

# 仕様型設計の信頼性評価への実務的変換と安全度評価

A Practical Conversion of Allowable Stress Design into Reliability Analysis and its Safety Evaluation

吉田 修  
Osamu YOSHIDA

Allowable stress design is based on ensuring the safety factor value for steel yielding against the nominal loads. Nominal yielding limit regulated in JIS can be converted into the probability density distribution based on the mill-sheet data. In contrast, the distribution of the live load action is an issue, because the background of nominal live load regulation was not identified. Monte-Carlo Simulation was performed using the individual weight distributions of classified vehicles for deriving the unit load of motorcades based on the hierarchical Traffic Flow Models. Then, reliability assessment examples for the Plate-Girder Bridge are introduced being compared with allowable stress design. Practical reliability assessment for the Performance-based Design can be comprised through the conversion of allowable stress design.

Key words : Performance-based Design, Probability density distribution, Reliability Index

## 1. はじめに

性能設計は構造物の機能を目標性能としてこれを実現することを目指すものであり、仕様設計では達成できない多様な要求を満たすことを可能とする。そのために信頼性理論のような応用性の広い理論を適用し荷重や強度を確率密度分布として指標化することを求められる。

構造物の目標とする条件によって荷重作用や材料強度が定められるが、これは要求性能を構成する要素となるものであり、性能設計であっても仕様型設計であっても現実に存在する荷重データや材料特性値をもとに設定される点は同じであろう。

公称荷重や許容応力という指標は仕様型設計において使用される要素であるが、性能設計の場合にこれらとの関連付けを把握することが性能評価を理解しやすいものにする。

具体的設計作業において使用される個々の特性値は同じ物の特性を違う角度から見て指標化されていると見ることもできる。このような観点から、性能設計を実務的に適用するために、また社会的要請のレベルを数値的に表す手法として要求性能を仕様設計からの相対的位置付けに設定することで可能とすることを提言するものである。

計算事例として、鋼単純！桁形式の橋梁の主桁を対象に、現行の道路橋示方書による設計と信頼性理論の枠組みに変換した場合を示し、安全度の変化について定量的な検証を行う。

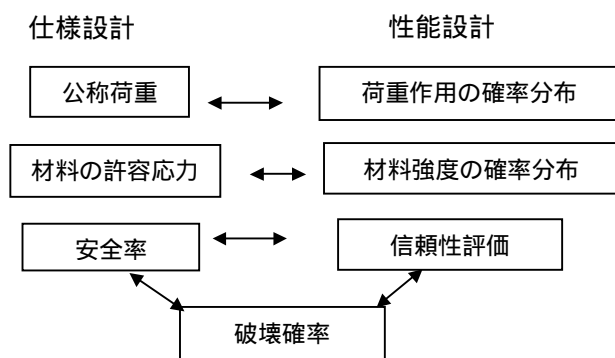


図-1 仕様設計と性能設計の相互関係

## 2. 仕様設計の信頼性理論への変換概念

仕様型設計（許容応力法）では所定の公称荷重によって断面に作用する応力度が許容応力度を越えないことを条件として設計がなされる。ここで用いられる荷重は公称値であり、許容応力度は降伏点または引張強度に対して一定の安全率を確保した値に設定される。<sup>1)</sup>

これを信頼性理論による作用と強度の関係に置換えると、図-2 のようになる。応力領域の問題として扱い、横軸が応力、縦軸が確率密度である。SM400 で構成される鋼主桁に公称荷重によって作用する応力が許容応力度と一致している状態を示し、また公称降伏点と鋼材が持っている降伏点のパラツキの関係を併せて表示している。

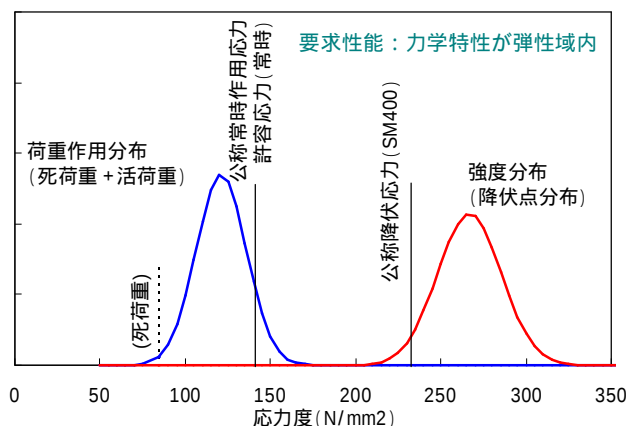


図-2 SM400 の許容応力と降伏点の位置関係

許容応力は公称降伏点の 1/1.7、公称降伏点は JIS 規格値であり、分布は文献 2) に記述されている実測の平均と標準偏差から正規分布型に図化したものである。

荷重作用は[死荷重+活荷重]の状態、そのうち活荷重の占める割合が 40%ありその確率分布は正規分布で変動係数が 40%とした時にその 90%信頼期待値が公称荷重値と一致すると設定したものである。これは活荷重変動が構造物のライフ期間中 90%の範囲が公称許容応力内にあり、残り 10%は許容応力を超過する可能性があることを想定している。

この想定では許容応力を超過する若干の可能性を包含

し、全体としての信頼性については信頼性指標に基づいて降伏点を超過する確率を一定値以下とすれば、通常の使用期間内において鋼材は弾性域内にあって（降伏せずに）健全度を保持することができるとするものであり、これが一つの要求性能の照査とするものである。

上記のような応力領域の作用と強度の確率パターンを設定する場合に 2 次モーメント法を適用して計算される信頼性指標  $\beta$  は

$$\beta = \frac{\mu_R - (\mu_D + \mu_L)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} = 6.1 \quad \dots (1)$$

ここに

- $\mu_R$  : 降伏点応力の平均
- $\mu_D$  : 死荷重応力の平均
- $\mu_L$  : 活荷重応力の平均
- $\sigma_R$  : 降伏点応力の標準偏差
- $\sigma_L$  : 活荷重応力の標準偏差

となる。これは、荷重の重ね合わせが単純な加法則に従うとし、死荷重確率分布の変動係数をゼロとした場合の最も簡潔な形の信頼性評価ということが出来る。以下、本稿では信頼性評価をすべて応力領域において行うこととする。

### 3 . 荷重作用の確率分布特性

#### 3.1 活荷重シミュレーション

道路橋示方書では、橋面上に自動車が続いている状態を想定した分布荷重が規定されており、大型車の頻度に応じて A 荷重、B 荷重の 2 種類から選択することが定められている。ここでは、車種毎の車重分布特性を想定してモンテカルロ・シミュレーションを行い、車列の長さ当たり重量から分布荷重を割出し、公称荷重値との関連を調べる。

シミュレーションの手順は図-3 のとおりである。ここでは文献 3) に記述された交通流モデルと各車種毎の車重確率分布を採用し各車種の確率分布に応じた乱数を発生させる。全サンプルのヒストグラムは図-4 のようになる。大型車率の高い交通流 E の場合でも大部分の車両は車両制限令の 25ton 以下にあるが、これを越える車両が縦距は小さいが存在している。

この全サンプルをシャッフルし、ランダムに配列された車間距離 1m の渋滞車列を生成する。先頭車から載荷長に相当する長さ分の台数をカウントし、その総重量と車列長を求め、総重量を車列長で除して長さ当たりの分布重量を計算する。これを 2 台目以降順次繰り返して車列分布重量の離散サンプルが得られる。

シミュレーションで扱うサンプル全体の確率密度分布特性は母集団のそれと相似形になっており、上記の約束によって組合わせられた各グループの分布特性は無限の母集団から同じ約束で組合せられた場合と相似形であり同じ確率密度分布を持つ。サンプルの総数を増大させてシミュレーションを行った場合でも得られる結果は理想的には同値であり、乱数サンプルの個別的な差による差は生ずる。

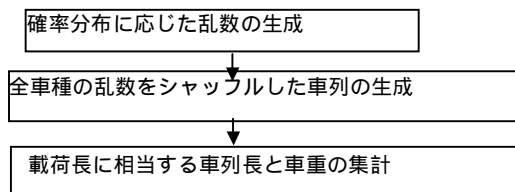


図-3 乱数シミュレーション手順

表-1 交通流モデル(各車種の構成率)

| 交通流区分<br>(大型車率%) |         | A<br>(5.0) | B<br>(20.5) | C<br>(32.5) | D<br>(40.0) | E<br>(60.0) |
|------------------|---------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 小型車              | 乗用車     | 0.776      | 0.653       | 0.551       | 0.490       | 0.327       |
|                  | 小型トラック  | 0.174      | 0.147       | 0.124       | 0.110       | 0.073       |
| 大型車              | 中型トラック  | 0.020      | 0.081       | 0.131       | 0.161       | 0.242       |
|                  | 大型トラック  | 0.016      | 0.068       | 0.103       | 0.127       | 0.190       |
|                  | 大型ダンプ   | 0.005      | 0.018       | 0.030       | 0.037       | 0.056       |
|                  | タンクローリー | 0.003      | 0.011       | 0.017       | 0.021       | 0.032       |
|                  | セミトレーラー | 0.005      | 0.021       | 0.034       | 0.042       | 0.063       |
|                  | 大型バス    | 0.001      | 0.006       | 0.010       | 0.012       | 0.017       |

表-2 各車種の車重分布特性 (単位: ton)

|         | 平均重量  | 最大重量  | 最小重量 | 標準偏差  |
|---------|-------|-------|------|-------|
| 乗用車     | 1.30  | 3.10  | 0.20 | 0.36  |
| 小型トラック  | 3.62  | 12.60 | 1.00 | 1.31  |
| 中型トラック  | 6.19  | 18.30 | 1.60 | 2.50  |
| 大型トラック  | 16.75 | 45.20 | 3.80 | 6.29  |
| 大型ダンプ   | 19.62 | 61.90 | 5.40 | 9.54  |
| タンクローリー | 13.82 | 33.70 | 3.90 | 6.31  |
| セミトレーラー | 24.78 | 86.70 | 5.10 | 12.92 |
| 大型バス    | 13.84 | 18.70 | 6.80 | 2.41  |

(分布形はすべて対数正規分布)

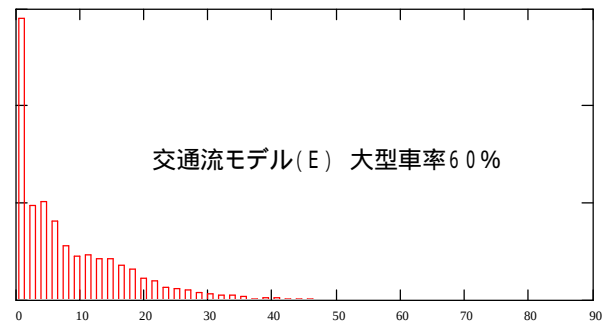


図-4 全サンプルのヒストグラム(tonf)

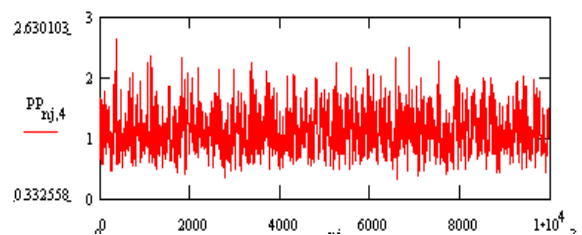


図-5 分布車重の変動(単位 tonf/m)

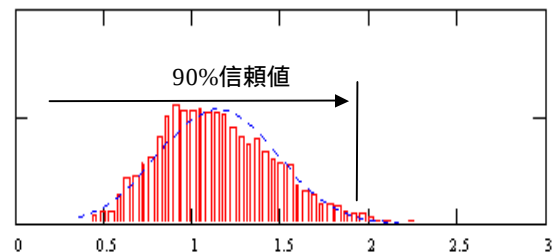


図-6 分布車重のヒストグラム(tonf/m/lane)

このようにして計算された分布重量の変動は図-5 のような波形となる。これをヒストグラムに表すと図-6 のようになる（交通流[C] 載荷長 100m の場合）。

図-6 のヒストグラムから、これにフィッティングする正規分布曲線を得、平均値と標準偏差を求めることができる。離散数値が得られているので求めるパーセンティジ順位の値を求める方法もあるが、分布形態としての平均や分散の程度を把握する意味でフィッティング正規分布を求める。表-2 に示すすべての交通流モデルについても分布車重のヒストグラムが得られその分布特性は表-3 のようになる。

表-3 分布車重の確率密度分布特性 (単位: tonf/m/lane)

| 交通流モデル | 載荷長  | L=30  | L=50  | L=100 | L=200 |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| A      | 平均値  | 0.416 | 0.417 | 0.416 | 0.417 |
|        | 中央値  | 0.342 | 0.36  | 0.385 | 0.403 |
|        | 標準偏差 | 0.234 | 0.185 | 0.132 | 0.093 |
|        | 変動係数 | 0.563 | 0.444 | 0.317 | 0.223 |
|        |      |       |       |       |       |
| B      | 平均値  | 0.654 | 0.655 | 0.657 | 0.658 |
|        | 中央値  | 0.565 | 0.598 | 0.628 | 0.644 |
|        | 標準偏差 | 0.363 | 0.297 | 0.219 | 0.158 |
|        | 変動係数 | 0.555 | 0.453 | 0.333 | 0.240 |
|        |      |       |       |       |       |
| C      | 平均値  | 0.841 | 0.846 | 0.833 | 0.847 |
|        | 中央値  | 0.769 | 0.801 | 0.818 | 0.834 |
|        | 標準偏差 | 0.428 | 0.343 | 0.234 | 0.177 |
|        | 変動係数 | 0.509 | 0.405 | 0.281 | 0.209 |
|        |      |       |       |       |       |
| D      | 平均値  | 0.932 | 0.939 | 0.94  | 0.94  |
|        | 中央値  | 0.863 | 0.895 | 0.92  | 0.928 |
|        | 標準偏差 | 0.435 | 0.35  | 0.251 | 0.178 |
|        | 変動係数 | 0.467 | 0.373 | 0.267 | 0.189 |
|        |      |       |       |       |       |
| E      | 平均値  | 1.148 | 1.151 | 1.159 | 1.154 |
|        | 中央値  | 1.092 | 1.113 | 1.143 | 1.145 |
|        | 標準偏差 | 0.436 | 0.347 | 0.258 | 0.179 |
|        | 変動係数 | 0.380 | 0.301 | 0.223 | 0.155 |
|        |      |       |       |       |       |

### 3.2 載荷長による変動特性

表-3 のシミュレーションでは車両群による分布車重は載荷長を指標として計算しておりその変動特性を見ると。平均値は交通流モデルの区分に対応していて載荷長によってほとんど変化せず、また変動係数は載荷長が増大するにつれて低減している。

載荷長が大きくなればその載荷範囲に含まれる車両台数が増加し、多数の車種が混在することになるのでその車重合計の分散が小さくなる「大数の法則」に従っていることになる。仮に載荷長が無限に大きくなれば分散がゼロとなって母集団の平均値に近づくという傾向は実感としても理解できるものである。

この確率分布特性から、図-7 に示すようなある非超過確率の期待値を次のように求める。

$$S_d = \mu_s (1 + k \cdot V_s) \quad \dots (2)$$

ここに

$$\begin{cases} S_d : \text{荷重期待値、} & \mu_s : \text{確率分布の中央値} \\ V_s : \text{確率分布の変動係数、} & k : \text{シフト係数} \end{cases}$$

シフト係数は信頼区間のパーセンティジに応じて決まる係数で、確率分布が正規分布の場合、表-4 のようになる。

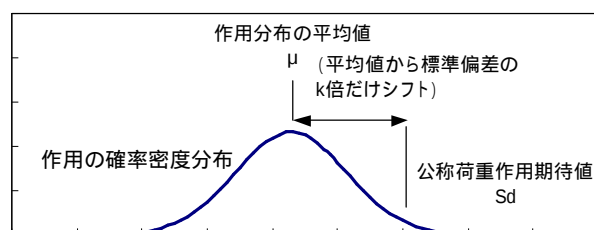


図-7 荷重作用の確率分布と公称荷重値との関連

表-4 正規分布の場合の非超過確率とシフト係数

| 非超過確率 (%) | 70   | 80   | 90   | 95   |
|-----------|------|------|------|------|
| シフト係数 $k$ | 0.53 | 0.85 | 1.28 | 1.65 |

このようにして計算された荷重期待値と公称分布荷重値との関連を交通流モデル区分を指標にして整理すると図-8 (a~d) のようになる。信頼期待値を 70、80、90、95% の 4 ケースに設定した場合の分布荷重の変化を図化したものである。また図中の折れ線は道路橋示方書に規定されている L 荷重 P2 である。

図-8 では、大型車率が大きな交通流ほど分布荷重の期待値は大きくなっており、載荷長の増大に伴う荷重の低減特性も再現されている。また道路橋示方書に規定される P2 分布荷重値とこのシミュレーション期待値との相対的関係を理解することができる。

信頼区間のパーセンティジを高く取るほど載荷長に対する低減の勾配が大きくなる。

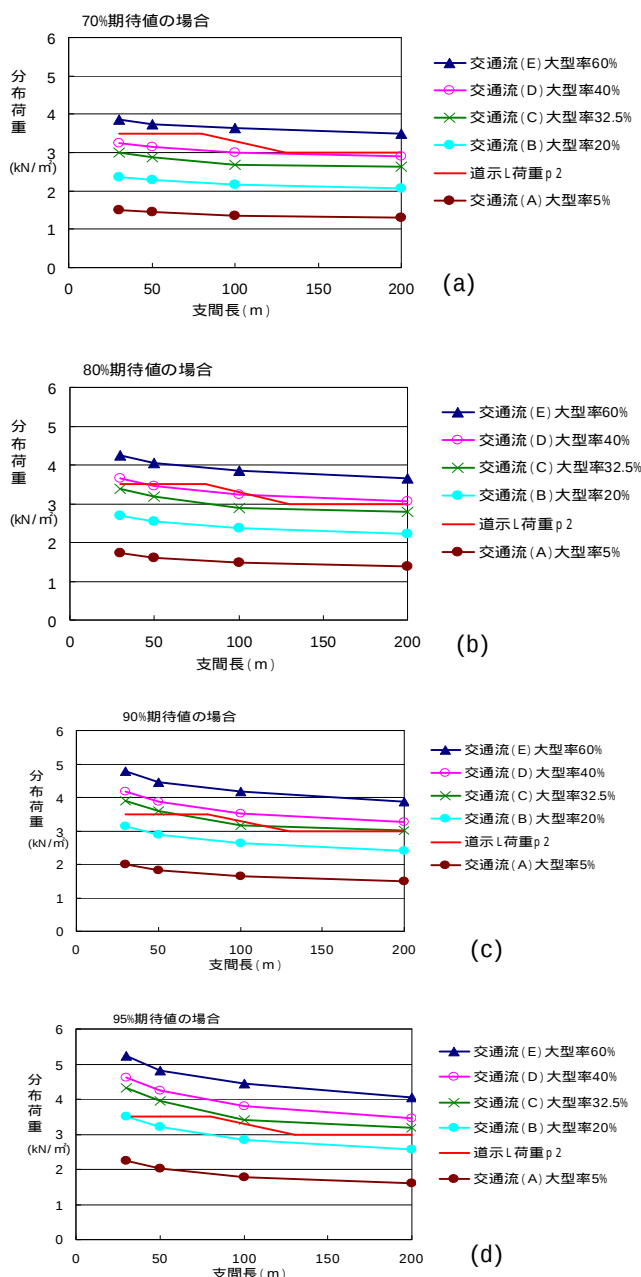


図-8 シミュレーションによる分布荷重期待値

### 3.3 幅員の変化による変動特性

載荷長による荷重期待値が低減する特性は、同じ理由によって載荷幅が増大する場合についても存在するものである。道路橋示方書のⅠ荷重規程には主載荷幅、従載荷幅の考え方があり、図-9 に示すようなものとなっている。

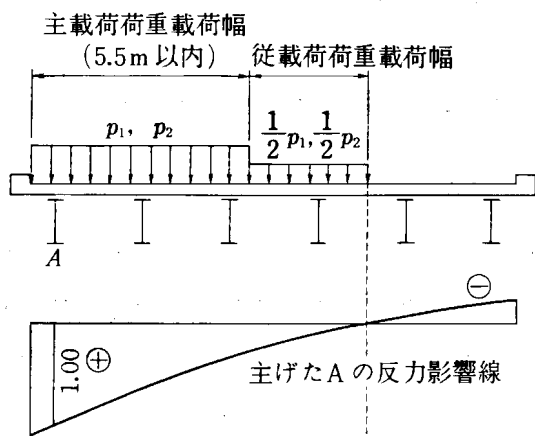


図-9 主載荷幅・従載荷幅の規程

このような事象を車群の分布荷重の特性として取り扱う場合、車線数の増加に応じて載荷される面積が増加するものと評価することができる。

前項と同じシミュレーションを載荷長を 30m から 180m まで 30m 間隔で増加させて行った場合の結果は表-5 のようになり、

| 交通流モデル | 載荷長  | L=30  | L=60  | L=90  | L=120 | L=150 | L=180 |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A      | 平均値  | 0.416 | 0.417 | 0.416 | 0.416 | 0.416 | 0.417 |
|        | 中央値  | 0.342 | 0.367 | 0.381 | 0.389 | 0.395 | 0.401 |
|        | 標準偏差 | 0.234 | 0.169 | 0.138 | 0.121 | 0.108 | 0.098 |
|        | 変動係数 | 0.563 | 0.405 | 0.332 | 0.291 | 0.260 | 0.235 |
| B      | 平均値  | 0.654 | 0.667 | 0.668 | 0.668 | 0.668 | 0.668 |
|        | 中央値  | 0.565 | 0.622 | 0.631 | 0.64  | 0.651 | 0.651 |
|        | 標準偏差 | 0.363 | 0.282 | 0.232 | 0.201 | 0.181 | 0.167 |
|        | 変動係数 | 0.555 | 0.423 | 0.347 | 0.301 | 0.271 | 0.250 |
| C      | 平均値  | 0.841 | 0.847 | 0.848 | 0.847 | 0.847 | 0.847 |
|        | 中央値  | 0.769 | 0.809 | 0.819 | 0.825 | 0.825 | 0.831 |
|        | 標準偏差 | 0.428 | 0.314 | 0.259 | 0.226 | 0.203 | 0.186 |
|        | 変動係数 | 0.509 | 0.371 | 0.305 | 0.267 | 0.240 | 0.220 |
| D      | 平均値  | 0.932 | 0.939 | 0.939 | 0.939 | 0.939 | 0.94  |
|        | 中央値  | 0.863 | 0.901 | 0.917 | 0.924 | 0.929 | 0.926 |
|        | 標準偏差 | 0.435 | 0.321 | 0.265 | 0.23  | 0.205 | 0.188 |
|        | 変動係数 | 0.467 | 0.342 | 0.282 | 0.245 | 0.218 | 0.200 |
| E      | 平均値  | 1.148 | 1.156 | 1.158 | 1.158 | 1.158 | 1.159 |
|        | 中央値  | 1.092 | 1.126 | 1.134 | 1.143 | 1.148 | 1.148 |
|        | 標準偏差 | 0.436 | 0.324 | 0.27  | 0.235 | 0.211 | 0.193 |
|        | 変動係数 | 0.380 | 0.280 | 0.233 | 0.203 | 0.182 | 0.167 |

表-5 載荷長 30m 間隔の確率分布（単位：tonf/m/lane）

この結果のうち、変動係数に着目すると載荷長の増大に伴う変化は交通流モデルに拘わらずほぼ一定の割合で低減している。L=30m を 1.0 とする低減係数を交通流 A～E の平均として表示すると表-6 のようになり、これは載荷長の 1/2 乗に反比例するものと近似することができる。

表-6 載荷長による変動係数の低減特性

| L=               | 30  | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|
| 低減係数             | 1.0 | 0.72 | 0.59 | 0.52 | 0.46 | 0.42 |
| $\sqrt{30/L}$ 近似 | 1.0 | 0.71 | 0.58 | 0.50 | 0.44 | 0.41 |

これはシミュレーションの結果から帰納的に導いたとも見えるが、「ある分布特性を持つ母集団から有限のサンプリングを行った場合の標本の分散が標本数に逆比例する」という定理に従っているものである。

この定理に従うと、車線数の増大は載荷長が倍化された場合と同じとし、分布荷重の期待値は変動係数を次のよう

低減して計算することができる。

$$S_d = \mu_s \left( 1 + k \cdot V_s / \sqrt{n} \right) \quad \dots (3)$$

ここに  $n$  : 車線数

図-9 のように影響線の傾斜があって荷重強度の偏差を無視すべきでないと判断する場合には、全車線の平均値が一致するように次のような車線ごとの偏差を設けることが仕様規程との整合性を保つ手法となる。

期待値パーセンテージは一定（ $k$  が一定）であるとし変動係数が上記のように低減するとして、全車線に均等な分布荷重  $p_a$  は、

$$p_a = p_1 \cdot \frac{1 + \frac{V_p}{\sqrt{n}} \cdot k}{1 + V_p \cdot k} \quad \dots (4)$$

ここに  $\begin{cases} V_p : 1 \text{ 車線あたりの分布荷重の変動係数} \\ p_1 : 1 \text{ 車線あたりの分布荷重（平均値）} \end{cases}$

であり、各車線の分布荷重は第 1 車線を 1 車線の場合と同じ荷重強度とし、第 2 車線以降は全車線の均等分布荷重が同じになるように修正し次のようになる。

$$p_n = n \cdot p_a - (p_1 + \dots + p_{n-1}) \quad \dots (5)$$

$p_n$  :  $n$  番目車線の 1 車線あたり分布荷重

このようにして、計算された車線ごとの分布荷重の低減を図-10 に示す。（載荷長 30m の場合）

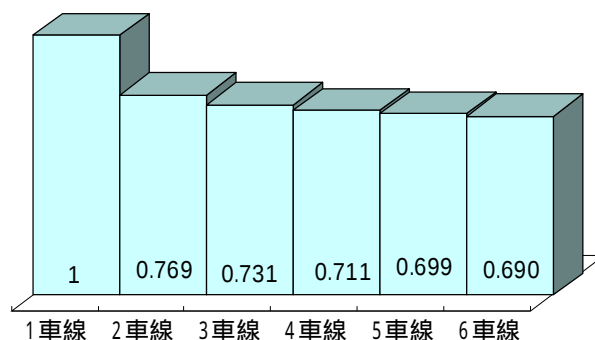


図-10 車線数による分布荷重の低減

### 3.4 確率密度分布の加法則

活荷重等による影響を応力領域で照査する場合に、複数の荷重作用が働くことを考慮する場合、例えば分布荷重と集中荷重の重ね合わせ或いは死荷重と活荷重の重ね合わせを考慮する場合には異なる確率分布を加算することが必要となる。

一般に、正規分布、ポアソン分布、二項分布等において再生性から平均と分散の単純な加法則が成立するとされている。ここではシミュレーションのような離散値における場合について述べる。

#### 【加法則】

「変数  $x$  と  $y$  があり、それぞれが  $[\mu_x, \sigma_x]$  および  $[\mu_y, \sigma_y]$  の平均と標準偏差を持つ場合、 $x + y$  は  $[\mu_x + \mu_y, \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}]$  の確率密度分布特性を持つ」

#### 【加法則の証明】

変数  $x$  と  $y$  が  $n$  個あるとすると

$$x \text{ の平均は } \mu_x = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$x$  の分散は

$$S_x = \frac{(x_1 - \mu_x)^2 + (x_2 - \mu_x)^2 + \dots + (x_n - \mu_x)^2}{n}$$

および

$$y \text{ の平均は } \mu_y = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

$y$  の分散は

$$S_y = \frac{(y_1 - \mu_y)^2 + (y_2 - \mu_y)^2 + \dots + (y_n - \mu_y)^2}{n}$$

であるから  $x + y$  の平均は

$$\frac{(x_1 + y_1) + (x_2 + y_2) + \dots + (x_n + y_n)}{n} = \mu_x + \mu_y$$

となることは容易に理解できる。

また分散の場合は

$S_{x+y} - S_{xy} = 0$  となることを証明すればよい

上式の左辺は  $k$  番目のサンプルにおいて

$$\frac{(x_k - \mu_x)^2}{n} + \frac{(y_k - \mu_y)^2}{n} - \frac{(x_k + y_k - \mu_x - \mu_y)^2}{n}$$

だから、これを  $n$  倍して開くと

$$-2x_k \cdot y_k + 2x_k \cdot \mu_y + 2y_k \cdot \mu_x - 2\mu_x \cdot \mu_y$$

となる。

これを  $n$  個サメイションして  $2n$  で割ると

$$= -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k \cdot y_k) + \mu_x \cdot \mu_y \quad \text{となる}$$

この第1項は各サンプルの積の平均であり、第2項は平均の積である。

演繹的には第1項と第2項の差はゼロにはならないが、十分に大きなサンプル数の場合には両者はほぼ等しくなり、差はゼロと見てよい。

(実際に乱数シミュレーションを行うと確認できる)

以上から、荷重作用の重ね合わせを乱数サンプルのような離散値においても平均値と分散の単純和を適用することの妥当性が理解されよう。

### 4. 非合成鋼 I 桁橋における試算例

#### 4.1 対象とする橋梁構造

具体的な適用事例を取り扱うために下記の諸元を持つ橋梁の鋼上部工を取り上げ、試算例を示す。

橋梁形式：単純非合成鋼 I 桁

幅員：10.5 (m)

支間長：30.0 ~ 60.0 (m)

主桁本数：5 (本)

使用鋼材：SM400A → 許容引張応力 = 140 (N/mm<sup>2</sup>)

問題を単純化し、荷重作用側の特性の変化による構造諸元への影響を調べるために主桁構造の断面変化に着目する。一般に主桁断面の構造寸法は「死荷重 + 活荷重」の荷重状態が主たる支配条件であり、上記の単純 I 桁構造は支間長の変化によって、この荷重条件の変化も比例的な変化となる。幅員は3車線を想定している。

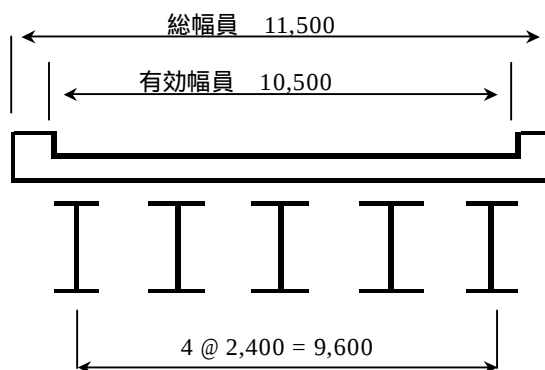


図-11 対象橋梁

現行の道路橋示方書に基づく場合に主桁の断面設計（曲げモーメント）に適用される主な荷重条件を表-7に示す。（鋼重等の仮定条件を含む）

| 表-7 主な荷重条件    |      | (単位：kN/m <sup>2</sup> ) |      |
|---------------|------|-------------------------|------|
| 死荷重           | 床版関係 | L=30                    | L=60 |
|               | 鋼重   | 7.7                     |      |
| 活荷重<br>(L 荷重) | p 1  | 1.8                     | 3.6  |
|               | p 2  | 10.0                    | 3.5  |

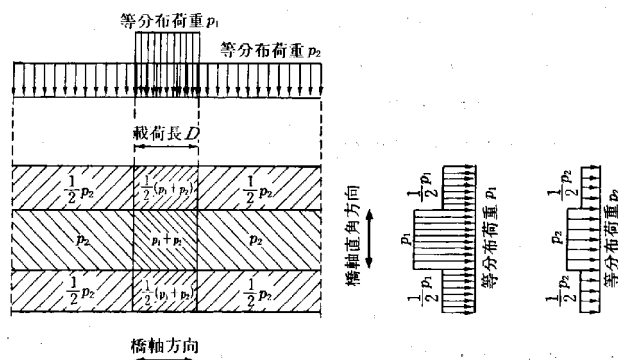


図-12 道路橋示方書の L 荷重

#### 4.2 許容応力法による設計

単純支持の主桁構造の断面設計は、支間中央の曲げモーメントによって定まり、規程により活荷重は上記のL 荷重が適用される。これにより計算される曲げモーメントならびに許容応力法に従って設計される主桁の断面諸元は表-8 のようになる。

表-8 許容応力法で設計された主桁断面

| 支間長 (m)                   | 30     | 40     | 50     | 60     |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 曲げモーメント (kN*m)            | 23,600 | 40,300 | 62,200 | 90,000 |
| 桁高(mm)                    | 1,960  | 2,640  | 3,540  | 4,260  |
| Web 厚(mm)                 | 10     | 10     | 12     | 14     |
| Flg 巾(mm)                 | 500    | 520    | 540    | 600    |
| Flg 厚(mm)                 | 30     | 36     | 36     | 36     |
| 発生応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 137    | 137    | 136    | 138    |
| 鋼重(ton)                   | 57.7   | 99.1   | 158.1  | 239.7  |

(鋼重 = 桁断面積 × 支間長 × 主桁本数 × 単位質量)

このように設計された鋼桁の断面応力について、その内訳として死荷重によるものと活荷重によるものを区分し、活荷重の占める割合を割り出すと表-9 のようになる。

表-9 許容応力法による主桁モーメントの内訳 (kN\*m)

| 支間長 (m) | 30      | 40      | 50      | 60      |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 死荷重     | 13,400  | 24,900  | 40,900  | 62,200  |
| 活荷重     | 10,200  | 15,400  | 21,300  | 27,900  |
| 合計      | 23,600  | 40,300  | 62,200  | 90,000  |
| (活荷重率)  | (0.432) | (0.382) | (0.342) | (0.310) |

この活荷重率は道路橋示方書に基づいた荷重によるものである。これがある確率分布要素からの期待値であるとした場合、例えば表-3 ならびに図-8 に記述した活荷重シミュレーションの交通流モデル C 程度に相当するとした場合。分布活荷重の確率分布の変動要素を交通流モデル C の変動係数と p1 荷重の影響を考慮して変動係数を一律に  $V=0.4$  としこれに支間長の変化による活荷重率を乗じて信頼性指標を逆算すると、表-10 ならびに図-13 のようになる。

表-10 逆算された信頼性指標 (β)

| 支間長 (m) | 30  | 40  | 50  | 60  |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 95%期待値  | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 |
| 90%期待値  | 6.0 | 6.2 | 6.3 | 6.5 |
| 80%期待値  | 5.5 | 5.7 | 5.9 | 6.1 |
| 70%期待値  | 5.0 | 5.3 | 5.5 | 5.7 |

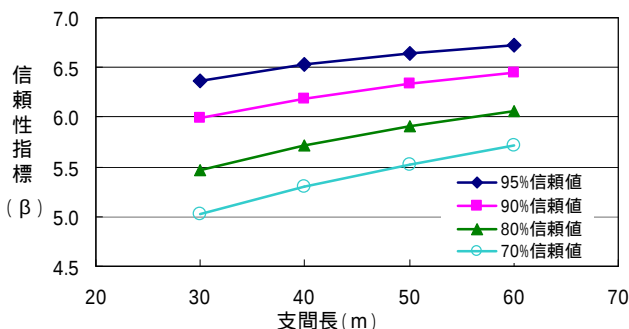


図-13 逆算された信頼性指標

支間長が大きくなるに従い活荷重応力の占める割合が小さくなり荷重作用の変動する程度が相対的に小さくなることで信頼性指標が増大する傾向が現れる。また活荷重の期待値パーセンテージをどのように考えるかによって信頼性指標の絶対値は相当に変動する。

この結果から、許容応力法で設計された支間長 30m の橋梁の信頼性評価は、例えば

交通流 C モデル 90% 期待値の公称活荷重に対する信頼性指標は 6.0 である

と表現されることになり、荷重期待値を他のパーセンテージに設定する場合はそれに相当する信頼性指標になる。

許容応力法における公称活荷重値の確率論的背景は明確ではないが、これらのいずれかであると仮定することによって、統一された理念にもとづいて信頼性指標を比較することが可能になる。

#### 4.3 信頼性指標にもとづく断面諸元の縮減

許容応力法による設計結果について活荷重のような変動的荷重を確率論による取扱いを加味して信頼性指標による評価ができることを前項に述べた。これを一歩進めて許容応力の代わりに信頼性指標の値を統一させることを規準として主桁断面を決定する場合を試みる。表-11 は、交通流 C モデルを想定して支間長 30m の場合と同水準の信頼性指標を保つように他の支間長の場合の断面諸元を修正して再計算したものである。

表-11 信頼性指標を基準とする場合の主桁断面

| 支間長 (m)                         | 30     | 40     | 50     | 60     |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 曲げモーメント (kN*m)                  | 23,600 | 40,300 | 62,200 | 90,000 |
| 桁高(mm)                          | 1,960  | 2,640  | 3,540  | 4,260  |
| Web 厚(mm)                       | 10     | 10     | 12     | 14     |
| Flg 巾(mm)                       | 500    | 505    | 510    | 560    |
| Flg 厚(mm)                       | 30     | 36     | 36     | 36     |
| 発生応力 (許容応力法 N/mm <sup>2</sup> ) | 137    | 141    | 142    | 144    |
| 信頼性指標 β                         | 6.0    | 6.0    | 6.0    | 6.0    |
| 鋼重(ton)                         | 57.7   | 97.4   | 153.8  | 233.0  |

(鋼重 = 桁断面積 × 支間長 × 主桁本数 × 単位質量)

支間長 60m のケースについて言えば、許容応力法設計では 3% 弱の応力超過にはなるが信頼性指標では支間長 30m と同じ耐活荷重性能を保持しており、また鋼重は約 6.8ton (約 3%) の低減となっている。

支間長 30m の設計ケースが絶対的な基準ではないがこれが社会的に受容されるならば、これと同じ信頼性指標をもつと証明される設計が同じように受容されるべきと考えられる。相対的な信頼性評価が同等であることを示す比較標準とするものである。

## 5. 要求性能の設定と信頼性指標に基づく照査

### 5.1 道路橋示方書の活荷重規程と信頼性理論への置換

道路橋示方書の活荷重規程について具体的な根拠は示されていないが、過去の制定経緯や理念上の考え方が背景として解説等に記述されており、これらを信頼性理論において取り扱う場合の考え方に置換える。(表-12)

表-12 道路橋示方書活荷重規程の背景

| 道示規定                | 背景                                                                                                                      |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 活荷重全般               | 床版上に載荷される様々な車種から構成される車群を想定して公称荷重値を設定する。<br>重量の大きな車種が集中する場合には、公称荷重値を上回る荷重が載荷することもあり得るが、許容応力と限界状態(降伏点等)との余裕によって賄われると想定する。 |
| p 1 荷重<br>(集中荷重)    | 影響線形状に尖点があるために集中荷重が部材力を増大させる効果を考慮し、集中荷重を分布荷重に重ねることとする。                                                                  |
| p 2 荷重の<br>載荷長による低減 | 載荷長が長くなると重量の小さな車両が混入する確率が大きくなることを考慮し、載荷長による低減を考慮する。                                                                     |
| p 2 荷重の<br>幅員方向の低減  | 載荷長による低減と同じ理由によって低減を考慮する。                                                                                               |

分布荷重の場合は載荷長の範囲内にある様々な車重の平均化された値になっているという認識なので、影響線載荷する場合には影響線の尖点の効果を低く見積もってしまう恐れがある。これを補うために、その尖点位置に重量車が一致する場合を考慮してそれを重ね合わせるようにしたものとする。(平成5年の改訂以前にはp 1 荷重は線荷重であった)

これらの想定から車種ごとの車重分布特性を使って道路橋示方書に規定されている公称荷重値との関連を考慮しつつ信頼性照査のための構成要素を導出する。

### 5.2 耐活荷重性能と信頼性照査

前述の鋼 I 桁橋梁の事例に対して、主桁断面の活荷重に対する信頼性照査の具体的な手順を以下に記す。

#### 1) 要求性能の定義と照査基準

要求性能のうち主桁断面の耐活荷重性能ならびにその照査基準を表-13 のように整理する。

表-13 要求性能と照査基準

|      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| 要求性能 | 通常の使用状態において構造材が弾性域にあり、材料特性に変化を生じないこと |
| 照査基準 | 降伏点に達する確率の信頼性指標 $\beta$ を許容応力法と同等とする |

#### 2) 荷重作用の確率分布特性の設定

荷重作用の確率分布特性と公称荷重との関係は(2)式を使って次のように関連付けられる。

$$\mu_s = \frac{S_d}{1 + k \cdot V_s} \quad \dots (6)$$

ここに  $\mu_s$  : 作用分布の中央値、  
 $S_d$  : 公称基準荷重値、  
 $k$  : シフト係数、 $V_s$  : 作用分布の変動係数

これを許容応力法で規定されている荷重条件に対応させながら、それぞれ具体的に設定する。

道路橋設計の主桁曲げモーメントには  $p1$ 、 $p2$  の 2 種類の分布荷重を適用する規定になっているので、これらを確率分布特性の形式で表現する。

$p1$  は影響線の縦距が大きい部分に載荷すべきもので元の形は線荷重であることから、その設定背景は集中荷重である。ここではこれを大型ダンプと想定して分布特性を当てはめる。

表-2 から、大型ダンプの車重分布平均値 = 19.62 (ton) であり、主載荷幅 5.5m を  $5.5/3.5=1.57$  台(車線)分とみなし載荷長 10.0m だから、 $p1$  の平均と分散に関する分布特性は、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{平均値: } \mu p1 = \frac{19.62}{5.5 \times 10.0} \times \frac{5.5}{3.5} \times 9.8 = 5.49 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \text{変動係数: } Vp1 = 9.54/19.62 = 0.486 \end{array} \right.$$

$p2$  荷重は表-3 のシミュレーション結果から誘導することとし、支間長 30m の場合の平均と変動係数を基準として次のように設定する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu p2 = \frac{0.841}{3.5} \times 9.8 = 2.35 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ Vp2 = 0.509 \cdot \sqrt{\frac{30}{L}} \end{array} \right.$$

変動係数は式(3)と同様に載荷長の平方根に反比例するものとしている。

これらの平均荷重を用いてそれぞれによる発生応力が次のように計算される、

[  $p1$  による発生応力 ]

$$f\mu p1 = \frac{M\mu p1}{Z_g} \quad (M\mu p1 = \mu p1 \cdot I_{p1}) \quad \dots (7)$$

$f\mu p1$  :  $p1$  の平均荷重  $\mu p1$  による主桁維応力  
 $M\mu p1$  :  $\mu p1$  による主桁曲げモーメント  
 $Z_g$  : 主桁の曲げに対する断面係数  
 $I_{p1}$  :  $p1$  に対応する主桁曲げモーメント影響面体積

[  $p2$  による発生応力 ]

$$f\mu p2 = \frac{M\mu p2}{Z_g} \quad (M\mu p2 = \mu p2 \cdot I_{p2}) \quad \dots (8)$$

$f\mu p2$  :  $p2$  の平均荷重  $\mu p2$  による主桁維応力  
 $M\mu p2$  :  $\mu p2$  による主桁曲げモーメント  
 $I_{p2}$  :  $p2$  に対応する主桁曲げモーメント影響面体積

(応力の表示はここでは  $f$  を用いる、標準偏差に使用される  $\sigma$  と紛らわしいので)

### 3) 降伏点の確率分布特性

許容応力設計における許容応力は SM400 の場合、降伏点の 1/1.7 を基準に設定されたとされており、公称降伏点は JIS 規格値である。

鋼材の JIS 規格値はいわば保証すべき下限値のように言われることもあるが、製品として供給されている鋼材が実際に持っている降伏点のバラツキ特性を反映して強度側の確率分布を想定することができる。

図-14、表-14 は文献 2) に報告されているミルシートにもとづく実測降伏点の平均値と標準偏差から正規分布型に図化したものである。

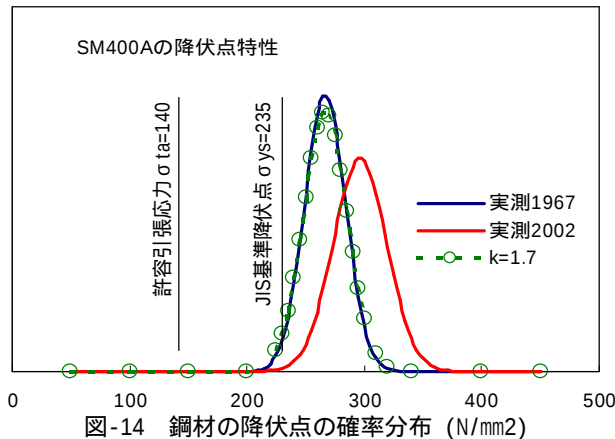


表-14 SM400A の実測降伏点の分布特性 (単位: N/mm²)

|         | 平均値   | 標準偏差  | 変動係数  |
|---------|-------|-------|-------|
| 1967 調査 | 266.6 | 17.54 | 0.066 |
| 2002 調査 | 296.3 | 22.77 | 0.077 |

確率分布の特性値と公称基準値との関連はシフト係数と変動係数を用いて下式のように表される。

$$f\mu_y = \frac{\sigma_{ys}}{1 - k \cdot V_{Ry}} \quad \dots (9)$$

ここに  $\left\{ \begin{array}{l} f\mu_y : \text{降伏点確率分布の平均値、} \\ \sigma_{ys} : \text{JIS 基準降伏点、} \\ V_{Ry} : \text{降伏点の変動係数 (標準偏差/平均)} \end{array} \right. k : \text{シフト係数、}$

図-14 の  $k=1.7$  のマーク付の点線はシフト係数を 1.7、変動係数を 7% として [実測 1967] にフィッティングさせた場合の確率密度分布である。1967 年の調査結果をベースに信頼性照査を行う場合には、シフト係数  $k=1.7$  を用いることが可能なことを示したものである。

### 4) 信頼性指標の算定

主桁の耐活荷重性能を評価するために、前記の確率分布特性を用いて降伏点到達確率に関する 2 次モーメント法による信頼性指標を次のように計算する。

$$\beta = \frac{f\mu_y - (f\mu_d + f\mu_{p1} + f\mu_{p2})}{\sqrt{(f\mu_y \cdot V_{Ry})^2 + (f\mu_d \cdot V_d)^2 + (f\mu_{p1} \cdot V_{p1})^2 + (f\mu_{p2} \cdot V_{p2})^2}} \quad \dots (10)$$

ここに、 $\left\{ \begin{array}{l} f\mu_d : \text{死荷重による主桁縦応力の平均値} \\ V_d : \text{同上の変動係数} \end{array} \right. \text{ (他は(7),(8),(9)式と同)}$

3.4 項に述べた加法則を適用して主桁に作用する死荷重と活荷重の平均応力と分散を加算して信頼性指標を計算するものである。各応力の標準偏差は各荷重の変動係数に線形に推移するものとした。式(1)では死荷重の変動係数をゼロとして提示したが、死荷重と活荷重を同種の変動要素と見る場合には単純な加法則が適用できるものとしたのが式(10)である。

死荷重は ISO2394<sup>5)</sup> の「永続作用」に分類されるであろうが、実務的には何らかの変動要因を含む場合も考えられる。例えば死荷重値の算出根拠となる材料密度の変動や、橋梁に将来何らかの添架物があると想定する余裕荷重等の扱いを変動要因として考慮する場合等である。

降伏点到達確率の値を知りたい場合は、正規分布を前提とする破壊確率  $P_f$  と  $\beta$  との関係、(11)式を用いて計算することができる。<sup>6),7)</sup>

$$P_f(\beta) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \dots (11)$$

数値としては表-15 のようになる。

表-15 信頼性指標と確率の関係

| $\beta$ | 3.0                  | 4.0                  | 5.0                  | 6.0                   |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| $P_f$   | $1.4 \times 10^{-3}$ | $3.2 \times 10^{-5}$ | $2.9 \times 10^{-7}$ | $9.9 \times 10^{-10}$ |

確率の数値は  $10^{-6}$  以下のオーダーの小さなものになり、オーダーレベルの判定と見るべきであろう。

表-8 に記した許容力法によって設計された断面諸元の橋梁に対して、5.1 以降に記述した荷重作用の確率分布を適用し式(8)を用いて計算した信頼性指標  $\beta$  を表-16 に示す。荷重作用は死荷重の変動係数をゼロとし、活荷重は交通流 C モデル、衝撃係数は道路橋示方書の規程を準用した。

表-16 確率平均応力と信頼性指標(1) (単位: N/mm²)

| 支間長 ( m )       |           | 30    | 40    | 50    | 60    |
|-----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 死荷重             | $f\mu d$  | 78.1  | 84.9  | 89.7  | 95.2  |
| 活荷重<br>p1       | $f\mu p1$ | 22.0  | 17.6  | 14.3  | 12.0  |
|                 | $Vp1$     | 0.486 | 0.486 | 0.486 | 0.486 |
| 活荷重<br>p2       | $f\mu p2$ | 16.9  | 17.4  | 17.5  | 17.5  |
|                 | $Vp2$     | 0.509 | 0.441 | 0.394 | 0.360 |
| 降伏点<br>(SM400A) | $f\mu y$  | 267   |       |       |       |
|                 | $V_{Ry}$  | 0.07  |       |       |       |
| 信頼性指標 $\beta$   |           | 6.4   | 6.7   | 6.9   | 6.9   |

表-16 の信頼性指標の値は支間長の増大と共に増大する傾向にある。これは曲げモーメントに占める活荷重の割合が相対的に減ることによるもので、許容応力法による設計断面では前項の表-10 に示したと同じ要因でこのような傾向となる。

支間長 30m の場合の各荷重作用別の応力と降伏点の確率密度分布の相対的位置関係を図示すると図-15 のようになる。分布形態はいずれも正規分布である。

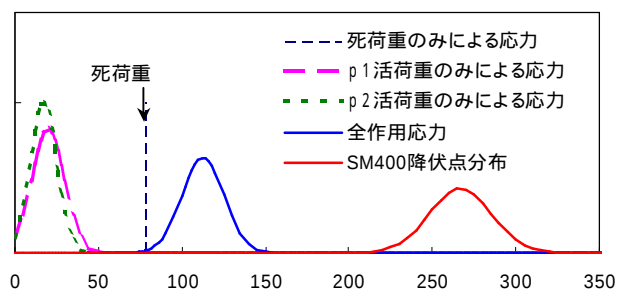


図-15 支間長 30mの場合の各確率密度分布 (N/mm<sup>2</sup>)

これに対して信頼性理論を基本とし「信頼性指標 6.0 以上を確保する」ことを設計基準とする場合を想定すると、主桁の断面諸元は若干の縮減となり、発生応力等の計算結果は表-17 のようになる。

表-17 確率平均応力と信頼性指標(2) (単位: N/mm<sup>2</sup>)

| 支間長 (m)         |              | 30    | 40    | 50    | 60    |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 死荷重             | $f_{\mu d}$  | 81.5  | 91.8  | 98.9  | 104.2 |
| 活荷重<br>p1       | $f_{\mu p1}$ | 22.9  | 19.0  | 15.8  | 13.2  |
|                 | $V_{p1}$     | 0.486 | 0.486 | 0.486 | 0.486 |
| 活荷重<br>p2       | $f_{\mu p2}$ | 17.6  | 18.9  | 19.3  | 19.1  |
|                 | $V_{p2}$     | 0.509 | 0.441 | 0.394 | 0.360 |
| 降伏点<br>(SM400A) | $f_{ly}$     | 267   |       |       |       |
|                 | $V_{Ry}$     | 0.07  |       |       |       |
| 信頼性指標 $\beta$   |              | 6.1   | 6.1   | 6.2   | 6.2   |
| 桁高 (mm)         |              | 1,960 | 2,630 | 3,540 | 4,260 |
| Web 厚 (mm)      |              | 10    | 10    | 12    | 14    |
| Flg 巾 (mm)      |              | 460   | 500   | 500   | 540   |
| Flg 厚 (mm)      |              | 31    | 34    | 34    | 35    |
| 鋼重 (Ton)        |              | 56.0  | 93.7  | 148.5 | 227.0 |

この結果では支間長 30mのケースを含めてすべてのケースの信頼性指標を 6.0 程度に抑制したことによって表-16 に比較して 3%程度の鋼重低減となっている。

これらの計算結果を許容応力法の場合を含めて比較すると、各ケースの活荷重条件と断面決定の基準は表-18 のようになっており、与条件の違いが信頼性指標と主桁断面諸元の違いとなって現れている。

表-18 各検討ケースの荷重条件等

|              | 活荷重の考え方                                | 断面決定                |
|--------------|----------------------------------------|---------------------|
| 表-10<br>のケース | 道路橋示方書の活荷重による発生応力は変動係数 40% の 90%期待値と想定 | 許容応力法               |
| 表-11<br>のケース | 同上                                     | $\beta$ を L=30m に統一 |
| 表-16<br>のケース | モンテカルロ・シミュレーションによる確率密度分布を適用            | 表-10 と同じ断面          |
| 表-17<br>のケース | 同上                                     | $\beta$ 6.0         |

これらの与条件ならびに断面決定は道路橋示方書の規程を大きく逸脱しないように設定されているものであり画期的な変化ではない。信頼性指標を決定基準とすることで支間長が長くなると若干の断面縮減を可能とすることは死荷重と活荷重の確率分布の傾向を考慮すれば一般的にも理解されやすいと思われる。

重要な点は与条件に対して過不足のない耐荷力が確保されていることであり、これを客観的かつ定量的に証明することである。

## 6. まとめと課題

鋼 1 桁橋の主桁断面の耐活荷重性能に着目してその性能照査を信頼性理論に沿って行う手法を述べた。主桁断面の設計においては支配的荷重条件が死荷重+活荷重であり、活荷重が持つ変動作用としての特性に着目して整理した。鋼材の降伏点ならびに荷重作用の確率分布特性を設定して信頼性指標の算出を行い、耐活荷重性能を信頼性指標に基づいて評価することを提言したものである。

作用と強度の確率分布から作用が強度を上回る限界状態となる確率を基本として指標化する手法である。信頼性指標だけでなく確率そのものを知りたい場合には変換式を用いて算定することもできる。

荷重係数法は限界状態に達する荷重の大きさと公称荷重の大きさを比較する形態であり、限界状態としてどのような破壊モードを想定するかや、また公称荷重値を確率論で定義する場合の問題が関係してくる。

例えば不静定構造の場合には部材の一部が降伏点を越えて塑性化し、さらに塑性化が他の部位に進展して荷重の増大に耐えられなくなって破壊する終局状態を見出すことが条件であり、不静定構造が静定構造よりも終局耐荷力が高い事などを適切に反映すべきものである。またこの極限の荷重状態が公称荷重の構成要素がどのように増加して行ったものかを各構成要素の確率特性を考慮しておかなければならない。

荷重係数法のこのような特徴は許容応力法とは力学的に線形関係にはなく構造物の弾塑性状態の推移を見極めることを重視するものである。これが許容応力設計法との関連付けを一对一に整理しにくい要因となっている。

本稿で許容応力設計との対比によって性能照査を行うおうとする主旨は性能設計の実務的な適用を推進することを狙いとして、許容応力法の背景や既存構造との連続性を考慮しつつ以下のような論点を基本において検討を進めたものである。

仕様設計において公称荷重や許容応力等が定められた背景は信頼性理論の理念と相反するものではないはずである。信頼性理論が仕様設計を超越する普遍性を持つならば、仕様設計の背景にある経験的判断を説明できるはずである。性能設計の結果は安全性、経済性について定量的に評価される必要があり、比較標準が必要である。現状では材料強度や荷重作用の確率分布特性に関する情報は十分とは言えないが、仕様設計の許容応力度法との相対的位置関係を経験的合理性にもとづいて想定することは可能である。

道路橋示方書(H14)では性能照査が原則であることを総論に規定し、それと併せて仕様型の許容応力法設計でも性能照査の一と見做すという考え方となっている。

一方 ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」があり、国際標準として汎用性のある基本理念が示されている。これが構造物の信頼性を論ずる場合の国際的規範と見るべきものであり、この標準との関連を考慮しておく必要もある。しかしこの標準は国際的汎用性を旨として整理されているので、計算理論や実験による検証法の基本が示されていて我国の許容応力法設計基準との関連性やそれとのキャリブレーションの具体的手段を検討するには実務的に見て不便であり理解が進まない恐れもある。

本稿では、許容応力法に習熟した技術者への参考となるよう、簡潔で骨太な骨格が理解されることを狙いとして整理したものであり、その意味ではいくつかの点で「割切っ

た」設定もあり議論を深めるべき点も含んでいる。

今回の整理の中で今後議論を深めるべき課題と思われる点を以下に挙げる。

### 1) $p_1$ と $p_2$ の重ね合わせ

作用応力の計算に用いる荷重として道路橋示方書に規定されている  $p_1$  と  $p_2$  の重ね合わせをそのまま適用することとした。しかしながら同一箇所に車重が重複しているのは、活荷重シミュレーションが実際の載荷状態を再現することを目的としている点から言えば疑問が残る。

$p_1$  と  $p_2$  の重ね合わせは分布荷重が必ずしも等分布でないことと影響線の傾斜による効果を配慮していることが背景にあり、過去には線荷重と分布荷重の重ね合わせであった荷重規定との連続性を保っている。現行の設計が持っている安全性をそのまま踏襲することが社会的にも受容されやすいと考えられ、シミュレーションから等分布荷重値を求めるのは現行の荷重規程との比較を解り易い形で示す意味もある。

しかしながら性能設計の狙いである新しい考え方の導入によるコスト縮減という観点からみればやや保守的とも言えよう。影響線と等分布荷重の積から作用応力を計算すること自体が便法であり、荷重の期待値を求めるよりも様々な車重の組合せが発生させる応力の離散値を直接求める等の手法も考えられる。

### 2) 交通流モデルによる荷重区分

活荷重の確率特性を求めるに当たって交通流モデルを想定することは実務的な手法であり、本稿では交通流モデルの設定事例<sup>3)</sup>から中間的なものを想定して分布荷重の確率密度を推定した。この 90%期待値と道路橋示方書に規定されている分布荷重の支間長変化がほぼ整合することからも不自然ではないと考えられるからである。

現行の許容応力設計との相対的な比較による指標として扱う場合には交通流モデルは比較のための媒介であり、どのモデルを適用しても結果としては大差のないものになるという面で不安のないものである。さらに現行の道路橋示方書が具体的な交通流モデルを想定して導出されたと定義されている訳ではないので、いわば後付け整理のようにも見える。

しかし交通流モデルを設定して構造設計を行うことは、その橋梁のライフサイクルにおける機能として耐活荷重性能を検討するものであり、その要求性能は社会的要求の一つとして重視すべきものである。つまり許容応力法との比較のための媒介ではなくそれ自体設計条件となるべきものである。このような点では公的な基準が整備されていることが望ましい。

性能設計では細かな照査法を規定しないことがその精神であるとしても、個々のケースにおいて検討されるべき事項とそれを支持する基盤のような共通認識となる公的基準があってより万全なものになると思われる。

### 3) 構造細目

橋梁の基本的骨格は主桁構造でありその断面諸元を支配する要素が全体曲げモーメントであることに着目して本稿は整理を進めた。構造細目の照査を行う場合においても同じ信頼性理論の考え方にもとづいて現行の許容応力設計との関係を整理することが可能と思われる。床版や縦桁等、構造部位によっては分布荷重ではなく輪重が支配要因になる場合があり、その場合は個々の車重の分布特性に着目する必要がある。

橋梁が実際に保持している耐力は実物の断面諸元や材料強度によって定まり、設計計算の理論はどうあれ同じ

条件下で供用される橋梁の安全度は、これら実物の諸元が支配する。高度な理論を適用しなくても断面諸元を強化すれば橋梁の耐力や安全度を向上させることが可能ではある。しかしそこに過不足があってはならない。

橋梁が保持する安全度が適切か否かは、与条件に対して過不足のない耐力が確保されていることが重要であり、与条件の設定自体が適切か否かによって左右される場合も考えられる。時代の推移によって交通条件が変化する場合など、社会的な環境の変化に柔軟に対応することも技術進歩の一であろう。実際に供用されている橋梁に作用する負荷を極力正確に把握することがこれらの課題に答えることになるのではないかと。

今後のより精緻な議論への展開を望むものである。

### 【参考文献】

- 1) 道路橋示方書・同解説(平成14年3月)日本道路協会
- 2) 南邦明、三木千壽：橋梁で使用する鋼材の機械的性質の現状、鋼構造論文集 Vol.11, No.42, 2004.6
- 3) 道路橋の疲労設計指針(平成14年3月)日本道路協会
- 4) 性能設計体系における合意形成・評価手法に関する研究小委員会報告(Dec. 2003 土木学会)
- 5) ISO2394 構造物の信頼性に関する一般原則(1998.6)
- 6) ルジャニーツィン(高岡宣善訳)：構造物の信頼性解析、丸善, 1980.12.20
- 7) 尾坂芳夫、高岡宣善、星谷勝：土木構造設計法、技報堂出版, 1981.6.15
- 8) 吉田修：シミュレーションによる活荷重確率分布に関する検討(第58回土木学会年次講演会 2003.9)
- 9) 吉田修：相対的要求性能設定による性能設計の考察(第60回土木学会年次講演会 2005.9)