

Ⅱ 鋼橋・鋼部材編の改定と関連する調査研究

玉越隆史・坂本佳也

1. はじめに

本稿では、Ⅱ 鋼橋・鋼部材編（以下「Ⅱ編」という。）の規定及びこれまでの示方書からの変更内容について主なものを紹介する。

Ⅱ編には、Ⅰ 共通編に規定される作用の組合せによって所要の性能を満足するとみなせるために必要となる鋼部材や鋼橋の上部構造の状態に関する条件が主に規定されている。

2. Ⅱ編の構成

Ⅱ編では、橋や部材の性能は耐荷性能とその前提となる耐久性能及びその他の性能に大別される。そして耐荷性能は、部材等に生じる設計応答値が、着目する限界状態に対し、その限界状態を超えないとみなせるかどうかの基準である制限値を満足するかを照査することが基本となる。なお、耐荷性能の限界状態に関する照査基準は、橋全体の状態を代表させることができるよう、基礎的部材形式単位だけでなく床版や床組といった構造要素単位でも規定され、その組合せによって多様な形式にも適用できるように配慮されている。このような照査体系を反映して、Ⅱ編の目次構成は、図-1に示すようになっている。

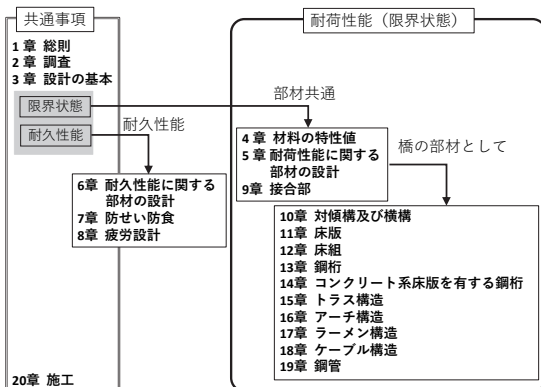


図-1 Ⅱ 鋼橋・鋼部材編の構成

なお、道路橋として必要な性能を確保するために、設計状況とは直接関係付けられていない照査用作用による照査が求められている項目もある。

例えば、鋼桁のたわみやそりの照査などはこれに該当する。

3. 使用材料

橋梁用高降伏点鋼板(JIS G 3140)は、既に規定されていた構造用鋼材に比べて引張強度に対する降伏強度が高く、予熱の省略可能範囲も広い特徴を有する鋼材であり、鋼材選択の自由度を拡大できることから、表-1に示すように使用材料の規定にSBHS400(W)、SBHS500(W)が追加された。

また、高力ボルトでは遅れ破壊への懸念からF11T以上の高強度材料は規定が見送られてきた。しかし、耐遅れ破壊性能や継手性能についてS10TやF10Tとの比較検証を含む最新の技術的知見^{例えは1)}を踏まえ、新設のみならず補修補強での採用も視野に、F11Tよりも高強度のS14Tが摩擦接合継手用として規定されている（表-2）。ただし、S14Tの耐遅れ破壊性能は、He/Hc法や図-2の腐食促進試験結果などにより実験室レベルで検証されているものの²⁾、道路橋の環境に近い条件での長期の使用実績や暴露試験結果が乏しいことを考慮して、適用条件は厳しく制限されている。また、締付け軸力が大きいため、母材鋼種との組合せには制限がある。

表-1 主な鋼材の強度の特性値 (N/mm²)

引張降伏 圧縮降伏	鋼種 板厚 (mm)	SS400	SM490	SM490Y	SBHS400	SM570	SBHS500
		SMA400W	SMA400W	SM520 SMA490W	SBHS400W	SMA570W	SBHS500W
	t ≤ 40	235	315	355	400	450	500
	40 < t ≤ 75			335		430	
	75 < t ≤ 100	215	295	325		420	

表-2 摩擦接合用高力ボルトの強度の特性値 (N/mm²)

応力の種類	ボルトの等級			
	F8T	F10T	S10T	S14T
引張降伏	640	900	900	1,260
せん断破断	460	580	580	810
引張強度	800	1,000	1,000	1,400

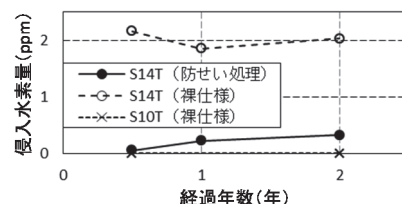


図-2 腐食促進試験によるボルトへの侵入水素量

4. 限界状態、特性値、制限値

耐荷性能の照査に必要な材料や部材の強度の特性値、特性値と関連付けられた限界状態及び計算応答値が限界状態を超えないとみなすことができる制限値が規定されている。材料等の強度の特性値は、図-3に示すJIS等の規格値、強度試験結果のばらつきなどを考慮して設定された材料等の性質を最も適切に代表できるものとして設定された指標値である³⁾。

制限値は、特性値に対して設計応答値の算出過程に介在する様々な不確実性を考慮して規定された部分係数を乗じることで得られる。

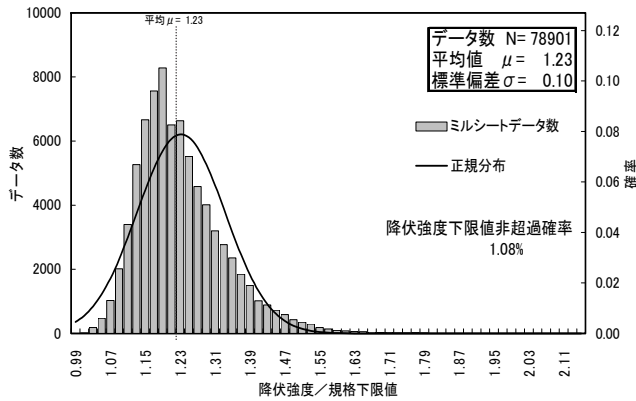


図-3 構造用鋼材の降伏強度の頻度分布

制限値の設定では、材料や部材の強度の特性の根拠とする実験データを、なるべく最新の結果もとりにいれて更新するとともに、数値シミュレーションによる調査結果などの最新の知見も踏まえた評価が行われた。

表-3に軸方向引張応力度の制限値の例、図-4に両縁支持板の基準耐荷力曲線の例を示す。

表-3 軸方向引張応力度の制限値の例

	SM490Y	SBHS400	SMS570	SBHS500									
引張強さ σ_{st} (N/mm ²)	490	490	570	570									
降伏点 σ_{yk} (N/mm ²)	355	400	450	500									
降伏比 YR	0.72	0.82	0.79	0.88									
部分係数	作用の組合せ												
		i	ii	iii	i	ii	iii	i	ii	iii	i	ii	iii
	調査・解析係数 ξ_1	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0
	部材・構造係数 ξ_2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	0.95	0.95
制限値 (N/mm ²)	限界状態 1 $\sigma_{st} = \xi_1 \times \Phi_{st} \times \sigma_{st}$	272	320	355	306	360	400	344	405	450	383	450	500
	限界状態 3 $\sigma_{st} = \xi_1 \times \xi_2 \times \Phi_{st} \times \sigma_{st}$	272	320	355	306	360	400	344	405	450	363	428	475

※作用の組合せ・・・ i) ii) iii) 以外

- ii) ②変動作用支配状況での地震の影響を考慮する作用の組合せ
- iii) ③偶発作用支配状況での地震の影響を考慮する作用の組合せ

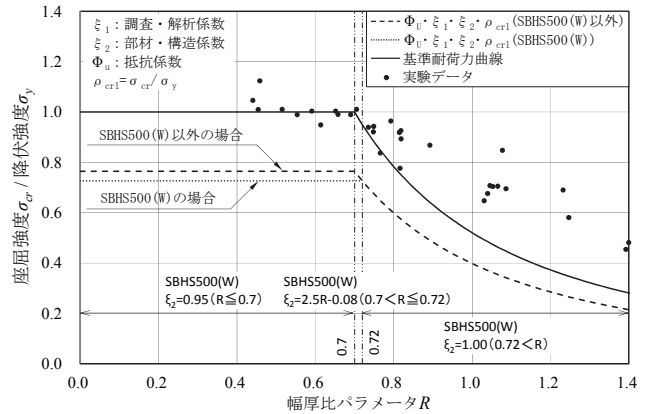


図-4 基準耐荷力曲線の例 (両縁支持板)

5. 接合部

溶接継手の品質確保に関しては、関連規定の精査が近年の施工管理実態や品質検査事情を考慮して行われ、運用上の疑義が生じないことにも配慮して規定内容や表現の見直しが行われた。

また、実際に道路橋に用いられる溶接継手形式とこれまでの示方書で疲労強度等級の規定などで示されていた継手形式の対応付けに迷う事例が報告されていたことを踏まえて、表-4に示すように溶接継手の形式分類と呼称は見直しが行われた。

表-4 溶接継手の形式分類と呼称

溶接の種類 継手形式	開先溶接			すみ肉溶接
	完全溶込み 開先溶接	部分溶込み 開先溶接	片面溶接	
突合せ溶接継手	両面溶接 (裏はつりあり)		片面溶接 細分類: ・裏当て金あり ・裏当て金なし	
十字溶接継手	両面溶接 (裏はつりあり)	細分類: ・連続 ・始終端を含む	片面溶接 細分類: ・裏当て金あり ・裏当て金なし	すみ肉溶接 細分類: ・連続 ・断続
T溶接継手	両面溶接 (裏はつりあり)	両面溶接 片面溶接	片面溶接 細分類: ・裏当て金あり ・裏当て金なし	両面溶接 片面溶接 細分類: ・連続 ・断続
角溶接継手	両面溶接 (裏はつりあり)	すみ肉溶接 内側すみ肉溶接あり 外側溶接のみ	片面溶接 細分類: ・裏当て金あり ・裏当て金なし	すみ肉溶接 細分類: ・連続 ・断続 $d < \sqrt{2t}$
重ね溶接継手				フラグ溶接 スロット溶接

ボルト接合継手では、これまでの示方書による継手の性能や最新の研究成果を踏まえて、設計で考慮する限界状態が規定されている。なお、摩擦接合の限界状態3は、支圧接合と同様にボルトのせん断破壊と考えることができるため、これまで

の示方書では支圧接合に対してのみ考慮されていたはし抜け破壊に対する照査が摩擦接合に対しても必要とされている。

応力方向のボルトの縁端距離については、最新の研究を踏まえて、応力方向のボルト本数が1本の場合、ボルトの許容力との関係ではなく、作用力に対してはし抜けが生じないことを板のせん断破壊に着目して直接照査する規定とされている。

S14Tを用いた摩擦接合継手の規定化には、土木研究所を含む産官学で行われた図-5に示すような実験結果なども反映して、すべり係数とその適用条件が定められている。

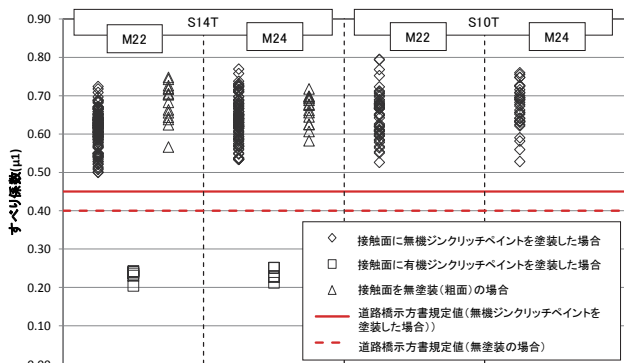


図-5 ボルト等級・ボルト径別の設計軸力に対するすべり係数の実験結果

6. 疲労設計

設計供用期間が規定されたことに伴い、疲労設計の荷重条件が規定されている。これにより、自動車荷重の影響を考慮した発生応力に基づく疲労耐久性の照査もⅡ編の規定により行うこととされている。なお、応力に基づく照査の方法及び設計耐久期間を100年とする場合の耐久性能の要求水準は実績を考慮して、これまでの示方書及び「鋼道路橋疲労設計指針（日本道路協会、2002年）」に準じたものとされている。このほか疲労設計に関しては、溶接継手の疲労強度等級の一部が最新の研究成果を踏まえて見直された。

7. 床版

これまでの示方書では、コンクリート系床版は自動車荷重の影響を考慮して規定された断面力に対する発生応力度を許容値以下にするとともに、最小版厚を確保することで、耐荷性能と耐久性が満足されるとされていた。今回の改定では、耐荷性能についてはⅢコンクリート橋・コンクリート部材編に基づいてコンクリート部材としての耐

荷性能照査を行い、これまでの示方書に規定されてきた断面力式による照査を耐久性能の照査として行うこととされている。

8. ケーブル

これまでの示方書では、鋼橋及びコンクリート橋ともにケーブル部材が用いられる構造形式や橋の種類毎に抵抗側で一律に安全率が規定されていた。今回の改定では部分係数化に伴って、より合理的な設計が行えるよう、ケーブル部材毎に異なる供用期間中に生じる発生応力の状況を反映して、作用側と抵抗側で安全余裕を考慮する方針とされた。そこで、土木研究所では、近年の国内の吊橋形式橋梁の設計実績を考慮して選定された代表的な橋梁に対して荷重シミュレーションを行い、ケーブル部材に発生する応力を評価した（図-6）。今回の改定では、これらの結果も踏まえ、ケーブル部材に生じる応力に占める変動成分の規模や比率などの違いを反映して適切な安全余裕が確保できるように、Ⅰ共通編に規定される作用とその組合せによる効果も考慮して、部分係数が決定されている。

また、現時点では、データが十分でなく耐荷性能と疲労耐久性を独立して規定することが困難であるとの判断から、関連の規定を全て満足することで必要な耐荷性能と疲労耐久性がともに満足されるよう規定内容は構成されている。

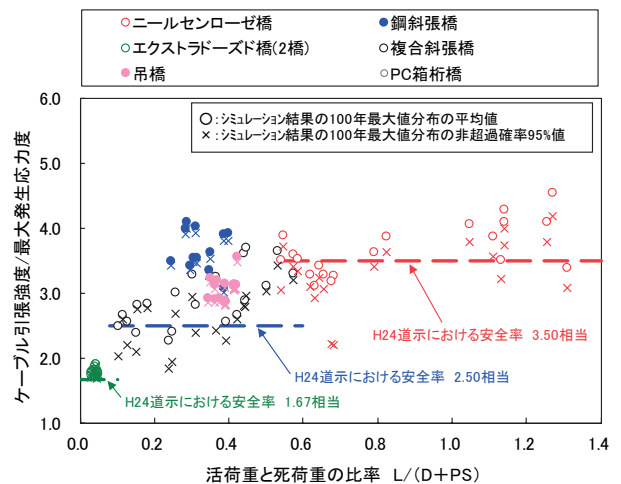


図-6 荷重シミュレーションによりケーブル部材に発生する応力度を評価した結果

まず、ケーブル部材単位での品質条件が、200万回繰返し载荷に対する応力範囲の区分で規定されている。これは道路橋用として、具備すること

が望ましい機械的性質や疲労耐久性に関わる材料特性の最低限を保証する目的で導入されたものである。

ケーブル部材に確保すべき安全余裕の程度には、材料のばらつき、設計計算の精度、荷重の不確実な変動、荷重の振幅や発生頻度の影響、二次応力の影響、他の構造部位の安全余裕とのバランス、維持管理性、破断による影響などが関係する。今回の改定では部分係数の決定にあたって、これら様々な要因のうち、ケーブル部材の発生応力の変動の影響の大きさを活荷重と死荷重の比率に代表させて考慮するとともに、これとは別に変動応力の大きさそのものの影響についても、それを活荷重による応力変動の大きさに代表させて考慮している。

図-7に活荷重と死荷重の比率と部分係数（調査・解析係数と部材・構造係数の積）の関係、図-8に応力振幅と部分係数の関係を示す。図-7、8中には、国内の橋梁の実績による安全余裕を部分係数として表したもの（斜線部）、一般的な条件での吊橋形式橋梁の従来安全率相当も示した。

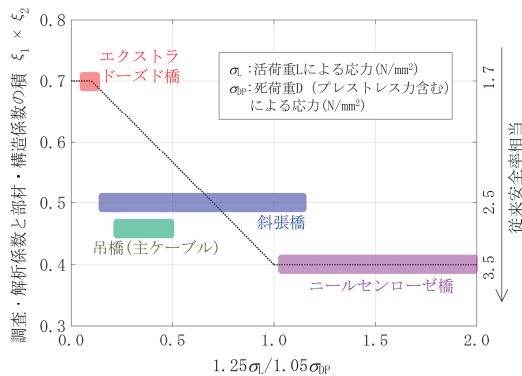


図-7 活荷重と死荷重の比率による実績の整理

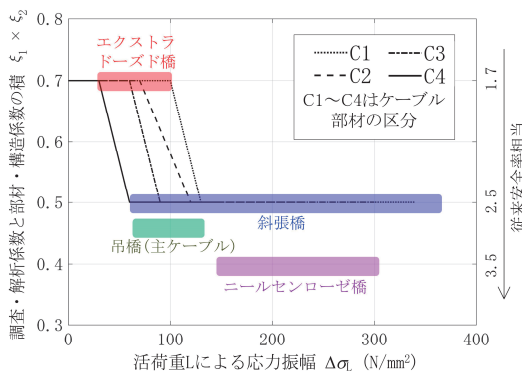


図-8 応力振幅による実績の整理

9. 施工

施工について、これまでと同様に設計の前提と

しての遵守事項が規定されている。

溶接継手の内部きず検査については、応力を分担する完全溶込み開先溶接継手では裏はつりが原則であること、部材の種類によらず全て内部きず検査の対象となることが品質確保の徹底の意図から明確に規定されている。

10. おわりに

II編の改定では、鋼部材を中心に部分係数設定にかかる実績調査や統計処理の多くが土木研究所の研究として行われ、その成果が反映された。特に、新たに規定された超高力ボルトS14Tの強度特性や適用条件の決定においては多数の実験や解析による検討が、ケーブル部材の安全率の見直しでは、大規模な荷重シミュレーションを含む吊橋形式橋梁の構造特性に関する研究成果が最大限活用された。

今後の課題として、多様な条件に対する部分係数の調整方法や既設橋の補修補強への応用方法の開発、合理化効果が期待できる鋼部材の塑性設計法の基準化なども残されている。引き続き道路橋の安全と安心を経済的に実現できるための手法など技術開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 玉越隆史、白戸真大、横井芳輝、山崎健次郎、水口知樹：鋼道路橋への適用にむけた超高力ボルトを用いた摩擦接合継手の継手強度に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第827号、466p、2015
- 2) 横井芳輝、水口知樹、玉越隆史：超高力ボルトの鋼道路橋への適用性に関する実験、土木技術資料、第57巻、第7号、pp.6～9、2015
- 3) 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、121p、2008



玉越隆史
土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr. Takashi TAMAKOSHI



坂本佳也
土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
Yoshiya SAKAMOTO