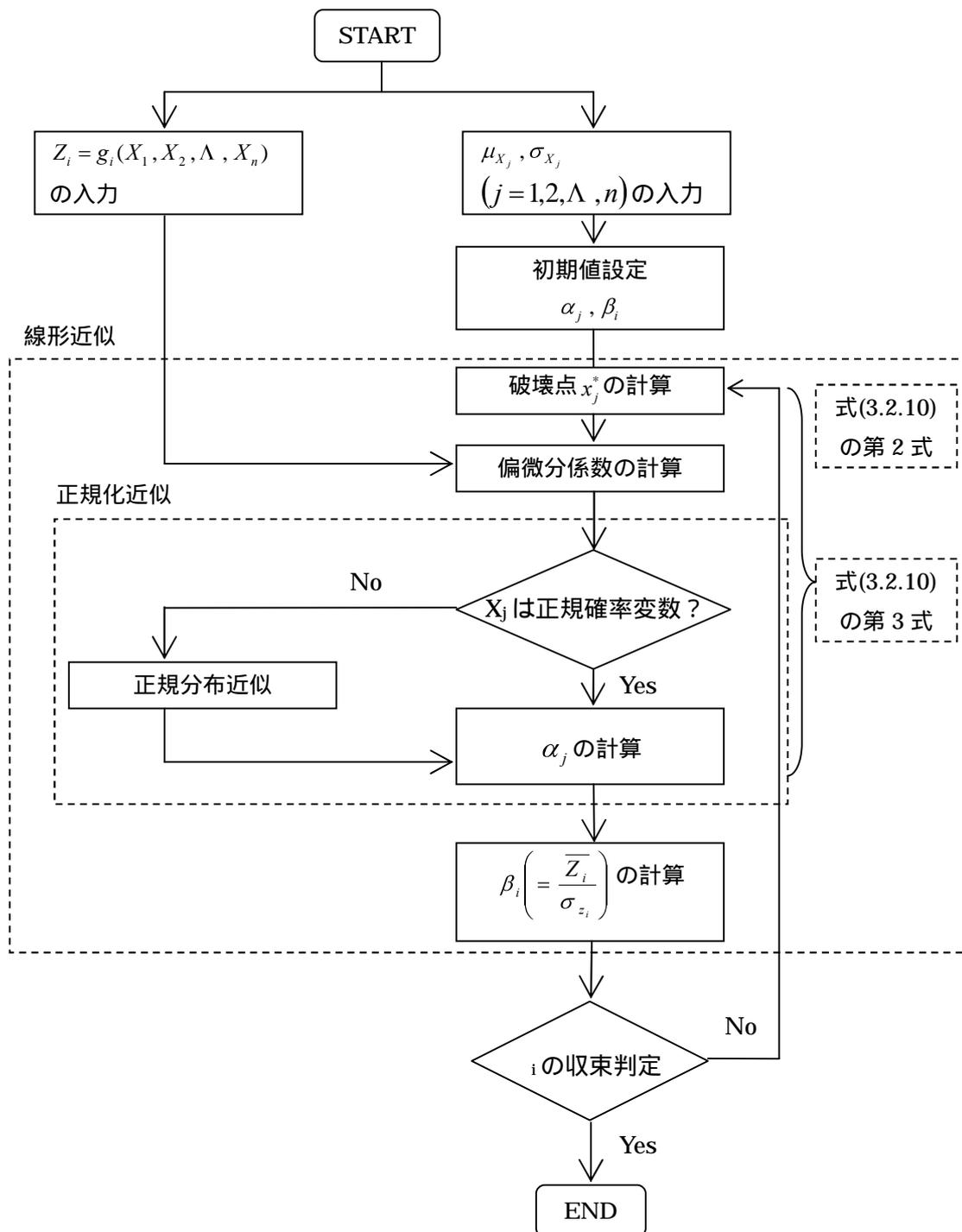


図-3.3 FORM法のフローチャート

#### 4．信頼性指標の試算例

今回検討した試算例は、現示方書の信頼性指標を試算した。

##### 4．1 試算橋梁の諸元

今回検討した試算橋梁の諸元は、以下のとおりである。

###### 4.1.1 橋梁諸元

- a) 橋梁形式 : 鋼単純非合成 4 主鈹桁
- b) 設計荷重 : B 活荷重
- c) 橋 長 : 51.0m
- d) 支間長 : 50.0m
- e) 全幅員 : 10.7m
- f) 有効幅員 : 9.5m
- g) 平面線形 : R =
- h) 斜角 : A 1 = 90°、A 2 = 90°
- i) 舗装 : アスファルト舗装 t = 80mm
- j) 床版 : 鉄筋コンクリート床版 t = 250mm
- k) 高欄 : 鋼製高欄
- l) 検査路 : なし
- m) 添架物 : なし
- n) 雪荷重 : なし
- o) 使用鋼材 : SM490Y



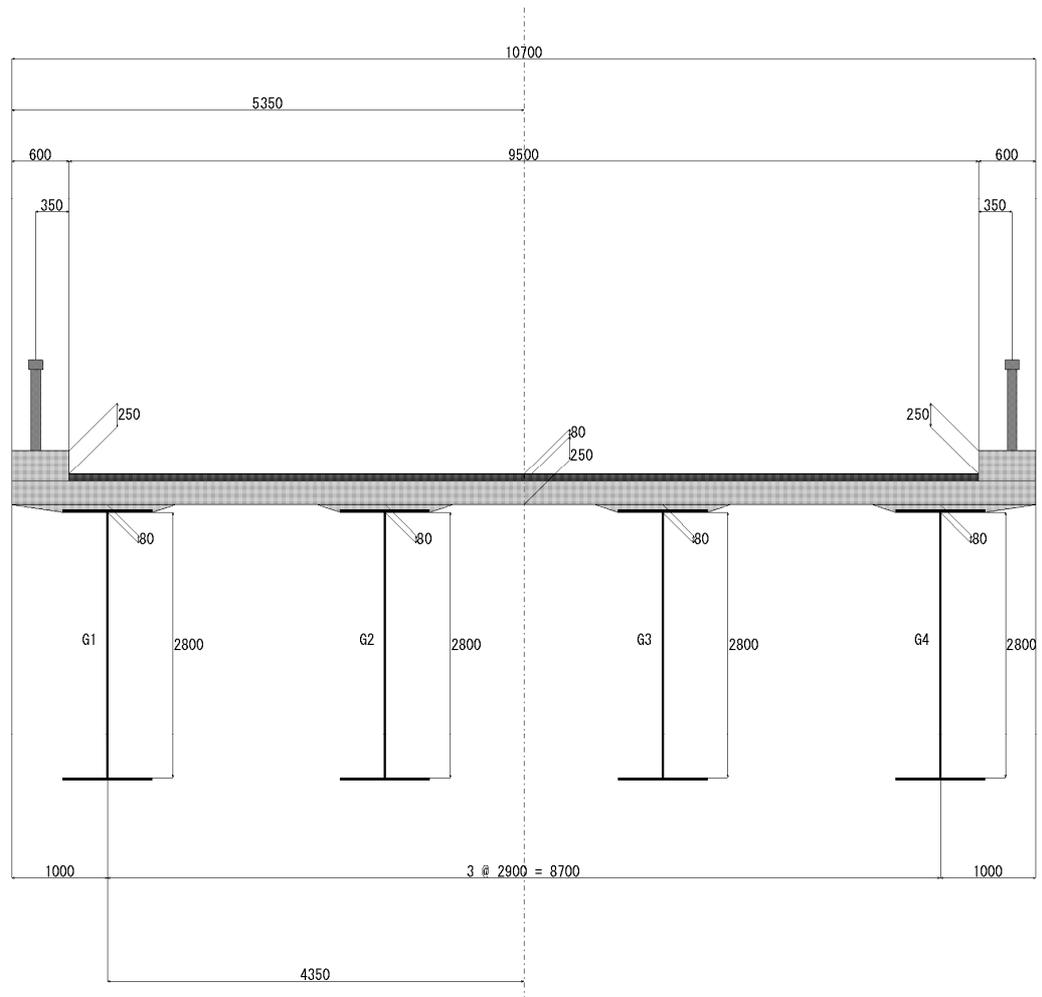
### 4.1.3 現行許容応力度法による計算結果

#### (1) 設計条件

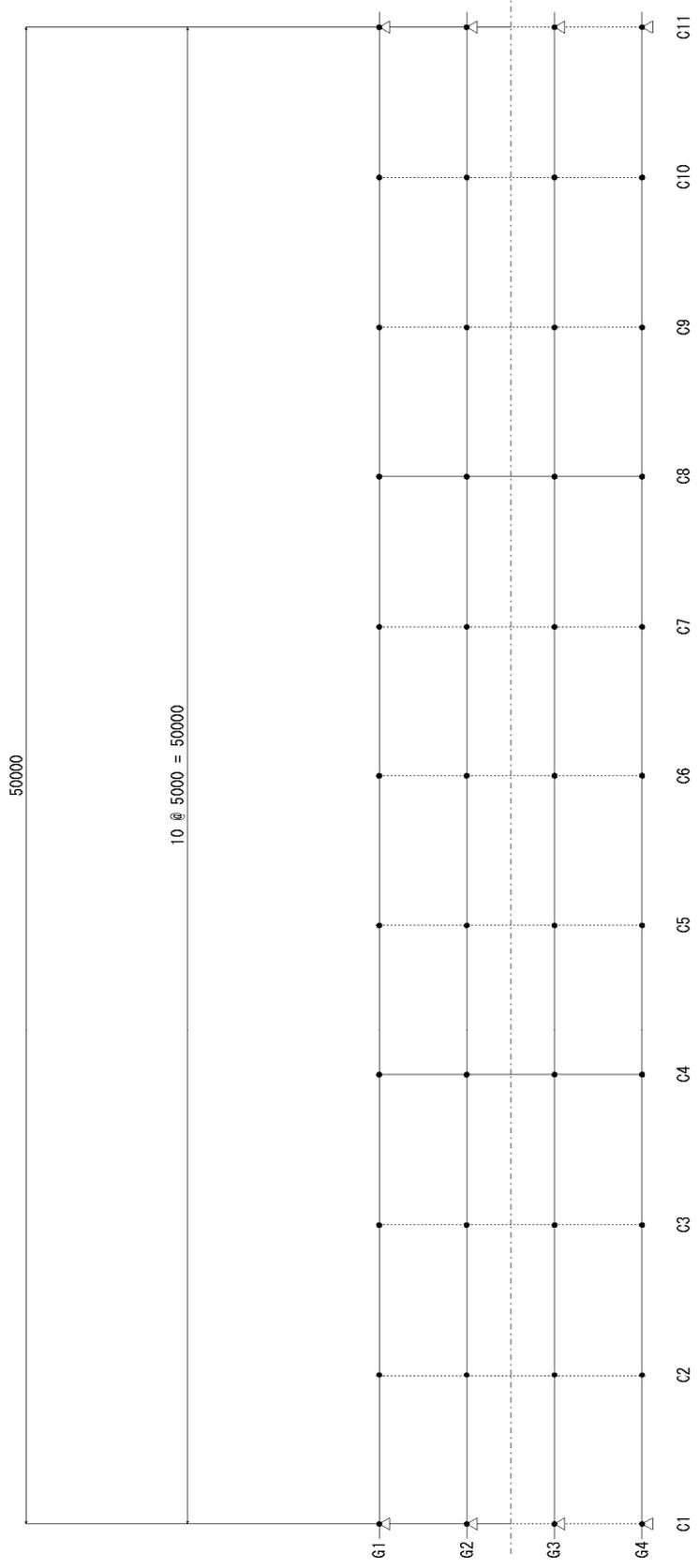
- 基本条件

タイトル	鋼技研資料-50m歩道なし
形式	単純非合成鈹桁
主桁本数	4本
支間長合計	50[m] (構造基本線)
桁高	2800[mm]
床版形式	鉄筋コンクリート床版 t=250[mm]
舗装	アスファルト舗装 t=80[mm]
平面線形	R=∞
横桁斜角	90° 0' 0.0"
活荷重	B活荷重-L
添架物	なし
使用鋼材	-H仕様材
鋼種の仕様	道路橋示方書
耐候性鋼材	使用しない

- 横断面図

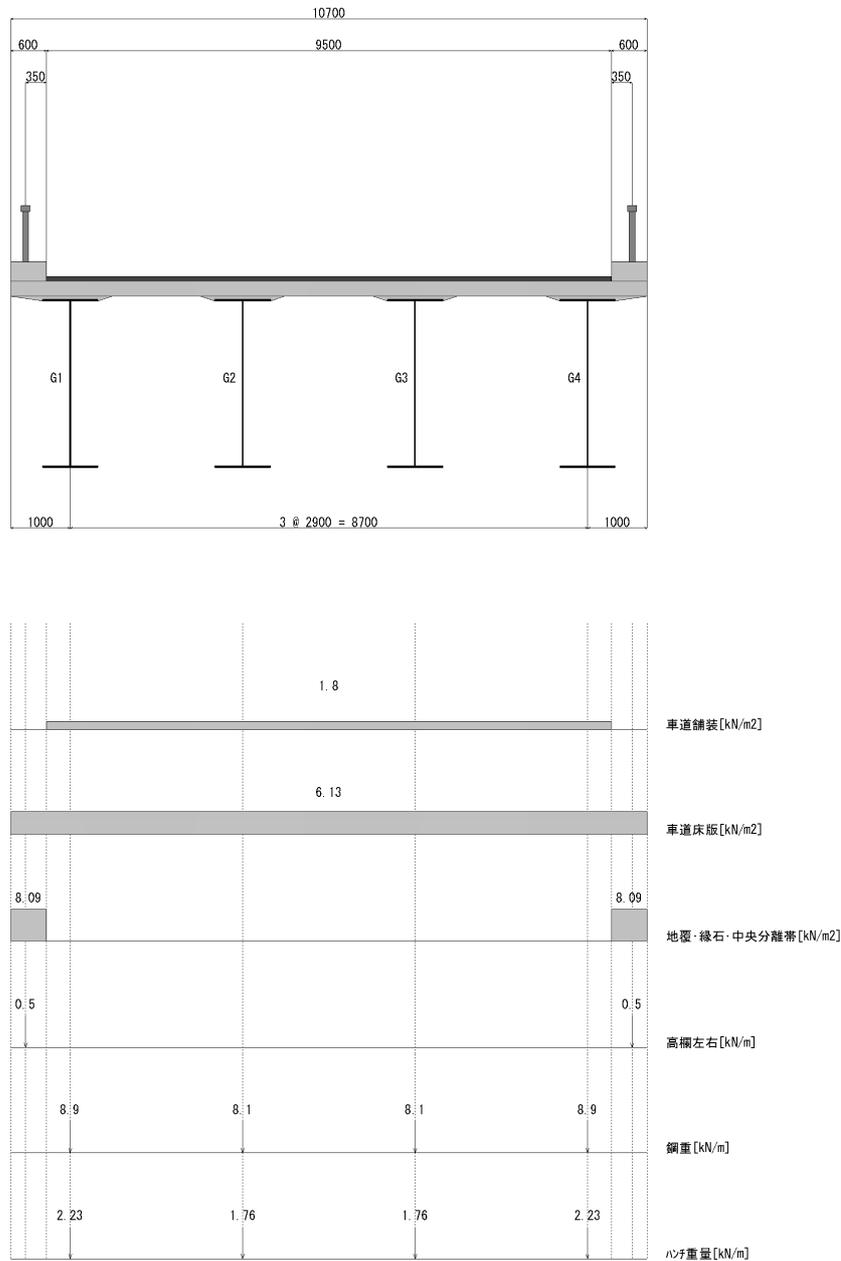


<平面格子図> ※寸法値は構造基本線上の長さ [mm]



## (2) 荷重

- ・ 死荷重



- ・ 活荷重

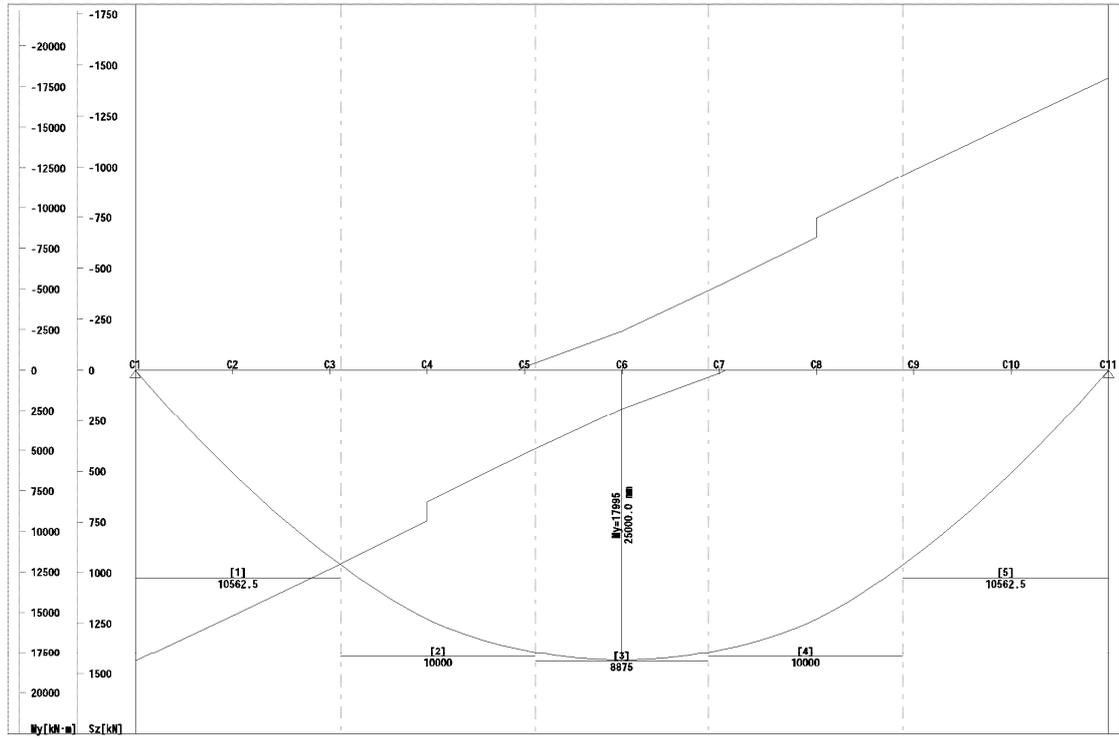
活荷重種類 : B活荷重-L

(1) L活荷重

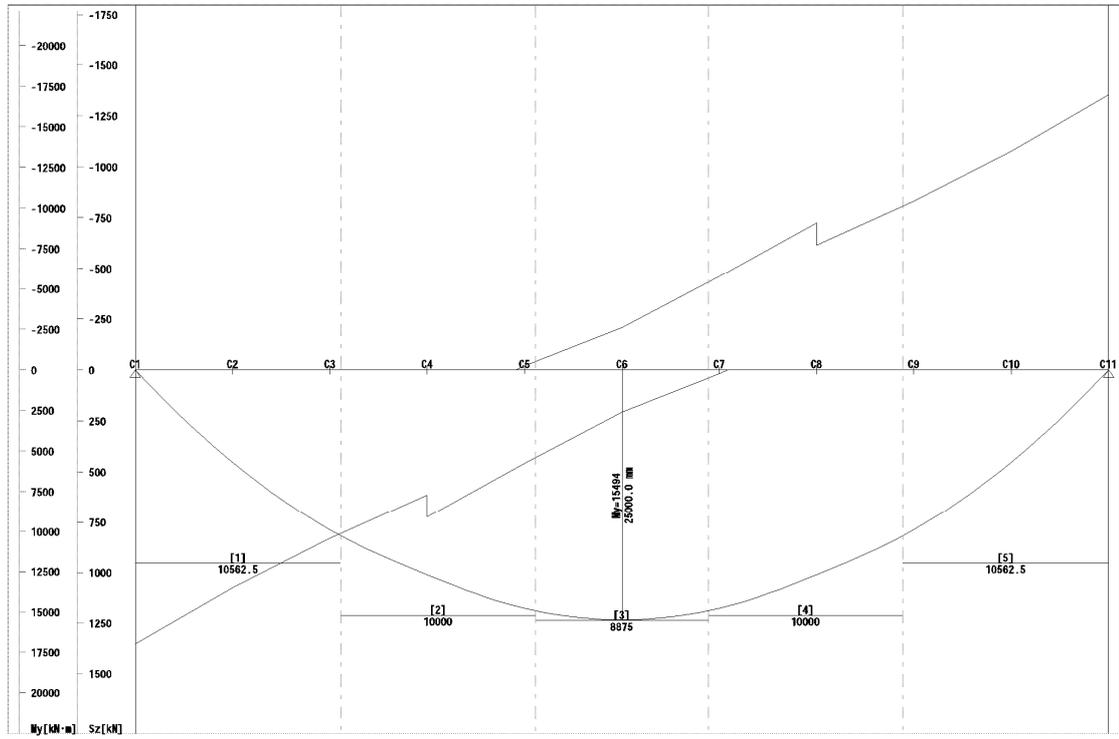
- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| (a) P1活荷重-曲げ着目時主載荷強度  | 10 [kN/m <sup>2</sup> ]   |
| (b) P1活荷重-曲げ着目時従載荷強度  | 5 [kN/m <sup>2</sup> ]    |
| (c) P1活荷重-せん断着目時主載荷強度 | 12 [kN/m <sup>2</sup> ]   |
| (d) P1活荷重-せん断着目時従載荷強度 | 6 [kN/m <sup>2</sup> ]    |
| (e) 橋軸方向載荷長           | 10 [m]                    |
| (f) 橋軸直角方向載荷幅         | 5.5 [m]                   |
| (g) 橋軸方向移動量           | 1 [m]                     |
| (h) P2活荷重-主載荷分布活荷重強度  | 3.5 [kN/m <sup>2</sup> ]  |
| (i) P2活荷重-従載荷分布活荷重強度  | 1.75 [kN/m <sup>2</sup> ] |

(3) 断面力

曲げモーメント・せん断力 <主桁G1, G4>



曲げモーメント・せん断力 <主桁G2, G3>



(4) 断面計算結果

<主桁グループ1 (G1, G4)>

断面位置	断面1-L	断面1-R	断面2-L	断面2-R	断面3-L	断面3-R
断面長 [mm]	10562.5	10562.5	10000.0	10000.0	8875.0	8875.0
材質	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB
断面力	My(max) [kN・m] 0 My(min) [kN・m] 0 Sz [kN] 1438	12069 6878 957	12069 6878 957	17495 10058 390	17495 10058 390	17495 10058 390
固定間距離 [mm]	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
断面	上フランジ [mm] 690 x 22 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 23	上フランジ [mm] 690 x 22 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 23	上フランジ [mm] 690 x 34 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 36	上フランジ [mm] 690 x 34 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 36	上フランジ [mm] 690 x 35 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 35	上フランジ [mm] 690 x 35 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 35
断面諸量	δ [cm] 2.76 Yu [cm] -144.96 Yt [cm] 139.54 Ag [cm <sup>2</sup> ] 709.40 Iy [cm <sup>4</sup> ] 8877331	2.76 -144.96 139.54 709.40 8877331	3.96 -147.36 139.64 885.80 12469955	3.96 -147.36 139.64 885.80 12469955	1.68 -145.18 141.82 885.50 12474995	1.68 -145.18 141.82 885.50 12474995
応力度	σu(max) [N/mm <sup>2</sup> ] 0.0 < 210.0 σt (°) [N/mm <sup>2</sup> ] 0.0 < 210.0 σu(min) [N/mm <sup>2</sup> ] 0.0 < 210.0 σt (°) [N/mm <sup>2</sup> ] 0.0 < 210.0 τ [N/mm <sup>2</sup> ] 36.7 < 120.0	197.1 < 210.0 <b>200.3 &lt; 210.0</b> -112.3 < -210.0 114.1 < 210.0 24.4 < 120.0	142.6 < 210.0 142.7 < 210.0 -81.3 < -210.0 81.3 < 210.0 24.4 < 120.0	206.7 < 210.0 <b>206.8 &lt; 210.0</b> -118.9 < -210.0 118.9 < 210.0 9.9 < 120.0	203.6 < 210.0 <b>210.0 &lt; 210.0</b> -117.0 < -210.0 120.7 < 210.0 9.9 < 120.0	-203.6 < -210.0 210.0 < 210.0 -117.0 < -210.0 120.7 < 210.0 9.9 < 120.0
合成応力度	Wu 0.093 < 1.2 Wt 0.093 < 1.2	0.895 < 1.2 0.831 < 1.2	0.482 < 1.2 0.434 < 1.2	0.932 < 1.2 0.833 < 1.2	0.902 < 1.2 0.860 < 1.2	0.902 < 1.2 0.860 < 1.2
抵抗曲げモーメント	Mru(max) [kN・m] 12861 Mr1 (°) [kN・m] 13360 Mru(min) [kN・m] 12861 Mr1 (°) [kN・m] 13360	12861 13360 12861 13360	17770 18754 17770 18754	17770 18754 17770 18754	18045 18472 18045 18472	18045 18472 18045 18472
引張ボルト数 (上・下)		4 4	4 4	4 4	4 4	4 4
水平補剛材の段数	1	1	1	1	1	1

断面位置	断面3-C	断面4-L	断面4-R	断面5-L	断面5-R
断面長 [mm]	8875.0	10000.0	10000.0	10562.5	10562.5
材質	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB
断面力	My(max) [kN・m] 17995 My(min) [kN・m] 10434 Sz [kN] 190	17495 10058 390	12069 6878 957	12069 6878 957	0 0 1438
固定間距離 [mm]	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
断面	上フランジ [mm] 690 x 35 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 35	上フランジ [mm] 690 x 34 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 36	上フランジ [mm] 690 x 34 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 36	上フランジ [mm] 690 x 22 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 23	上フランジ [mm] 690 x 22 ウェブ [mm] 2800 x 14 下フランジ [mm] 720 x 23
断面諸量	δ [cm] 1.68 Yu [cm] 145.18 Yt [cm] 141.82 Ag [cm <sup>2</sup> ] 885.50 Iy [cm <sup>4</sup> ] 12474995	3.96 147.36 139.64 885.80 12469955	3.96 147.36 139.64 885.80 12469955	2.76 -144.96 139.54 709.40 8877331	2.76 -144.96 139.54 709.40 8877331
応力度	σu(max) [N/mm <sup>2</sup> ] 209.4 < 210.0 σt (°) [N/mm <sup>2</sup> ] 204.6 < 210.0 σu(min) [N/mm <sup>2</sup> ] -121.4 < -210.0 σt (°) [N/mm <sup>2</sup> ] 118.6 < 210.0 τ [N/mm <sup>2</sup> ] 4.9 < 120.0	206.7 < 210.0 <b>206.8 &lt; 210.0</b> -118.9 < -210.0 118.9 < 210.0 9.9 < 120.0	142.6 < 210.0 142.7 < 210.0 -81.3 < -210.0 81.3 < 210.0 24.4 < 120.0	197.1 < 210.0 <b>200.3 &lt; 210.0</b> -112.3 < -210.0 114.1 < 210.0 24.4 < 120.0	0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 36.7 < 120.0
合成応力度	Wu 0.949 < 1.2 Wt 0.904 < 1.2	0.932 < 1.2 0.833 < 1.2	0.482 < 1.2 0.434 < 1.2	0.895 < 1.2 0.831 < 1.2	0.093 < 1.2 0.093 < 1.2
抵抗曲げモーメント	Mru(max) [kN・m] 18045 Mr1 (°) [kN・m] 18472 Mru(min) [kN・m] 18045 Mr1 (°) [kN・m] 18472	17770 18754 17770 18754	17770 18754 17770 18754	12861 13360 12861 13360	12861 13360 12861 13360
引張ボルト数 (上・下)		4 4	4 4	4 4	4 4
水平補剛材の段数	1	1	1	1	1

<主桁グループ2 (G2, G3)>

断面位置	断面1-L	断面1-R	断面2-L	断面2-R	断面3-L	断面3-R
断面長 [mm]	10562.5	10562.5	10000.0	10000.0	8875.0	8875.0
材 質	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB
断面力	My(max) [kN・m] My(min) [kN・m] Sz [kN]	0 6652 1353	10263 6652 807	10263 6652 807	14930 9655 431	14930 9655 431
固定間距離 [mm]	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
断面	上フランジ [mm] ウェブ [mm] 下フランジ [mm]	660 x 21 2800 x 14 680 x 21	660 x 21 2800 x 14 680 x 21	660 x 29 2800 x 14 680 x 31	660 x 29 2800 x 14 680 x 31	660 x 30 2800 x 14 680 x 31
断面諸量	δ [cm] Yu [cm] Yl [cm] Ag [cm <sup>2</sup> ] Iy [cm <sup>4</sup> ]	0.88 142.98 141.22 673.40 8159131	0.88 142.98 141.22 673.40 8159131	3.48 -146.38 139.62 794.20 10604966	3.48 -146.38 139.62 794.20 10604966	2.27 -145.27 140.83 800.80 10745319
応力度	σu(max) [N/mm <sup>2</sup> ] σ1 (°) [N/mm <sup>2</sup> ] σu(min) [N/mm <sup>2</sup> ] σ1 (°) [N/mm <sup>2</sup> ] τ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 0.0 < 210.0 34.5 < 120.0	179.9 < 210.0 <b>189.3 &lt; 210.0</b> 116.6 < 210.0 122.7 < 210.0 20.6 < 120.0	141.7 < 210.0 144.0 < 210.0 91.8 < 210.0 93.3 < 210.0 20.6 < 120.0	206.1 < 210.0 <b>209.5 &lt; 210.0</b> 133.3 < 210.0 135.5 < 210.0 11.0 < 120.0	201.8 < 210.0 208.5 < 210.0 130.5 < 210.0 134.9 < 210.0 11.0 < 120.0
合成応力度	Wu Wl	0.083 < 1.2 0.083 < 1.2	0.742 < 1.2 0.724 < 1.2	0.467 < 1.2 0.425 < 1.2	0.934 < 1.2 0.846 < 1.2	0.895 < 1.2 0.839 < 1.2
抵抗曲げモーメント	Mru(max) [kN・m] Mrl (°) [kN・m] Mru(min) [kN・m] Mrl (°) [kN・m]	11984 12133 11984 12133	11984 12133 11984 12133	15214 15951 15214 15951	15214 15951 15214 15951	15533 16024 15533 16024
引張ボルト数 (上・下)		4 4	4 4	4 4	4 4	4 4
水平補剛材の段数	1	1	1	1	1	1

断面位置	断面3-C	断面4-L	断面4-R	断面5-L	断面5-R
断面長 [mm]	8875.0	10000.0	10000.0	10562.5	10562.5
材 質	上フランジ SM490YB ウェブ SM490YA 下フランジ SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB	SM490YB SM490YA SM490YB
断面力	My(max) [kN・m] My(min) [kN・m] Sz [kN]	15494 9954 208	14930 9655 431	10263 6652 807	10263 6652 807
固定間距離 [mm]	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
断面	上フランジ [mm] ウェブ [mm] 下フランジ [mm]	660 x 30 2800 x 14 680 x 31	660 x 29 2800 x 14 680 x 31	660 x 29 2800 x 14 680 x 31	660 x 21 2800 x 14 680 x 21
断面諸量	δ [cm] Yu [cm] Yl [cm] Ag [cm <sup>2</sup> ] Iy [cm <sup>4</sup> ]	2.27 145.27 140.83 800.80 10745319	3.48 146.38 139.62 794.20 10604966	3.48 146.38 139.62 794.20 10604966	0.88 -142.98 141.22 673.40 8159131
応力度	σu(max) [N/mm <sup>2</sup> ] σ1 (°) [N/mm <sup>2</sup> ] σu(min) [N/mm <sup>2</sup> ] σ1 (°) [N/mm <sup>2</sup> ] τ [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>-209.5 &lt; -210.0</b> 203.1 < 210.0 -134.6 < -210.0 130.5 < 210.0 5.3 < 120.0	206.1 < 210.0 <b>209.5 &lt; 210.0</b> -133.3 < -210.0 135.5 < 210.0 11.0 < 120.0	141.7 < 210.0 144.0 < 210.0 -91.8 < -210.0 93.3 < 210.0 20.6 < 120.0	179.9 < 210.0 <b>189.3 &lt; 210.0</b> -116.6 < -210.0 122.7 < 210.0 20.6 < 120.0
合成応力度	Wu Wl	0.956 < 1.2 0.896 < 1.2	0.934 < 1.2 0.846 < 1.2	0.467 < 1.2 0.425 < 1.2	0.742 < 1.2 0.724 < 1.2
抵抗曲げモーメント	Mru(max) [kN・m] Mrl (°) [kN・m] Mru(min) [kN・m] Mrl (°) [kN・m]	15533 16024 15533 16024	15214 15951 15214 15951	15214 15951 15214 15951	11984 12133 11984 12133
引張ボルト数 (上・下)		4 4	4 4	4 4	4 4
水平補剛材の段数	1	1	1	1	1

#### 4.2 信頼性指標試算に用いる各統計データ、試算方針

##### 4.2.1 使用する各統計データ

死荷重の統計的偏りについては、部分係数法を検討した土木研究所資料「鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討」<sup>4)</sup>の解析に考慮した確率変数と統計量で、不確定要因別確率変数の基準値と既存文献から引用した実験データの平均値を整理した表-4.1を参考とし、鉄筋コンクリート床版と地覆の平均値 1.05 を試算簡略化のため、全部の死荷重に適用し、仮定した。

表-4.1 解析に考慮した荷重側の確率変数の統計量<sup>5)</sup>

荷重側 不確定要因	分類等	基準値	データ 数	平均値 基準値	標準 偏差	変動 係数	仮定する 確率分布形	備考
死荷重	鋼重(全鋼種)	公称体積×単位重量(77.0kN/m <sup>3</sup> )	160980	1.00	0.01	0.01	正規分布	
	鉄筋コンクリート床版重量	公称体積×単位重量(24.5kN/m <sup>3</sup> )	不明	1.05	0.01	0.01	正規分布	
	舗装重量	公称体積×単位重量(22.5kN/m <sup>3</sup> )	不明	1.03	0.05	0.05	正規分布	
	地覆	公称体積×単位重量(24.5kN/m <sup>3</sup> )	不明	1.05	0.01	0.01	正規分布	RC床版と同じとする
	鋼製高欄(金属製高欄)	規定無し:0.5kN/m(1高欄当り)	-	-	-	-	確定値	

抵抗側の統計的偏りについては、荷重側と同様に土木研究所資料「鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討」の解析に考慮した確率変数と統計量の表-4.2を適用し、仮定した。但し、板厚誤差は、「道路橋示方書 鋼橋編 H14.3」<sup>6)</sup>17.2より上限値をJIS G 3193「熱間圧延鋼板と鋼帯の形状寸法及び質量及びその許容差」<sup>7)</sup>表4、表5とし、下限値を公称板厚の5%以内と仮定した。

表-4.2 解析に考慮した抵抗側の確率変数の統計量<sup>2)</sup>

抵抗側 不確定要因	分類等	基準値	データ 数	平均値 基準値	標準 偏差	変動 係数	仮定する 確率分布形	備考	
材料 強度	鋼材降伏強度	全鋼種、全板厚	JIS規格下限値	78901	1.23	0.10	0.08	正規分布	下限値有
部材 強度	自由突出板の 圧縮座屈強度	R 0.7	cr/ y=1.0	24				確定値	
		0.7 < R	cr/ y=(0.7/R) <sup>0.64</sup>	25	1.13	0.06	0.05	正規分布	
	補剛板の 圧縮座屈強度	R <sub>R</sub> 0.2	cr/ y=1.0	56	1.26	0.14	0.11	確定値	
		0.2 < R <sub>R</sub> 1.0	cr/ y=1.1125-0.5625R <sub>R</sub>					正規分布	
横倒れ 座屈強度	0.2	cr/ y=1.0	221	1.30	0.17	0.13	確定値		
	0.2 <	cr/ y=1.0-0.412(-0.2)					正規分布		
断面 定数	板厚誤差	板厚t 100mm	板厚公称値	160980	1.00	0.01	0.01	正規分布	上下限値有
	板取(板幅)誤差		板幅公称値					確定値	
	コンクリート床版厚	合成桁の床版	床版厚公称値		1.05	0.01	0.01	正規分布	
	コンクリート床版有効幅	合成桁の床版	床版有効幅公称値					確定値	
物理定数	弾性係数(鋼材)	200000 N/mm <sup>2</sup>	1024	1.00	0.05	0.05	正規分布		
	ポアソン比(鋼材)	0.30	588	0.94	0.09	0.09	正規分布		
	弾性係数(コンクリート)	公称値					確定値		

活荷重の荷重係数については、現時点で明確な統計データがないため、試算上は現示方書のB活荷重の1.6倍で仮定した。

#### 4.2.2 試算方針

信頼性指標 を試算する方法は、モンテカルロ法によるシミュレーション解析で行い、上記より荷重側  $S$  と抵抗側  $R$  の乱数を 1 万回発生させ、性能関数  $Z=R - S$  を算出し、その性能関数の平均値、標準偏差を求め、信頼性指標 を算出する。

### 4.3 信頼性指標 の算出

#### 4.3.1 試算に使用した乱数

##### (1) 鋼材降伏強度

材質：SM490Y

降伏強度のJIS下限値： $\sigma_{yk}=355\text{N/mm}^2$

乱数発生結果の整理

	$\sigma_{yn}/\sigma_{yk}$	$\sigma_{yn}$
平均	1.232	437.5
標準偏差	0.097	34.3
変動係数	0.078	0.1

ここに、 $\sigma_{yn}$ ：乱数によってバラツキを与えた鋼材降伏強度( $\text{N/mm}^2$ )

発生させた乱数 (抜粋)

N	$\sigma_{yn}/\sigma_{yk}$	$\sigma_{yn}$ ( $\text{N/mm}^2$ )
1	1.268040	450.15
2	1.334096	473.60
3	1.151204	408.68
4	1.154327	409.79
5	1.166664	414.17
6	1.080855	383.70
7	1.210910	429.87
8	1.261400	447.80
9	1.175270	417.22
10	1.099831	390.44
11	1.379929	489.87
12	1.250151	443.80
13	1.117724	396.79
14	1.411262	501.00
15	1.120685	397.84
16	1.002010	355.71
17	1.201765	426.63
18	1.152949	409.30
19	1.309260	464.79
20	1.208116	428.88
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
9996	1.174533	416.96
9997	1.221098	433.49
9998	1.406568	499.33
9999	1.438804	510.78
10000	1.326281	470.83

## (2) ヤング係数

ヤング係数の標準値： $E_k=200000\text{N/mm}^2$

乱数発生結果の整理

	$E_n/E_k$	$E_n$
平均	0.999	199806
標準偏差	0.045	8955
変動係数	0.045	0.04

ここに、 $E_n$ ：乱数によってバラツキを与えたヤング係数( $\text{N/mm}^2$ )

発生させた乱数（抜粋）

N	$E_n/E_k$	$E_n(\text{N/mm}^2)$
1	0.969	193765
2	0.922	184496
3	1.009	201775
4	0.948	189534
5	1.020	203941
6	1.040	208007
7	0.931	186277
8	0.985	197012
9	0.953	190655
10	1.019	203825
11	1.025	204913
12	0.957	191355
13	0.946	189147
14	0.994	198807
15	0.943	188656
16	1.046	209195
17	1.010	201952
18	1.056	211133
19	0.952	190492
20	1.030	205919
.		
.		
.		
.		
.		
9994	0.972	194441
9995	1.043	208656
9996	1.039	207819
9997	1.108	221648
9998	0.982	196475
9999	1.001	200136
10000	1.010	201967

### (3) ポアソン比

ポアソン比の標準値： $\kappa=0.3$

乱数発生結果の整理

	$n/k$	$n$
平均	0.937	0.281
標準偏差	0.085	0.025
変動係数	0.091	0.090

ここに、 $n$ ：乱数によってバラツキを与えたポアソン比

発生させた乱数（抜粋）

N	$n/k$	$n$
1	1.034	0.3103
2	0.877	0.2630
3	0.993	0.2978
4	0.825	0.2476
5	0.981	0.2944
6	0.983	0.2949
7	0.925	0.2774
8	1.088	0.3264
9	1.069	0.3208
10	1.066	0.3199
11	0.965	0.2894
12	0.892	0.2677
13	0.819	0.2457
14	0.984	0.2952
15	1.158	0.3475
16	1.043	0.3128
17	0.771	0.2314
18	1.017	0.3050
19	1.114	0.3342
20	0.938	0.2813
⋮	⋮	
⋮	⋮	
⋮	⋮	
⋮	⋮	
⋮	⋮	
9992	0.837	0.2512
9993	0.866	0.2598
9994	0.971	0.2913
9995	1.021	0.3063
9996	0.825	0.2474
9997	0.887	0.2662
9998	1.011	0.3032
9999	0.972	0.2916
10000	0.849	0.2548

(4) 自由突出板の基準耐荷力

乱数発生結果の整理

	$(\sigma_{cr}/\sigma_y)_n / (\sigma_{cr}/\sigma_y)_k$
平均	1.124
標準偏差	0.060
変動係数	0.053

ここに、 $(\sigma_{cr}/\sigma_y)_n$ ：乱数によってバラツキを与えた基準耐荷力曲線  
 $(\sigma_{cr}/\sigma_y)_k$ ：示方書における基準耐荷力曲線

発生させた乱数（抜粋）

N	$(\sigma_{cr}/\sigma_y)_n / (\sigma_{cr}/\sigma_y)_k$
1	1.1066
2	1.1420
3	1.1364
4	1.1443
5	0.9949
6	1.1388
7	1.0620
8	1.2664
9	1.0257
10	1.1298
11	1.1177
12	1.0071
13	1.1261
14	1.1501
15	1.1443
16	1.1348
17	0.9691
18	1.1455
19	1.0352
20	1.1675
・	・
・	・
・	・
・	・
・	・
9992	1.1073
9993	1.0809
9994	1.0065
9995	1.1394
9996	1.0561
9997	1.1308
9998	0.9556
9999	1.0683
10000	1.1806

(5) 板厚

23mm の場合を代表ケースとして示す。

板厚公称値： $t_k=23\text{mm}$

乱数発生結果の整理

	$t_n / t_k$	$t_n$
平均	1.000	0.281
標準偏差	0.010	0.025
変動係数	0.010	0.090

ここに、 $t_n$ ：乱数によってパラツキを与えた板厚

発生させた乱数（抜粋）

N	$t_n / t_k$	$t_n$
1	1.010	23.23
2	1.006	23.14
3	0.992	22.81
4	0.985	22.65
5	1.008	23.19
6	1.002	23.04
7	0.999	22.97
8	1.002	23.04
9	0.991	22.79
10	1.001	23.02
11	0.992	22.82
12	0.992	22.81
13	1.002	23.04
14	0.996	22.90
15	0.992	22.81
16	0.992	22.82
17	1.002	23.06
18	0.987	22.70
19	0.990	22.78
20	0.997	22.94
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
9991	0.985	22.64
9992	0.998	22.94
9993	1.003	23.06
9994	0.994	22.86
9995	1.004	23.09
9996	0.988	22.72
9997	0.987	22.70
9998	1.011	23.25
9999	1.006	23.13
10000	1.001	23.01

### 4.3.2 抵抗強度 R の算出

4.3.1 にて発生させた乱数を用いて作成した、主桁断面のバラツキを考慮した抵抗強度データを表-4.3 に示す。

表-4.3 抵抗強度データ

公称値	U-FLG (mm)		WEB (mm)		L-FLG (mm)		I (mm <sup>4</sup> )	YU (mm)	YL (mm)	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	U <sub>Flg</sub>	自由突出板設計係数	σ <sub>y</sub> /σ <sub>w</sub>	曲げ引張強度 L <sub>Flg</sub> [kN-m]	曲げ圧縮強度 U <sub>Flg</sub> [kN-m]	せん断抵抗強度 web [kN]
	幅	板厚	幅	板厚	幅	板厚												
1	690.0	22.17	2800.0	14.09	720.0	23.14	892329584.38	1457.5	1387.4	194376.62	0.24	450.15	1.2270	1.0000	0.7770	21991.76	17547.38	8034.41
2	690.0	22.07	2800.0	13.96	720.0	23.14	892329584.38	1457.5	1387.4	194376.62	0.24	450.15	1.2270	1.0000	0.7770	21991.76	17547.38	8034.41
3	690.0	21.88	2800.0	13.85	720.0	22.81	880616671.64	1448.6	1396.1	201775.26	0.27	408.68	1.2681	1.0000	0.8330	24417.27	21600.74	9152.69
4	690.0	21.71	2800.0	13.69	720.0	22.65	873768636.52	1448.6	1396.1	201775.26	0.27	408.68	1.2681	1.0000	0.8330	24417.27	21600.74	9152.69
5	690.0	22.41	2800.0	14.30	720.0	23.19	897475385.77	1450.5	1394.8	203940.53	0.27	414.17	1.1558	1.0000	0.9949	25242.49	19673.30	9575.07
6	690.0	22.17	2800.0	13.88	720.0	23.04	8927814781.18	1444.1	1401.4	208006.55	0.32	383.70	1.0293	1.0000	1.1388	23154.37	21750.32	8608.76
7	690.0	21.93	2800.0	13.84	720.0	22.97	8852961507.6	1450.2	1394.7	186277.04	0.25	429.87	1.2043	1.0000	1.0620	25846.16	20477.77	9689.66
8	690.0	21.97	2800.0	13.91	720.0	23.04	8860811435.4	1450.6	1394.4	197011.76	0.31	447.80	1.1744	1.0000	1.2664	26953.60	25876.15	10067.98
9	690.0	21.84	2800.0	14.02	720.0	22.79	882826805.22	1448.7	1396.0	190694.66	0.28	417.22	1.1699	1.0000	1.0257	24993.21	19481.92	9487.60
10	690.0	22.51	2800.0	14.06	720.0	23.02	896459065.22	1443.2	1402.4	203824.72	0.28	390.44	1.0611	1.0000	1.1298	23641.52	21607.53	8875.44
11	690.0	21.89	2800.0	13.83	720.0	22.82	8805810469.99	1448.6	1396.1	204913.29	0.27	489.87	1.2230	1.0000	1.1177	29267.10	24164.59	10955.79
12	690.0	22.00	2800.0	14.00	720.0	22.81	885191164.95	1446.9	1398.0	191355.45	0.30	443.80	1.1864	1.0000	1.0071	26618.51	20190.12	10045.19
13	690.0	21.82	2800.0	14.15	720.0	23.04	8884417410.7	1452.2	1392.6	189146.64	0.28	396.79	1.1443	1.0000	1.1261	23978.05	20813.10	9079.36
14	690.0	22.46	2800.0	13.98	720.0	22.81	891238785.78	1440.9	1404.3	198806.92	0.25	501.00	1.2632	1.0000	1.1503	30065.99	25018.69	11327.02
15	690.0	22.33	2800.0	14.25	720.0	22.82	882862443.92	1451.2	1393.5	198806.92	0.27	501.00	1.2632	1.0000	1.1503	30065.99	25018.69	11327.02
16	690.0	22.44	2800.0	14.15	720.0	23.06	8976208130	1444.5	1401.0	201932.47	0.29	428.63	1.1440	1.0000	1.0981	21491.55	20502.26	8195.67
17	690.0	21.93	2800.0	13.64	720.0	22.70	8753736090.1	1446.6	1398.1	211133.11	0.26	409.30	1.1015	1.0000	1.1455	24288.86	21974.75	9028.02
18	690.0	22.06	2800.0	13.97	720.0	22.78	8848877652.9	1445.6	1399.2	190491.51	0.30	464.79	1.2156	1.0000	1.0352	27843.06	21373.59	10498.30
19	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
20	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
21	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
22	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
23	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
24	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
25	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
26	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
27	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
28	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
29	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
30	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
31	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
32	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
33	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
34	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
35	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
36	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
37	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
38	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
39	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
40	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
41	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
42	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
43	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
44	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
45	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
46	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
47	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
48	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
49	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
50	690.0	22.15	2800.0	14.05	720.0	22.84	890075665.60	1446.6	1398.4	205919.30	0.30	428.88	1.1157	1.0000	1.1675	25858.55	23649.01	9744.19
5001	690.0	22.20	2800.0	14.14	720.0	22.64	8881972104.3	1441.8	1403.1	192219.03	0.27	378.49	1.0935	1.0000	1.1661	22695.34	21001.72	8653.19
5002	690.0	22.14	2800.0	14.04	720.0	22.94	889597631.33	1446.3	1398.2	193758.90	0.22	403.68	1.1261	1.0000	1.092	24328.82	21014.69	9156.96
5003	690.0	21.89	2800.0	14.13	720.0	23.06	8893771467.8	1451.8	1393.2	199956.46	0.29	447.62	1.2262	1.0000	1.0138	29486.34	22086.76	11137.11
5004	690.0	21.68	2800.0	14.00	720.0	22.86	8810690199.0	1451.8	1392.7	200452.34	0.27	414.05	1.1485	1.0000	1.0512	24811.17	20057.01	9371.90
5005	690.0	22.03	2800.0															

### 4.3.3 作用強度 S の算出

4.2.2 同様、作用強度 S についてバラツキを考慮した統計データを作成する。活荷重強度については、前述したように偏りのみを考慮することとした。

表-4.4 作用強度データ

作用曲げモーメントの公称値 $M_k$ [kN・m]	
死荷重	7461
活荷重	4608

作用せん断力の公称値 $S_k$ [kN]	
死荷重	514.58
活荷重	174.92

荷重値の統計データの整理

平均値	1.05	1.6
変動係数	0.0138	0.0

荷重値の統計データの整理

平均値	1.05	1.6
変動係数	0.049	0.0

N	死荷重係数 $\gamma_D$	活荷重係数 $\gamma_L$	バラツキを考慮した死活荷重 $M$
1	1.050	1.6	15205
2	1.050	1.6	15207
3	1.026	1.6	15028
4	1.050	1.6	15203
5	1.036	1.6	15103
6	1.031	1.6	15064
7	1.038	1.6	15116
8	1.046	1.6	15178
9	1.029	1.6	15049
10	1.061	1.6	15289
11	1.023	1.6	15009
12	1.046	1.6	15174
13	1.041	1.6	15136
14	1.069	1.6	15349
15	1.055	1.6	15243
16	1.054	1.6	15239
17	1.054	1.6	15235
18	1.065	1.6	15321
19	1.047	1.6	15183
20	1.059	1.6	15273
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
5001	1.064	1.6	15309
5002	1.061	1.6	15290
5003	1.031	1.6	15068
5004	1.046	1.6	15175
5005	1.070	1.6	15356
5006	1.038	1.6	15115
5007	1.047	1.6	15181
5008	1.063	1.6	15301
5009	1.049	1.6	15200
5010	1.056	1.6	15254
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
9991	1.070	1.6	15353
9992	1.060	1.6	15285
9993	1.051	1.6	15211
9994	1.053	1.6	15229
9995	1.052	1.6	15220
9996	1.055	1.6	15243
9997	1.064	1.6	15311
9998	1.054	1.6	15240
9999	1.063	1.6	15303
10000	1.053	1.6	15228

	死荷重係数 $\gamma_D$	活荷重係数 $\gamma_L$	バラツキを考慮した死活荷重 $S$
1	1.006	1.6	824
2	0.947	1.6	818
3	1.117	1.6	814
4	1.055	1.6	814
5	1.111	1.6	815
6	1.121	1.6	825
7	0.918	1.6	828
8	1.155	1.6	833
9	1.050	1.6	817
10	1.062	1.6	813
11	1.023	1.6	819
12	1.059	1.6	835
13	0.989	1.6	820
14	1.010	1.6	825
15	0.973	1.6	832
16	1.109	1.6	823
17	1.056	1.6	816
18	1.111	1.6	822
19	1.129	1.6	818
20	0.993	1.6	828
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
5001	1.144	1.6	818
5002	1.056	1.6	832
5003	0.962	1.6	831
5004	0.981	1.6	829
5005	0.985	1.6	816
5006	1.024	1.6	824
5007	0.957	1.6	828
5008	0.987	1.6	827
5009	1.115	1.6	816
5010	0.963	1.6	814
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
9991	0.982	1.6	817
9992	1.032	1.6	827
9993	1.113	1.6	823
9994	0.993	1.6	826
9995	0.966	1.6	824
9996	0.998	1.6	825
9997	0.973	1.6	812
9998	1.023	1.6	827
9999	1.094	1.6	817
10000	1.055	1.6	826

#### 4.3.4 性能関数および信頼性指標 の算出

4.3.2、4.3.3 にて算出した抵抗強度 R、作用強度 S の統計データから性能関数を求め、信頼性指標 を算出する。

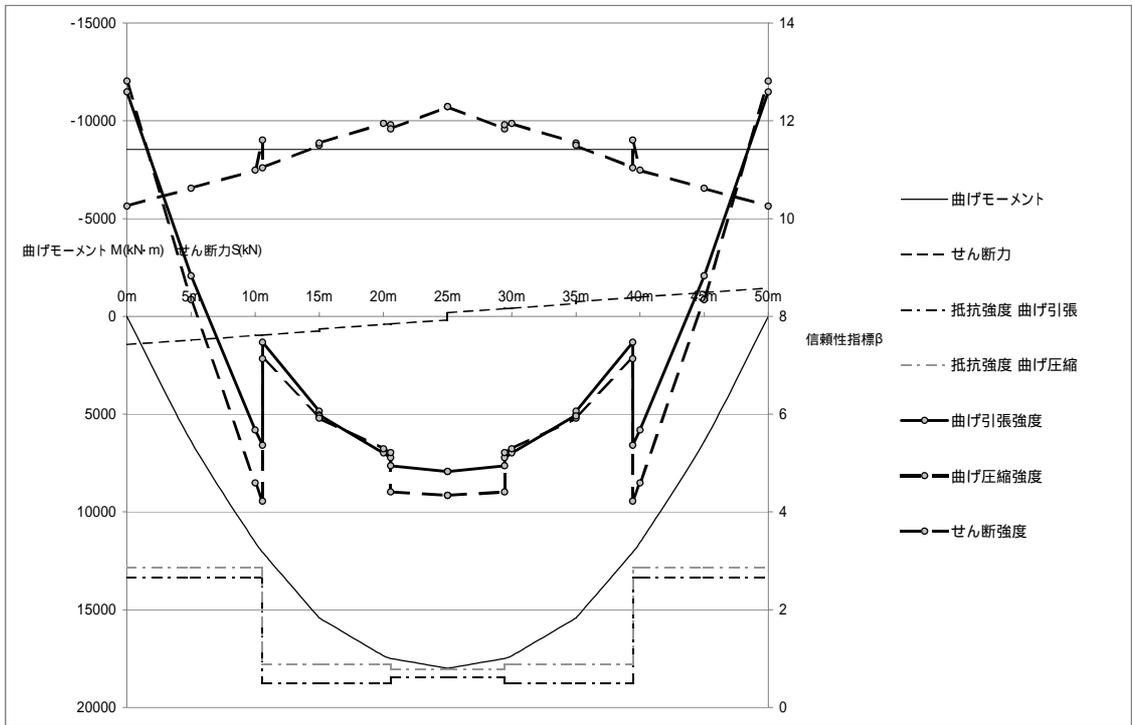
表-4.5 性能関数および信頼性指標算出結果

	性能関数 Z=R-S		
	曲げ引張	曲げ圧縮	せん断
	L.Flg	U.Flg	Web
	[kN・m]	[kN・m]	[kN]
1	11995	6984	9334
2	13496	8539	9972
3	9389	6573	8339
4	9084	5857	8252
5	10139	4570	8760
6	8090	6686	7784
7	10730	5362	8862
8	11776	10698	9235
9	9944	4433	8640
10	8352	6318	8063
11	14258	9156	10137
12	11444	5016	9210
13	8842	5677	8260
14	14717	9670	10502
15	8673	6081	8156
16	6252	5263	7373
17	10657	4443	8943
18	8968	6654	8204
19	12660	6191	9680
20	10584	8376	8916
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
5001	7386	5693	7835
5002	9038	5724	8326
5003	14417	7019	10306
5004	9636	4882	8543
5005	9195	5510	8266
5006	8453	1954	8081
5007	7138	6803	7574
5008	9950	7242	8706
5009	12384	8090	9547
5010	10959	7899	9047
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
9990	11544	7897	9275
9991	11290	9421	9172
9992	7517	5336	7747
9993	11371	7290	9057
9994	10025	4175	8675
9995	11263	8062	9129
9996	9823	5629	8650
9997	10779	7706	8990
9998	15166	5871	10570
9999	15931	8902	10815
10000	12981	9938	9801

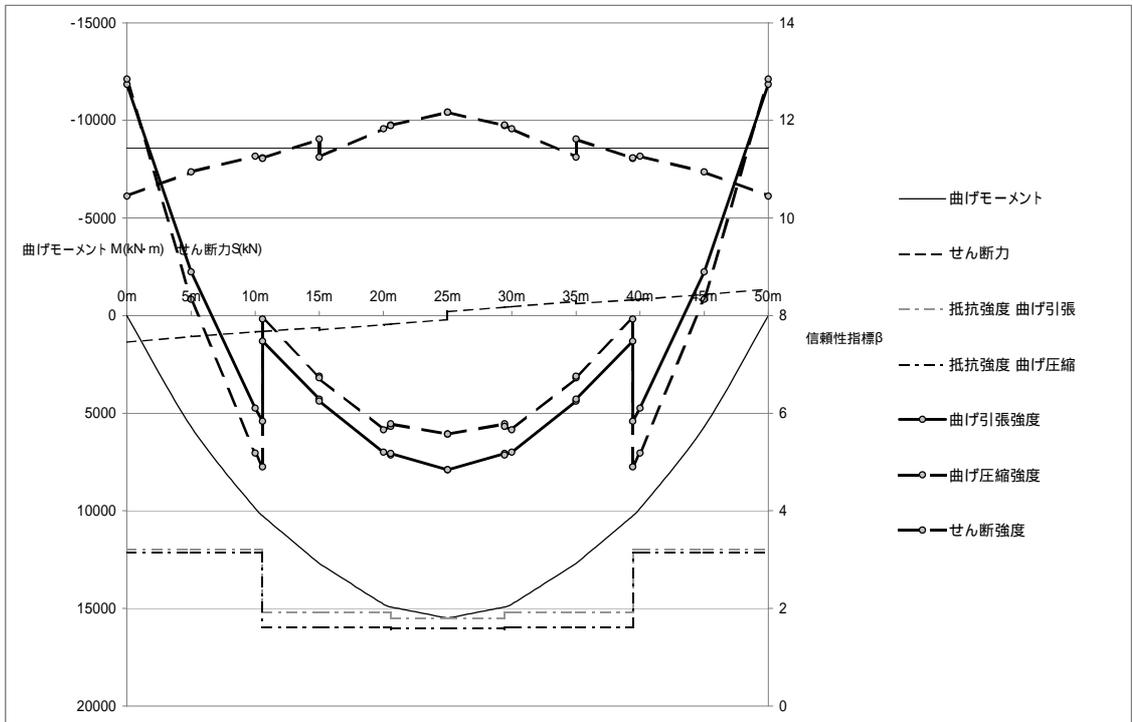
	曲げ引張	曲げ圧縮	せん断
	抵抗強度	抵抗強度	抵抗強度
	L.Flg	U.Flg	Web
	[kN・m]	[kN・m]	[kN]
公称値	6185	2340	7214
平均値	11159	7434	9082
標準偏差	2081	1762	783
$\beta$	5.4	4.2	11.6

#### 4.3.5 信頼性指標算出結果

図-4.1 に各主桁の信頼性指標算出結果を示す。



a)G1 桁



b)G2 桁

図-4.1 信頼性指標算出結果

#### 4.4 考察

##### 4.4.1 信頼性係数 の算出結果

算出した信頼係数 を以下に、一覧表で示す。

表-4.2 信頼係数 算出結果一覧表

		曲げ圧縮	曲げ引張	せん断	備考	
		U.Flг	L.Flг	Web		
G1	C1	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	0 < 210	0 < 210	36.7 < 120	断面1-L
		応力度比率	0%	0%	31%	
			12.81	12.59	10.25	
	J1	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-197.1 < -210	200.3 < 210	24.4 < 120	断面1-R
		応力度比率	94%	95%	20%	
			4.22	5.36	11.61	
	J2	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-206.7 < -210	206.8 < 210	9.9 < 120	断面2-R
		応力度比率	98%	98%	8%	
			4.41	4.94	11.83	
	C6	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-209.4 < -210	204.6 < 210	4.9 < 120	断面3-C
		応力度比率	100%	97%	4%	
			4.34	4.83	12.29	
G2	C1	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	0 < 210	0 < 210	34.5 < 120	断面1-L
		応力度比率	0%	0%	29%	
			12.84	12.74	10.45	
	J1	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-179.1 < -210	189.3 < 210	20.6 < 120	断面1-R
		応力度比率	85%	90%	17%	
			4.90	5.84	11.23	
	J2	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-206.1 < -210	209.5 < 210	11.0 < 120	断面2-R
		応力度比率	98%	100%	9%	
			5.78	5.18	11.89	
	C6	応力度(N/mm <sup>2</sup> )	-209.5 < -210	203.1 < 210	5.3 < 120	断面3-C
		応力度比率	100%	97%	4%	
			5.57	4.84	12.17	

) 着色部は、最小値を示す。

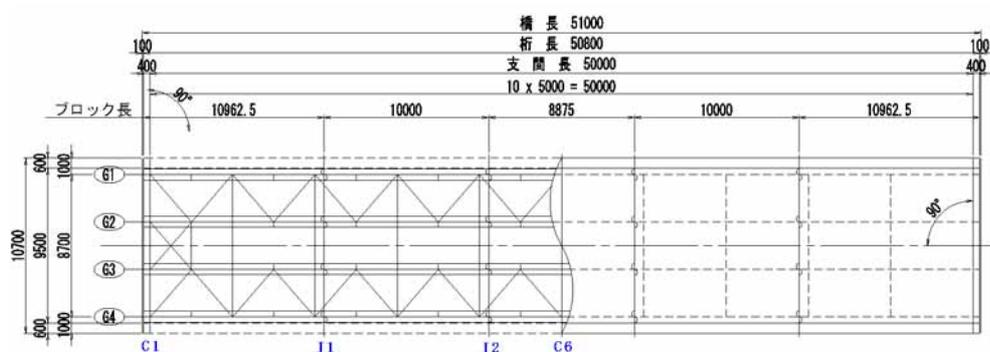


図-4.2 算出位置平面図

##### 4.4.2 信頼性係数 の算出結果に対する考察

信頼性指標の試算を実施した結果、次のことが言える。

- ・算出した信頼係数 は、『4.2~12.8』の範囲である。
- ・信頼係数 は、許容値に対する発生応力度の比率が大きい箇所では（上下フランジ曲げ圧縮）小さな数値（4.2~5.8）となる。
- ・同様に、許容値に対する発生応力度の比率が小さい箇所では（ウェブせん断）大きな数値（10.3~12.3）となる。

既往文献より確認できる信頼係数 は、『3.8~4.5』程度であり、上記の結果は、妥当な範囲であると言える。

## 5 . 部分係数設計法について

### 5 . 5 部分係数による設計法の概要

#### 5.1.1 部分係数設計法による照査式

本章では、IS02394 をもとに部分係数を用いた設計法の概要について紹介する。  
部分係数による設計法では、基本変数に割り当てられた設計用値を用いて、異なった原因によって生じる不確定性と変動性の影響を分離している。設計条件は次のような設計用値を用いて表現することができる。

$$g(F_d, f_d, a_d, \sigma_d, C, \gamma_n) = 0 \dots\dots\dots (5.1.1)$$

ここに、

- $F_d$  : 作用の設計用値
- $f_d$  : 材料特性の設計用値
- $a_d$  : 幾何学量の設計用値
- $\sigma_d$  : モデル不確定性を表す変数  $\sigma$  の設計用値
- $C$  : 使用性の制約条件
- $\gamma_n$  : 破壊形式の重大さを含めて、構造物の重要度や破壊の影響度合いが考慮される係数。 $\gamma_n$  は実際の構造物や構造要素の規定された信頼性レベルに依存するようになっている。

式(5.1.1)中の各々の記号は単一変数あるいはいくつかの変数からなるベクトルを表している。

基本変数は次の変数に分類される。

- ・ 主要基本変数
- ・ 他の基本変数

主要基本変数とは、その値が設計結果に最も重要と考えられるものである。それらは、作用や特定の材料からなる構造物を扱う設計法で規定される。(注：鋼構造では、鋼材の強度が主要基本変数であり、弾性係数は主要でない基本変数となる。作用は通常主要基本変数として扱う。)

主要基本変数  $F$ 、 $f$ 、 $a$ 、 $\sigma$  の設計用値は次のように得られる。

$$F_d = \frac{F}{\gamma_f} \dots\dots\dots (5.1.2)$$

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \dots\dots\dots (5.1.3)$$

$$a_d = a_k \pm \sigma_a \dots\dots\dots (5.1.4)$$

$$\sigma_d = \sigma_D \quad \text{又は} \quad 1/\gamma_D \dots\dots\dots (5.1.5)$$

ここに、

- $F_r$  : 作用の代表値(5.1.2 参照)
- $f_k$  : 材料特性の特性値(5.1.3 参照)
- $a_k$  : 幾何学量の特性値(5.1.4 参照)
- $f$  : 作用の部分係数
- $m$  : 材料の部分係数
- $a$  : 付加的幾何学量
- $D$  : モデル不確定性を表わす部分係数

$f$  は以下のものを考慮する。

- ・作用がその代表値から不利な状態になる可能性
- ・作用モデルの不確定性

$m$  は以下のものを考慮する。

- ・材料特性の特性値から不利な状態になる可能性
- ・変換係数の不確定性

$a$  は以下のものを考慮する。

- ・ $a$  の変動の重要性、 $a$  に関する精度の仕様、 $a$  との隔たりの制御を含む幾何学的パラメータの特性値(規定値) の不利な状態になる可能性
  - ・いくつかの幾何学的隔たりが同時に生じる組合せ効果
- $D$  は実測や比較計算より特定できるモデル不確定性を考慮する。

主な変数以外の基本変数に対して、部分係数は先験的に 1.0 とし、付加的誤差は 0 とする。すなわち、設計用値が特性値に等しくなる。平均値を用いる場合もある。

### 5.1.2 作用の代表値

#### (1) 永続作用 (死荷重)

永続作用はしばしば唯一の特性値をとる。構造物の自重の場合、 $Q_k$  は、規定された幾何学量と材料の平均単位体積重量から規定される値によって得られる。しかし、永続作用に対し、二つの値、すなわち、上限特性値と下限特性値を定義するほうが好ましい場合もある。

#### (2) 変動作用 (活荷重、温度荷重、風荷重等)

変動作用は次の代表値により表わされる。

- ・特性値  $Q_k$
- ・組合せ値  ${}_0Q_k$
- ・頻度値  ${}_1Q_k$
- ・準永続値  ${}_2Q_k$

#### (3) 偶発作用 (L2 地震荷重)

偶発作用は、唯一の特性値  $A_k$  を取る。

#### (4)特性値

選ばれた基準期間中に好ましくない側に超過する確率が規定された値となるように選ばれる。

#### (5)組合せ値

組合せにより生じる荷重効果が超過する確率が単一作用を考えるとほぼ同様となるように選ばれる。

#### (6)頻度値

以下のように定められる。

- ・選ばれた期間中に超過している全時間が選んだ期間の極く小さい部分である。
- ・その超過の頻度がある与えられた小さな値に限定されている。

(注：異なった設計条件によっては、同じ荷重に対して2個以上の頻度値が存在することもありうる。)

#### (7)準永続値

選ばれた期間中に超過している全時間が、その期間の半分程度の長さであるように定められる。

### 5.1.3 材料特性の特性値

材料特性はJIS等の規格値が用いられる。人工材料については、特性値は原則として、関連する材料の規格の適用範囲内で生産され、供給される材料特性の統計的分布のばらつきは先験的に規定された割合として与えられるべきである。

地盤や既存構造物に対しては、特性値は同様の原則にしたがって予測されるべきで、設計で考慮される既存構造物の実際の部位や地盤の実際の代表値とする。

### 5.1.4 幾何学量の特性値

幾何学量に対しては、特性値 $a_k$ は普通、設計者により規定された寸法に相当している。

### 5.1.5 荷重ケースと荷重組合せ

荷重ケースは永続作用と一緒に計算に導入される自由作用(変動作用や偶発作用)の特定の空間的配列である。

自由作用は、考慮している限界状態に対し構造物に好ましくない効果を生じさせるように設定される。

作用の組合せは、ある限界状態に対し、いくつかの異なった作用の同時影響の下での構造信頼性の検証に用いる一連の異なる荷重作用の設計用値の組合せである。

作用の組合せの基本的原則は以下のものである。

- ・ある作用が支配的と考えられ、極大設計値をとるものとして、組合せに導入される。
- ・その他の全ての作用はより起こりそうな値として導入される。

同時に起こらない荷重(たとえば物理的な理由で)は、荷重組合せに考慮しない。

#### 5.1.6 荷重効果および強度

多くの場合、基本変数や計算モデルの不確定性を表わす係数はいくつかのグループに分離することができる。

その中のいくつかのグループは以下の荷重効果を与える。

$$S(F, f, a, \dots)$$

そして、他のグループは以下の強度を与える。

$$R(F, f, a, \dots)$$

$S$  の表現の中で、たとえば、2次理論に従う計算のような特別な場合のみ、材料特性  $f$  は主要基本変数である。 $R$  の表現のなかでは、作用  $F$  が  $R$  に影響を与える場合がある。

設計値  $S_d$  と  $R_d$  は以下のように定義できる。

$$S_d = S(F_d, f_d, a_d, \dots) \dots \dots \dots (5.1.6)$$

$$R_d = R(F_d, f_d, a_d, \dots) \dots \dots \dots (5.1.7)$$

そして、式(5.1.1)は次式で書くことができる。

$$g(S_d, R_d) = 0 \dots \dots \dots (5.1.8)$$

式(5.1.1)の場合と同じく、式(5.1.8)は記号的記述として見なすべきである。各々の記号  $S$  と  $R$  は、荷重効果や強度を表している。

最も簡単な場合では、式(5.1.8)は以下のように書ける。

$$R_d = S_d \dots \dots \dots (5.1.9)$$

式(5.1.8)や式(5.1.9)は終局限界状態や使用限界状態に適用可能である。使用限界状態では、たとえば、たわみに関して、設計条件は以下の形式となる。

$$S_d = C \dots \dots \dots (5.1.10)$$

ここに  $C$  は使用性に関する限界値であり、たとえば、許容たわみである。

## 5.2 設計値法による部分係数キャリブレーション

設計値法とは，FORM 法などで算出された感度係数  $\alpha_i$ ，基本変数の平均・標準偏差および目標とする信頼性指標  $\beta_T$  を用いて部分係数を算定する方法である。FORM 法の中で算定される感度係数  $\alpha_i$  は，信頼性指標  $\beta$  および標準正規座標系における破壊点  $(z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*)$  と以下の関係にある（感度係数  $\alpha_i$  は，抵抗側が正，荷重側が負となる）。

$$z_i^* = -\alpha_i \beta$$

これらの関係を 2 変数の場合を例に標準正規座標系で示すと，図-5.1 のとおりとなる。

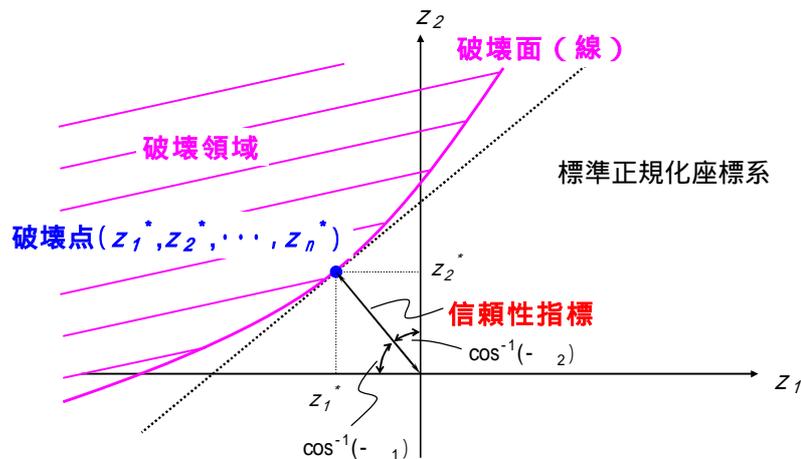


図-5.1 信頼性指標と破壊点との関係

部分係数設計法における照査の基本式は次式で表されるとする。

$$\gamma_D D_k + \gamma_L L_k \leq \phi_R R_k \dots\dots\dots (5.2.1)$$

ここで，

$\phi_R, \gamma_D, \gamma_L$  : 抵抗係数，死荷重係数，活荷重係数

$R_k, D_k, L_k$  : 抵抗，死荷重，活荷重を断面力もしくは応力で表現した特性値

部分係数の算出に用いる信頼性指標  $\beta$  は，性能関数  $Z$  が抵抗項  $R$  と荷重項  $D+L$  によって  $R-(D+L)$  で表される場合，次式で定義される。

$$\beta_i = \frac{\bar{Z}_i}{\sigma_{Z_i}} = \frac{\bar{R}_i - (\bar{D}_i + \bar{L}_i)}{\sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \dots\dots\dots (5.2.2)$$

ここに，

$R_i$  : 照査部位ごとの抵抗強度の基本変数 ( $\bar{R}_i$  : 平均値， $\sigma_{R_i}$  : 標準偏差)

ただし、各種抵抗項（鋼材降伏強度，座屈強度，板厚等）を塊にまとめた抵抗項を表す。（統計量が得られていることが前提）

$D_i$ ：照査部位ごとの死荷重の基本変数（ $\bar{D}_i$ ：平均値， $\sigma_{D_i}$ ：標準偏差）

ただし、各種死荷重項（鋼材，コンクリート等）を塊にまとめた死荷重項を表す。

$L_i$ ：照査部位ごとの活荷重の基本変数（ $\bar{L}_i$ ：平均値， $\sigma_{L_i}$ ：標準偏差）

ただし、各種活荷重項（B 活荷重，衝撃）を塊にまとめた活荷重項を表す。

添字  $i$ ：照査部位ごとの値を示す。

また，

$$\sigma_{Z_i} = \frac{\sigma_{Z_i}^2}{\sigma_{Z_i}} = \frac{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}{\sigma_{Z_i}}$$

ここで、感度係数  $\alpha_{R_i}$ ， $\alpha_{D_i}$ ， $\alpha_{L_i}$  は，照査部位ごとに対して，次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{R_i} &= \frac{\sigma_{R_i}}{\sigma_{Z_i}} = \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \\ \alpha_{D_i} &= -\frac{\sigma_{D_i}}{\sigma_{Z_i}} = -\frac{\sigma_{D_i}}{\sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \\ \alpha_{L_i} &= -\frac{\sigma_{L_i}}{\sigma_{Z_i}} = -\frac{\sigma_{L_i}}{\sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2.3)$$

これより， $\sigma_{Z_i}$  は式を変形することにより次式で表される。

$$\sigma_{Z_i} = \alpha_{R_i} \cdot \sigma_{R_i} - \alpha_{D_i} \cdot \sigma_{D_i} - \alpha_{L_i} \cdot \sigma_{L_i}$$

これを式 (5.2.2) に代入することにより，

$$\beta_i (\alpha_{R_i} \cdot \sigma_{R_i} - \alpha_{D_i} \cdot \sigma_{D_i} - \alpha_{L_i} \cdot \sigma_{L_i}) = \bar{R}_i - (\bar{D}_i + \bar{L}_i)$$

式を変形することにより，次式が得られる。

$$\left(1 - \beta_i \cdot \alpha_{D_i} \cdot \frac{\sigma_{D_i}}{D_i}\right) \cdot \frac{\bar{D}_i}{D_{ki}} D_{ki} + \left(1 - \beta_i \cdot \alpha_{L_i} \cdot \frac{\sigma_{L_i}}{L_i}\right) \cdot \frac{\bar{L}_i}{L_{ki}} L_{ki} = \left(1 - \beta_i \cdot \alpha_{R_i} \cdot \frac{\sigma_{R_i}}{R_i}\right) \cdot \frac{\bar{R}_i}{R_{ki}} R_{ki} \dots\dots\dots (5.2.4)$$

式 (5.2.4) と式 (5.2.1) を比較することにより，部分係数は次式で与えられる。

$$\phi_{R_i(\beta_i)} = \left(1 - \beta_i \cdot \alpha_{R_i} \cdot \frac{\sigma_{R_i}}{R_i}\right) \cdot \frac{\bar{R}_i}{R_{ki}} \dots\dots\dots (5.2.5)$$

$$\gamma_{D_i(\beta_i)} = \left( 1 - \beta_i \cdot \alpha_{D_i} \cdot \frac{\sigma_{D_i}}{D_i} \right) \cdot \frac{\bar{D}_i}{D_{ki}} \dots \dots \dots (5.2.6)$$

$$\gamma_{L_i(\beta_i)} = \left( 1 - \beta_i \cdot \alpha_{L_i} \cdot \frac{\sigma_{L_i}}{L_i} \right) \cdot \frac{\bar{L}_i}{L_{ki}} \dots \dots \dots (5.2.7)$$

注)  $\phi_{R_i(\beta_i)}$ ,  $\gamma_{D_i(\beta_i)}$ ,  $\gamma_{L_i(\beta_i)}$  :  $i$  をもとに算定した抵抗係数, 死荷重係数, 活荷重係数

以上より, 抵抗係数  $\phi_{R_i}$  と  $i$  の関係が得られるが, この式より, 種々の橋梁における照査部位に対して, 一律に目標信頼性指標  $\beta_T$  を満足するような抵抗係数を近似的に設定する方法については, 必ずしも標準的な方法があるわけではない。一方法としては,  $i$  と  $\beta_T$  がかけ離れていない値の場合には, 近似的な方法であるが, 上式中の  $i$  に  $\beta_T$  を代入することにより,  $\beta_T$  に近づくような抵抗係数  $\phi_{R_i}$  が算出される。

$$\phi_{R_i} = \left( 1 - \beta_T \cdot \alpha_{R_i} \cdot \frac{\sigma_{R_i}}{R_i} \right) \cdot \frac{\bar{R}_i}{R_{ki}} \dots \dots \dots (5.2.8)$$

### 5.3 その他のキャリブレーション方法 (AASHTO などの例示)

国際規格 IS02394 (構造物の信頼性に関する一般原則) では、構造設計にあたって構造物及び構造要素に要求される性能を適切な程度の信頼性を有しながら検証することとしている。同規格の例示によれば、設計供用期間をクラス 1~4 に分類し、重要な構造物、大規模橋梁に対して 100 年、それら以外の構造物については 50 年を与えており、目標とする信頼性指標  $\gamma$  の例示として 終局限界状態では安全性クラスに応じてそれぞれ 3.1, 3.8, 4.3, 疲労限界状態では点検の可能性に応じて 2.3~3.1 を与えている。諸外国の道路橋の規準に関しては、米国 AASHTO LRFD コードでは、設計供用期間 75 年で終局限界状態に対して、目標とする信頼性指標  $\gamma$  を 3.5 とし、主要な照査項目に対する荷重・抵抗係数を設定している。

ここでは、設計値法以外の部分係数の算定方法として、AASHTO LRFD コードによる部分係数 (抵抗係数) の算定方法<sup>3)</sup> を例として示す。AASHTO LRFD コードによる方法では、モンテカルロシミュレーションで算出された抵抗項と荷重項の統計量および目標とする信頼性  $\gamma$  を用いて部分係数を算定する。ここで、抵抗係数を算定する際、死荷重係数  $D$  および活荷重係数  $L$  の値は任意に与えることができる。

基本となる照査式は式 (5.2.1) で与えられるとする。信頼性指標  $\beta_i$  は式 (5.2.2) で定義される。

ここで、式 (5.2.1) の右辺と左辺が等しいとして式を変形すると、

$$\phi_{R_i} = \frac{1}{R_{k_i}} (\gamma_{D_i} D_{k_i} + \gamma_{L_i} L_{k_i}) \dots \dots \dots (5.3.1)$$

が得られる。また、式 (5.2.2) を変形すると、

$$1 = \frac{\bar{R}_i}{(\bar{D}_i + \bar{L}_i) + \beta_i \sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \dots \dots \dots (5.3.2)$$

式 (5.3.1) と式 (5.3.2) の両辺を掛け合わせて整理すると、抵抗側の部分係数は次式で表される。

$$\phi_{R_i(\beta_i)} = \frac{\bar{R}_i (\gamma_{D_i} D_{k_i} + \gamma_{L_i} L_{k_i})}{(\bar{D}_i + \bar{L}_i) + \beta_i \sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \dots \dots \dots (5.3.3)$$

注)  $\phi_{R_i(\beta_i)}$  :  $\beta_i$  をもとに算定した抵抗係数

5.2 節と同様に  $\beta_i$  に目標信頼性指標  $\gamma$  を代入することにより、 $\gamma$  に近づくような抵抗係数  $\phi_{R_i}$  が算出される。

$$\phi_{R_i} = \frac{\frac{\overline{R}_i}{R_k} (\gamma_{D_i} D_{k_i} + \gamma_{L_i} L_{k_i})}{(\overline{D}_i + \overline{L}_i) + \beta_T \sqrt{\sigma_{R_i}^2 + \sigma_{D_i}^2 + \sigma_{L_i}^2}} \dots \dots \dots (5.3.4)$$

## 6 . まとめ

次回示方書改訂では信頼性理論に基づいた部分係数設計法が導入される見込みである。次期示方書における設計手法はレベル の信頼性設計であり、示方書で規定される部分係数を使った照査式を満足することで構造物の安全率を一定に保つことができる。そのため、当面、設計実務上は、実際に設計者自らが信頼性解析を行って構造物の安全性を照査することは少ないと思われる。ただし、将来、性能規定化が推し進み、個別事例ごとに、より合理的な設計方法が求められ、設計者自らが統計量を設定し、信頼性指標もしくは破壊確率によって構造物の安全性を照査する時代が到来することも考えられる。そのような場合には、今回のこの報告書が、設計実務の場において信頼性設計の理解のための一助となれば幸いである。

以 上

## 参考文献

- 1)国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002.10
- 2)(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同開設、2007.7
- 3)星谷、石井：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.5
- 4)独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター：土木研究所資料 鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討、2009.3
- 5)独立行政法人 土木研究所 構造物研究グループ 橋梁チーム：土木研究所資料 鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査、2008.3
- 6)(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編、2002.3
- 7)JIS G 3193「熱間圧延鋼板と鋼帯の形状、寸法、質量及びその許容差」、2005.3