

すべり後の支圧状態を考慮した 高力ボルト摩擦接合の設計合理化

中本勇¹・赤松伸祐¹・藤原眞幸²

¹ (一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室

² 技術部技術推進室

要約

現行の道路橋示方書では、高力ボルト摩擦接合継手に対して限界状態1および3に対する照査が求められる。接合部のすべり後に、破断に対して所要の耐荷性能・変形性能を有する状態が明らかになれば、限界状態2を定義できる。過年度より、被接合部材に対して、すべり後のボルト孔壁の変形性能に着目した変形支圧限界に係る検討が行われている。本検討は、変形支圧限界への到達を高力ボルト摩擦接合の限界状態2として適用することを目的とし、適用するうえでの必要事項の整理、および適用性を確認するための実構造に対する試設計を行った。

キーワード: 高力ボルト摩擦接合, 限界状態, 変形支圧限界, 設計合理化

1. はじめに

道路橋示方書I編¹⁾ (以下、道示I) では、橋の耐荷性能は橋が置かれる状況に対して、橋が必要な状態に留まることが、所要の確からしきで満足されることと定義されている²⁾。これらの関係は表-1で表現できる。所要の状態は限界状態1から3として定義されている。

橋の耐荷性能は部材の耐荷性能で代表させてよいことが示されている。本検討は橋梁部材の高力ボルト摩擦接合継手部の限界状態に着目するものであり、継手部に対しても表-1の限界状態の照査が求められることになる。

高力ボルト摩擦接合継手部に対しては、道路橋示方書II編³⁾ (以下、道示II) に限界状態が示されており、表-2の照査項目が求められている。高力ボルト摩擦接合継手部の限界状態のイメージは図-1および図-2に示す通りであり、接合面のすべりまたは被接合材の降伏が限界状態1と定義され、限界状態1を超えた後に、被接合材とボルト軸部との接触によるボルト孔周辺での降伏（支圧降伏）の進展の後、ボルトの破断又は被接合材の破壊が生じるどちらかの状態が限界状態3とされている。

表-1より、偶発作用（設計供用期間に対して規模や頻度を確率的に扱うことが困難であるが、一旦生じると部材等に及ぼす影響が甚大となり得る作用）が支配的な状況では、限界状態2および3の照査が求められる。接合部に対しても限界状態2が適用されることとなるが、接合部のすべり後挙動に関する研究は少なく限界状態2の照査法は確立されていない。そのため実態の接合部の設計では偶発作用に対しても限界状態1および3の照査を行っており、限界状態1を求めることで限界状態2を満足すること

を確認している。

限界状態設計法による合理化を目指す場合、すべり後挙動を評価し、適切な限界状態2の設定が必要である。これに対して図-1に示すように接合部の最大耐力に対して所要の耐荷性能・変形性能を有す

表-1 道路橋示方書による都市高速道路等の橋の耐荷性能

状態	発揮すべき橋又は部材の状態	構造安全面からの橋の状態
状況	橋としての機能が損なわれていない状態	部分的に荷重を支持する能力の低下が生じているが、橋としてあらかじめ想定する荷重を支持する能力の範囲である状態
永続作用や変動作用が支配的な状況	状態を所要の信頼性で実現する。	致命的な状態でない
偶発作用が支配的な状況	状態を所要の信頼性で実現する	所要の安全性を確保する。

限界状態1

限界状態2

限界状態3

表-2 高力ボルト摩擦接合部の限界状態

状態	限界状態1	限界状態2	限界状態3
永続作用や変動作用が支配的な状況	母材：孔引き断面(引張部材)における降伏 連結板：みなし規定※ ボルト：接合面のすべり		母材：孔引き断面(引張部材)における降伏 連結板：みなし規定※ ボルト：せん断破断
偶発作用が支配的な状況		限界状態1を求める	

※母材の照査を満足する場合、母材と同等以上の耐力を有する連結板も照査を満足するとみなす

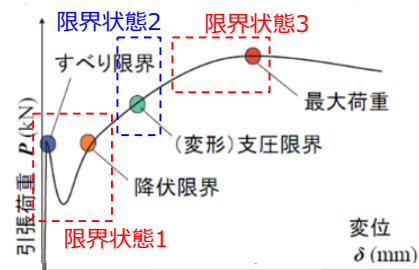


図-1 高力ボルト摩擦接合継手部の限界状態

る限界状態を設定することを目的に、すべり後の変形性能に着目した変形支圧限界が提案されている⁴⁾。

阪神高速グループビジョン 2030⁵⁾では、2030 年のありたい姿の 1 つとして「世界水準の卓越した都市高速道路技術で発展する阪神高速」を掲げている。このありたい姿を実現し、お客さま満足に寄与するためには、「都市高速道路の建設・管理の経験を活かした新規路線建設及び大規模更新事業に係る技術の開発・活用」が重要である。その取組みに紐づく研究・技術開発戦略テーマの 1 つとして、「一般高架橋の革新的な設計・施工技術を開発」することが挙げられ、本検討で着目する高力ボルト摩擦接合部の設計合理化に向けた検討が位置づけられる。

本検討は、変形支圧限界への到達を被接合材の限界状態 2 として適用することを考え、変形支圧限界の制限値を検討し、適用するうえでの必要事項の整理を行った。また、実橋を対象とした試設計により、ボルト本数の変化を評価した。

2. 変形支圧限界

文献 6)では、図-3 に示す短冊形継手を対象に、変形支圧限界到達時の被接合材の支圧耐力に関する解析が実施されている。変形支圧限界は、設計上の簡便さ、状態確認の容易さから考えられたものであり、図-4 に示すボルト孔変形量のボルト軸径に対する割合で表される。支圧耐力は式(1)により算出され、式(1)の支圧耐力係数 α_{bl} は変形支圧限界時に被接合材に生じる応力を降伏強度の特性値（公称値）で除した値である。文献 6)では、表-3 に示す構造パラメータを対象に解析を実施し、ボルト孔変形量がボルト軸径に対して 10%になる状態における支圧耐力係数 α_{bl} を図-5 に示す通り整理している。

$$V_e = \alpha_{bl} \cdot d \cdot t_m \cdot \sigma_{ym} \quad (1)$$

ここで、 α_{bl} ：支圧耐力係数、 d ：ボルト軸平行部径 (mm)、 t_m ：被接合材の板厚 (mm)、 σ_{ym} ：被接合材の降伏強度の特性値 (N/mm²)である。

支圧耐力係数 α_{bl} は、式(2)に示す被接合材の端抜け破断（ボルト部断面における被接合材軸方向断面のせん断破断）と純断面破断（ボルト部断面における被接合材軸直角方向面の引張破断）の耐力比 k_b と相関がある（図-5）。

$$k_b = \frac{P_{esd}}{P_{tnd}} = \frac{\sigma_{tm} \cdot t_m \cdot m_f \{e_1 + (n_f - 1)p\}}{\sigma_{tm} \cdot t_m (b_f - d_0 \cdot m_f)} \quad (2)$$

ここで、 P_{esd} ：被接合材の端抜け破断強度(kN)、 P_{tnd} ：被接合材の純断面破断強度 (kN)、 σ_{tm} ：被接合材の引張強度の特性値 (N/mm²)、 m_f ：被接合材のボルト行数（部材軸直交方向のボルト本数）、 n_f ：被接合材のボルト列数（部材軸方向のボルト本数）、 e_1 ：縁端距離 (mm)、 p ：ボルトピッチ (mm)、 b_f ：被接合材の総幅 (mm)、 d_0 ：ボルト孔径 (mm)である。

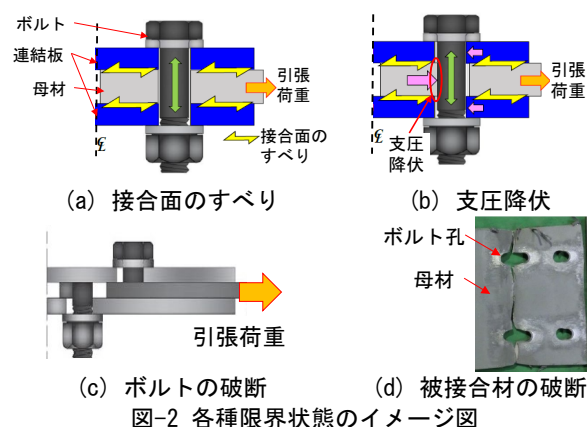


図-2 各種限界状態のイメージ図

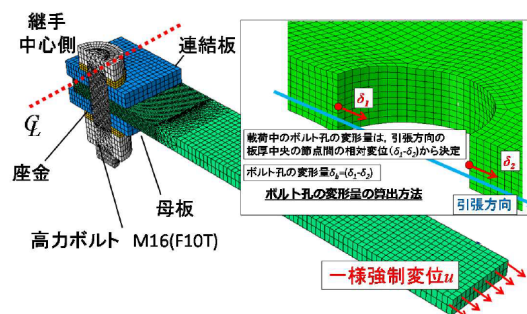


図-3 解析モデル

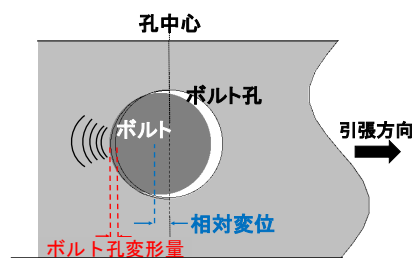


図-4 ボルト軸径とボルト孔変形量

表-3 解析対象の構造パラメータ

ボルト 列数	母板および 連結板の 板厚	端しあき 距離/軸平 行部径	ピッチ/ 軸平行 部径	縁りあき 距離/軸平 行部径
n	$t_m = t_{spl}$ mm	e_1 / d	p / d	e_2 / d
1	9, 14, 19, 25	1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5	-	1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5
2		2.5, 3.5	2.5, 3.5, 4.5	
4			2.5, 3.5	

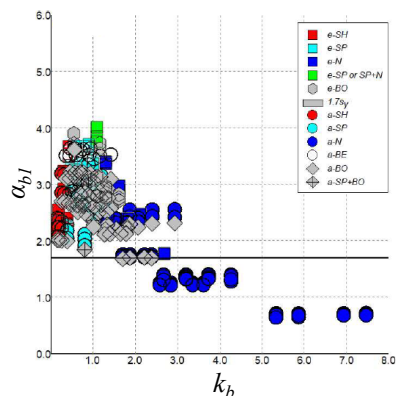


図-5 支圧耐力係数と耐力比の関係

図-5 より、支圧耐力係数 α_{bl} は耐力比 k_b の増加とともに低下する傾向が見られる。これは耐力比 k_b が大きい範囲では純断面降伏の影響が大きく、ボルト孔での支圧力が孔変形に及ぼす影響が相対的に小さくなるためと考えられる。

文献7)では、図-6に示す短冊形継手の要素試験による、変形支圧限界に関する検討結果が整理されている。ボルト軸径に対するボルト孔変形量の割合を、文献6)では10%を対象としていたのに対し、文献7)では5%を対象としている。これは、最大耐力に対する変形支圧限界の余裕度を大きくするために、評価対象とするボルト孔変形量を小さくしたものである。文献7)では支圧耐力係数 α_{bl} を図-7に示す通り整理しており、図-5の解析結果と類似の傾向が見られる。本検討は、図-7の要素試験結果をもとに変形支圧限界の制限値を検討する。

3. すべり後の支圧状態を考慮した設計法

支圧耐力 V_e を限界状態2における特性値とし、各種安全余裕を考慮した制限値 V_b を式(3)に示す。調査・解析係数 ξ_l は、調査結果などにに基づき断面力などの作用効果を算出する過程に含まれる不確実性を考慮する係数である。抵抗係数 ϕ は、材料、施工、耐力式等の有する不確実性など、抵抗値の評価に直接関係する要因の確率統計的な信頼性の程度を考慮する係数である。

$$V_b = \xi_l \cdot \phi \cdot V_e \quad (3)$$

ここで、 ξ_l ：調査・解析係数、 ϕ ：抵抗係数である。

変形支圧限界における制限値の各項目の設定方法を示す。

(1) 特性値

特性値を設定するにあたり、支圧耐力係数 α_{bl} は要素試験データの下限值相当になるように設定することを考えた。

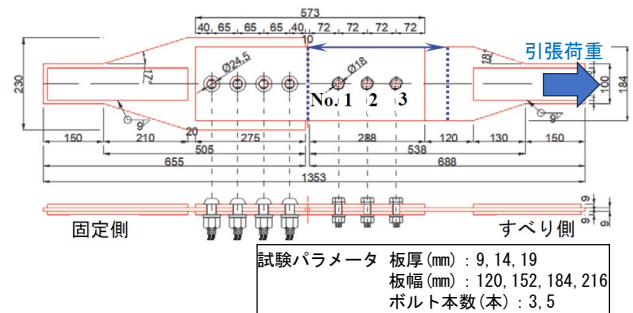
図-5の要素試験データに対する回帰直線を式(4)に示す。式(4)では、支圧耐力係数の適用範囲を要素試験事例がある範囲とし、耐力比 k_b を3.0以下としている。

$$\alpha_{b1} = 3.55 - 0.21k_b (k_b \leq 3.0) \quad (4)$$

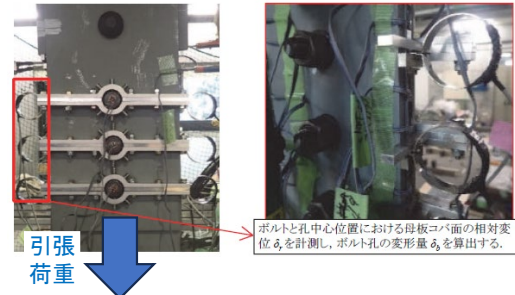
道示Iでは、データのばらつきを考慮した抵抗係数を変動係数に応じた値として設定している(表-4)。この考えを準用し、要素試験結果(データ数 60件)の変動係数17.6%から、表-4より抵抗係数は0.65、支圧耐力係数の特性値は $0.65\alpha_{bl}$ とした。図-5より、支圧耐力係数の特性値は要素試験データの下限值程度となった。

(2) 制限値

調査・解析係数 ξ_l は、道示IIにおいて、高力ボル



(a) 試験体形状



(b) 試験状況

図-6 変形支圧限界に関する要素試験の状況

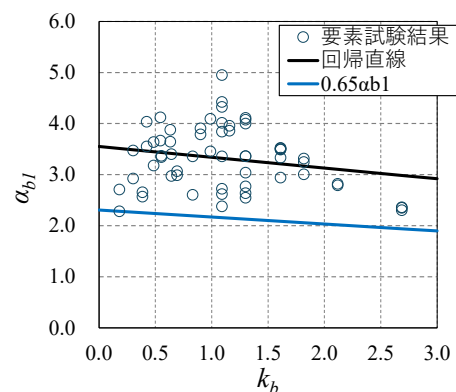


図-7 支圧耐力係数と耐力比の関係(要素試験)

表-4 道路橋示方書I編による変動係数に応じた抵抗係数

変動係数(%)	5.0	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	30.0	40.0
抵抗係数	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.50	0.35

表-5 制限値の各項目の数値および考え方

項目	調査・解析係数 ξ_l	抵抗係数 ϕ	特性値
数値	1	0.85	支圧耐力係数を要素試験データの下限值相当とする
適用の考え方	道路橋示方書の値を準用	鋼材強度ばらつきを考慮することとし、道路橋示方書IIの値を準用	

ト摩擦接合の被接合材に対して限界状態3(偶発作用)を考慮する場合の値を準用し、1.0とした。

抵抗係数 ϕ は、要素試験データに対して降伏強度のばらつきを考慮することとし、道示IIに基づき0.85とした。制限値の各項目の数値と考え方を表-5にまとめる。

以上の検討を踏まえ、限界状態2を取り入れた接合部に対する照査項目を表-6に示す。限界状態2において、ボルトに対してせん断破断の照査を行うこ

ととしている。これは、ボルトの破断が被接合材の変形支圧限界到達に先行して生じないことを前提としているためである。

(3) 適用条件

限界状態 2 は、接合部の降伏後の挙動が、変形支圧限界に関する検討が実施された事例と同じ傾向を示すと想定される構造に適用可能とする。変形支圧限界への影響を検討した知見がなく、適用対象外とする条件の一覧を表-7 に示す。

一般的な鋼材と比べて降伏点が高い SM570, SM570W, SBHS400, SBHS400W, SBHS500, SBHS500W は、塑性変形能に関する研究事例が少なく、変形支圧限界において道示 I に規定する他の構造用鋼材と異なる挙動を示す可能性があるため、適用対象外とする。

ボルト列数については、道示 II より、高力ボルト摩擦接合において 1 ボルト線状に並ぶ本数が増えると、ボルトに作用する力が不均等になる。変形支圧限界は、関連する文献⁴⁾⁶⁾⁷⁾でボルト列数が 5 列以下で検討されているため、6 列以上の場合は適用対象外とする。

耐力比 k_b については、2. (1) に示す要素試験事例がある範囲を適用範囲とする。

(4) 適用対象部材

道示 II では、接合部において、連結され一体となる部材が所要の機能を発揮するようにしなければならない。つまり、部材が限界状態に至る前に接合部が限界状態に至ることがないようにする必要がある。実務設計では、主部材は偶発作用に対して限界状態 1, 3 を満足することを照査する。このため、部材一般部が限界状態 1 となる前に連結部が限界状態 2 になることは許容されないと考えられ、主部材の接合部への変形支圧限界の適用は難しい。

適用対象となる箇所として、主桁間の荷重分配に寄与しておらず、一時的にすべりや塑性化が発生したとしても主部材や構造の耐荷性能に大きく影響しない部材や、損傷時に比較的取替えやすい部材を対象と考えることができる。地震により対傾構接合部のすべりが生じた事例⁸⁾を図-8 に示す。本事例のように発災時に実際にすべりが生じているが、主部材に大きな変形が認められない場合には構造自体が不安定になっているとはいえない。適用対象部材の例として、中間横桁、横構、対傾構が考えられる。また、一般的に横桁は主桁間の荷重分配への寄与が大きいいため、適用対象とすることは難しいが、少数 2 主 I 桁橋等の主桁間の荷重分配への寄与が小さい分配横桁も適用可能性があると考えられる。

4. 実構造物への適用

(1) 試設計の実施方針

変形支圧限界の適用が可能か確認するために、実

表-6 変形支圧限界を取り入れた照査項目

状態	限界状態1	限界状態2	限界状態3
永続作用や変動作用が支配的な状況	母材:孔引き断面(引張部材)における降伏 連結板:みなし規定※ ボルト:接合面のすべり		母材:孔引き断面(引張部材)における降伏 連結板:みなし規定※ ボルト:せん断破断
偶発作用が支配的な状況		(提案) 母材:変形支圧限界における支圧耐力 連結板:みなし規定※ ボルト:せん断破断	

※母材の照査を満足する場合、母材と同等以上の耐力を有する連結板も照査を満足するとみなす

表-7 変形支圧限界の適用対象外とする条件

1	道示 I 9.1 に規定する構造用鋼材のうち、SM570, SMA570W, SBHS400, SBHS400W, SBHS500 および SBHS500W が用いられている場合
2	1 ボルト線状に並ぶ本数が 6 本以上の場合
3	道示 II 9.5.5 の拡大孔が適用されている場合
4	道示 II 9.5.10 の勾配座金及び曲面座金を用いられている場合
5	端抜け破断/純断面破断の耐力比 k_b が 3.0 より大きい場合



図-8 地震による対傾構のすべり発生事例⁶⁾

表-8 部材接合部の構造諸元

橋名	形式	部材	ボルト 行数 m_f	ボルト 列数 n_f	板厚 t_m (mm)	部材の 総幅 b_f (mm)	耐力比 k_b
A橋	6径間連続 鋼桁橋	横構	2	2	14	200	1.6
		対傾構	2	2	8	152	2.3
B橋	6径間連続 鋼少数主桁橋	中間横桁下フランジ	2	3	24	300	1.4
		中間横桁ウェブ	1	2	13	146	1.0
C橋	5径間連続 鋼少数主桁橋	横構	2	4	13	220	3.1
D橋	4径間連続 鋼箱桁	中間横桁下フランジ	2	3	14	320	1.2
		中間横桁ウェブ	1	2	9	150	1.0
E橋	2径間連続 鋼細幅箱桁	中間横桁下フランジ	2	4	24	300	2.0
		中間横桁ウェブ	1	2	13	150	1.0
F橋	3径間連続 鋼細幅箱桁	中間横桁下フランジ	2	4	24	300	2.0
		中間横桁ウェブ	1	2	13	145	1.0

橋の中間横桁、横構、対傾構に対して変形支圧限界到達を限界状態 2 に適用した場合の試設計を行った。

ボルト本数削減効果は、現行設計と変形支圧限界適用時のボルト本数を比較することで確認する。ボルト本数の計算において以下の条件を適用する。

- ・現行設計と変形支圧限界でボルト行数は同じとする。

表-9 試設計の結果

橋名	部材	現行設計					変形支圧限界					比率(変形支圧限界/現行設計)		
		すべり耐力 の特性値(kN)	支配的な作 用(道示1)	ボルト本数 決定要因	計算 本数	設計 本数	支圧耐力の 特性値(kN)	支配的な作 用(道示1)	ボルト本数 決定要因	計算 本数	設計 本数	特性値	計算 本数	設計 本数
A橋	横構	92	偶発①	限界状態1	4.61	6	158	偶発①	限界状態2	3.07	4	1.72	0.67	0.67
	対傾構	92	偶発①	限界状態1	3.58	4	90	偶発①	限界状態2	4.29	6	0.98	1.20	1.50
B橋	中間横桁 下フランジ	184	偶発①	限界状態1	5.75	6	274	偶発①	限界状態3	5.11	6	1.49	0.89	1.00
	中間横桁ウェブ	184	偶発①	限界状態1	6.17	12	149	偶発①	限界状態2	8.98	12	0.81	1.46	1.00
C橋	横構	92	偶発①	限界状態1	7.01	8	132	偶発①	限界状態3	6.12	8	1.43	0.87	1.00
D橋	中間横桁 下フランジ	184	変動②	限界状態1	3.49	6	162	変動②	限界状態1	3.49	6	0.88	1.00	1.00
	中間横桁ウェブ	184	変動②	限界状態1	18.81	32	104	変動②	限界状態1	18.81	32	0.57	1.00	1.00
E橋	中間横桁 下フランジ	184	変動⑥	限界状態1	5.79	8	262	変動⑥	限界状態1	5.79	8	1.42	1.00	1.00
	中間横桁ウェブ	184	変動⑥	限界状態1	8.70	12	142	変動⑥	限界状態1	8.70	12	0.77	1.00	1.00
F橋	中間横桁 下フランジ	184	変動⑥	限界状態1	6.22	8	262	変動⑥	限界状態1	6.22	8	1.42	1.00	1.00
	中間横桁ウェブ	184	変動⑥	限界状態1	8.46	12	142	変動⑥	限界状態1	8.46	12	0.77	1.00	1.00

青：現行設計と比べて耐力増加/ボルト本数減少，赤：現行設計と比べて耐力低下/ボルト本数増加

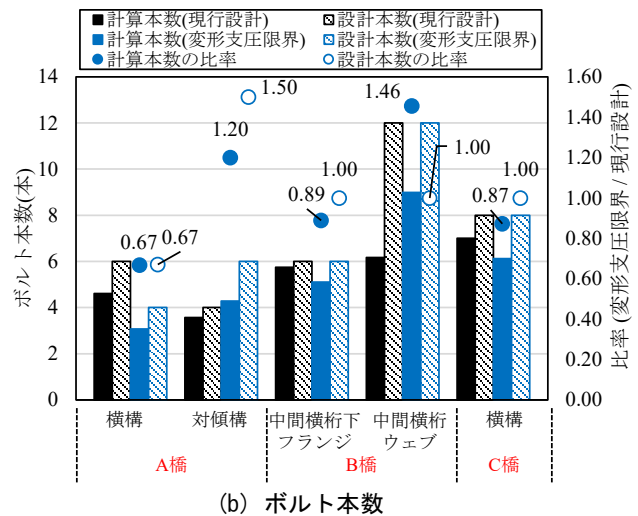
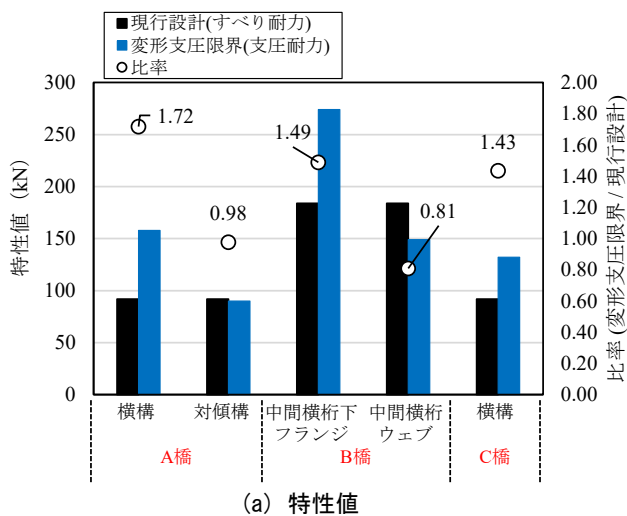


図-9 試設計の結果

- ・変形支圧限界適用時は、行方向および列方向のボルト本数を揃える通常のボルト配置を想定する。
- ・設計計算により求められるボルト本数（計算本数）と、実施工に適用する場合を想定したボルト本数（設計本数）を整理する。設計本数は、計算本数に対して、ボルト本数を整数値に切り上げ、最低ボルト列数³⁾（2列）の適用を考慮した本数となる。
- ・接合部を母材の全強 75%以上³⁾とする。

試設計においては、3. (3) の適用条件は考慮しないこととする。試設計の対象は設計書で作用力が判明している部材のうち、作用力が最大である部材とする。対象とする作用力は各設計書に基づく。変形支圧限界に対する照査項目は表-6 による。

(2) 試設計の結果

対象とする部材接合部の構造諸元を表-8 に示す。C 橋の横構は耐力比 k_b が 3.1 であり、表-7 に示した適用範囲外となった。これは C 橋の横構はボルト列数が 4 列であり、他の部材と比べて端抜け破断耐力が大きいこと、およびボルト列数が 4 列の他の部材（E 橋、F 橋の中間横桁下フランジ）と比べて部材の総幅が小さく、純断面破断耐力が小さいことが影

響している。

試設計の結果を表-9 に示す。表-9 の変形支圧限界適用時の照査項目は、A 橋、B 橋、C 橋は偶発作用が支配的な状況であるため限界状態 2 および 3 に対する照査を、D 橋、E 橋、F 橋は変動作用が支配的な状況であるため限界状態 1 および 3 に対する照査を示している。元とした設計計算で変動作用が支配的な接合部は試設計結果の評価を省略することとし、偶発作用が支配的である A 橋、B 橋、C 橋について、特性値およびボルト本数を図-9 に示す。

図-9(a) より、すべり耐力の特性値と 3. による支圧耐力の特性値の比率は、A 橋の対傾構と B 橋の中間横桁ウェブでは 1.0 より小さかった。これは、A 橋の対傾構は比較的板厚が薄く支圧耐力が小さいこと、B 橋の中間横桁ウェブは摩擦接合面が 2 面でありすべり耐力が大きいことが影響している。その他の部材では特性値の比率が 1.0 以上であった。

図-9(b) より、設計本数の比率は A 橋の横構で 0.7 となりボルト本数を削減できたが、A 橋の対傾構で 1.5 となりボルト本数が増加した。B 橋および C 橋の設計本数の比率は 1.0 となった。これは、ボルト本数を整数値に切り上げ、または最低ボルト列数の

制限により、現行設計と変形支圧限界適用時でボルト本数が変わらないことを示している。

偶発作用の照査を行った3橋のうち、設計上削減可能なボルト本数は2本となった。変形支圧限界の適用によるボルト本数削減効果は、部材の断面積が大きく、使用ボルト本数（列数、行数）が多い場合に大きくなる。一方、式(2)より、ボルト列数および行数が多いほど端抜け破断耐力が大きくなり、耐力比 k_b が適用範囲である3.0を超える可能性が高くなる。主部材での k_b は3.0以上となるケースが多いこともわかっているため、変形支圧限界の適用拡大に向けて、今後は耐力比 k_b が3.0以上での支圧耐力係数に関する知見を収集し、支圧耐力係数 α_{bl} の適用範囲を拡大する必要がある。

5. まとめ

本検討は、変形支圧限界への到達を高力ボルト摩擦接合の限界状態2として適用するうえでの必要事項の整理および適用性を確認するための実構造に対する試設計を行った。その概要を以下に示す。

- ・変形支圧限界における支圧耐力係数 α_{bl} の特性値を、被接合材の端抜け破断と純断面破断の耐力比 k_b に関する式として設定した。支圧耐力係数 α_{bl} の特性値は要素試験データの下限值相当になることを確認した。
- ・変形支圧限界の適用対象になりうる部材の考え方を整理した。主桁間の荷重分配に寄与しておらず、一時的にすべりや塑性化が発生したとしても主部材や構造の耐荷性能に大きく影響しない部材を適用対象と考えることができる。
- ・変形支圧限界の実構造物への試設計を行った。現行設計に対する変形支圧限界適用時のボルト本数は、対象とした部材の中では最大2本削減可能であった。今後は、変形支圧限界の適用によるボルト

本数削減効果が高くなると想定される部材の断面積が大きくなる条件を整理する。

- ・本検討では、試設計を行うために調査・解析係数 ξ 、抵抗係数 ϕ 、および適用対象部材を仮定した。今後は制限値を設定するための参照データの特性や限界状態2の特性を踏まえ、これらの妥当性の検討が必要である。また、変形支圧限界に関する検討事例を踏まえて、設計法の適用範囲の検討が必要である。

謝辞：本検討の実施にあたり、大阪公立大学山口教授、北海道大学佐倉助教に協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，2017.
- 2) 白戸真大：道路橋示方書における部分係数設計法と限界状態設計法，土木技術資料，2018.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.
- 4) 森山仁志，杉山裕樹，山口隆司，郎宇：板幅および板厚が高力ボルト摩擦接合継手の支圧限界状態に与える影響，土木学会論文集A1，Vol.74，No.1，pp.25-43，2018.
- 5) 阪神高速道路株式会社：『阪神高速グループビジョン2030～未来（あす）への道、私たちの挑戦～』の策定について，<https://www.hanshin-exp.co.jp/company/kigyovision/index.html>（2025.4.7.閲覧）
- 6) 森山仁志，高井俊和，山口隆司，郎宇：高力ボルト摩擦接合継手の断面構成およびボルト配置間隔がボルト孔の変形量で規定したすべり後の支圧耐力に及ぼす影響，構造工学論文集Vol.66A，2020.
- 7) 佐倉亮：曲げとせん断を受ける高力ボルト摩擦接合部のすべり・支圧強度に関する研究，大阪市立大学博士論文，2024.
- 8) 国土技術政策総合研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料，第967号，2017.