

鋼橋の設計の合理化に向けた研究とその成果

上仙 靖・澤田 守・坂本佳也

1. はじめに

我が国の道路橋の大半が高度経済成長期に建設され、維持管理の重要性が益々高まっている中で、架け替え等更新が必要な橋梁も増えつつある。一方、労働人口の減少や厳しい財政状況などから、道路橋の建設及び維持管理の面で、さらなるコスト縮減が求められている。その中で、鋼橋においては、少数I桁橋や細幅箱桁橋といった構造の合理化を図った鋼橋も普及してきており、土木研究所構造物メンテナンス研究センター（以下「CAESAR」という。）でも過年度から鋼橋の設計の合理化に向けた検討を進めてきた。本稿では、鋼橋の合理化の余地がある、基準において構造諸元が詳細に規定されている高力ボルトと様々な不確実性を考慮して構造形式や橋の種類ごとに安全率が規定されているケーブル部材を対象に、CAESARでの取り組みとその成果について報告する。

2. 高力ボルト摩擦接合継手に関する検討

2.1 背景・課題

鋼橋を構成する鋼部材の接合方法として、主に溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手（以下「ボルト継手」という。）の2種類が用いられる。近年板厚50mmを超える厚板鋼板を使用する事例が増えつつある一方、溶接継手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ことから、施工性と経済性の面から、ボルト継手が採用される場合が多い。ただし、ボルト継手を厚板鋼板に適用するにあたり、部材の厚板化により接合部の継手自体が大型化し、ボルト列数が増加する傾向にある一方、多列配置がすべり耐力に及ぼす影響が明らかにされていないため、これまでの道路橋示方書（以下「道示」という。）ではボルト列数を無理のない範囲で8列程度以下とするのがよいとされていた。

2.2 検討方法

CAESARでは産学官と連携し、ボルト継手の厚

板鋼板への適用にあたり、ボルト継手の多列化がすべり耐力に及ぼす影響について、接触面を無塗装とする場合と防食の観点から接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合を対象に、実験及び解析の両面から検討した。過年度の検討では、無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の多列継手を対象に、板厚及びボルト列数をパラメータとした試験体のすべり耐力試験及びFEM解析を行い、図-1に示すように、ボルト列数が8列以上となる場合のすべり係数の低下傾向を明らかにした¹⁾。この研究成果は、無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の、8列以上の場合の摩擦接合用高力ボルトの許容力に乘じる低減係数としてH24道示解説に反映された。

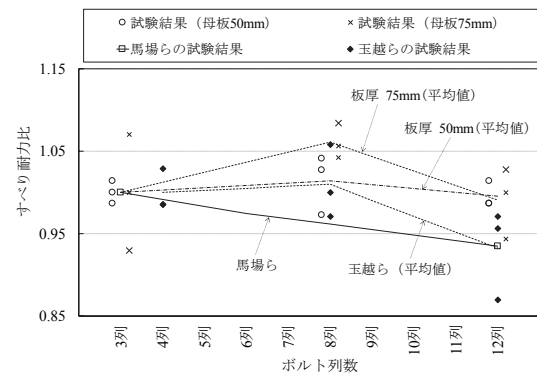


図-1 ボルト列数とすべり耐力比

一方、接触面を無塗装とした場合のボルト列数の影響に関しても、すべり耐力試験等による知見が十分でないため、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合と同様に、板厚及びボルト列数をパラメータとした試験体によるすべり耐力試験を行い、ボルト列数が継手挙動に及ぼす影響を検討した²⁾。

試験体は、板厚を50、75mmの2種類、ボルト列数を3、8、12列の3種類とした計6ケースで試験を実施した。試験体の基本諸元を表-1、形状寸法を図-2に示す。なお、試験体数はケースごとに各3体、試験体の材質は、母板と連結板にSM490Y、高力ボルトにF10T-M22を使用している。また、すべり耐力には、母板の降伏耐力に対するすべり耐力の比率（以下「すべり/降伏耐力比」という。）が影響することが明らかにされているため、列数がすべり耐力に与える影響を適切に評価できるよう、すべり/降

表-1 試験体の基本諸元

試験体名称	ボルト列数	母板厚 (mm)	連結板厚 (mm)	母板幅 (mm)	母板すべり耐力 (kN)	すべり/降伏耐力比
3-50 A,B,C	3	50	26	120	576	0.32
8-50 A,B,C	8			190	1,504	0.49
12-50 A,B,C	12			270	2,123	0.46
3-75 A,B,C	3	75	38	120	584	0.22
8-75 A,B,C	8			130	1,527	0.51
12-75 A,B,C	12			190	2,104	0.45

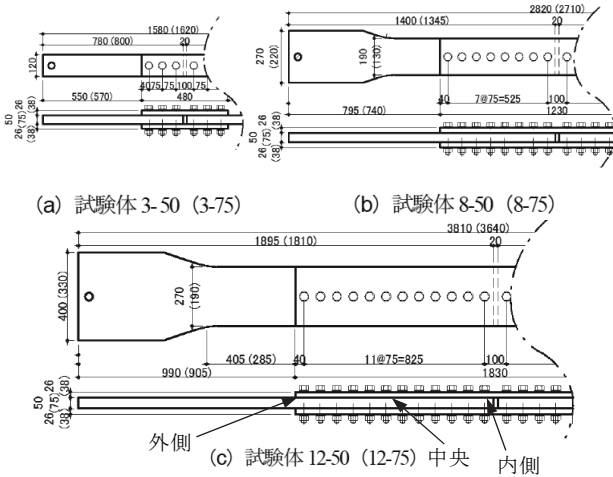


図-2 試験体の寸法形状

伏耐力比を0.5程度になるよう、試験体の母板幅を設定している。

2.3 検討結果

図-3にすべり耐力試験から求めた試験体別のすべり係数の結果を示す。なお、図-3中の μ_0 、 μ_2 は設計軸力、試験前の計測軸力から求めたすべり係数である。図-3に示すように、すべり係数は0.44~0.49であり、いずれも道示のすべり係数の規定値(=0.4)を上回っている。また、図-4に示すボルト列数の影響については、ボルト列数8列に対する12列のすべり係数 μ_2 (各試験体の平均値)は母板厚50、75mmともに約3%低下している。これは図-5に示すように、すべり耐力時の母板と連結板間の相対変位が、8列及び12列の場合、継手の中央と端部(内側、外側)ではすべりが発生するまでに差が大きくなる挙動が確認されていることから、端部で作用力が大きくなる傾向にあることで、すべり係数の低下に影響を及ぼしたものと考えられる。なお、図-4に示したボルト列数の多列化によるすべり係数の低下の傾向のほか、図-5に示したすべり耐力時の継手内の相対変位の不均一さ及びすべり面の発生の傾向は、過年度に実施した接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合のすべり耐力試験の結果と概ね一致していた。

これらの研究結果を踏まえ、H29道示解説に接触

面を無塗装とする場合の多列配置によるすべり強度の特性値に乘じる低減係数が追記され、ボルト継手の合理化に寄与した。

今後は、H29道示に新たに規定された摩擦接合用超高力ボルトS14Tについて、新設及び補修補強での採用を考慮し、現行規定の厳しい適用条件の緩和に向けた実橋での長期耐久性試験の実施等、さらなる接合部の合理化に向けた検討を行う予定である。

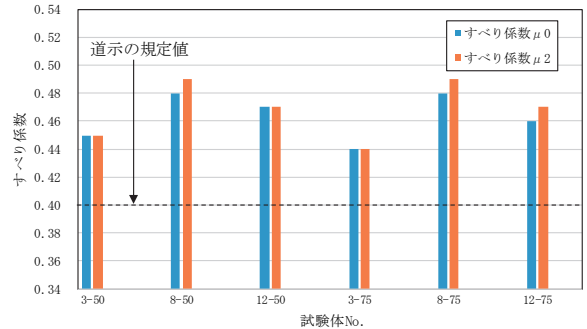


図-3 試験体別のすべり係数 (平均値)

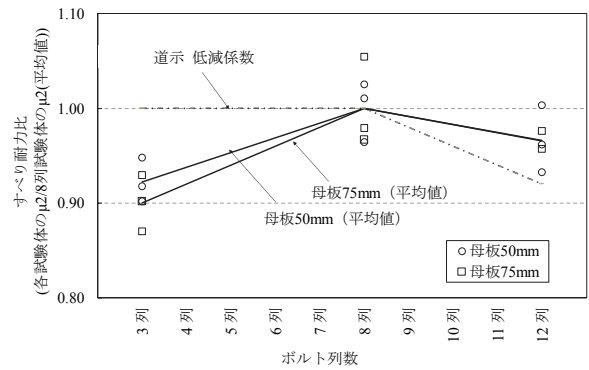


図-4 ボルト列数—すべり耐力比

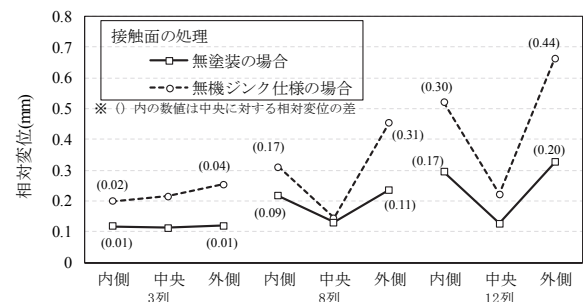


図-5 すべり耐力時の母材-連結板間の相対変位 (母板厚50mmの場合)

3. ケーブル部材の合理化に関する検討

3.1 背景・課題

これまでの道示では、吊構造形式橋梁に用いるケーブル部材の安全率は、表-2に示すように、橋の種類や構造形式ごとに経験的に規定されていた。しかし、ケーブル部材も含めて、橋を構成する各部材に確保すべき安全余裕は、材料品質のばらつきなど

の抵抗特性の信頼性に加えて、供用期間中に発生することが想定される応力の大きさや変動の特徴を考慮した合理的なものであることが望まれる。そこで、CAESARでは、これまでに建設されてきた吊構造形式橋梁のケーブル部材について、実設計での設計断面力の分析や数値シミュレーションにより求めた供用期間中に生じる荷重により発生する断面力の分析を行い、ケーブル部材の合理的な安全余裕の確保に向けた検討を行ってきた。

表-2 これまでのケーブル安全率

鋼橋				コンクリート橋				
ケーブル		ハンガー		ニールセンローゼ橋	内ケーブル	外ケーブル	エクストラードロード橋	斜張橋
吊橋	斜張橋	直線部	曲線部					
3.0	2.5	3.5	4.0	3.5	1.67 ^{*1}	1.67 ^{*2}	2.5 ^{*2}	

※1：PC鋼材に対する許容応力度 $0.6\sigma_{pu}$ を換算
 ※2：活荷重による変動応力から安全率を1.67~2.5の範囲で定める方法もある

3.2 実設計での分析による検討

まず、ケーブル部材に発生する断面力の大きさに着目し、表-2に示す安全率を考慮して建設された表-3に示す吊構造形式橋梁の実設計をもとに、設計断面力による分析を行った。分析にあたり、供用中は固定的に作用する死荷重（プレストレス含む）（以下「D+PS」という。）と不規則に変動する活荷重（以下「L」という。）が支配的であり、合理的に安全余裕を確保するのであれば、ばらつきが大きく不確実な要因に対してより大きな安全余裕を確保することが合理的であるとされる。そこで、D+PS及びLごとの設計断面力を用いて、安全率との関係を整理した。

図-6にL及びD+PSにより発生するケーブル部材断面力の比（以下「死活荷重断面力比」という。）と安全率の関係を示す。なお、図中の破線は形式によらない全データの近似直線を示している。その結果、ばらつきはあるものの死活荷重断面力比と安全率の間に一定の相関が見られた。

3.3 数値シミュレーションによる検討

次に、表-2に示す安全率を考慮して建設された吊構造形式橋梁の中から、表-4に示す代表的な吊構造形式橋梁のモデルを用いて、ケーブル部材が置かれる状況を想定し、表-5に示す各荷重の同時性やばらつき、作用頻度を考慮した数値シミュレーションを行い、算出したケーブル部材に発生する断面力による分析を行った。

表-3 橋梁形式別の分析対象数

橋梁形式	橋梁数	ケーブル数
エクストラードロード橋（ED橋）	15	454
コンクリート斜張橋	16	485
複合斜張橋	4	179
鋼斜張橋	18	579
吊橋（主ケーブル）	14	14
吊橋（ハンガー）	11	1,016
ニールセンローゼ橋（NL橋）	14	328
計	92	3,055

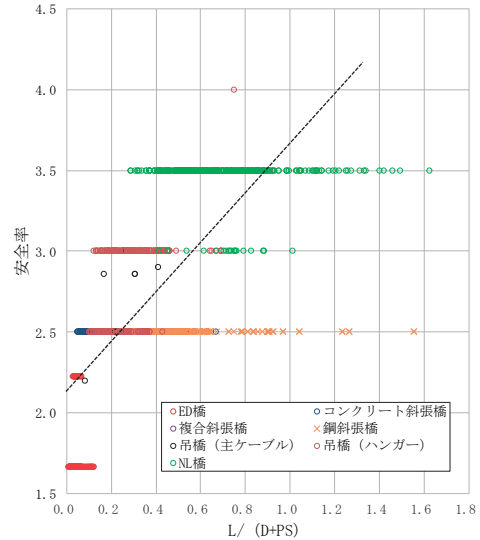


図-6 死活荷重断面力比-安全率

表-4 数値シミュレーション対象橋梁

No.	橋梁形式	支間 (m)	着目部材	モデル
1	吊橋	60+140+600+170	ハンガーロープ	立体骨組
2	鋼斜張橋	105+165	斜ケーブル	立体骨組
3	複合斜張橋	55+75+475+75+55	斜ケーブル	立体骨組
4	ED橋	91+182+98	斜ケーブル	平面骨組
5		88.3+122.3+81.2	斜ケーブル	平面骨組
6	NL橋	123	吊材	平面骨組

表-5 各荷重の発生頻度、時刻、規模

荷重の種類	発生頻度 (1年間)	発生時刻	規模 (荷重の大きさ)	
永続作用 死荷重(D)	全区間	死荷重の確率分布モデルを用いてt=0にて100年間の初期値を確率的に与える。その後の100年間は一定とする。		
変動作用	活荷重(L) 【洪滞時】 【通常時】	【洪滞時】730区間 【通常時】洪滞時以外	洪滞発生時刻をポアソン過程により与える 平均大型車混入率を30%とした車両列スナップショットを確率的に構成し、与える	
	温度変化の影響 (TH)	全区間	日最大・最小値を6区間ごとに交互に与え、その他の区間は正弦波で補充する。	
	風荷重(W) 【季節風】	12区間	ポアソン過程による	月最大値分布 (10分間平均風速の月最大値の分布) の確率分布モデルによって与える
	風荷重(W) 【台風】	台風発生期の中で3区間	ポアソン過程による	月最大値分布 (台風の10分間平均風速最大値の分布) の確率分布モデルによって与える
地震の影響 (EQ)	12区間	ポアソン過程による	月最大値分布 (加速度の月最大値の分布) の確率分布モデルによって与える	

図-7に死活荷重断面力比と安全余裕の関係を示す。なお、ケーブルの安全余裕は数値シミュレーションから求めた断面力の100年最大値分布の非超過確率95%値をケーブル引張強度で除して算出した。図-7に示すように、ケーブル安全余裕は、ばらつきはあ

るものの、死活荷重断面力比に応じて変化する傾向にあり、これは実設計での結果と同じ傾向である。このため、ケーブル部材に生じる死活荷重断面力比に応じて安全余裕を確保することにより、設計の合理化の可能性が伺える結果が得られた。

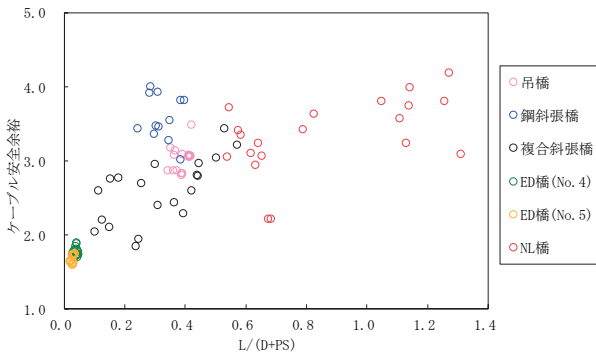


図-7 死活荷重断面力比・ケーブル安全余裕

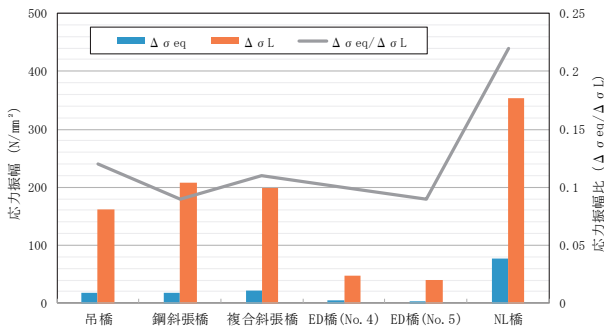


図-8 橋梁形式別の $\Delta\sigma_{eq}$ と $\Delta\sigma_L$ (100年相当)

次に、ケーブル部材に発生する断面力の変動として、疲労耐久性に着目し、表-4に示す吊構造形式橋梁を対象に、ケーブル部材に発生する応力振幅による分析を行った。分析は、実橋で置かれる状況を考慮し、数値シミュレーションで用いたBWIM³⁾による活荷重実態調査結果の車両軸重に着目し、道示で規定されているT荷重に換算した100年間に相当する応力振幅 $\Delta\sigma_{eq}$ を算出した上で、L荷重による応力振幅 $\Delta\sigma_L$ と比較した。図-8にL荷重による振幅が最大となるケーブルでの100年相当の応力振幅の関係を示す。図-8に示すように、 $\Delta\sigma_{eq}$ は $\Delta\sigma_L$ に比べて十分に小さく、その割合は最大でも $\Delta\sigma_L$ の20%程度である。よって、ケーブル部材に発生する断面

力の変動に対しては、L荷重による応力振幅を考慮することで、疲労耐久性に対して十分な安全余裕を確保できる可能性が明らかとなった。

これらの結果も含め、CAESARで行った様々な分析結果は、H29道示のLの大きさと変動幅に応じた部分係数の規定に反映され、ケーブル部材の設計の合理化に寄与した。今後は耐荷と耐久を分離した部分係数の設定に向けた検討を行い、ケーブル部材のさらなる合理化に向けた検討を行う予定である。

4. おわりに

本稿では、鋼橋の設計の合理化に向けたCAESARでの取り組み及びその成果について紹介した。これらの成果は、新設橋の建設だけでなく、既設橋の補修補強にもつながるものである。

今後は、鋼橋の長寿命化を目指し、主たる劣化要因である腐食、疲労により損傷した既設橋が増えることを念頭におき、現場ニーズを踏まえ、既設橋の点検・診断・措置のメンテナンスサイクルに対応した研究開発を進めていく予定である。

謝 辞

本稿で紹介した高力ボルト摩擦接合継手に関する検討は、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」として実施されたもので、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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A1 (構造・地震工学)、Vol.70、No.1、pp.94~104、2014
- 2) 村越潤、石原大作、澤田守、山口隆司：接触面を無塗装とした厚板・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A1 (構造・地震工学)、Vol.72、No.1、pp.166~175、2016
- 3) 玉越隆史、中州啓太、石尾真理、中谷昌一：道路橋の交通特性評価手法に関する研究-橋梁部材を用いた車両重量計測システム (Bridge Weigh-in Motion System) -, 国総研資料No.188、2004

上仙 靖



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター 上席研究員
Yasushi JOSEN

澤田 守



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター 主任研究員
Mamoru SAWADA

坂本佳也



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター 研究員
Yoshiya SAKAMOTO