

二条城本丸御殿における 150 角角形鋼管ボルト式十字形柱 継手の性能試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：重要文化財 二条城本丸御殿 御常御殿及び御書院
文化財種別 (指定年月日)：重要文化財 建造物 (昭和 19 年 9 月 5 日)
所在地：京都府京都市中京区二条通堀川西入二条城町 541
所有者 (管理団体)：京都市 [担当：京都市文化市民局 元離宮二条城事務所]
構造形式：御常御殿 木造 2 階建 (3 層)、御書院 木造平屋建
建築年：御常御殿 嘉永 2 年 (1849) 築、明治 26～27 年移築、
御書院 寛政 2 年 (1790) ～3 年築、明治 26～27 年移築
事業名称：重要文化財 (建造物) 二条城本丸御殿玄関ほか 3 棟保存修理強化対策事業
事業期間：平成 29 年 (2017) 6 月 1 日～令和 6 年 (2024) 3 月 31 日
工事名称：京都市二条城本丸御殿玄関ほか 2 棟保存修理工事
工事期間：平成 30 年 (2018) 10 月 26 日～令和 6 年 (2024) 3 月 31 日
工事種別：半解体修理 (+耐震補強工事)
事業者：京都市
設計監理：京都市文化市民局 元離宮二条城事務所
(有) シー・アンド・シー事務所 (協力事務所 株式会社 立石構造設計)
実験計画者：京都市文化市民局 元離宮二条城事務所
請負者 伸和建設 (株)、(株) 上宗建設共同企業体
構造補強工事監理 (有) シー・アンド・シー事務所
(協力事務所 株式会社 立石構造設計)
京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 空間構造開発工学分野
聲高裕治研究室
実験機関：京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 空間構造開発工学分野 聲高研究室
実験年月日：令和 3 年 (2021) 9 月 14 日～10 月 6 日
引用・参考文献：－

●実験に至る経緯と目的

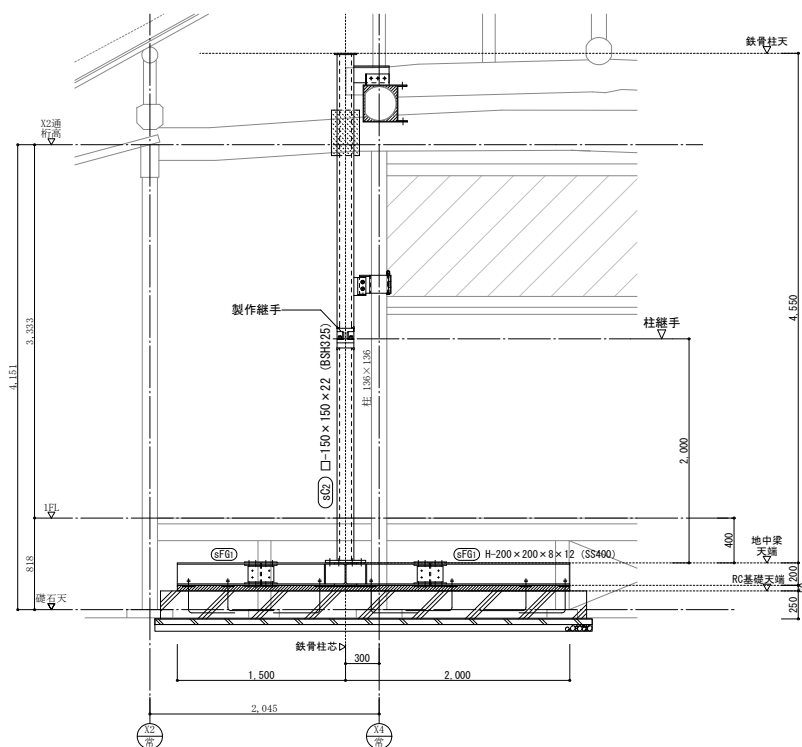
【経緯】

二条城本丸御殿の玄関、御書院、御常御殿の耐震補強実施設計では、当初耐震補強のひとつとして 200 角の角形鋼管柱を計画していた。

しかし、二条城保存整備委員会において、鉄骨補強の必要性は認められるものの、鉄骨柱をおよそ 150 角の木造柱に寄せて配置すると目立つため、可能な限り鋼管のサイズを小さくするべきとの要求がなされた。

鉄骨柱の継手は搬入施工の制約から必要不可欠であり、現場内は火気厳禁のため、柱の継手は無溶接継手である必要があるが、角形鋼管の無溶接継手は 200 角までであれば一般化された工法と部品があるものの、150 角は存在しない。

そこで、今般オリジナルの 150 角継手を考案し、初めて使用するため、所要の構造性能を試験によって確かめることとした。試験は公的機関で実施した。



御常御殿 西側補強柱詳細図

【目的】

新型の 150 角無溶接継手の構造性能を明らかにし、実施設計で設定した数値以上あることを確認する。

なお、試験で得られた数値を用いて、実施設計と同一の方法(等価線形化法)により、耐震補強された建造物の耐震性能を確認する。

● 姿図・寸法

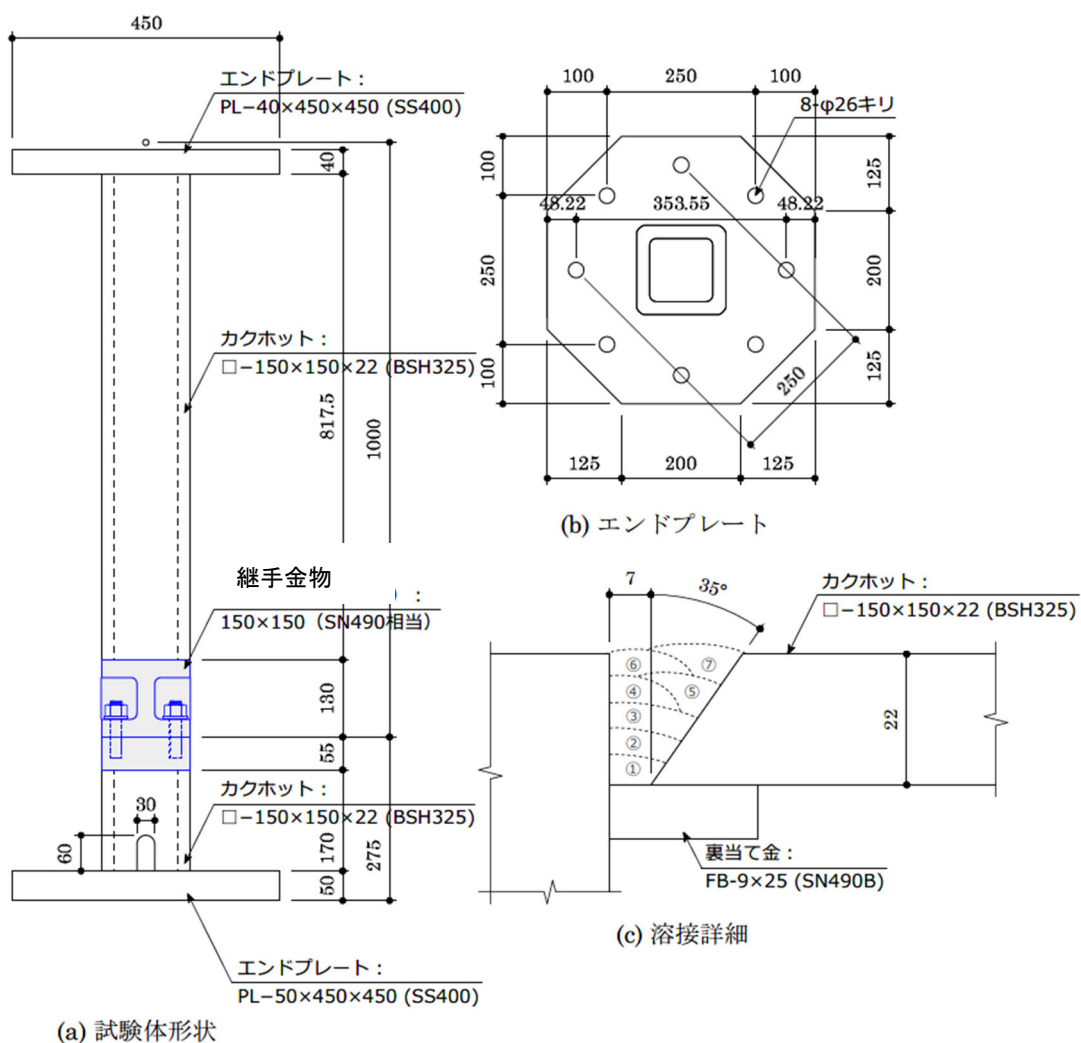
【使用材料】

柱 □-150×150×22 (BSH325)

上側継手金物 PL-130 (SN490B 相当)、下側継手金物 PL-55 (SN490B 相当)

植込みボルト M20 (10T F10T の頭部を除去し、ネジ加工を行ったもの)

【試験体寸法】



試験体寸法(単位: mm)

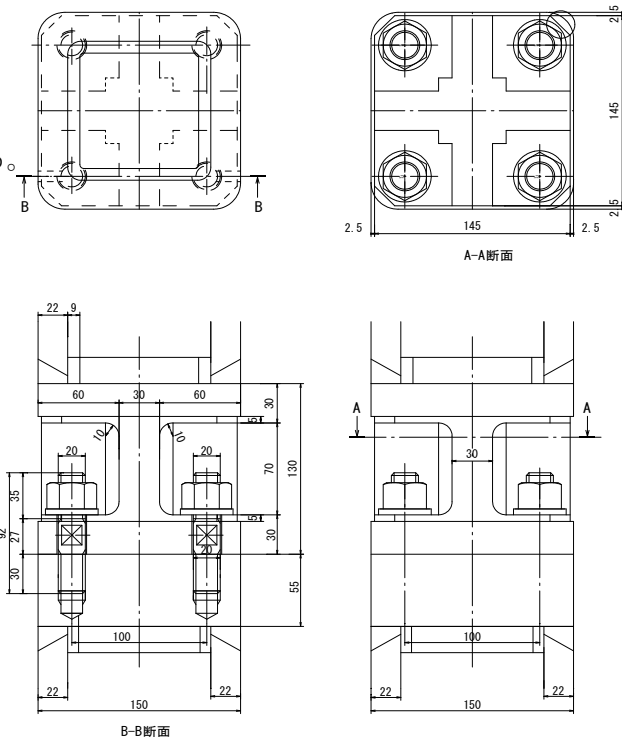
継手溶接部の 2 隣辺は、余盛(柱面からはみ出た部分)を表面仕上げの試施工としてグラインダーがけを実施している。

製作継手は炭素鋼 SM490 で、
上継手は 150mm 六面体から削り出し
製作する。下継手は厚さ 55mm の
150mm 角に植え込みボルトのねじを切る。

上下の継手は、工場溶接にて柱材と
溶接接合される。右図はグラインダー
処理後の姿図である。

接合具は、径 20mm の両ねじの
高力ボルトである。

継手を溶接した柱材は専用のレンチ
を用いて現場で無溶接接合される。



製作継手寸法(単位 : mm)

●概要

継手金物部分の回転剛性と耐力を確認する。実験パラメータは、ボルトに与える初期張力、柱軸力の有無、水平力の載荷方向とする。下表に示す。

なお、柱軸力は、十字断面の降伏軸力 2419kN に軸力比 0.1 を乗じた値に近い 250kN とした。

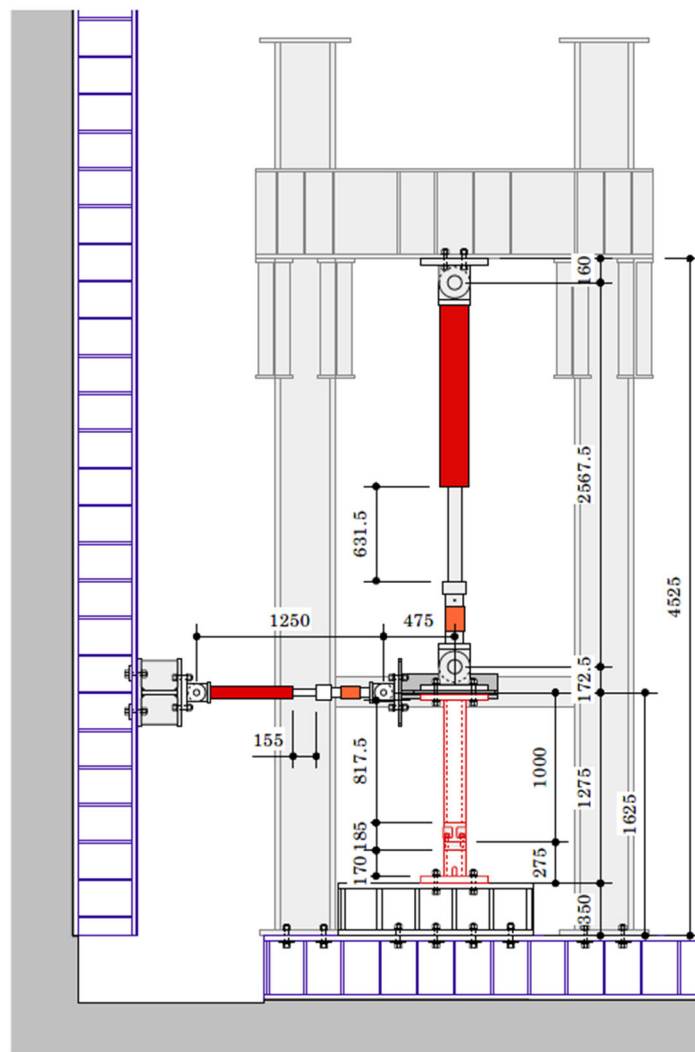
実験パラメータ

ボルト初期張力 (kN)	水平力の載荷方向			
	0°		45°	
	柱軸力なし	柱軸力あり	柱軸力なし	柱軸力あり
120	①弾性	①弾性		
140	②弾性	②弾性		
160	④弾性	④弾性		
180	③弾塑性	③弾性	⑥弾性	⑥弾性
200	⑤弾塑性	⑤弾性	⑦弾塑性	⑦弾性

●実験方法

水平油圧ジャッキには載荷能力 200kN、ストローク 300mm のもの、鉛直油圧ジャッキには載荷能力 500kN、ストローク 800mm のものを用いる。

柱の下端部のエンドプレートを基礎ジグに高力ボルトで接合することで、固定端を模擬し、上端部はエンドプレートに専用のジグを介して 2 つの油圧ジャッキを取り付けることで、自由端を模している。載荷履歴は、AISC 耐震規定* に準ずる。



載荷装置(単位 : mm)

* AISC : Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-10) ,2010.6

●特性値

【試験体全体の弾性剛性】

初期導入張力 [kN]	柱軸力	荷重方向	弾性剛性 [kN/mm]							
			全体		上柱		継手		下柱	
			正	負	正	負	正	負	正	負
120	なし	0°	6.21	6.36	70.8	65.3	12.4	12.4	25.3	27.1
140			6.55	6.62	68.9	65.1	12.9	12.7	24.4	23.5
160			6.11	6.17	74.2	68.0	11.1	11.7	24.0	23.4
180			6.65	6.63	72.2	66.2	13.2	12.6	25.4	26.3
200			6.08	6.18	63.8	66.1	11.3	11.8	27.5	23.5
120	あり		6.23	5.97	56.7	58.4	12.1	11.6	28.0	25.0
140			6.28	6.27	57.9	57.2	12.0	12.0	25.0	25.2
160			6.56	6.07	86.0	63.6	12.3	11.2	29.9	28.9
180			6.53	6.37	63.0	60.0	12.5	11.8	29.1	27.8
200			6.18	5.94	63.7	57.9	11.8	11.2	28.8	27.7
180	なし	45°	6.24	6.51	67.3	63.7	13.4	13.2	33.1	29.2
200			6.31	6.49	63.2	63.3	14.0	14.1	33.3	27.8
180	あり		6.83	6.14	77.4	55.9	14.6	13.2	31.2	28.1
200			7.14	6.24	43.5	58.5	15.9	13.8	30.7	28.4

【継手部の回転角の弾性剛性】

初期導入張力 [kN]	柱軸力	荷重方向	弾性剛性 [$\times 10^3$ kNm/rad]					
			継手全体の回転角		曲げによる回転角		離間による回転角	
			正	負	正	負	正	負
120	なし	0°	11.8	11.9	25.1	24.9	104.8	80.7
140			12.1	12.1	25.1	25.0	105.1	80.4
160			10.6	11.1	20.3	22.0	40.6	52.8
180			12.5	12.0	25.0	25.0	151.7	86.8
200			11.1	11.2	20.8	22.1	52.7	55.9
120	あり		12.4	11.9	25.6	24.6	117.9	106.9
140			12.3	12.1	24.2	24.7	125.3	124.8
160			12.5	11.4	25.4	23.0	75.2	73.1
180			12.7	12.0	25.1	24.7	227.9	199.8
200			12.1	11.4	23.2	22.3	83.6	80.3
180	なし	45°	13.0	12.8	18.76	19.3	-	-
200			13.6	13.7	18.6	19.3	-	-
180	あり		15.1	13.7	22.4	20.3	-	-
200			16.4	14.4	23.1	20.2	-	-

【継手部の回転角の弾性剛性】

初期導入張力 [kN]	柱軸力	荷重方向	降伏耐力 [kNm]		全塑性耐力 [kNm]	
			計算値	実験値	計算値	実験値
180	無	0°	33.8	47.1	57.1	59.4
200				49.4		60.9
200		45°	39.6	56.9	68.4	61.3

計算値とは、十字断面の寸法から求まるそれぞれの耐力を示す。

【離間耐力】

初期導入張力 [kN]	柱軸力	荷重方向	離間耐力 [kNm]・サイクル開始時ボルト張力 [kN]							
			NE (N)		NW		SE (S)		SW	
120	無	0°	22.0	116.0	22.6	116.5	24.6	115.6	22.9	117.8
140			25.4	137.5	25.5	137.4	25.5	137.2	27.5	138.8
160			-	152.1	-	150.2	-	154.1	-	153.5
180			31.1	176.5	31.3	176.9	31.3	174.1	32.5	174.6
200			-	189.8	-	186.4	-	185.1	-	187.4
180		45°	-	169.8	/		-	171.7	/	
200			-	182.9			39.6	180.9		

【継手の最大耐力】

初期導入張力 [kN]	柱軸力	荷重方向	最大耐力 [kNm]			
			計算値		実験値	
			案①	案②	正	負
180	無	0°	72.8	56.0	(66.2)	67.9
200			66.1	(67.7)		
200		45°	80.2	59.4	62.8	(63.0)

計算値とは、ボルトの破断で決定される最大耐力を示す。

案①：回転中心をメタルタッチ面の縁とした場合

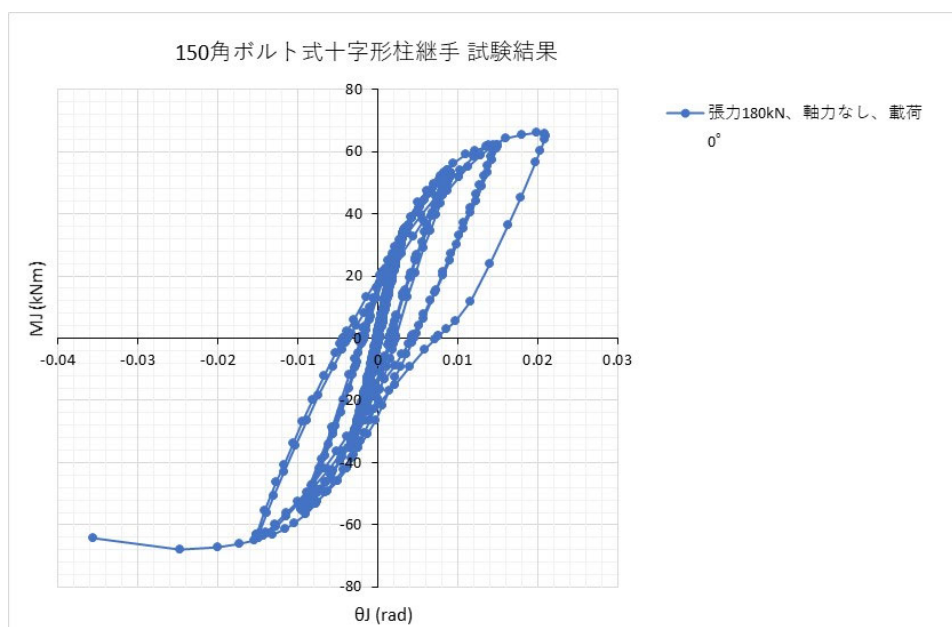
案②：回転中心を圧縮縁側のボルト図心とした場合

●荷重変形

荷重変形関係は、塑性域まで実験で確認した③ 初期ボルト導入張力 180kN、付加軸力なし、水平力の載荷方向 0° のケースを以下に示す。



試験番号③ 初期ボルト導入張力 180kN 付加軸力なし



●破壊形状

いずれの試験体も、最終的には植込みボルトが破断した。

継手金物のめねじについては、試験後に容易に解体できたことから、概ね弾性範囲内であったと考えられる。十字断面については、明らかに塑性化した。ただし、十字断面の降伏からボルト破断までの耐力上昇は2倍以上で、破壊が生じるまでかなりの余力があることが確認できた。

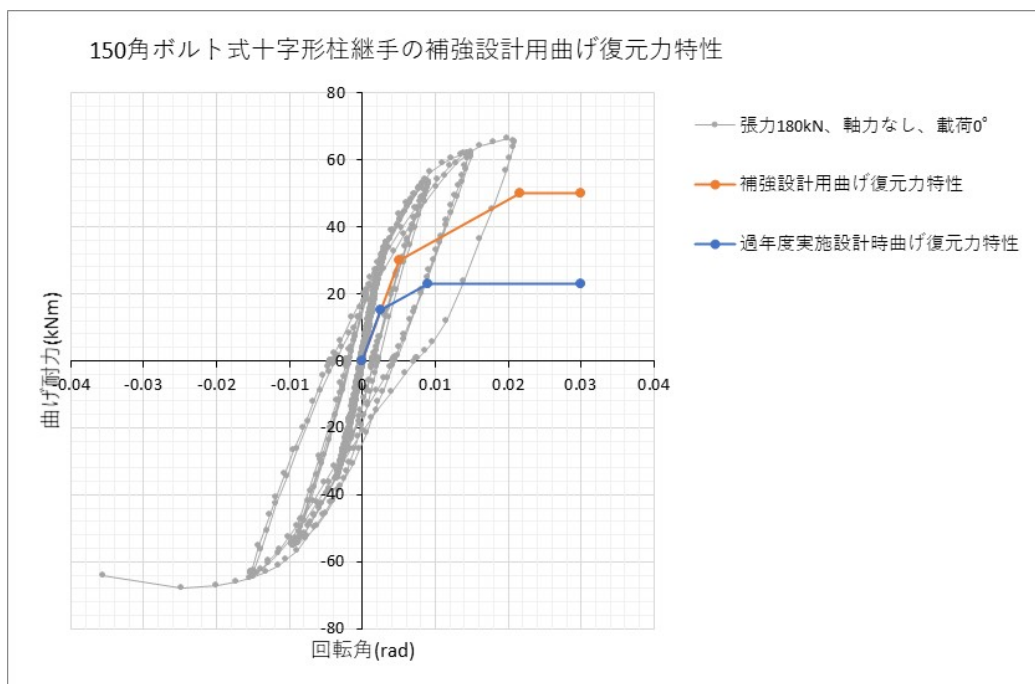


ボルトの終局状態

●理論式 —

●モデル化

木架構と鉄骨架構を複合した部材型の立体架構モデルの 150 角柱の継手について、耐震補強設計用の剛性と耐力を実験結果から求めた数値を元に設定して、当該建造物の耐震性能を検討した。



初期導入張力 (kN)	初期剛性 ($\times 10^3$ kNm/rad)	降伏耐力 (kNm)	二次剛性 ($\times 10^3$ kNm/rad)	終局耐力 (kNm)
180	6.0	30	1.2	50

●考察

この継手の設計上の注意点は、十字断面の降伏が許容耐力であり、設計ではその範囲に収めるようにすることと考えられる。

万一、想定を超える応力が生じた場合でも、植込みボルトを取替えることで、この継手を再用できると考えられる。

なお、本継手を本件の仕様で採用する場合、最も適切なボルト初期張力は、下記 2 点を根拠として、180kN と設定した。

- ボルトの初期導入張力が大きいほど、曲げモーメント- ボルト張力関係の傾きが低下し始める荷重が大きくなる。
- M20 の標準ボルト張力が 180kN 強である。

過年度の実施設計時の想定値と比較して、回転剛性はおおよそ一致することを確認した。降伏及び終局耐力(曲げモーメント)は、想定値の約 2 倍あることを確認した。

また、複数の試験体を製作し実験したことで、上下継手金物の接触面の平滑具合が回転剛性に与える影響が非常に大きいことが明らかになった。しかし、下継手金物上面を削ることにより平滑面をつくることで、回転剛性及び耐力を確保できることを確認した。工場製作時の精度の推奨値もあわせて確認できた。

なお、試験を終了した試験体は、塗装・下地処理及び継手部の意匠的な仕様検討のために有効利用した。