

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（抵抗係数）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、道路橋、鋼桁橋、信頼性解析、信頼性指標、FORM 法、モンテカルロシミュレーション、設計値法、抵抗係数

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)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、充実化およ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 20 年度は、前年度²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾までの検討結果をもとに鋼桁橋における抵抗側の部分係数（以下、抵抗係数）の設定までの流れを整理するとともに、道示 II 鋼橋編（以下、道示 II）の鋼桁橋に関わる部分について、部分係数設計法書式による道示 II ドラフトの作成を行った。

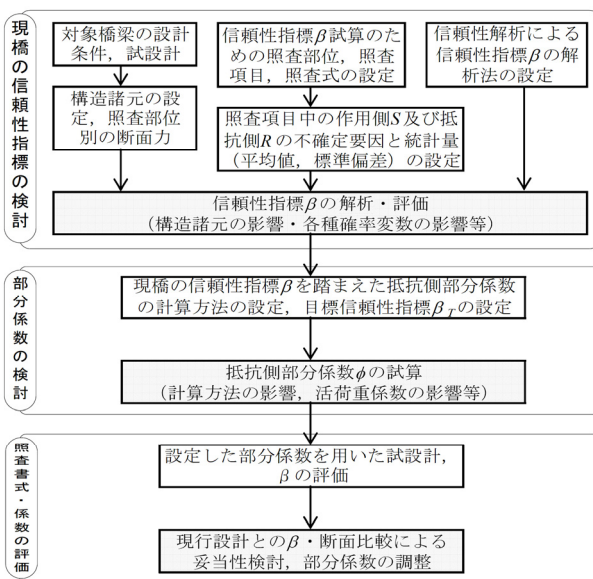


図-1 本研究の検討フロー

2. 研究の概要

2.1 研究内容

図-1に検討フローを示す。検討の詳細は各章で述べるが、以下に検討フローに沿って信頼性指標 β および部分係数（抵抗係数）の検討の概要を示す。

(1) 信頼性指標 β の検討

道示 II に従って設計された鋼桁橋の主桁を対象として、橋梁形式（合成・非合成、単純・連続、I 桁・箱桁の別）、支間長（20m～200m）をパラメータとして各照査項目・部位に対する信頼性指標 β の試算を行った。本研究で取

扱った照査項目は、現行設計における曲げに対するフランジの降伏・座屈（自由突出板座屈、補剛板座屈）、桁の横倒れ座屈、ウェブのせん断に対する降伏とし、照査部位は、断面設計でクリティカルとなる部位（支間中央部、断面変化部および支点の各断面）とした。表-1 に照査対象部位および照査項目について、連続桁の例を示す。また、図-2 に主要な強度照査項目を示す。荷重・抵抗側の各種パラメータの統計データについては、文献7)に基づき設定した。信頼性指標 β の解析手法については、レベル2の信頼性設計法を対象として、FORM法とモンテカルロシミュレーションによることとし、信頼性指標 β

および各種パラメータの影響（感度係数）を把握した。

なお、主桁の照査項目としては、上記の他、ボルト継手部のすべり耐力、溶接継手部の疲労強度、支点上補剛材の圧縮強度、活荷重たわみ等があるが、ここでは現時点で統計データが収集分析可能であった代表的な照査項目を取り上げることとした。

(2) 目標信頼性指標 β_T に対する部分係数の検討

上記(1)の検討結果を基に、曲げモーメントによるフランジの降伏・座屈に対する目標信頼性指標 β_T を仮に設定し、部分係数の試算を行った。ここでは、荷重側の部分係数をパラメータとして、抵抗係数の傾向を把握した。

(3) 部分係数設計法に基づく試設計

上記(2)で設定された抵抗係数を用いた部分係数設計法書式による試設計を行い、(1)と同様の手法で信頼性指標 β を算出する。その結果を(1)で試設計された桁断面の断面諸量や β の変化等について比較分析を行った。

2.2 検討対象橋梁

表-2に検討対象としたケース（検討対象橋梁の支間長、橋梁形式）を、図-3に橋梁断面図を示す。橋梁形式としては、鋼道路橋の建設実績のうち8割以上を占める鋼桁橋（主にRC床版）を対象とし、幅員構成は全て同一とし、支間長に応じて標準的な桁形式、桁配置（対称断面）及び桁本数桁を選定した。

3. 信頼性指標 β の検討

3.1 信頼性指標 β の解析方法

信頼性指標 β の解析方法としては、2方法によることとしたが、両者で概ね同一の結果が得られているので、ここでは、破壊点まわりでの1次の項までのテーラー展開近似を利用するFORM（First-Order Reliability Method）法を適用した場合の結果を示す。

表-1 照査部位および強度照査項目一覧

| 橋梁形式 | 照査部位 | 照査項目 |
|-------|-------|---|
| 非合成桁 | 端支部位 | ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |
| | 断面変化部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 |
| | 支間中央部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 |
| | 中間支部位 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 ・曲げを受ける桁の対傾構間における横倒れ座屈 ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |
| 合成I桁 | 端支部位 | ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |
| | 断面変化部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 ・曲げを受ける桁の対傾構間における横倒れ座屈 |
| | 支間中央部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 ・曲げを受ける桁の対傾構間における横倒れ座屈 |
| | 中間支部位 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張・降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（自由突出板）の局部座屈 ・曲げを受ける桁の対傾構間における横倒れ座屈 ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |
| 鋼床版箱桁 | 支部位 | ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |
| | 断面変化部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ圧縮・引張降伏） |
| | 支間中央部 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ圧縮・引張降伏） |
| | 中間支部位 | ・曲げモーメントによる垂直応力度（フランジ引張降伏） ・圧縮応力を受けるフランジ（補剛板）の局部座屈 ・腹板の曲げに伴うせん断応力度 |

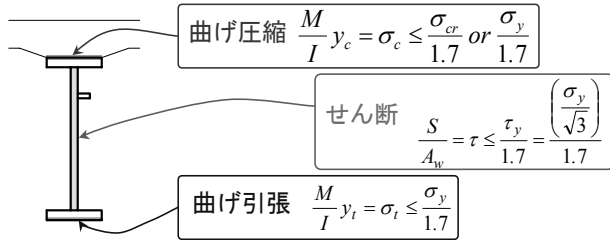


図-2 主要な強度照査項目

表-2 検討ケース（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 | | 連続箱桁 | | |
|-----------------------|-------------|---------|------------------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------|-------------------------|
| | RC床版 | | RC床版 | PC床版 | | RC床版 | 鋼床版 | 鋼床版 | | |
| コンクリート系床版と主桁の合成作用の取扱い | 主桁断面決定の考え方 | | 非合成 | 合成 | 非合成 | 非合成 | 合成 | 非合成 | — | — |
| | 主桁応力度算定の考え方 | | 非合成 | 合成 | 合成 | 非合成 | 非合成 | 合成 | 非合成 | — |
| 支間長 | 20m | S-NN-20 | | | | | | | | |
| | 30m | S-NN-30 | | | | | | | | |
| | 40m | S-NN-40 | S-NC-40 ^{注1)} | S-CC-40 | C-NN-40 ^{注2)} | | | | | |
| | 50m | S-NN-50 | | | | C-NN-50 ^{注3)} | C-CC-50 ^{注3)} | SB-NN-50 | SB-S-50 | |
| | 55m | S-NN-55 | | | | | | | | |
| | 100m | | | | | | | | | CB-S-100 ^{注4)} |
| | 200m | | | | | | | | | CB-S-200 ^{注5)} |

注1) 非合成桁として設計するが、信頼性指標 β 算出時においては、合成桁として断面照査を行う。注2) 支間割は3@40mとする。注3) 支間割は2@50mとする。注4) 支間割は80m+100m+80mとする。注5) 支間割は160m+200m+160mとする。

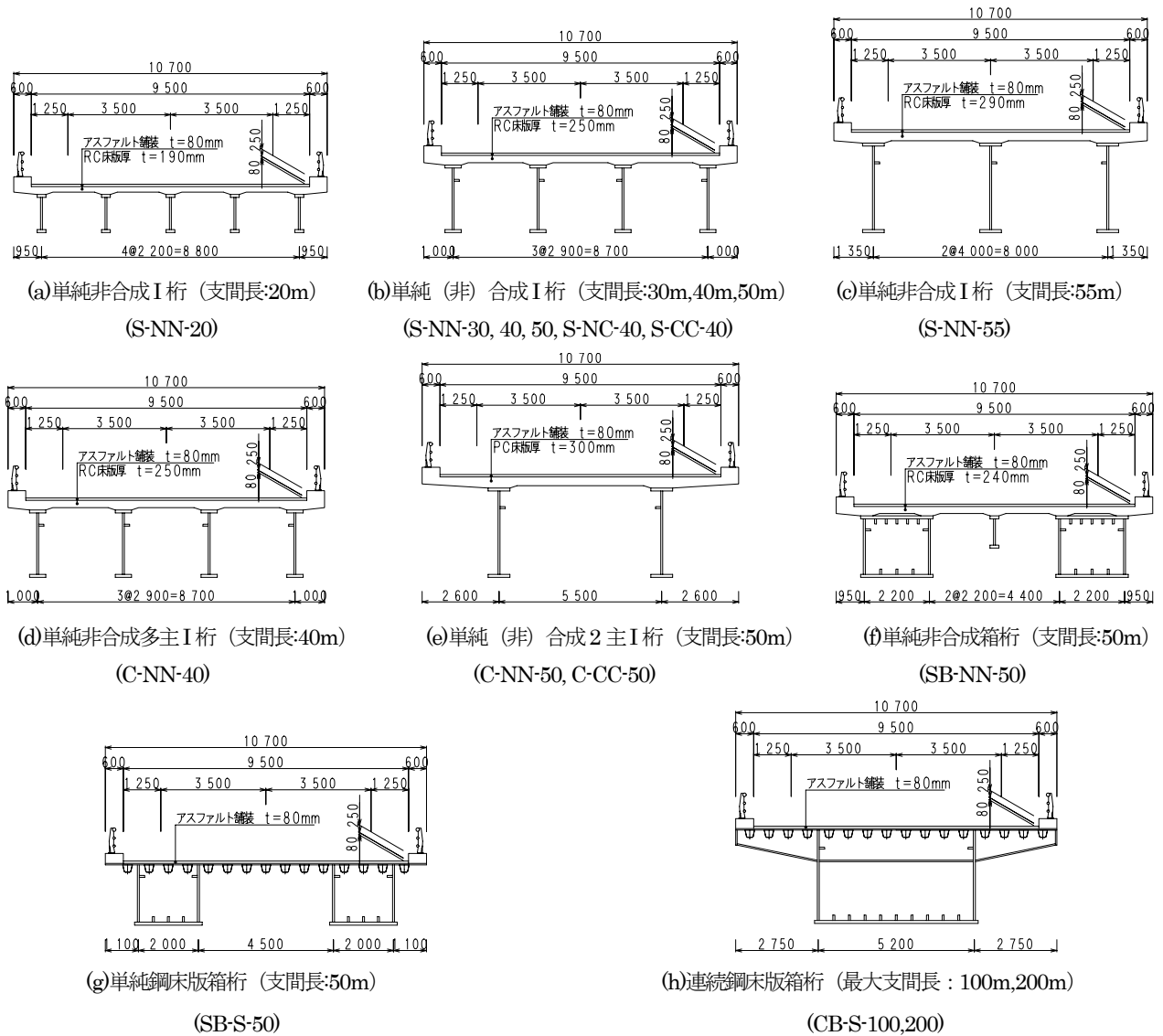


図-3 対象橋梁断面図⁸⁾

3.2 解析に考慮した抵抗側・荷重側の確率変数と統計量

表-3、表-4に、仮定した確率変数の基準値、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、それぞれ示す⁷⁾。表中の標準偏差と変動係数は、各不確定要因の基準値で除すことで無次元量として表している。信頼性指標 β 試算上の分布形はいくつか考えられ、分布形状の影響については別途検討を行っている⁹⁾が、ここでは最も標準的で取扱いが容易な正規分布と仮定した。

また、座屈強度については、各強度統計データの分析を行い、道示Ⅱの基準耐荷力曲線と統計データとの関係を整理した上で統計量を与えている。

信頼性指標 β 算出の際、座屈強度によっては、道示Ⅱの基準耐荷力曲線と実験データとの乖離が見られるため、座屈領域での無次元統計データ (平均値、標準偏差) が

幅厚比パラメータによらずほぼ一定値をとるように、 β 算定上の座屈強度の基準値を、道示Ⅱの基準耐荷力曲線とは異なる曲線 (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)) に設定した。なお、 β 算定上の基準値が $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0$ の領域については座屈強度を確定値としている (表-5)。

活荷重については、確率論として扱うことが必ずしも適切ではない面があるので、既往の研究をもとに単純桁の曲げモーメントを対象に、100年での非超過確率95%の荷重強度を概略推定した上で確定値として扱い、その値を参考にパラメータとして、活荷重統計量 [100年での非超過確率95%の活荷重断面力/B活荷重断面力 (以下、 μ_L)] を、1.2, 1.4, 1.6 (確定値) と設定した。設定し、主に抵抗係数を検討する時に用いた。

表-3 抵抗側不確定要因と解析に用いた確率変数の統計量⁷⁾

| 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 | |
| | 部材強度 | 自由突出板の圧縮座屈強度 | $R \leq 0.7$ | $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0$ | 24 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 |
| $0.7 < R$ | | | $\sigma_{cr} / \sigma_y = (0.7/R)^{0.64}$ | 25 | 1.125 | 0.06 | 0.053 | 正規分布 | |
| 補剛板の圧縮座屈強度 | | $R_R \leq 0.2$ | $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0$ | 56 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |
| | | $0.2 < R_R \leq 1.0$ | $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.1125 - 0.5625R_R$ | | 1.258 | 0.136 | 0.108 | 正規分布 | |
| 横倒れ座屈強度 | $\alpha \leq 0.2$ | $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0$ | 221 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | | |
| | $0.2 < \alpha$ | $\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2)$ | | 1.302 | 0.171 | 0.131 | 正規分布 | | |
| 断面定数 | 板厚誤差 | 板厚 $t \leq 100\text{mm}$ | 板厚公称値 | 160980 | 1.002 | 0.012 | 0.012 | 正規分布 | |
| | 板取(板幅)誤差 | - | 板幅公称値 | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |
| | コンクリート床版厚 | 合成桁の床版 | 床版厚公称値 | - | 1.050 | 0.012 | 0.011 | 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 | - | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 確定値 | |
| 物理定数 | | 弾性係数(鋼材) | 200000 N/mm ² | 1024 | 0.999 | 0.045 | 0.045 | 正規分布 | |
| | | ポアソン比(鋼材) | - | 588 | 0.937 | 0.085 | 0.091 | 正規分布 | |
| | | 弾性係数(コンクリート) | 公称値 | - | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 確定値 | |

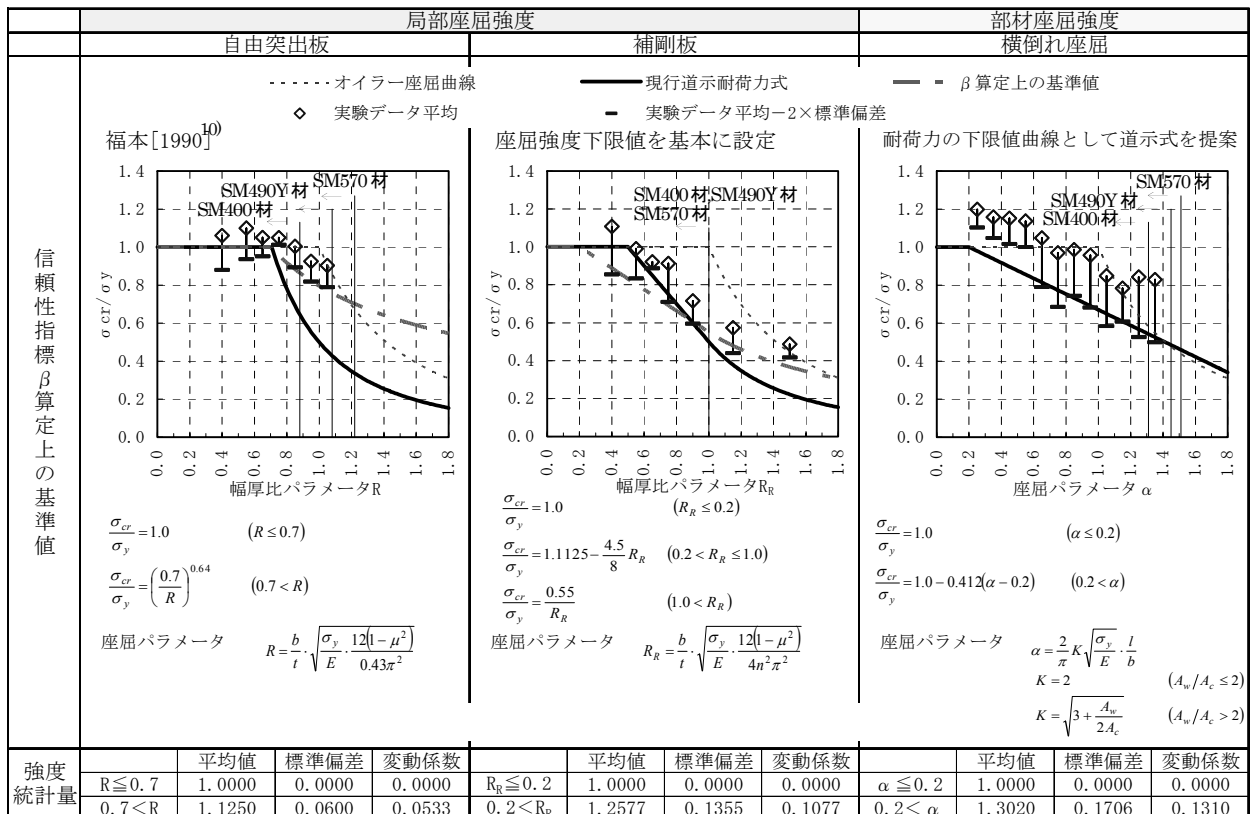
注) 今回収集できた既存の座屈実験データは降伏強度公称値でなく、試験体の鋼材降伏強度で除して無次元化されており、その統計量は基準耐力曲線からの離れ量で表現されている。

表-4 荷重側不確定要因と解析に用いた確率変数の統計量⁷⁾

| 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 ³) | 160980 | 1.002 | 0.012 | 0.012 | 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 ³) | 不明 | 1.05 | 0.014 | 0.013 | 正規分布 | | |
| | 舗装重量 | 公称体積×単位重量 (22.5kN/m ³) | 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 ³) | 不明 | 1.05 | 0.014 | 0.013 | 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: 0.5 kN/m (1高欄当り) | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | | |
| 活荷重 | B活荷重 | L活荷重 | 道示 I 2.2.2活荷重 | - | 1.20 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | パラメータとする |
| | | 衝撃係数 | $i=20/(50+L)$ L: 支間長 | - | 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 | |
| 不静定力 | コンクリートのクリープの影響 | クリープ係数 | 2.0 | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |
| | | 乾燥収縮の影響 | 最終収縮度 | 20×10^{-5} | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 |
| | 温度変化の影響 | 鋼の線膨張係数 | 12×10^{-6} | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |
| | | コンクリートの線膨張係数 | 12×10^{-6} : 合成桁 (10×10^{-6}) | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |
| | | 温度差 | ±10度 | - | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 確定値 | |

注) 活荷重の「平均値/基準値」の値は、「100年での非超過確率95%の供用期間中に起こりうる活荷重断面力/B活荷重断面力」の値を表す。

表-5 抵抗側不確定要因と解析に用いた確率変数の統計量



3.3 解析結果と考察

(1) 照査部位・項目別の信頼性指標 β の傾向

図-4 に $\mu_L=1.6$ (確定値) とした場合の FORM 法による主桁 (外桁) の信頼性指標 β の算出結果の例を示す。図中の β については、○印の位置 (断面変化位置、断面力極値位置) で解析しており、それらの間は直線補間している。

曲げ圧縮・引張強度に関して断面力に対する余裕が小さな部位は、支間中央部、断面変化位置、中間支点部であり、各橋梁の β の値は、最小値で支間中央断面で 3.8~4.5 程度である。端支点上で曲げモーメントが 0 となる位置では、抵抗側の要因のみで β が決定され 8~12 程度となっている。

連続非合成I桁 (図-4 (b)) では、正曲げ区間では、単純非合成I桁と同様の傾向が見られ β の最小値は4.0程度となっている。負曲げ区間においても β の最小値は中間支点上において4.0程度となっている。

(2) 抵抗側不確定要因の確率変数のばらつきの影響

抵抗側不確定要因として用いた各確率変数のばらつきが信頼性指標 β に与える影響 (感度係数) を把握するため、FORM 法により算定された各確率変数の感度係数 α_j を確認した。検討対象は単純非合成 I 桁支間長 40m (S-NN-40) の G1 桁とし、照査部位・項目は自由突出板座屈強度で断面が決定する端支点断面 (1-R) における曲げ圧縮強度 (上フランジ) および曲げ引張強度 (下フランジ) とした。

表-6 に FORM 法において考慮した荷重側および抵抗側の不確定要因に対する感度係数を示す。曲げ圧縮強度の場合、感度係数は絶対値の大きい順に鋼材降伏強度、座屈強度、上フランジ (圧縮側) 板厚と続くが、鋼材降伏強度、座屈強度の 2 項目以外は 1 桁以上数値が離れており、これは表-3、表-4 の不確定要因の統計量のうち、標準偏差が大きい項目と対応している。 μ_L を確定値 (1.2~1.6) としているため、感度係数から得られる情報は限

られているが、抵抗側不確定要因のばらつきに関して言えば、鋼材降伏強度と座屈強度が信頼性指標 β に与える影響が大きいと考えられる。

曲げ引張強度の場合、感度係数は絶対値の大きい順に鋼材降伏強度、下フランジ (引張側) 板厚と続くが、鋼材降伏強度以外は1桁以上数値が離れており、抵抗側不確定要因のばらつきに関しては、鋼材降伏強度が信頼性指標 β に与える影響が大きいと考えられる。

(3) 鋼桁橋全般の信頼性指標 β の傾向

図-5 に対象橋梁に対する信頼性指標 β の解析結果を死荷重曲げモーメント比率別に示す。ただし、外・内桁

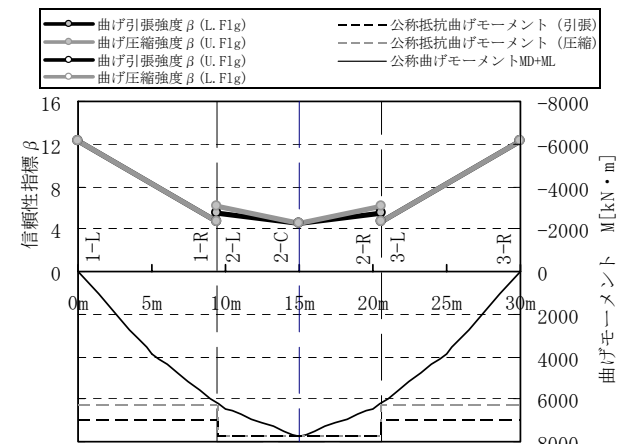
(a) 上フランジ曲げ圧縮強度

| 活荷重統計量 | β 値 | 荷重側不確定要因 | | | 抵抗側不確定要因 | | | | 合計 | |
|--------|-----------|----------|--------|--------|----------|-------|---------|---------|-------|-------|
| | | 鋼重 | 床版・地覆 | 舗装 | 鋼材降伏強度 | 座屈強度 | 上フランジ板厚 | 下フランジ板厚 | | ウェブ板厚 |
| 1.2 | 7.6 | -0.006 | -0.024 | -0.017 | 0.955 | 0.291 | 0.041 | 0.007 | 0.010 | 1.000 |
| 1.4 | 7.3 | -0.006 | -0.024 | -0.017 | 0.949 | 0.312 | 0.044 | 0.008 | 0.011 | 1.000 |
| 1.6 | 6.9 | -0.006 | -0.024 | -0.017 | 0.942 | 0.331 | 0.046 | 0.008 | 0.011 | 1.000 |

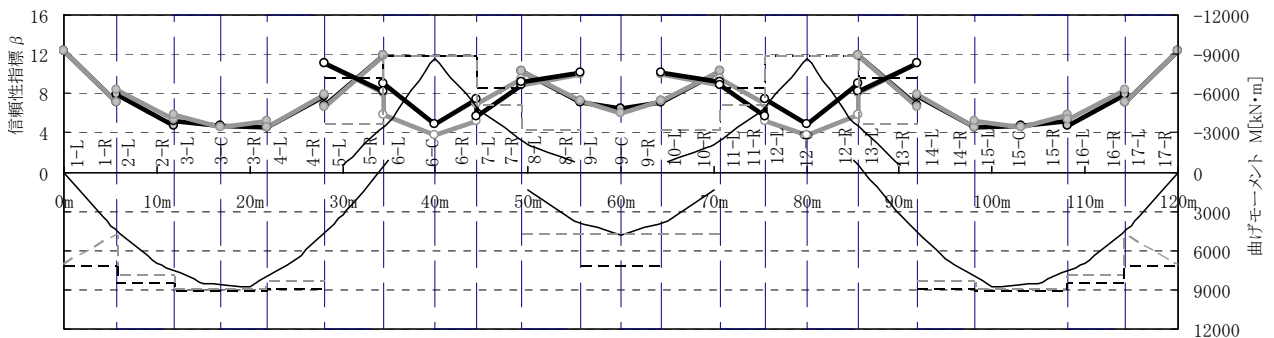
(b) 下フランジ曲げ引張強度

| 活荷重統計量 | β 値 | 荷重側不確定要因 | | | 抵抗側不確定要因 | | | | 合計 |
|--------|-----------|----------|--------|--------|----------|---------|---------|-------|-------|
| | | 鋼重 | 床版・地覆 | 舗装 | 鋼材降伏強度 | 上フランジ板厚 | 下フランジ板厚 | ウェブ板厚 | |
| 1.2 | 7.1 | -0.007 | -0.026 | -0.018 | 0.998 | 0.008 | 0.042 | 0.013 | 1.000 |
| 1.4 | 6.7 | -0.007 | -0.026 | -0.018 | 0.998 | 0.008 | 0.045 | 0.014 | 1.000 |
| 1.6 | 6.3 | -0.007 | -0.026 | -0.018 | 0.998 | 0.009 | 0.048 | 0.015 | 1.000 |

の表-2 に示す断面決定部位 (公称抵抗曲げモーメントに



(a) 支間長30mの単純非合成I桁 (S-NN-30)



(b) 支間長 40m の連続非合成 I 桁 (C-NN-40)

図-4 主桁 (外桁) における β の支間方向の変化

対して公称曲げモーメントの余裕が小さな部位)のうち、強度照査で断面が決定している部位(自由突出板の強度照査で決定している部位は除く)のデータのみを抽出して整理している。

β の傾向は照査項目により異なるものの、曲げ引張・圧縮降伏強度については、概ね死荷重曲げモーメント比率に応じて増加する傾向がみられる。図中の勾配線はこの傾向が見られる β の下限値相当の直線を示している。これをもとに図中では β の下限値に相当する水平線(以下、 β_L)を示す。

補剛板座屈強度および横倒れ座屈強度については、他の強度と比べると座屈強度の標準偏差が大きいため、 β の値は曲げ引張・圧縮強度と比較して小さく、最小値は3.8程度であり、かつ死荷重曲げモーメント比率の影響は明確に見られない。これは、曲げ引張・圧縮強度と比べると強度の標準偏差が大きいためである。現行設計による信頼性指標 β の下限値は、死荷重曲げモーメント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結果となっている。

次に、信頼性指標 β と μ_L との関係について検討する。図-6にそれぞれ曲げ引張・圧縮降伏強度、自由突出板座屈強度、曲げ圧縮補剛板座屈強度および横倒れ座屈強度について $\mu_L = 1.2, 1.4, 1.6$ 別の信頼性指標 β の算出結果(プロットは $\mu_L = 1.6$ 以外は省略)を示す。図中には、下限値に近い値の β に対して、水平線を示している。図-6(a)に関して、図中の勾配線は、データの下限値の傾向を示したものであり、次式で表すことができる。

$$\beta = -5\mu_L + 10.8 + (4.5\mu_L - 3.8) \left(\frac{M_D}{M_D + M_L} \right) \quad (1)$$

また、 β の下限値(β_L)は次式で表される。

$$\beta_L = -3\mu_L + 9.2 \quad (\text{ただし、}\beta > \beta_L) \quad (2)$$

ここに、

M_D : 死荷重曲げモーメント

M_L : 活荷重曲げモーメント

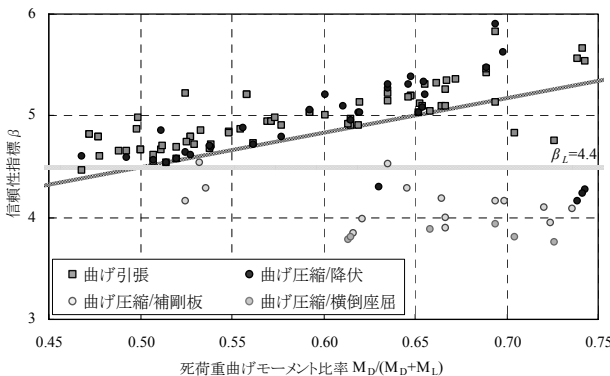


図-5 応力における断面決定部位の信頼性指標 β ($\mu_L = 1.6$)

本検討では活荷重の検討は行っていないが、概ね上式で活荷重断面力に対する傾向を把握することができるものと考えられる。

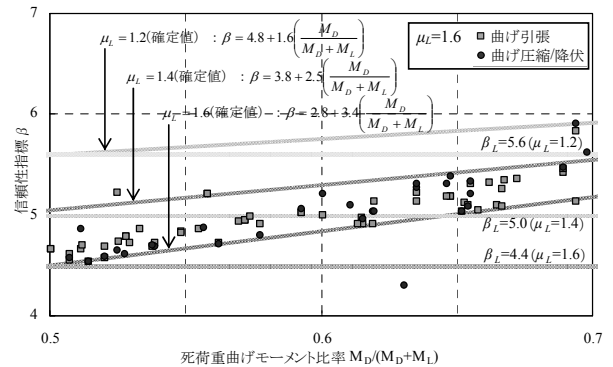
4. 目標信頼性指標 β_T に対する抵抗係数の検討

4.1 抵抗係数の検討条件および設定方法

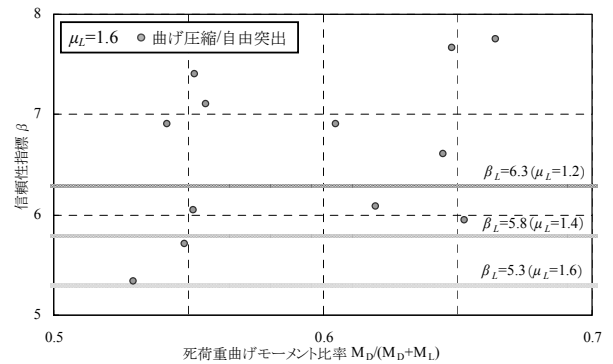
鋼桁橋の主桁フランジの曲げ圧縮・引張降伏強度、自由突出板座屈強度、補剛板座屈強度、および横倒れ座屈強度を対象に抵抗係数を設定する上での方針・方法をまとめるとともに、抵抗係数の設定を行った。以下に、検討条件と設定条件をまとめる。

(1) 基本とする照査書式

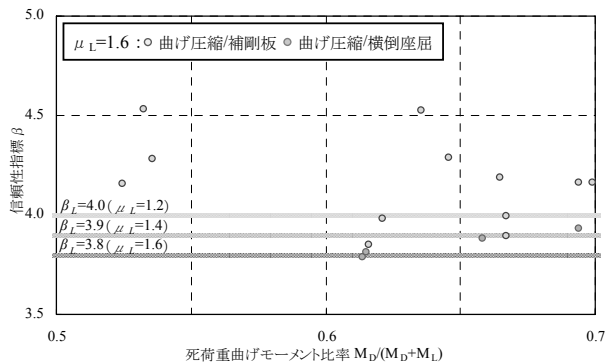
抵抗係数は、死活荷重が主たる荷重組合せとなる場合



(a) 曲げ引張・圧縮降伏強度



(b) 自由突出板座屈強度



(c) 補剛板座屈強度、横倒れ座屈強度

図-6 座屈強度別の信頼性指標 β

について、照査項目ごとに以下の書式を基本として、一つの確定値（諸元等のパラメータを含まないの意味）として設定した。

$$\gamma_D D_k + \gamma_L L_k \leq \phi_R R_k \quad (3)$$

ここに、

$\gamma_D, \gamma_L, \phi_R$: 死荷重係数、活荷重係数、抵抗係数
 D_k, L_k, R_k : 死荷重、活荷重、抵抗を断面力もしくは応力で表現した特性値

(2) 特性値及び荷重項

降伏強度の特性値 σ_{yk} は保証降伏点とし、座屈強度の特性値 $\sigma_{ak} / \sigma_{yk}$ は、道示Ⅱに規定される基準耐荷力曲線とした。

荷重項における活荷重は確定値として扱うこととし、特性値は道示における設計活荷重強度（B活荷重強度）とした。死荷重係数 γ_D は、統計データにおいて平均値が基準値をわずかに超えるものがあつたため1.05とし、活荷重係数 γ_L は、信頼性指標 β_i の算出と同様に1.6（確定値）を基本とした。

(3) 目標信頼性指標 β_T

3.3に示したように、FORM法による信頼性指標 β_i （ i : 照査橋種、部位、項目別、の意味）の算定結果を踏まえ、目標信頼性指標 β_T は、照査項目毎に、現行設計の実績等と同等程度の信頼性を有するように断面決定部位における信頼性指標 β_i より下限値を目標に設定した。なお、照査項目毎に下限値が若干異なることから、引張・圧縮降伏強度における下限値に相当する $\beta_T = 4.5$ を中心に、3.5～5.5とパラメータとして与えた。なお、自由突出板座屈強度、補剛板座屈強度、および横倒れ座屈強度については、引張・圧縮降伏強度よりも低い値となっている。現行の設計実績を踏まえると、それぞれの抵抗強度に応じて β_T を設定することも考えられるが、本検討では全強度共通に与えることとした。

(4) 抵抗係数の算定

抵抗係数は、2.～3.の検討により試設計により得られた鋼断面における照査項目に対して、照査部位、項目ごとに得られた β_i より目標信頼性指標 β_T を仮定した上で、設計値法により算定した。基本変数が正規分布に従う場合、抵抗係数 ϕ_{Ri} は抵抗側の感度係数 α_{Ri} を用いて、

$$\phi_{Ri} = \left(1 - \beta_T \cdot \alpha_{Ri} \cdot \frac{\sigma_{Ri}}{R_i} \right) \cdot \frac{\bar{R}_i}{R_{ki}} \quad (4)$$

と表される。ここで、

R_{ki} : 照査部位ごとの抵抗強度の基準値（公称値）
 R_i : 照査部位ごとの抵抗強度の基本変数

（平均： \bar{R}_i 、標準偏差： σ_{Ri} ）

α_{Ri} : 感度係数

自由突出板座屈強度と補剛板座屈強度に関する抵抗係数については、信頼性指標 β 算定上の基準値（各幅厚比パラメータの実験値の下限値相当（平均値-2×標準偏差））を特性値 R_k として、抵抗係数 ϕ_{Ri} を算出した後、道示Ⅱの基準耐荷力曲線を特性値 R'_k とした場合の抵抗係数 ϕ'_{Ri} を算出した。抵抗強度設計値は、抵抗係数と特性値の積で表されることから、抵抗係数 ϕ'_{Ri} は次式で表される。

$$\phi'_{Ri} = \phi_{Ri} \frac{R_k}{R'_k} \quad (5)$$

ここで、

ϕ_{Ri} : 信頼性指標 β 算定上の基準値を特性値とした場合の抵抗係数

R_k : 信頼性指標 β 算定上の基準値を基にした特性値

ϕ'_{Ri} : 道示Ⅱの基準耐荷力曲線を特性値とした場合の抵抗係数

R'_k : 道示Ⅱの基準耐荷力曲線を基にした特性値

ここに、添え字 i は、各照査部位で算出された抵抗係数を意味している。

表-7 に抵抗係数の算出条件をまとめる。

4.2 試算結果と考察

(1) 座屈パラメータと抵抗係数との関係

図-7に、目標信頼性指標 β_T を4.5、 $\mu_L = 1.6$ （確定値）とした場合の、設計値法で計算した場合の抵抗係数と座屈パラメータの関係を示す。図中には信頼性指標 β 算定上の基準値を特性値とした場合の抵抗係数 ϕ_{Ri} と、道示Ⅱの基準耐荷力曲線を特性値とした場合の抵抗係数 ϕ'_{Ri} の結果を示す。横軸は座屈パラメータ、縦軸は抵抗係数と σ_{ax} / σ_y である。

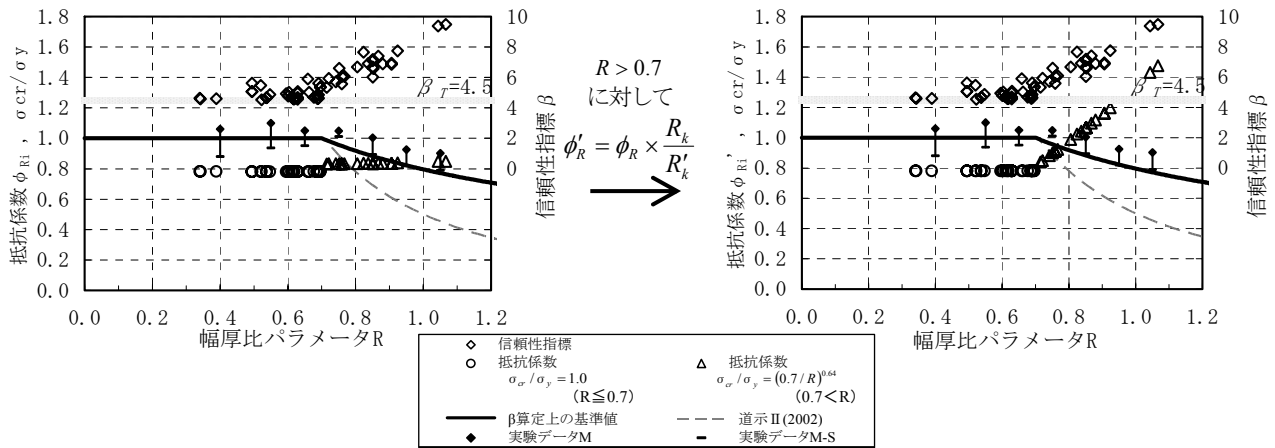
表-7 抵抗係数一覧

(a) 抵抗係数算出の条件一覧

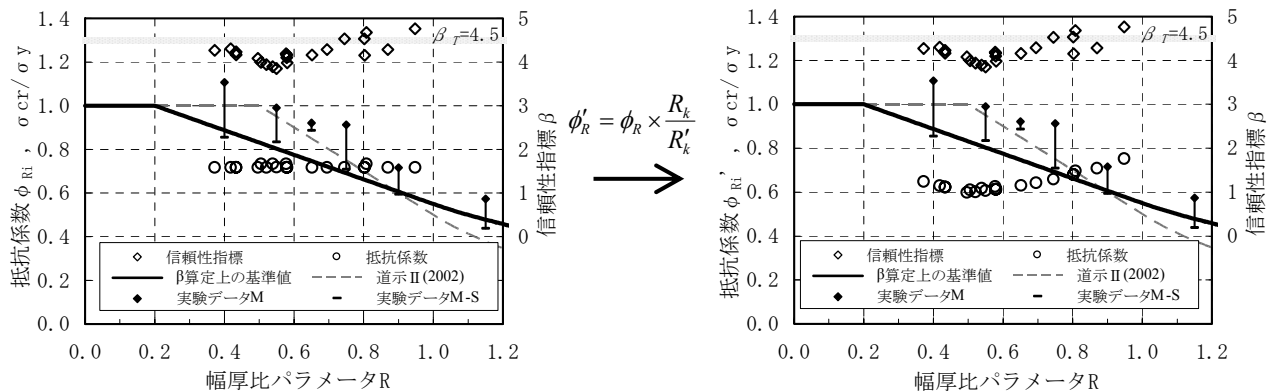
| 抵抗係数算出の条件 | | 備考 | |
|-----------|------------|---------------------------------|----------|
| 目標信頼性指標 | β_T | 3.5, 4.0, <u>4.5</u> , 5.0, 5.5 | パラメータとする |
| 死荷重係数 | γ_D | 1.05 | |
| 活荷重係数 | γ_L | 1.2, 1.4, <u>1.6</u> | パラメータとする |

(b) 抵抗係数一覧（(a)の下線部の値とした場合）

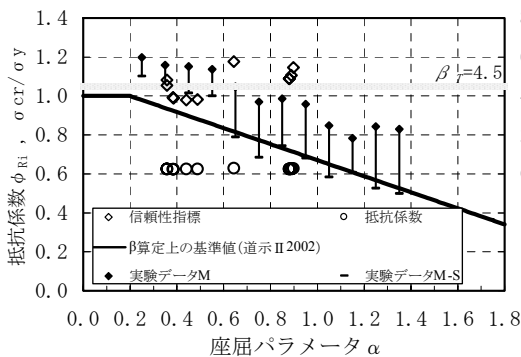
| 抵抗係数の種類 | 抵抗係数 | |
|-------------------|--------------|------|
| 引張降伏強度に関する抵抗係数 | ϕ_t | 0.8 |
| 圧縮降伏強度に関する抵抗係数 | ϕ_c | 0.8 |
| 自由突出板座屈強度に関する抵抗係数 | ϕ_{cr} | 0.8 |
| 補剛板座屈強度に関する抵抗係数 | ϕ_{cr} | 0.65 |
| 横倒れ座屈強度に関する抵抗係数 | ϕ_{clb} | 0.65 |



(a) 曲げ圧縮強度および自由突出板座屈強度（単純非合成 | 桁、連続非合成 | 桁）



(b) 補剛板座屈強度



(c) 横倒れ座屈強度

図-7 座屈パラメータと抵抗係数との関係

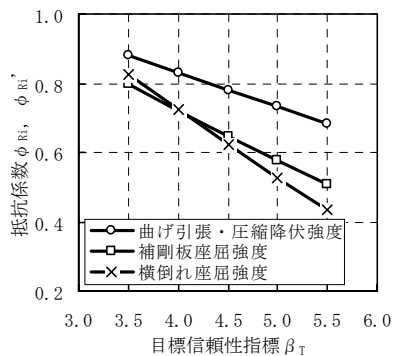


図-8 目標信頼性指標と抵抗係数との関係
 (活荷重係数 $\gamma_L = 1.2, 1.4, 1.6$)

曲げ圧縮強度および自由突出板座屈強度の抵抗係数 ϕ_R (図-7(a)) は、幅厚比パラメータ R によらずほぼ一定値となる。一方、道示IIの基準耐荷力曲線を特性値とした場合の抵抗係数 ϕ'_R は幅厚比パラメータ $R > 0.7$ の範囲において、 R が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。これは、 R が大きくなるほど道示IIの基準耐荷力曲線が安全側にずれていくため、目標信頼性指標 β_T を一定の条件では、座屈強度を低くなる（抵抗係数が小さくなる）ことによる。

補剛板座屈強度の抵抗係数 ϕ_R (図-7(b)) は、幅厚比パラメータ R によらずほぼ一定値となるが、抵抗係数 ϕ'_R は R で β 算定上の基準値と道示IIの基準耐荷力曲線との関係により変化している。 β 算定上の基準値が道示IIの基準耐荷力曲線を下回る範囲では、 ϕ'_R は ϕ_R と比べて小さくなっており、幅厚比パラメータ $R = 0.5$ 付近で両基準値が最も乖離しているため、 ϕ'_R が最小となっている。 $R = 0.9$ 付近では両基準値が一致しているため、 ϕ'_R は ϕ_R と同程度の値が得られている。

横倒れ座屈強度の抵抗係数 ϕ_R (図-7(c)) は、座屈パラメータ α によらずほぼ一定値となる。

(2) 目標信頼性指標と抵抗係数の関係

図-8に、自由突出板座屈強度を除き、活荷重係数を $\gamma_L = 1.2, 1.4, 1.6$ (即ち、 $\mu_L = 1.2, 1.4, 1.6$) とした場合の、抵抗係数 ϕ_{Ri} または ϕ'_{Ri} と目標信頼性指標 β_T の関係を示す。目標信頼性指標と抵抗係数の関係は、線形関係にあることがわかる。

設計値法において抵抗係数を算出する場合、式(4)に示すように FORM 法により得られる感度係数を用いる。確率変数が標準偏差を持つ場合、それらの確率変数ごとに感度係数が算出され、その二乗和は1となる。本研究では、活荷重を確定値と設定したため、活荷重の違いによる影響を受ける感度係数は算出されない。この結果、上記3通りの μ_L に対して抵抗側の感度係数は、変わりようがなくほぼ同じ値が得られた。したがって得られる抵抗係数は、活荷重係数に関わらずほぼ等しい結果となった。

図-8をもとに、各強度に対する抵抗係数 ϕ_{Ri} あるいは ϕ'_{Ri} と目標信頼性指標 β_T との関係について推定式で表すと以下のとおりとなる。

$$\text{曲げ引張・圧縮降伏強度} : \phi_{Ri} = -0.1\beta_T + 1.2 \quad (7)$$

$$\text{補剛板座屈強度} : \phi'_{Ri} = -0.1\beta_T + 1.3 \quad (8)$$

$$\text{横倒れ座屈強度} : \phi_{Ri} = -0.2\beta_T + 1.5 \quad (9)$$

5. 部分係数設計法に基づく試設計⁴⁾⁶⁾

5.1 検討内容

本章では、設定した抵抗係数により適切な断面設計が実現しているかどうかを評価するために、得られた抵抗係数を用いて部分係数設計法書式による試設計を行い、現行道示との β_i の変化傾向 (β_T に概ね近い、もしくは大きい値となっているか)を確認するとともに、鋼断面の現行の許容応力度設計との比較を行い、書式変換の影響を分析することとした。

部分係数設計法書式による試設計ケースは、表-1に示す検討ケースのうち、単純非合成I桁 (S-NN-20～S-NN-55)、連続非合成I桁 (C-NN-40, C-NN-55)、3径間連続鋼床版1箱桁 (CB-S-100, CB-S-200) の9ケースとした。

部分係数設計法書式による照査項目は、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、横倒れ座屈強度およびせん断強度とする。その他の照査項目については、抵抗係数の検討を行っていないため、現行の道示IIに従い設計する。

部分係数設計法に基づく試設計と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および信頼性指標 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。部分係数設計法により得られた鋼桁断面の有する信頼性指標 β は、3.と同様の方法により算出し、解析方法には FORM 法を用いた。鋼材降伏強度、鋼材物理定数、座屈強度、死荷重強度には表-3、表-4に示す統計量を使用した。 β の解析位置は、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 (断面力による断面決定位置)とする。

照査に用いる部分係数は、これまでの算定結果を基に、表-7に示す数値とした。ただし、せん断強度に関する抵抗係数については、曲げ引張強度と同じ値とした ($\phi_s = 0.8$)。

5.2 計算結果と考察

(1) 断面諸量の変化

図-9に現行設計法と部分係数設計法書式により得られた外桁の抵抗断面 (支間中央断面、中間支点上断面)を示す。得られる断面は β_T の設定により変化するものであるが、 $\beta_T = 4.5$ とした本検討では現行設計と比較して、引張・圧縮降伏強度で決定する部位は、フランジ厚が減少する傾向が見られ (SB-S-100 10-C断面 (下フランジ)を除く)、横倒れ座屈強度で決定する部位は、フランジ厚が増加する傾向が見られた。

図-10に部分係数設計法による場合の外桁支間中央断面の断面積および断面二次モーメントの変化率 (部分係数設計法による鋼桁断面諸量/許容応力度設計法による鋼桁断面諸量) -1) について、死荷重曲げモーメント比率で整理した結果を示す。図-11に主部材の鋼重 (主桁、横桁、対傾構、横構、高力ボルト) および外桁支間中央のたわみ値の変化率について、最大支間長で整理した結果を示す。

部分係数設計法書式により得られた抵抗断面は、今回、 $\beta_T (= 4.5)$ を β の下限值側 (S-NN-30における下限値に概ね近い値)で設定したことから、S-NN-30では断面積、断面二次モーメントは-1%程度の変化であり、鋼重についても-2%程度の変化である。橋種別に見ると、鋼重のみ若干増加したケースもみられるが、鋼桁断面、鋼重は支間が長くなると減少し、支間が長くなるにつれて減少率は大きくなる傾向となった。また、S-NN-20では活荷重たわみにより断面が決定し、抵抗断面はほぼ同じとなった。

活荷重たわみについては、橋種別に見ると支間が長くなるにつれて抵抗断面の減少割合が大きくなるため、増加割合が大きくなる結果となった。

(2) 信頼性指標 β の変化

図-12 に許容応力度法と部分係数設計法について、強度照査による断面決定部位における信頼性指標 β と死荷重曲げモーメント比率との関係を示す。許容応力度法により得られた断面では、曲げ引張・圧縮降伏強度については、曲げモーメント比率の増加に応じて β の下限値が増加する傾向がみられたが、部分係数設計法により得られた断面では、死荷重曲げモーメント比率にかかわらず、全体的に目標信頼性指標である 4.5 に近づくことがわかる。圧縮補剛板座屈強度および横倒れ座屈強度については、許容応力度法では β の下限値が 3.8 程度であったものが、目標信頼性指標である 4.5 に近づく傾向が見られる。図-13 に許容応力度法と部分係数設計法について、単純非合成 I 桁における強度照査による断面決定部位に

おける信頼性指標 β と支間長との関係を示す。部分係数設計法については、図-11 に示した鋼重変化率も合わせて示した。許容応力度法では β は広範囲にばらついていたが、部分係数設計法では目標信頼性指標である 4.5 を中心に狭い範囲にばらついている。

以上、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より、桁断面諸元や信頼性指標 β については概ねコードキャリブレーションを実施した場合の想定結果が得られ、現行設計とかけ離れた結果にないことが確認された。

6. 道示Ⅱのドラフトについて

鋼桁橋の設計に関わる主要な部分について、前述の研究成果を取り込んだ形で、部分係数設計法書式に基づく

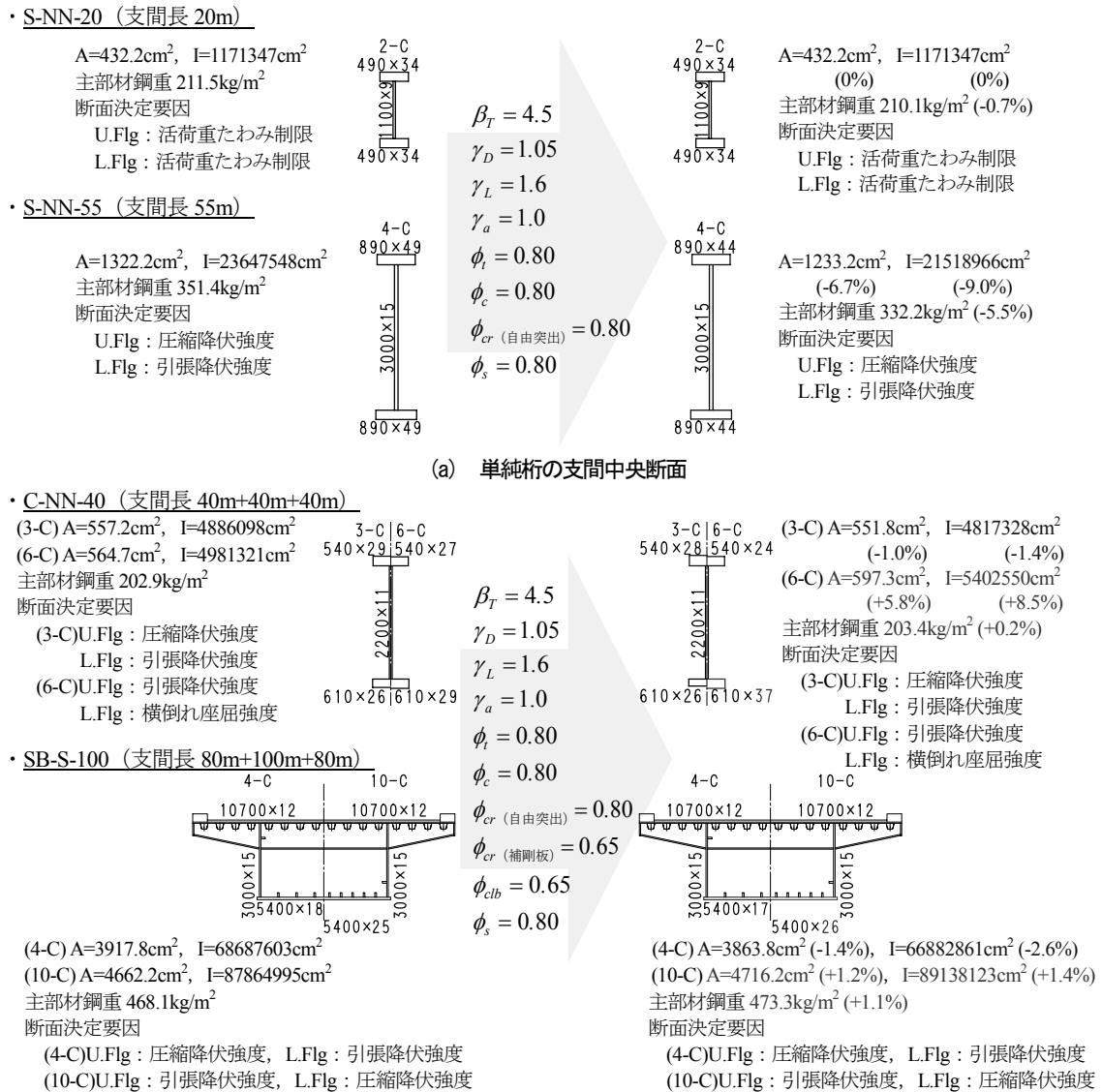


図-9 設計法の違いによる鋼桁断面の比較例

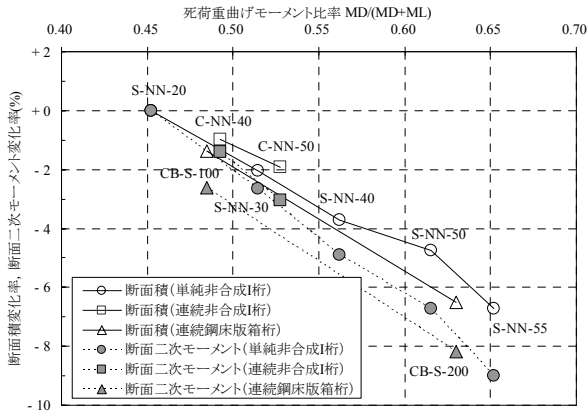


図-10 部分係数設計法による場合の鋼桁断面の変化率 (外桁支間中央断面)

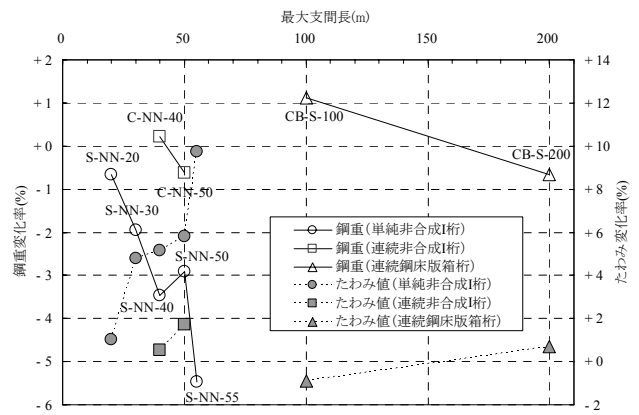
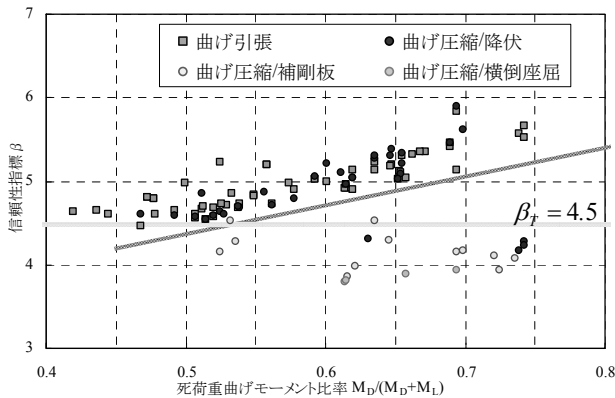
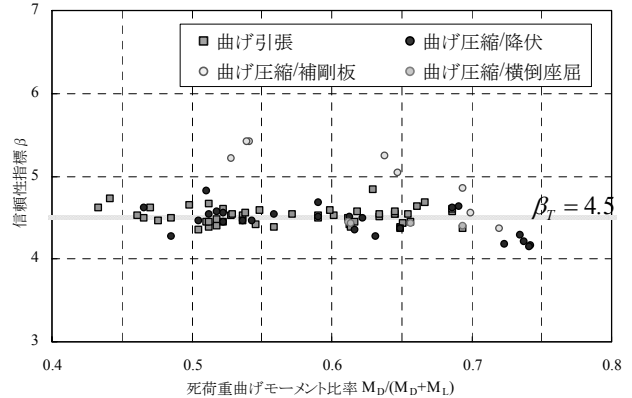


図-11 部分係数設計法による場合の鋼重変化率、たわみ変化率 (橋全体)



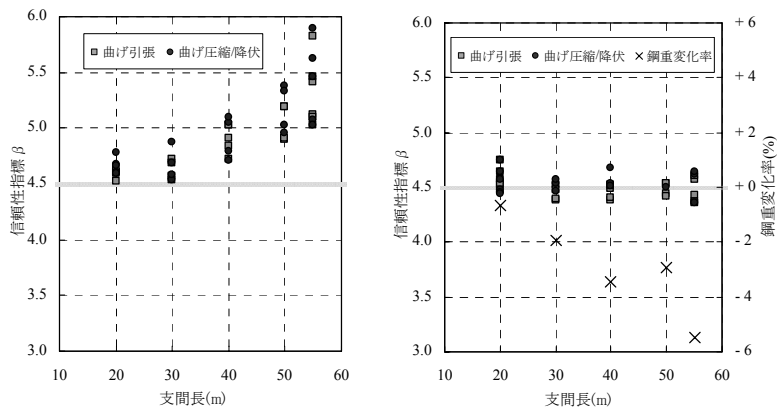
(a) 許容応力度設計法



(b) 部分係数設計法

注) 図(a) は、図-6 の再掲であるが、本章で対象としていない橋種データは除外した。

図-12 鋼桁断面の信頼性指標 β



(a) 許容応力度設計法

(b) 部分係数設計法

図-13 信頼性指標 β と支間長との関係 (単純非合成I桁)

道示IIのドラフトの作成を行った。図-14に1章~7章までの目次構成を示す。

7. まとめ

部分係数設計法書式に基づく鋼道路橋上部構造の設計法構築のための基礎資料とするため、標準的な橋梁形式である鋼桁橋の主桁フランジの曲げ圧縮強度と曲げ引張強度を対象として、現行設計基準で設計された橋梁の信頼性指標 β と、目標信頼性指標 β_T に対する抵抗係数の傾

向について検討するとともに、抵抗係数の設定までの一連の手順・方法を取りまとめ、抵抗係数の提案を行った。また、得られた抵抗係数を用いて部分係数設計法書式に基づき、鋼桁断面の試設計を行い、現橋との断面諸元、信頼性指標 β と比較分析を行った。本検討によって得られた主な結論を以下にまとめる。

(1) 信頼性指標 β の検討結果

- 活荷重統計量の μ_L をパラメータとし、照査項目・照

| | |
|--|--|
| <p>1章 総則</p> <p>1.1 適用の範囲</p> <p>1.2 設計の前提となる施工の条件</p> <p>1.3 設計の前提となる維持管理の条件</p> <p>1.4 設計計算の基本</p> <p>1.5 用語の定義</p> <p>1.6 設計図等に記載すべき事項</p> <p>2章 設計の基本</p> <p>2.1 一般</p> <p>2.2 設計に用いる荷重と作用の組合せ</p> <p>2.3 応答値の計算</p> <p>2.4 限界値の設定</p> <p>3章 材料</p> <p>3.1 一般</p> <p>3.2 要求特性・品質</p> <p>3.2.1 鋼材</p> <p>3.2.2 コンクリート</p> <p>3.3 物理定数</p> <p>3.4 強度特性値</p> <p>3.4.1 一般</p> <p>3.4.2 鋼材の強度特性値</p> <p>3.4.3 溶接部および接合用鋼材の強度特性値</p> <p>4章 性能の照査</p> <p>4.1 一般</p> <p>4.2 限界状態1の照査</p> <p>4.3 限界状態2及び限界状態3の照査</p> <p>4.4 設計限界値</p> <p>5章 部材</p> <p>5.1 総則</p> <p>5.1.1 一般</p> <p>5.1.2 二次応力に対する配慮</p> <p>5.1.3 相反応力部材</p> <p>5.1.4 交番応力部材</p> <p>5.2 抵抗係数</p> | <p>5.3 板部材の照査</p> <p>5.3.1 一般</p> <p>5.3.2 圧縮応力を受ける両縁支持板</p> <p>5.3.3 圧縮応力を受ける自由突出板</p> <p>5.3.4 圧縮応力を受ける補剛板</p> <p>5.3.5 補剛材</p> <p>5.4 骨組部材の照査</p> <p>5.4.1 一般</p> <p>5.4.2 軸方向引張力を受ける部材</p> <p>5.4.3 軸方向圧縮力を受ける部材</p> <p>5.4.4 曲げ引張力を受ける部材</p> <p>5.4.5 曲げ圧縮力を受ける部材</p> <p>5.4.6 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材</p> <p>5.4.7 せん断力あるいはねじりモーメントを受ける部材</p> <p>5.4.8 曲げモーメントとせん断力を同時に受ける部材</p> <p>5.4.9 二軸応力を受ける部材</p> <p>5.4.10 圧縮力を受ける山形及びI形断面を有する部材</p> <p>5.5 鋼管部材の照査</p> <p>5.5.1 軸方向力を受ける鋼管部材</p> <p>5.5.2 曲げモーメントを受ける鋼管部材</p> <p>5.5.3 せん断力を受ける鋼管部材</p> <p>5.5.4 軸方向力と曲げモーメントを受ける鋼管部材</p> <p>5.5.5 軸方向力とせん断力を受ける鋼管部材</p> <p>5.6 ケーブルの照査</p> <p>5.7 支承部材の照査</p> <p>5.7.1 一般</p> <p>5.7.2 支圧を受ける部材</p> <p>5.7.3 アンカーボルトおよびピン</p> <p>5.7.4 仕上げボルト</p> <p>5.8 部材に関する構造細目</p> <p>5.8.1 鋼材の最小板厚</p> <p>5.8.2 部材の細長比</p> <p>5.8.3 孔あき板</p> <p>5.8.4 引張山形鋼の有効断面積</p> <p>6章 耐久性能の検討</p> <p>6.1 一般</p> <p>6.2 防食設計</p> <p>6.3 疲労設計</p> <p>7章 疲労設計</p> <p>7.1 一般</p> <p>7.2 継手の疲労強度</p> <p>7.2.1 継手の疲労設計曲線</p> <p>7.2.2 継手の強度等級</p> <p>7.2.3 平均応力（応力比）の照査</p> |
|--|--|

図-14 鋼橋編ドラフトの主要部分目次構成 (1章～7章)

査部位別の信頼性指標 β の試算を行い、活荷重統計量に対するばらつきの傾向を把握した。

- 鋼桁断面の目標信頼性指標 β_T については、現橋の断面の曲げ引張・圧縮強度に対する β の下限値は、 $\mu_L=1.6$ (確定値)とした場合、おおよそ4.5程度であり、 μ_L を1.2～1.6と変えた場合、4.5～5.6まで変化し、補剛板座屈強度および横倒れ座屈強度に対する β の下限値は、3.8～4.6まで変化することがわかった。
- 曲げ引張・圧縮強度に対して、 μ_L を変えた場合 (1.2

～1.6)の結果を基に、 β の下限値および β の下限値の近似式を提案した。

(2) 抵抗係数の検討結果

- 曲げ引張・圧縮降伏強度、補板座屈強度および横倒れ座屈強度に対する抵抗係数と目標信頼性指標との関係についてそれぞれ近似式を提案した。
- また、目標信頼性指標 β_T を4.5、 $\mu_L=1.6$ (確定値)、死荷重係数 $\gamma_D=1.05$ 、活荷重係数 $\gamma_L=1.6$ とした場合の抵抗係数を一例として提示した。

(3) 部分係数設計法書式による試設計

- (2) で試算した抵抗係数を用いて、死荷重係数 $\gamma_D = 1.05$ 、活荷重係数 $\gamma_L = 1.6$ として、9 ケースの橋梁に対して部分係数設計法に基づき試設計を行った。

桁断面諸元や信頼性指標 β については、コードキャリブレーションを実施した場合に想定どおりの結果が得られ、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。

すなわち鋼桁の断面積は、当初の設計断面における β と目標信頼性指標 β_T との大小関係により、橋梁形式別に死荷重曲げモーメント比率が大きくなる、すなわち支間が長くなるにつれて減少し、逆に活荷重たわみは、許容値は満足するものの増加する傾向が見られた。

- また、曲げ引張・圧縮降伏強度に関して、部分係数設計法により得られた断面では、死荷重曲げモーメント比率にかかわらず、想定どおり、目標信頼性指標である 4.5 に概ね近づく傾向が見られた。

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) 清水英樹、村越潤、梁取直樹、小森大資：鋼げた橋の信頼性指標 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、2008.9.
- 6) 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、2008.9.
- 7) 村越潤、梁取直樹、有馬敬育、清水英樹、小森大資：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.
- 8) 都市局都市計画課長、道路局企画課長通達：道路の標準幅員に関する基準（案）、1975.7.
- 9) 小森大資、村越潤、梁取直樹、清水英樹：確率分布形状の違いが信頼性指標、抵抗係数および設計断面に与える影響の検討、第 64 回年次学術講演会（投稿中）
- 10) 福本嘯士：鋼骨組み構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究、平成元年度科学研究費（総合研究 A）研究成果報告書（課題番号：62302040）、1990.3.

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 order to make basic data to establish the design method based on the format of partial factored design, the procedure for derivation of resistance factors is organized, and numerical values of the factors are suggested for several design criteria in this study. In the procedure, reliability indices are calculated for compressive and tensile stresses in flanges of typical steel girder bridges that were designed by the current specification based on allowable stress method, and relationship between target reliability index and resistance factor are examined. Then using derived resistance factors, design calculations are conducted based on partial factor design method in order to compare reliability indices and cross sections of girders with those of bridges that were designed by the current method.

Key words : partial factor design method, highway bridge, steel girder bridge, reliability analysis, reliability index, first order reliability method, Monte Carlo simulation , resistance factor