

9.1 鋼道路橋の部分係数設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 17～平 20

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁）

研究担当者：村越潤、梁取直樹

【要旨】

道路橋示方書については、技術基準の国際的整合への対応を図り、品質を確保しつつより合理的かつ効率的な道路橋整備を可能とするため、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作業が進められている。道路橋ではこれまで許容応力度設計法が用いられてきたが、要求性能を合理的に検証する手段として、次期改訂では信頼性設計の考え方を基礎とする国際的な技術基準の書式としての部分係数設計法の導入が検討されている。

本研究では、鋼道路橋上部構造を対象として、部分係数設計法導入に向けて、設計体系の構築、必要となる部分係数（材料係数、部材係数等）の設定方法及び具体的数値の検討を行い、部分係数法に基づく設計法の提案を行う。

キーワード：部分係数設計法、鋼桁橋、信頼性解析、信頼性指標、部分係数

1. はじめに

土木・建築分野の各種構造物の設計に係わる技術標準については、「土木・建築にかかる設計の基本」（国土交通省、2002 年）の考え方に沿って、検討・改訂を進めていくこととされており、この中で要求性能の検証方法として信頼性設計の考え方を基礎とする限界状態設計法の導入が求められている。現在、道路橋に関する技術基準である道路橋示方書¹⁾（以下、「道示」という）については、技術基準の国際的整合への対応を図るとともに、品質を確保しつつより合理的かつ効率的な道路橋整備を可能とするため、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ており、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。

本研究は、鋼道路橋上部構造を対象として、信頼性の考え方を取り入れた設計体系の構築、必要となる抵抗側部分係数の設定方法、及び具体的数値の検討を行い、部分係数法書式に基づく照査法の提案を目的とする。

平成 19 年度は、支間長の大きな鋼床版連続 1 箱桁橋および連続合成 2 主 I 桁橋を対象に、前年度²⁾³⁾⁴⁾に引き続き道示Ⅱ鋼橋編の座屈関連抵抗強度照査式における統計データの把握及び性能関数の設定を行った。また、それらを用いた試設計により信頼性指標を算出し、目標信頼性指標 β_T を仮定した場合の部分係数の試算を行った。最後に、部分係数設計法による試設計を行い許容応力度設計法との断面諸元の違いについて比較検討を行った。

2. 部分係数設計法への書式変換に関する検討

2. 1 検討内容

現行道示Ⅱ鋼橋編に基づく照査項目別の強度照査書式および性能関数 Z を設定するとともに、部分係数設定方法の手順について整理した。

2. 2 強度照査書式

基本とする強度照査書式をもとに、部分係数設計法への書式変換を行った。ここでは、基本強度照査式と、鋼桁の作用曲げモーメントに対して、曲げ引張降伏強度照査式と曲げ圧縮降伏強度照査式を例として示す。

(1) 基本強度照査式

$$\gamma_D D_k + \gamma_L L_k \leq \frac{\phi_R R_k}{\gamma_a}$$

ここに、

γ_D : 死荷重係数、 γ_L : 活荷重係数

ϕ_R : 抵抗係数、 γ_a : 全体調整係数

D_k : 死荷重による断面力もしくは応力の特性値

L_k : 活荷重による断面力もしくは応力の特性値

R_k : 抵抗を断面力もしくは応力で表現した特性値

(2) 曲げ引張降伏強度照査式

$$\gamma_D M_{Dk} + \gamma_L M_{Lk} \leq \frac{\phi_R M_{Rtk}}{\gamma_a}$$

$$\gamma_D M_{Dk} + \gamma_L M_{Lk} \leq \frac{\phi_R \left(\frac{\min(1.1 A_{net-k}, A_{gross-k})}{A_{gross-k}} \sigma_{yk} \frac{I_k}{y_{tk}} \right)}{\gamma_a}$$

ここに、

M_{Dk} : 死荷重による曲げモーメントの特性値

M_{Lk} : 活荷重による曲げモーメントの特性値

M_{Rtk} : 抵抗の引張降伏モーメントの特性値

ϕ_R : 曲げ引張強度に関する抵抗係数

σ_{yk} : 鋼材の降伏強度の特性値

$A_{gross-k}$: 引張フランジ公称総断面積

A_{net-k} : 引張フランジ公称純断面積

I_k : 鋼部材の公称断面 2 次モーメント

y_{ik} : 中立軸から部材引張縁までの公称距離

(3) 曲げ圧縮降伏強度照査式

$$\gamma_D M_{Dk} + \gamma_L M_{Lk} \leq \frac{\phi_R M_{Rck}}{\gamma_a}$$

$$\gamma_D M_{Dk} + \gamma_L M_{Lk} \leq \frac{\phi_R \left(\frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{yk}} \sigma_{yk} \frac{I_k}{y_{ck}} \right)}{\gamma_a}$$

ここに、

M_{Rck} : 抵抗の圧縮降伏モーメントの特性値

ϕ_R : 曲げ圧縮降伏強度に関する抵抗係数

y_{ck} : 中立軸から部材圧縮縁までの公称距離

$\frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{yk}} = 1.0$: 圧縮座屈強度ではなく圧縮降伏強度で圧縮抵抗強度が決定する場合 1.0

2. 3 性能関数

以下に鋼桁フランジ垂直引張強度および垂直圧縮強度の照査に対する性能関数 Z の例を示す。確率変数とした諸元に【変数】と示す。

(1) 鋼桁曲げモーメントによるフランジ垂直引張強度

$$Z = \sigma_y \cdot \frac{I}{y_t} \min \left(\frac{A_{f \lg - net} \times 1.1}{A_{f \lg - gross}}, 1 \right) - (M_D + M_L)$$

(2) 鋼桁曲げモーメントによるフランジ垂直圧縮強度

$$Z = \sigma_y \cdot \frac{I}{y_c} - (M_D + M_L)$$

ここに、

σ_y : 鋼材降伏強度【変数】

M_D : 死荷重による曲げモーメント【変数】

M_L : 活荷重による曲げモーメント【変数】

I : 鋼部材の断面二次モーメント

y_t, y_c : 中立軸から部材引張縁及び部材圧縮縁までの距離

2. 4 部分係数設定手順

強度関連規定における部分係数設定に向けた検討フローを図-1 に示す。過年度の抵抗強度等の統計データの収集状況（データ数、信頼性）⁵⁾ や実務設計への反映を踏まえて、下記制約条件を考慮して方法 1 から方法 3 に区

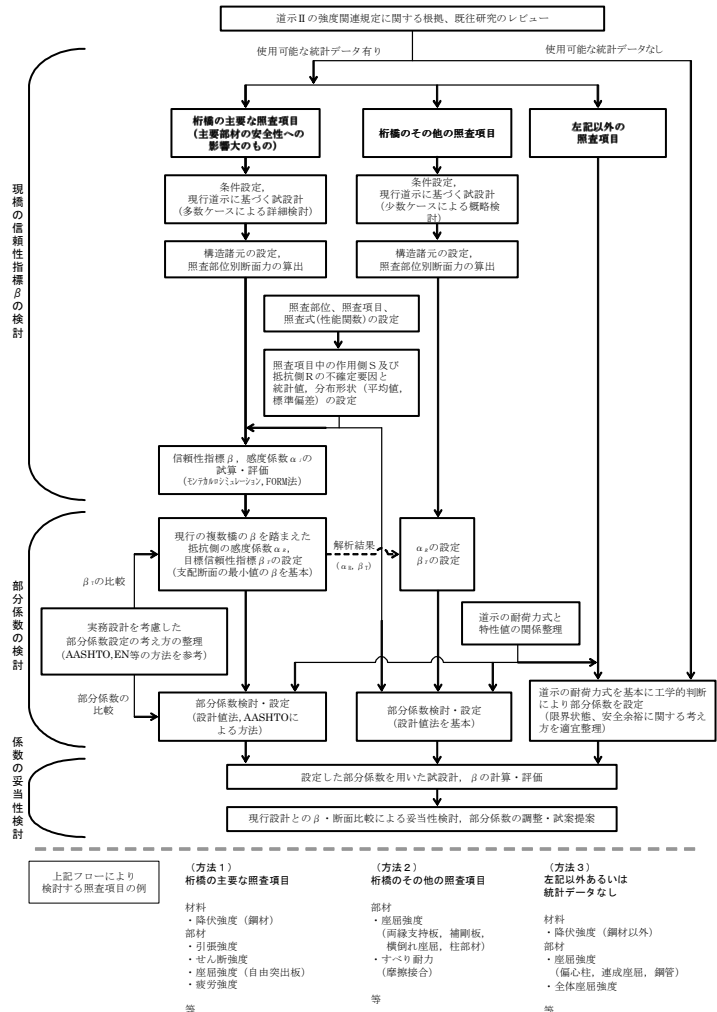


図-1 強度関連規定における部分係数設定に向けた検討フロー

分した。

・大部分の強度照査式において、強度統計データがない場合が多い。

・強度統計データがある場合でも使用にあたって、データの信頼性の精査が必要な場合が多い。

・実験値と強度照査式との乖離が大きく、部分係数設定にあたって強度照査式の見直しを前提に考えなければならない場合がある。

以下では、方法 1 に従って、鋼桁橋の主要な照査項目について、抵抗側の部分係数（以下、「抵抗係数」という）の試算を行った結果を示す。

3. 試験設計による現橋の信頼性指標 β の検討

3. 1 検討内容

道示に従って設計された鋼桁橋の主桁を対象として、各照査項目・部位に対する信頼性指標 β の試算を行った。照査項目は、曲げに対するフランジの降伏・座屈（自由突出板、補剛板）、桁の横倒れ座屈とし、照査部位は、設計で断面が決定する部位（支間中央部、断面変化部及び

支点の各断面)とした。

3.2 信頼性指標 β の解析方法

信頼性指標 β の解析法としては、各種の方法があるが、本検討では、FORM法を適用した。

FORM法は、非正規確率変数を破壊点で確率密度及び確率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、信頼性指標 β を算出する方法である。本検討では性能関数の確率変数をすべて正規分布と仮定しているため、AFOSM法(確率変数を標準正規座標系に換算し、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 β を定義)と結果的に同じ解が得られることになる。

FORM法では、信頼性指標 β とともに感度係数が得られる。感度係数は、後述の設計値法により、部分係数を算出する際に必要となるものである。感度係数 α_i^* 及び信頼性指標 β の算出式を示す。また、図-2に各確率変数と性能関数の関係及びFORM法による信頼性指標 β の算定イメージを示す。

$$\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right)_*}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right)_*^2}} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

(ここで $\sum_i \alpha_i^* = 1$)

$$\mu_z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right)_* (\mu_{x_i} - x_i^*)$$

$$\sigma_z = \sum_i \alpha_i^* \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)_* \sigma_{x_i}$$

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$$

ここで、

α_i^* : 感度係数

g : 性能関数 $z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$

x_i^* : 破壊点

μ_z : 性能関数 z の平均値

σ_z : 性能関数 z の標準偏差

β : 信頼性指標

μ_{x_i} : x_i の平均値

σ_{x_i} : x_i の標準偏差

$*$: 破壊点を示す

3.3 対象橋梁

表-1に検討対象とした橋梁ケース、図-3に検討対象橋梁断面図を示す。単純非合成

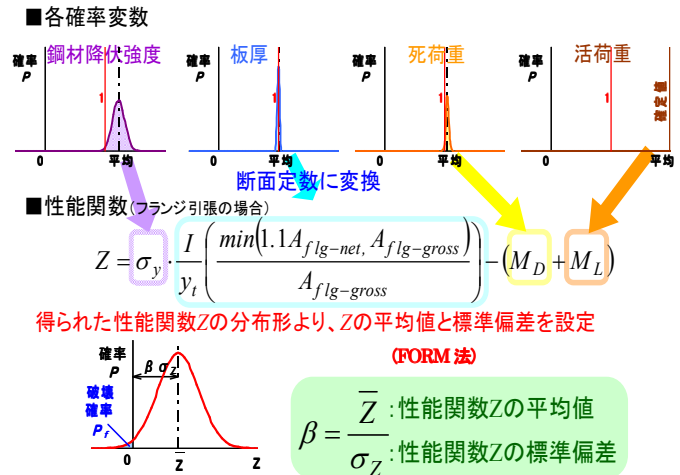


図-2 FORM法による信頼性指標 β の解析方法

桁では、支間長40mのケース(S-NN-40)を基本に、死活荷重比率の影響を把握するために支間長を、非合成I桁の適用範囲である20~55mの範囲で設定した。線形条件は直橋(斜角90度)とした。

3.4 統計データの整理と特性値の設定

信頼性指標 β 算定に使用する不確定要因別確率変数の基準値、平均値(既存文献から引用した実験データから求められた平均値)、標準偏差、変動係数について、抵抗側・荷重側に分けて、統計値とパラメータを表-2に示す。表中の標準偏差と変動係数は、各不確定要因に関する基準値で除すことで無次元量として表している。

鋼上部構造において支配的な荷重である活荷重(L荷重)の統計値及び荷重係数については、単純桁の曲げモーメントを対象に、100年間での非超過確率95%の荷重強度を概略推定し、その値を参考にパラメータとして設定する。なお、本文では現行B活荷重に対して平均値1.6の確定値とした場合について示す。

抵抗側については、前年度までに検討した自由突出板に加えて、新たに両縁支持板、補剛板、横倒れ座屈強度等の座屈強度の統計データの分析を行い⁷⁾、道示基準耐荷力曲線と、統計データとの関係を把握した。一部座屈パラメータに対して、基準耐荷力曲線と実験データとの

表-1 検討対象橋梁ケース(検討対象橋梁の支間長、橋梁形式)

構造諸元	単純I桁	連続I桁	単純箱桁	単純鋼床版箱桁	連続鋼床版箱桁
床版と主桁の合成作用の取扱い	主桁断面決定の考え方 主桁応力度算定の考え方	非合成 合成 ^(注1)	非合成 合成	非合成 合成	非合成 合成
支間長	20m 30m 40m 50m 55m 100m 200m	S-NN-20 S-NN-30 S-NN-40 S-NN-50 S-NN-55 C-NN-40 C-NN-50 C-NN-100 C-NN-200	S-CC-40 S-CC-50 S-CC-100 C-CC-40 C-CC-50 C-CC-100 C-CC-200	SB-NN-50 SB-NN-100 SB-NN-200	SB-CC-50 SB-CC-100 SB-CC-200

.....: 前年度検討内容より荷重係数を変更し、長支間橋梁ケースと比較検討を行うケース
: 前年度検討ケース

乖離が見られたことから、無次元統計データ（平均値、標準偏差）が座屈パラメータによらずにほぼ一定値をとるように β 算定上の座屈強度の基準値（実験データの下限值相当（実験データの平均値 $-2 \times$ 標準偏差））を設定した。表-3 に道示の基準耐荷力曲線、強度統計データ及び基準値の関係を示す。

3. 5 解析結果

図-4 に、対象とした全ての鋼桁橋における、外桁、内桁の断面決定部位（公称抵抗曲げモーメントに対して公

称曲げモーメントの余裕が小さな部位）の全箇所を対象として、信頼性指標 β と死活荷重断面力比率 $(M_D)/(M_D+M_L)$ の関係を示す。死活荷重断面力比率に対する β の傾向は、照査項目により異なるものの、概ね死活荷重比率の増加に応じて増加する傾向がみられる。補剛板の座屈強度を除けば、 β の下限値は4.5～5.5程度となっている。死活荷重断面力比率が0.55以下の範囲では、 β の下限値は4.5と一定値をとる傾向が見られるが、桁断面が強度照査ではなくたわみ制限規定により決まっていることによる。以上のように、200m までの適用支間

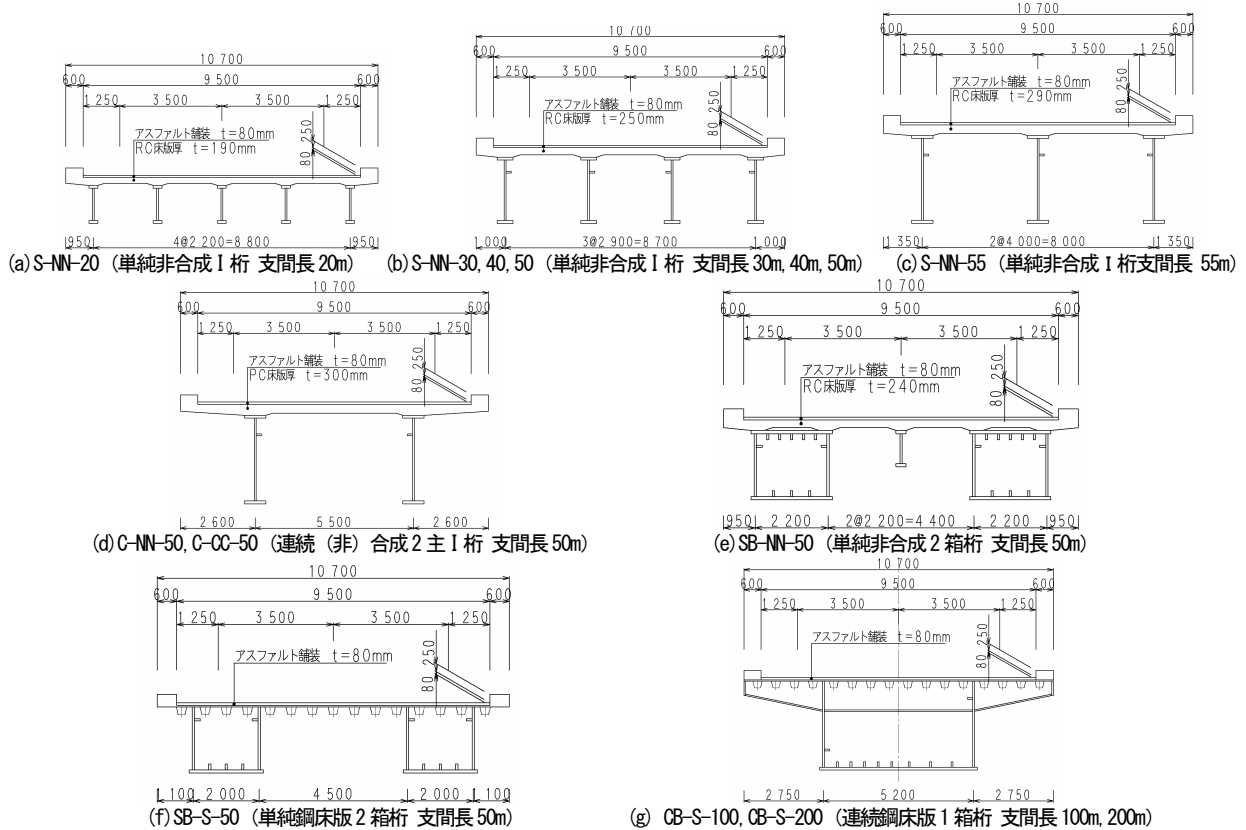


図-3 対象橋梁断面図

表-2 信頼性指標 β 算定上の統計値とパラメータ

	不確定要因	基準値	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 (参考文献等)
抵抗側	鋼材降伏強度	保証降伏点（JISおよび道示）	1.23	0.10	0.08	正規分布	下限値有
	自由突出板の圧縮座屈強度	$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0$ ($R \leq 0.7$)	1.00	0.00	0.00	確定値	R: 座屈パラメータ
	同縁支持板の圧縮座屈強度	$\sigma_{cr}/\sigma_y = (0.7/R)^{0.64}$ ($0.7 < R$)	1.13	0.06	0.05	正規分布	
	補剛板の圧縮座屈強度	$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0$ ($R \leq 0.5$)	1.00	0.00	0.00	確定値	
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = (0.5/R)^{0.88}$ ($0.5 < R$)	1.24	0.15	0.12	正規分布	R: 座屈パラメータ
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0$ ($R \leq 0.2$)	1.00	0.00	0.00	確定値	R: 座屈パラメータ
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.1125 - 0.5625R$ ($0.2 < R \leq 1.0$)	1.26	0.14	0.11	正規分布	
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 0.55/R$ ($1.0 < R$)	1.00	0.00	0.00	確定値	
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0$ ($\lambda \leq 0.2$)	1.00	0.00	0.00	確定値	λ : 座屈パラメータ
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.109 - 0.545\lambda$ ($0.2 < \lambda \leq 1.0$)	1.27	0.17	0.13	正規分布	
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0/(0.773 + \lambda^2)$ ($1.0 < \lambda$)	1.00	0.00	0.00	確定値	
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0$ ($\alpha \leq 0.2$)	1.00	0.00	0.00	確定値	α : 座屈パラメータ
		$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2)$ ($0.2 < \alpha$)	1.30	0.17	0.13	正規分布	
			1.00	0.00	0.00	確定値	
荷重側	鋼材板厚	板厚公称値	1.002	0.012	0.012	正規分布	確定値として扱う
	鋼材板取	板幅公称値	1.00	0.00	0.00	確定値	
	弾性係数	200000N/mm ²	0.999	0.045	0.045	正規分布	
	ポアソン比	0.30	0.937	0.085	0.091	正規分布	
	活荷重 (L 荷重)	B 活荷重	1.20	0.00	0.00	確定値	パラメータとする
			1.40	0.00	0.00	確定値	
			1.60	0.00	0.00	確定値	
			1.40	0.10	0.07	正規分布	
	鋼重	公称体積 $\times$ 公称単位重量	1.002	0.012	0.012	正規分布	
	コンクリート床版重量	公称体積 $\times$ 公称単位重量	1.050	0.014	0.013	正規分布	
	舗装重量	公称体積 $\times$ 公称単位重量	1.03	0.05	0.05	正規分布	
	地盤	公称体積 $\times$ 公称単位重量	1.050	0.014	0.013	正規分布	RC床版と同じとする
	鋼製高欄	公称体積 $\times$ 公称単位重量	1.00	0.00	0.00	正規分布	確定値として扱う

表-3 座屈強度実験結果と信頼性指標 β 算定上の基準値および強度統計値

	自由突出板	局座屈強度 両縁支持板	補剛板	柱材の座屈	部材座屈強度	横倒れ座屈																																																												
実験データと道示耐荷力曲線の関係																																																																		
道示耐荷力式	$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 \quad (R \leq 0.7)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{0.5}{R^2} \quad (0.7 < R)$ 座屈パラメータ $R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y (12b - \mu^2)}{E \cdot 0.43\pi^2}}$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 \quad (R \leq 0.7)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{0.5}{R^2} \quad (0.7 < R)$ 座屈パラメータ $R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y (12b - \mu^2)}{E \cdot 4\pi^2}}$	実験データ：文献⑥ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 \quad (R \leq 0.5)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.5 - R \quad (0.5 < R \leq 1.0)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{0.5}{R} \quad (1.0 < R)$ 座屈パラメータ $R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y (12b - \mu^2)}{E \cdot 4\pi^2}}$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.2)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.109 - 0.545\lambda \quad (0.2 < \lambda \leq 1.0)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1.0}{0.773 + \lambda} \quad (1.0 < \lambda)$ 座屈パラメータ $\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \frac{l}{r}$	$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 \quad (\alpha \leq 0.2)$ $\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) \quad (0.2 < \alpha)$ 座屈パラメータ $\alpha = \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{b}$ $K = 2 \quad (A_1/A_2 \leq 2)$ $K = \frac{1}{2} + \frac{A_1}{2A_2} \quad (A_1/A_2 > 2)$																																																													
信頼性指標 β 算定上の基準値																																																																		
強度統計値	<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>変動係数</th></tr><tr><td>$R \leq 0.7$</td><td>1.0000</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr><tr><td>$0.7 < R$</td><td>1.1250</td><td>0.0600</td><td>0.0533</td></tr></table>		平均値	標準偏差	変動係数	$R \leq 0.7$	1.0000	0.0000	0.0000	$0.7 < R$	1.1250	0.0600	0.0533	<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>変動係数</th></tr><tr><td>$R \leq 0.5$</td><td>1.0000</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr><tr><td>$0.5 < R$</td><td>1.2380</td><td>0.1459</td><td>0.1179</td></tr></table>		平均値	標準偏差	変動係数	$R \leq 0.5$	1.0000	0.0000	0.0000	$0.5 < R$	1.2380	0.1459	0.1179	<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>変動係数</th></tr><tr><td>$R \leq 0.2$</td><td>1.0000</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr><tr><td>$0.2 < R$</td><td>1.2577</td><td>0.1355</td><td>0.1077</td></tr></table>		平均値	標準偏差	変動係数	$R \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000	$0.2 < R$	1.2577	0.1355	0.1077	<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>変動係数</th></tr><tr><td>$\lambda \leq 0.2$</td><td>1.0000</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr><tr><td>$0.2 < \lambda$</td><td>1.2729</td><td>0.1654</td><td>0.1299</td></tr></table>		平均値	標準偏差	変動係数	$\lambda \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000	$0.2 < \lambda$	1.2729	0.1654	0.1299	<table><tr><th></th><th>平均値</th><th>標準偏差</th><th>変動係数</th></tr><tr><td>$\alpha \leq 0.2$</td><td>1.0000</td><td>0.0000</td><td>0.0000</td></tr><tr><td>$0.2 < \alpha$</td><td>1.3020</td><td>0.1706</td><td>0.1310</td></tr></table>		平均値	標準偏差	変動係数	$\alpha \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000	$0.2 < \alpha$	1.3020	0.1706	0.1310	
	平均値	標準偏差	変動係数																																																															
$R \leq 0.7$	1.0000	0.0000	0.0000																																																															
$0.7 < R$	1.1250	0.0600	0.0533																																																															
	平均値	標準偏差	変動係数																																																															
$R \leq 0.5$	1.0000	0.0000	0.0000																																																															
$0.5 < R$	1.2380	0.1459	0.1179																																																															
	平均値	標準偏差	変動係数																																																															
$R \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000																																																															
$0.2 < R$	1.2577	0.1355	0.1077																																																															
	平均値	標準偏差	変動係数																																																															
$\lambda \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000																																																															
$0.2 < \lambda$	1.2729	0.1654	0.1299																																																															
	平均値	標準偏差	変動係数																																																															
$\alpha \leq 0.2$	1.0000	0.0000	0.0000																																																															
$0.2 < \alpha$	1.3020	0.1706	0.1310																																																															

に対して現行設計による信頼性指標 β の下限値は、死活荷重断面力比率の影響を受けるが極端に大きく変化するものではないことが確認された。なお、補剛板については、他の座屈強度と比較して標準偏差が大きいこと β の値が小さくなる傾向にあり、かつ死活荷重断面力比率の影響は明確に見られない。

図-5に自由突出板の局部座屈強度に着目し、幅厚比パラメータ R と信頼性指標 β の関係を示す。 $R \leq 0.7$ の領域では β が概ね4.5程度であるが、 $R > 0.7$ の領域では β は R が大きくなるに従い大きくなっている。これは、道示の耐荷力曲線と実験値の乖離程度が幅厚比パラメータ R で異なることによる。

4. 抵抗係数の検討

4.1 検討内容

抵抗係数は、設計値法を用いて算出することとした。降伏強度の分布形状として正規分布を用いた場合の抵抗係数の算出式を以下に示す。

$$\phi_{R_i} = \left(1 - \beta_T \cdot \alpha_i \cdot \frac{\sigma_R}{R} \right) \cdot \bar{R}$$

ここで、

β_T : 目標信頼性指標 α_i : 感度係数

$\bar{R}$: 平均値 σ_R : 標準偏差

ϕ_{R_i} : 抵抗係数

対象とした照査項目は、曲げ引張降伏強度、曲げ圧縮降伏強度、曲げ圧縮自由突出板座屈強度、曲げ圧縮補剛板

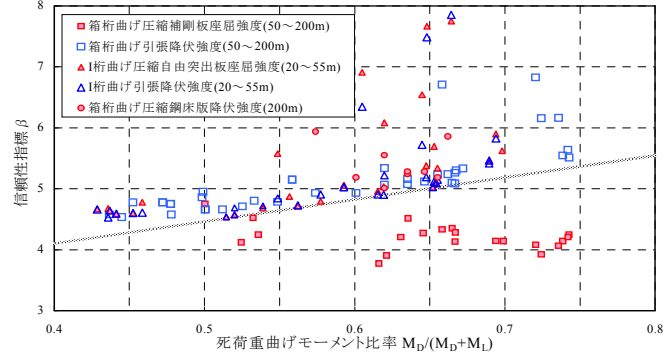


図-4 検討対象橋梁の断面決定部位の β (活荷重統計量1.6 (確定値))

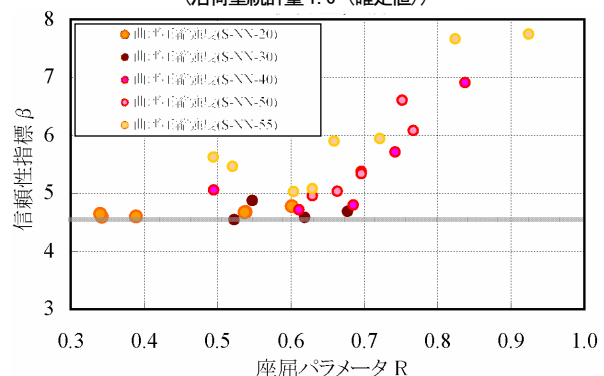


図-5 検討対象橋梁の断面決定部位の自由突出板の局部座屈強度 β (活荷重統計量1.6 (確定値))

座屈強度、横倒れ座屈強度とした。抵抗係数については、 β 算定上の基準値(各座屈パラメータの実験値の下限値相当(平均値 $-2 \times$ 標準偏差))を特性値 R_k とした場合と、現行道示の耐荷力曲線を特性値 R_k とした場合の2方法により算出した。抵抗強度設計値は抵抗係数 $\times$ 特性値で表されることから、 R_k と R_k の関係は次式で表される。

$$\phi_{Ri} \cdot R_k = \phi_{Ri}' \cdot R_k' \text{ これより } \phi_{Ri}' = \phi_{Ri} (R_k / R_k')$$

ここに、添え字 i は各照査位置で算出された感度係数及び抵抗係数を意味している。

4. 2 算定結果

(1) 感度係数 α

FORM 法による感度係数の算定結果として、連続鋼床版 1 箱桁と連続合成 2 主 I 桁を対象に、各性能関数に対する 6~19 個の感度係数のうち、主要な感度係数の平均値を表-4 に示す。引張降伏強度（上下フランジ）と圧縮降伏強度（上フランジ）は、ともに降伏強度の感度係数はほぼ 1.0 であり、板厚などの他の確率変数の影響をほとんど受けることなく、降伏強度のばらつきの影響が支配的である。一方、圧縮補剛板座屈強度（下フランジ）と圧縮横倒れ座屈強度（下フランジ）は、ともに降伏強度の感度係数と補剛板座屈強度あるいは横倒れ座屈強度の感度係数の二乗和がおおよそ 1.0 であることから、これら 2 確率変数の影響が支配的である。

(2) 抵抗係数

表-5 に抵抗係数の算定結果を示す。また、図-6 に、自由突出板と補剛板の圧縮座屈強度を例に、 β_T を各照査項目の下限值 β の最大値程度で 4.5 と仮定し試算した抵

表-4 感度係数の平均値

(a) 連続鋼床版 1 箱桁

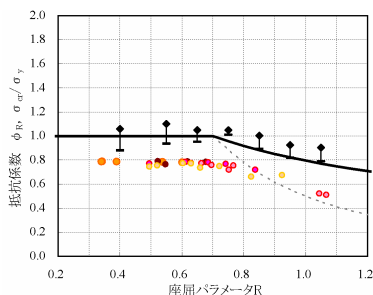
	U. Flg 曲げ引張 抵抗強度	U. Flg 曲げ圧縮 抵抗強度	L. Flg 曲げ引張 抵抗強度	L. Flg 曲げ圧縮補剛板 座屈強度	
	$\alpha_{\sigma y}$	$\alpha_{\sigma y}$	$\alpha_{\sigma y}$	$\alpha_{\sigma cr/\sigma y}$	$\sqrt{\sum \alpha^2}$
SB-S-100	—	—	0.997	0.343	0.988
SB-S-200	0.998	0.998	0.998	0.374	0.921

(b) 連続合成 2 主 I 桁

	L. Flg 曲げ圧縮横倒れ 座屈強度	
	$\alpha_{\sigma y}$	$\alpha_{\sigma cr/\sigma y}$
C-CC-50	0.236	0.971

表-5 抵抗係数の算定結果

抵抗係数の種類	ϕ_{Ri}' (ϕ_{Ri})
曲げ引張降伏強度	0.80
曲げ圧縮降伏強度	0.80
曲げ圧縮自由突出板座屈強度	0.80
曲げ圧縮補剛板座屈強度	0.65
横倒れ座屈強度	0.65



(a) β 算定上の基準値を特性値とした場合

$R = 0.7$ に対して

$$\phi_{Ri}' = \phi_{Ri} \frac{R_k}{R_k'}$$

抗係数 ϕ_{Ri}' と ϕ_{Ri} を示す。

自由突出板では、 ϕ_{Ri} は幅厚比パラメータ $R > 0.7$ 領域において R が大きくなるに従い小さくなるが、 ϕ_{Ri} は同領域において 0.78~0.97 となっている。図-6(b) に示すとおり、座屈パラメータによらず一定の信頼性指標 β の値を得るには、抵抗係数を変化させる必要がある。今後、実務設計での簡便さや現行道示における R の大きい領域での安全余裕や統計データの信頼性等を勘案の上、座屈パラメータに対する抵抗係数の設定ルールを検討していく必要がある。

5. 部分係数照査書式による試設計

5. 1 検討内容

4. の抵抗係数の算定結果を基に、抵抗係数を仮設定し、2. で設定した部分係数照査書式に従い桁断面の試設計を行った。また、現行の許容応力度法に基づく試設計との比較を行い、断面諸量の増減の程度及び信頼性指標 β の収束度合い (β_T との一致度合い) について分析を行った。

照査項目は、主桁の曲げに伴うフランジの引張降伏強度、圧縮降伏強度、圧縮自由突出板座屈強度、圧縮補剛板座屈強度、横倒れ座屈強度とした。

5. 2 部分係数照査書式による試設計

部分係数照査書式による試設計は表-1 中の以下の 6 ケースとした。

- ・単純非合成 I 桁橋 (S-NN-30、40、50、55)

※支間 20m の断面は、応力ではなくたわみで決まっているため、検討対象外とした

- ・3 径間連続鋼桁橋 1 箱桁橋 (CB-S-100、CB-S-200) ⁸⁾

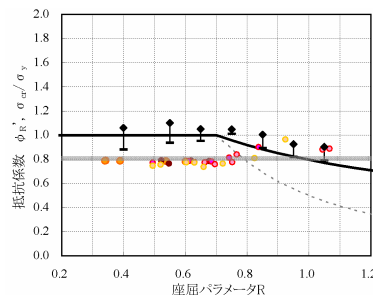
- ・連続合成 2 主 I 桁橋 (C-CC-50)

照査位置は、主桁の添接位置と支間中央や中間支点上などの曲げモーメント極大位置とする。

前述までの算定結果を基に、目標信頼性指標 β_T は 4.5 とし、照査に用いる部分係数は以下の数値とした。

- ・活荷重係数 (B 活荷重 L 荷重) : $\gamma_L = 1.6$

- ・死荷重係数 : $\gamma_D = 1.05$



(b) 現行道示の耐力曲線を特性値とした場合

図-6 曲げ圧縮自由突出板座屈強度の抵抗係数
(目標信頼性指標 $\beta_T = 4.5$, 活荷重統計量 1.6 (確定値))

- ・ 全体調整係数 : $\gamma_a = 1.0$
- ・ 曲げ引張降伏強度に関する抵抗係数 : $\phi_R = 0.80$
- ・ 曲げ圧縮降伏強度に関する抵抗係数 : $\phi_R = 0.80$
- ・ 曲げ圧縮自由突出板座屈強度に関する抵抗係数 : $\phi'_R = 0.80$
- ・ 曲げ圧縮補剛板座屈強度に関する抵抗係数 : $\phi'_R = 0.65$
- ・ 横倒れ座屈強度に関する抵抗係数 : $\phi_R = 0.65$

5.3 検討結果

図-7 に単純非合成 I 桁を例として、許容応力度法により試設計した鋼桁断面と、仮定した部分係数を用いて試設計した外桁支間中央断面の断面積及び断面二次モーメントの比率（部分係数設計法による鋼桁断面－許容応力度法による鋼桁断面）／許容応力度法による設計断面）を示す。部分係数法書式による桁断面は、今回、 β_T を下限値側で設定したことから、断面積で 2.0%～6.1%減少、断面二次モーメントで 2.6%～8.1%減少し、支間が長くなるにつれて減少割合は大きくなる傾向となった。今後、現行設計とのすりあわせの方法については、これらの結果を基に設計への影響を十分勘案の上調整していく必要があるが、これまで述べてきた目標信頼性指標と抵抗係数の設定手順において、概ね現行設計とかけ離れた結果にはならないことが確認された。

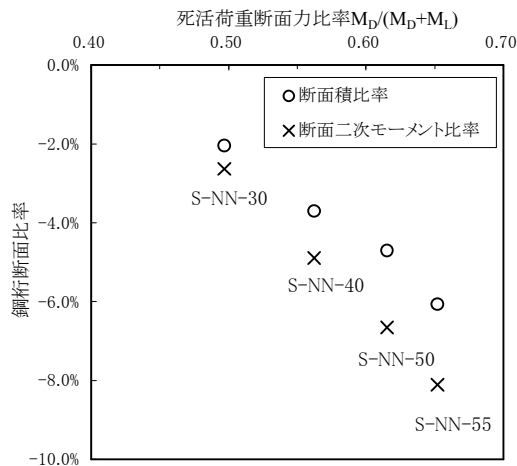
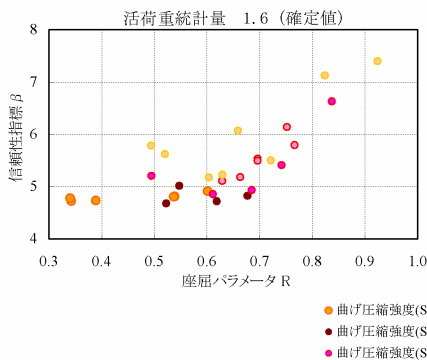


図-7 設計法の違いによる鋼けた断面比率
(活荷重統計量 1.6 (確定値))



(a) 現行設計法

また、図-8 に許容応力度法と部分係数設計法について、信頼性指標 β と座屈パラメータの関係を示す。許容応力度法で得られた断面では、 β のばらつきが見られていたが、全体的に目標信頼性指標である 4.5 に近づく傾向が見られることがわかる。

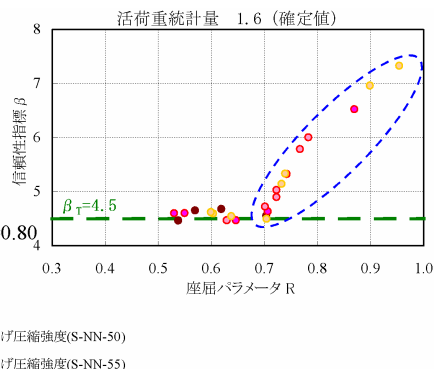
なお、自由突出板に見られるように、一部、座屈パラメータが大きい領域等において、目標信頼性指標との乖離が見られる。これは、表-3 に示したとおり、現行道示の耐力曲線と強度統計データとの乖離が見られるためであり、現行道示との整合を図る場合には図に示すとおり、信頼性指標は大きくなる結果となる。この点については、座屈という不安定現象に対して、これまでの設計実績や付与すべき構造的冗長性について慎重に扱いを検討する必要があると考えられる。

6. まとめ

支間長の大きな鋼床版連続 1 箱桁橋および連続合成 2 主 I 桁橋を対象に、前年度に引き続き、道示 II 鋼橋編の座屈関連抵抗強度照査式における統計データの把握及び性能関数の設定を行い、試設計により信頼性指標を算出した。また、目標信頼性指標 β_T を仮定した場合の部分係数の試算及び部分係数照査書式による試設計を行い、許容応力度法との断面諸元及び β の比較検討を行った。以下に主な結果をまとめる。

(1) 信頼性指標 β の算定手順・手法・条件

- ・ 信頼性指標 β の算定手順・手法・条件を整理し、標準的な鋼桁橋を対象として、代表的な照査項目である曲げ圧縮・引張強度における β の値の傾向を把握した。
- ・ 支間長の大きな連続鋼床版 1 箱桁橋、および連続合成 2 主 I 桁橋を対象として、性能関数を設定し、曲げ引張・曲げ圧縮降伏強度、曲げ圧縮自由突出板座屈強度、曲げ圧縮補剛板座屈強度、横倒れ座屈強度における信頼性指標 β の傾向を把握した。



(b) 部分係数設計法

図-8 設計法の違いによる鋼桁断面の信頼性指標 β (自由突出板圧縮座屈強度)

(2) 信頼性指標 β の検討結果

・活荷重設計値を 1.6 とした場合、断面決定部位における曲げ圧縮・引張強度に対する β の値は 3.8~8.0 であった。

・活荷重断面力比率に対する β の傾向は、照査項目により異なるものの、概ね死荷重比率の増加に応じて増加する傾向がみられ、強度のばらつきの大きい補剛板の座屈強度等を除けば、 β の下限値は 4.5~5.5 程度であった。

(3) 抵抗係数の検討結果

・活荷重統計量を 1.6 (確定値)、目標信頼性指標 β_T を 4.5 と仮定した場合の試算結果をもとに、以下の抵抗係数を設定した。

曲げ引張・曲げ圧縮降伏強度	: $\phi_R = 0.80$
曲げ圧縮自由突出板座屈強度	: $\phi'_R = 0.80$
曲げ圧縮補剛板座屈強度	: $\phi'_R = 0.65$
横倒れ座屈強度に関する抵抗係数	: $\phi_R = 0.65$

(4) 抵抗係数の妥当性の検討

・(3) に示す抵抗係数を用いて、活荷重係数 1.6、死荷重係数 1.05 とし β_T を 4.5 とし、部分係数設計法に基づき試設計を行った結果、桁の断面積で -6.5~+1.21% 程度の差であり、現行道示の適用支間長 200m の範囲において両方の設計法に関してほぼ同程度の断面となることが確認された。

今後、得られた結果を精査するとともに、疲労強度等他の照査項目についても、部分係数の設定及び鋼桁橋を対象として部分係数法書式試案を作成する予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、2002.3.
- 2) 村越潤、清水英樹、有馬敬育：鋼 I 桁橋の信頼性指標 β の評価と部分係数に関する基礎検討、構造工学論文集 Vol.53A、2007.3.
- 3) 清水英樹、村越潤、梁取直樹：鋼 I 桁橋の目標信頼性指標 β_T と部分係数に関する一検討、第 62 回年次学術講演会、2007.9.
- 4) 村越潤、梁取直樹、清水英樹：部分係数設計法による鋼 I 桁橋の試設計と許容応力度設計法との比較検討、第 62 回年次学術講演会、2007.9.
- 5) (独) 土木研究所：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査、土木研究所資料第 4090 号、2008.3.
- 6) 建設省土木研究所：補剛板の限界状態(その 1、大型供試体による耐荷力試験)、土木研究所資料第 1779 号、1982.2.
- 7) 清水英樹、村越潤、梁取直樹、小森大資：鋼 I 桁橋の信頼性指標 β の評価と部材強度の抵抗係数の基礎検討、第 63 回年次学術講演会 (投稿中)
- 8) 小森大資、村越潤、梁取直樹、清水英樹：部分係数設計法による連続鋼床版箱桁橋の試設計と許容応力度設計法との比較検討、第 63 回年次学術講演会 (投稿中)

A STUDY ON PARTIAL FACTOR DESIGN METHOD FOR STEEL BRIDGES

Abstract : This study is a part of research to introduce partial factor design method to the design specifications for highway bridges. The introduction of new design method is planned to be conducted in the next revision of the specifications. In fiscal 2007, following results are obtained ;

- 1) Reliability index β was calculated for a two-span continuous composite girder bridge with span lengths of 50m and for two three-span continuous orthotropic steel deck bridges with center span lengths of 100m and 200m.
- 2) Values of resistance factors for yield, local buckling of bending compression flange, lateral buckling of bending compression flange are obtained by using assumptions that design live load is 1.6 times of B-type design live load, design dead load is 1.05 times of nominal dead load and target reliability index is 4.5
- 3) Partial factor design method using resistance factor obtained in (2) leads a little difference from allowable stress design method for cross sections of simple and continuous steel girder bridges and continuous steel box girder bridges with orthotropic steel deck.

Key words : partial factor design, steel bridge, reliability analysis, reliability index, partial factor