

局部座屈損傷部を加熱/プレス矯正した鋼製橋脚の力学挙動

Mechanical behavior of steel bridge pier with local buckling damage
corrected by heating/pressing

金 裕哲*, 廣畑 幹人**, 森本 拓世***, 小野 潔****

You-Chul Kim, Mikihiro Hirohata, Takuya Morimoto, Kiyoshi Ono

*工博, 大阪大学 接合科学研究所 教授 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

**修士(工学), 大阪大学大学院 工学研究科 博士後期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***大阪大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

****博士(工学), 東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

In order to elucidate the mechanical behavior of steel bridge pier whose local buckling parts were corrected by heating and pressing, a series of experiments was conducted. It was confirmed that mechanical characteristics of the steel were unchanged by heating/pressing correction with or without water-cooling only if heating temperature was kept below A_1 transformation temperature. In the case that residual imperfection was larger than initial deflection and its mode was the same as buckling mode, the maximum load of the specimen after heating/pressing correction became lower comparing with that in the virgin situation. However, in the case that the mode of residual imperfection was intentionally inverted to buckling mode, the maximum load after heating/pressing correction was the same as that in the virgin situation.

Key Words: Heating/Pressing correction, Local buckling, Steel bridge pier, Residual imperfection

キーワード: 加熱/プレス矯正, 局部座屈, 鋼製橋脚, 残存不整

1. 緒言

地震や火災, 事故などにより局部座屈した社会基盤鋼構造物の早期復旧を目的として, 加熱とプレスを併用した矯正による補修が広く行われている^{1,2)}。

ところで, 加熱/プレス矯正が部材強度に及ぼす影響について不明な点が多々あり, 加熱/プレス矯正された鋼構造部材の安全性を保証する意味から, 加熱/プレス矯正が部材強度に及ぼす影響を明らかにしておくことは重要と考える。

著者らは, 等方十字断面柱および箱型断面柱を対象とし, 一連の実験および数値シミュレーションを行い, 加熱/プレス矯正が鋼構造部材の単調圧縮荷重負荷下における力学挙動に及ぼす影響を明らかにしてきた³⁾⁵⁾。

ところで, 十字柱などの小型供試体を対象とした実験およびシミュレーション結果より得られた知見が, 橋脚や桁などの実構造物に対して適用できるか否かは不明である。

本稿では, 鋼製橋脚を模擬した大型供試体を対象とし,

一連の実験を行う。まず, 供試体を正負交番載荷により局部座屈させる。その後, 局部座屈部を加熱/プレス矯正し, 再び正負交番載荷実験に供す。健全状態と加熱/プレス矯正後との実験結果を比較検討し, 局部座屈損傷部を加熱/プレス矯正した鋼製橋脚の力学挙動を明らかにする。

2. 健全な鋼製橋脚に対する正負交番載荷実験

2.1 供試体

供試体の概形および寸法を図-1 に, 供試体諸元を表-1 に示す。供試体数は2体とし, 供試体 A では加熱/プレス矯正に際し水冷を用いない。一方, 供試体 B では加熱/プレス矯正に際し水冷を用い, 加熱および水冷の有無が鋼材の機械的性質に及ぼす影響を明らかにする。

鋼製橋脚については, 平成8年の道路橋示方書において初めて具体的な塑性域での耐力, 変形性能を考慮した耐震設計法が導入された⁶⁾。よって, 既設橋脚の中でも, 平成8年以前の道路橋示方書⁷⁾に基づき設計された橋脚

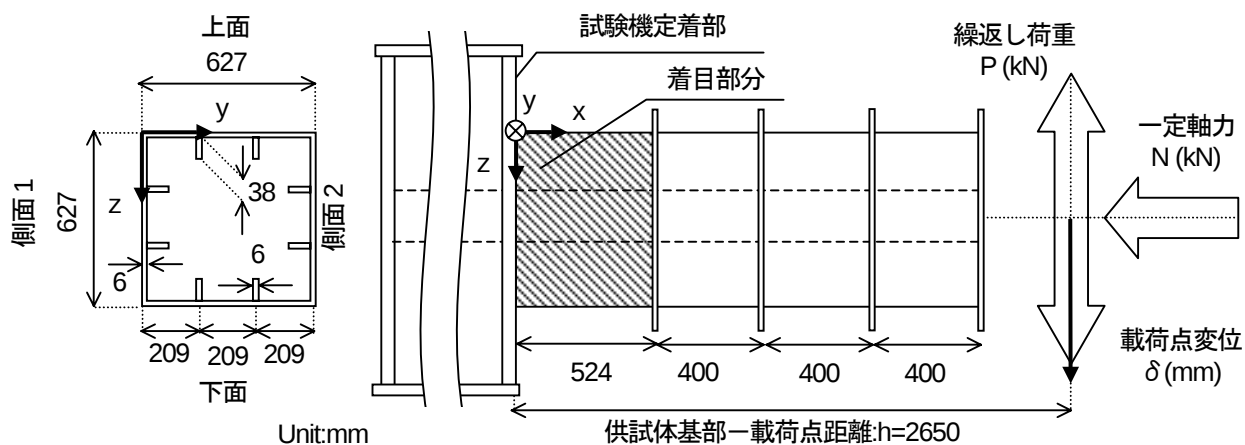


図-1 供試体概形

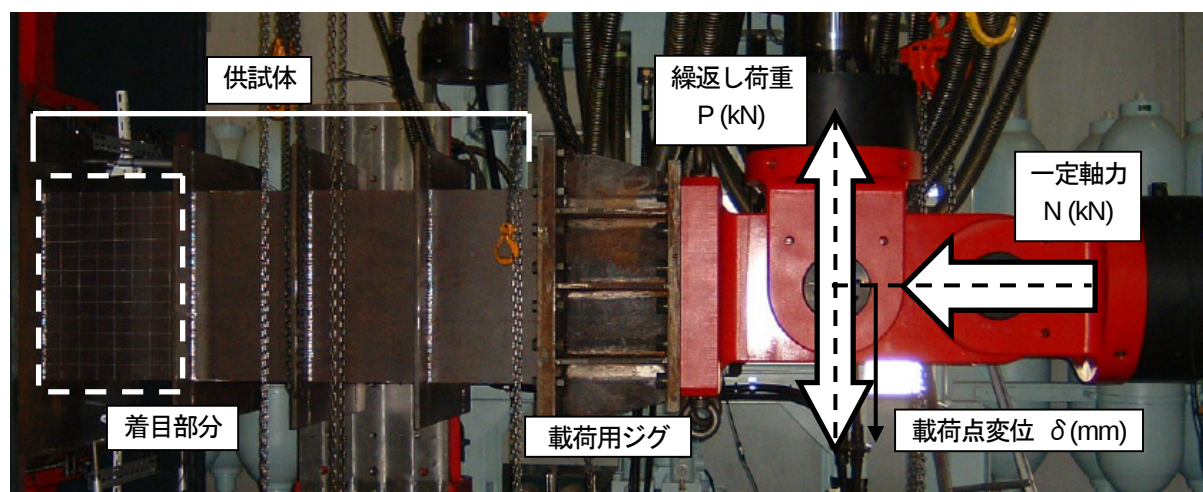


図-2 供試体－試験装置据付状況

表-1 供試体諸元

材料		SM490	
降伏応力 (MPa)	公称値 σ_{YN}	325	
	実測値 σ_{YM}	421	
ヤング率 E (GPa)		200	
供試体基部－載荷点距離 h (mm)		2650	
断面積 A (mm ²)		16728	
断面 2 次モーメント I (mm ⁴)		1.04×10^9	
断面係数 Z (mm ³)		3.33×10^6	
		公称値	実測値
細長比パラメータ λ		0.27	0.31
幅厚比パラメータ	補剛板 R_F	0.74	0.84
	補剛材間 R_R	0.74	0.84
	補剛材 R_S	0.41	0.47
縦補剛材剛比	γ/γ_{lreq}	1.00	
	γ/γ_i^*	1.00	

は、現行の示方書に基づき設計された橋脚に比べ、幅厚比が大きく、補剛材剛度が小さい^{8)・10)}。これらの橋脚を対象とし、既設橋脚の調査結果^{8)・9)}を参照し、供試体の幅厚比パラメータおよび補剛材剛比を決定した(R_R , $R_F=0.7$ 程度, $\gamma_i/\gamma_{lreq}=1.0$, $\gamma_i/\gamma_i^*=1.0$)^{6)・7)}。

交番载荷による局部座屈部を加熱/プレス矯正する際

の作業性を確保するため、ダイアフラム(板厚 16mm)は供試体外側に取り付けている。

なお、供試体着目部分(図-1 斜線部)における各パネルの面外方向初期たわみは±1mm 程度であることを確認している。

2.2 実験方法

何ら損傷していない健全な供試体を、正負交番载荷実験に供した。

供試体－試験装置据付状況を図-2 に示す。

一定軸力負荷下において、上下方向に変位制御による繰返し载荷を行った。実橋脚における死荷重に相当する軸力 N は、既往の正負交番载荷実験¹¹⁾における一般的な値であること、既設橋脚の調査結果¹⁰⁾における上限値であることから、公称降伏軸力の 15%($N=0.15 \sigma_{YN} \cdot A$)とした。

橋脚軸直角方向(実橋脚における水平方向)における繰返し载荷は、式(1)から求まる公称降伏変位 δ_{YN} を基本とし、 δ_{YN} の整数倍の変位を漸増させ载荷した(図-3 参照)。

供試体基部はボルトにより試験装置に固定されているため、载荷により基部の回転および並進が生じる。こ

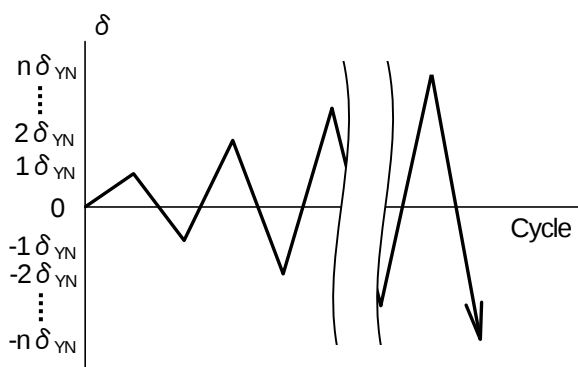


図-3 荷重パターン

れらは既往の研究¹¹⁾と同様の方法により補正した。以後、荷重点の変位 δ は補正後の値を用いる。

$$\delta_{YN} = \frac{P_{YN} h^3}{3EI} \quad (1)$$

$$P_{YN} = \left(\sigma_{YN} - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (2)$$

本研究に用いた供試体の場合、 $\delta_{YN}=9.6\text{mm}$ である。

なお、最大荷重の発生および荷重低下を確認したサイクルで荷重を終了した。

2.2 実験結果

各供試体(A, Bとする)の繰返し荷重 P および荷重点変位 δ の関係(以後、荷重－変位関係と呼ぶ)を図-4 に示す。また、荷重－変位関係(正側)の包絡線を図-5 に示す。図中、○および□印は、それぞれ供試体 A および B の最大荷重発生点を表す。

供試体 A は 3 サイクル目の荷重反転時に最大荷重に到達し、4 サイクル目に荷重低下を確認した。一方、供試体 B は 4 サイクル目載荷中に最大荷重に到達し、その後荷重が低下した。

各供試体の正側ループにおける最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_m を表-2 に示す。 P_{max} の無次元化に用いている降伏荷重 P_{YM} は、(2)式における降伏応力に実測値 σ_{YM} を代入することで得られる値である。同様に、 δ_{YM} は(1)式における降伏荷重に P_{YM} を代入することで得られる値である。

供試体 A および B において、最大荷重に達したサイクルが異なっており、最大荷重で約 30kN、最大荷重時変位で約 3mm の差があった。

各供試体の着目パネルの、試験終了後における残留変形を図-6(供試体 A)および図-7(供試体 B)に示す。なお、図中、正值は供試体外側方向を表し、負値は内側方向を表す。点線は補剛材位置を示す。

上下面および両側面における残留変形の傾向はそれぞれ同様であったため、上面および側面 1 の変形計測結果を示す(a)：上面、(b)：側面 1)。いずれの供試体も、繰返し載荷方向に直交する上面および下面は供試体内側方向に変形していた。これに対し、繰返し載荷方向に平行な側面は外側方向に変形していた。

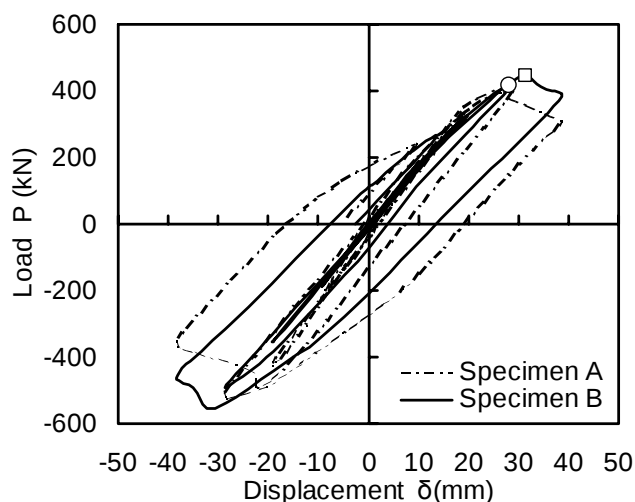


図-4 荷重－変位関係

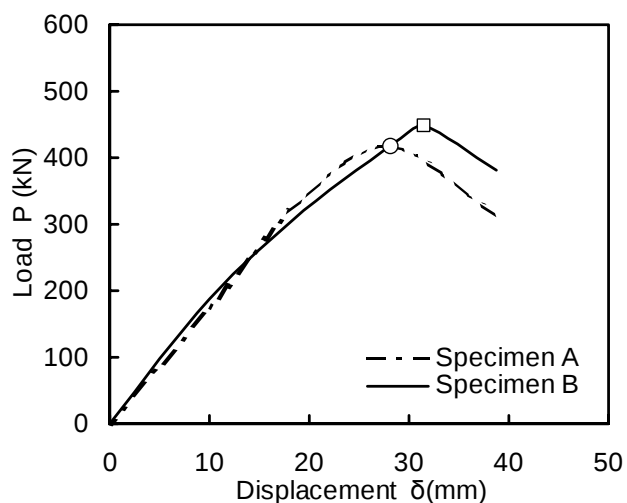


図-5 荷重－変位関係(正側)の包絡線

表-2 最大荷重および最大荷重時変位
(健全状態：正側)

		Specimen	
		A	B
最大荷重	P_{max} (kN)	417	448
最大荷重 /降伏荷重	P_{max}/P_{YN}	1.20	1.28
	P_{max}/P_{YM}	0.89	0.95
最大荷重時変位	δ_m (mm)	28.2	31.5
最大荷重時変位 /降伏変位	δ_m/δ_{YN}	2.72	3.03
	δ_m/δ_{YM}	2.02	2.25

また、面外残留変形は基部より約 200mm 離れた断面で最大となっていた。x=196.5mm における断面の面外残留変形形状を図-6(c)および図-7(c)に示す。

供試体 A および B では、最大荷重に達したサイクルが異なる(供試体 A：3 サイクル目、供試体 B：4 サイクル目)。供試体 A では、最大荷重到達(3 サイクル)後、4 サイクル目の載荷により、パネルに塑性変形が生じた。一方、供試体 B では、最大荷重に達し、荷重が低下した 4 サイクル目で載荷を終了したため、供試体 A に比べ、パネルの塑性変形は小さかった。このため、供試体 A の

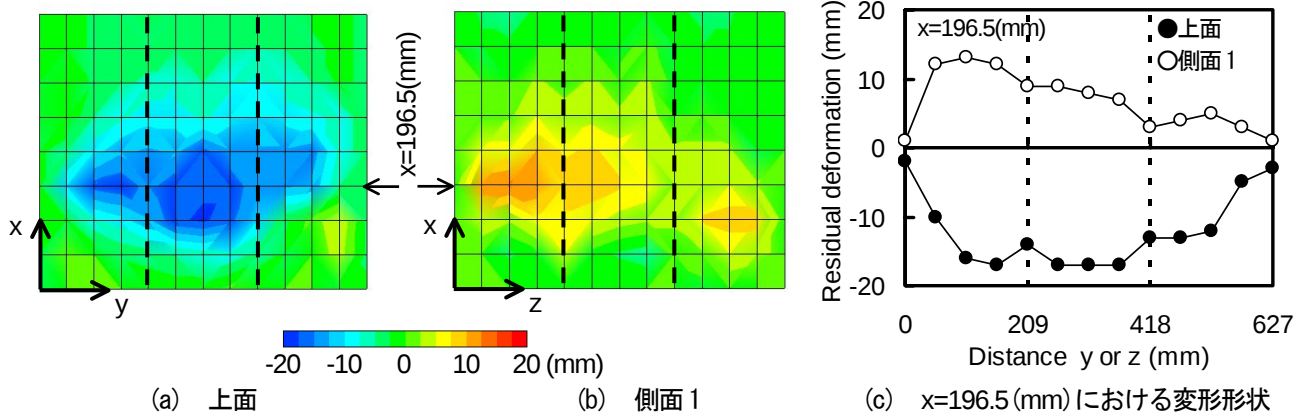


図-6 健全状態実験後における残留変形(供試体 A)

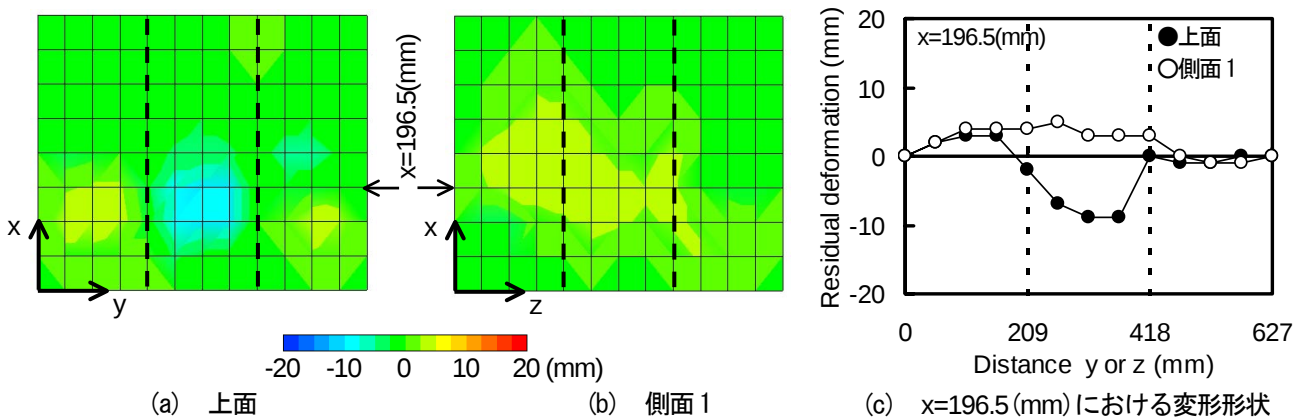


図-7 健全状態実験後における残留変形(供試体 B)

着目パネルにおける実験終了後の面外方向残留変形は、供試体 B の残留変形に比べて大きい(供試体 A : 最大値 20mm, 供試体 B : 最大値 10mm)。

供試体内部の補剛材であるが、供試体 A では面外方向に 3-8mm, 供試体 B では 1-2mm 程度変形していた。

いずれの供試体も、実験終了後、溶接部に割れなど発生していなかった。

3. 加熱/プレス矯正

交番载荷による局部座屈部を加熱/プレス矯正した。加熱/プレス矯正の概要を図-8 に示す。

実構造体では、上部工の死荷重をベントで仮受けし、無荷重状態で加熱/プレス矯正することが基本である¹⁾。現場における作業を想定し、供試体を解体することなく、無荷重状態で加熱/プレス矯正した。

鋼材の機械的性質を変化させない¹²⁾よう、加熱温度は A_1 変態点(約 720°C)以下とした($550\text{--}650^{\circ}\text{C}$)。

供試体 A では、ガスバーナーにより局部座屈部を加熱し、ジャッキを用いて残留変形を矯正した。一方、供試体 B は、ガスバーナーを用いた加熱による膨張と、水冷による収縮を利用、さらにジャッキを用いて残留変形を矯正した。

なお、温度管理には温度チョークおよび接触型の温度計を用いた。

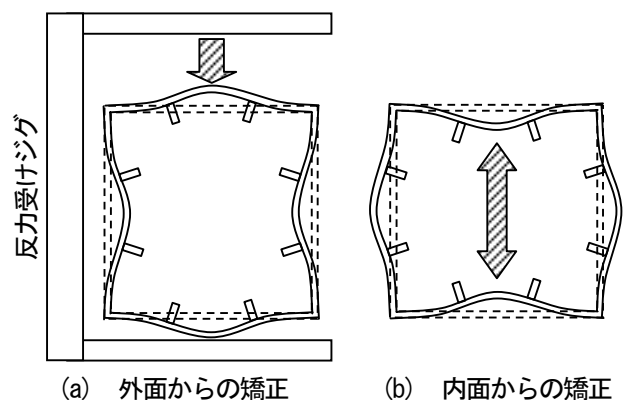


図-8 加熱/プレス矯正

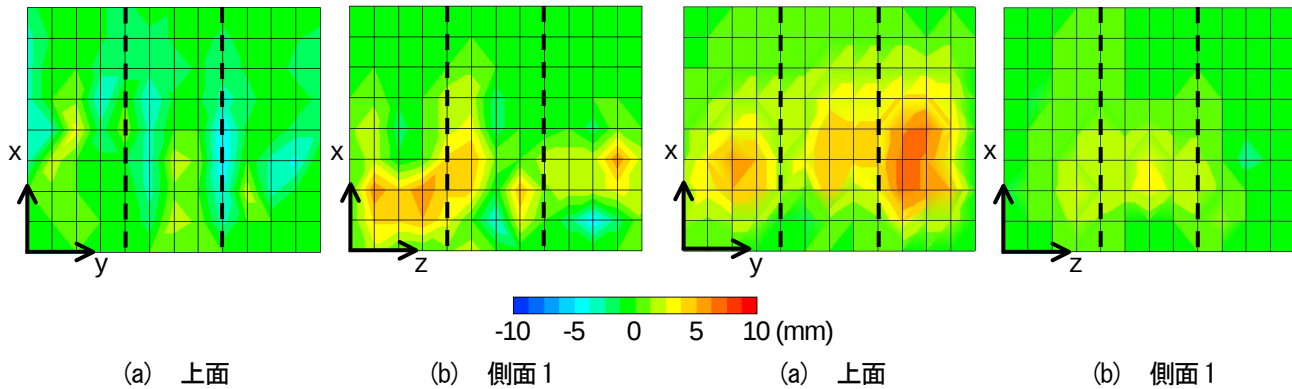


図-9 加熱/プレス矯正後における残存不整(供試体 A)

ジャッキによるプレス矯正時、外側に膨らんだ残留変形は、コの字型のジグを反力受けとし、内側にへこんだ変形は、向かい合う面を反力受けとした(図-8(a)(b))。

ところで、残留変形を無理に矯正しようとすると供試体に割れが発生するおそれがあるため、矯正しきれない変形をやむを得ず残したままにした(以後、残存不整と呼ぶ)。加熱/プレス矯正しきれない残存不整(上面および側面 1)を図-9(供試体 A)および図-10(供試体 B)に示す。

いずれの供試体も、着目パネルにおける残存不整の面外方向最大値は 7mm 程度であった。

供試体内部の補剛材は矯正が困難であり、供試体 A では面外方向に 5mm、供試体 B では 1mm 程度の不整が残った。

なお、加熱/プレス矯正に伴う供試体中心軸の変形は 1-2mm 程度であった。

供試体 A の残存不整は、正負交番载荷による残留面外変形の傾向と同様、上面および下面は供試体内側方向に変形し、側面は外側方向に変形していた(図-9(a)および(b)参照)。一方、供試体 B の残存不整は、正負交番载荷による局部座屈モードと相反するよう、やや過度に矯正した。すなわち、供試体 B の上下面における残留変形は供試体内側方向に変形していたが、これを外側方向に変形するように、やや大きく矯正した(図-10(a)参照)。

いずれの供試体も、空冷・水冷によらず、溶接部に割れなど発生することなく面外変形を加熱/プレス矯正できた。

4. 加熱/プレス矯正後における鋼製橋脚に対する正負交番载荷実験

面外残留変形を加熱/プレス矯正した供試体を、再び正負交番载荷実験に供した。

各供試体の荷重-変位関係を図-11 に、荷重-変位関係(正側)の包絡線を図-12 に示す。図中、点線は健全状態、実線は加熱/プレス矯正後における供試体の挙動を示す。図-4 および図-5 同様、○および□印は各供試体の健全状態载荷における最大荷重を表し、●および■印は加熱/プレス矯正後载荷における最大荷重を表す。

図-10 加熱/プレス矯正後における残存不整(供試体 B)

各供試体の正側ループにおける最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_m を表-3 に示す。

いずれの供試体も、载荷中に割れなど生じることなく最大荷重に到達した。最大荷重の到達点は健全状態とほぼ同じであった。すなわち、供試体 A は 3 サイクル目の载荷反転時に最大荷重に到達し、4 サイクル目に荷重低下を確認した。供試体 B は 4 サイクル目载荷中に最大荷重に到達し、その後荷重が低下した。最大荷重時変位は健全状態とほぼ等しかった。

供試体 A では、正側、負側の両ループにおける最大荷重(図-11 および 12、●印)は健全状態(○印)に比べ約 20% 低下した。ただしこれは、健全状態载荷における除荷時の荷重(△印)にほぼ等しい。一方、供試体 B では、正側、負側の両ループにおける最大荷重は健全状態とほぼ同じであった(■および□印)。

各供試体の健全状態および加熱/プレス矯正後における吸収エネルギーの推移を図-13 に示す。なお、縦軸に示す吸収エネルギーは、荷重-変位曲線(図-11 参照)により囲まれる部分の面積を繰返し数毎に求めたものである。横軸は繰返し数を表す。

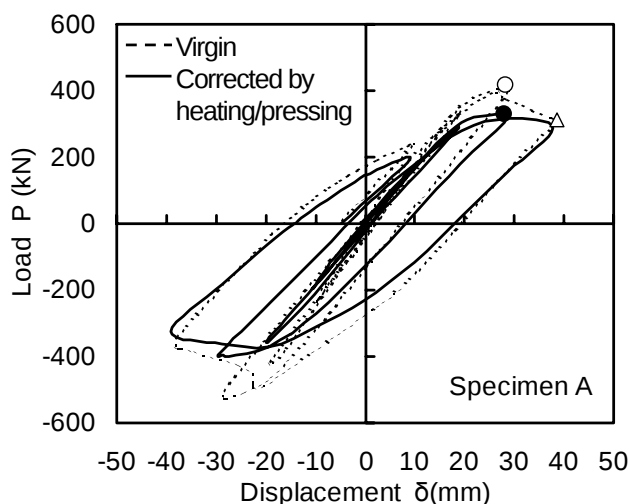
供試体 B では、健全状態および加熱/プレス矯正後载荷における荷重-変位曲線がほぼ同じであるため、当然ではあるが、吸収エネルギーがほぼ等しい。

一方、供試体 A では、健全状態に比べ、加熱/プレス矯正後における最大荷重が小さいことに起因し、4 サイクル目の吸収エネルギーが健全状態に比べ、やや低下している。ただし、これは健全状態および加熱/プレス矯正後における供試体 B の吸収エネルギーとほぼ同じであり(図-13 参照)、吸収エネルギーの低下度合いは、問題とはならない程小さい。

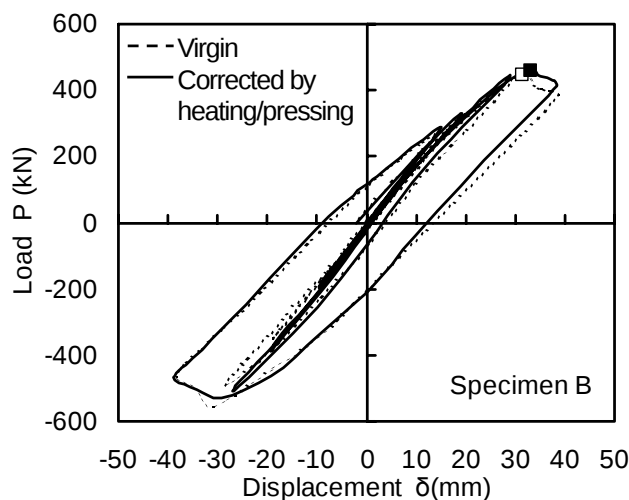
正負交番载荷終了後における着目パネル(上面および側面 1)の残留変形を図-14(a)(b)(供試体 A)および図-15(a)(b)(供試体 B)に示す。

供試体 A の場合、パネルの座屈モードは健全状態(図-6 参照)と同様であり、上面および下面は供試体内側方向に、側面は外側方向に変形していた。

一方、供試体 B の場合、健全状態とは異なる座屈モードを呈した。着目部分の上面パネルであるが、健全状態

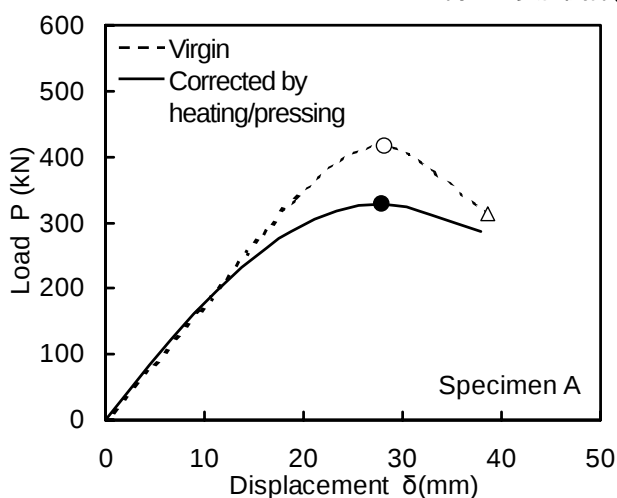


(a) 供試体 A

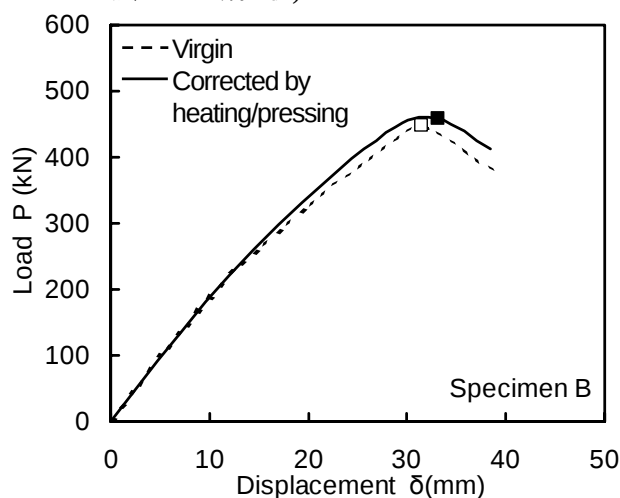


(b) 供試体 B

図-11 荷重－変位関係(健全および加熱/プレス矯正後)



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-12 荷重－変位関係(正側の包絡線)(健全および加熱/プレス矯正後)

では、補剛材間パネルが供試体内側方向に変形していた(図-7 参照)。これに対し、加熱/プレス矯正後における載荷では、上面パネルにおける基部近傍はわずかに供試体内側方向に変形していたものの、パネルのほぼ全域が供試体外側方向に変形するモードを呈していた。下面および側面は、健全状態載荷時と同様の変形モードであった。

加熱/プレス矯正後載荷終了時の、 $x=196.5\text{mm}$ における断面の面外残留変形状を図-14(c) および図-15(c) に示す。健全状態と同様、面外残留変形が最大となる断面は基部より約 200mm 離れた個所であった。

5. 実験結果に対する考察

5.1 加熱/プレス矯正が鋼材の機械的性質に及ぼす影響

加熱/プレス矯正後の正負交番載荷実験では、いずれの供試体も、載荷中に割れなど生じることなく最大荷重に到達した。また、最大荷重時変位は健全状態とほぼ等しかった。

ところで、正負交番荷重による面外残留変形を加熱/プレス矯正せず、再び正負交番荷重を負荷した場合、最大荷重は健全状態載荷における除荷時の荷重を下回るはずである。供試体 A では、加熱/プレス矯正後における最大荷重は健全状態に比べ約 20% 低下していたが、これは、健全状態載荷における除荷時の荷重にほぼ等しい(図-11, 12(a) 参照)。供試体 B では、加熱/プレス矯正後における供試体の挙動は健全状態とほぼ同じであった(図-11, 12(b) 参照)。

本実験の範囲ではあるが、加熱温度を A_1 変態点以下とすれば、加熱および冷却により鋼材の機械的性質が何ら劣化しない¹²⁾ ことを結果は示唆している。

5.2 残存不整が最大荷重に及ぼす影響

加熱/プレス矯正後における供試体 A の最大荷重は健全状態に比べ約 20% 低下した。

供試体 A の面外方向残存不整(最大値 7mm)は、初期たわみ許容値($b/150=1.4\text{mm}$: $b=209\text{mm}$)¹³⁾ に比べ、5 倍程度大きく、その傾向は局部座屈モードと同様であった(図-9

参照, 上下面: 内側方向への変形, 側面: 外側方向への変形). また, 供試体内部の補剛材にも, 面外方向の不整(5mm程度)が残っていた. このため, 加熱/プレス矯正後の正負交番荷重では, 健全状態に比べ最大荷重が大きく低下したと考えられる.

一方, 供試体 B では, 加熱/プレス矯正後における最大荷重は健全状態とほぼ同じであった. 供試体 B の残存不整の大きさは, 供試体 A とほぼ同じであったが, 上下面の残存不整が局部座屈モードと相反する傾向(局部座屈モード: 内側方向への変形, 残存不整: 外側方向への変形)となるように矯正した(図-10 参照). このため, 加熱/プレス矯正後における正負交番荷重では, 上面パネルは供試体内側に変形することなく, 供試体外側に変形するモードとなった.

繰返し荷重の荷重方向に直交する上下面は, 荷重により供試体内側方向に変形しようとするが, 上下面の外側方向への変形が, 荷重による内側への変形に抵抗したと推測される. また, 供試体 B の場合, 供試体 A に比べ補剛材の残存不整が小さかった(供試体 A : 5mm, 供試体 B : 1mm)ため, 加熱/プレス矯正後の荷重においても健全状態と同程度の最大荷重が確保できたものと考えられる.

いずれにせよ, 局部座屈部を加熱/プレス矯正する場合, 残留変形を初期たわみの許容値まで修復することが

表-3 最大荷重および最大荷重時変位
(加熱/プレス矯正後: 正側)

		Specimen	
		A	B
最大荷重	P_{max} (kN)	327	458
最大荷重/降伏荷重	P_{max}/P_{YN}	0.94	1.31
	P_{max}/P_{YM}	0.70	0.98
最大荷重時変位	δ_m (mm)	27.9	33.2
最大荷重時変位/降伏変位	δ_m/δ_{YN}	2.69	3.20
	δ_m/δ_{YM}	1.99	2.37

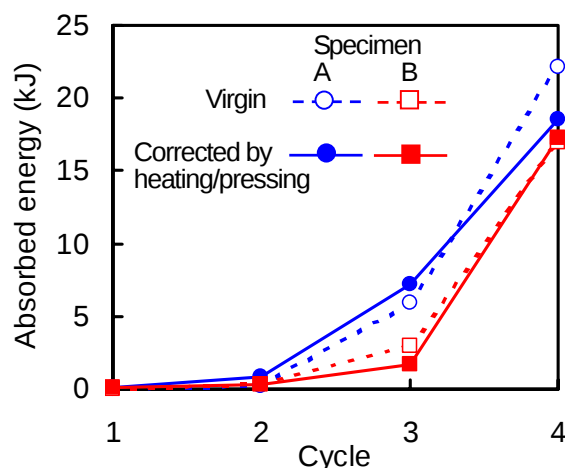


図-13 吸収エネルギーの推移

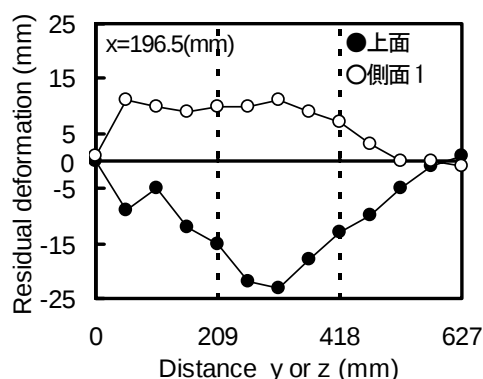
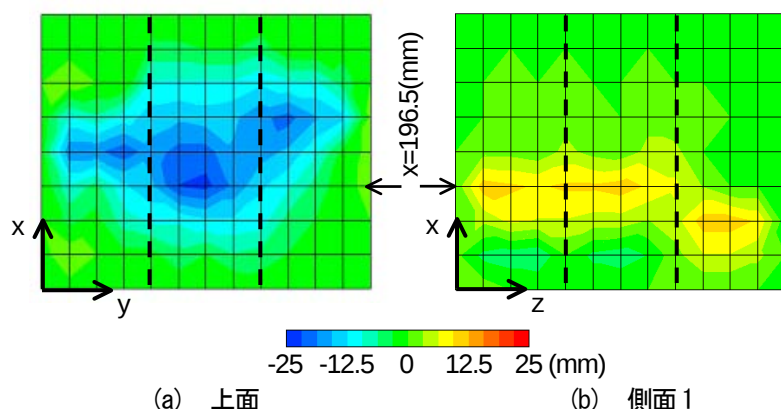


図-14 加熱/プレス矯正後の供試体 A に対する実験終了時における残留変形

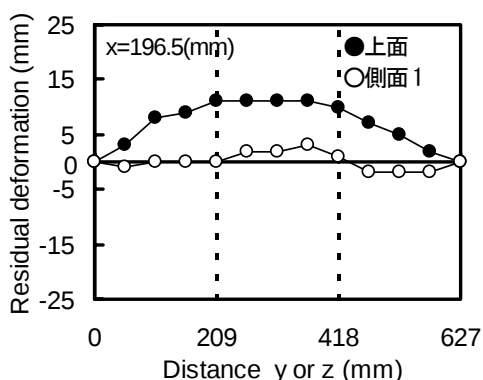
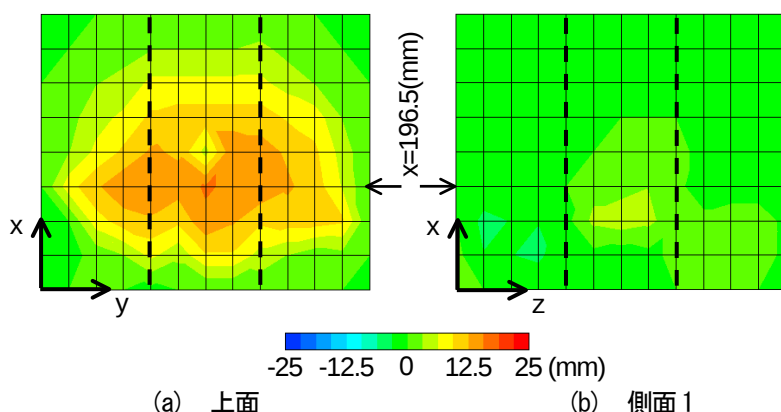


図-15 加熱/プレス矯正後の供試体 B に対する実験終了時における残留変形

理想である。ただしそれが困難な場合、本実験の範囲では、局部座屈モードと相反する不整形を残すことで、健全状態と同程度の最大荷重を確保できる可能性を結果は示唆している。

6. 結言

局部座屈損傷部を加熱/プレス矯正した鋼製橋脚の力学挙動を明らかにするため、一連の実験を行った。

結果によれば；

- (1) 加熱/プレス矯正しきれない残存不整が初期たわみ許容値に比べ大きく、その傾向が局部座屈モードと同じである場合、加熱/プレス矯正後における正負交番載荷時の最大荷重は健全状態に比べ、大きく低下した。ただし、これは健全状態における載荷履歴の除荷時の荷重と同程度であった。
- (2) 加熱/プレス矯正しきれない残存不整が初期たわみ許容値に比べ大きくても、その傾向が局部座屈モードと相反する場合、加熱/プレス矯正後における正負交番載荷時の最大荷重は健全状態と同程度であった。
- (3) 加熱/プレス矯正後の正負交番載荷において、最大荷重時までの吸収エネルギーは、健全状態と比べ、低下しなかった。
- (4) 加熱/プレス矯正時の加熱温度を A_1 変態点以下とすれば、空冷、水冷に関わらず、鋼材の機械的性質は何ら劣化していないことが確認できた。
- (5) 局部座屈部を加熱/プレス矯正する場合、残存不整を初期たわみの許容値まで修復することが理想であるが、それが困難な場合、局部座屈モードと相反する不整形を残すことで、健全状態と同程度の最大荷重が確保できる可能性を実験結果は示唆している。

謝辞

本研究は平成 16-17 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)、代表者：金 裕哲)によって行われたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 -土木構造物の応急復旧、補修、補強、1999.10.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物の補修・補強・改造の手引き、1992.7.
- 3) 金 裕哲，廣畑幹人，河津英幸：加熱矯正が十字柱突出板の座屈および終局強度に及ぼす影響，鋼構造論文集第 11 巻 44 号，pp.57-62, (社)日本鋼構造協会，2004.12.
- 4) 金 裕哲，廣畑幹人，河津英幸：加熱矯正された十字柱突出板の圧縮挙動，鋼構造論文集第 13 巻 49 号，pp.37-42, (社)日本鋼構造協会，2006.3.
- 5) 廣畑幹人，河津英幸，金 裕哲：局部座屈損傷部を加熱矯正した箱型断面柱の圧縮挙動，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，2006.9.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，2002.3
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋編，1980.
- 8) 中井博，河井章好，吉川紀，北田俊之，酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上)，橋梁と基礎，82-6，pp.35-40, 1982.6.
- 9) 中井博，河井章好，吉川紀，北田俊之，酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査(下)，橋梁と基礎，82-7，pp.43-49, 1982.7.
- 10) (社)日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の耐震設計マニュアル(ラーメン橋脚等の実験及び実績調査編)，2001.3.
- 11) 建設省土木研究所，首都高速道路公団，阪神高速道路公団，名古屋高速道路公社，(社)鋼材倶楽部，(社)日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(Ⅰ)-(Ⅷ)，(総括編)，1997.4-1999.3.
- 12) 溶接学会：溶接・接合便覧，2003.
- 13) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005.

(2007 年 9 月 18 日受付)