

加熱/プレス矯正した鋼構造部材の力学挙動の解明と補修法の提案

Elucidation of mechanical behavior of steel structural members corrected by heating/pressing and a proposal of its repair

廣畑幹人*・森本拓世**・金 裕哲***

Mikihito HIROHATA, Takuya MORIMOTO and You-Chul KIM

*正会員, 博士(工学) 大阪大学 接合科学研究所 特任助教 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

**修士(工学) 新日鉄エンジニアリング(株) (研究当時: 大阪大学大学院生)

***正会員, 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)

For proposing a method of correction by heating/pressing on locally buckled steel structural members, a series of experiments and analyses was carried out on the specimens modeling steel bridge piers. The heating temperature must be kept below A_1 transformation temperature (about 720°C) for preventing the change of the mechanical properties of the general structural steels. It was ideal that the imperfection, which was residual deformation in the steel member, was controlled within the acceptance of the initial deflection. However, even if the absolute value of the residual imperfection was 6 times as large as the acceptance of the initial deflection, the stiffness, the ultimate strength and ductility of the corrected steel member were almost the same as those of the virgin steel member by correcting the residual imperfection from the concave to the convex shape in the cross-section of the steel member.

Key Words: Correction by heating/pressing, Repair, Steel bridge pier, Local buckling, Residual imperfection

キーワード: 加熱/プレス矯正, 補修, 鋼製橋脚, 局部座屈, 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る^{1), 2)}.

ところで, 加熱/プレス矯正した鋼構造部材が, 損傷前の部材と同等の力学性能を有しているのか否か, 部材性能に及ぼす影響について不明な点が多々ある. 加熱/プレス矯正された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確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形断面柱を対象とし, 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⁾⁻⁶⁾.

さらに, 実構造物の補修を想定し, 加熱/プレス矯正が鋼製橋脚の力学挙動に及ぼす影響を明らかにするため, 橋脚を模擬した大型供試体を対象とした一連の実験を実施した⁷⁾. 供試体を正負交番載荷により局部座屈させた後, 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した. 健全時と矯正後の橋脚の挙動を比較検討した結果, 加熱/プレス矯正時の加熱温度を A_1 変態点(一般鋼材

の場合, 約 720°C)以下とすれば, 鋼材の機械的性質は何ら劣化しないことを確認した. また, 矯正しきれない面外変形(残存不整と称す)の大きさと形状が, 矯正後の橋脚の最大荷重に大きく影響を及ぼすことを明らかにした⁷⁾.

ところで, 補修の観点から, 加熱/プレス矯正後の鋼構造部材が, 健全な部材と同等の耐荷力および変形性能を確保するため, いかなる条件を満足すべきかを明らかにしておくことは重要と考える.

本稿では, 橋脚を模擬した供試体に対する一連の実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートし, 加熱/プレス矯正された橋脚の力学挙動を明らかにする. また, 矯正後の橋脚が健全な橋脚と同等の力学性能を確保するための条件を明示する. 得られた結果を基本とし, 鋼製橋脚に代表される局部座屈した鋼構造部材に対する加熱/プレス矯正による補修法を提案する.

2. 健全な鋼製橋脚の力学挙動

ここでは, 健全な鋼製橋脚の正負交番荷重下における力学挙動を明らかにするため, 橋脚を模擬した供試体に対して実施した正負交番載荷実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートする.

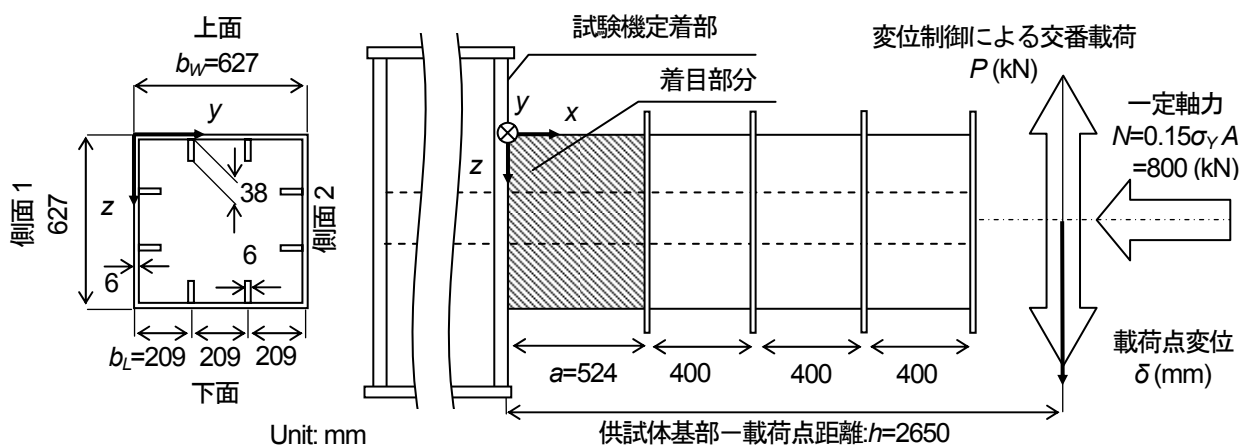


図-1 供試体概形

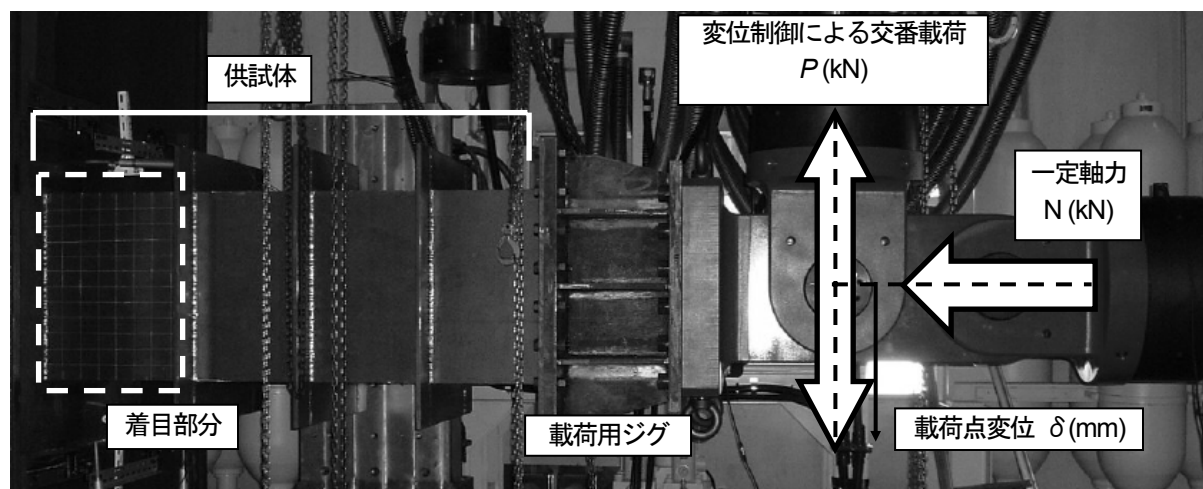


図-2 供試体一試験装置据付状況

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}	391
ヤング率 E (GPa)		200
供試体基部一荷重点距離 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	$r/r_{l, req}$	1.00
	r/r_*	1.00

2.1 健全供試体に対する正負交番荷重実験

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体である。

既設橋脚の中でも、平成8年以前の道路橋示方書⁸⁾に基づき設計された橋脚は、現行の示方書に基づき設計された

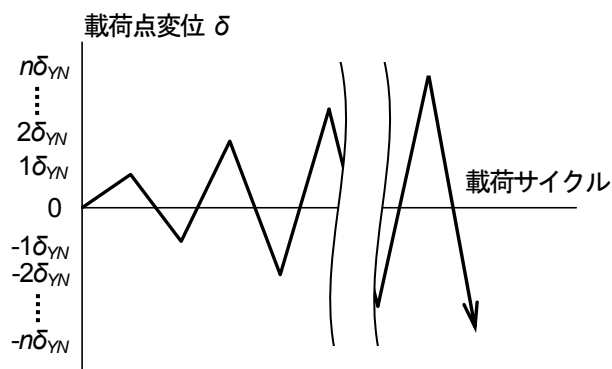


図-3 荷重パターン

橋脚に比べ、幅厚比が大きく、補剛材剛度が小さい。これらの橋脚を対象とし、既設橋脚の調査結果^{9), 10)}を参照し、供試体の各種パラメータを決定した。

荷重実験終了後、局部座屈部を加熱/プレス矯正するが、供試体断面の内側方向への変形を矯正する際、供試体の内側にバーナーを挿入、ジャッキを設置する必要がある。供試体の内側からの加熱/プレス矯正作業を容易にするため、ダイアフラム(板厚 16mm)は供試体外側に取り付けている。

供試体着目部分(図-1 斜線部)における各パネルには、橋脚軸(x)方向を8分割、パネル幅(y, z)方向を16分割するように格子状に線を記している。試験装置に設けた基準線が

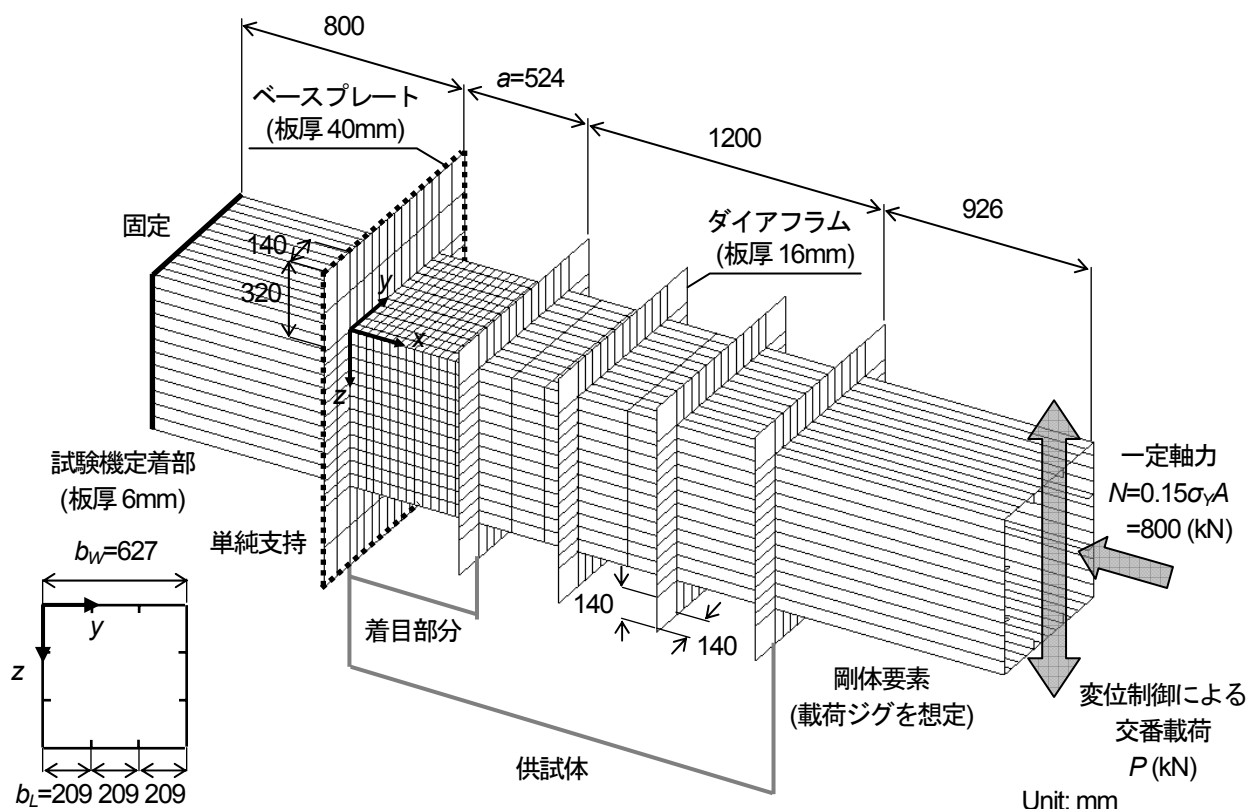


図-4 解析モデル

ら格子点までの距離を計測することで、初期たわみおよび
 載荷終了後のパネルの面外変形を計測する。

供試体着目部分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。

なお、局部座屈させる前の健全な供試体を、健全供試体
 と称す。

供試体-試験装置据付状況を図-2に示す。

実験方法であるが、一定軸力負荷下において、上下方向
 に変位制御による交番荷重を負荷した。実橋脚における死
 荷重に相当する軸力 N は、公称降伏軸力の 15%
 $(N=0.15\sigma_{YN} \cdot A; 800\text{kN})$ とした。

橋脚軸直角方向(実橋脚における水平方向)における交番
 載荷は、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載荷した(図-3 参照)。

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

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

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
 ルで載荷を終了した。

2.2 弾塑性大変形解析によるシミュレーション

解析モデルを図-4に示す。解析には4節点シェル要素
 を用いており、要素内板厚方向の積分点数は10である。

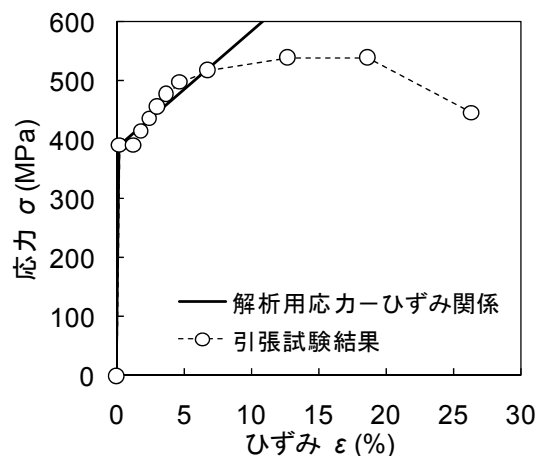


図-5 応力-ひずみ関係

橋脚頭部に設置した剛体要素に、荷重制御により一定軸
 力を負荷する。また、変位制御により交番荷重を漸増載荷
 する。

要素分割であるが、パネル幅(y, z)方向は12分割、橋脚
 軸(x)方向については、着目部分($0 \leq x \leq 524$)は16分割とし、
 着目部分以外は分割を粗くしている。

橋脚基部の境界条件であるが、ベースプレートの周辺は
 単純支持とし、試験機定着部の端は固定としている。これ
 らは、実験および解析における荷重-変位関係の初期勾配
 が一致するように決定している。

構成則であるが、図-5(実線)に示す移動硬化則を考慮し
 たバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いる。引張試験結
 果(○印)を参照し、降伏応力は391MPa、加工硬化率は $E/100$
 とする。

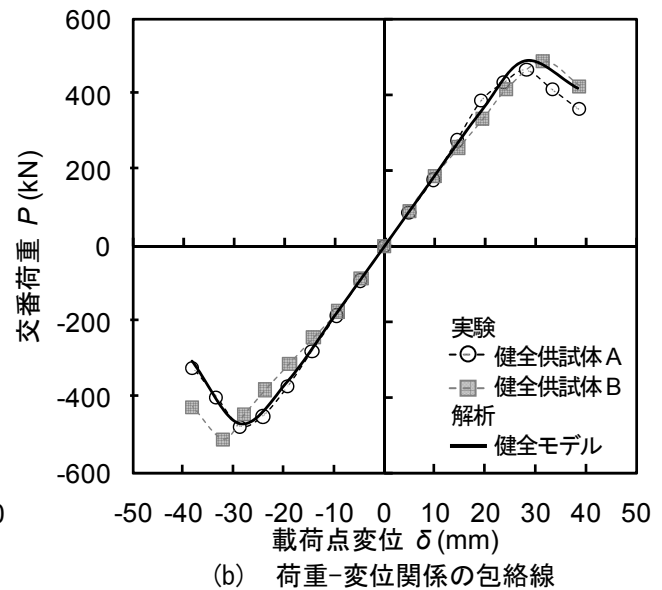
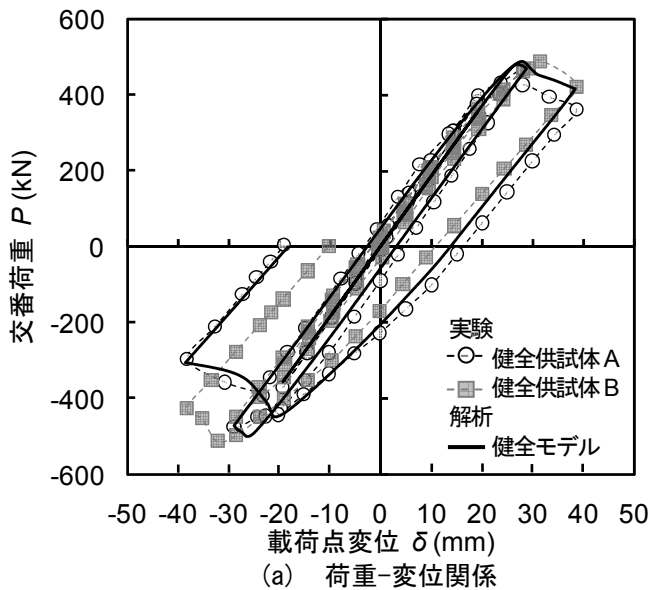


図-6 荷重-変位関係およびその包絡線(健全供試体および健全モデル)

初期たわみは、(3)式に示す正弦波の重ね合せとし、 $0 \leq x \leq 524$ の領域における4枚のパネルに対称に与える。

$$w = A_w \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b_w} + A_L \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{3\pi y}{b_w} \quad (3)$$

ここに、 A_w ：補剛板の初期たわみ許容値($b_w/1000$)。

A_L ：補剛材間の初期たわみ許容値($b_L/150$)¹⁾。

溶接残留応力であるが、健全時の載荷および加熱/プレス矯正により、残留応力分布は複雑に変化する。局部座屈の度合いおよび矯正の仕方によって残留応力分布は種々異なることが推測されるため、残留応力を考慮して得られる解析結果の一般性は不明である。このため、本研究では、健全時および矯正後を想定した全ての解析モデルにおいて、敢えて残留応力を考慮しないこととする。

以降、健全供試体を想定した解析モデルを、健全モデルと称す。

2.3 実験および解析結果

健全供試体(A および B)に対して実施した正負交番載荷実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートした。

実験および解析により得られた荷重-変位関係とその包絡線を図-6に示す。

健全供試体 A は3サイクル目の載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。一方、健全供試体 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。解析により得られた健全モデルの挙動は、健全供試体 A および B の挙動とほぼ一致していた。

供試体 A, B 共に、載荷終了後の面外変形は $x=196.5\text{mm}$ の断面において最大となっていた。 $x=196.5\text{mm}$ の断面における面外変形モードを図-7に示す。なお、面外変形の値は3倍に拡大している。

交番荷重に垂直な上下面は供試体断面の内向きに、平行な側面は外向きに変形していた。基部から100-300mm 離

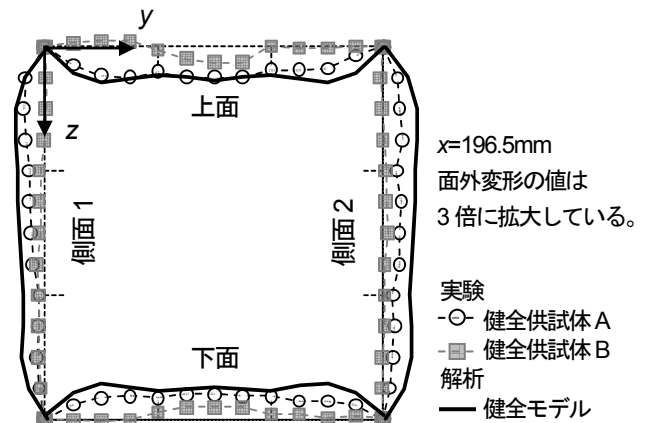


図-7 面外変形モード
(健全供試体および健全モデル)

れた領域($100 \leq x \leq 300$)が面外に大きく変形していた。面外変形の最大値は、10-20mm であった。解析により得られた健全モデルの面外変形モードは、健全供試体 A および B の面外変形モードとほぼ一致していた。

以上より、健全供試体の挙動を明らかにすると共に、使用する解析プログラムの妥当性が確認できた。

3. 加熱/プレス矯正された鋼製橋脚の力学挙動

ここでは、加熱/プレス矯正された鋼製橋脚の力学挙動を明らかにするため、局部座屈部を加熱/プレス矯正した橋脚に対して実施した正負交番載荷実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートする。

3.1 加熱/プレス矯正および正負交番載荷実験

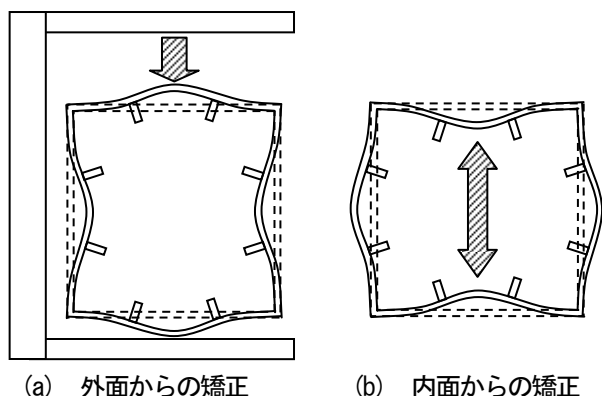
交番載荷による局部座屈部を加熱/プレス矯正した。

加熱/プレス矯正の概要を図-8に示す。

実構造物では、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



反力受けジグ



(a) 外面からの矯正

(b) 内面からの矯正

図-8 加熱/プレス矯正

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よう、加熱温度は A_1 変態点(一般鋼材の場合、約 720°C)以下($550\text{--}650^{\circ}\text{C}$)¹²⁾とした。

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面外変形を矯正した。

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。

ジャッキによるプレス矯正時、外向きに膨らんだ面外変形は、コの字型のジグを反力受けとし、内向きにへこんだ変形は、向かい合う面を反力受けとした(図-8(a)(b))。

ところで、面外変形を無理に矯正しようとすると溶接部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、残留不整と呼ぶ)。x=196.5mm の断面における残留不整を図-9 に示す。なお、残留不整(面外変形)の値は3 倍に拡大している。

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

供試体断面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。

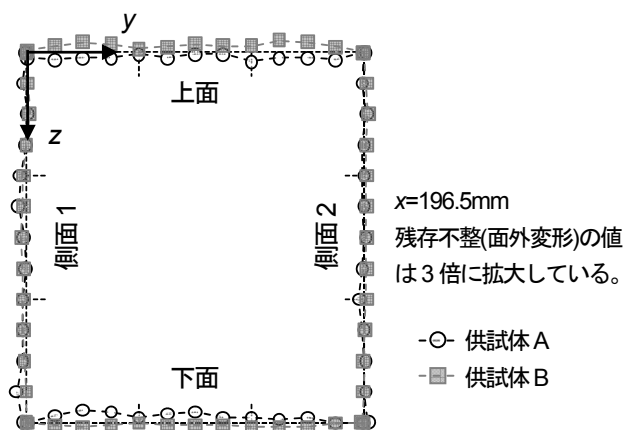


図-9 残留不整

供試体 A の残留不整は、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断面の内向きに変形し、側面は外向きに変形していた。一方、供試体 B の残留不整は、交番荷重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断面の内向きに変形していたが、これを外向きとするように、やや大きく矯正した。

いずれの供試体も、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。

加熱/プレス矯正後における供試体(矯正後供試体と称す)を、再び2.1 に示す方法により正負交番载荷実験に供した。

3.2 弾塑性大変形解析によるシミュレーション

矯正後供試体に対する正負交番载荷実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートする。

矯正後供試体の挙動に影響を及ぼす因子は種々考えられる。

まず、加熱/プレス矯正しきれない残留不整であるが、残留不整は、矯正後供試体における初期たわみに相当する。また、健全供試体の初期たわみに比べ、残留不整の絶対値は、5 倍程度大きい。残留不整が矯正後供試体の挙動に大きく影響を及ぼすことは自明である。このため、供試体 A、B の残留不整をそれぞれ節点座標として直接入力することで、初期たわみとして残留不整を考慮する。

次に、応力-ひずみ関係であるが、健全時の载荷および加熱/プレス矯正に伴い、塑性変形した領域は加工硬化し、降伏応力が変化する。これに対し、小型供試体に対する実験および解析結果から、降伏応力の変化は部材の終局状態以降の挙動にのみ影響を及ぼすことを明らかにしている³⁾⁶⁾。本研究では、補修の観点から、橋脚の最大荷重までの挙動に注目するため、塑性変形に伴う降伏応力の変化は考慮しないこととする。このため、矯正後においても、健全時と同じ応力-ひずみ関係を用いる。

また、2.2 に示すように残留応力については考慮しないこととする。

以降、矯正後供試体を想定した解析モデルを、矯正後モデルと称す。

3.3 実験および解析結果

矯正後供試体 A および B に対して実施した正負交番載荷実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートした。

実験および解析により得られた荷重-変位関係とその包絡線を図-10 に示す。なお、図には、健全供試体の荷重-変位関係の包絡線を一点鎖線で示している。

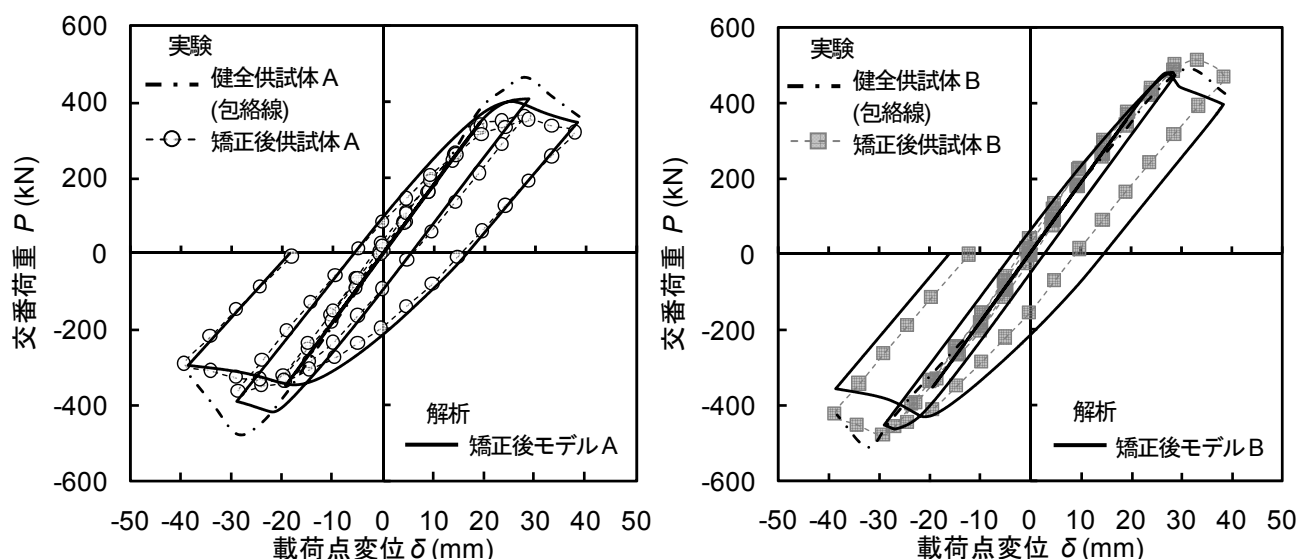
健全供試体 A と同様、矯正後供試体 A は 3 サイクル目の載荷反転時に最大荷重に到達し、4 サイクル目に荷重低下を確認した。矯正後供試体 A の最大荷重は、健全供試体 A の最大荷重に比べ、約 20% 低かった(図-10(a))。

矯正後供試体 B の場合も、健全供試体 B と同様、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。矯正後供試体 B の最大荷重および最大荷重時変位は、健全供試体 B の場合とほぼ同じであった(図-10(b))。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ことを結果は示唆していた。

解析により得られた矯正後モデル A および B の挙動は、それぞれ矯正後供試体 A および B の挙動とほぼ一致していた。

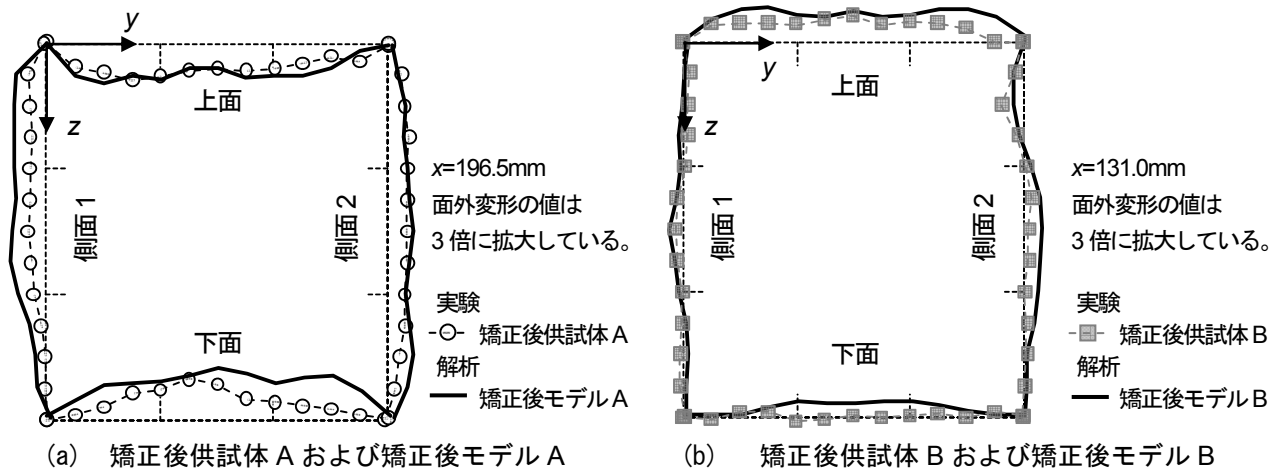
健全供試体の場合と同様、矯正後供試体の場合も、基部から 100-300mm 離れた領域($100 \leq x \leq 300$)が面外に大きく変形していた。矯正後供試体 A および矯正後モデル A では、 $x=196.5\text{mm}$ の断面において、載荷終了後の面外変形が最大となっていた。一方、矯正後供試体 B および矯正後モデル B では、 $x=131.0\text{mm}$ の断面において、載荷終了後の面外変形が最大となっていた。実験および解析により得られた面外変形モード(矯正後供試体 A および矯正後モデル A ; $x=196.5\text{mm}$ 、矯正後供試体 B および矯正後モデル B ; $x=131.0\text{mm}$)を図-11 に示す。なお、面外変形の値は 3 倍に拡大している。

矯正後供試体 A の場合、パネルの変形モードは健全供試体 A と同様、上下面は供試体断面の内向きに、側面は外向きに変形していた。一方、矯正後供試体 B の場合、健全供試体 B とは異なる変形モードを呈した。着目部分の上面パネルであるが、健全供試体 B では、補剛材間パネルが供試体断面の内向きに変形していた。これに対し、加熱/プレス矯正後における載荷では、上面パネルのほぼ全域が供試体外向きに変形していた。下面および側面は、健全供試体 B と同様の変形モードであった。



(a) 矯正後供試体 A および矯正後モデル A (b) 矯正後供試体 B および矯正後モデル B

図-10 荷重-変位関係(矯正後供試体および矯正後モデル)



(a) 矯正後供試体 A および矯正後モデル A (b) 矯正後供試体 B および矯正後モデル B

図-11 面外変形のモード(矯正後供試体および矯正後モデル)

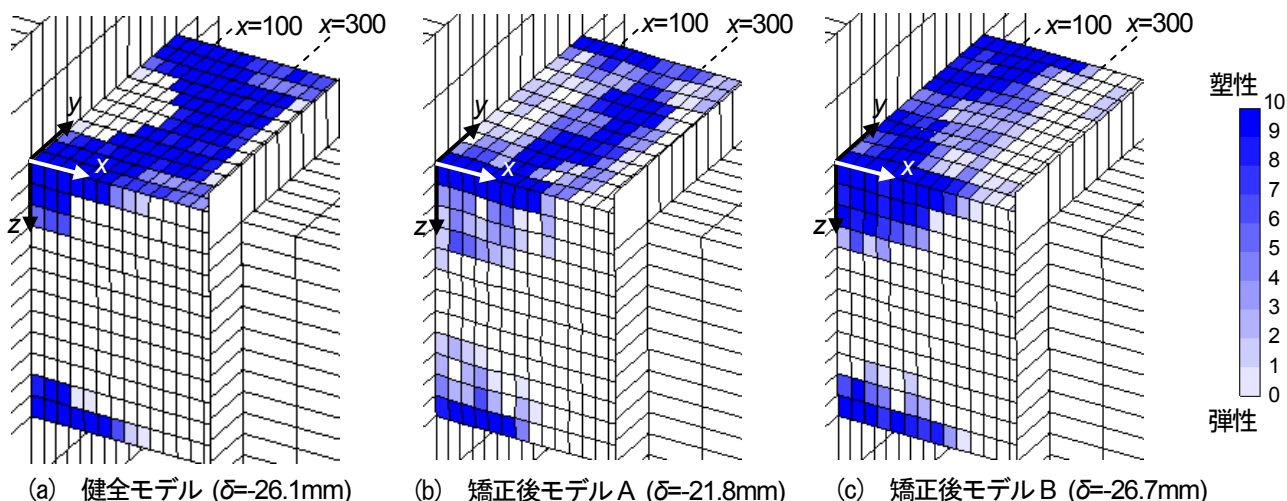


図-12 最大荷重時における塑性化進展状況

解析により得られた矯正後モデル A および B の面外変形モードは、それぞれ矯正後供試体 A および B の面外変形モードとほぼ一致していた。

矯正後モデル A, B 共に、それぞれ実験で得られた荷重-変位関係およびパネルの面外変形モードを解析により再現できた。塑性変形に伴う応力-ひずみ関係の変化および残留応力を考慮せず、残存不整のみを考慮することで、矯正後供試体に対する実験結果を再現できた。矯正後供試体の力学挙動を支配する因子は残存不整であることを解析結果は示唆している。

3.4 残存不整が鋼製橋脚の最大荷重に及ぼす影響

残存不整の傾向が載荷時の変形モードと同様(上下面：内向き，側面：外向き)である矯正後供試体 A は，健全供試体 A に比べ，最大荷重が約 20%低下した。一方，上面の残存不整の傾向を変形モードと逆とした矯正後供試体 B の最大荷重は，健全供試体 B の最大荷重とほぼ同じであった。

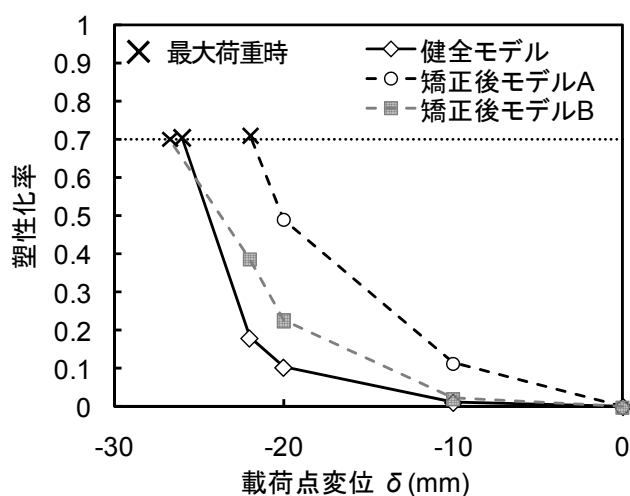
残存不整が橋脚の最大荷重に及ぼす影響を明らかにするため，最大荷重時の塑性化進展状態に注目する。

健全および矯正後モデル A, B の最大荷重時(上面パネルに圧縮応力が作用する負側載荷)における塑性化進展状況を図-12 に示す。図中，要素の色が濃くなるにつれ，板厚方向に塑性化が進展している状態を示している。すなわち，要素内板厚方向の積分点(10 点)のうち，塑性化している積分点の数を示している。

健全および矯正後モデル A(図-12(a)および(b))では，基部から 100-300mm 離れた領域($100 \leq x \leq 300$)において塑性化が大きく進展していた。

これに対し，矯正後モデル B(図-12(c))では，曲げモーメントが最大となる基部近傍から塑性化が進展した。その後，最大荷重時には，塑性化領域は基部から 100-300mm 離れた領域($100 \leq x \leq 300$)まで拡大していた。

いずれのモデルにおいても，最大荷重時には，基部から 100-300mm 離れた領域($100 \leq x \leq 300$)が大きく塑性化していた。この領域の応力算出点の数(要素数と積分点数の積)



に対する，塑性化した積分点の数の割合を塑性化率と定義し，各モデルの塑性化率の推移を図-13 に示す。

ここでは，上面パネルに圧縮応力が作用する負側載荷過程に注目しているため，横軸の変位(δ)は負値となっている。

健全モデルの塑性化率は， $\delta = -20\text{mm}$ 以降に大きく上昇した。 $\delta = -26.1\text{mm}$ の時点で，健全モデルは最大荷重に達したが，このとき，塑性化率は約 0.7 となっていた。

矯正後モデル A の塑性化率は， $\delta = -10\text{mm}$ 以降に大きく上昇し， $\delta = -21.8\text{mm}$ の時点で最大荷重に達した。矯正後モデル A では，残存不整が変形モードと同傾向であり，その絶対値が初期たわみ許容値の約 5 倍であった。このため，健全モデルに比べ，矯正後モデル A ではパネルに作用する応力が大きく，早期に塑性化が進展した。結果として，健全モデルに比べ，矯正後モデル A の最大荷重が大きく低下したと考えられる。ただし，健全モデルと同様，矯正後モデル A においても，最大荷重時の塑性化率は約 0.7 であった。

矯正後モデル B(上面パネル)の残存不整は，変形モードと逆傾向としたため，健全モデルおよび矯正後モデル A に比べ， $100 \leq x \leq 300$ の領域に作用する応力が低下した。塑性化は橋脚基部近傍から進展したが，この領域はベース

プレートによる拘束が大きく、 $100 \leq x \leq 300$ の領域における塑性化率が約 0.7 となるまで荷重は上昇した。結果として、矯正後モデル B の最大荷重は、健全モデルの場合とほぼ同じとなったと推測される。

いずれにせよ、本研究で対象とする橋脚の場合、基部から 100–300mm 離れた領域($100 \leq x \leq 300$)が約 7 割塑性化することで最大荷重が決まると考えられる。

橋脚の最大荷重を決定する領域(本研究の場合、基部から 100–300mm 離れた領域)に作用する応力を低減することが、橋脚の耐荷力を確保するうえで有効となる可能性を結果は示唆している。

4. 局部座屈した鋼製橋脚に対する加熱/プレス矯正による補修法の提案

3.において、加熱/プレス矯正後の橋脚の力学挙動を支配する因子は残存不整であることを特定した。また、矯正後の橋脚に変形モードと相反する不整を残すことが、橋脚の耐荷力を確保するうえで有効となる可能性を述べた。残存不整は、初期たわみ許容値以下に抑制することが理想であるが、それが困難な場合、どのような不整を、どの程度残すべきか。ここでは、残存不整に注目し、矯正後の橋脚が健全な橋脚と同程度の剛性、耐荷力および変形性能を確保するため、残存不整が満たすべき条件を明示すると共に、局部座屈した鋼製橋脚に対する加熱/プレス矯正による補修法を提案する。

4.1 残存不整が満たすべき条件

(1) 残存不整の傾向に対する検討

残存不整の傾向、形状および大きさと橋脚の初期剛性(荷重-変位関係の傾き)、最大荷重および最大荷重時変位の関係を明らかにするため、弾塑性大変形解析によるシミュレーションを実施する。

まず、残存不整の傾向が橋脚の力学性能に及ぼす影響について検討する。

残存不整は、(3)式に示す正弦波の重ね合せにより与える。補剛板全体(第一項)および補剛材間(第二項)の面外変形の大きさ(A_W および A_L)の組合せにより、不整の傾向、形状および大きさを種々変化させ、解析を行う。

解析モデルの断面形状を図-14(a)–(c)に示す。

モデル 1–3 は、残存不整の傾向が橋脚の挙動に及ぼす影響を明らかにするため、補剛板全体の不整のみを考慮したものである。すなわち、(3)式の第二項における A_L を 0 としている。

モデル 1 は、全てのパネルに、変形モードと同傾向、すなわち、上下面は断面の内向き、側面は外向きとなるように不整を与える。

モデル 2 は、全てのパネルに、変形モードと逆傾向、すなわち、上下面は断面の外向き、側面は内向きとなるように不整を与える。

モデル 3 は、全てのパネルに、断面の外向きの不整を与える。

モデル 1–3 に対する解析結果を図-15 に示す。

図中、縦軸は各モデルの初期剛性 θ 、最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_m を、健全モデルの初期剛性 θ_v 、最大荷重 P_{maxv} および最大荷重時変位 δ_{mv} でそれぞれ無次元化した値である。なお、初期剛性、最大荷重および最大荷重時変位は、正および負側載荷の絶対値を平均した値である。横軸は、残存不整の最大値 W_{max} である。

まず、初期剛性と残存不整の最大値の関係(図-15(a))に注目する。残存不整の最大値が大きくなるにつれ、各モデルの初期剛性が低下した。各モデルの初期剛性の低下割合はいはほぼ同じであった。なお、残存不整の最大値 W_{max} が 4mm 以下の場合、各モデルの初期剛性は健全モデルの初期剛性とほぼ同じである。これは、補剛板全体の初期たわみ許容値($b_W/1000=0.627$)の約 6 倍である。

次に、最大荷重と残存不整の最大値の関係(図-15(b))に注目する。初期剛性と同様、残存不整の最大値が大きくなるにつれ、各モデルの最大荷重が低下した。残存不整の最大値 W_{max} が 4mm 以下の場合、モデル 1 に対し、モデル 2 および 3 の最大荷重は大きかった。残存不整の最大値 W_{max} が 4mm を越えると、モデル 1 と 2 の最大荷重はほぼ同じであった。一方、モデル 1 と 2 に比べ、モデル 3 の最大荷重は 10–25%大きかった。

また、最大荷重時変位と残存不整の最大値の関係(図-15(c))に注目する。モデル 1 および 2 については、最大荷重と同様、残存不整が大きくなるにつれ、最大荷重時変位が低下した。残存不整の最大値 W_{max} が 4mm 以下の場合、モデル 1 および 2 の最大荷重時変位は、健全モデルの最大荷重時変位とほぼ同じであった。一方、モデル 3 の最大荷

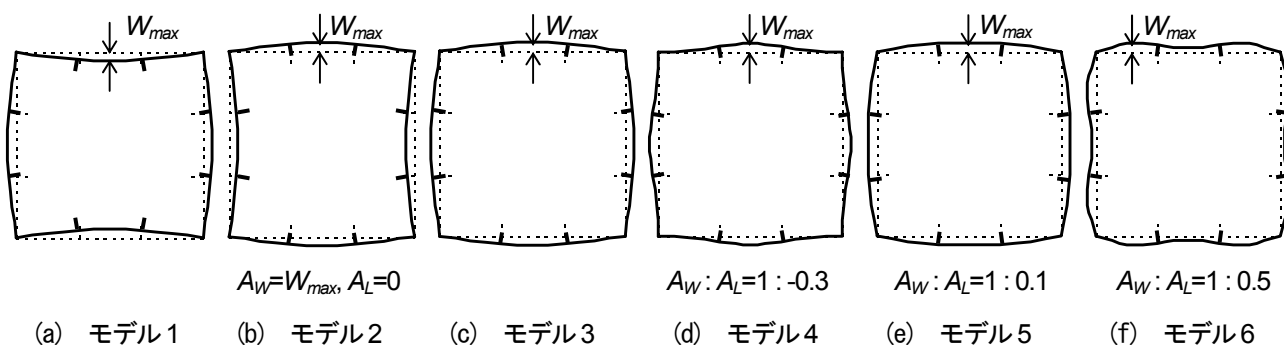
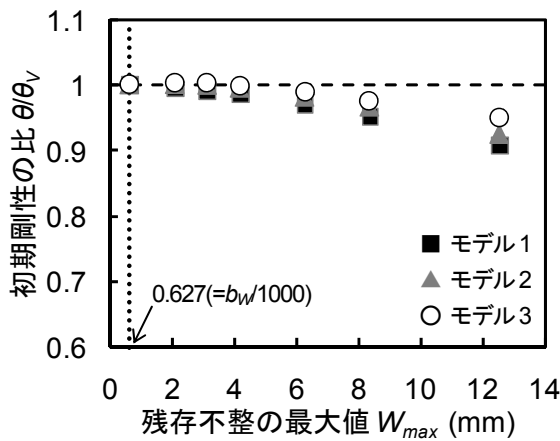
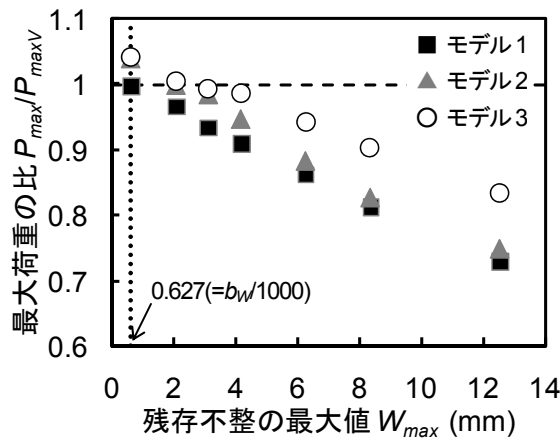


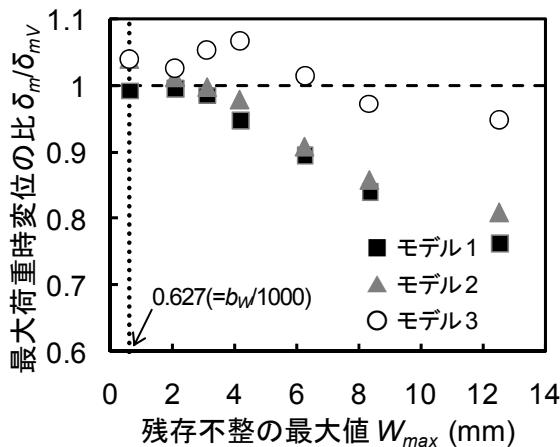
図-14 解析モデルの断面形状



(a) 初期剛性と残存不整の最大値の関係



(b) 最大荷重と残存不整の最大値の関係



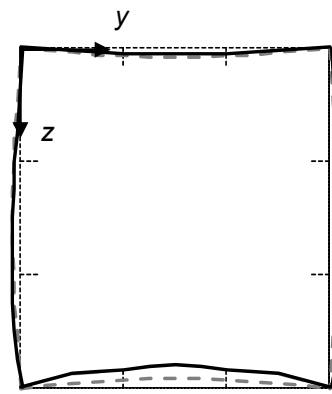
(c) 最大荷重時変位と残存不整の最大値の関係

図-15 解析結果(モデル1-3)

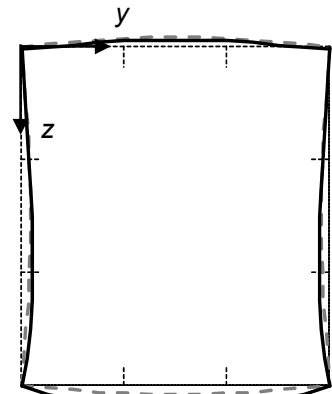
重時変位は、健全モデルの最大荷重時変位よりも大きかった。残存不整の最大値 W_{max} が 4mm 以上の場合、モデル1 および2 の最大荷重時変位は、健全モデルの最大荷重時変位に比べ、10-25%小さかった。モデル3 の最大荷重時変位は、残存不整の大きさに関係なく、健全モデルの最大荷重時変位の 95%以上の値となっていた。

いずれにせよ、モデル1 および2 に比べ、モデル3 の初期剛性、最大荷重および最大荷重時変位が大きかった。理由を以下に述べる。

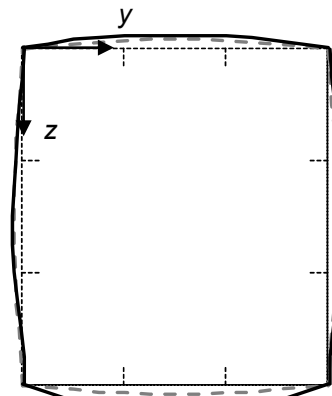
残存不整の最大値 W_{max} が 6.27mm の場合の、モデル1-3



(a) モデル1



(b) モデル2



(c) モデル3

$x=196.5\text{mm}$
面外変形の値は
3倍に拡大している。
--- 残存不整
— 変形モード

図-16 最大荷重時における変形モード

の最大荷重時における $x=196.5\text{mm}$ の断面の変形モードを図-16に示す。健全供試体に対する実験および健全モデルに対する解析では、交番载荷により曲げを受ける上下面パネルは、橋脚断面の内向きに変形し、側面パネルは外向きに変形した(図-7 参照)。モデル1では、これと同じ傾向の残存不整を与えたため、当然ながら、残存不整の大きさに応じて、初期剛性、最大荷重および最大荷重時変位が低下した。一方、モデル2および3では、上下面パネルに断面の外向きの不整を与えたため、パネルは断面の外向きに変形した。パネルは曲げによる断面内向きへの変形に抵抗したため、モデル1に比べ、モデル2および3の初期剛性、最大荷重および最大荷重時変位が大きくなった。しかし、上下面が断面の外向きに変形する場合、これに伴い、側面

は内向きに変形しようとする。モデル2の側面パネルの残存不整はこの変形モードと同じ傾向であったのに対し、モデル3の側面パネルの残存不整は逆の傾向であったため、モデル2に比べ、モデル3の初期剛性、最大荷重および最大荷重時変位が大きくなったと考えられる。

ここでは、矯正後における荷重方向が矯正前と同じ場合を想定しているが、実際の荷重方向は不明である。全てのパネルの不整を断面の外向きとすれば、断面形状が対称となるため、橋脚の挙動は荷重方向に依存しないと考えられる。荷重方向の観点からも、全てのパネルの不整を断面の外向きとすることは有効であるといえる。

一方、実際の矯正作業を想定すると、断面外向きの変形を内向きに矯正するには、反力受けが必要となるが、断面内向きの変形を外向きに矯正する場合は、反力受けは不要である。矯正作業の観点からも、全てのパネルの不整を断面の外向きとすることは有効であるといえる。

(2) 残存不整の形状および大きさに対する検討

モデル1-3に対する解析結果より、全てのパネルにおいて、残存不整の傾向を橋脚断面の外向きとすることが最も有効となることがわかった。このうえで、残存不整の形状が橋脚の力学性能に及ぼす影響を明らかにするため、補剛板全体および補剛材間の不整の大きさを種々変化させ、解析を行う。

解析モデルの断面形状を図-14(d)-(f)に示す。

いずれのモデルに対しても、全てのパネルに断面の外向きの残存不整を与えるが；

モデル4は、 $A_W : A_L = 1 : -0.3$ としたものである。

モデル5は、 $A_W : A_L = 1 : 0.1$ としたものである。

モデル6は、 $A_W : A_L = 1 : 0.5$ としたものである。

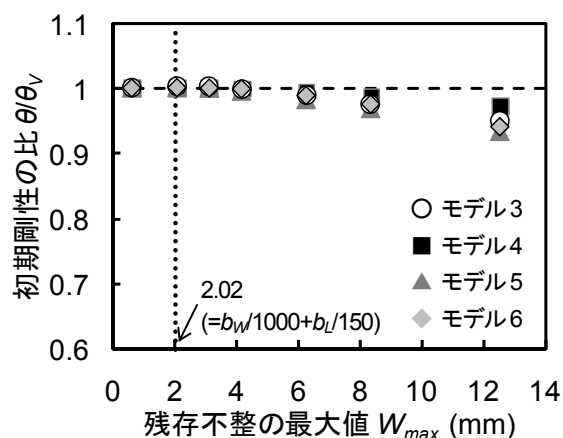
なお、各モデルの A_W および A_L の大きさは、残存不整の最大値 W_{max} が同じとなるように決定している。

モデル3-6に対する解析結果を図-17に示す。

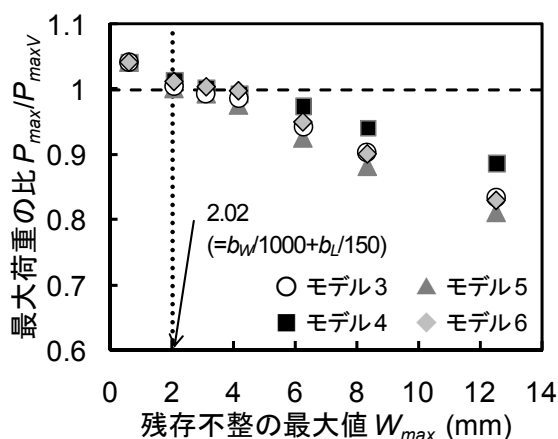
まず、初期剛性と残存不整の最大値の関係(図-17(a))に注目する。残存不整の最大値が大きくなるにつれ、各モデルの初期剛性は低下したが、残存不整の形状によらず、初期剛性の低下度合いはほぼ同じであった。なお、残存不整の最大値 W_{max} が4mm以下の場合、各モデルの初期剛性は健全モデルの初期剛性とほぼ同じであった。これは、補剛板および補剛材で区切られるパネルの初期たわみ許容値($b_W/1000+b_L/150=2.02$)の約2倍である。

次に、最大荷重および最大荷重時変位と残存不整の最大値の関係(図-17(b)および(c))に注目する。全てのモデルにおいて、残存不整の大きさに応じて最大荷重が低下した。残存不整の最大値 W_{max} が4mm以下の場合、各モデルの最大荷重は健全モデルの最大荷重とほぼ同じであった。また、最大荷重時変位と残存不整の間には明確な関係は見られないが、残存不整の大きさに関係なく、各モデルの最大荷重時変位は健全モデルの最大荷重時変位の95%以上の値となっていた。

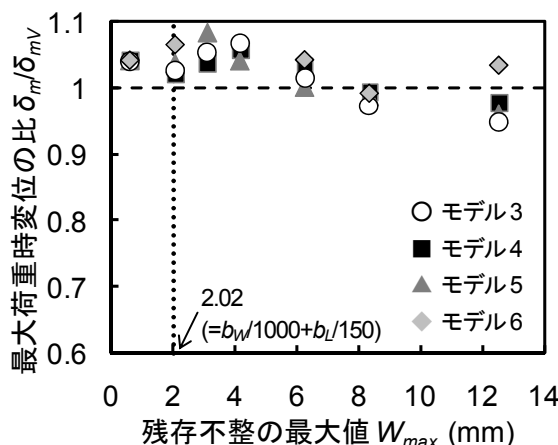
初期剛性および最大荷重時変位については、残存不整の形状および大きさに関係なく、健全モデルの初期剛性およ



(a) 初期剛性と残存不整の最大値の関係



(b) 最大荷重と残存不整の最大値の関係



(c) 最大荷重時変位と残存不整の最大値の関係

図-17 解析結果(モデル3-6)

び最大荷重時変位の90-95%以上の値となっていた。しかし、不整の形状および大きさにより最大荷重は種々異なっていた。これに対し、残存不整のうち、補剛板全体の不整の大きさ A_W と最大荷重の関係を図-18に示す。

最大荷重の低下の度合いは、補剛材間の不整の大きさ A_L に関係なく、補剛板全体の不整の大きさ A_W で整理できている。補剛材間の残存不整が橋脚の最大荷重に及ぼす影響は小さく、補剛板全体の残存不整が橋脚の最大荷重を決定するといえる。補剛板全体の不整の大きさ A_W が約4mm以下の場合、最大荷重は健全モデルの場合とほぼ同じであ

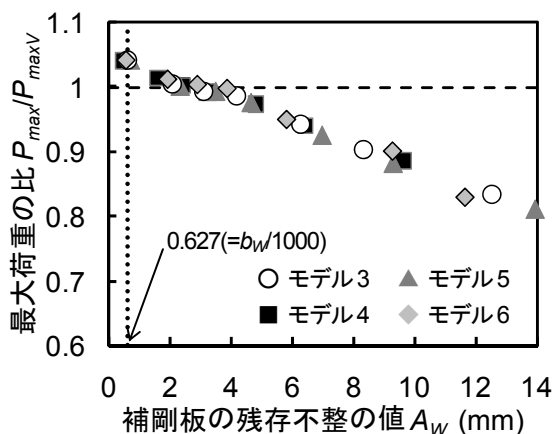


図-18 最大荷重と補剛板の残存不整の大きさの関係(モデル3-6)

った。本研究の場合、これは、補剛板の初期たわみ許容値($b_w/1000=0.627$)の約6倍である。

残存不整の形状に関係なく、不整の傾向を断面の外向きとし、不整の大きさを初期たわみ許容値の6倍以下とすれば、健全な橋脚と同等の剛性、耐荷力および変形性能が確保できることを結果は示唆している。

4.2 加熱/プレス矯正による補修法の提案

局部座屈した鋼製橋脚に対する加熱/プレスによる補修においては、まず、加熱温度を A_1 変態点(一般鋼材の場合、約 720°C)以下とすることが必須である。加熱温度が A_1 変態点以下であれば、空冷、水冷に関係なく、鋼材の機械的性質は何ら劣化しない。

そのうえで、矯正後の橋脚において、剛性、耐荷力、変形性能など、健全な橋脚と同等の力学性能を確保するためには、加熱/プレス矯正しきれない残存不整をいかに抑制するかが最重要となる。残存不整は、矯正後の橋脚において、初期たわみに相当する。残存不整の大きさは初期たわみ許容値以下とすることが理想である。しかし、それが困難な場合、全ての面において不整の傾向を橋脚断面の外向きとし、不整の大きさを初期たわみ許容値の6倍以下とすることで、追加の補修を施すことなく健全な橋脚と同等の力学性能を確保できる。

5. 結言

鋼製橋脚を模擬した供試体を正負交番荷重により局部座屈させ、座屈部を加熱/プレス矯正した後、再び交番荷重を載荷した。そして、健全および矯正後供試体の挙動を比較検討した。また、一連の実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートした。

得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 健全な供試体に対する正負交番荷重実験を弾塑性大変形解析によりシミュレートし、解析プログラムの妥当性を確認した。

実験および解析結果を基本とし、局部座屈部を加熱/プレス矯正した鋼製橋脚の力学挙動を明らかにした。

- (2) 局部座屈とその矯正時の塑性変形に伴う応力-ひずみ関係の変化および残留応力を考慮せず、残存不整のみを考慮することで、局部座屈部を加熱/プレス矯正した供試体に対する正負交番荷重実験を解析により精度よく再現できた。すなわち、加熱/プレス矯正後の供試体の力学挙動を支配する因子は残存不整であることを特定した。
- (3) 本研究で対象とした橋脚の場合、基部から高さ方向に100-300mm離れた領域が約7割塑性化することで、最大荷重が決まることを明らかにした。橋脚の最大荷重を決定する領域に作用する応力を低減するよう、変形モードと相反する不整を矯正後の橋脚に残すことで、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た。

加熱/プレス矯正後の橋脚が健全な橋脚と同等の力学性能、すなわち、剛性、耐荷力および変形性能を確保するための条件を明らかにし、局部座屈した鋼製橋脚に対する加熱/プレス矯正による以下の補修法を提案した。

- (4) 鋼材の機械的性質を変化させないため、加熱温度を A_1 変態点(一般構造用鋼の場合、約 720°C)以下とすること。
- (5) 加熱/プレス矯正しきれない残存不整は、初期たわみ許容値以下に抑制することが理想であるが、それが困難な場合、橋脚断面を構成する全ての面において、不整の傾向を断面の外向き(局部座屈の方向と逆向き)とし、絶対値を初期たわみ許容値の6倍以下とすることで、これらを満足することで、健全な橋脚と同等あるいはそれ以上の力学性能が確保できることを確認した。

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) 廣畑幹人、金 裕哲：加熱矯正による補修構造部材の健全度、構造物の安全性・信頼性 Vol.6、JCOSSAR2007 論文集、pp.81-88、日本学術会議、2007.6.
- 7) 金 裕哲、廣畑幹人、森本拓世、小野 潔：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、構造工学論文集 Vol.54A、pp.504-511、土木学会、

2008.3.

- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋編，1980.
- 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(上)，橋梁と基礎，82-6，pp.35-40，1982.6.
- 10) 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.
- 11) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005.
- 12) 溶接学会：溶接・接合便覧，2003.

(2009年4月9日 受付)