

高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の力学的性能 ならびに実構造への適用事例

鈴木 博 之

Performance of High Strength Blind Bolted Friction Joints and Examples of Application to Actual Structures

Hiroyuki SUZUKI

High strength blind bolts, which enable make a joint only from one side, are effective for repairing and/or strengthening of members in existing structures, for connecting of box steel pipes in new structures and so on. However, fatigue strength of high strength blind bolted friction joints is not verified up to now. And strength of blind bolts after cyclic loading is also unknown. In addition, data on the slip coefficient, relaxation of axial force, which are the basic characteristics of high strength blind bolted friction joints, are not necessarily enough, either.

In this paper, first, the feature of high strength blind bolts and the mechanism of bolting are explained. Then, the results of some experiments, which are conducted to verify fatigue strength and the other mechanical performance of blind bolted friction joints, are described. Moreover, some examples of application of blind bolted joints to actual structures are also introduced.

キーワード：高力ワンサイドボルト，摩擦接合継手，疲労強度，すべり係数，リラクセーション

Keywords：High Strength Blind Bolts, Friction Joints, Fatigue Strength, Slip Coefficient, Relaxation

1. はじめに

近年，交通量の増加や車両の大型化に伴って鋼道路橋に疲労損傷が生じていることが数多く報告されている．また，高度経済成長期に架設された橋梁は，すでに架設から 40 ～ 50 年経過し経年劣化も報告されている．さらに，1995 年兵庫県南部地震，2011 年東北地方太平洋沖地震によって橋梁が被害を受け，全国の橋梁の耐震性能を向上させる補強対策が必要とされている^{1),2)}．

鋼道路橋に限らず，一般に補修・補強工事は狭隘な部位が多く，部材の反対側に人が入れないばかりでなく，手さえ入らない場合もある．このような場合，部材の接合に溶接を用いることになるが，狭隘な部位においては，溶接姿勢や運棒などが制約されるので，溶接品質を確保することが難しい．溶接品質を確保するために様々な対策を講じ，極めて大がかりな工事になってしまうこともある．したがって，補修・補強工事においては，出来るだけ部材の接合を高力ボルトで行うことが望まれている．

さて，従来の高力ボルトは部材の片側からボルトを挿入し，もう一方の側からナットで締付けるので，上述のように，少なくとも部材の反対側に手が入らないと施工できな

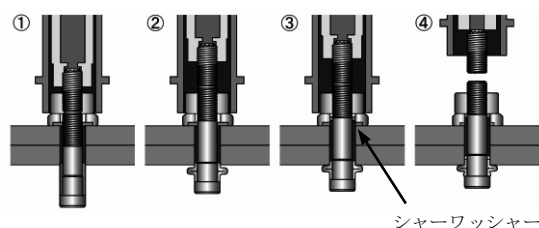
い．この問題点を解決した，部材の片側から施工が可能な高力ワンサイドボルトと呼ばれるボルトがある．このボルトは，既存構造物の補修・補強工事における部材の接合に極めて有効なボルトである．さらに，新設構造物においてもハンドホールをあけることができない小径の角形鋼管のような閉断面部材の接合にも有効である．現場溶接を行わずに部材を接合できるので，接合部の品質，施工性，安全性が向上するといった利点もある．

高力ワンサイドボルトに関する研究には，大野らによる片面施工用高力ボルトを用いた摩擦接合法³⁾，松村らによる矩形鋼製断面柱の角補強効果⁴⁾，田中らによるワンサイドボルト引張接合による柱・梁接合部に関する研究⁵⁾などがあり，ワンサイドボルトの有効性が少しずつ明らかにされてきた．しかしながら，これらの研究は実構造への適用のための検証試験であり，系統立てて行われたものではない．また，これまで高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の疲労強度に関する研究も行われていない．

本稿では，最初に高力ワンサイドボルトの部材構成，締付けの概要を紹介する．次に高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の基礎的特性である，すべり係数，軸力リラクセーション，疲労強度について調査し，従来の高力ボルト継手



図－1 高力ワンサイドボルト部材構成



図－2 高力ワンサイドボルト締結概要図

の特性と比較、考察する。さらに、疲労試験前後のボルトの引張強度についても調査する。最後に、高力ワンサイドボルトを用いた摩擦接合継手の角形鋼管柱への適用事例や鉄筋コンクリート柱の耐震補強事例、および鋼道路橋の耐震補強・疲労対策事例を報告する。

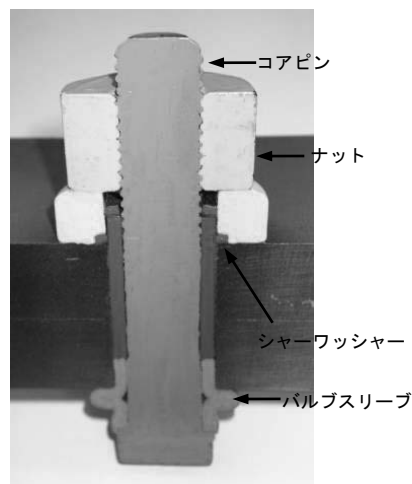
2. 高力ワンサイドボルトの概要

高力ワンサイドボルトの部材構成を図－1に示す。部材裏側でボルト頭を形成するバルブスリーブ、バルブスリーブを支持するグリップスリーブおよびシャーワッシャー、グリップスリーブを確保するベアリングワッシャー、特殊台形ねじおよびピンテール溝の付いたコアピン、ナットの6部品から構成されている。

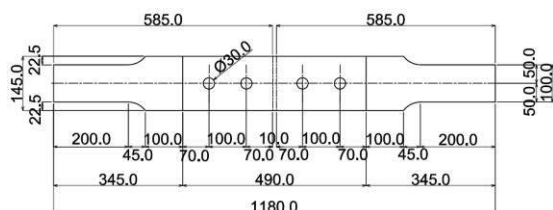
高力ワンサイドボルトの締付けの概要を図－2に、締付け後のボルトの軸方向断面を写真－1に示す。締付け手順は以下の通りである。

- ①高力ワンサイドボルトをボルト孔に挿入し、専用シャーレンチで締付けを開始
- ②部材裏側でバルブスリーブが座屈変形し、バルジ（ボルト頭）を形成
- ③シャーワッシャーが軸力によりせん断され、部材への軸力導入を開始
- ④コアピンのピンテールが破断することにより、所定の軸力が導入され締付け完了

バルブスリーブの座屈変形に要する軸力は、バルジ形成と同時にシャーワッシャーのせん断により一旦解放される。その後、トルシア型高力ボルトと同様に、ピンテールの破断により所定の軸力がコアピンに導入される。高力ワンサイドボルトの軸力導入は、2段階の締付けメカニズムとなっている。



写真－1 高力ワンサイドボルト断面



図－3 すべり試験体

溶接接合は、作業環境の影響を受けやすく、作業員の技量に左右される場合が多々あるが、高力ワンサイドボルトは、専用電動シャーレンチを使用して締付けるので、作業環境や作業員の技量の影響を受けることが少ない。また、このボルトは、片側から部材を締付けることができるので、反対側に人を配置したり、閉断面部材にハンドホールを設けたりする必要がなく、従来の高力ボルト接合より省力化が可能である。

3. すべり試験

3.1 試験方法

試験体を図－3に示す。角形鋼管柱の接合部を想定した二面摩擦接合継手とし、板厚は $t=22\text{mm}$ 、材質は SN490Bとした。摩擦面の処理には、ショットブラスト処理とグリットブラスト処理を採用し、表面処理の違いについて調査することとした。いずれの処理においても表面粗さは $50\mu\text{mRz}$ 以上とした。また、高力ワンサイドボルト試験体との比較のため、従来の高力ボルト (S10T, M22) を用いた試験体についてもすべり試験を行った。この試験体の表面処理はショットブラスト処理である。試験体数は1ケースにつき3体とした。

すべり試験にはアムスラー型万能試験機を用い、明瞭なすべり音を発したときの荷重を主すべり荷重 $P(\text{kN})$ とした。

3.2 試験結果

表－1～3にすべり試験の結果を示す。すべり係数 μ を算出するのに使用した標準ボルト軸力には、すべり試験に用いたボルトと同じロットのボルト5本の軸力測定値の平

表－1 高力ワンサイドボルト(グリットブラスト)

	試験体 No.1	試験体 No.2	試験体 No.3
P (kN)	710	759	707
μ	0.610	0.652	0.607

表－2 高力ワンサイドボルト(ショットブラスト)

	試験体 No.1	試験体 No.2	試験体 No.3
P (kN)	682	622	698
μ	0.586	0.534	0.600

表－3 高力ボルト(ショットブラスト)

	試験体 No.1	試験体 No.2	試験体 No.3
P (kN)	575	550	531
μ	0.625	0.598	0.577

均値を用いた。高力ワンサイドボルトの軸力は 291kN、高力ボルトの軸力は 230kN であった。

高力ワンサイドボルト継手のすべり係数 μ の 3 体の平均値は、グリットブラストの場合 0.62、ショットブラストの場合 0.57 であり、高力ボルト継手のすべり係数は 0.60 であった。高力ワンサイドボルト試験体も従来の高力ボルト試験体も道路橋示方書に規定されているすべり係数値 0.4 を満たしており、両試験体に有意な差は認められない。また、本実験の範囲においては、表面処理方法の違いによるすべり係数の差異は認められない。

4. リラクセーション試験

4.1 試験方法

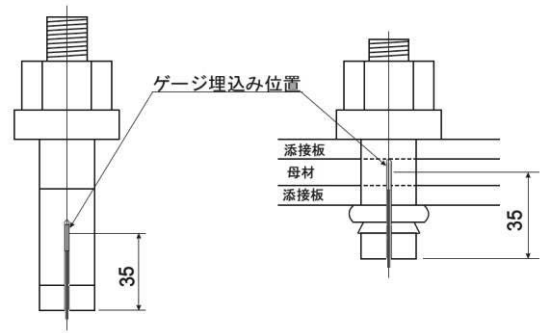
リラクセーション試験における高力ワンサイドボルトの軸力は、コアピンに埋め込んだ軸力ゲージの軸方向ひずみを計測し、応力-ひずみ関係およびボルト断面積を用いて算出した。軸力ゲージの埋め込み位置を図－4に、設置状況を写真－3に示す。

図－7に示す疲労試験体が高力ワンサイドボルトを締付けた後、14日経過までの軸力を計測した。

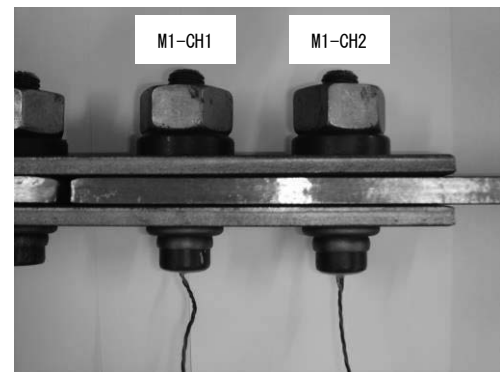
4.2 試験結果（短期計測）

高力ワンサイドボルトの軸力とボルト締付け後の経過時間の関係を図－5に示す。ボルト軸力は、締付け後、1日経過するまでは急激に低下し、その後緩やかに減少した。約1週間経過すると、ほぼ一定の軸力で安定し、14日経過後の軸力減少量は、締め付け時の軸力を100%とした場合、約4.5%となった。

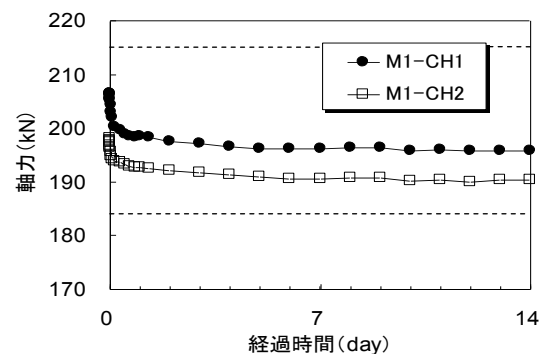
調査した2本のボルトの導入軸力に約5kNの差が締付け直後から14日経過後まで生じている。これは導入軸力のばらつき、試験体のボルト締付けの際に1次締めを省略したことなどに起因していると思われるが、試験結果は高力ワンサイドボルトの導入軸力の規定値184～215kNに収まっている。



図－4 軸力ゲージ埋め込み位置



写真－3 軸力ゲージ設置状況



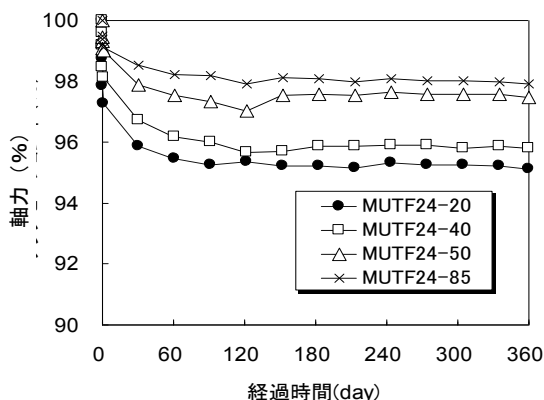
図－5 軸力のリラクセーション

4.3 試験結果（長期計測）

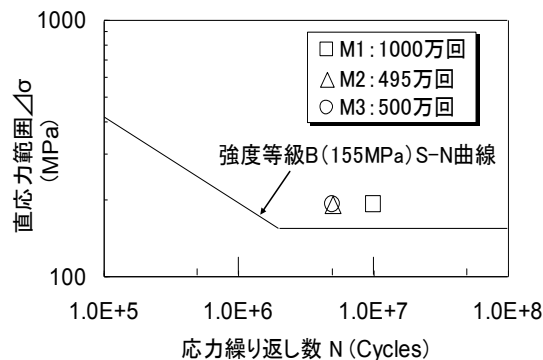
高力ワンサイドボルトの軸部長さが軸力のリラクセーションに及ぼす影響と長期的なリラクセーションを確認するため、4種類の高力ワンサイドボルトに対して1年間の長期計測を行った。室温20℃の恒温恒湿試験室内でボルト頭部にひずみゲージを貼り、ボルト軸方向ひずみの経年変化を計測した。

図－6に軸力のリラクセーションの長期計測結果を示す。締付け直後の導入軸力を100%としたとき、1年後の軸力低下は2.1～4.9%であった。

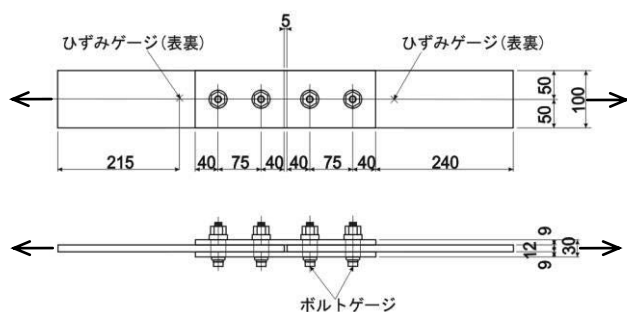
これらの結果から、高力ワンサイドボルトのリラクセーションは、従来の高力ボルトのリラクセーション試験結果と同様な傾向を示しており、設計軸力や導入軸力について特別な配慮は必要ないと判断される⁸⁾。



図－6 軸力のリラクセーション



図－8 疲労試験結果



図－7 試験体形状

表－4 鋼板の機械的性質

	材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
添 接 板	SS400	9	311	442	29
母 材	SM400A	12	333	458	30

表－5 高力ワンサイドボルトの材質

Core Pin	Nut	Washer
SCM440	SCM440	SCM430

Shear Washer	Grip Sleeve	Bulb Sleeve
SCM430	SCM430	AISI1018

表－6 コアピンの機械的性質

	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	絞り (%)	伸び (%)
規格値	Min 1006	1118-1216	Min 40	Min 14
成績	1111	1195	54	16

5. 疲労耐久性試験

5.1 試験方法

試験体は、図－7に示すように、二面摩擦接合とし、試験体数は3体（M1、M2、M3）とした。母材および添接板の機械的性質を表－4に、高力ワンサイドボルトの材質およびコアピンの機械的性質を表－5および表－6に示す。試験体のボルト孔径は $\phi=26.0\text{mm}$ とし、母材および添接板の摩擦面にはショットブラスト処理を施した。母材端部から215mmの位置にひずみゲージを貼付し、疲労試験における荷重を検証した。

日本道路協会の疲労設計指針では、高力ボルト摩擦接合継手の強度等級はB等級に分類されており、基本応力範囲は $\Delta\sigma=155\text{MPa}$ である。しかしながら、本実験では試験体数に限りがあるので強度等級を1ランク上のA等級に設定し、作用応力範囲をA等級の基本応力範囲である $\Delta\sigma=190\text{MPa}$ とした⁷⁾。

疲労試験は、完全片振り、繰返し速度6Hzで行った。

5.2 疲労試験結果

図－8に高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の疲労試験結果を示す。図には、従来の高力ボルト摩擦接合継手の疲労設計曲線(強度等級B)も示した⁷⁾。応力範囲 $\Delta\sigma=190\text{MPa}$ に対して、M1は繰返し数1,000万回で破断せず、M2は495万回、M3は500万回で破断した。

M2およびM3の破断後の状況を写真－3、4に示す。M2、M3とも高力ワンサイドボルトの頭側(バルジ側)からナット側へ板厚の斜め方向に破断している。従来の六角高力ボルトM24(S10T)のボルト頭外径は43mm、ワッシャー外径は48mmであるのに対して、高力ワンサイドボルトは締付け後のバルジ外径は約38mm、ワッシャー外径は47.5mmである。このように高力ワンサイドボルトは頭側とナット側の寸法差が従来の高力ボルトに比べて大きく、バルジ側とナット側で部材を締付ける力に差があることが、板厚の斜め方向への破断という結果に表れていると考えられる。

写真－5、6に実験終了後のM2、M3試験体の解体後のナット側およびバルジ側の母材破断状況を示す。繰返し荷



写真-3 母材破断状況 (M2)



写真-4 母材破断状況 (M3)



写真-5 母材破断状況 (ナット側)

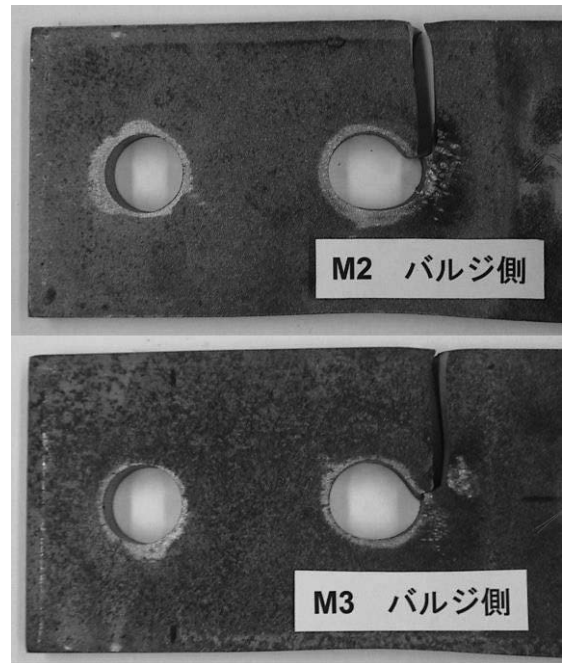


写真-6 母材破断状況 (バルジ側)

表-7 疲労試験前後の引張試験

	最大(kN)	最小(kN)	平均(kN)
疲労試験前(n=10)	270.9	269.2	269.9
疲労試験後(n=8)	270.8	269.2	270.0

重による表面損傷(フレッティング)が母材ボルト孔周辺に認められ、ここが亀裂発生箇所であると判断される。ボルト孔周辺の表面損傷部から疲労き裂が発生し、板幅方向に進展して破壊している。

極めて限られた試験体数ではあるが、もっとも寿命が短かった M2 でも応力範囲の打ち切り限界 200 万回の約 2.5 倍という結果が得られ、本実験の結果、高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の疲労強度が、従来の高力ボルト摩擦接合継手のそれより低いと結論するには至らなかった。

6. 高力ワンサイドボルトの引張試験

疲労試験後の高力ワンサイドボルトの強度を確認するために、試験体 M2 および M3 を解体し、高力ワンサイドボルトの引張試験を行った。工場出荷時と疲労試験後の高力ワンサイドボルトの引張試験結果を表-7 に、試験後のボルト破断状況を写真-7, 8 に示す。

高力ワンサイドボルトの引張試験後の破断位置は、全てボルトのねじ部であり、座屈変形したバルジ部(ボルト頭部)は十分な強度を有していることが分かる。

工場出荷時と疲労試験後の高力ワンサイドボルトの引張強度に差異はなく、約 500 万回の繰返し荷重を受けた後でも、高力ワンサイドボルトの強度低下はないことを確認できた。

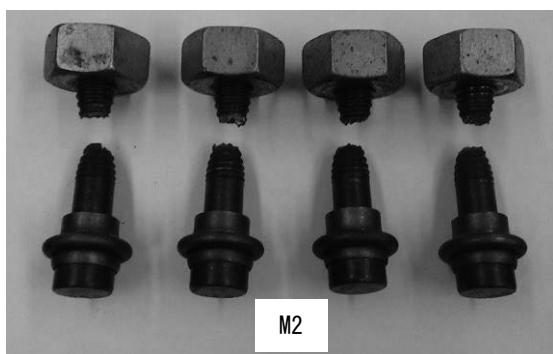


写真-7 引張試験後の破断状況(M2)

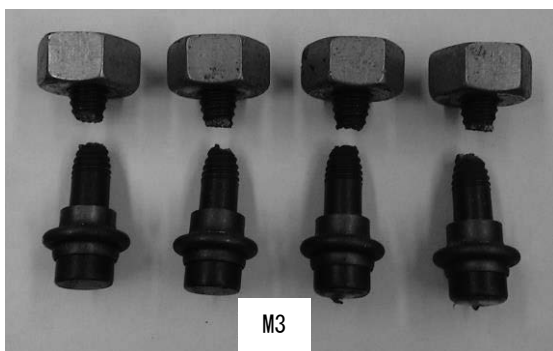


写真-8 引張試験後の破断状況(M3)



写真-9 角形鋼管柱継手

7. 高力ワンサイドボルトの適用事例

閉断面である角形鋼管の柱継手は、ハンドホールを設けることが困難な場合が多かったため現場溶接せざるを得なかったが、片側施工が可能な高力ワンサイドボルトを用いることで、摩擦接合継手の適用が可能になった。

高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の角形鋼管柱への適用事例を写真-9に示す。

また、RC柱への鋼板巻き立てや耐震ブレース設置などの耐震補強工事においても、高力ワンサイドボルト継手は現場溶接を必要としない接合法として有効である。



写真-10 RC柱鋼板巻き補強



写真-11 鋼アーチ橋補強

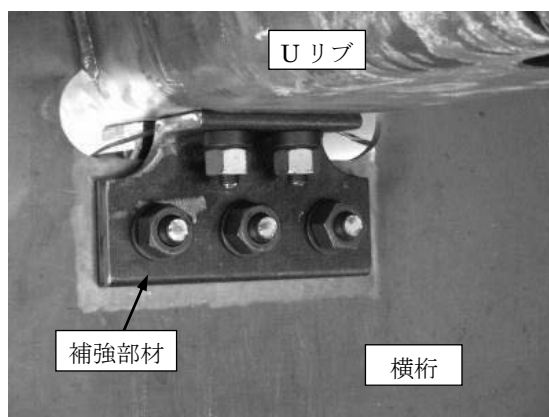


写真-12 鋼床版Uリブ補強

RC柱の鋼板巻き立て接合部に高力ワンサイドボルトを用いた事例を写真-10に示す。

アーチ橋やトラス橋など比較的大規模な橋梁の耐震補強に採用された事例もある。その一例としてアーチリブの角補強事例を写真-11に示す^{1),4)}。この例も部材が閉断面で

あり、ハンドホールをあけずに施工できるということが評価され採用された。

鋼道路橋の疲労亀裂の補修・補強においては、交通規制をできるだけ避ける、閉断面部材にハンドホールをあけることを避けるといった施工上の制約から高力ワンサイドボルトを用いる場合がある。鋼道路橋の鋼床版の U リブと横桁交差部の疲労き裂対策に採用された事例がある⁹⁾。鋼床版 U リブ下面に補強部材を高力ワンサイドボルトで接合した事例を写真-12 に示す。

8. まとめ

高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の基礎的特性である、すべり係数、軸力のリラクセーション、疲労耐久性について検証試験を行った。また、疲労試験後の高力ワンサイドボルトの引張試験を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 高力ワンサイドボルト試験体も従来の高力ボルト試験体も道路橋示方書に規定されているすべり係数値 0.4 を満たしており、両試験体に有意な差は認められなかった。また、本実験の範囲においては、表面処理方法の違いによるすべり係数の差異は認められなかった
- (2) 高力ワンサイドボルトのリラクセーションは約 5% 程度であり、従来の高力ボルトのリラクセーション試験結果と同様な傾向を示した。
- (3) 極めて限られた試験体数ではあるが、もっとも寿命が短かった試験体でも応力範囲の打切り限界 200 万回の約 2.5 倍という寿命が得られ、本実験の結果、高力ワンサイドボルト摩擦接合継手の疲労強度が、従来の高力ボルト摩擦接合継手のそれより低いと結論するには至らなかった。

- (4) 工場出荷時と疲労試験後の高力ワンサイドボルトの引張強度に差異はなく、約 500 万回の繰返し荷重を受けた後でも、高力ワンサイドボルトの強度低下はないことを確認した。
- (5) 高力ワンサイドボルトの実構造への適用例を 4 例紹介した。

参考文献

- (1) 吉津宏夫, 藤井恒二郎: 鋼逆ランガー橋の補強設計, 土木技術 59 巻 7 号, pp.55-62, 2004.7
- (2) 橋本保則, 亀山誠司, 広村修: ワンサイドボルトによる鋼床版 U リブ突合せ溶接部の添接補強, 技報たきがみ VOL.23, pp.87-96, 2005.11
- (3) 大野崇, 名取暢, 松本好生: トルクコントロール型片面施工用高力ボルトを用いた摩擦接合法, 横河ブリッジ技報 No.26, pp236-240, 1997.1
- (4) 松村政秀, 北田俊行, 吉津宏夫, 木地谷充良, 村本和之: ワンサイドボルトによる矩形鋼製断面柱の角補強効果に関する実験的研究, 第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp207-212, 2006.2
- (5) 田中剛, 田淵基嗣, 古海賢二, 村山 稔, 松原洋一: ワンサイドボルト引張接合による仕口増厚角形鋼管柱・梁接合部に関する研究, 鋼構造年次論文報告集第 3 巻, pp.355-362, 1995.11
- (6) 高田 佳彦, 平野 敏彦, 坂野 昌弘: 阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷状況報告, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.1067-1068, 2006.9
- (7) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3
- (8) 土木学会: 鋼構造シリーズ 15 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006.12
- (9) 平野 敏彦, 高田 佳彦, 松井 繁之, 坂野 昌弘: 鋼床版の U リブと横リブ交差部の疲労き裂に着目した移動輪荷重試験報告, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.1125-1126, 2006.9