

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，
金田崇男，榎本忠夫

【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、部材等の実験データを基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。

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は、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の継手性能について、実験的・解析的検討を行った。座屈強度関連の照査式については、鋼箱形断面圧縮部材及び局部座屈を考慮する3部材について、座屈パラメータに対する既往の実験及び解析データの整理、分析を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線の提案を行った。また、抵抗側の部分係数の設定方法の検討については、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及び抵抗側の部分係数の設定方法の提案を行い、安全余裕の分析を行った。

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、文献1)の考え方に沿って、検討・改定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、要求性能の明確化及び充実化並びにみなし規定の充実化に向けた次期改定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限界状態設計法の1つである部分係数設計法の導入検討が進められている。

過年度に実施したプロジェクト研究（平成 17-20 年度）では、鋼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及び部分係数書式に基づく基準試案を提示している。一方で、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とともに、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。

本研究は、鋼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 21～24 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を行った。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整理分析等を行い、設計に用いる基準耐荷力曲線について検討し、以下を提案した。

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

これらの検討成果は、平成 24 年 2 月に改定された道示に反映されたところである。

平成 25 年度は、鋼部材としての限界状態及び抵抗側の部分係数の設定方法並びにその具体的な数値について検討した。また、合理化の観点から、局部座屈強度規定を対象として、座屈パラメータに対する

既往の研究データを整理分析し、設計に用いる基準耐荷力曲線を検討した。

2. 高力ボルト摩擦接合継手の合理化に関する検討

2.1 研究の背景と課題

近年、部材の簡素化、構造の合理化を図った鋼橋の普及により、板厚 50mm を超える厚板鋼板を使用する事例が増えてきている。鋼板の接合方法には、主に溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手の 2 種類が用いられているが、溶接接合は厚板になるほど多層溶接となり品質管理や現場工期が課題となるため、施工性・経済性の面から、高力ボルト摩擦接合が採用される場合が多い。一方、高力ボルト摩擦接合の設計にあたって、道示では、接触面の処理方法に関わらず一定のすべり係数やボルト列数の制限を規定しており、これらが合理化の妨げとなって、継手が多列化・大型化する事例や溶接接合を採用する事例が見られる。また、高力ボルト摩擦接合の厚板鋼板への適用については、ボルト列数、フィラー、肌すき、塗膜厚等の各種構造諸元がすべり耐力に及ぼす影響について、設計法として明らかにすべき点も残されている。

2.2 研究内容

本研究では、平成 21 年度より、厚板・多列となる高力ボルト摩擦接合継手の適用を前提とした設計法の提示を目的として、大阪市立大学との共同研究「高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究」⁴⁾として、厚板鋼板を用いた多列の高力ボルト摩擦接合継手を対象として、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の継手性能について、実験的・解析的検討を行った。主な検討内容を以下に示す。

- (1) 厚板多列継手試験体を用いたすべり耐力試験による各種構造諸元の影響の検討
- (2) 多列配置モデルを用いた FEM 解析による荷重伝達機構の分析
- (3) 既往のすべり耐力試験結果も含めたすべり係数の分析
- (4) (1) ~ (3) を踏まえた摩擦接合継手の設計法の検討

すべり耐力試験では、厚板鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合継手試験体 51 体を製作してすべり耐力試験を行い、母板・連結板の厚さ、ボルト列数、

フィラープレート、肌すき、塗膜厚などの構造諸元が継手性能に及ぼす影響について検討を行った。数値解析では、各種構造諸元についてパラメータ解析を実施し、すべり挙動及びすべり耐力に与える影響について分析を行うとともに、厚板を用いた高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達機構について検討を行った。

2.3 研究成果

本研究では、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した F10T-M22 の高力ボルト摩擦接合継手を対象に、板厚、ボルト列数及び母板間の板厚差をパラメータとした試験体のボルト軸力の計測及びすべり耐力試験を行い、厚板及び多列化や母板間の板厚差が継手性能に及ぼす影響について検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。なお、詳細な試験結果については、参考文献 5) にまとめている。

- (1) 接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した板厚 75mm で 12 列まで諸元を変化させた全ての試験体において、すべり係数は道示に規定されるすべり係数 0.4 を上回った。
- (2) 母板厚の影響に関して、ボルト軸力導入後の軸力残存率及びすべり係数 μ_2 とともに、試験体ごとの平均値で比較した場合、板厚による違いはほとんど見られなかった。ただし、母板厚 75mm で 3 列の試験体では、すべり係数のばらつきが大きいとともに、一部ではすべり係数が相対的に低いものも見られた。
- (3) 多列化の影響に関して、ボルト列数によるボルト軸力導入後の軸力残存率の違いは、ほとんど見られなかった。一方、すべり係数は、12 列の場合、8 列の場合と比べて母板厚 50mm では 1%、母板厚 75mm では 7% 低下した。また、継手内の母材と連結板間の相対変位量について、8 列及び 12 列の試験体では、すべり耐力に至るまでに継手中央と端部（内側、外側）で差が著しくなる挙動が確認され、端部側に作用力が大きくなる傾向にあることが、すべり係数の低下に影響を及ぼしたと考えられる。

3. 鋼箱形断面圧縮部材の耐力に関する検討

3.1 研究の背景と課題

鋼橋の圧縮部材の耐力に関しては、海外の設計基準等では初期不整や断面形状等の条件に応じて区分された複数の耐力曲線が与えられている。一方、

道示における基準耐荷力曲線は、設計の煩雑さの回避から、各種条件下の耐荷力曲線に対する下限値(圧縮側の残留応力(以下、残留応力)を $0.4\sigma_y$ (σ_y :鋼材の降伏点)、初期たわみを $L/1000$ (L :部材長)と仮定したI形鋼の弱軸に関する耐荷力曲線)を基本に設定されたものであり、既往の研究成果^{8)~9)}や複数耐荷力曲線が採用されている海外基準¹⁰⁾を踏まえると、耐荷力に影響を与える断面形状や初期不整に応じて強度分類することにより、耐荷力曲線を合理的に設定できる余地がある。

3.2 研究内容

本研究では、現行道示に準じた溶接箱形断面部材を対象として、初期不整(残留応力、初期たわみ)や断面形状等の諸条件が耐荷力に与える影響を解析的に分析するとともに、既往の研究成果による耐荷力推定式⁶⁾を基に、既往の耐荷力実験データ及び新たに実施した解析データを踏まえて溶接箱形断面部材の設計に適用するための耐荷力曲線を提案した。検討フローを図-3.1に、検討項目を以下に示す。

(1) 弾塑性有限変位解析による溶接箱形断面部材の耐荷力に関する検討

現行道示により設計された溶接箱形断面部材を対象として、断面形状や初期不整などをパラメータとした影響感度解析を、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析により行い、各種のパラメータが耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 溶接箱形断面部材の耐荷力曲線に関する検討

既往の研究成果の分析を行い、現行規定を満たす耐荷力実験結果や初期不整の計測結果を抽出し、前項の解析結果を踏まえて耐荷力に及ぼす影響の大きい因子である断面形状及び初期不整をパラメータとした耐荷力曲線の推定式を検証するとともに、初期不整の計測結果を踏まえ溶接箱形断面部材の耐荷力曲線について検討する。

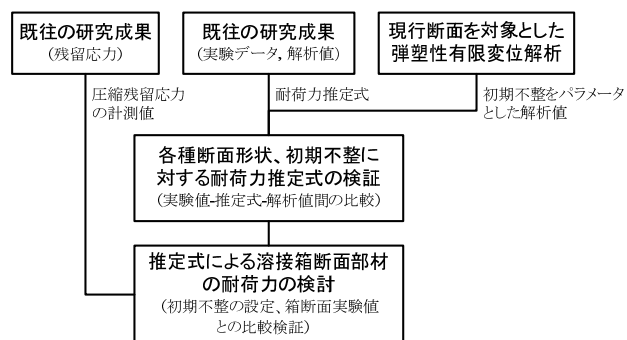


図-3.1 検討フロー

3.3 研究成果

本研究では、設計の合理化の観点から、圧縮部材として適用頻度の高い溶接箱形断面部材を対象として、初期不整や断面形状等が耐荷力に与える影響を解析的に検討するとともに、既往の実験データを含む研究成果の分析を行い、溶接箱形断面部材の設計に適用するための耐荷力曲線について検討した。

溶接箱形断面を対象とした種々のパラメータを用いた弾塑性有限変位解析により、初期不整(初期たわみ、残留応力)が耐荷力に与える影響を定量的に評価した。また、残留応力の分布形状やその大きさの違いによる断面内の塑性化の進展状況を明らかにし、これにより耐荷力に差異が生じることを確認した。詳細は文献11)にまとめている。

また、既往の実験データを整理するとともに(図-3.2)、初期不整(初期たわみ、残留応力)を変数とした信頼性の高い耐荷力曲線の推定式を用い、既往の残留応力の計測データを参考にして、残留応力を $0.25\sigma_y$ 、初期たわみを $L/1000$ とした溶接箱形断面部材の設計に用いる耐荷力曲線を提案した(図-3.3)。今回提案した耐荷力曲線は、溶接箱形断面部材に対して、H14道示の耐荷力曲線に比べて最大で10%程度大きく耐荷力を評価している。断面形状に応じてこれらの耐荷力曲線を使い分けることにより、設計の合理化に資するものと考えられる。

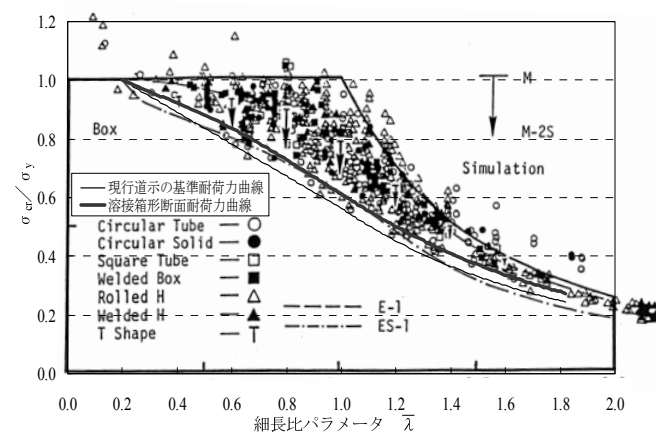


図-3.2 溶接箱形断面耐荷力曲線と既往の実験値^{8),9)}との比較

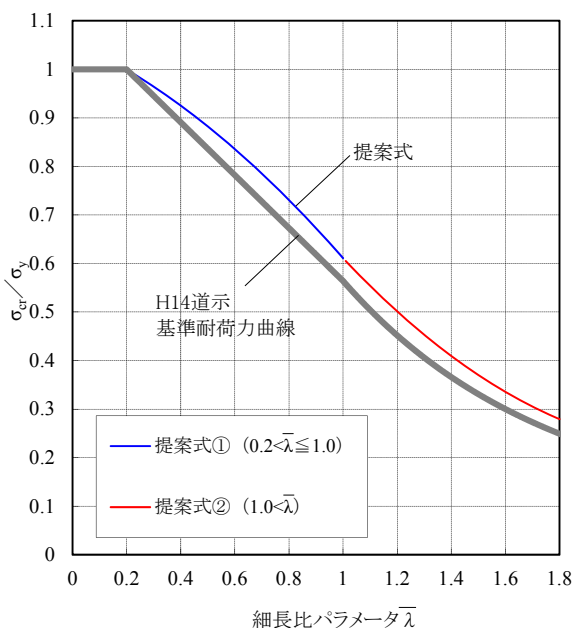


図-3.3 耐力曲線と推定式の関係

4. 部分係数設計法に関する検討

4.1 研究内容

これまで現行道示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 12)～14)等、最近では文献 15)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、長年の実績が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⁾。本研究では、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、部分係数設計法が抵抗特性等の不確実性の影響を考慮して適切な安全余裕を与える設計体系であり要求事項を明確なものとする必要があることから、許容設計応力度法における各種基準耐力と安全率設定の考え方を整理した。

また、鋼橋上部構造に要求される性能を満たす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。

4.2 道示の各種強度規定における安全率の整理

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対して表-4.1 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、改定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、実験データ及び解析データで得られた耐力の下限値を基本に設定
- (2) 座屈のように最大耐力（最大強度）を超える荷重や変形を受けた時に、それ以降、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設計基準耐力を設定

一方で、(2)の安全余裕については、現状の知見に照らすと以下の課題が挙げられる。

- ① 安全余裕の整合が必ずしも図られていないため、部分係数設計法を導入する段階で強度規定間の整合を図るのが難しくなる可能性がある。
- ② 部材の基準耐力は、本来耐力に影響する構造的特徴により強度分類されることが合理的な場合があるが、実務上の煩雑さを避けるべく、全分類の強度の下限値を基本に基準耐力を設定している場合があり、合理化の余地がある。

上記に該当する例として、①では自由突出板、両縁支持板の圧縮強度、②では柱（溶接箱断面）の圧縮強度が挙げられることから、適切な基準耐力の設定を行う必要があると考えられる。

現行基準における安全率と設計限界値（許容値）の関係について、引張部材及び圧縮部材（座屈の生じる場合）を例として図-4.1 に示す。これらは常時荷重に対する安全率の考え方を示したものであり、許容応力度の割り増しは考慮していない。

表-4.1 道示の主な強度規定と安全率

強度規定		想定する限界状態	基準耐力に対する安全率		改訂時期 ※1	基準耐力の考え方	
部材	1	許容軸方向引張応力度 許容曲げ引張応力度	引張降伏 ※ 降伏比が大きい場合には引張強度で規定	SM400, SM490Yほか SM570	1.70程度 (1.68~1.72) 1.76程度 (1.75~1.76)	S39 S48	JIS規格の下限值, 引張強度に対する安全率は3程度 JIS規格の下限值, 引張強度に対する安全率は2.2程度
	2	中心圧縮材の全体座屈	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本 ※2
	3	横倒れ座屈	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本
	4	山形及びT形断面を有する圧縮部材	全体座屈		1.70程度	S48	実験結果の下限値を基本
	5	両縁支持板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
	6	自由突出板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
	7	補剛板	局部座屈		1.70程度	S55	実験結果の下限値を基本 ※3
構造	8	アーチ面外座屈	面外全体座屈		2.00	S48	※4
	9	アーチ終局強度	主に面内全体座屈		1.70	S55	※5
製品材料	10	高力ボルト摩擦接合	すべり		1.70	H2	すべり係数0.4は, 実験の下限值
	11	仕上げボルト	降伏	強度区分 4.6	1.71	H2	
				強度区分 8.8	1.83	H2	降伏比が高いことを考慮して高めに規定
				強度区分 10.9	2.00	H2	降伏比が高いことを考慮して高めに規定
	12	アンカーボルト	せん断降伏		2.20~2.49	S14以前	施工性の不確実性などに配慮し, 許容応力度を70%~低減
	13	ケーブル	破断	吊橋	3.00	S48	※6
				斜張橋	2.50	H2	※7
14	ハンガーロープ	破断	直線部	3.50	S48	※8	
			曲線部	4.50	S48	※9	

- ※1 SI単位系への移行を除く
- ※2 各種の断面形状を対象とした実験結果の下限值相当としている。安全余裕は座屈パラメータの大小に関わらず一定としている
- ※3 座屈パラメータの大きい領域では、基準耐力曲線に安全余裕を持たせている
- ※4 当時の改訂根拠資料によれば、「座屈現象が直ちに落橋、人命の損傷を意味する座屈の場合は安全率を2にとる」としている
- ※5 非線形性の影響を考慮している
- ※6 降伏点に相当する0.7%全伸び耐力に対して2.0の安全率をとると破断に対する安全率は2.8となる、曲げ剛性等による二次応力も考えられるので安全率3.0をとることとしている
- ※7 吊橋に比べ、二次応力の影響が小さいことを考慮し、我が国での長大支間の斜張橋の実績、海外の基準等を参考としている
- ※8 死荷重の占める割合が小さく、活荷重応力の発生頻度も大となるため、としている
- ※9 ケーブル断面が大きい場合はハンガーを2つ折りにしてケーブルにかける方法をとることがある、この場合ハンガーは局部的に大きく曲げられるので、その影響を考慮している

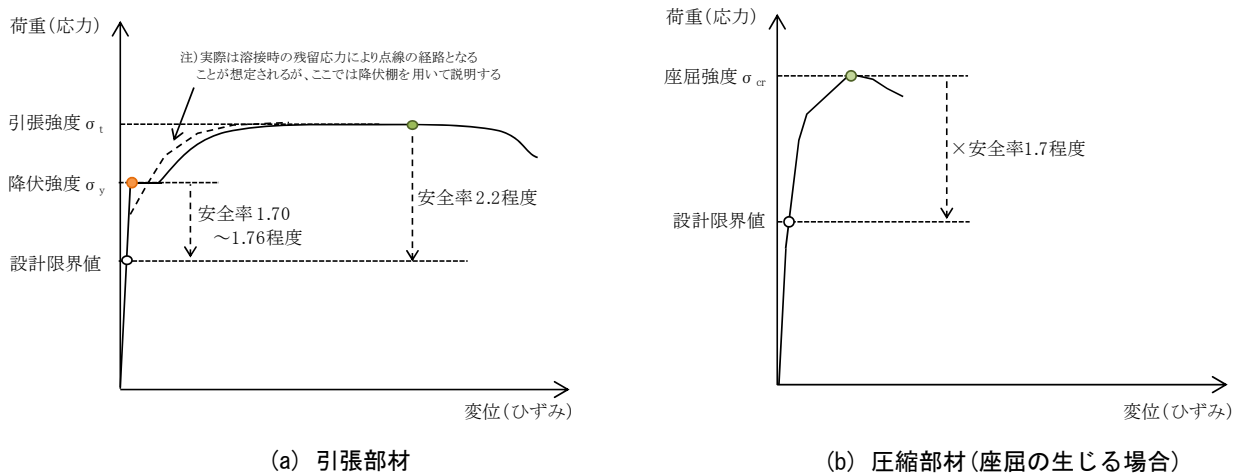


図-4.1 現行設計における設計限界値の例

引張部材の設計限界値は、降伏強度から安全率 1.7 程度を確保した点、または引張強度から安全率 2.2 程度を同時に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。

4.3 部材等の限界状態の整理と設計限界値

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たす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し、それを照査するのは困難であると考えられる。したがって、部材等の限界状態を設定したうえで、全ての部材等が各限界状態に対して適当な安全余裕を有することで、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-4.2 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、橋の耐荷性能に関する部材等の限界状態に用いる工学的指標の例を表-4.3 に示す。

また、図-4.2 に橋の耐荷性能に関す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、同様に使用限界状態及び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または桁全体の降伏や座屈強度により表されることになる。

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-4.2 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-4.3 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、また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 ϕ_{Rcr} を乗じた点となる。

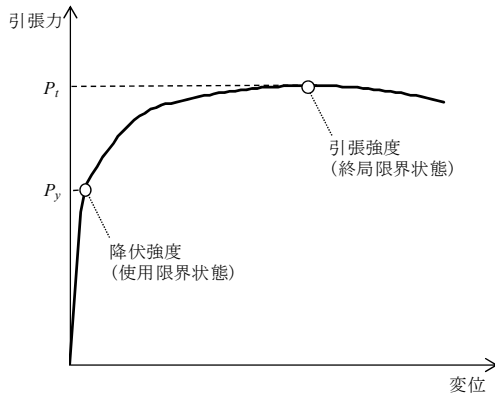
部材強度の特性値については、現行の設計基準との整合性を踏まえて設定するものとした。許容応力度の設定にあたっては、これまで材料強度として JIS 規格値や、部材強度として実験データ等を踏まえた下限値相当の基準耐力等が用いられてきた。このため、ここでは、実験データ等のばらつきを考慮したうえで、実験データがそれを下回る確率がある一定の値以下となることが保証された強度の値、またはそれと同等程度の値により設定することを基本としている。具体的には、これまでの許容応力度の設定における基準強度との整合を踏まえ、下限値相当(2.3%フラクタイル値(平均値-2×標準偏差))の値を特性値とすることを標準とした。

表-4.2 耐荷性能に関する鋼橋の部材等の限界状態

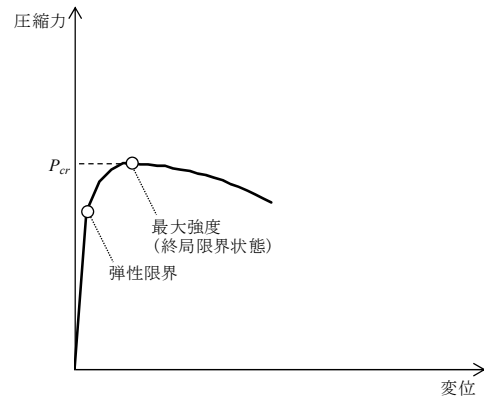
使用限界状態	部材等の応答が可逆性を有し、かつ、有害な変位、変形又は振動が生じないとみなせる限界の状態
修復限界状態	部材等の損傷の程度を限定的とし、修復が容易に行いうる範囲に留まるとみなせる限界の状態
終局限界状態	部材等の強度に低下が生じないとみなせる限界の状態

表-4.3 耐荷性能に関する部材等の照査項目の例

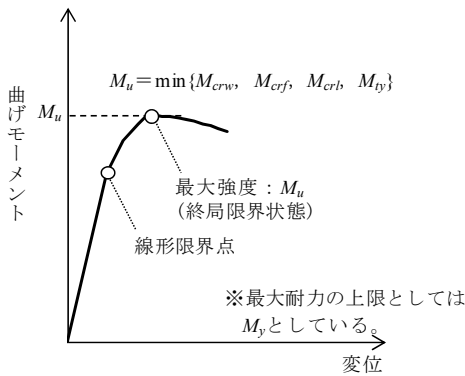
設計で考慮する状況	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
永続支配	・変形・振動 (渦励振風速, 変位制限値)	—	・変形・振動 (発散振動風速)
変動支配	・強度 (降伏強度, すべり強度) ・変形・振動 (変位制限値)	—	・強度 (引張強度, 座屈による最大強度) ・変形・振動 (変位制限値)
偶発支配	—	・強度(最大強度) ・変形(各限界状態に応じた変位)	



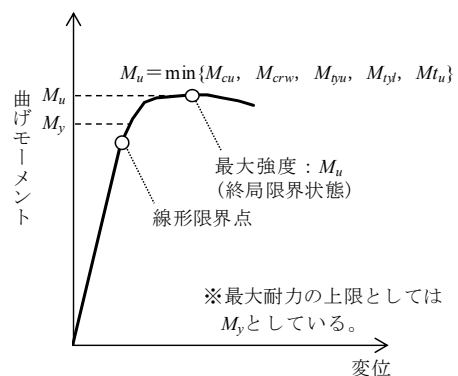
(a) 引張部材



(b) 圧縮部材



(c) 曲げ部材(鋼桁のみの状態)



(d) 曲げ部材(床版と一体化した状態)

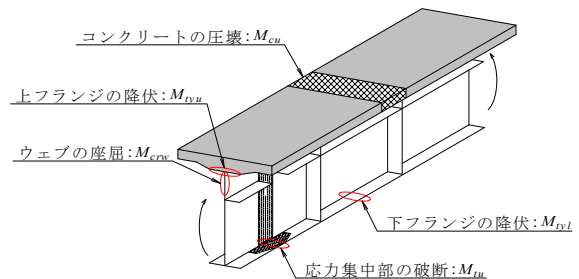
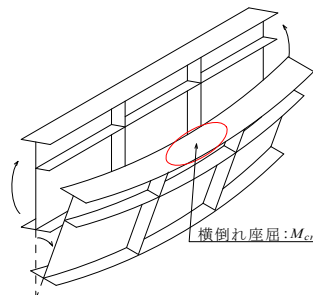
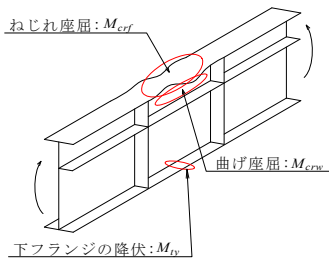
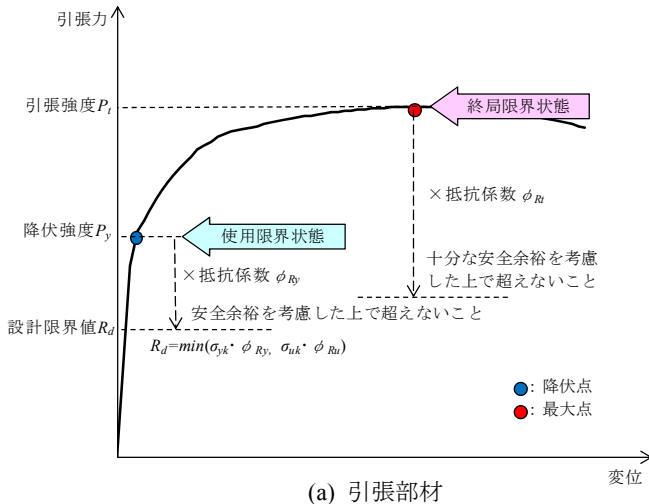
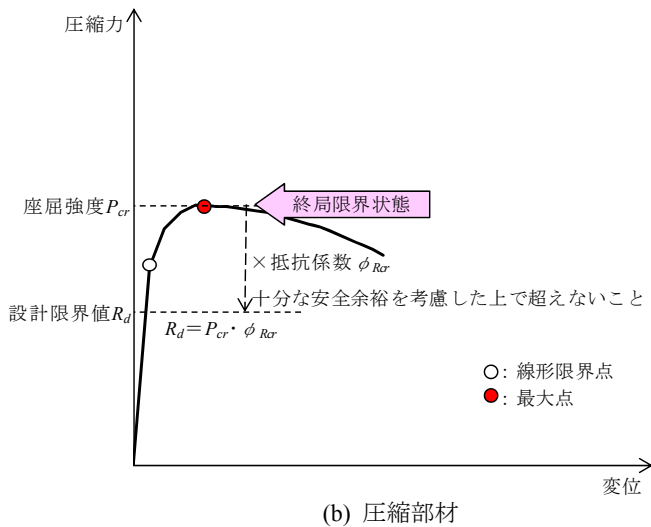


図-4.2 耐荷性能における部材等の限界状態の例



(a) 引張部材



(b) 圧縮部材

図-4.3 各限界状態に対する設計限界値

4.4 抵抗係数の設定方法に関する検討

4.4.1 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実験データの統計量を基に、信頼性設計の考え方も踏まえつつ提案した。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、提案した。設計限界値は式 (4.1) で与えられる。

$$R_d = \phi_R \cdot R_k \dots\dots\dots (4.1)$$

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(強度の下限値を基本に設定、以下、強度特性値)

抵抗係数については、式 (4.2) 及び表-4.4 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。

$$\phi_R = \phi_M \cdot \phi_n \cdot \psi \dots\dots\dots (4.2)$$

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

4.4.2 抵抗強度に対する係数： ϕ_M

強度特性値を実験データの統計量の下限值相当(平均値-2×標準偏差)としたうえで、抵抗強度に対する部分係数 $\phi_M=1.0$ とした。表-4.5 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-4.4 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

表-4.5 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

4.4.3 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-4.6 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提案した。

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、両者の安全余裕を提案

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-4.4 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。

表-4.6 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)

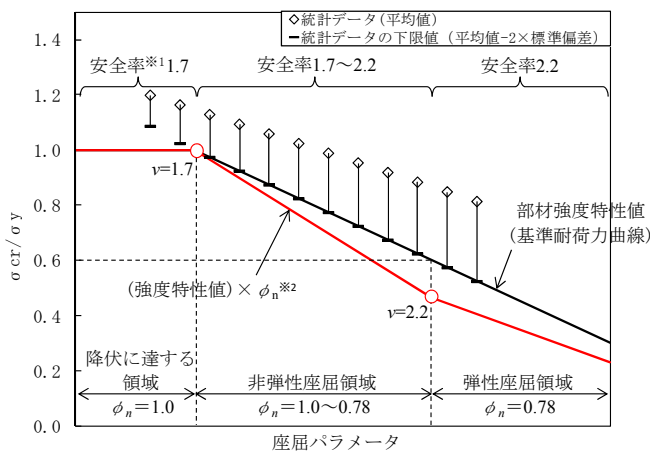


図-4.4 基準耐荷力曲線に対する係数 ϕ_n のイメージ

4.4.4 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

現行設計基準における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。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。

4.5 鋼部材の局部座屈強度規定の見直しに関する検討

4.5.1 検討方針

前述のとおり、現行設計基準の局部座屈に対する基準耐荷力曲線(安全率 1.7 を考慮する前の強度曲線)には、幅厚比パラメータの大きな領域に対して、終局限界状態以降の強度特性を考慮した安全余裕が確保されている。また、この安全余裕の大きさについては局部座屈の強度規定間で統一がとられているわけではなく、かつ必ずしも合理的な値でないと考えられることから、部分係数設計法への移行に合わせて、合理的かつ信頼性の高い基準耐荷力曲線への見直しの検討を行った。

検討対象は自由突出板(圧縮フランジ等)、両縁支持板(柱のフランジ・ウェブ等)、補剛板(箱桁の圧縮フランジ等)の局部座屈強度である。抵抗側の設計限界値 R_d は、式 (4.3) で与えられる。ここで、局部座屈強度の設計限界値は、幅厚比パラメータに対して連続性を確保しようとする、強度特性値 R_k 、安全余裕 ϕ_n の双方が変数となり、実務上設計が煩雑になることから、 R_k に ϕ_n を組み込んだ基準耐荷力曲線 R_k' とした。

$$\phi_R = \phi_M \cdot \psi \cdot \underbrace{\phi_n \cdot R_k}_{R_k'} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに、 R_k : 部材等の抵抗強度の特性値 (強度特性値)、 R_k' : 基準耐荷力曲線 ($= \phi_n \cdot R_k$)

4.5.2 強度特性値 R_k の設定

局部座屈強度の強度特性値(R_k)は、実験データの下限值(2.3%フラクタイル値)を基本として、解析データも参考に設定した。

(1)自由突出板

図-4.5 の実験データは、S55 道示改定時に規定された基準耐荷力曲線を設定する際に収集されたものである。なお、幅厚比パラメータについては、突出幅の取り方などが文献間で異なるため、道示の規定に従って再整理した値¹⁶⁾を用いている。実験データの統計量は、これらの実験値を幅厚比パラメータ毎

に集計し、平均値及び下限値相当(2.3%フラクタイル値(平均値-2×標準偏差))を示している。

解析データは、小松ら¹⁷⁾、奥井ら¹⁸⁾、小野ら¹⁹⁾による3辺単純支持・1辺自由板を対象とした解析によるものである。小松らの解析における残留応力は、福本らの研究で提示された残留応力頻度分布²⁰⁾の90パーセンタイルに相当する $0.4\sigma_y$ 、初期たわみを部材精度の現行設計基準における許容値である $b/100$ としており、ほぼ上限値の初期不整を考慮した結果と考えられる。奥井らの解析では、残留応力頻度分布(平均値: $0.23\sigma_y$ 、標準偏差: $0.145\sigma_y$)²⁰⁾及び初期たわみ頻度分布(平均値: $b/108$ 、標準偏差: $b/154$)¹⁷⁾のばらつきを考慮し、モンテカルロシミュレーションを用いて最大強度の統計量を算定している。解析データの下限值は、解析データを正規分布と仮定した場合の2.3%フラクタイル値としている。小野らの解析では、残留応力を $0.25\sigma_y$ 、初期たわみを $b/100$ としている。なお、解析データについては、使用ソフトの違いにより結果にバラつきが見られたことから、参考データとして扱うこととした。

強度特性値としては、実験データを基にほぼ下限側に相当する曲線を提案した。 $0.6 < R < 1.0$ の付近では解析値が強度特性値を若干下回る傾向を示すが、初期不整等の解析条件が安全側の仮定である可能性も考えられるため、実験データを基本に現行の限界幅厚比 $R=0.7$ を踏襲して設定した。

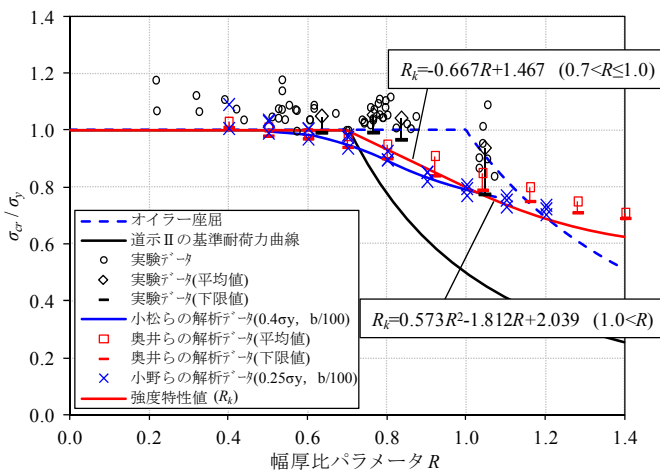


図-4.5 自由突出板の基準耐力曲線と既往の研究成果の比較

(2)両縁支持板

図-4.6の実験データは、文献21)~25)の実験結果を基に示している。これらの実験データのうち、文献25)、26)の試験体は4辺単純支持板、文献21)、24)、25)の試験体は箱断面としたものであるが、これらの

実験結果から、初期たわみを計測している実験データの中で、道示で規定されている許容値($b/150$)を満たさないデータ、及びHT780に対するデータを取り除いている。実験データの統計量は、これらの実験データを幅厚比パラメータ毎に集計し、平均値及び下限値相当(2.3%フラクタイル値(平均値-2×標準偏差))を示している。

解析データは、奥井ら¹⁸⁾及び小野ら¹⁹⁾による4辺単純支持板を対象としたものである。奥井らの解析では、残留応力頻度分布(平均値: $0.23\sigma_y$ 、標準偏差: $0.145\sigma_y$)及び初期たわみ頻度分布(平均値: $b/400$ 、標準偏差: $b/520$)のばらつきを考慮し、モンテカルロシミュレーションを用いて限界強度の統計量を算定している。解析結果の下限值は、解析結果を正規分布と仮定した場合の2.3%フラクタイル値としている。小野らの解析では、残留応力を $0.25\sigma_y$ 、初期たわみを部材精度の許容値である $b/150$ としている。なお、解析値については、境界条件や初期不整条件について精査が必要と考えられ、現時点では参考データとして扱った。

強度特性値としては、実験データを基にほぼ下限側に相当する曲線を提案した。 $0.5 < R < 0.9$ の付近では解析データが強度特性値を若干下回る傾向を示すが、初期不整等の解析条件が安全側の仮定である可能性も考えられるため、実験データを基本に現行の限界幅厚比 $R=0.7$ を踏襲して設定した。

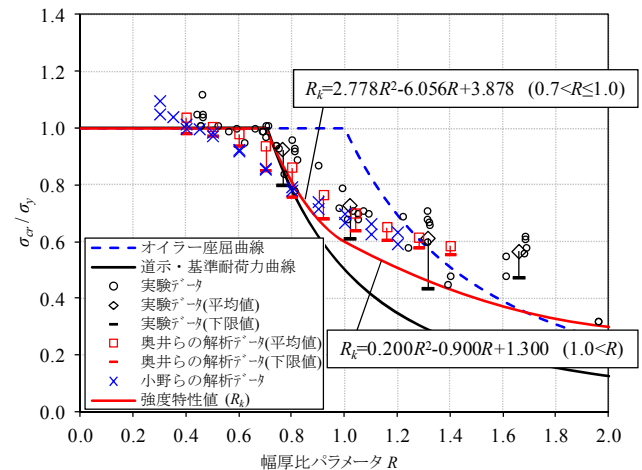


図-4.6 両縁支持板の基準耐力曲線と既往の研究成果の比較

(3)補剛板

道示改定の根拠とした実験²⁷⁾以外にも様々な実験的研究が行われてきており、それらの実験データと基準耐力曲線を比較した。図-4.7は西野ら²⁸⁾、小松ら²⁹⁾、³⁰⁾によって実施された補剛板の実験データ

の中から、道示における規定の適用条件を満たす実験データのみを抽出してプロットしたものである。実験データの統計量は、これらの実験データを幅厚比パラメータ毎に集計し、平均値及び下限値相当(2.3%フラクティル値(平均値-2×標準偏差))を示している。

強度特性値の提案式としては、限界幅厚比を 0.5 とし、これらの実験のほぼ下限値に相当する曲線を提案した。

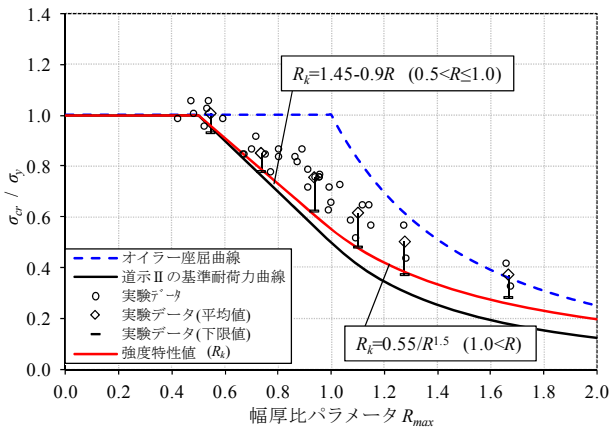


図-4.7 補剛板の基準耐力曲線と既往の研究成果の比較

4.5.3 安全余裕 (ϕ_n) 及び基準耐力曲線 (R_k) の提案

座屈領域における安全余裕 ϕ_n は、4.5.2 で提案した強度特性値と現行道示の基準耐力曲線の差を比較すると、各強度間で異なる。安全余裕 ϕ_n が最も小さいのは補剛板であり、その基準耐力曲線によって不具合が生じていない現状から、現行の補剛板が有する安全余裕を ϕ_n として妥当な値と考えて、統一的に確保すべき安全余裕 ϕ_n とした。具体的には、補剛板における強度特性値の安全余裕が、常時における幅厚比制限値 ($R=1.0$) で 1.9、施工時における幅厚比限界値 (鋼種別の最大値 $R=2.0$) において 2.6 であり、この値を基本に他の局部座屈強度にも付与した。ただし、自由突出板の場合は、常時における幅厚比制限値が規定されていないため、安全側を考慮して、鋼種別の最小の幅厚比制限値 ($R=0.88$) に対して安全率 1.9 を付与することとした。

基準耐力曲線は、強度特性値 R_k に部分係数 ϕ_n を乗じる形で a)~c) の式のように表される。自由突出板、両縁支持板に関しては、二次式を用いて近似した。補剛板に関しては、前述のとおり現行道示と同じ基準耐力曲線である (図-4.8~図-4.10)。

a) 自由突出板

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.0 & (R \leq 0.7) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 0.370R^2 - 1.741R + 2.037 & (0.7 < R \leq 0.88) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 0.779R^2 - 2.661R + 2.531 & (0.88 < R) \end{aligned}$$

b) 両縁支持板

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.0 & (R \leq 0.7) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 3.067R^2 - 6.747R + 4.220 & (0.7 < R \leq 1.0) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 0.230R^2 - 1.035R + 1.345 & (1.0 < R) \end{aligned}$$

c) 補剛板

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.0 & (R \leq 0.5) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 1.5 - R_R & (0.5 < R \leq 1.0) \\ \sigma_{cr} / \sigma_y &= 0.5/R_R^2 & (1.0 < R) \end{aligned}$$

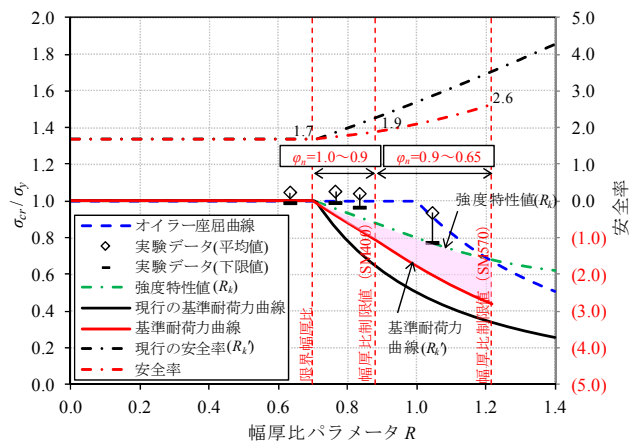


図-4.8 自由突出板としての局部座屈強度

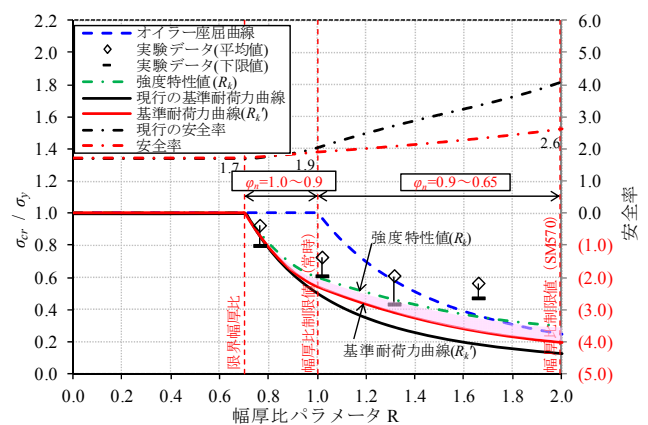


図-4.9 両縁支持板としての局部座屈強度

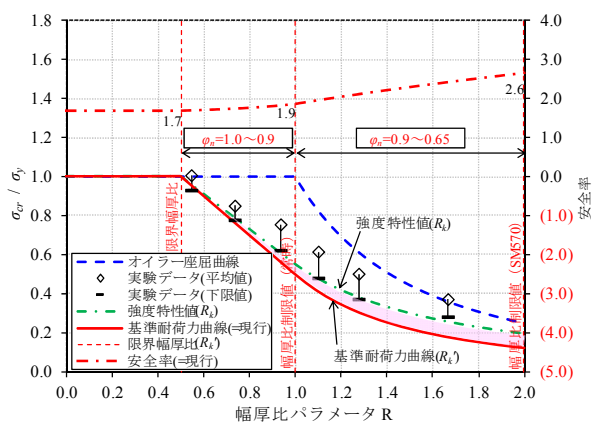


図-4.10 補剛板としての局部座屈強度

5. おわりに

本研究では、厚板の適用を前提とした構造合理化に向けた検討として、高力ボルト摩擦接合継手で厚板を適用した場合のすべり耐力を明らかにするとともに、ボルト列数制限や設計すべり係数に関する検討した。

次に、各種座屈強度規定について、道示に規定された昭和 48 年以降の実験的研究及び解析法の進歩を踏まえた最新の知見並びに諸外国基準と比較した際の乖離を解消するため、構造合理化に向けて強度規定を検討した。まず、溶接箱形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を提案した。また、局部座屈強度における基準耐荷力曲線について、既往の実験及び解析データを基に、実験データの下限值相当である強度特性値を設定することにより、現行設計基準において最大強度以降の強度特性を考慮して確保されている安全余裕を明らかにした。その上で、補剛板において考慮されている安全余裕を自由突出板、両縁支持板で考慮した場合の基準耐荷力曲線を提案した。

最後に、道示共通編に示される橋の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、現行設計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。

抵抗係数の設定においては、従来より考慮されている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実験データ等を踏まえ、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

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，Ⅱ鋼橋編，2002.3.
- 3) 独立行政法人土木研究所：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) 独立行政法人土木研究所，公立大学法人大阪市立大学：高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書，428 号，2012.1.
- 5) 村越潤，澤田守，山口隆司，彭雪，大嶽敦郎：接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，土木学会論文集，Vol.70，No.1，pp.94-104，2014
- 6←8) 西村，青木，西井，福本：鋼柱部材の基本強度の統一評価，土木学会論文集，第 410 号/I-12，pp.325-333，1989.10.
- 7←9) 織田，長谷川，宇佐美：初期不整の関数で表した連成座屈強度公式の実験データによる検証，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.31-40，1996.7.
- 8←10) 福本（研究代表者）：鋼骨組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補助金（総合研究 A）研究成果報告書，1990.3.
- 9←11) 福本，伊藤：座屈実験データベースによる鋼柱の基準強度に関する実証的研究，土木学会論文報告集，第 335 号，1983.7.
- 10←12) CEN：Eurocode3:Design of steel structures, prEN1993-1-1:2003, 2003.
- 11) 独立行政法人土木研究所：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討，土木研究所資料，第 4221 号，2012.3.
- 12) 土木学会：構造物の安全性・信頼性，1976.10.
- 13) 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.
- 14) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1997.5.
- 15) 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.

- 16) 独立行政法人土木研究所：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.
- 17) Komatsu and Kitada：Statistical Study on Compression Flange Plates, ASCE, Vol.109, 1983.2.
- 18) 小室，奥井，野坂，宮下，野上，長井：初期たわみと残留応力の統計データを用いた自由突出板の限界強度に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.60A，2014.3.
- 19) 八木，小野，北根，野阪，葛西，松村，宮下：鋼橋の耐荷力曲線に関する解析的検討(仮題)，平成 25 年度 災害科学報告書(案)，2014.1.
- 20) Fukumoto.Y. and Itoh.Y.：Basic Compressive Strength of Steel Plate from Test Date, Proc.of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., No344, 1984.4.
- 21) 上田，安川，矢尾，池上，大南：圧縮を受ける正方形板の最終強度に関する研究(第 1 報)，造船協会春季講演会，1975.5.
- 22) 藤田，吉田：構造物の塑性設計(その 4)，造船協会春季講演会，1964.5.
- 23) 奥村，西野，長谷川：箱型断面柱の局部座屈強度，土木学会論文報告集，第 205 号，1972.9.
- 24) 宇佐美，福本，青木：溶接箱断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 308 号，1981.4.
- 25) 宇佐美，福本：鋼圧縮部材の連成座屈強度実験と有効幅理論による解析，土木学会論文報告集，第 326 号，1982.10.
- 26) 日本鋼構造協会：鋼橋の強度設計の合理化，鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会/合理化構造・設計法研究部会，2013.3.
- 27) 土木研究所：補剛板の限界状態，土木研究所資料，第 1779 号，1982.2.
- 28) 長谷川，長浜，西野：圧縮を受ける補剛された板の座屈強度，土木学会論文報告集，第 236 号，1975.4.
- 29) 小松，牛尾，北田：補剛板を有する圧縮板の極限強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 255 号，1976.11.
- 30) 小松，牛尾，北田，奈良；縦横に補剛された圧縮板の極限強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 288 号，1979.10.

STUDY ON DESIGN RATIONALIZATION FOR STEEL BRIDGES

Budget : 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

Takao KANEDA

Tadao ENOMOTO

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 FY2013, focusing on the member for which local buckling shall be considered, the safety margin considered in the strength curve of the current design standard was reviewed. And in order to improve and rationalize the current strength curve, previous experimental and analytical data was reviewed and analyzed regarding buckling parameter representing the width-thickness ratio of the plate.

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