

構造合理化に対応した鋼橋の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁）

研究担当者：村越潤，遠山直樹，澤田守

【要旨】

現在、道路橋の技術基準に関しては、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。本研究では、鋼道路橋上部構造を対象に、抵抗側の部分係数の設定方法の検討を行うとともに、構造合理化の観点から座屈強度関連の照査式や厚板・多列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法について検討を行うものである。

平成 24 年度には、部分係数設計法の導入に向けて、現行設計法との整合性の確保を基本方針として、鋼部材としての限界状態、要求性能及び抵抗側の部分係数の設定方法に関する検討を行った。

キーワード：構造合理化，部分係数設計法，抵抗係数，高力ボルト摩擦接合，すべり耐力，座屈強度

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基準については、「土木・建築にかかる設計の基本」（国土交通省，2002 年）¹⁾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²⁾（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。

過年度に実施した重点プロジェクト研究（平成 17-20 年度）では、道路橋設計への部分係数設計法の導入に向けた検討を行い³⁾、鋼桁橋を対象に部分係数の設定の考え方、具体的数値及び部分係数書式に基づく基準試案を提示している。今後は、荷重係数の検討を踏まえた上で、鋼桁以外の形式も含めた抵抗係数の設定に向けた検討を行う必要がある。併せて、個別部材の強度照査規定に関しては、コスト縮減に向けた構造合理化を踏まえ、規定の充実を図っていく必要がある。

本研究では、鋼道路橋上部構造を対象に、抵抗側の部分係数の設定方法の検討を行うとともに、構造合理化の観点から座屈強度関連の照査式や厚板・多

列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法について検討を行うものである。

平成 21～23 年度には、主として高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を行い、塗膜厚等の接合面の塗装条件がすべり係数に与える影響について検討した。また、鋼アーチ橋や鋼トラス橋の圧縮部材として使用頻度の高い溶接箱断面部材の座屈強度を対象として、実構造断面諸元の整理、強度の支配因子である残留応力データの収集、弾塑性 FEM、既往の実験データの比較分析等を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線について検討し、以下の成果を得た。

- ・圧縮力を受ける箱断面柱の基準耐荷力曲線（案）
- ・厚板多列高力ボルト継手の設計法（改定案）

これらの検討成果は、平成 24 年 2 月に改定された道路橋示方書に反映されたところである。

平成 24 年度は、部分係数設計法の導入に向けて、現行設計法との整合性の確保を基本方針として、鋼部材としての限界状態、要求性能及び抵抗側の部分係数の設定方法に関する検討を行った。

2. 研究内容

これまで現行基準で設計された鋼道路橋の信頼性レベルや鋼部材の抵抗側部分係数（以下、抵抗係数）に関して、過去には文献 4)～6)等、最近では文献 7)等多くの調査研究が行われてきている。ただし、これらの信頼性を考慮した設計法の実務への適用に関しては、長年の実績のある現行の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く、現行設計基準が有する信頼性を評価し、抵抗係数を具体的に提示するという、実用化に重点をおいた系統立てた検討が必ずしも行われてきているわけではない。

土木研究所では過年度までに鋼道路橋の大半を占める鋼桁橋を対象として、現行設計法の信頼性評価や、抵抗係数の設定に関する検討を行ってきた³⁾。平成24年度の検討ではこれらの検討結果を元に、照査書式について現行設計との整合性の観点から検討を行った。具体的には、鋼橋上部構造に要求される性能を満足することを検証するために必要な限界状態及び工学的な評価指標の設定を行い、それぞれの限界状態に対する抵抗係数の設定方法を検討した。

3. 道示の各種強度規定における安全率

鋼橋上部構造の設計では、荷重に対する安全性等の照査に関して、荷重組合せによる作用応力度と安全率を考慮して設定された許容応力度を比較することにより照査する方法（許容応力度設計法）が用いられている。安全率については、材料または部材の限界状態とする強度に応じて1.7~4.0に示す値が確保されるように規定されている。安全率の値は、設定当時の技術水準や経験等の時代背景を踏まえて設定されてきており、強度規定間の整合性が必ずしも図られていない部分も見受けられる。

各種許容応力度規定の基本となる強度（以下、基準耐力）については、改訂当時の知見に照らして概ね以下の考え方を基本に設定されているものと考えられる。

- ① 耐力に影響する構造パラメータを考慮するとともに、初期不整等の設計・施工の条件を踏まえた上での、実験結果もしくは解析結果で得られた耐力の下限値を基本に設定

- ② 座屈のように耐力を超える荷重や変形を受けた時に、最大荷重以降、耐力が急激に低下する場合（座屈パラメータが大きく、ねばりのない構造となる場合）に対しては、耐力の下限値よりも、さらに安全余裕をもたせた基準耐力曲線を設定

上記に該当する例として、②では自由突出板の圧縮強度が挙げられ、今後、必要な安全余裕を確保した上で、適切な基準耐力曲線の設定を行う必要があると考えられる。

また、降伏や座屈に対する安全率は概ね1.7程度に設定されているが、その経緯は以下の通りである⁸⁾。「日本国内で明確に許容応力度の字句が出てくるのは、関場茂樹の著書（標準橋梁仕様書）と思われるが、この中で破壊強度に対し安全率3を与えている。このことは、降伏点を破壊の2/3としたうえで、降伏点に2の安全率を考えたものと想定されるとされている。その後、昭和35年（1956年）の道路橋示方書改訂の際、JIS改訂に伴い、同クラスの鋼種（SS41）に、降伏強度の下限が23kgf/cm²と新規格が設けられたことにより、鋼材の安全率は降伏点に対し、約1.7となった。」としている。

このような経緯を踏襲して、現行における引張部材の設計限界値は、降伏強度から安全率1.7程度を、引張強度から安全率2.2程度を確保するように定められている。また圧縮部材（座屈の生じる場合）の設計限界値は、座屈強度に対し安全率1.7程度を確保するように定められている。

4. 部材等の限界状態の整理と照査

鋼橋上部構造を構成する部材等の限界状態に関しては、橋の重要度、橋全体の性能や各種作用に対して考慮する限界状態に応じて、床版、床組、桁など

表-4.1 耐力性能に関する鋼橋の部材等の限界状態

使用限界状態	部材等の応答が可逆性を有し、かつ、有害な変位、変形又は振動が生じないとみなせる限界の状態
修復限界状態	部材等の損傷の程度を限定的とし、修復が容易に行いうる範囲に留まるとみなせる限界の状態
終局限界状態	部材等の強度に低下が生じないとみなせる限界の状態

表-4.2 耐力性能に関する部材等の照査項目の例

限界状態 設計で 考慮する状況	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
永続支配	・変形・振動 (渦励振風速, 変位制限値)	—	・変形・振動 (発散振動風速)
変動支配	・強度 (降伏強度, すべり強度) ・変形・振動 (変位制限値)	—	・強度 (引張強度, 座屈による最大強度) ・変形・振動 (変位制限値)
偶発支配	—	・強度(最大強度) ・変形(各限界状態に応じた変位)	

の部材等ごとに具体的に設定することも考えられるが、橋全体系の性能を満足する部材等の組合せは複数想定され、各組合せ全てを網羅して橋の限界状態を設定するのは困難であると考えられる。このため、部材等の限界状態を設定し、これを適切に組み合わせ、橋全体系の性能を代表させることとした。なお、部材等の限界状態は、材料・構造によらない普遍的な表現として、供用性、修復性、安全性の観点から、表-4.1に示すとおり耐荷性能に対して、3段階の限界状態を設定した。これに対して、鋼橋における部材等の限界状態の工学的な指標の例示として、耐荷性能における限界状態に用いる工学的指標の例を表-4.2に示す。

また、図-4.1に耐荷性能における部材等の限界状態を例示する。引張部材の場合には、降伏強度が使用限界状態に、引張強度が終局限界状態に対応する。圧縮部材の場合にも、同様に使用・終局限界状態に対応する点を概念的には図中に示すことはできるが、使用限界状態を工学的指標により設定するための十分な知見が必ずしも得られているわけではない。このため、圧縮部材に対しては、終局限界状態に対応する最大強度のみを設定して圧縮部材の限界状態を代表させることになる。また、曲げを受ける鋼桁の場合には、最大強度は、桁を構成する板部材や桁断面もしくは桁全体の降伏や座屈強度により表されることになる。

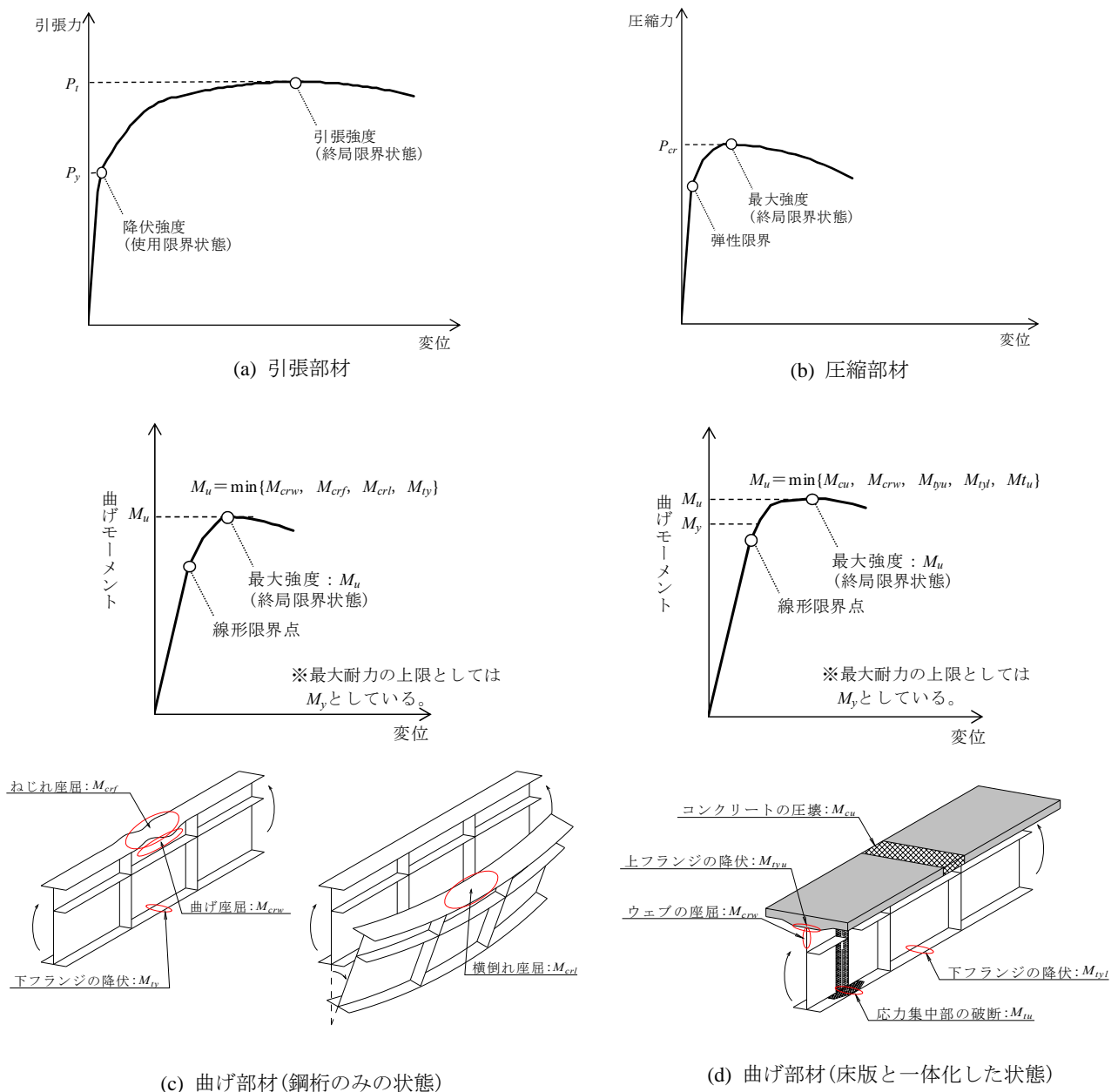
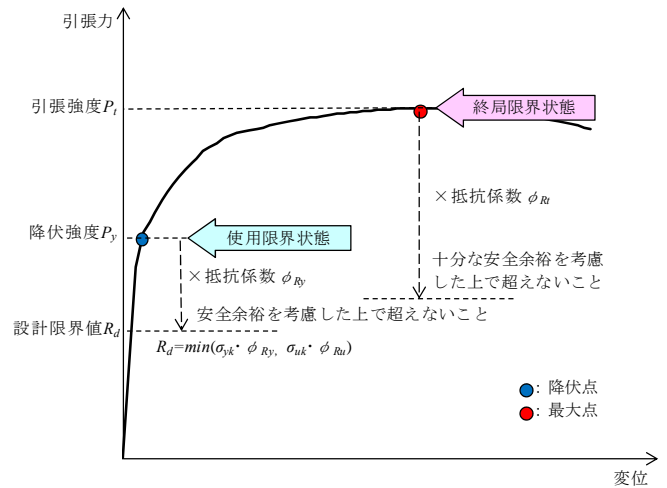


図-4.1 耐荷性能における部材等の限界状態の例

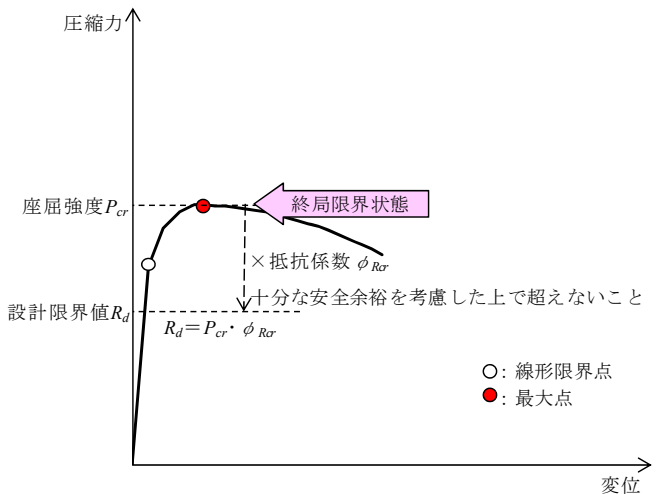
なお、終局限界状態を設定することの意味は、使用限界状態を超えて塑性化に至るような状態を許容する設計を指向することを意図しているものではない。部材として想定される限界状態に対して、適切な安全余裕（抵抗係数）を考慮することにより、塑性化させない状態にとどめることを求めるものである。

また、橋の構造条件と構成される部材の組合せによっては、必ずしも起こりえることが想定されにくい部材の限界状態も考えられる。しかしながら、部材という単位が、橋全体系の中で、どのような作用に対して、どのような位置付けで使用されるかを基準の中で特定することは難しい。また、性能規定化によって、新技術の採用を検討する機会が増加する中で、どのような材料・強度特性を有する部材等が適用されるか想定することも難しい。以上のようなことを踏まえると、部材レベルにおいては、図-4.1に例示するように、可能性のある限界状態を要素、部材、構造、橋全体の各レベルにおいて適切に設定しておくことが必要と考えられる。

部分係数設計法書式における設計限界値は、部材強度の特性値に抵抗係数を乗じた値として求められる。図-4.2に、引張部材及び圧縮部材（座屈の生じる場合）の設計限界値の例を示す。引張部材においては、使用限界状態に対して一定の安全余裕を確保するとともに、最大耐力である終局限界状態に対しては、十分な安全余裕を確保する観点での照査もあわせて行うこととしている。使用限界状態に対しては、降伏強度 P_y に抵抗係数 ϕ_{Ry} を乗じた点、終局限界状態に対しては、引張強度 P_t に抵抗係数 ϕ_{Rt} を乗じた点が設計限界値となる。終局限界状態である引張強度に対する照査については、現行道示では陽な形で示されておらず、降伏比の大きい高張力鋼（SM570材）の場合に対しては、降伏強度に対する安全率が若干高めとなるように設定されている。部分係数設計法で、現行道示の考え方を踏襲するためには、引張強度に対する抵抗係数を設定し強度照査を行うか、もしくは降伏強度に対する抵抗係数に対して、降伏比に応じた補正係数を別途設定する方法が考えられる。圧縮部材においては、前述の理由により、現時点では使用限界状態及び終局限界状態の両者に対する照査ではなく、最大強度である終局限界状態に対してのみ、十分な安全余裕が確保できているかを照査することとしている。よって設計限界値は、終局限界状態である座屈強度 P_{cr} に抵抗係数



(a) 引張部材



(b) 圧縮部材

図-4.2 各限界状態に対する設計限界値

ϕ_{Rcr} を乗じた点となる。

部材強度の特性値については、現行の設計基準との整合性を踏まえて設定するものとした。許容応力度の設定にあたっては、これまで材料強度として JIS 規格値や、部材強度として試験データを踏まえた下限値相当の基準耐荷力等が用いられてきた。このため、ここでは、試験データのばらつきを考慮したうえで、試験値がそれを下回る確率がある一定の値以下となることが保証された強度の値、またはそれと同等程度の値により設定することを基本としている。具体的には、これまでの許容応力度の設定における基準強度との整合を踏まえ、下限値相当(2.3%フラクタイル値(平均値-2×標準偏差))の値を特性値とすることを標準とした。

5. 抵抗係数の設定方法に関する検討

5.1 抵抗係数に含まれる安全余裕の内訳

抵抗係数 ϕ_R は、鋼材料や鋼部材の強度特性等に関する統計データを基に、信頼性設計の考え方も踏まえつつ設定した。具体的には、荷重係数と抵抗係数の組合せにより得られる安全余裕が、現行設計と大きく乖離しないように、現行基準の信頼性指標 β を評価し、抵抗係数を調整、設定した。設計限界値は次式で与えられる。

$$R_d = \phi_R \cdot R_k \dots\dots\dots (式 5.1)$$

ここに、 R_d ：設計限界値、 ϕ_R ：抵抗係数、 R_k ：部材等の抵抗強度の特性値(強度の下限值を基本に設定)

抵抗係数については、次式及び表-5.1 のとおり、その内訳の分類・整理を行い、係数設定の考え方の提案を行った。

$$\phi_R = \phi_M \cdot \phi_n \cdot \psi \dots\dots\dots (式 5.2)$$

ここに、 ϕ_M ：抵抗強度に対する係数、 ϕ_n ：部材等の重要度や破壊の影響度を考慮するための係数、 ψ ： ϕ_M 、 ϕ_n 及び荷重側の安全余裕とは別に確保しておくべき安全余裕を考慮するための係数

表-5.1 鋼部材における安全余裕の内訳(案)

係数	安全余裕	設定方法
ϕ_M	材料強度、部材耐力に応じた安全余裕	材料、モデル、及び幾何学的な不確実性(材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動、部材耐力の算定上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響等)を考慮して設定
ϕ_n	限界状態に応じた安全余裕	部材等の終局限界状態以降の強度特性を考慮して設定
ψ	ϕ_M 、 ϕ_n 及び荷重側の安全余裕とは別に確保しておくべき安全余裕	橋全体系として確保しておくべき安全余裕や上記部分係数には含まれない不確実要因を考慮して設定

5.2 抵抗強度に対する係数： ϕ_M

強度特性値を統計データの下限值相当(平均値-2×標準偏差)とした上で、抵抗強度に対する部分係数 $\phi_M=1.0$ とした。表-5.2 に抵抗強度に対する信頼性指標 β の試算結果を示すが、 β は概ね 2~3 程度の値となっており、強度照査項目間でも整合性が概ね確保されることになる。

表-5.2 抵抗側の強度特性値に対する信頼性指標

項目		β	
引張部材	引張降伏	2.3	
	引張強度	3.0	
圧縮部材	全体座屈	圧縮柱	2.5
		横倒れ座屈	2.6
	局部座屈	自由突出板	3.1
		両縁支持板	2.6
		補剛板	2.8

5.3 部材等の重要度や破壊の影響度を考慮するための係数： ϕ_n

係数 ϕ_n については、表-5.3 のとおり、各限界状態に至るまでの挙動及びそれ以降の強度・変形特性を考慮して安全余裕を設定した。

表-5.3 ϕ_n のイメージ

部材の例		使用限界状態	終局限界状態
引張部材		降伏強度に対して ≈ 1.0	引張強度に対して $\approx 0.77(=1.7/2.2)$
圧縮部材	終局強度が降伏に達する領域(座屈パラメータ小)	降伏強度に対して ≈ 1.0	—
	上記以外(座屈パラメータ中~大)	—	最大強度に対して $\approx 1.0 \sim 0.77$

ϕ_n : 大 ←→ 小
(安全余裕小) (安全余裕大)

引張部材に関しては、限界状態以降の強度特性を考慮して、使用限界状態(降伏強度)より終局限界状態(引張強度)に対して、道示における SM570 材の許容応力度の安全率を基本に、両者の安全余裕を設定した。

圧縮部材に関しては、前述のとおり基準耐荷力曲線の中に、安全率 1.7 とは別に安全余裕が考慮されている照査項目があり、必ずしも安全率が一律に設定されているわけではない。例えば、自由突出板においては、座屈パラメータに対して最大 5 程度の安全余裕が確保されている。この安全余裕を ϕ_n で考慮し、今後、図-5.1 に示すように基準耐荷力曲線の見直しと合わせて、統一的な ϕ_n の設定を検討する予定である。

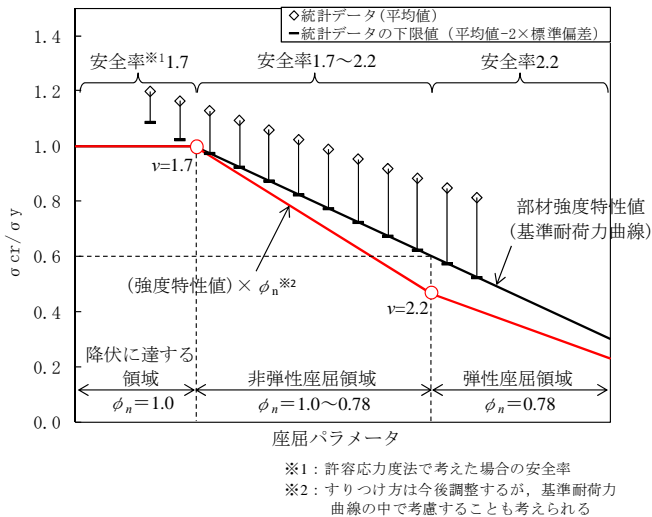


図-5.1 基準耐荷力曲線に対する係数 ϕ_n のイメージ

5.4 ϕ_M , ϕ_n 及び荷重側の安全余裕とは別に確保しておくべき安全余裕を考慮するための係数: Ψ

現行設計の安全余裕は過去の様々な経緯から設定されており、大きな過不足があるとは考えにくいいため、当面現行設計と同程度となるように設定することを基本としている。部分係数設計法書式により設計した場合に、現行設計法と乖離が生じる場合には、この係数により調整することも検討する。ただし、今後、この係数により確保されている安全余裕を分析し、さらに細分化することで、安全余裕を見直すことも考えられる。

5.5 抵抗係数の設定例

表-5.4 に抵抗係数 ϕ_R の内訳のイメージを示す。次期改定においては、抵抗係数について一つの係数に集約して提示していくことを考えているが、抵抗係数に含まれる安全余裕の意味を明確にするという観点から、細分化して提示するという考え方もある。抵抗係数の分割方法やそれぞれの係数の設定方法について引き続き検討していく予定である。

表-5.4 抵抗係数 ϕ_R の内訳のイメージ

部材・限界状態・限界値の例			$\phi_M \times \phi_n \times \Psi = \phi_R$			
引張部材	使用限界状態	降伏強度	1.0	1.0	0.60	0.60
	終局限界状態	引張強度	1.0	0.77	0.60	0.45
圧縮部材	終局限界状態	最大強度 (降伏強度に達する領域)	1.0	1.0	0.60	0.60
		最大強度 (弾性・非弾性座屈領域)	1.0	~ 0.77	0.60	~ 0.45

6. まとめ

本年度は、共通編に示す要求性能に対応して、鋼部材及び鋼上部構造の照査の基準となる限界状態を定義し、現行基準に示す照査の位置づけ、照査項目、工学的指標を整理し明確にしたうえで、設計限界値と設計応答値との比較による照査体系への考え方を示した。

また、抵抗係数の設定においては、従来より考慮されていた安全余裕の確保を基本としつつ、鋼材料や鋼部材の強度特性等に関する統計データを踏まえ、信頼性設計の考え方に基づき係数の設定を行うとともに、考慮する安全余裕に応じた抵抗係数の内訳の分類・整理を行い、係数設定の考え方を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I～V編，2002.3.
- 3) 土木研究所：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討，土木研究所資料，第4141号，2009.3.
- 4) 土木学会：構造物の安全性・信頼性，1976.10.
- 5) 東海鋼構造研究グループ：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用（上）（下），橋梁と基礎，1980.11-12.
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1997.5.
- 7) 日本鋼構造協会：土木構造物の性能設計ガイドライン，2001.10.
- 8) 日本道路協会：日本道路史，1977.

STUDY ON DESIGN RATIONALIZATION FOR STEEL BRIDGES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2013

Research Team : Bridge and Structural Engineering Research Group

Author : Jun MURAKOSHI

Naoki TOYAMA

Mamoru SAWADA

Abstract : For the next revision of Japanese Specification of Highway Bridges, partial factor design (PFD) based on reliability analysis is being investigated in order to secure consistency with international technical standard, and to make bridge design more rational and reliable. The goal of this study is to propose the resistance factors for the design of highway bridges and to rationalize the design of steel members, including compression member and high-strength bolted joint, based on experimental data. In FY2012, for the introduction of the partial factor design method, limit states and partial factors for the steel structures were discussed.

Key words : rational design, partial factor design method, resistance factor, high-strength bolted connection, slip-resistance