

塑性変形した鋼橋の矯正にかかわる参考資料（案）

この参考資料（案）の位置づけ

この参考資料を用いるにあたっては、その位置づけや取り扱いには各道路管理者が個々の案件ごとに決めるものである。この参考資料を基準のごとく扱い、画一的に適用することは想定していない。

1. 適用の範囲

本参考資料は、既設橋の塑性変形した鋼部材の変形の矯正をするとき、特に熱間加工を検討、実施するにあたって、調査、計画、実施の留意点をまとめたものである。

既設橋の材料や構造条件は多様である、また実情も個々に異なる、そこで、損傷に対する対応方法や実施にあたっての安全の確保などは、本資料を参考にするだけでなく個々に適切に検討する必要がある。

2. 塑性変形した鋼橋の補修工法選定のための調査とその留意点

2.1 塑性変形した鋼橋の調査

衝突、地震、火災などにより鋼橋が被災し、塑性変形が生じた場合、供用可否の判断や補修工法の選定を行うためには、橋梁の損傷状況を把握する必要がある。なお、本編 2.2 鋼材の温度履歴と機械的性質に示すように、熱履歴を受けると温度によっては鋼材の特性が変化し、塑性変形の程度は軽微であっても部材の耐荷性が低下する可能性があるため、火災の場合は別途注意が必要である。例えば、文献 1) 土木学会「鋼構造シリーズ 24 火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン」及び文献 2) 「国総研資料第 710 号 鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査」が参考になる。

鋼橋の損傷発見後には、恒久対策の検討・判断につなげるため、一般的に以下の状態を速やかに把握することが必要である。

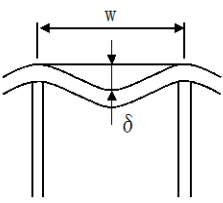

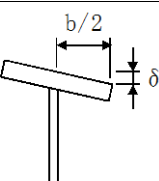
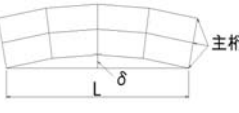

また、緊急の仮支持が必要な場合等もあり得る。ベント等を設置するときの留意点は 4.1.3 が参考になる。

- ① 局部の状態について
 - ・ 局部座屈の有無
 - ・ き裂の有無
 - ・ 塗装剥離の有無
 - ・ ボルトの破断・損傷の有無
- ② 部材の状態について
 - ・ 部材の変形の有無
 - ・ 断面欠損の有無
- ③ 橋全体の状態について
 - ・ 全体変形の有無
 - ・ 軸力部材の軸線のずれの有無
 - ・ 支承・支点の損傷・移動の有無
- ④ その他の状態について
 - ・ 路面段差の有無
 - ・ 伸縮装置の損傷の有無
 - ・ 落下・倒壊の危険性のある部材の有無
 - ・ 異音の有無
 - ・ 付属物の損傷の有無
 - ・ 遊間の異常の有無
 - ・ ケーブル部材の破断・損傷の有無

鋼橋の被災状況が、外力等による塑性変形のみの場合、恒久対策の必要性を判断するにあたって最も用いられる指標は、変形量になる。この点については、鋼橋の製作時や架設時の精度の許容値内であれば、橋全体及び部材等ごとに設計時に付与しようとした性能は満足されると考えられる。そこで、道路橋示方書の部材精度基準や組立精度基準を参考にして判断することは1つの方法となる。なお、橋全体及び部材に要求される性能から許容できる変形量を設定することも考えられるが、変形した部材の耐荷性能に関する研究は少なく、部材等ごとに許容変形量を算出することは容易ではない。

塑性変形量のみでは補修の必要性は判断できず、例えば、損傷部とその周辺にはき裂がないこと、および原因となる外力により当該橋の中で大きな反力が生じた部位に損傷が生じていないこと、ボルト等の緩みが生じていないことなども前提となる。特にき裂に関しては、微小なき裂であっても、そこから疲労き裂や脆性破壊が生じる恐れがあるため注意が必要である。特に溶接止端部は応力集中部であり、車両の衝突による変形によりき裂が生じやすい部位のため、入念な調査が必要である。

参-表-2.1.1 道路橋示方書の製作時の部材精度及び架設後の通り精度

項目	許容誤差	備考	測定方法	適用例
板の平面度 δ (mm) (注1)	$w/250$	w : 腹板高 (mm)		
板の平面度 δ (mm) (注2)	$w/150$	w : 腹板または リップの間隔 (mm)		
フランジの直 角度 δ (mm)	$b/200$	b : フランジ幅 (mm)		
架設後の 通り δ (mm)	\pm ($10+2L/5$)	L : 支間長 (m)		

注1 : 鋼桁及びトラス等の腹板

注2 : 箱桁及びトラス等のフランジ、鋼床版のデッキプレート

塑性変形損傷の調査項目や調査方法について以下に示す。塑性変形以外の腐食、疲労、コンクリート劣化などによる損傷については、損傷状況に応じて適切に調査する必要がある。

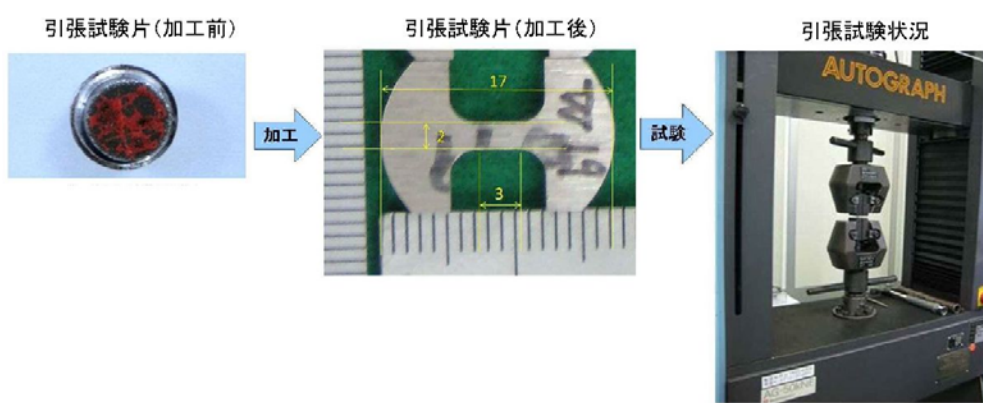
恒久対策ための調査項目例を参-表-2.1.2 に示す。各調査方法の詳細について以下に述べる。

参-表-2.1.2 塑性変形損傷調査の調査項目例

状態	調査項目	調査目的	調査方法または内容
一般	鋼材の材質	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物の強度の把握 ・ 加熱矯正など補修工法の選定 ・ 火災後の対応方針 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計図書による部材ごとの使用鋼材の把握 ・ 橋歴板による主な使用鋼材の把握 ・ 建設年代により使用鋼材の推測 ・ 引張試験や組織試験などの材料試験による材質の特定
	現場の状況	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各種施工方法の採用可否 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 交差条件と周辺環境 ・ ジャッキ反力を負担する部材の調査
	架設の状況	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部材の応力状態 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計図書による架設工法、手順 ・ 架設系と完成形の分担断面力の違いの把握
局部	破断・き裂	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位ごとの損傷状況の把握 ・ 橋梁の健全性診断 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 磁粉探傷試験 ・ 浸透探傷試験
部材	部材の変形量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 部位ごとの損傷状況の把握 ・ 橋梁の健全性診断 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水糸 ・ トータルステーション ・ 3D レーザースキャナー ・ 3D デジタルカメラ計測
	損傷部の曲げ半径	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼材の靱性（変形部の塑性ひずみ量）の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計測した局部変形の詳細データ ・ アール定規による曲げ半径の計測
橋全体	全体変形量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主桁面外方向の変形の把握 ・ 橋梁全体の耐力低下の診断 	<ul style="list-style-type: none"> ・ トランシット ・ トータルステーション ・ 3D レーザースキャナー ・ GPS 測量システム
その他	支承健全度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 段差・落橋の可能性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目視 ・ メジャー

2.1.1 使用鋼材の特性の調査

損傷した部位の鋼種の特定、補修方法の選定を行うために、鋼材の機械的性質への影響を調査する。このためには、設計図書の調査や既設部材から試験片を採取して試験を行う必要がある。しかし、例えば強度を確認する場合、既設部材から JIS Z 2241 「金属材料引張試験方法」の規格の試験片を切り出すことは困難な場合が多い。その場合、鋼材の強度の推定方法のひとつとして、小片による引張試験方法がある。小片による引張試験（参-写真-2.1.1）は、既設部材に携帯式磁気ボール盤で穿孔（ $\phi 24.5$ ）した際に生じるスラグ（ $\phi 17$ 程度の抜きカス）を使った引張試験である^{1)、3)}。JIS Z 2241 の試験片での試験結果との相関を掴むことにより、鋼材の強度を推定できる。また、スラグを使用して組織試験を行うことにより、加熱矯正温度の決定に必要な製鋼方法（調質鋼や TMCP 鋼など）や火災による組織への影響の推定も可能である。ただし、これらの方法は引張試験結果を別な方法で推定していることを考慮して、結果の評価を行うことが必要である。



参-写真-2.1.1 小片による引張試験

2.1.2 交差条件と周辺環境の調査

工事に伴う騒音、振動、夜間照明、粉塵、塗料の飛散、地下水位の低下、水質の汚濁、汚染、一般交通の通行制限等の周辺環境への配慮については事前に調査し、対策方法を計画に盛り込むと同時に、必要に応じて周辺住民に説明し協力を得られるように配慮することが望ましい。また、条例等によって騒音、振動等が特別に規制されている場合があるので、調査しておくのがよい。工事により周辺地盤が沈下し、既設構造物に損傷を与える恐れがある場合や、既設構造物を一時的に他の場所へ移設する場合には、影響の有無を後から検証できるようにする必要がある、例えば目的を整理したうえで、それにならうように既設構造物及び周辺の状況をあらかじめ写真等で記録に残しておくなどが考えられる。

以下に一般調査項目と地域別調査項目を示す。詳細については文献 4) 「鋼橋架設資料」及び文献 5) 「鋼構造架設設計施工指針」が参考になる。

① 一般調査項目

- a) 復旧作業地点及び付近の地耐力、地盤高、水面高、水深、下部工天端高等
- b) 前後取付道路の平面形状、地形、等高線
- c) 主要道路から現場までの搬入路
- d) 搬入路の幅員、重機の最小回転半径、最急勾配、仮橋・仮栈橋の要否
- e) 桁下空間使用の可否
- f) 現場付近の環境(騒音、振動、高圧線)

② 地域別調査項目

i) 道路上の場合

- a) 工事中の迂回路有無
- b) 道路占有の可否、作業時間帯制約の有無
- c) 工事中建築限界の縮小の可否
- d) 地上物件・空中物件及び地下埋設物の種類、位置、形状

ii) 鉄道上の場合

- a) 架空線、地下埋設物の有無及びその位置
- b) 線路閉鎖、き電停止の時間帯

iii) 河川上の場合

- a) 河川敷利用の可否
- b) 常時、降雨時、ダム放流時の水深、流速の変化及び時間差等
- c) 水利権ならびに漁業権
- d) 航路限界

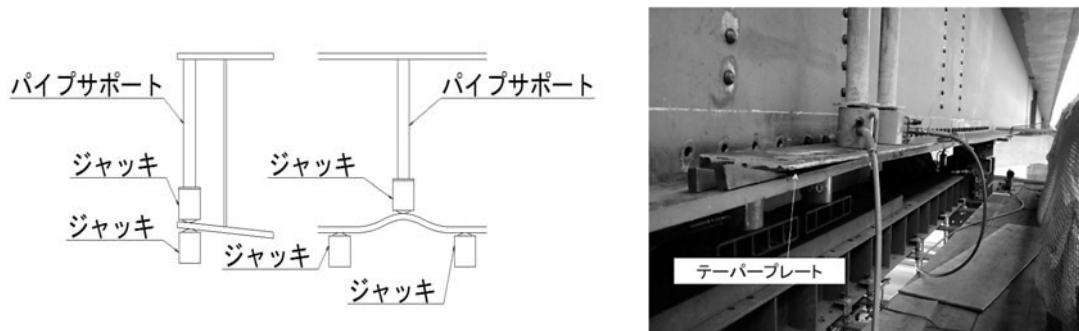
2.1.3 ベントやジャッキの設置に関する調査

補修が必要となった際には、損傷部位や補修方法によってはベントやジャッキの設置が必要となる。そのため、他の調査の手配と並行してベントの運搬・搬入方法、設置用重機の配置、施工ヤードなどについてもあらかじめ確認しておくのがよい。

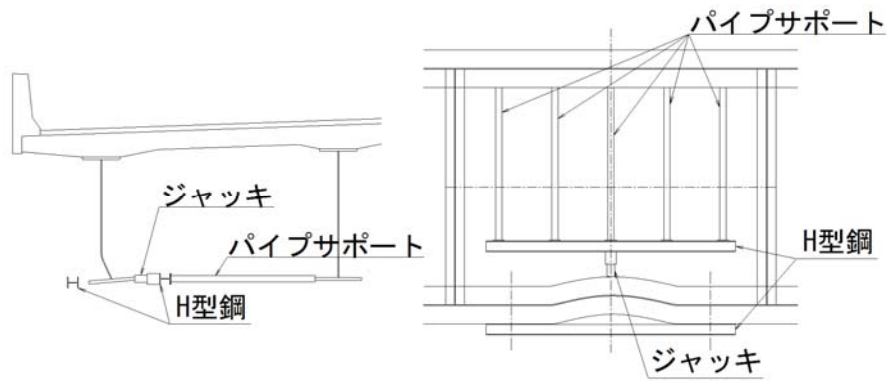
2.1.4 ジャッキ反力を負担する部材の調査

加熱矯正工法は、加熱後にジャッキで加圧矯正を行うことから、ジャッキ反力を負担する部材についても調査が必要となる。鉛直方向の反力であれば、ベントや床版に反力を負担させられる場合もあり、桁への補強材等の設置が不要となることが多い。一方、水平方向の反力を負担させる場合は、その安定性の照査は慎重に行う必要がある。特に鉸桁下フランジやウェブ下端に水平方向反力を負担させる場合は、局所的な座屈やねじれに対する照査が必要であり、多くの場合は補強材が必要となる。

ジャッキ鉛直反力を負担させた例を参-図-2.1.1に示す。下フランジの損傷変形区間の両端も地盤またはベントから反力を確保した油圧ジャッキで固定し、変形により勾配を有するフランジとジャッキの密着度を確保するため仮設フィラープレート（テーパープレート）を用いている。一方、ジャッキ水平反力を隣接桁のフランジに負担させた例を参-図-2.1.2に示す。



参-図-2.1.1 ジャッキ鉛直反力を負担させる例



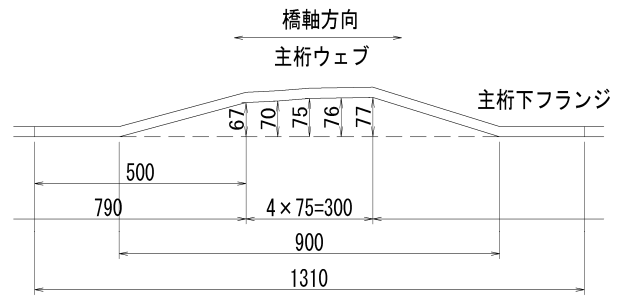
参-図-2.1.2 ジャッキ水平反力を負担させる例

2.1.5 損傷状況の記録

部位ごとの損傷の写真やスケッチ図等による記録（参-写真-2.1.2、参-図-2.1.3）は、橋梁の健全性の診断を正しく行うための重要情報である。板厚・材質、損傷部材の破断・き裂、変形量と範囲を詳細に記録することが重要である。



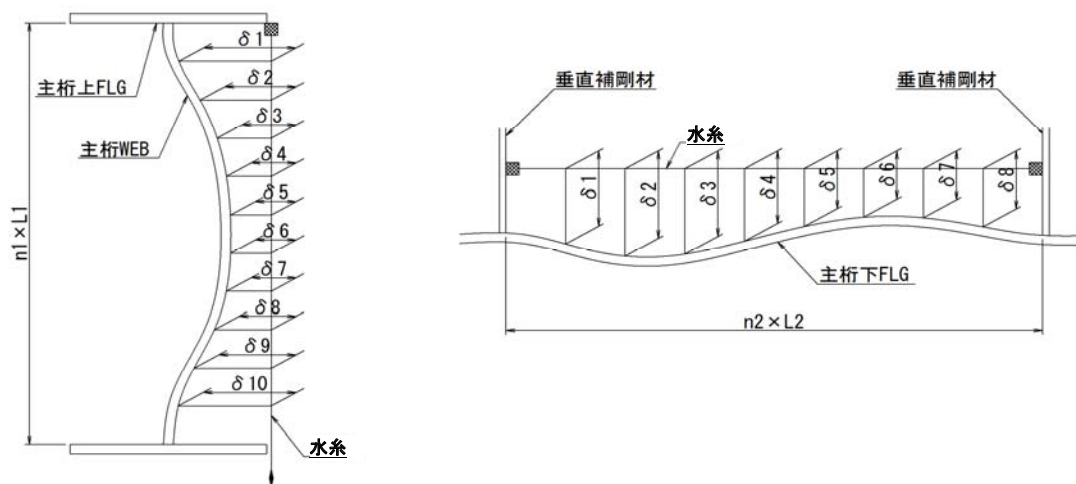
参-写真-2.1.2 損傷部の写真



参-図-2.1.3 損傷部のスケッチ図

2.1.6 局部変形量の調査

一般的な局部変形量の調査方法である水系による調査例を参-図-2.1.4 に示す。なお、デジタルカメラ計測や 3D スキャナ等によるものがあるが、それぞれのシステムが持つ誤差について把握した上で使用するのがよい。



参-図-2.1.4 局部変形量の調査例

2.1.7 破断・き裂の調査

損傷した部材に破断・き裂が存在する場合、疲労き裂や脆性破壊の起点となる恐れがある。また、微小なき裂であっても加熱矯正時に与える変形により、き裂が拡大する可能性がある。特に溶接継手の溶接止端部は応力集中部であり、車両の衝突による変形によりき裂が生じやすい部位のため、入念な調査が必要である。破断は目視にて確認できるが、き裂は目視では確認できないこともあり、き裂の有無の調査は磁粉探傷試験や浸透探傷試験にて行うのがよい。き裂の検出性能は一般的に磁粉探傷試験の方が浸透探傷試験より優れている。

磁粉探傷試験は、MT (Magnetic Particle Testing) と呼ばれ、鉄鋼など強磁性材料の表面近傍の欠陥を検出するのに適した探傷試験方法である。試験体を磁化した場合、表面及び表面直下の比較的浅い部分にきずなどの磁気的な不連続があると、その部分から磁束が漏洩し不連続部との境界に磁極が生じる。試験体表面に磁粉(磁性粉に顔料または蛍光体を付着したもの)を散布すると磁粉は漏洩磁界によって磁化され、微小磁石となり欠陥部分の磁極に付着する。この欠陥部分に付着した磁粉によって、実際の欠陥の幅と比較し、数倍から数十倍の幅の磁粉模様ができ、容易に目視観察で欠陥が検出できる。

参-図-2.1.3 に示す損傷例についての磁粉探傷検査実施例を参-図-2.1.5 に示す。磁粉探傷検査の範囲は損傷範囲よりも大きくし、その範囲の塗膜を剥離する必要がある。加熱矯正工法を適用する場合は、加熱矯正範囲や加熱による塗膜劣化範囲を考慮して塗膜剥離を決定するのがよい。

磁粉探傷検査の結果、き裂が認められない場合は、加熱矯正工法の適用が可能である。なお、微小なき裂の場合、グラインダーにてき裂を完全に除去できれば加熱矯正工法が可能であるが、き裂の残存がないかを慎重に判断する必要がある。き裂を除去できないと判断した場合は、き裂の処置方法を踏まえ別途補修工法を検討する。

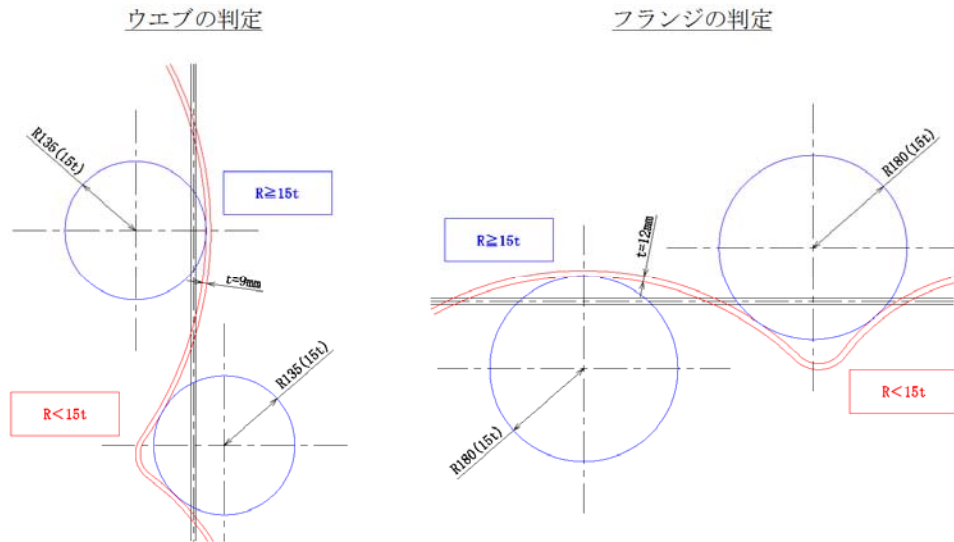


参-図-2.1.5 磁粉探傷検査例

2.1.8 塑性ひずみ量の把握

本編第2章に示すように、塑性ひずみ量が大きくなると、じん性は低下する。変形部の塑性ひずみ量と内側曲げ半径との関係は、一様な引張ひずみ3%は概ね曲げ半径15t (t:板厚)、5%は曲げ半径10t、7%は曲げ半径8tの表面ひずみにそれぞれ相当する。

計測した局部変形の詳細データより、損傷部の曲げ半径を求めることが可能であるが、簡易・迅速な確認方法の一つとして、変形部に半径Rのアール定規をあてることにより、隙間なく定規があたるものは曲げ半径R以上、隙間があるものはR以下であると判断できる。判定例を参-図-2.1.6 に示す。



参-図-2.1.6 損傷部の曲げ半径の判定例

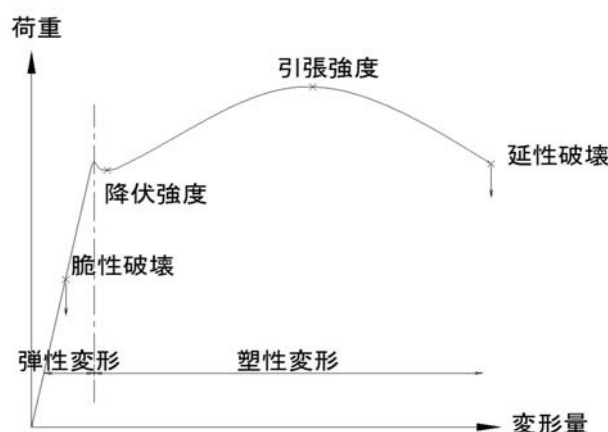
2.1.9 補修の要否の判断

2.1.1~2.1.9 といった、各調査結果を総合的に考慮して、当該部材に対する補修工事の要否を判断することになる。

なお判断の際には、変形した部材が、圧縮部材か引張部材か、または状況により圧縮・引張が入れ替わる交番部材かで対応は異なる。圧縮部材の場合は、僅かな変形でも座屈耐荷力が著しく低下する場合があるため、何らかの補修（座屈耐荷力確保のための補剛を含む）を行うのがよい。一方、引張部材もしくは交番部材の場合は、変形の大小によってその照査方法が変わってくる。

2.2 変形部材の健全性の評価

変形部の健全性の評価は、塑性変形した鋼橋の調査の結果に基づいて行い、恒久的な補修・補強の要否の判断に繋げるものである。基本的には、変形部のじん性および強度、それと橋梁の耐荷力（強度）の両方面から評価する必要がある。鋼材の強度・変形量とじん性の関係を参-図-2.2.1に示す。



参-図-2.2.1 鋼材の強度・変形量とじん性の関係

じん性については、冷間曲げ加工によりひずみが生じた部分の鋼材はじん性が低下し、脆性破壊を起こしやすいという問題があるため、道路橋示方書では内側曲げ半径の大きさを板厚(t)の15倍(15t)以上とするのを原則としている。脆性破壊を防止するため、損傷部材の塑性変形量から、鋼材の材質等を考慮して部材の健全性を評価するのがよい。

そして、同じような変形程度であっても、材料ならびに変形が生じた部位によって部材・橋の耐荷力に与える影響度は異なることを考慮して補強等の必要性を判断していく。

2.2.1 局部健全性の評価

① 塑性ひずみ量

局部健全性の評価は、損傷部材のじん性の照査による。損傷部材のじん性の健全度については、損傷部から試験片を採取してシャルピー吸収エネルギー値を確認すれば評価できるが、シャルピー衝撃試験片の長さは55mmであり、この試験片を既設部材から採取することは困難である場合が多い。この場合、損傷部の塑性ひずみ量からじん性の健全度を評価することになる。本編第2章に示すように、損傷部の内側曲げ半径の大きさが板厚(t)の15倍(15t)以上であれば、じん性に対する安全性を有すると判断できる。

損傷部の内側曲げ半径が板厚の15倍未満の場合、竣工図書等から損傷部の鋼材のシャルピー吸収エネルギーが本編第2章の表-2.2.2に示す条件を満たし、かつ化学成分中の全窒素量が0.006%を超えないことが確認できれば、損傷部の内側曲げ半径は板厚の7倍以上または5倍以上としても、じん性に対する安全性を有すると判断できる。ただし、通常、鋼材ミルシートには窒素量の記載がないため、2.1.1で示した小片を採取して化学成分分析を行う必要がある。

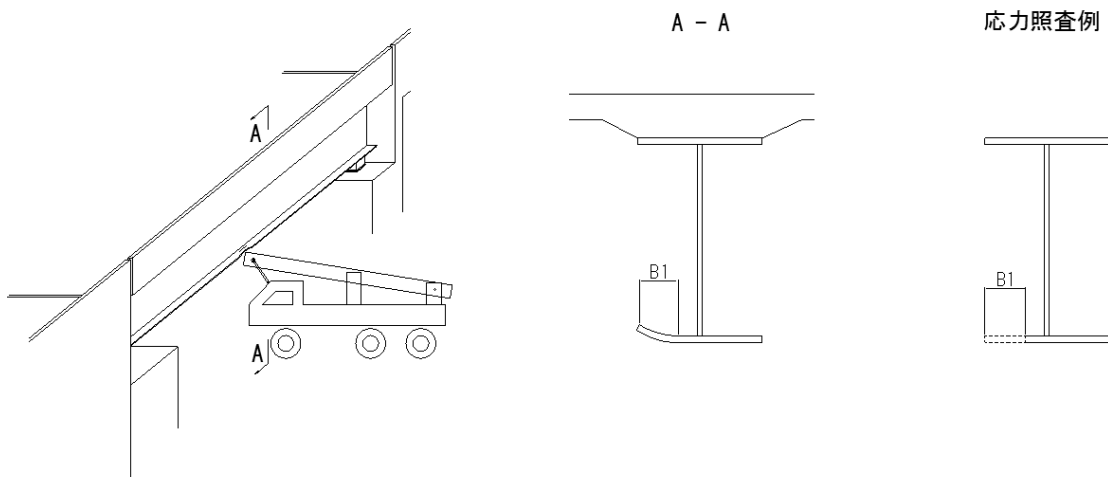
2.2.2 部材残存性能の評価（断面欠損法）

断面欠損法は、損傷範囲を断面欠損しているものとして扱い、軸線は変化しないものとして残りの断面積、断面二次モーメント、初期応力などを考慮して、許容応力度照査を行うことで残存性能を評価する方法である。しかし、変形の状態によっては、そもそも既存の技術図書にあるような許容応力度が適用できないこともあり、どのような許容応力度を使うかは個別に判断する必要がある。例えば、変形の状態によっては横倒れ座屈、局部座屈などの許容応力度の適用性がないことも考えられる。この方法を用いたとしても2.2.3と合わせて橋としての安全性を適切に判断することが重要である。

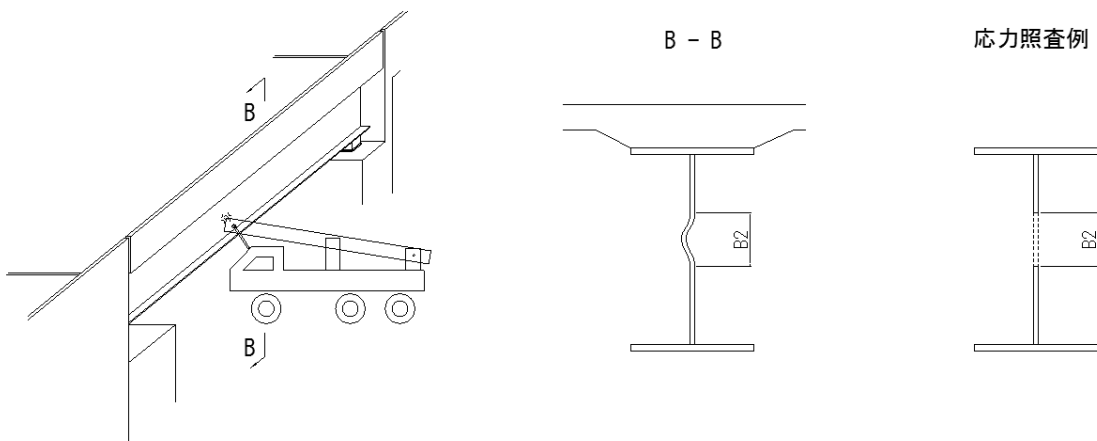
なお、歩道橋等で断面に応力上の余裕が十分にあり、ベント等で死荷重応力を除去することなく加熱矯正を行う場合、加熱範囲を断面欠損しているとみなして死荷重載荷状態に対して応力照査を行い、加熱矯正作業中の安全性を確認するのがよい。ただし、架設手順を調べるなどをしないと誤った評価になり得るので注意すること。

部材や格点の変形・損傷が大きく、当初の構造から軸線が大きくずれている場合には、断面欠損法の適用の範囲外であると考えるのがよい。

参-図-2.2.2 および参-図-2.2.3 に断面欠損法を用いた照査例を示す。

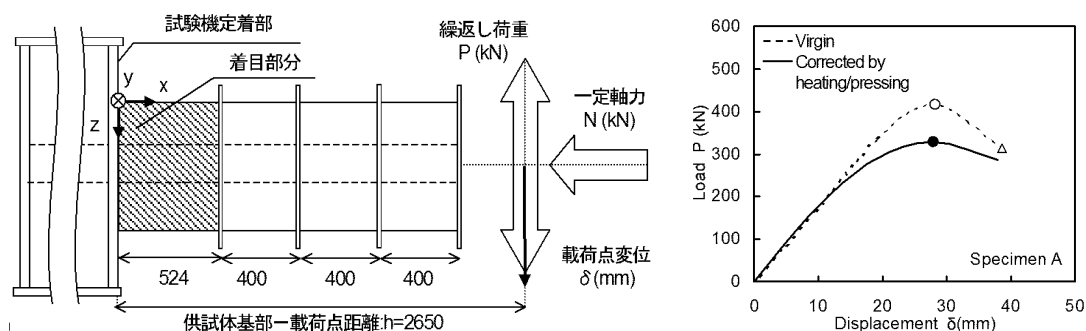


参-図-2.2.2 断面欠損法の照査例（下フランジ）



参-図-2.2.3 断面欠損法の照査例（ウェブ）

一方で局部変形が部材最大強度に及ぼす影響は一様ではなく、既往の研究から一律に論ずることは困難である。たとえば文献6)は、橋脚の供試体を正負交番载荷により局部座屈させ、その後、局部座屈部を加熱/プレス矯正し、再び正負交番载荷させ、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ている。加熱/プレス矯正後における供試体の面外方向残存不整（最大値 7mm）は、道路橋示方書の初期たわみ許容値($b/150=1.4\text{mm}$: $b=209\text{mm}$)に比べ、5 倍程度大きくなっており、参-図-2.2.4 に示すように、最大荷重は健全状態に比べ約 20%低下している。局部変形を考慮した許容応力度の設定法に定まった考え方がなく、計算上許容応力度を超えないとしても、2.2.3 に述べるように当該部材の変形が大きくなったとしても、全体系として安全の余裕が確保できるかどうか検討することになる。



参-図-2.2.4 局部変形量と橋脚の耐荷力の検討例

2.2.3 全体健全性の評価

主要な部材の破断・き裂、著しい塑性変形、支承からの主桁の脱落などは、目視調査により橋梁全体の安全性に問題があると容易に判断できる。一方、参-写真-2.2.1 に示すような主桁に面外変形が生じている場合、橋梁全体の耐荷力を詳細に検討した上で健全性を判断する必要がある。



参-写真-2.2.1 主桁の面外変形

主桁に面外変形が生じた場合における橋梁全体の耐荷力に関する研究は少なく、定量的な閾値を設けることはできないため、個別に検討する必要がある。

桁の耐荷力については、初期たわみ(面外方向)や残留応力などの初期不整の影響を大きく受けること

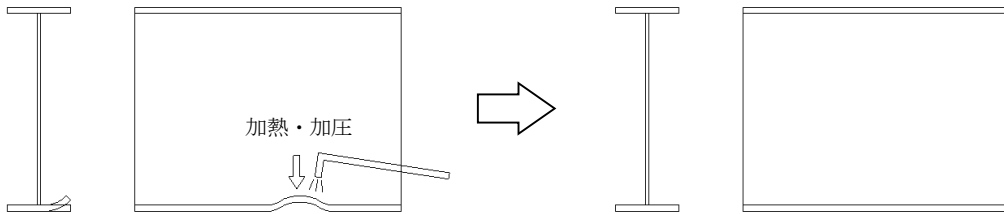
が知られている^{7)、8)}。塑性変形が生じたということは、その変形量が小さくても橋梁が降伏応力以上の応力を経験したことを意味し、拘束条件によっては部材に大きな残留応力が生じている可能性がある。そのまま放置した場合、活荷重の作用により、変形量が大きく進展する場合がある。

実橋梁の主桁に面外変形が生じている場合の橋梁全体の耐荷力をFEMで検討する場合、塑性変形量は初期たわみとして考慮できるが、残留応力の分布、残留応力の大きさなどの再現が課題となる。

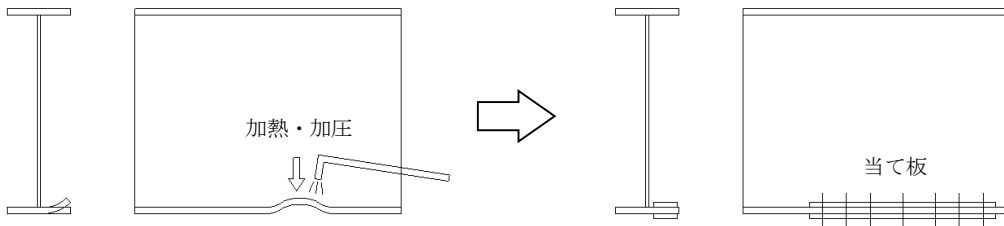
3. 補修工法の種類と選定にあたっての留意点

3.1 各補修工法の特徴

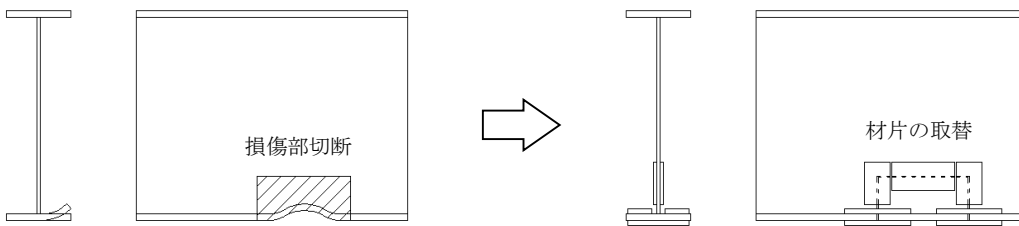
塑性変形した部材に対する補修工法としては、一般的に、①加熱矯正工法（温度管理型）、②加熱矯正（非温度管理型）+当て板工法、③材片の取替工法、④材片追加工法が採用されることが多い。各工法の概念図を参-図-3.1.1~3.1.4に示す。また、各工法の特徴や適用条件について工法ごとに記載する。



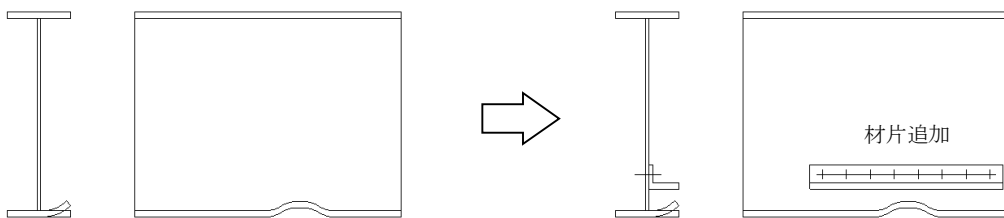
参-図-3.1.1 加熱矯正工法（温度管理型）の概念図



参-図-3.1.2 加熱矯正（非温度管理型）+当て板工法の概



参-図-3.1.3 材片の取替工法の概念図



参-図-3.1.4 材片追加工法の概念図

3.1.1 加熱矯正工法（温度管理型）

(1) 目的

変形した母材断面を平坦に矯正することで形状の復元を図る。

(2) 適用部材

加熱矯正の条件（本編 2 章参照）を満たす鋼材が使われている部材とする。なお、加熱矯正工法は適用条件や施工条件の制約が多いことから、対傾構、横構、添架物支持金具等の容易に取替が可能な部材については、材片の取替工法が選ばれることも多い。

(3) 適用条件

少なくとも以下の 3 条件を全て満たす必要がある。

- ① 加熱後にジャッキ等で加圧矯正を行うため、ジャッキ反力を負担する部材（ベント材を含む）が周辺にあること
- ② 加熱矯正中は部材のヤング係数が著しく低下し、死荷重応力を負担できなくなるため、バイパス材設置やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担できること
- ③ 変形範囲の溶接部にき裂がないこと、もしくは溶接補修等によってき裂を補修できること

(4) 工法の概要

鋼材の温度が 500℃から 700℃（調質鋼、TMCP 鋼の場合は 630℃）の間になるように加熱し、ジャッキ等で加圧することで矯正する。温度管理については、温度チョークでは加熱部の温度を直接管理できないため、非接触型の表面温度計が用いられることが多い。非接触型の表面温度計の使用状況写真を参-写真-3.1.1 に示す。



参-写真-3.1.1 非接触型表面温度計の使用状況

3.1.2 加熱矯正（非温度管理型）＋当て板工法

(1) 目的

変形した母材断面を平坦に矯正した上で当て板補強を行い、損傷した母材断面を補う。なお、加熱矯正後に母材の平坦度が悪く、当て板との間に肌隙ができる場合には、3.1.3 (4)に示された確実な応力伝達方法を採用するか、もしくは材片の取替工法等の代替工法を適用するのがよい。

(2) 適用部材

使用されている鋼材が加熱矯正の条件（本編2章表-2.2.18）を満たさず、加熱矯正により鋼材の機械的性質等が損なわれ、所定の性能に回復できないものの、当て板による補強は可能な部材とする。

(3) 適用条件

少なくとも以下の7条件を全て満たす必要がある。

- ① 加熱後にジャッキ等で加圧矯正を行うため、ジャッキ反力を負担する部材（ベント材を含む）が周辺にあること
- ② 加熱矯正中は部材のヤング係数が著しく低下し、死荷重応力を負担できなくなるため、バイパス材設置やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担できること
- ③ 変形範囲の溶接部にき裂がないこと、もしくは溶接補修や当て板によってき裂を補修・補強できること
- ④ 補強板（当て板）を母材に重ね、高力ボルトで締め付けた場合に肌隙が発生しない状態まで母材を矯正できること、もしくは3.1.3 (4)に示された確実な応力伝達方法を採用できること
- ⑤ ボルトの設置・締め作業ができる空間が確保されていること
- ⑥ 最大／最小ボルト間隔、最大／最小ボルト縁端距離を満足するボルト配置にできること
- ⑦ ボルト孔引断面での応力状態に問題がないこと

(4) 工法の概要

加熱矯正により変形を矯正した後、当て板を施工することで断面を補う。母材のボルト孔の削孔については、加熱矯正完了後に行う。なお、母材の平坦度が悪い場合に樹脂やパテを用いて不陸修正を行った事例も報告されているが、樹脂やパテの硬化後の収縮や長期の耐久性など、適用する材料に関して十分な検討が必要となる。加熱矯正（非温度管理型）＋当て板工法の事例を参-写真-3.1.2に示す。



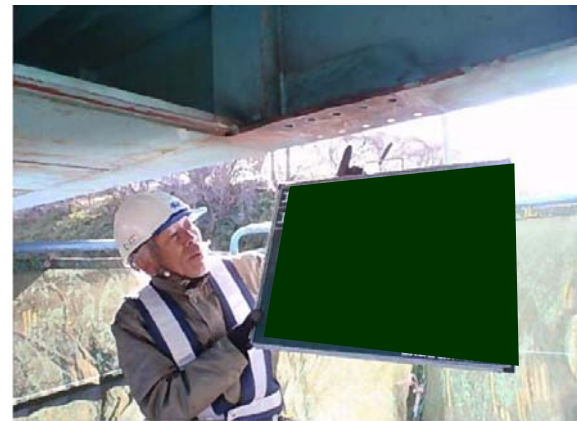
損傷状況（化粧パネル有）



損傷状況（化粧パネル撤去）



加熱矯正（ジャッキによる加圧）



加熱矯正後（当て板施工前）



加熱矯正後（当て板施工後）



補修完了状況

参-写真-3.1.2 加熱矯正（非温度管理型）+当て板工法の事例

3.1.3 材片の取替工法

(1) 目的

変形した母材断面の一部もしくは全部を切断・撤去し、その母材断面と同等以上の材片に取替えることで、性能の回復を図る。

(2) 適用部材

二次部材等容易に取替が可能な部材、もしくは他の補修方法では機能の改善が不可能な場合。ただし、適用条件が満たさない場合は、各案を再度詳細に検討して、実現性を慎重に検討する必要がある。

(3) 適用条件

少なくとも以下の3条件を全て満たす必要がある。

- ① 材片の取替作業中は死荷重応力を負担できなくなるため、バイパス部材設置やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担できること
- ② 取替材片を安全に搬入、設置できること
- ③ 発生応力度の大きい部材（主桁の下フランジ等）を接合する場合、溶接縮みによる残留応力の恐れのない高力ボルト接合の採用が基本であるが、その添接板を設置するスペースを確保できること

(4) 工法の概要

バイパス部材やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担させた後、損傷部分の切断・撤去を行い、取替材片を設置する。

① 二次部材のため、損傷しても致命的とはならず、材片の取替工法が適している事例の損傷状況を参-写真-3.1.3に示す



鋸桁の中間対傾構



アーチの上横構

参-写真-3.1.3 材片の取替工法が適した例

② 箱桁下フランジの損傷に対し、損傷部の撤去及び新材を用いた再設置を行った事例の状況写真を、参-写真-3.1.4に示す。



損傷状況（外面）



損傷状況（内面）



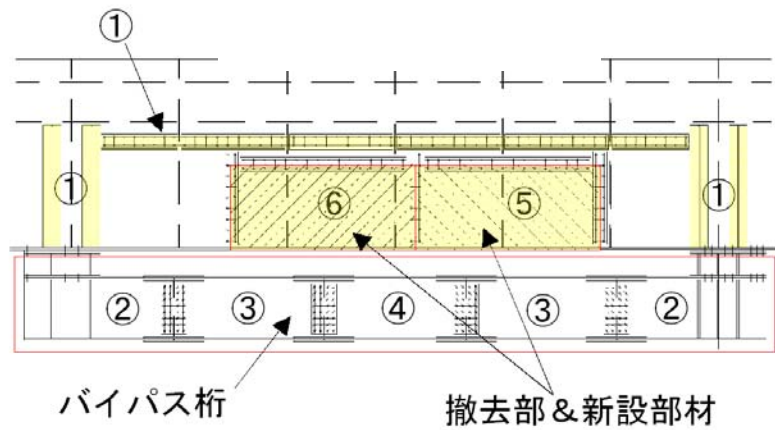
切断・撤去状況



材片の取替完了状況

参-写真-3.1.4 材片の取替工法の事例(1)

③ 主桁ウェブ及び下フランジの損傷に対し、バイパス部材を設置した上で材片の取替を行った事例について、その概要図を参-図-3.1.5 に状況写真を参-写真-3.1.5 に示す。



①：追加補剛材 ②③④：バイパス部材 ⑤⑥：撤去・新設材片

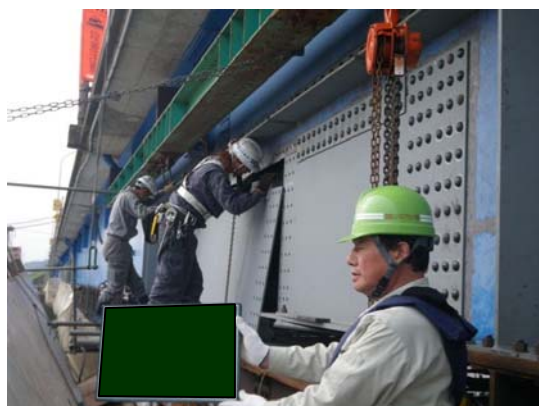
参-図-3.1.5 材片の取替工法の事例(2) 概要図



バイパス部材設置状況



損傷部の切断・撤去状況



材片の取替作業状況



材片の取替完了状況

参-写真-3.1.5 材片の取替工法の事例(2) 状況写真

3.1.4 材片追加工法

(1) 目的

追加材片により断面を増すことで、損傷により性能が低下した母材断面を補う。

(2) 適用部材

追加材片を接合するスペースを周囲に有する部材とする。

変形の範囲が比較的大きい場合には、材片の取替工法より合理的な場合がある。

(3) 適用条件

少なくとも以下の2条件を全て満たす必要がある。

- ① 追加材片を安全に搬入、設置できること
- ② 追加材片が交差物件の建築限界を侵さないこと

また、活荷重のみならず死荷重も負担させる場合は、少なくとも以下の条件を満たす必要がある。

- ③ 追加材片に死荷重を確実に負担させるため、ベント支持及びジャッキアップにより死荷重応力を抜いた状態で追加材片を設置できる環境であること

(4) 工法の概要

- ① ランガー橋補剛桁下フランジの腐食損傷に対し、欠損部の断面を補う目的で補強材片を設置した事例の概要図を参-図-3.1.6に、状況写真を参-写真-3.1.6に示す。この事例では、腐食した下フランジについて錆の除去及びパテによる不陸修正を行い、水が溜まらないようにした上で補修塗装を行っている。また、欠損した断面については、下フランジの上方に追加のフランジを設置することで主桁断面全体の断面性能を確保しており、下フランジを無理に補修していない。

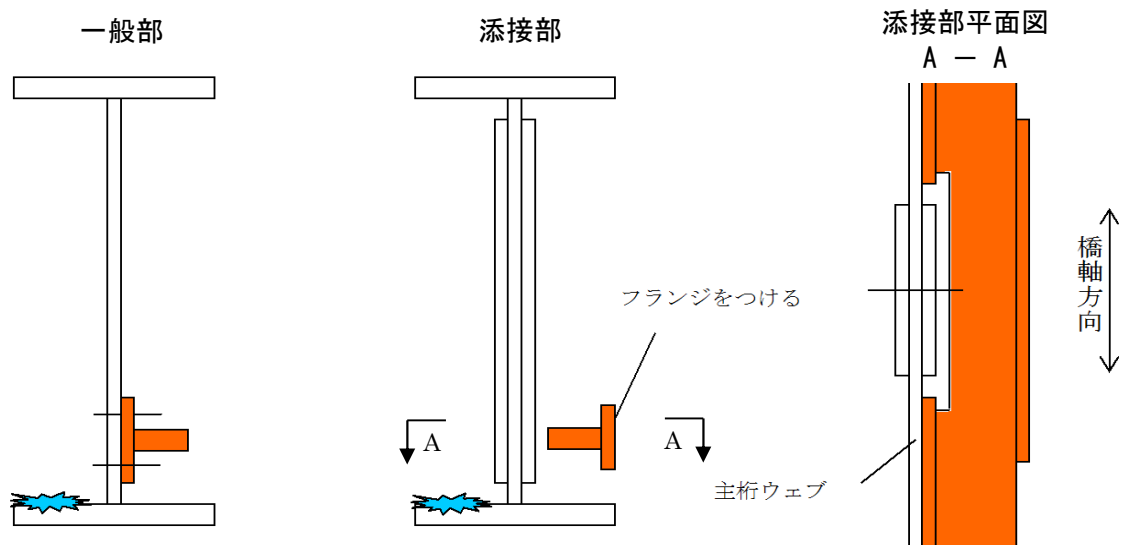


図-3.1.6 下フランジ腐食欠損部の断面補填を目的とした補強材片の概要図



参-写真-3.1.6 下フランジ腐食欠損部の断面補填を目的とした補強工の完成状

- ② トラス橋横桁上フランジの腐食損傷に対し、欠損部の断面を補う目的で補強材片を設置した工事の状況写真を参-写真-3.1.7に示す。この事例においても、腐食部の断面欠損は、その下方に設けた補強材で補っており、床版と接している上フランジを無理に断面補修しない工法を採用している。



上フランジ腐食状況



補強材片の設置状況

参-写真-3.1.7 上フランジ腐食欠損部の断面補填を目的とした補強工の施工状

③ 鉋桁の主桁下フランジ近傍の変形損傷に対し、縦桁を増設して荷重を分担させることにより、損傷個所の応力を低減した工事の状況写真を参-写真-3.1.8に示す。



ウェブ、下フランジの変形状況



補強材片の設置状況

参-写真-3.1.8 主桁の変形損傷を縦桁の増設により補修した補修工事の施工状況

3.2 加熱矯正の適用性に関する参考資料

補修工法は、その特徴や適用条件を踏まえ、各物件の個別の条件や要求性能を考慮して決定する必要がある。

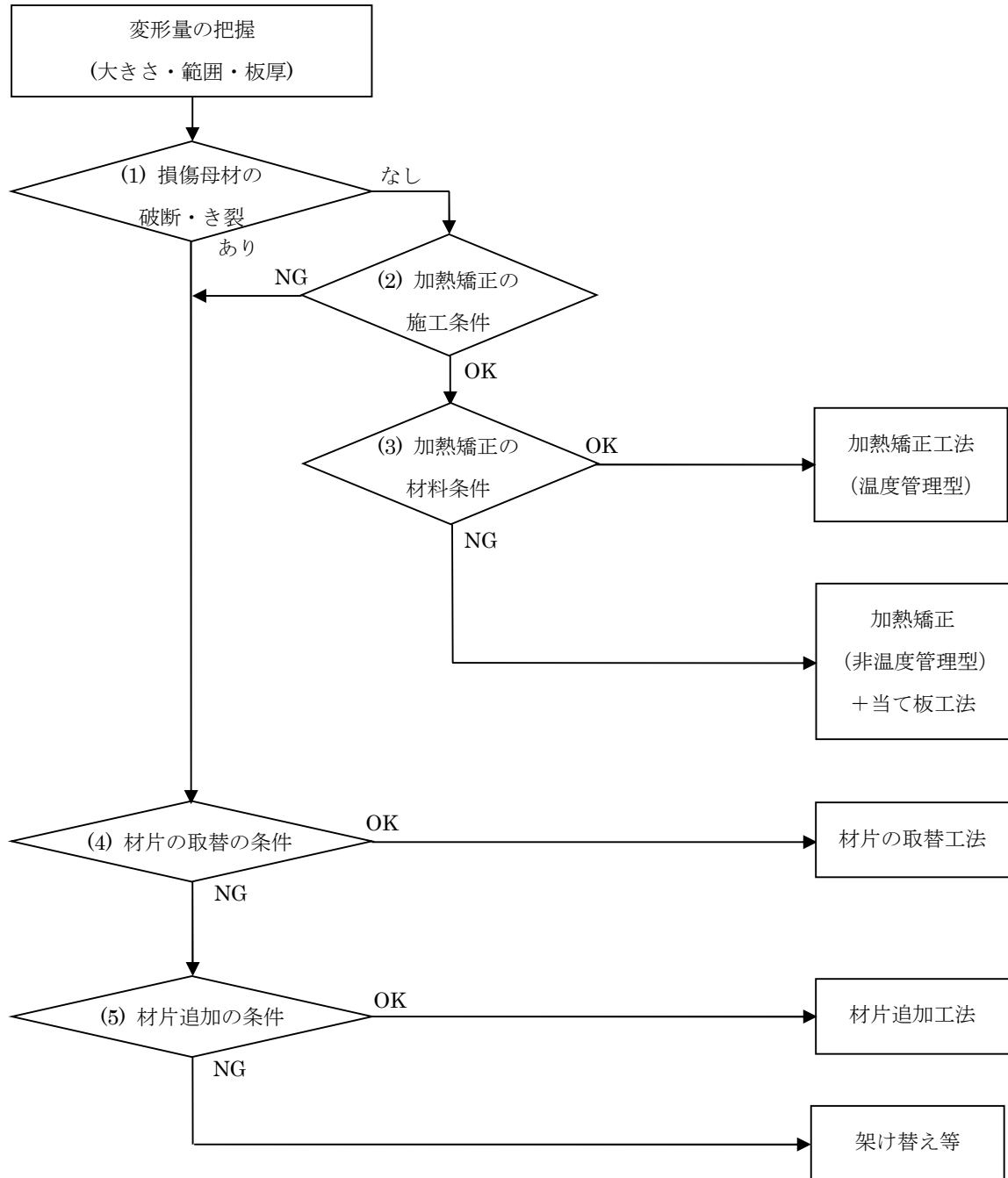
特に加熱矯正を伴う「加熱矯正工法」や「加熱矯正+当て板工法」については、施工条件や材料条件により採用可否が分かれることから、注意が必要である。

3.2.1 一般的な補修工法の選定フロー（主要部材）

主要部材における一般的な補修工法選定フローを参-図-3.2.1に示す。

常時において応力が作用している主要部材、例えば主桁やトラスの弦材・斜材などの場合、補修工法や手順によっては構造が不安定な状態を招き、更なる部材損傷や落橋に至る危険性を有する。そのため、損傷状態や材料等の各種条件を調査し、フローに基づいて適切な補修工法を選定する必要がある。

フローはあくまでも、選定手順の一例を示しており、施工時及び施工後の安全性・安定性を前提に、施工条件、要求性能、工期、工費等を総合的に判断して、選定するものとする。



【前提条件】

補修工法の選定は、少なくとも以下の条件が満たすことが前提である。

- ①現状で全体系が不安定な状態が想定される場合は、それを改善するための処置が優先される。
- ②補修工事中に全体系が不安定な状態にならない工法であること。

参-図-3.2.1 補修工法の選定フロー(主要部材)

3.2.2 一般的な補修工法の選定フロー（二次部材・付属物）

下横構のような二次部材の場合、ベント支持等を行わずに材片の取替が可能であることが多く、そのような場合は加熱矯正等による補修ではなく、材片の取替が適している。なお、二次部材だけでなく、二次部材を主桁等の主要部材に接合している箇所（ガセットプレート等）の溶接部についても点検が必要である。溶接部からのき裂は、二次部材側だけでなく、主部材側にも進展する可能性があるため、磁粉探傷試験等で溶接部の健全性を確認し、問題があれば材片の取替と同時に溶接部も補修する必要がある。

3.2.3 補修工法の選定条件

参-図-3.2.1のフロー中の(1)～(5)について、ここで説明する。

(1) 損傷部材の破断・き裂の有無

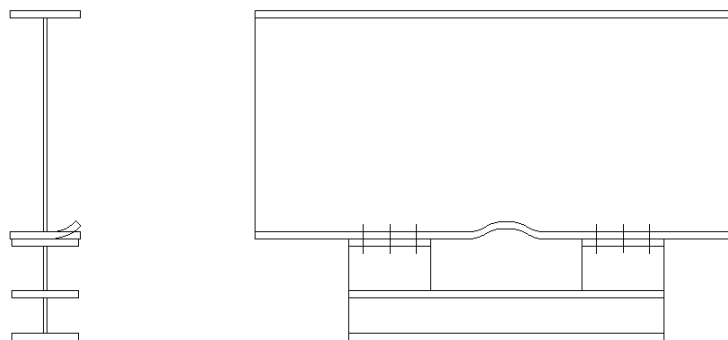
損傷した部材に破断・き裂が存在する場合、加熱矯正で変形を戻しても破断・き裂が残り、たとえそれが小さなものでも破断・き裂部への応力集中による疲労き裂や脆性破壊の恐れがある。き裂の補修方法も含めて、合理的となるよう補修工法を選定する必要がある。

(2) 加熱矯正の施工条件

加熱矯正工法を適用するためには、少なくとも以下の施工条件を満たす必要がある。

- ① 加熱後にジャッキ等で加圧矯正を行うため、ジャッキ反力を負担できる部材（ベント材を含む）が周辺にあること
- ② 加熱矯正中は加熱された部分のヤング係数が著しく低下し、死荷重応力を負担できなくなるため、バイパス材設置やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担できること

バイパス部材の概念図を参-図-3.2.2に示す。加熱後のジャッキ加圧矯正時の反力受けとしても使用されることを考慮して、必要な曲げ剛性を有する形状となるよう設計される場合が多い。



参-図-3.2.2 バイパス部材の概念図

(3) 加熱矯正の材料条件

加熱矯正工法を適用し、矯正後の母材の機械的性質を確保するためには、少なくとも以下の条件を満たす必要がある。

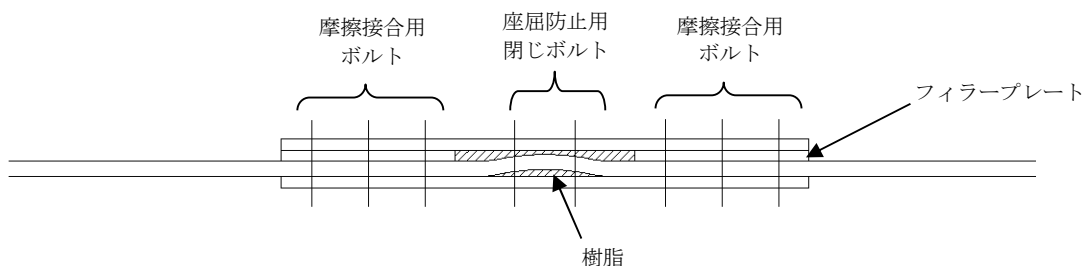
- ① 変形部の曲げ半径が $7t$ 以上であること。もしくは、本編の第 2 章を参考にすることとして事前の実験等で確認すること
- ② 靭性脆性領域 ($150\sim 400^{\circ}\text{C}$) で加熱矯正を行わないこと
- ③ 非調質鋼であれば、加熱矯正時の温度を 700°C 以下に抑えること
- ④ 調質鋼、TMCP 鋼であれば、加熱矯正時の温度を 630°C 以下に抑えること

上記条件を満たすことができない場合、矯正後の母材の機械的性質を確保できない可能性がある。そこで、当て板や部材の追加等を行い、母材の機械的性質の低下を補う必要がある。なお、機械的性質の低下を定量的に把握することは困難であることから、上記条件を満たさない場合、計算上は加熱矯正部を断面欠損しているとみなし、必要な当て板や材片の追加等を行うのが現実的である。

加熱矯正後は矯正した部分の平坦度が悪く、当て板との間に肌隙が出来てしまうことが多い。加熱矯正後に当て板を行う場合、高力ボルト摩擦接合部での応力伝達の確実性低下や肌隙からの水の浸入による発錆が懸念されるため、水の浸入を防ぐため、樹脂注入などによる防水処置を行う必要がある。なお、樹脂は紫外線による劣化が起りやすいため、肌隙部への注入後、周辺の鋼材と共に塗装を施すのがよい。肌隙が生じるものの、やむを得ず当て板を施工する場合は、部材が破壊に至るまでの応力伝達の確実性を少しでも高められるように、当て板やボルトの配置などを検討する必要がある。肌隙部にフィラーを入れるなど、供用中の確実な摩擦力の発揮を得ることが必要であるが、不確実性は残ると考えれば、以下の対応等を組み合わせるなど確実な応力伝達を図る方法が考えられる。

- ① 肌隙部または樹脂等の充填部においては、打込式高力ボルトによる支圧接合としても機能するようにする
- ② 周辺平坦部まで当て板の領域に含めることによる確実な摩擦接合とする

周辺平坦部における摩擦接合と樹脂注入の概念図を参-図-3.2.3 に示す。この場合、母材から当て板への応力伝達は周辺平坦部の高力ボルト摩擦接合により伝えられる。平坦度が悪い中央部分については、周辺平坦部にフィラープレートを入れることで変形部が収まる隙間を設け、防水のため隙間に樹脂を注入している。さらに、当て板の座屈防止を目的として閉じボルトを設けている。



参-図-3.2.3 周辺平坦部による摩擦接合と樹脂注入の概念図

(4) 材片の取替の条件

損傷部材の一部もしくは全部を切断・撤去し、その母材断面と同等以上の材片に取替えるためには、少なくとも以下の条件を満たす必要がある。

- ① 材片の取替作業中は死荷重応力を負担できなくなるため、バイパス材設置やベント支持により死荷重応力を他の部材で負担できること
- ② 取替材片を安全に吊上げ、設置できること

なお、取替材片の取付方法はボルト構造とすることを基本とする。やむを得ず溶接を適用する場合には、振動等の影響、鋼材の溶接性、溶接による変形や残留応力の影響、溶接縮みの影響、さらには溶接作業性等を検討する必要があるが、これらについてはその検討に定まった知見はない。また、以下の場合には、溶接補修を避けること。

- ① 古い時代の鋼材で、材料的に溶接に適さない場合（本編 2.1 参照）
- ② 振動下での溶接作業となり、溶接品質の確保が難しい場合

(5) 材片追加の条件

バイパス材や追加補剛材など材片追加による補修を行うためには、少なくとも以下の条件を満たす必要がある。

- ① 追加材片を安全に吊上げ、設置できること
- ② 追加材片が交差物件の建築限界を侵さないこと

また、活荷重のみならず死荷重も負担させる場合は、以下の条件を満たす必要がある。

- ③ 追加材片に死荷重を確実に負担させるため、ベント支持または PC 鋼材によるプレストレス導入等により死荷重応力を抜いた状態で追材片を設置できる環境であること

なお、追加材片の取付方法はボルト構造とすることを基本とする。溶接を適用する場合には、(4)と同様の検討が必要である。

4. 加熱矯正工法の施工とその留意点

本章は、実際の現場で損傷した部材を加熱矯正することを想定し、通常の補修手順に本報告書で整理した熱間加工の知見を踏まえて、従来からの知見をまとめなおしたものである。したがって通常の設計で基本的に扱われることは照査していない。

4.1 加熱矯正工法の手順

4.1.1 加熱矯正工法を行うにあたっての注意点

加熱矯正工法は、工種に応じた加熱温度の管理、加熱によるヤング係数低下を考慮した死荷重及び活荷重応力負担、加熱方法、加圧時の反力負担など、施工上の留意点が多くある。これらの留意点に配慮しないと想定する強度が得られない。加熱や加圧による部材の座屈など、かえって橋梁全体の耐荷力を低下させてしまうことになる。加熱矯正工法を行うにあたっての留意点を以下に示すので、計画段階からその対応方法について検討し、計画に従って正しく施工する必要がある。

(1) 材料に関する注意点

- ① 鋼材の製造プロセスによって、加熱可能な温度が異なる。以下に本章で示す加熱矯正の施工条件（本編 5 章 表-5.2）を示す。

参-表-4.1.1 加熱矯正の施工条件（本編 5 章 表-5.2）

鋼材の製造時期	鋼材の適用規格及び主な材質	製造プロセス	加熱矯正法					その他	
			加熱矯正の可能性	加熱温度	冷却条件	水冷する場合の温度	加圧禁止温度		
第1期	1925年以前	—	否	—	—	—	—	線状加熱または加熱矯正を適用する場合は、事前に化学成分調査を実施、適用可能か確認する	
	1925年～1952年	JES20号：第1,2種 JES第430号：SS34,SS41 JES金属3101：SS34,SS41	非調質鋼	基本的には可	700℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	720℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する
第2期	1952年～1970年代	JIS G 3101-1952：SS41,SS50 JIS G 3106-1952：SM41,SM41W JIS G 3101-1959：SS41,SS50 JIS G 3106-1959：SM41,SM50 JIS G 3101-1966：SS41,SS50 JIS G 3106-1966：SM41,SM50,SM50Y,SM53 JIS G 3114-1968：SMA41,SMA50	非調質鋼	基本的には可	700℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	720℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する
		JIS G 3106-1966：SM58Q	調質鋼 (焼入れ焼戻し)	基本的には可	630℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	650℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する
第3期	1980年以降	JIS G 3101-1988：SS400 JIS G 3106-1988：SM400,SM490,SM490Y,SM520 JIS G 3114-1988：SMA400,SMA490	非調質鋼	基本的には可	700℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	720℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する
		JIS G 3101-1988：SS400 JIS G 3106-1988：SM570Q JIS G 3114-1988：SMA570Q	調質鋼 (焼入れ焼戻し)	基本的には可	630℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	650℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する
		JIS G 3106-1988：SM490TMC,SM490YTMC,SM520TMC,SM570TMC JIS G 3114-1988：SMA490TMC,SMA570TMC	TMCP鋼	基本的には可	630℃以下	原則空冷	400℃以下	150～400℃	650℃以上で加熱矯正を行う場合は、母材の鋼材の特性を得られないことので注意する

(2) 加熱矯正を採用する際の注意点

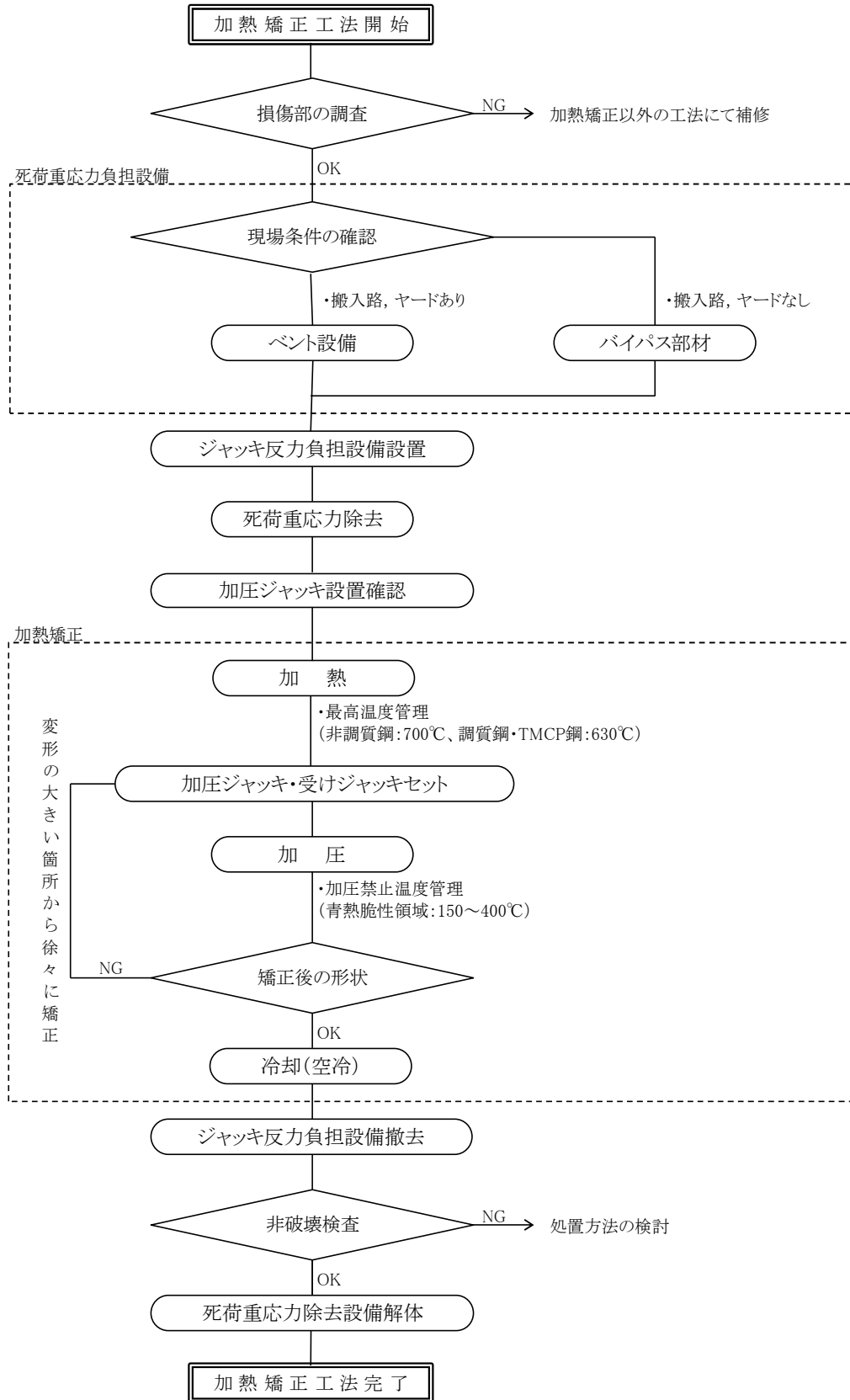
- ① 加熱矯正工法により変形の補修が可能な変形量、板厚、作業空間であること。実作業で補修不可となり工法の変更にならないように、あらかじめ現地調査や試験等で確認するのがよい。
- ② 変形部の内側曲げ半径が 7t 以上であること。もしくは、文献 9) の 2 章を参考にするなどして事前に実験等で確認すること。
- ③ 変形範囲の母材や溶接部にき裂がないこと。
- ④ ジャッキを用いて加圧するため、ジャッキ反力を負担できる部材または設備があること。
- ⑤ 加熱矯正中は部材のヤング係数が著しく低下し、死荷重応力を負担できなくなるため、ベント支持によるジャッキアップやバイパス材の設置により死荷重応力を負担できること。
- ⑥ 変形量や板厚などにより、同一箇所を何回も繰り返し加熱矯正を行う場合は、加熱温度の上限を下げて行うこと。

(3) 加熱矯正を施工する際の注意点

- ① 加熱温度を厳守する。
- ② 加熱矯正後の残留ひずみを最小限にするために、加熱は変形部の温度が均一となるようにする。
- ③ ジャッキによる加圧方向を十分に検討し、ジャッキをセットするスペースや反力をとるスペースを考慮する。
- ④ 加圧禁止温度（青熱脆性領域 150～400℃）を厳守する。
- ⑤ 変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正していく。
- ⑥ 冷却は原則空冷とする。速やかに矯正程度を確認したい場合等で水冷を行う場合は、矯正箇所の板厚全域が 400℃以下であること。板厚中央部の温度は確認できないが、これに対して例えば表面温度が 300℃以下で水冷するなど、安全側に十分余裕をみて行うなどの対応が考えられる。

4.1.2 施工フロー

加熱矯正工法の施工フローを示す。



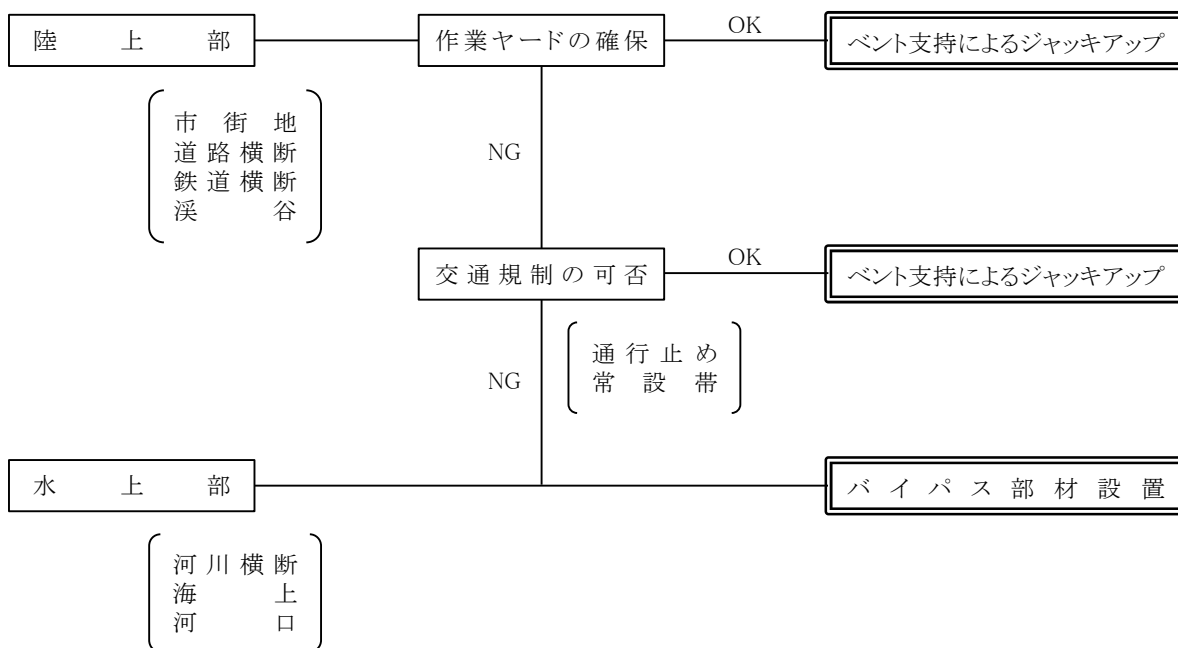
参-図-4.1.1 加熱矯正工法の施工フロー

4.1.3 死荷重応力負担設備の設置

加熱矯正中は加熱された箇所の変形係数が著しく低下することから、死荷重応力を負担できる設備の設置が必要不可欠であり、交差条件や周辺環境等の現地条件により、施工可能なものを採用する。

(1) 死荷重応力負担設備の選定

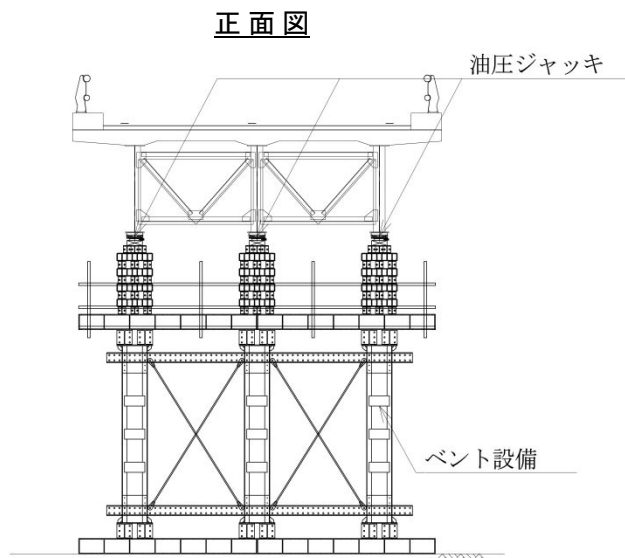
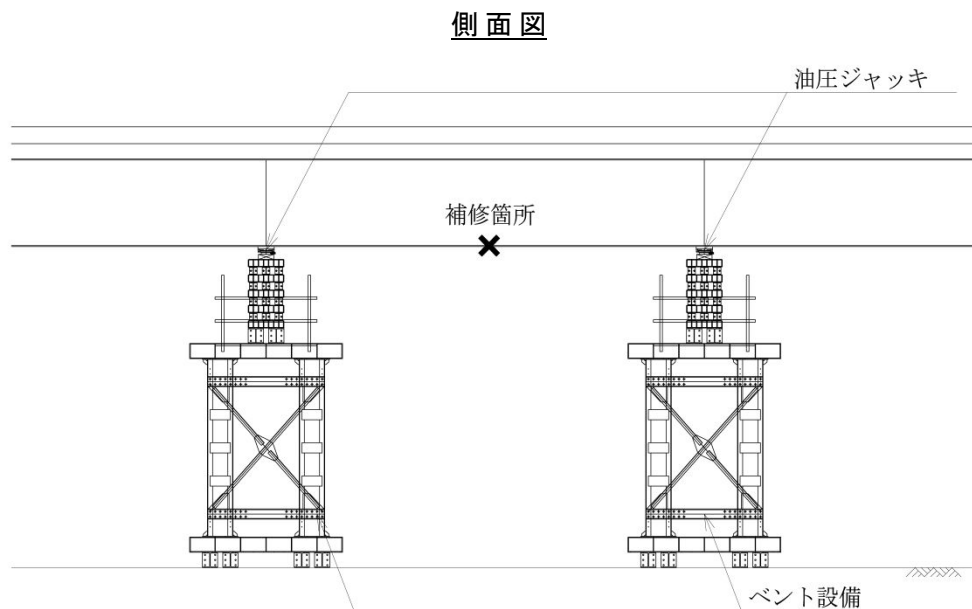
死荷重応力負担設備の選定フローを以下に示す。死荷重応力負担設備はベント支持が容易であり、さらにジャッキアップをすることで死荷重応力を除去できることから、作業ヤードの確保、施工期間中の通行止めや常設帯の設置が可能であれば、ベント支持を優先して選定に関する検討を進めるとよい。



参-図-4.1.2 死荷重応力負担接の選定フロー

(2) ベント支持によるジャッキアップ

ベント設備（参-図-4.1.3）を設置し、活荷重のない状態でジャッキアップを行い、たわみ管理で無応力状態を再現する方法が一般的である。交通供用下でジャッキアップを行う際には、一時的な通行止めや交通量の少ない夜間施工、交通規制による通行車両の制限等を十分に検討する必要がある。

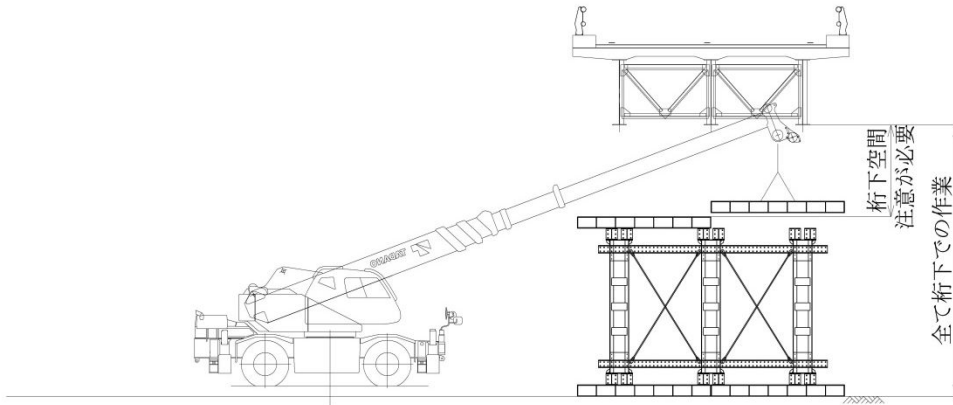


参-図-4.1.3 ベント設備図(例)

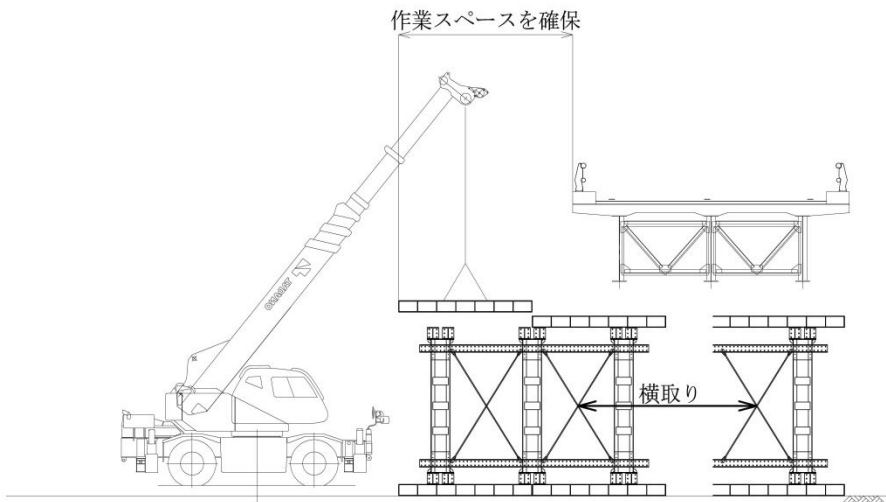
1) ベント設備

ベント設備の構造は、支持する橋梁の形状、重量および設置箇所の地盤条件や配置位置、ベントの高さ、作用荷重等の諸条件を考慮して計画する必要がある。また、ベント設備の組立・解体は新設橋梁とは異なり全て桁下での作業となるため、組立・解体を考慮した設備の計画も重要である。(参-図-4.1.4)

ベント設備組立・解体(例1)



ベント設備組立・解体(例2)



参-図-4.1.4 ベント設備組立・解体図(例)

ただし、ベント自体の温度や左右温度差の影響を受ける場合があるため、必要に応じて本体の応力状態に与える影響を確認して必要な対応をとること。

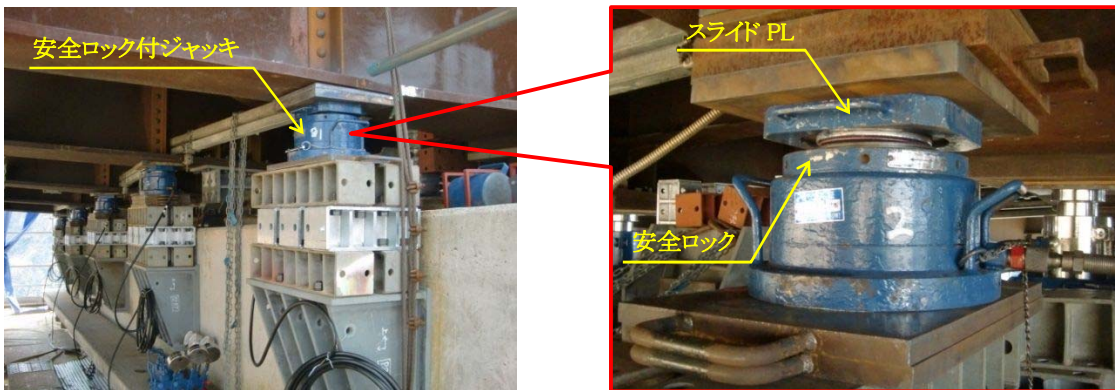
また、支保工を設置したり、バックアップ部材を取り付けたりする場合の、一般的な注意点を以下に示す。ただし、安全性は現地現物の状態に依存するものであり、ここに記載の留意点だけを考慮すればよいというものではないことを十分に認識したうえで、適切に実施される必要がある。

- ① 実際に落橋などが生じるときには、局所的に応力集中が生じたり、また、部材がねじれるなど、よく行われる応力計算で想定できるような挙動のとおりにはならないことが考えられる。したがって、適切な部材等の状態を前提として適用するのであれば設計基準にあるような荷重組み合わせを用いた応答の計算にも意味があるが、変状が進行したうえでの破壊においては、局所的にはそのような計算では想定しがたい応力分布になることを前提とする必要がある。つまり、工学的な判断からも補強部材や材料等の配置を工夫し、安全を付与することが重要である。
- ② たとえば、橋軸方向、重力方向の動きだけでなく、橋軸直角方向の動きや、桁かかり長が最小である方向、土圧等の作用方向など、橋の安全性にとってもっと影響の大きい方向の動きも考慮する必要がある。
- ③ また、活荷重だけでなく、温度変化、実際に生じ得る温度変化、損傷が進行的である場合には剛性や荷重分担のアンバランスが生じることなど、実際には複雑な荷重状態、応力状態に置かれることも考慮する必要がある。
- ④ このほか、当初の架設時や製作・コンクリート打設などによる残留応力の影響、その後の荷重履歴の影響など、橋の現応力の状態の再現には限界があること、たとえば、荷重を盛り替えるなども、完全に想定のとおりとはならないので、適切に管理することが重要である。
- ⑤ 橋に生じている変状については、その原因を特定できない場合もある。その場合でも、監視においては、それらに対しても安全側に考慮されるような計画を行う必要がある。
- ⑥ 橋を支持するための部材や材料を選定するにあたっては、その部材や材料の幾何学的性質や伸び等の特性から、比較的大きな変形になるまでは十分な反力等を与えないことがないように、その取り付け方や部材・材料の選定に配慮する必要がある。
- ⑦ 新たに設置する支持点や部材取り付け部が実際に機能するときには、局所応力が発生する。したがって、局所応力への配慮や、応力分布を遷移させるための構造上の配慮が同時に行われることも多い。
- ⑧ たとえば、支保工を設ける場合にはその安定・強度を確保するだけでなく、支保工自体も温度変化等に対して応答することで、構造物に影響を与えることもあるので、その影響をできるだけ小さくするとともに、それを考慮しても安全側になるように対処する必要がある。
- ⑨ また、支保工等で支持する場合には、その反力で部材等が損傷するなど結果的に支持されないことがないように、事前に対策を施すことが必要なときもある。
- ⑩ 支点となる部位や遷移区間となる部位等で補強を行ったり、また、変状部分の応力の増加を緩和するための補修や補強を行ったりするときには、建設当時に用いられた材料の特性なども考慮する必要がある。たとえば、古い鋼材は溶接性が保証されておらず、溶接を行った場合には却って割れ等が生じる恐れもあるなどの類である。
- ⑪ 支保工等を設置する地盤については安定について考慮するのは当然であるが、地盤の短期、長期の変形によってもベント等に生じる反力分布が変化することにも注意する。したがって、支保工等の反力分布や変形なども定期的に把握することも検討するのがよい。

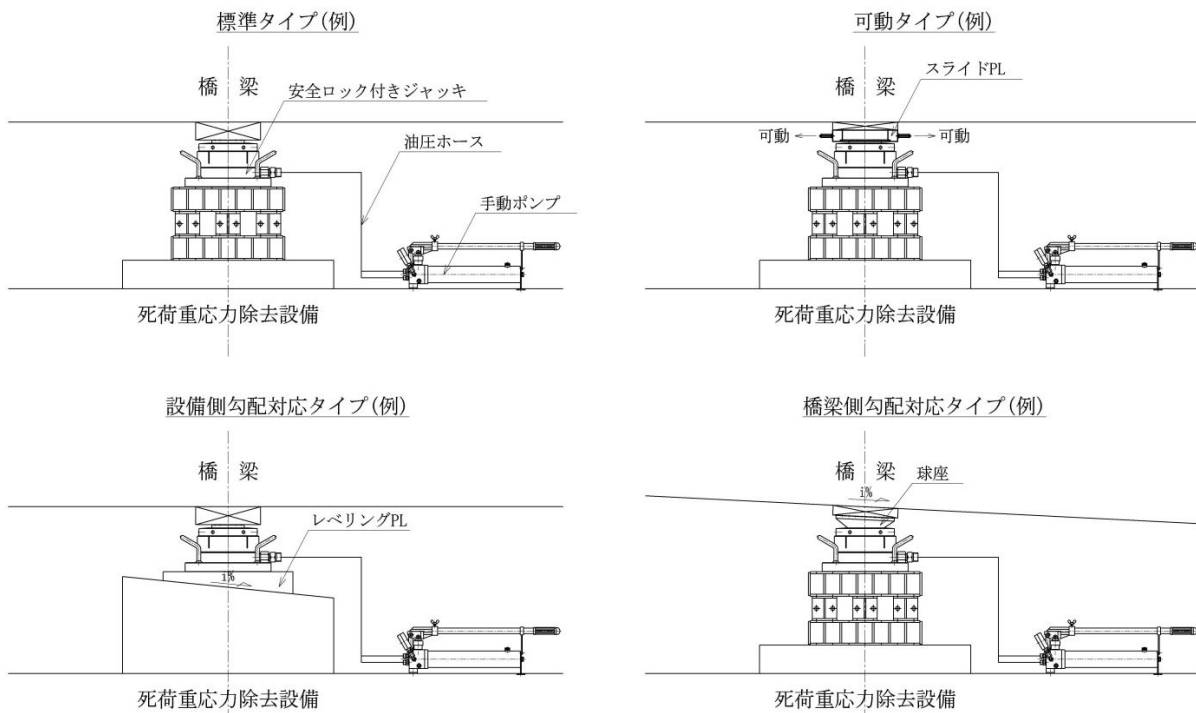
2) 死荷重応力除去用ジャッキ

ジャッキは油圧ジャッキを原則とし施工期間中に荷重を常に受け持つことから、支承取替時に用いられる安全ロック付きジャッキ（参-写真-4.1.1）を推奨する。安全ロック付きのジャッキは仮に油圧力が解放されても鉛直荷重を機械的に保持でき、長期間の仮受けに適しているジャッキである。付属のプレート等を装着することで可動沓として使用可能なものや勾配を吸収できるものもある。（参-図-4.1.5）

ジャッキの選定は死荷重応力を十分に負担できるものとし、死荷重を除去するためのたわみ量を満足するストロークのものを採用する。また、ベント設備のなじみや地盤の沈下、梁のたわみ量等もストロークに加味しておくといよい。



参-写真-4.1.1 安全ロック付ジャッキ



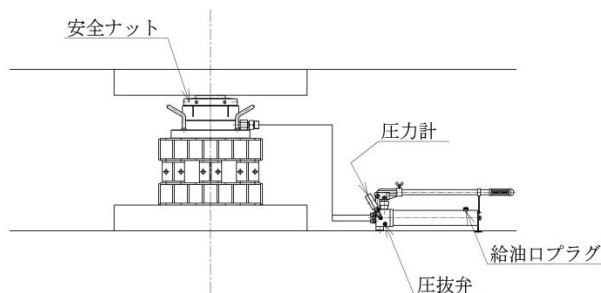
参-図-4.1.5 ジャッキの使用例

3) ジャッキアップ量及びジャッキ反力の確認

ジャッキ操作の手順は参-図-4.1.6 に示すとおりとし、ジャッキアップは桁及びベント設備に異常がないか確認しながら、ジャッキアップ量及び各々のジャッキに所定の反力がかかるよう操作する。

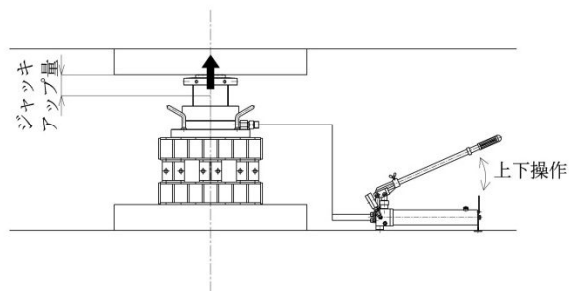
死荷重応力が除去されているかの判断は、ジャッキアップ量とジャッキ反力を目安に行う。ジャッキアップ量の管理は、ベント設備のなじみや地盤の沈下、梁にたわみが生じることもあるため、ベント設備以外に不動点を設け、不動点と桁との間隔にて管理することが望ましい。ジャッキ反力はポンプの圧力計の読み値にて確認を行う。設計反力と著しく異なる場合は、何かしらの原因があるため、作業を一旦中止し、橋梁およびベント設備の点検を行う、点検項目の例としては、設計反力になっても扛上しない場合は部材干渉の有無、設計反力以下で扛上した場合はベント設備の異常の有無等が挙げられる。

Step1



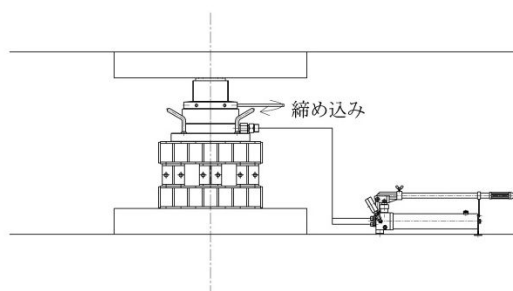
ジャッキ、ポンプ設置、ホースの配管を行い、ポンプの給油ロプラグを開き、圧抜弁を閉める。

Step2



ポンプのハンドルバーを上下に操作してジャッキを所定の扛上量にする。

Step3



安全ナットを締めこむ。

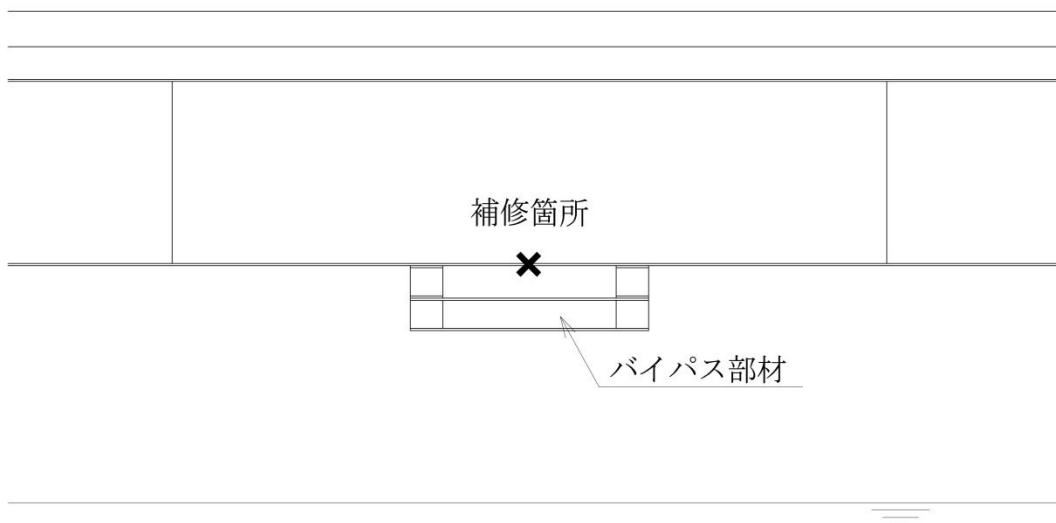
参-図-4.1.6 ジャッキ操作の手順

(3) バイパス部材の設置

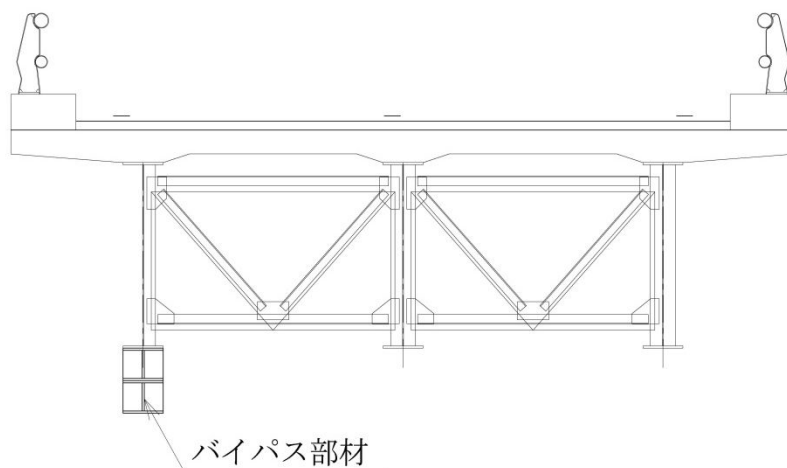
ベント支持によるジャッキアップと同様に活荷重のない状態でバイパス部材（参-図-4.1.7）の設置を行う。この場合、死荷重応力は加熱時にバイパス部材へ、バイパス部材撤去時に補修箇所へ伝わるため、無応力状態での作業とならないことから、施工方法等は別途検討が必要である。

また、バイパス部材を下フランジ下面に設置する際にはバイパス部材設置用の足場設備等を含め、建築限界やH.W.Lを侵さないよう注意が必要である。

側面図



正面図



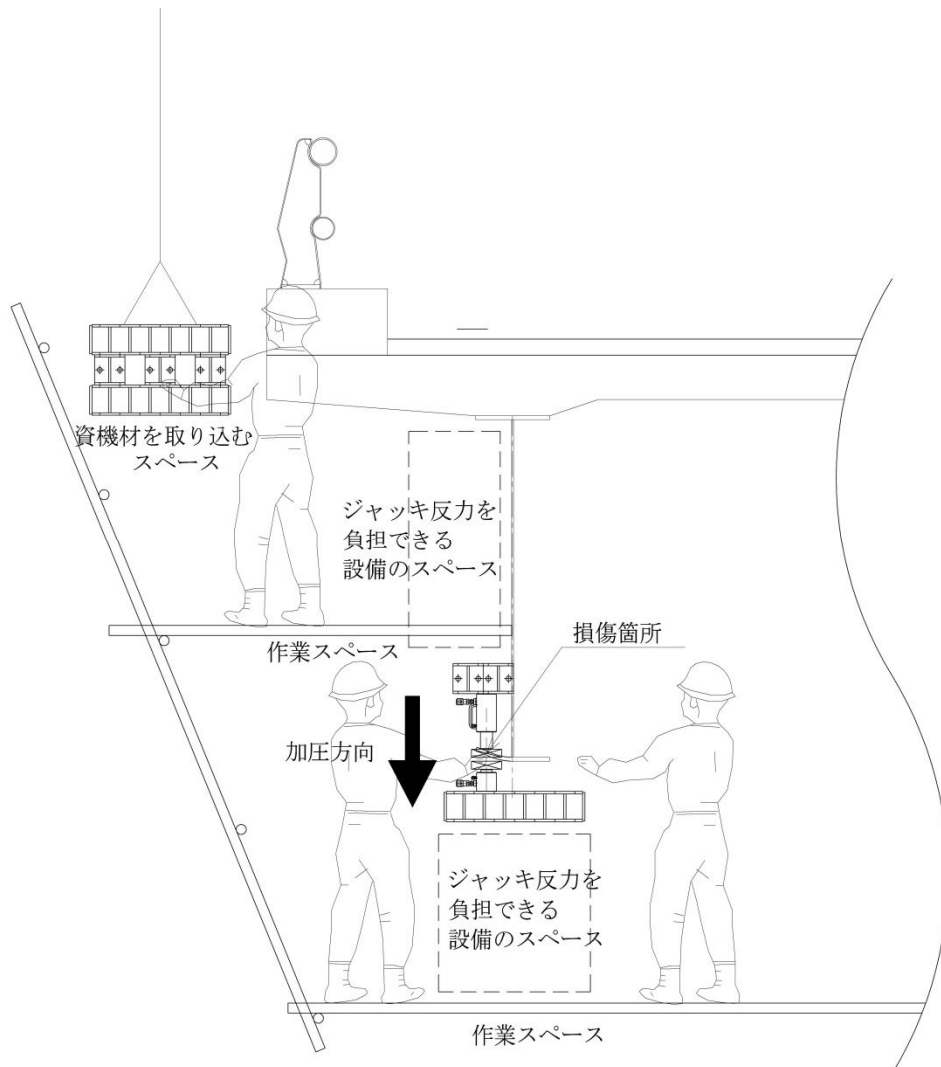
参-図-4.1.7 バイパス部材(例)

4.1.4 加熱矯正

加熱矯正は施工後の母材の機械的性質を確保するため、変形範囲の材質および内側曲げ半径の事前確認や施工時における加熱温度、ジャッキによる加圧矯正時の温度を管理しながら施工する必要がある。また、変形箇所や範囲等からジャッキの加圧方向を十分に検討し、ジャッキ反力を負担できる設備の設置スペースや作業スペースも考慮する。

(1) 設備計画

変形部の範囲や形状からジャッキの加圧方向を検討し、ジャッキスペースやジャッキ反力を負担できる設備のスペース、作業スペース、資機材等を取り込むスペース等を考慮した設備の計画が必要である。また、施工時における変形範囲の温度は 400°C ~ 700°C とかなり高温となり、無理な姿勢での作業とならないような作業スペースの確保や足場材を損傷箇所近傍に設置しない等の安全性を考慮した設備の検討も十分に行う。(参-図-4.1.8)



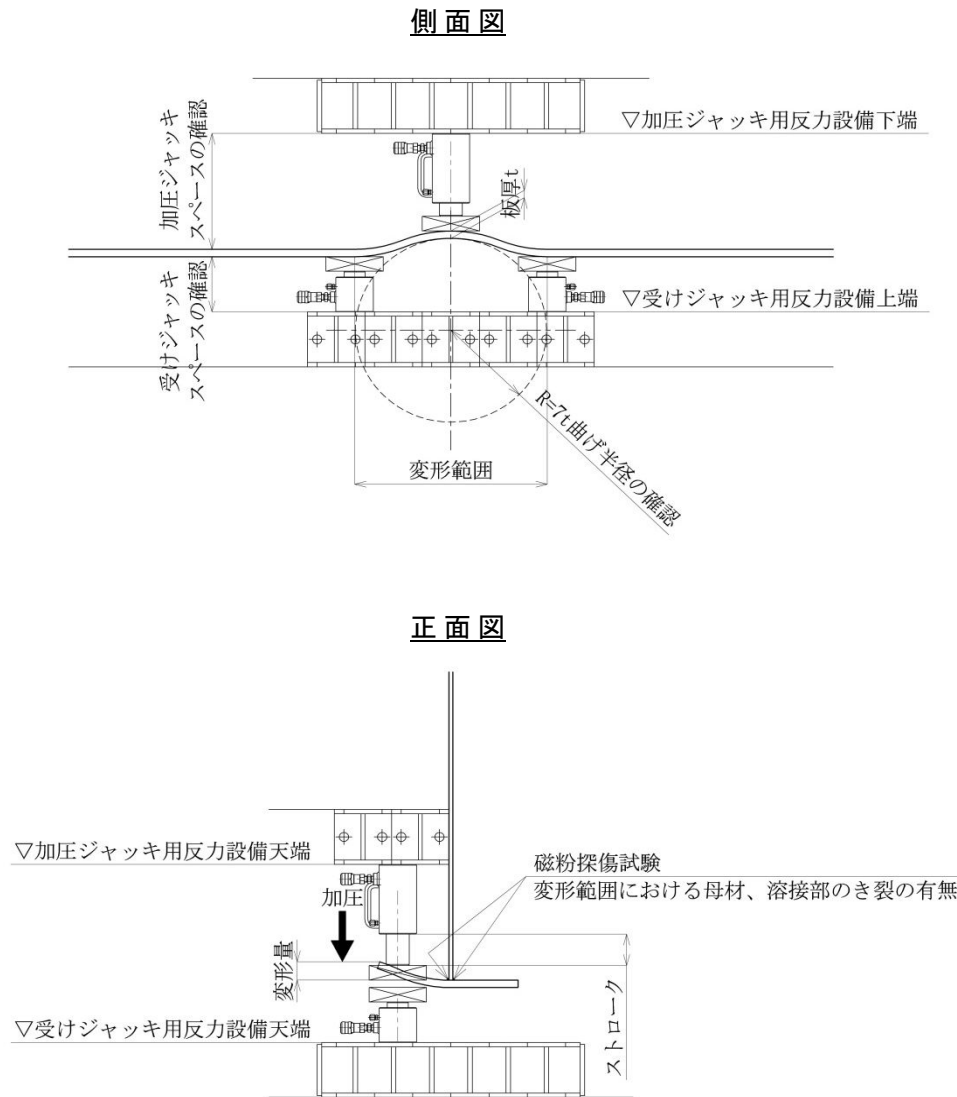
参-図-4.1.8 設備例 (下フランジ補修例)

(2) 加熱

加熱温度は加圧禁止温度の 400℃以上とし、非調質鋼の場合は 700℃以下、調質鋼、TMCP 鋼の場合は 630℃以下に抑えて加熱する。

1) 加熱矯正前の事前確認

加熱矯正を行うにあたり、変形範囲内における母材や溶接部のき裂の有無、材質や変形部の曲げ半径等の材料条件の確認、加圧矯正する際のジャッキスペースについても確認しておく。(参-図-4.1.9)



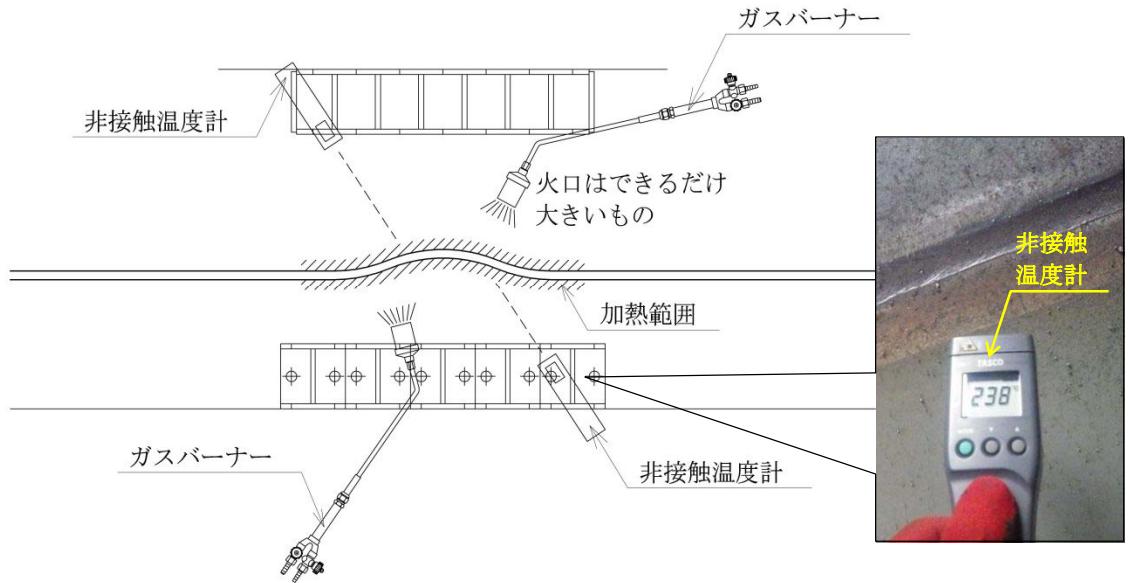
参-図-4.1.9 加熱矯正イメージ図 (下フランジ補修例)

2) 加熱方法

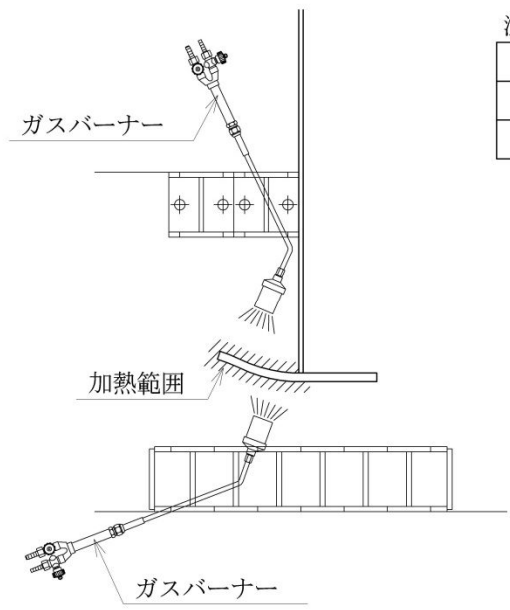
加熱はガスバーナー（火口のできるだけ大きいもの）を用い、変形した部位を均一に行う。板厚の厚いものは板厚中央まで温度が均一になるように両側から加熱する。(参-図-4.1.10)

変形箇所が大きい場合は、あらかじめ加熱が可能な範囲を設定し、後述する受けジャッキの設置位置に反映する。

側面図



正面図



温度管理

非調質鋼	700℃以下
調質鋼	630℃以下
TMCP鋼	630℃以下

参-図-4.1.10 加熱方法（下フランジ補修例）

3) 加熱時の温度計測

温度計測は加熱作業と並行して行い、変形部位の両面の温度が均一かつ所定の温度を超えないように管理する。温度計測器は温度チョーク、表面接触温度計、非接触温度計などがあり、加熱作業と並行して計測することから、稼働状態でも計測できる非接触温度計の使用が考えられる。

(3) ジャッキのセット

ジャッキセットは加熱後、速やかに行う。受けジャッキは加熱前にセットすることも可能であるが、ジャッキは熱に弱く加熱時に熱が伝わらないよう、加熱箇所にはタッチさせず隙間を設け、耐熱シートやブリキ板等で養生する等の対策が必要である。

1) ジャッキの選定

加圧ジャッキ、受けジャッキとも油圧ジャッキを使用する。ジャッキ能力は変形部位や材質、板厚に適したジャッキを選定し、加圧ジャッキのストロークは変形量を満足するものを採用する。加熱後にジャッキをセットするため、作業性を考慮し軽量型のものを使用することが望ましい。以下に一般的な油圧ジャッキの仕様（参-表-4.1.2）および写真（参-写真-4.1.2）を示す。

参-表-4.1.2 油圧ジャッキの仕様(例)

	能力 kN	ストローク mm	機械高 mm	受圧面積 cm ²	作動圧力 MPa	質量 kg	備考
普及型	100	200	330	19.6	50.93	11	
	200	200	350	44.2	45.27	19	
	300	60	200	56.7	52.87	18	
	300	200	350	60.1	49.89	33	
	500	50	150	100.3	49.86	21	
軽量型	100	150	250	19.6	50.93	7	
	200	200	310	34.2	58.46	12	
	500	50	140	78.5	63.66	14	
	500	150	290	78.5	63.66	26	
	500	200	340	78.5	63.66	31	

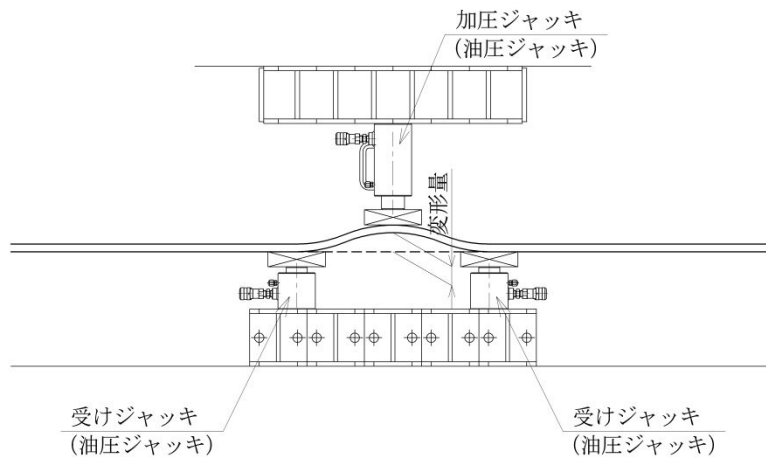


写-4.1.2 油圧ジャッキ（加圧ジャッキ、受けジャッキ）

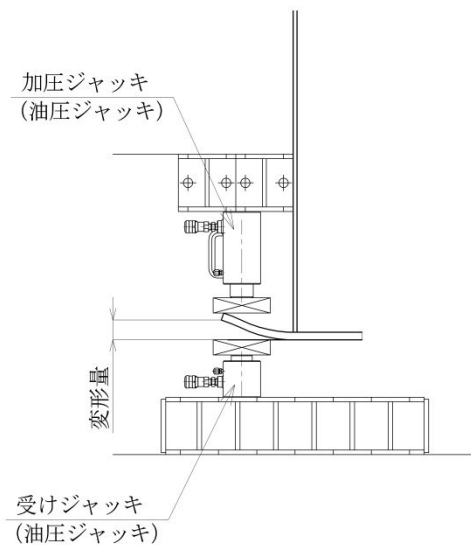
2) 加圧ジャッキ、受けジャッキのセット

加圧ジャッキは変形量の最も大きい箇所、受けジャッキはジャッキの加圧により健全部が変形しない箇所にセットする (参-図-4.1.11)。

側面図



正面図



参-図-4.1.11 ジャッキセット (下フランジ補修例)

(4) ジャッキによる加圧矯正

加圧矯正は加圧禁止温度（青熱脆性領域 150～400℃）を避け、変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正していく。矯正時の温度が 400℃を下まわる場合は再加熱し、規格値内となるまで同様の手順で行う。

1) ジャッキによる加圧矯正方法

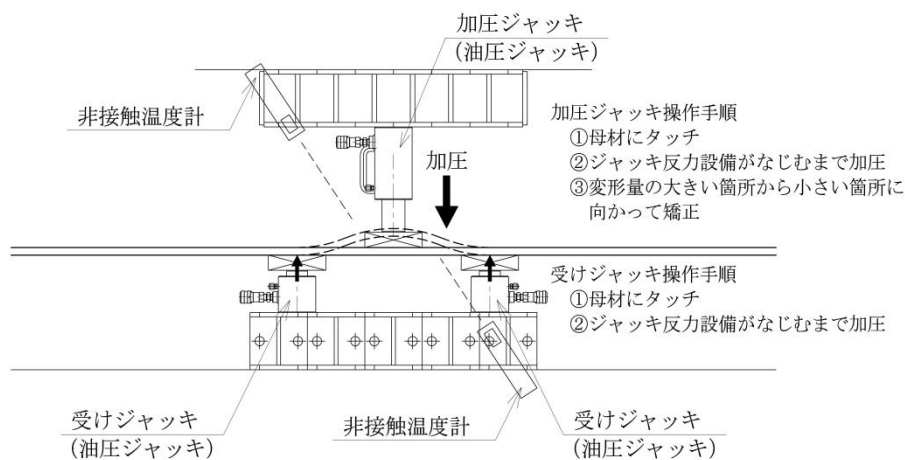
加圧ジャッキ、受けジャッキを母材にタッチさせ、ジャッキ反力設備がなじむまで加圧し、その後加圧ジャッキにて変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正する。加圧により変形部位が戻りすぎないように定規等で確認しながら加圧ジャッキの操作を行う。また、ジャッキ反力を負担できる設備に異常がないかも合わせて確認を行う（参-図-4.1.12）。

2) 矯正時の温度計測

温度計測は矯正前、矯正中に行い、変形範囲の温度が 400℃を下まわらないように管理する。400℃を下まわる恐れのある場合は、ジャッキを撤去し、再加熱する。

3) 矯正後の形状確認

矯正後に変形部位の形状を計測し、規格値内となるまで上記の作業を変形の大きい箇所から徐々に行う。



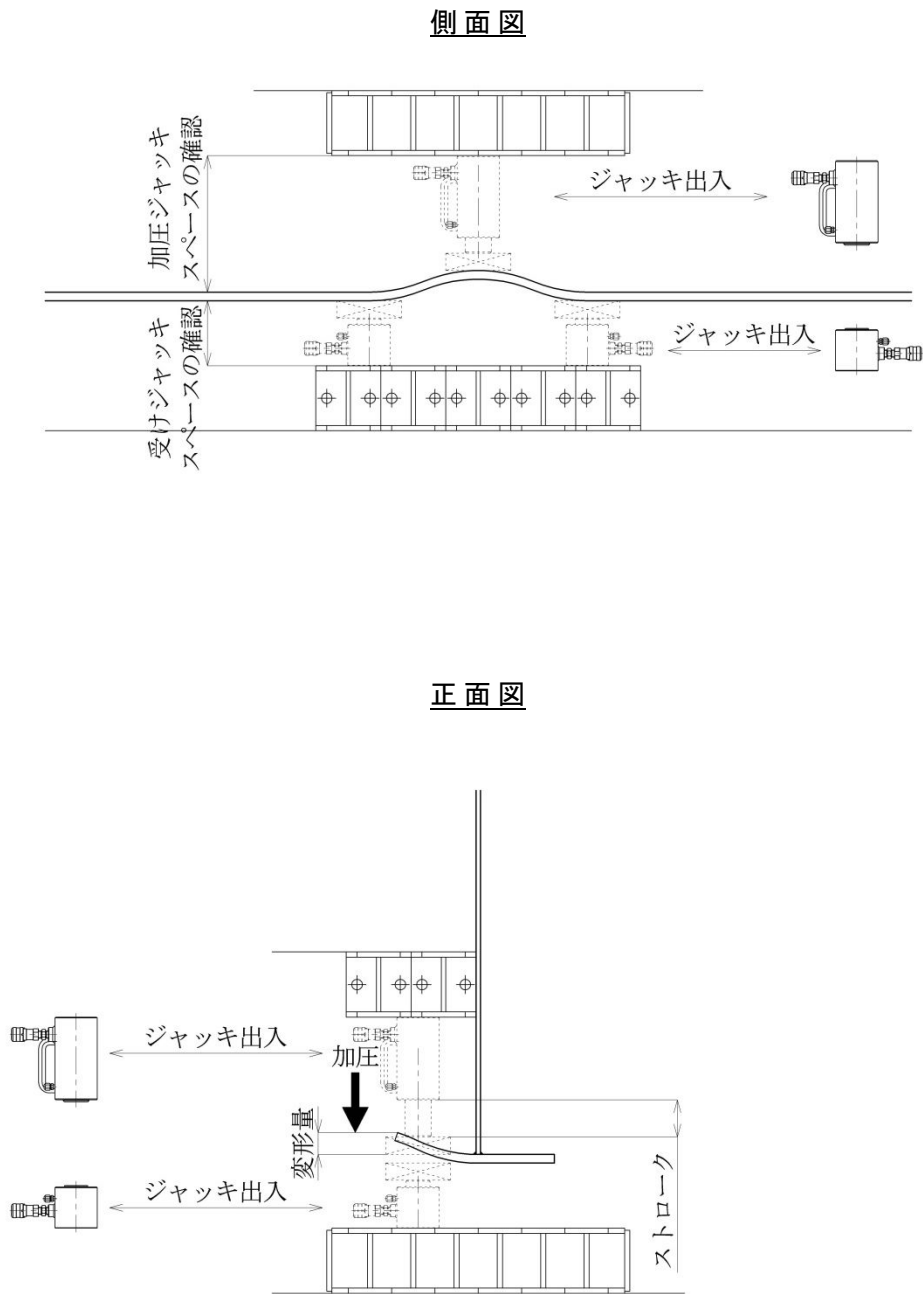
参-図-4.1.12 加圧方法（下フランジ補修例）

(5) 加熱矯正の施工ステップ

加熱矯正の施工ステップを以下に示す（参-図-4.1.13～参-図-4.1.22）。

Step1：ジャッキ設備の準備

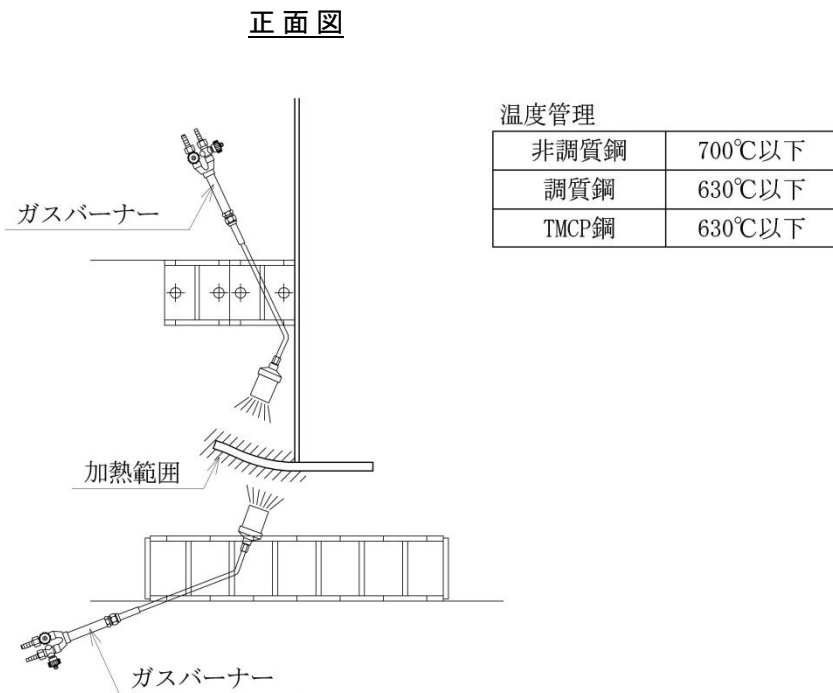
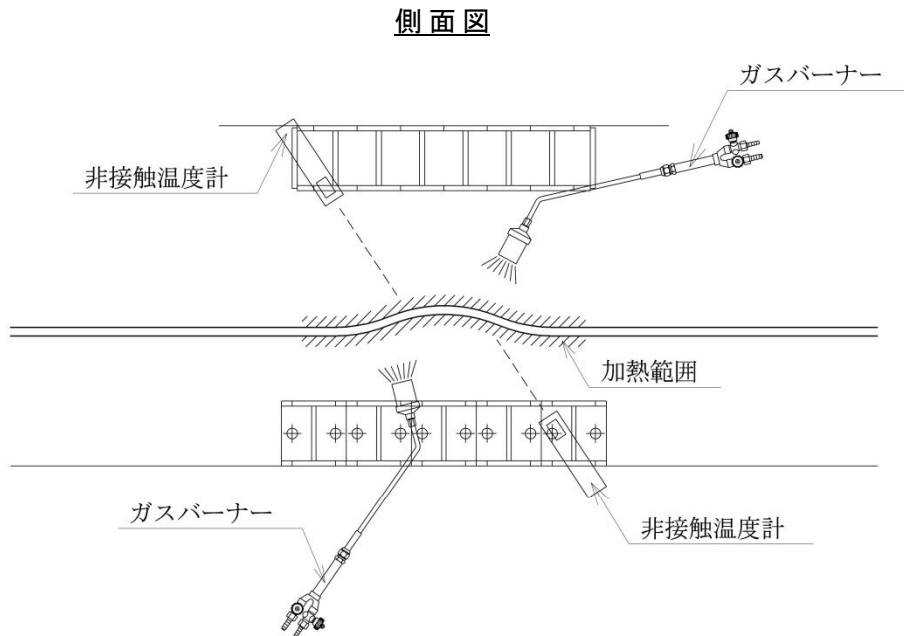
- ・ 加圧ジャッキは変形量を満足するストロークのものを採用する。
- ・ 加圧ジャッキ、受けジャッキのスペースを確認しておく。



参-図-4.1.13 加熱矯正ステップ図（下フランジ補修例）

Step2 : 加熱

- ・変形した部位に均一に行う。板厚の厚いものは板厚中央まで温度が均一になるように両側から加熱する。
- ・加熱温度は非調質鋼の場合は 700℃以下、調質鋼、TMCP 鋼の場合は 630℃以下に抑えて加熱する。

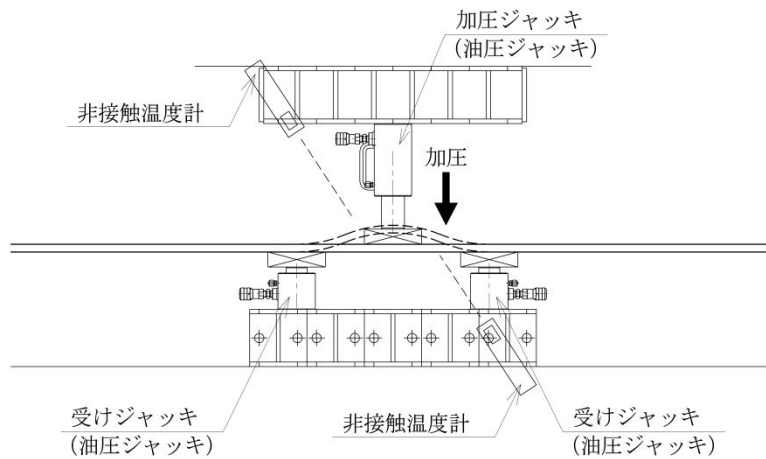


参-図-4. 1. 14 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

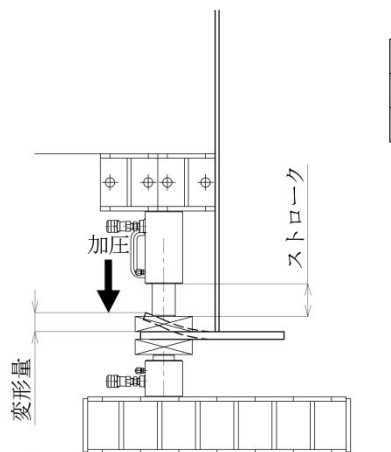
Step3 : ジャッキによる加圧矯正

- 変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正する。
- 400℃を下まわらない範囲で繰り返し行う。

側面図



正面図



温度管理

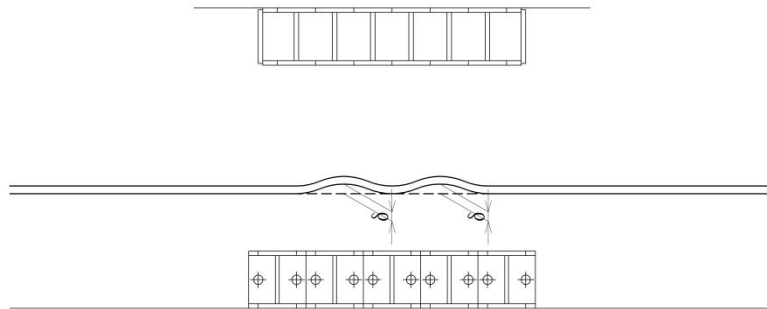
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 15 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

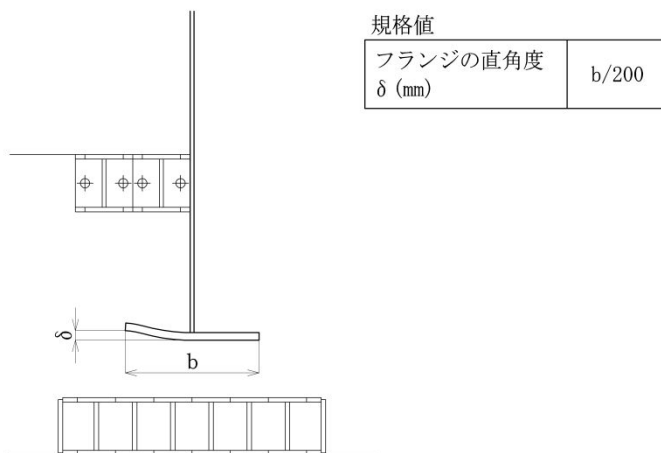
Step4 : 矯正後の形状確認

- ・ 矯正後の形状確認をおこなう。
- ・ 規格値内であれば施工完了、規格値外であれば Step5 へ

側面図



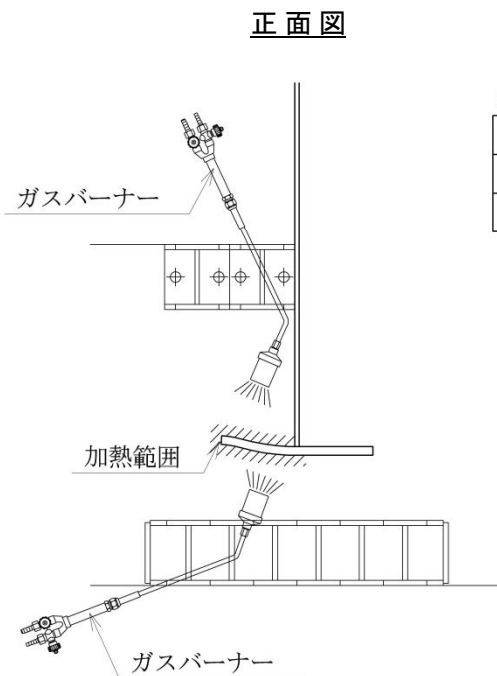
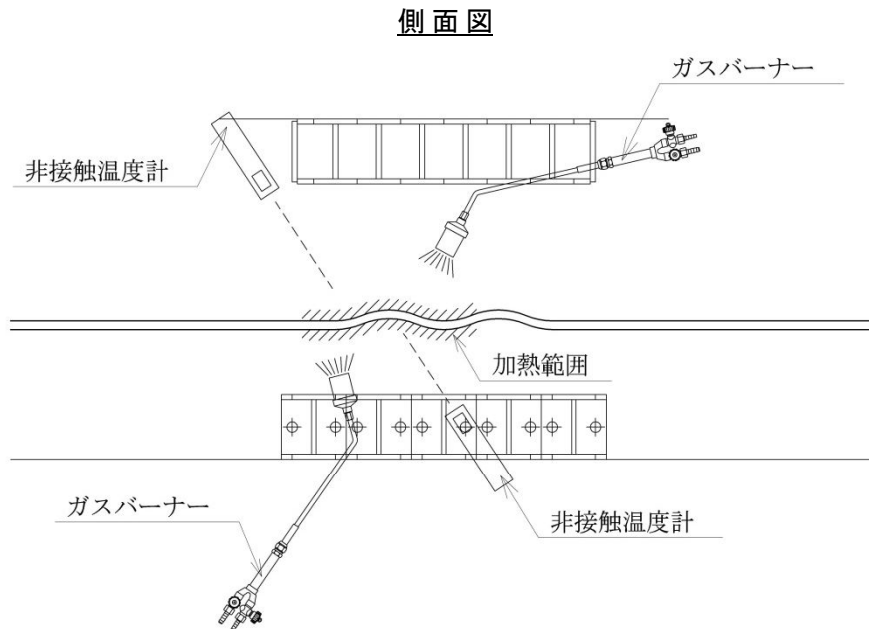
正面図



参-図-4. 1. 16 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

Step5 : 加熱

- ・変形した部位に均一に行う。板厚の厚いものは板厚中央まで温度が均一になるように両側から加熱する。
- ・加熱温度は非調質鋼の場合は 700℃以下、調質鋼、TMCP 鋼の場合は 630℃以下に抑えて加熱する。



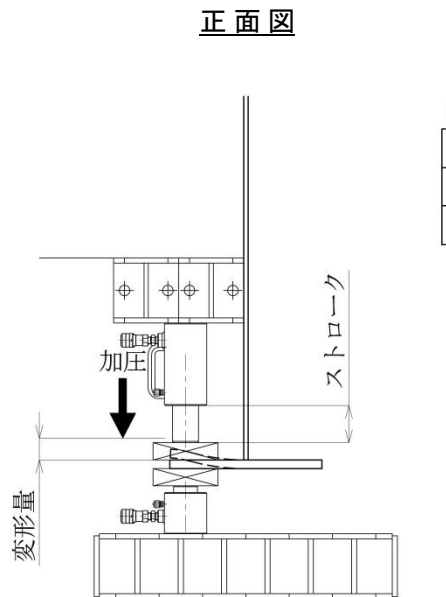
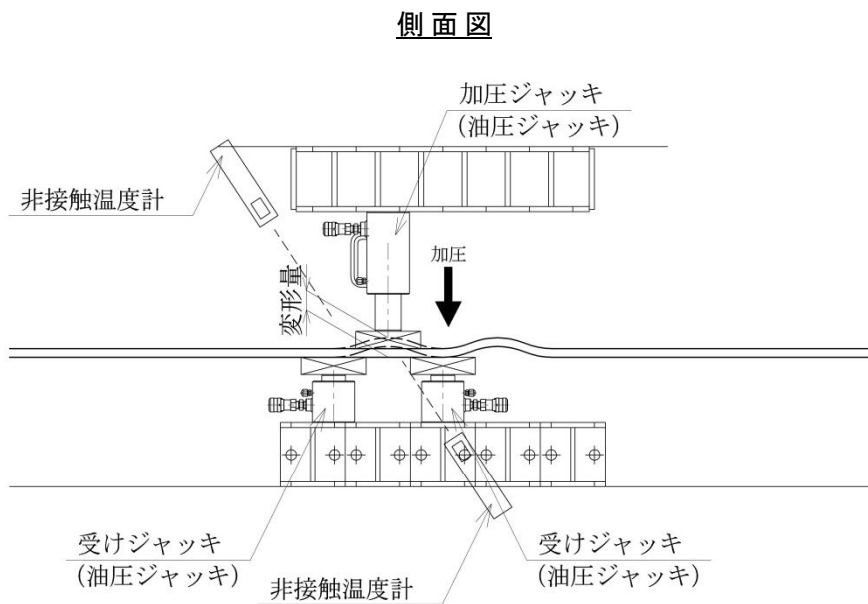
温度管理

非調質鋼	700℃以下
調質鋼	630℃以下
TMCP鋼	630℃以下

参-図-4. 1. 17 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

Step6 : 加圧矯正

- ・変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正する。
- ・400℃を下まわらない範囲で繰り返し行う。



温度管理

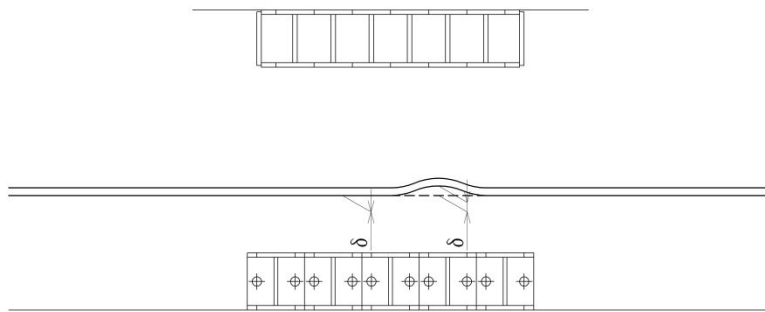
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 18 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

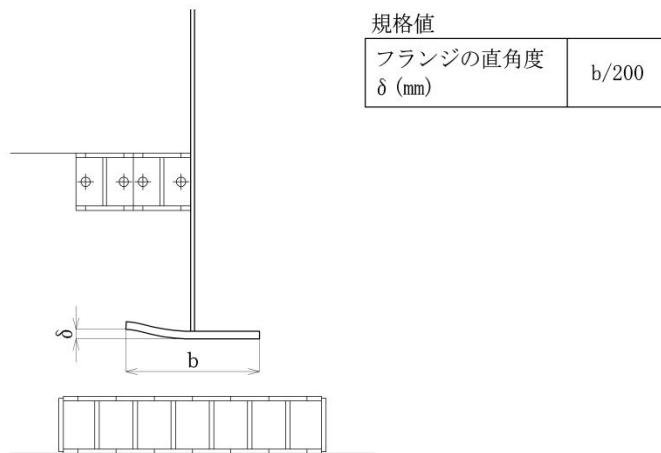
Step7 : 矯正後の形状確認

- ・ 矯正後の形状確認をおこなう。
- ・ 規格値内であれば施工完了、規格値外であれば Step8 へ

側面図



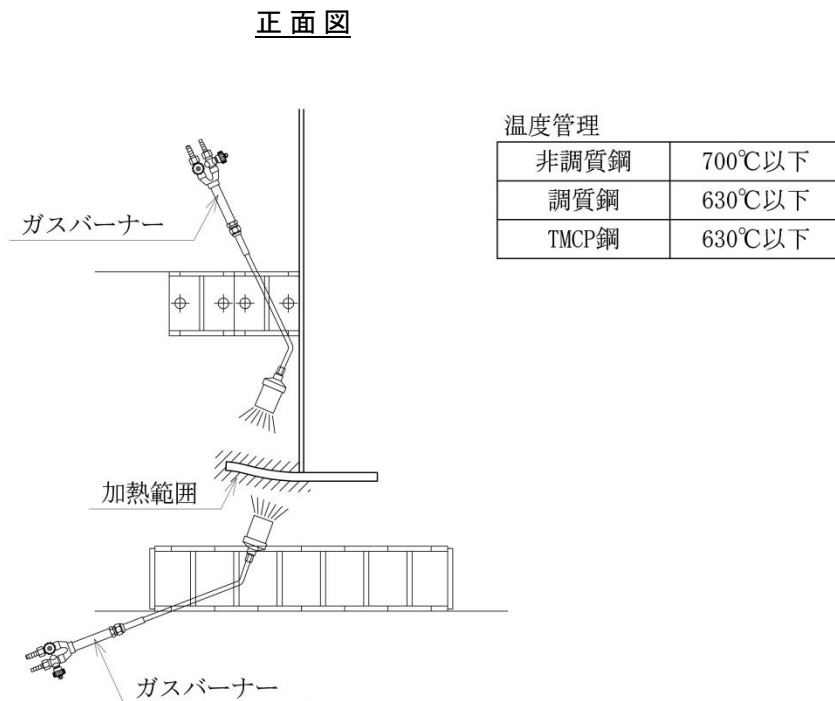
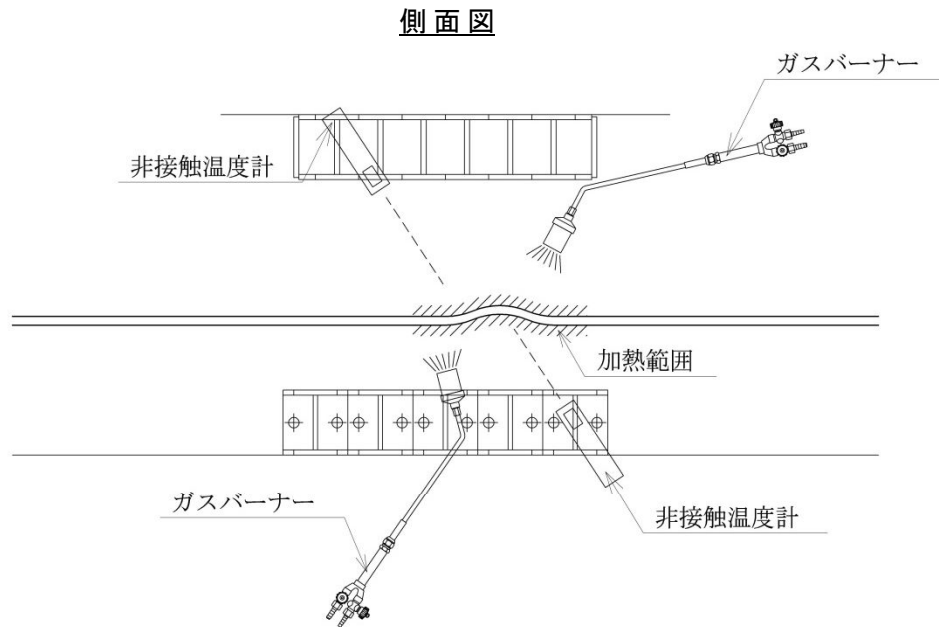
正面図



参-図-4. 1. 19 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

Step8 : 加熱

- ・変形した部位に均一に行う。板厚の厚いものは板厚中央まで温度が均一になるように両側から加熱する。
- ・加熱温度は非調質鋼の場合は 700℃以下、調質鋼、TMCP 鋼の場合は 630℃以下に抑えて加熱する。

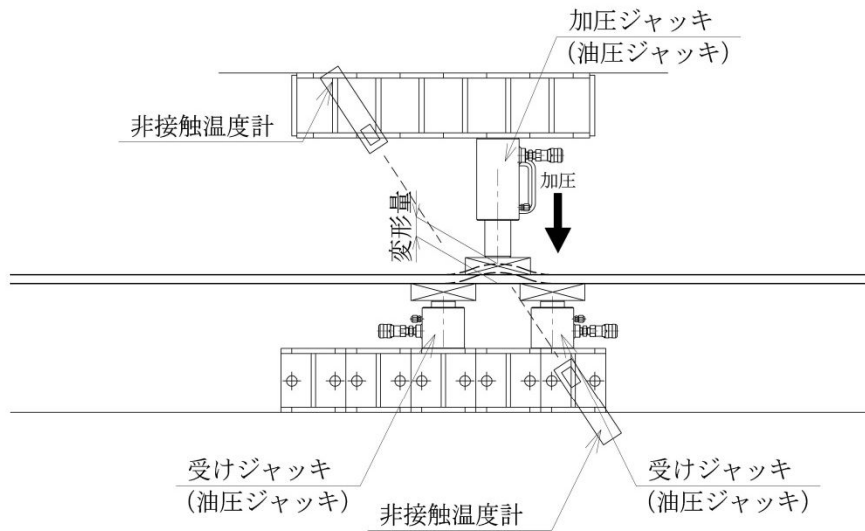


参-図-4. 1. 20 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

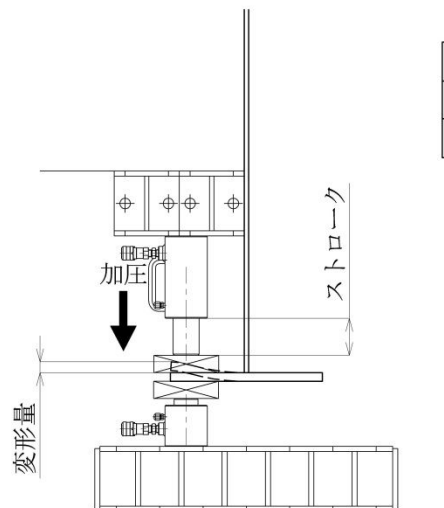
Step9 : 加圧矯正

- ・変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正する。
- ・400℃を下まわらない範囲で繰り返し行う。

側面図



正面図



温度管理

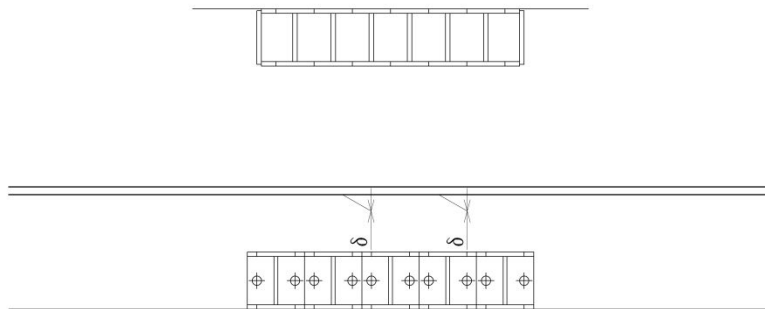
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 21 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

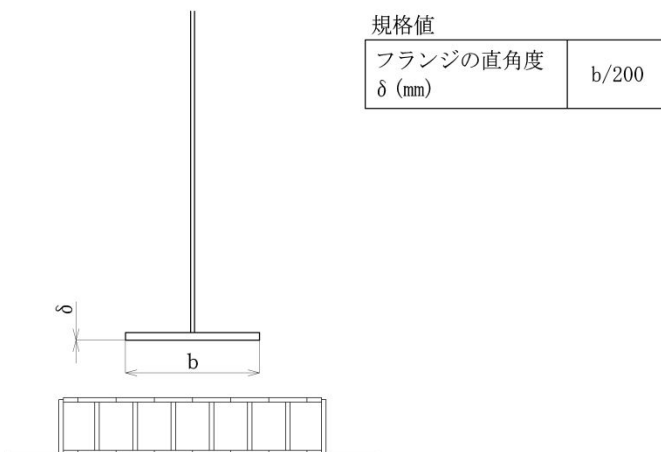
Step10：矯正後の形状確認

- ・矯正後の形状確認をおこなう。
- ・規格値内であれば施工完了、規格値外であれば繰り返し行う。
- ・繰り返し加熱する場合、熱影響度は累積されるため、繰り返し加熱すると予想される場合は、その影響度を小さくするために、1回目の加熱から加熱温度を下げるのが望ましい。

側面図



正面図



参-図-4.1.22 加熱矯正ステップ図（下フランジ補修例）

4.1.5 主要機器

加熱矯正工法に使用する主要機器を参-表-4.1.3 に示す。

参-表-4.1.3 加熱矯正工法に使用する主要機器

機 械 名	使 用 項 目	備 考
ガスバーナー	加熱	酸素・アセチレン混合ガス 酸素・プロパン混合ガス
油圧ジャッキ	死荷重応力除去	安全ロック付きが望ましい
油圧ジャッキ	加圧	
ライナーPL・その他治具	加圧	
温度計測器	温度計測	非接触温度計が望ましい
計測機器	形状計測	アール定規等
磁粉探傷試験機器	非破壊検査	

4.2 品質管理

品質管理項目の一覧表を参-表-4.2.1に示す。

参-表-4.2.1 品質管理項目一覧

管 理 項 目	工 種 ・ 項 目	試験(測定)頻度	規 格 値	備 考
変形箇所の材質	施工前の確認	施工前	—	設計図書、引張試験、小片による引張試験等
変形箇所の内側曲げ半径	施工前の確認	施工前	7t 以上	アール定規等
変形箇所のき裂	磁粉探傷試験	施工前、施工後	あつてはならない	
温度	加熱	加熱時	非調質鋼 表面温度 700℃以下	
			調質鋼 表面温度 630℃以下	
			TMCP 鋼 表面温度 630℃以下	
	加圧	矯正前、矯正時	400℃以上	

4.2.1 変形箇所の材質

非調質鋼、調質鋼、TMCP 鋼によって加熱矯正時の加熱温度の上限が異なるため、変形部の材質を施工前に把握しておく必要がある（材質の特定方法は 2.1.1 参照）。

4.2.2 変形箇所の曲げ半径

加熱矯正が可能な変形量や板厚であることを確認する。なお、変形の内側曲げ半径 7t 以上とする（測定方法は 2.1.8 参照）。内側曲げ半径が 7t 未満の場合は、本編 3 章を参考に実験等で同等のひずみを有する鋼材の加熱矯正後の機械的性質を確認しておく必要がある。

4.2.3 変形箇所のき裂

変形範囲の母材や溶接部にき裂があった場合、加熱矯正によりき裂が拡大する恐れがあるため、工法の選定の前に既に照査を行っていることが前提ではあるが、必要に応じて施工前に磁粉探傷試験にて、き裂の有無を確認しておく。照査にあたっては、文献 9) の 4 章 4.1.1 (5) を参考にすること。特に溶接部は衝突による変形によってき裂が生じやすい部位のため、入念に調査する。また、加熱矯正はジャッキによる加圧を行うため、加熱矯正後にも矯正した周辺の溶接部は磁粉探傷試験にて、き裂の有無を確認する。

4.2.4 温度

温度計測は加熱時、矯正前・矯正時に行い、変形箇所の材質によって適正な管理が必要である。非調質鋼の場合、加熱時は 700℃以下に抑え、矯正時は青熱脆性領域を避けた 400℃以上とする。調質鋼、TMCP 鋼の場合、加熱時は 630℃以下に抑え、矯正時は非調質鋼と同様に 400℃以上とする。矯正を行う際の温度の下限值は 400℃であるが、施工性をよくするため、及び残留ひずみを最小限にするため、できるだけ温度が高いほうがよい。

加熱矯正のプロセスにおいて温度管理は最も重要であり、鋼種に応じた加熱温度や加圧時の温度を計測しながら行うことになる。加熱矯正後の鋼材の機械的性質が確保されていることを保証するためには、温度管理を正しく行ったことを記録に残す必要があり、その管理記録の例を参-表-4.2.2 に示す。

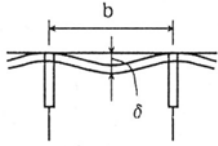
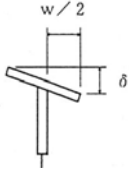
参-表-4.2.2 プロセス管理（温度管理）記録表（例）

橋梁名				施工年月日					
変形箇所		部位		曲げ半径					
		材質		き裂の有無					
項目			温度計測 (°C)		矯正前・後の形状		備考		
					板の平面度 (mm)	フランジの直角度 (mm)			
1 回 目	加熱		開始	—	〇〇mm	〇〇mm	最高温度		
			終了	〇〇°C					
	加 圧	1回目	開始	〇〇°C					
			終了	〇〇°C					
		2回目	開始	〇〇°C					
			終了	〇〇°C					
		回目	開始						
			終了						
		回目	開始						
			終了						
完了	—		〇〇mm	〇〇mm					
2 回 目	加熱		開始	—			最高温度		
			終了						
	加 圧	回目	開始						
			終了						
		回目	開始						
			終了						
		回目	開始						
			終了						
		回目	開始						
			終了						
完了	—								
規格値		非調質鋼		調質鋼		TMCP鋼			
		加熱時上限温度		700°C以下		630°C以下		630°C以下	
		加圧時下限温度		400°C以上		400°C以上		400°C以上	
記事									

4.3 出来形管理

管理値設定の考え方の例を示す。既設桁の衝突による変形は、橋の機能に影響しない形状に補修すればよいが、その形状は現時点では不明であり、変形部位ごとに形状の規格値を設定することは難しい。道路橋示方書では製作時の部材精度を規定しており、損傷部を製作時の部材精度の許容誤差以内（参-表-4.3.1）とすれば、橋の機能に影響ないとする考え方がある。

参-表-4.3.1 加熱矯正後の規格値

項 目		許 容 誤 差 (mm)	備 考	測 定 方 法
板の平面度 δ (mm)	鋼桁及びトラス等の 部材の腹板	$h/250$	h : 腹板(mm)	
	箱桁及びトラス等の フランジ, 鋼床版の デッキプレート	$w/150$	w : 腹板またはリブ の間隔(mm)	
フランジの直角度 δ (mm)		$b/200$	b : フランジ幅(mm)	

また、加熱矯正は、事前に変形量を調査し、必要な設備が配置できるか、設定した規格値以内に補修できるか十分検討することが重要である。しかし、実作業において、不測の事態で設定した規格値以内に補修できないことも考えられ、補修計画の段階でその対応についても検討しておく必要がある。例えば、変形量や板厚等により、鋼種に応じた加熱温度では規格値内に補修できない場合は、加熱温度を900℃まで上げて加熱矯正を行うことが考えられる。この場合、鋼材の機械的性質が低下するので、予め当て板補強の計画を行っておくなどの対応が必要である。

1～4の参考文献

- 1) (公社)土木学会：鋼構造シリーズ 24 火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン，2015. 7
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査，国総研資料第 710 号，2012. 12
- 3) 首都高速道路（株）：高速 3 号渋谷線高架下火災による損傷度調査結果及び恒久復旧方法，HP，2014. 4
- 4) 長大橋技術研究会：鋼橋架設資料，2000. 8
- 5) (公社) 土木学会：鋼構造架設設計施工指針【2012 年版】，2012. 3
- 6) 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，2008. 3
- 7) (一社) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2013 年度版
- 8) (公社) 土木学会：鋼構造シリーズ 2 座屈設計ガイドライン，1987. 10
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：塑性変形した鋼橋の部材矯正に用いる熱間加工に関する研究，国総研資料第 1108 号，2020. 4