

ISSN 1346-7328
国総研資料第1108号
令和2年4月

国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書

Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management,

No.1108

April 2020

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

国土交通省 国土技術政策総合研究所

一般社団法人 日本橋梁建設協会

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

国土交通省 国土技術政策総合研究所

一般社団法人 日本橋梁建設協会

概要

鋼道路橋では、工場製作時の部材寸法精度の確保や、既設橋の通行車両の衝突等による変形の補修において、その矯正方法のひとつとして熱間加工がある。熱間加工は、鋼材を加熱して矯正する加工方法であり、適切に行われないと加熱による鋼材の機械的性質の変化から鋼道路橋全体の耐荷力への影響が生じる可能性がある。道路橋示方書では熱間加工が規定されているが、詳細な施工方法や鋼道路橋の品質への影響は明らかにされていない。

本報告書は、熱間加工が鋼材の機械的性質に及ぼす影響について検討を行い、成果をまとめたものである。

キーワード：鋼部材，鋼橋，熱間加工，加熱矯正，補修

Study on hot working for the remedial work of steel bridge

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

Japan Association of Steel Bridge Construction

Synopsis

Hot working is one of the processing methods to correct the deformation of steel members by heating. Heat can affect the mechanical property of steel and hot working should be carefully controlled. However, the knowledge on the quality assurance protocol on the hot working has not been put together in a systematic manner. This report summarizes the knowledge for bridge maintenance engineers to acquire the knowledge of hot working for correcting the residual deformation of steel members in existing bridges.

Key Words : Steel members , steel bridges , Hot working , Heating correction , Repair

共同研究参加機関および担当者名簿

(令和2年 3月現在 順不同)

【実施期間】平成26年4月～平成29年3月

国土交通省 国土技術政策総合研究所

道路構造物研究部 橋梁研究室

玉越 隆史 (～平成28年3月)

星隈 順一 (平成28年4月～)

白戸 真大

横井 芳輝 (～平成27年3月)

岡田 紗也加 (平成27年4月～)

河野 晴彦 (平成27年4月～)

一般社団法人 日本橋梁建設協会

瀬田 真

福島 道人

塚狭 研治

王 慶雲

村上 貴紀

執筆担当者

国土交通省 国土技術政策総合研究所

道路構造物研究部 橋梁研究室

白戸 真大

河野 晴彦

大西 諒

高山 文郷

鈴木 克弥

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

目 次

第1章 研究概要

1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の内容と体制	1
1.2.1 研究の内容	1
1.2.2 研究の体制	2
1.3 用語の定義	2
1.4 報告書の構成	3

第2章 熱と鋼材の関係

2.1 鋼橋に使われる鋼材の変遷	4
2.1.1 鋼材の歴史的変遷	4
2.1.2 鋼材の規格の変遷	5
2.1.3 鋼道路橋の技術基準の変遷	18
2.2 鋼材の温度履歴の機械的性質	22
2.2.1 熱履歴を受けた鋼材の機械的性質	22
2.2.2 線状加熱による鋼材の機械的性質への影響	26
2.2.3 熱間加工による鋼材の機械的性質への影響	27
2.2.4 冷間加工による鋼材の機械的性質への影響	28

第3章 塑性変形を熱間加工した鋼材の機械的性質及び組織への影響の確認

3.1 試験概要	31
3.2 試験方法	32
3.2.1 試験体	32
3.2.2 冷間曲げ加工	33
3.2.3 熱間加工	35
3.2.4 冷間加工による曲げ戻し	37
3.2.5 時効促進処理	37
3.3 金属材料試験の種類と試験片の採取要領	38
3.4 試験結果	40
3.4.1 引張試験結果 (JIS Z 2241 : 5号試験片)	40
3.4.2 衝撃試験結果 (JIS Z 2242 : Vノッチ試験片)	43
3.4.3 金属組織試験結果	49
3.4.4 硬さ試験結果 (JIS Z 2244 : 硬さ記号 HV10)	51

第4章 加熱矯正による補修事例と考察

4.1 下フランジの変形に対する補修事例	54
4.1.1 損傷および補修事例概要	54
4.1.2 補修事例に対する考察	58
4.2 ウェブの変形に対する補修事例	59
4.2.1 損傷および補修事例概要	59
4.2.2 補修事例に対する考察	61
第5章 まとめ	62

塑性変形した鋼橋の矯正にかかわる参考資料（案）

1. 適用の範囲	参-1
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	参-2
2.1 塑性変形した鋼橋の調査	参-2
2.1.1 使用鋼材の特性の調査	参-5
2.1.2 交差条件と周辺環境の調査	参-5
2.1.3 ベントやジャッキの設置に関する調査	参-6
2.1.4 ジャッキ反力を負担する部材の調査	参-6
2.1.5 損傷状況の記録	参-7
2.1.6 局部変形量の調査	参-7
2.1.7 破断・き裂の調査	参-8
2.1.8 塑性ひずみ量の把握	参-8
2.1.9 補修の要否の判断	参-9
2.2 変形部材の健全性の評価	参-10
2.2.1 局部健全性の評価	参-10
2.2.2 部材残存性能の評価（断面欠損法）	参-11
2.2.3 全体健全性の評価	参-12
3. 補修工法の種類と選定にあたっての留意点	参-14
3.1 各補修工法の特徴	参-14
3.1.1 加熱矯正工法（温度管理型）	参-15
3.1.2 加熱矯正（非温度管理型）+あて板工法	参-16
3.1.3 材片の取替工法	参-18
3.1.4 部材追加工法	参-21
3.2 加熱矯正の適用性に関する参考資料	参-24
3.2.1 一般的な補修工法の選定フロー（主要部材）	参-24
3.2.2 一般的な補修工法の選定フロー（二次部材・付属物）	参-26
3.2.3 補修工法の選定条件	参-26

4. 加熱矯正工法の施工とその留意点	参-29
4.1 加熱矯正工法の手順	参-29
4.1.1 加熱矯正工法を行うにあたっての留意点	参-29
4.1.2 施工フロー	参-31
4.1.3 死荷重応力負担設備の設置	参-32
4.1.4 加熱矯正	参-39
4.1.5 主要機器	参-55
4.2 品質管理	参-56
4.2.1 変形箇所の材質	参-56
4.2.2 変形箇所の曲げ半径	参-56
4.2.3 変形箇所のき裂	参-56
4.2.4 温度	参-57
4.3 出来形管理	参-59

第1章 研究概要

1.1 研究の背景と目的

既設の鋼橋において、供用時に通行車両（船舶）の衝突や地震・風といった外力により部材に変形が生じる事象は少なくない。この変形が、橋の耐荷力に影響を及ぼす可能性が高い場合は、速やかに補修することが必要となる。様々な変形形状で、なおかつ現地条件も多種多様であるため、補修の方法について慎重に調査、検討を進める必要があるが、調査から補修までのプロセスをまとめた資料は少なく、各道路管理者や施工者がその都度、試行錯誤しながら検討・実施しているのが実態である。

桁の変形を補修する方法として、一般的には、常温でジャッキ等により外力を加えての矯正（冷間）や線状加熱矯正が行われている。しかし、変形が大きい場合や板厚が大きい場合には、これらの方法では補修しきれず、そのときに用いられる方法の1つとして、熱間加工（鋼材を熱した加熱状態でのジャッキ等により外力を加えての矯正）がある。しかし、これは適切に行われないと加熱による鋼材の機械的性質への影響から鋼道路橋全体の耐荷力への影響が生じる可能性がある。新たに部材を製作する過程では他の方法を選択することができるため当然熱間加工を避けることが可能であるが、既設橋梁の部材の補修については、様々な現地の条件と補修行為が橋に与える影響を比較したうえで、熱間加工を選ぶことが最も良い場合も想定される。

本共同研究では、既設橋を対象に、熱間加工の適用性や適用にあたっての留意事項をとりまとめるために、実験により鋼材の種別ごとに熱間加工（加熱温度、加工温度）による機械的性質（強度、靱性）への影響を明らかにした。また参考資料として、本共同研究で得られた結果や過去の事例を踏まえ、熱間加工を行う場合の留意点をまとめた。

1.2 研究の内容と体制

1.2.1 研究の内容

本共同研究は、熱間加工に関する要求性能や管理項目等を明確化するために、以下の項目に関する検討を行っている。

① 熱間加工による鋼材の材質変化に関する検討

実施工に基づいた加熱による鋼材の機械的性質や耐荷力への影響、及び矯正レベル（残留変形）による鋼部材の耐荷力への影響を把握する。

② 熱間加工の施工方法に関する検討

具体的な施工方法及び施工計画時からの留意点を把握する。

③ 設計・施工要領の確立に向けた検討

設計・施工の各段階における具体的な要求性能や管理項目の確立に向けて、熱間加工の手法、熱間加工後の耐荷力評価、補修補強設計、検査項目を検討・整理する。

1.2.2 研究の体制

本共同研究の体制は、国土技術政策総合研究所と熱間加工を含めた鋼道路橋の工場製作及び熱間加工による補修工事の施工実績を有する橋梁建設会社が所属する（一社）日本橋梁建設協会によるものである。

1.3 用語の定義

① 熱間加工

鋼材を再結晶温度以上の高温に加熱して加工することをいう。ジャッキ等により外力を加える加熱矯正も熱間加工に含まれる。

② 冷間加工

鋼材を常温で加工することをいう。

③ 線状加熱

鋼材の局所的な変形を、鋼材表面近傍をガス加熱炎で線状に加熱して矯正することをいう。ジャッキ等による外力を加えることなく、鋼の加熱・冷却による収縮を利用して矯正する。

④ 加熱矯正

鋼材の局所的な変形を、ガス加熱炎で加熱したのちに、ジャッキ等により外力を加えて矯正することをいう。

⑤ 赤熱脆性

熱間加工の温度範囲で鋼材がもろくなる性質のことをいう。

⑥ 青熱脆性

150～400℃付近で塑性変形しようとする時、引張強さ、硬さが常温の場合より増加し、伸び、絞り低下してもろくなる性質のことをいう。

⑦ ひずみ時効脆化

鋼材に曲げ加工を施し塑性ひずみを与えると硬化し、これに伴ってじん性も低下する現象のことをいう。硬化及びじん性の低下は時間の経過とともに進行する。

⑧ 時効促進処理

鋼材に温度を与え、ひずみ時効脆化を促進させることをいう。

⑨ 遷移温度

鋼材は低温になるとじん性を失い、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー（衝撃値）が急激に低下し脆性破断する。この時の脆性破面率が 50%となる温度のことをいう（脆性破面率が 50%になるシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが急激に変化する温度のことをいう）。

1.4 報告書の構成

本報告書は、塑性変形した既設の鋼道路橋の鋼部材を熱間加工により矯正する場合に関してまとめたもので、熱と鋼材の関係を調査した結果と、塑性変形した鋼材を加熱矯正した場合の鋼材の機械的性質及び組織への影響について試験を行い確認した結果を以下の構成で示した。さらに、加熱矯正を用いた補修事例等から実務で考慮すべき事項を抽出し、一般的なナレッジとなるように考察した。

また、実務での使用を考慮し、参考資料として以下の結果やナレッジを共有、活用しやすくするためにマニュアル化を試みたものを参考資料として付し、塑性変形した鋼道路橋の調査と健全性評価、補修工法の選定と特徴、加熱矯正の施工に分けてまとめた。参考資料は、道路管理者が個別の案件で参考にできることを意図としているものの、基準のごとく扱われることは意図しておらず、これによらねばならない、またはよりさえずればよいというような使われ方は想定していない。活用にあたっての位置づけなどの取り扱いは個々の道路管理者にて定めるべきものであることに留意されたい。

第1章 研究概要

第2章 熱と鋼材の関係

第3章 塑性変形を熱間加工した鋼材の機械的性質及び組織への影響の確認

第4章 加熱矯正による補修事例

参考資料

塑性変形した鋼橋の矯正にかかわる参考資料（案）

- 1 適用の範囲
- 2 塑性変形した鋼橋の補修工法選定のための調査の留意点
- 3 補修工法の種類と選定にあたっての留意点
- 4 加熱矯正工法の施工とその留意点

第2章 熱と鋼材の関係

2.1 鋼橋に使われる鋼材の変遷

既設橋の損傷の補修では、古い年代の鋼材を対象に熱間加工や線状加熱を行うことも考えられるため、補修計画にあたってはその当時の鋼材の特徴を知っておくべきである。そこで、鋼材の歴史的変遷、規格の変遷及び鋼道路橋の技術基準の変遷を以下に示す。

2.1.1 鋼材の歴史的変遷

世界最古の鉄製橋梁は、1779年に建設されたイギリスのアイアンブリッジと言われている。当時は、構造用材料として鑄鉄や錬鉄が多く使用されており^{2.1)}アイアンブリッジでも鑄鉄が使用されていた。1855年にベッセマー法（転炉による製鋼）が開発され、1877年にはトーマス法（内壁に塩基性の耐火材を用いた転炉による製鋼）の開発により脱リンが可能となったことから、鉄鋼の生産量が飛躍的に伸びた^{2.2)}。このような背景のもと、1874年に最初の鋼橋であるイーズ橋が建設された^{2.2)}。わが国においては、1868年（明治元年）に錬鉄を使用した桁を輸入し、日本で最初の鉄製橋梁である長崎のくろがね橋の他、吉田橋、高麗橋、新町橋などが建設された^{2.1)}。わが国初の国産化の鉄製橋梁は、1878年（明治11年）に建設された八幡橋であり、アーチ材は鑄鉄製、引張材は錬鉄製の鑄錬混合である^{2.1)}。日本最古の鑄鉄を使用した橋梁は、1885年（明治18年）に建設された神子畑鑄鉄橋であり、同橋は、同時期に建設された羽瀨鑄鉄橋とともに現在もその姿を留めている^{2.1)}。圧延鋼を使用したわが国初の鋼橋は、1888年（明治21年）に建設された天竜川橋梁（鉄道橋）とされ、道路橋では旧永代橋が1897年（明治30年）に建設された^{2.1)}。

鑄鉄は、鉄と炭素を主成分とし、一般に2.14%以上の炭素とその他の成分を含むものを呼ぶ。鑄鉄の種類として、ねずみ鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄、可鍛鑄鉄、合金鑄鉄、白鑄鉄などがある。鑄鉄は、主として圧縮力が作用するアーチ構造で広く用いられてきたが、材質が脆弱であることから引張力の作用する一般的な橋梁用材料としては不適當であった^{2.1)}。

錬鉄とは、パドル法という精錬法（溶融銑鉄の炉中攪拌による精錬法）により製造された、炭素（C）、硫黄（S）、リン（P）等の含有量が少ない鉄のことである。鑄鉄に比べ、構造用材料として重要なじん性が改善された。初期の錬鉄は不純物が多く純度の低いものであったが、反射炉の構造と規模が改良されて、純度が高い錬鉄が製造されるようになった^{2.1)}。

鋼は、0.2%程度の炭素と合金元素を添加した合金で、錬鉄に比べて粘り強い。鑄鉄から錬鉄へと進歩を遂げた構造用材料がさらに鋼へと技術革新が進む過程には、ベッセマーによる転炉法の発明に代表される製鋼技術の進歩があり、近年、LD転炉（酸素吹上転炉）、溶銑予備処理技術、連続鑄造技術などにより、不純物が少なく、じん性が高い鋼が製造されるようになった。図-2.1.1に鋼材の製鋼法の変遷を示す。

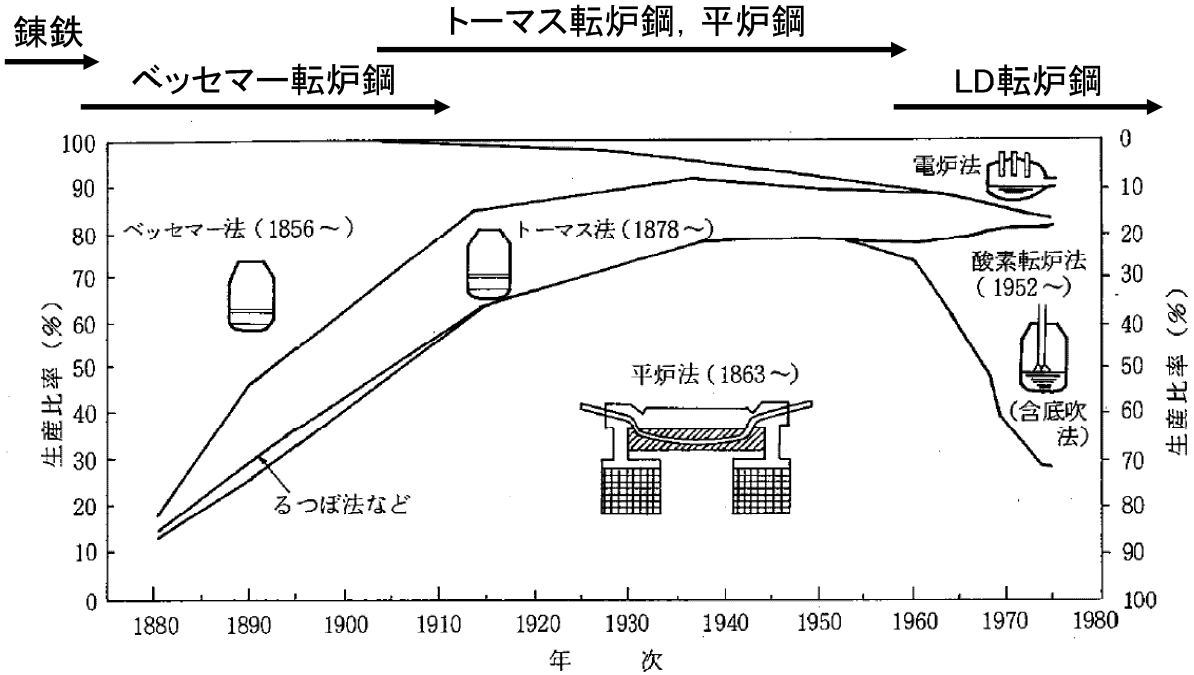


図-2.1.1 世界の鋼の総生産高に対する製鋼法別比率の時代による変化^{2.3)}

2.1.2 鋼材の規格の変遷

わが国における鋼材の規格化は、1925年(大正14年)に制定された日本標準規格 JES (Japanese Engineering Standard) が始まりである^{2.2)}。それ以前は、前述したように鑄鉄や錬鉄、1800年代後半から鋼材が使用されたが、規格化はされていない。1952年(昭和27年)に JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」(SS材)及び JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(SM材)が制定され、SM材には Mn/C の比を 2.5 以上として溶接性を重視した SM41W が追加された^{2.2)}。その後、SM材は化学成分や衝撃値が規定され、1970年代には連続鑄造技術や溶銑予備処理技術の実用化、1980年代には熱加工制御技術(TMCP)の導入など製鋼技術の躍進により、じん性や板厚方向特性(板厚方向に引張力を受ける場合の耐ラメラテア性能)が向上した。これらのことから、鋼材を次の3つの時代に区分することができる。

- 第1期 1952年以前： JIS 制定前
- 第2期 1952年～1970年代： JIS 制定後
- 第3期 1980年代以降： 製鋼技術の躍進により高純化

なお、文献2.2)では、鉄鋼の溶接性を基準にした材質面から次の3つの時代に区分できるとしている。

- 第1世代 1952年以前： 高C・低Mn鋼が使用され、溶接性が劣る。
- 第2世代 1952年から1970年代： Mn/Cが2.5以上となり、溶接性が改善された。
- 第3世代 1980年代以降： 高純化が進み、板厚方向特性(耐ラメラテア性能)が向上した。

(1) JIS 制定前の鋼材 (第 1 期 1952 年以前)

第 1 期 (1952 年以前) の JIS 制定前の鋼材 (ここでは、鋳鉄、錬鉄等も含めて鋼材という) を使用した橋梁は数多く健在しているが、JIS 制定前の鋼材の特性について記述されている資料は少ない。損傷の補修にあたっては、その当時の鋼材における熱間加工や線状加熱のような熱履歴を受けた場合の鋼材の特性への影響について把握して補修計画を行う必要がある。文献 2.2) に、鉄道橋で使用した JIS 制定前の鋼材の性質について整理されおり、以下に引用して示す。

これより、文献 2.2) より引用 図表名、文献名はカッコ内が原文

鋼材の規格制定は、1925 年 (大正 14 年) の JIS であるが、これ以前の鋼材について、橋梁に主として使用したものを年代別に区分すると以下のようなになる。

- ①1770～1850 年：鋳鉄橋 (鉄道橋では製作されていない)
- ②1850～1880 年：錬鉄橋
- ③1880～1896 年：錬鉄・鋼併用橋
- ④1895～1910 年：鋼橋 (主としてベッセマー鋼)
- ⑤1910 年以降：鋼橋

1895 年以降は鋼材が用いられているが、1910 年頃までは主としてベッセマー鋼が使用されており、それ以降は現在とほぼ同材質と考えられる鋼材が使用されている。JIS 制定前の鋼材の材質について記述されている資料は極めて少ない。特に、当時の資料で現存しているものはほぼ皆無の状態である。そこで、当時製作された橋梁から鋼材を採取し、その成分等を調査した結果が報告されている文献を参考に、JIS 制定前の鋼材の性質について記述することとする。ここで紹介する鋼材は、1920 年以前に製作され、60 年以上供用された鋼鉄道橋で撤去する必要が生じた橋梁から採取したものである。(表-2.2) 表-2.1.1 に採取した鋼材の化学成分の分析結果について、橋梁の製作年度や採取位置等を含めて示す。この表より以下の傾向が認められる。

- ・1900 年以前の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が A 及び B) は、ほとんどが C 量が 0.005% 以下、Mn が 0.02～0.06% と異常に低いのに対し、Si が 0.10～0.16%、P が 0.38～0.49% と異常に多い。これらは、成分的にも、製作時期からも錬鉄であると判断できる。
- ・1910 年頃の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が C 及び D) では、現行の溶接構造用鋼材と比較して、Si が非常に少なく、また P、S が非常に多い。そのため、これらの鋼材については溶接は避けるのがよいと考えられる。
- ・1915 年以降の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が E 及び F) については、1910 年以前のものと比較すると P、S が少ない。成分から判断すると溶接も可能であると考えられる。

また、(表-2.2) 表-2.1.1 の右欄には、炭素当量 C_{eq} 及び溶接割れ感受性組成 P_{CM} を示している。ただし、算定に必要な全成分を調査していないものが多いため、参考値として載せている (表中の斜体)。1920 年

頃の鋼材でも C_{eq} 、 P_{CM} ともに高い値を示しており、これらから判断すると溶接には不向きと考えられる。なお、ここで注意が必要なのが、 C_{eq} 、 P_{CM} の算定に P、S が含まれないことである。JES 制定前の鋼材では P、S が多く含まれているものがあり、溶接性の判断指標に C_{eq} 、 P_{CM} のみを用いることは不適切であると考えられる。さらに、これらの鋼材を用いて引張試験や衝撃試験も実施しており、結果を(表-2.3)表-2.1.2、(表-2.4)表-2.1.3 に示す。これらの表より認められる傾向を以下に列挙する。

- ・1900 年以前の鋼材は、現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の引張強度 400MPa より低い値となっており、また伸びも異常に小さい。
- ・1907 年の鋼材については、現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の規格をわずかに下回るものはあるものの、ほぼ満足している。
- ・1910 年以降の鋼材については、ほぼ現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の規格を満足している。
- ・衝撃値に関しては全般的にかなり小さく、試験温度 20°C においても現行の規定を満足していないものが多い。

なお、鉄道では、これらの調査結果を基に、(文献5)文献2.4)に、(表-2.5)表-2.1.4 に示す古い鋼材に対する加工上の注意点が記述されている。

(表-2.2)表-2.1.1 規格制定前の鋼材の成分分析結果の例(2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Ti	B	Nb	O	N	H	C _{eq} *3	P _{CM} *4
A1	1866年頃 (103年程度)	上落プレート ガーダー	主桁(腹板)	0.005	0.16	0.03	0.493	0.025					0.04								0.017	0.014
B1			主桁(腹板)	0.162	0.01	0.52	0.057	0.104					0.03								0.249	0.190
B2	1897年頃 (92年程度)	上落プレート ガーダー	主桁(補剛材山形鋼)	0.005	0.11	0.06	0.424	0.025					0.05								0.020	0.014
B3			主桁(支材山形鋼)	0.004	0.10	0.02	0.378	0.073					0.05								0.012	0.011
C1			上弦材(薄形鋼)	0.140	0.015	0.42	0.032	0.053				0.008						0.0161			0.211	0.162
C2	1907年 (82年)	下路トラス	上弦材(上フランジ板)	0.310	0.010	0.50	0.024	0.030				0.006						0.0102			0.394	0.335
C3			斜材(アイバー)	0.260	0.021	0.51	0.009	0.026				0.017						0.0106			0.346	0.286
C4			縦桁(下フランジ山形鋼)	0.220	0.005	0.57	0.013	0.032				0.002						0.0104			0.315	0.249
D1			縦桁(腹板)	0.095	0.007	0.46	0.034	0.087				0.001						0.0287			0.172	0.118
D2	1907年 (82年)	上落プレート ガーダー	横桁(腹板)	0.26	0.009	0.53	0.028	0.066				0.004						0.0092			0.349	0.287
D3			主桁(腹板)	0.095	0.007	0.46	0.034	0.087				0.001						0.0287			0.172	0.118
E1			主桁(腹板)	0.22	0.04	0.43	0.006	0.036													0.293	0.243
E2			主桁(補剛材山形鋼)	0.20	0.04	0.54	0.009	0.036													0.292	0.228
E3	1917年 (82年)	上落プレート ガーダー	主桁(フランジカバプレート)	0.19	0.04	0.55	0.038	0.041													0.283	0.219
E4			"	0.25	0.02	0.38	0.008	0.030													0.314	0.270
E5			"	0.16	0.02	0.62	0.035	0.036													0.264	0.192
F1			縦桁(腹板)	0.25	0.02	0.38	0.008	0.030													0.314	0.270
F2			縦桁(フランジ山形鋼)	0.24	0.017	0.50	0.006	0.065	0.006	0.007	<0.01	0.005	0.007	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.0077	0.0038	0.0004	0.326	0.266
F3			" [溶金*1]	0.10	0.55	1.00	0.005	0.010	0.016	0.018	<0.01	0.001	0.010	<0.005	0.019	0.0002	<0.003	0.0103		0.294	0.171	
F4			"	0.28	0.046	0.50	0.004	0.037	0.005	0.012	<0.01	0.007	0.011	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.010	0.0108	0.0006	0.368	0.308
F5	1919年 (70年)	上落トラス	" [溶金*1]	0.12	0.52	0.95	0.006	0.008	0.014	0.018	<0.01	0.001	0.011	<0.005	0.020	0.0002	<0.003		0.0054		0.304	0.188
F6			"	0.27	0.046	0.49	0.003	0.035	0.005	0.013	<0.01	0.008	0.011	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.010	0.0004		0.356	0.297
F7			"	0.16	0.02	0.62	0.035	0.036													0.264	0.192

注) *1 溶金：溶接金属

*2 表中の空欄は測定結果なし。

*3 炭素当量：C_{eq}=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

*4 溶接割れ感受性指数：P_{CM}=C+Si/20+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

*5 C_{eq}、P_{CM}の数値の斜体は、算定に用いる成分の分析結果がないため参考値を示す。

(表-2.3)表-2.1.2 規格制定前の鋼材の機械的性質の例 2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	曲げ 試験	備考
A1	1886年頃 (103年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	-	310	0.8	-	
B1	1897年頃 (92年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	317	445	24.8	-	
B2			主桁 (補剛材山形鋼)	276	350	5.3	-	
B3			主桁 (支材山形鋼)	224	356	-	-	
C1	1907年 (82年)	下路トラス	上弦材 (溝形鋼)	254	393	30.7	良	
C2			上弦材 (上フランジ板)	257	450	27.8	良	
C3			斜材 (アイバー)	287	461	26.6	良	
C4			縦桁 (下フランジ山形鋼)	259	403	28.4	良	
C5			縦桁 (腹板)	265	464	22.3	良	
C6			横桁 (腹板)	273	427	30.2	良	
D1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	261	373	29.2	良	
D2			主桁 (補剛材山形鋼)	294	460	27.3	良	
E1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (ソールプレート板)	215	359	32.5	良	
F1	1917年 (72年)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	290	447	27.0	-	
F2				297	467	4.3	-	孔明き材
F3				310	480	3.0	-	新規孔明き材
F4			主桁 (フランジ山形鋼)	263	427	29.3	-	
F5				327	483	4.0	-	孔明き材
F6				330	463	3.0	-	新規孔明き材
G1	1919年 (70年)	上路トラス	縦桁 (腹板)	250	430	40.3	-	
G2			縦桁 (フランジ山形鋼)	297	483	25.7	-	

(表-2.4)表-2.1.3 規格制定前の鋼材の衝撃値の例 2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	ノッチ位置	方向	試験温度 (°C) *1							vTrs*2 (°C)	備考		
						-40	-20	0	20	40	60	80			100	
A1	1886年頃 (103年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	母材			3.9	4.9	5.9						7.5mmサブサイズ*3	
B1	1897年頃 (92年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	"			8.8	18.6	48.1						"	
B2			"	"			9.8	26.5	57.9						"	
B3			主桁 (支材山形鋼)	"			6.9	12.8	19.6							"
C1	1907年 (82年)	下路トラス	斜材 (アイバー)	アイバー短縮部		3.9	3.9									
C2			"	母材		2.0	3.9									
D1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (補剛材山形鋼)	"		2.0	3.9	8.8							7.5mmサブサイズ*3	
D2			主桁 (腹板)	"		2.9	9.8	34.3								"
E1	1919年 (70年)	上路トラス	縦桁 (フランジ山形鋼)	"	L		5.9		26.5	54.0	85.3	87.3	96.1	30.4		
E2			"	"	C		3.9		17.7	27.5	32.4	29.4	30.4	27.0		
E3			"	Bond		8.8	16.7	34.3	40.2		52.0				0.0	
E4			"	Bondより1mm		12.8	14.7	22.6	32.4		38.3				-1.8	
E5			"	Bondより3mm		7.8	8.8		24.5		27.5	35.3			4.4	
E6			"	Bondより5mm		3.9	6.9		17.7		31.4	37.3	36.3		22.0	
E7			"	母材	L		4.9		14.7	24.5	67.7	75.5	85.3		44.8	
E8			"	"	C		3.9		11.8	20.6	39.2	44.1	44.1		50.4	
E9			"	Bond		16.7	18.6		48.1		65.7	68.7			7.0	
E10			"	Bondより1mm		13.7	18.6		33.4	59.8	62.8				17.0	
E11			"	Bondより3mm		6.9	15.7		42.2		51.0	54.0			5.0	
E12			"	Bondより5mm		3.9	8.8		16.7		44.1	45.1	47.1	47.2		

注) *1 吸収エネルギーの単位は[J]。文献2), 3) の値を 1 [kgf・m]=9.81[J]として換算している。

*2 vTrs : 50%破面遷移温度

*3 サブサイズで試験した結果については、断面積比により標準サイズの吸収エネルギーに換算している。

(表-2.5) 表-2.1.4 古い鋼材に対する加工上の注意点^{2.4)}

鋼材名		制作時期	代表的な適用橋梁形式	使用上の注意点	判別方法
主として錬鉄		1883年程度以前 (明治26年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・作錬式 ・作30年式桁の補剛桁 ・1886年製のポーナル型、ボーストリング型ピントラスのアイバーと床組の一部に使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質が不均一で層状剥離を起こすこともある。 ・強度は現行の41キロ材より低い(引張強度:70~80%、伸び:数分の1程度、靱性;非常にもろいものが多い) ・P、Sが多いものもあり、溶接はさけるべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・制作年代からの推定
主としてベッセマー鋼		1909年以前の鋼 (明治42年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・クーパー型のピントラス ・日鉄型 ・北陸式 ・山陽基本型 ・山陽補助型 ・達1715、達10のIビーム桁 ・鉄作乙1075 ・帝鉄880 ・作35(鉄作7) 	<ul style="list-style-type: none"> ・強度は現行の鋼材と変わらないものもある。しかし、特にベッセマー鋼はばらつきが大きく、錬鉄と同程度と考えれば安心できる。 ・Siが少ないため、溶接性は劣るので、溶接は避けた方がよい。 ・P、S、Oの含有率が高いため、靱性は劣る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・制作年代からの推定
鋼	S39	1926年~1928年以前 (大正15年~昭和3年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・Iビーム桁 達95、達875 ・上路鉸桁 達680、達540 達425、達94、 研甲355 ・上路鉸桁 達123、達16、 達74 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質的には不均一のものが多い(S、Cu、Oが多く、Siが少ない)。 ・強度的には規格値は保証されている。 ・しかし、靱性は低く割れやすい。 ・溶接は可能であるが、その方法は検討の余地もある。 ・老朽化した母材は、溶接部よりも靱性は劣っているし、一旦亀裂ができる大きな割れに結びつきやすい。 	制作年代がある程度判明すれば <ul style="list-style-type: none"> ・成分試験 ・母材のCOD試験もしくは衝撃試験で十分
	SS39	1928年以降 (昭和3年以降)	「鋼鉄道橋設計示方書(メートル)」(昭和3年)によった橋梁 達344、達827 達1084、達407		
	SS41	1940年以降 (昭和15年以降) 1951年以降 (昭和26年以降)	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼鉄道橋設計示方書(メートル)(昭和3年) ・鋼鉄道橋設計示方書(改訂)(昭和31年9月) ・高張力鋼(案)(昭和34年) ・溶接桁(案)(昭和35年) によった橋梁	<ul style="list-style-type: none"> ・ほぼ現行の鋼材と同じ性質である。ただし、腐食が著しく進行しているものは、腐食に対する配慮が必要となる。 	
SM41	1970年以降 (昭和45年以降)	「建造物設計標準(制定)」(昭和45年3月)によった橋梁			

ここまで引用

1925年に制定されたJES第20号「構造（橋梁、建築その他）用圧延鋼材」の概要を表-2.1.5に示す。鋼板、形鋼、平鋼の引張強さは39~47kg/mm²とされ、その他、伸びと曲げ性能、化学成分として不純物であるPとSが規定されている。橋梁には第1種を用いることとされており、第1種のSは0.06%以下とされ、現代の鋼材に比べ不純物が多いことがわかる。なお、同時にJES第21号「造船用圧延鋼材」なども規格化され、これらの規格を決定する際の方針は、工場で作成する鋼材の試験値を調査し、その約90%が合格する水準で決められている^{2.5)}。その趣旨は、製造業者に対し、鋼材品質の改善を促すと同時にその生産能力をあまり低下させないこともねらったものといわれている^{2.5)}。規格の内容は主に英国にならい、特に造船材料はロイド規格に合致するように努められている^{2.5)}。

表-2.1.5 JES第20号「構造（橋梁、建築その他）用圧延鋼材」（1925年）の概要^{2.5)}

種別		抗張力 kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ	化学成分	備考
鋼板・形鋼・平鋼	第1種	39-47	1号	t \geq 9 : \geq 21	常温曲げ： 180° 1.5t	第1種 P、S \leq 0.06%	第1種： 酸性または塩基性平炉で製造
	第2種			t $<$ 9 : \geq 17			
棒鋼	第1種	39-47	2号 3号	\geq 21	焼入れ曲げ： 650°C加熱、 約28°C急冷材 180° 1.5t	第2種 平炉：P \leq 0.08% S \leq 0.06%	第2種： 酸性または塩基性平炉もしくは 転炉で製造
	第2種			\geq 25			
鉄筋棒鋼	第1種	39-47	2号 3号	\geq 21	180° 密着	転炉：P \leq 0.12% S \leq 0.06%	
	第2種			\geq 25			
鋅材	第1種	34-41	2号 3号	\geq 27 \geq 34			

JES第20号は1938年(昭和13年)に全面改定され、JES第430号「一般構造用圧延鋼材」が制定され、SS00、SS34、SS41、SS50が規定された。SS00は、当時、無規格品として取りまわされていた雑用の鋼材を規格化したものである^{2.5)}。JES第430号「一般構造用圧延鋼材」の概要を表-2.1.6に示す。JES第20号の鋼板と比べると、転炉での不純物であるPの低減が図られている。

戦時中は、審議や手続きの簡素化、生産の拡充など目的として臨時的な規格として臨JESが制定された。一般構造用圧延鋼材は、1942年(昭和17年)に臨JES第280号が規格化され、1944年(昭和19年)に改定されている^{2.5)}。JES第430号に比べて、PとSは0.010%緩められ、引張強さの範囲が広がり、伸びは1%減り、曲げ半径は0.5倍緩くなっている^{2.5)}。

表-2.1.6 JES第430号「一般構造用圧延鋼材」（1938年）の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験			曲げ試験		化学成分 %				
		引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉		
							P	S	P	S	
鋼板 形鋼 平鋼	普通種	SS00	34-50	1号	t \geq 9 : \geq 18 t $<$ 9 : \geq 15	180°	1.5t	—	—	—	—
	第1種	SS34	34-41	1号	t \geq 9 : \geq 20 t $<$ 9 : \geq 17	180°	密着	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第2種	SS41	41-50	1号	t \geq 9 : \geq 20 t $<$ 9 : \geq 17	180°	1.5t				
棒鋼	普通種	SS00	34-50	2号 3号	\geq 18 \geq 21	180°	1.5径	—	—	—	—
	第1種	SS34	34-41	2号 3号	\geq 25 \geq 30	180°	密着				
	第2種	SS41	41-50	2号 3号	\geq 20 \geq 24	180°	1.5径	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第3種	SS50	50-60	2号 3号	\geq 18 \geq 21	180°	2.0径				

戦後 1948 年(昭和 23 年)に改定された JES 金属 3101「一般構造用圧延鋼材」では、臨 JES 第 280 号が戦時規格のため、国際性を加味した JES 第 430 号と同様の規格に復元され、引張強さの規定範囲が広い SS00 が廃止された^{2.5)}。JES 金属 3101「一般構造用圧延鋼材」の概要を表-2.1.7 に示す。

表-2.1.7 JES 金属 3101「一般構造用圧延鋼材」(1948 年)の概要^{2.5)}

種別		記号	引張試験			曲げ試験		化学成分 %			
			引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉	
								P	S	P	S
鋼板 形鋼 平鋼	第 1 種	SS34	34-41	1 号	t \geq 9 : \geq 25 t $<$ 9 : \geq 21	180°	密着	\leq	\leq	\leq	\leq
	第 2 種	SS41	41-50	1 号	t \geq 9 : \geq 20 t $<$ 9 : \geq 17	180°	1.5t	0.060	0.060	0.080	0.060
棒鋼	第 1 種	SS34	34-41	2 号 3 号	\geq 25 \geq 30	180°	密着	\leq	\leq	\leq	\leq
	第 2 種	SS41	41-50	2 号 3 号	\geq 20 \geq 24	180°	1.5 径	0.060	0.060	0.080	0.060
	第 3 種	SS50	50-60	2 号 3 号	\geq 18 \geq 21	180°	1.5 径				

(2) JIS 制定後の鋼材 (第 2 期 1952 年～1970 年代)

工業標準化法の施行により、日本工業規格 JIS に移行する作業が 1949 年(昭和 24 年)から開始され^{2.5)}、1952 年(昭和 27 年)に JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」(SS 材)が制定された。JIS G 3101 の概要を表-2.1.8 に示す。SS41 以上には、建築基準法の関係で降伏点の下限値が規定されるとともに、SS50 が新たに規定された (棒鋼は SS39 及び SS49 も規定)。

一方、当時、造船関係は海事協会鋼船規則と JIS を一致させたい意向があったこと、土木や建築関係では重量軽減の趣旨からリベット接合やボルト接合などの代わりに溶接接合が大幅に採用される段階にあったこともあり、溶接性の保証された材料の規格化が要望された^{2.5)}。このような背景のもと、SS 材とは別に、同じく 1952 年に JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(SM 材)が制定された。JIS G 3106 の概要を表-2.1.9 に示す。SM 材は SS 材よりも P と S を低く規定しており、溶接性を考慮した SM41W では、ロイド船級規格やアメリカ船級規格と同様に Mn/C が 2.5 以上の成分規定が設けられた。

また、当時は、ベッセマー転炉やトーマス転炉、及び平炉により製造されていたが、1950 年後半から LD 転炉 (酸素吹上転炉) が導入され、これにより P と S の低減化も進み、1959 年(昭和 34 年)の JIS 改正で、C、Si、Mn、P、S の成分規定、衝撃値の規定が設けられ、ほぼ現在の規格内容となった (表-2.1.10、表-2.1.11)。その後も高純化が進められ、1962 年の JIS 改正では、SS 材の P と S が 0.05%以下に、SM41 の S が 0.04%に引き下げられた。1970 年代には連続鑄造技術や溶銑予備処理技術が実用化された。

表-2.1.8 JIS G 3101 「一般構造用圧延鋼材」(1952年)の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験				曲げ		化学成分 %				
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉		
								P	S	P	S	
鋼板 形鋼 平鋼	第1種	SS34	—	34-41	1号	t \geq 9: \geq 25 t<9: \geq 21	180°	密着	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第2種	SS41	\geq 23	41-50	1号	t \geq 9: \geq 20 t<9: \geq 17		1.5t				
	第3種	SS50	\geq 28	50-60	1号	t \geq 9: \geq 18 t<9: \geq 15		2.0t				
棒鋼	第1種	SS34	—	34-41	2号 3号	\geq 25 \geq 30	180°	密着	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第2種	SS41	\geq 23	41-50	2号 3号	\geq 20 \geq 24		1.5径				
	第3種	SS50	\geq 28	50-60	2号 3号	\geq 18 \geq 21		2.0径				
	第4種	SS39	\geq 24	39-53	2号 3号	\geq 20 \geq 24		1.5径				
	第5種	SS49	\geq 30	49-63	2号 3号	\geq 16 \geq 20		2.0径				

表-2.1.9 JIS G 3106 「溶接構造用圧延鋼材」(1952年)の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験				曲げ		化学成分 %		
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ半径	Mn/C	P	S
鋼板 形鋼 平鋼	SM41	\geq 23	41-50	特1号	\geq 21	180°	t \leq 19: 0.5t 19<t \leq 32: 1.0t t>32: 1.5t	—	\leq 0.040	\leq 0.050
鋼板	SM41W							\geq 2.5	\leq 0.040	\leq 0.050

表-2.1.10 JIS G 3106 「溶接構造用圧延鋼材」(1959年)の概要^{2.5)}

鋼板の化学成分と衝撃値

種別	記号	板厚 mm	化学成分 %					衝撃値 kgm/cm ²	
			C	Si	Mn	P	S		
1種	A	SM41A	\leq 100	t \leq 50: \leq 0.23 50<t \leq 100: \leq 0.25	—	\geq 2.5 \times C	\leq 0.040	\leq 0.050	—
	B	SM41B	\leq 50	\leq 0.20	\leq 0.35	0.60~ 1.20	\leq 0.040	\leq 0.050	19<t \leq 25: \geq 3.5*
	C	SM41C	\leq 38	\leq 0.18	\leq 0.35	\leq 1.40	\leq 0.040	\leq 0.040	12<t \leq 38: \geq 6.0*
2種	A	SM50A	\leq 50	\leq 0.20	\leq 0.55	\leq 1.50	\leq 0.040	\leq 0.040	—
	B	SM50B	\leq 38	\leq 0.18	\leq 0.55	\leq 1.50	\leq 0.040	\leq 0.040	16<t \leq 25: \geq 3.5*
	C	SM50C	\leq 20	\leq 0.18	\leq 0.55	\leq 1.50	\leq 0.040	\leq 0.040	12<t \leq 20: \geq 6.0

* : 板厚25mmを超えるものは協定

表-2.1.11 JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(1959年)の概要^{2.5)}

鋼板の機械的性質 (引張試験、曲げ試験)

種別	板厚 mm	引張試験				曲げ試験	
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ半径
1種	t < 5	≥23 ただし板厚 32mm 以上 ≥ $\sigma_B/2$	41-50	5号	≥23	180°	t ≤ 19 : 0.5t 19 < t ≤ 32 : 1.0t t > 32 : 1.5t
	1号			≥19			
	1号			≥21			
	4号			≥24			
2種	t < 5	≥32	50-60	5号	≥22	180°	t ≤ 19 : 1.0t 19 < t ≤ 32 : 1.5t t > 32 : 2.0t
	1号			≥18			
	1号			≥20			
	4号			≥23			

連続鋳造技術が導入される以前は、精練を終了した溶鋼を鋳型に鋳込んで鋼塊(インゴット)とし、分塊圧延によりスラブとしてから鋼板を圧延する造塊法である。造塊法では、脱酸の程度により数種類の鋼塊があり、次のような特徴を持つ。

① リムド鋼

溶鋼を鋳型へ注入すると周縁から凝固が進むが、低炭素鋼では凝固前面で C と O が反応して CO ガスが発生し、鋼塊の縁に気泡が残る。鋼塊上部には、ひけ(パイプ)が発生しないので歩留まりがよく、無駄が少ない。気泡は還元性のガスのため内面が酸化せず、圧延で潰れて圧着するので欠陥としては残らないが、鋼塊中心部の非金属介在物が多い。この非金属介在物が圧延後、層状になることがあり、溶接用鋼材としては適していない。

② キルド鋼

溶鋼へ Si、Al、Mn、Ti、Zr などの脱酸剤を添加し、リミングアクション(沸騰攪拌運動)を鎮静化した鋼で、リムド鋼と比較して偏析や非金属介在物は少ないが、鋼塊上部に大きなひけを生じるため歩留まりは悪い。

③ セミキルド鋼

脱酸の程度をリムド鋼とキルド鋼の中間程度とし、適度にリミングアクションを抑えて歩留まりを向上させた鋼である。

造塊法では、S の偏析や MnS などの非金属介在物が起因するラミネーション(鋼板の圧延方向に平行に薄く層状に存在する鋼板の内部欠陥)が生じることがあった。特に、リベット構造から溶接構造となつてから、ラメラテア(板厚方向に生じた拘束応力によって鋼板表面に平行な方向に進展したはく離状の割れ)やサルファ割れ(硫黄偏析が層状に圧延されたサルファバンドから溶接金属内に柱状晶境界に沿って生じる粒界割れ)などの溶接割れが生じることもあり、高純化が迫られていた。このような背景のもと、溶銑予備処理技術が実用化され、低 S 鋼が普及した。また、連続鋳造技術により非金属介在物は低減・微小化されていった。

1950年代、鋼材の表面に保護性さび(緻密なさび)を形成し、さびの進展を抑制する耐候性鋼材の開発が本格化した。橋梁への適用は、耐候性鋼材に塗装を施すと塗装が長持ちするとの考え方により、塗装橋梁に耐候性鋼材が用いられていた。1967年に耐候性鋼材を塗装しない裸仕様で初めて適用され、

1969年にJIS G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」が制定された。その後、初期建設費の縮減と維持管理コスト軽減への期待から耐候性鋼材の橋梁への適用は増え、現在、鋼橋の中に占める耐候性鋼橋梁の重量割合は約20%となっている^{2.1)}。

(3) 最近の鋼材（第3期 1980年代以降）

1980年頃、LD転炉に完全に移行され、連続鋳造技術も普及したことにより、さらなる高純化が進められ、衝撃値や板厚方向特性が向上した。これにより、1988年（昭和63年）のJIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」（SM材）の改正では、PとSが0.04%以下から0.035%以下に引き下げられ、現在の安定した品質レベルとなった。また、熱加工制御技術（TMCP）の導入や、1992年にはJIS G 3199「鋼板及び平鋼の厚さ方向特性」（耐ラメラテア鋼）が制定され、現在までに多くの高性能鋼が開発・実用化されている。製鋼技術の推移とJISにおけるSS材及びSM材のS量の推移を図-2.1.2に、600N/mm²級鋼材のシャルピー吸収エネルギーの年代変化を図-2.1.3に示す。これらから、LD転炉への移行や連続鋳造の比率が高くなった1980年頃からシャルピー吸収エネルギーが向上しているのがわかる。

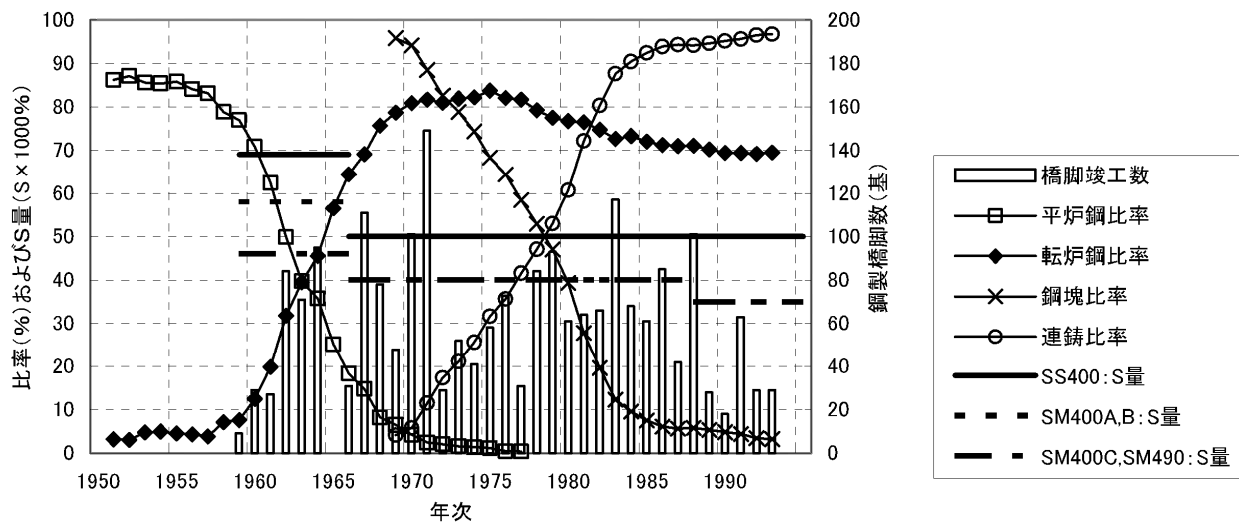
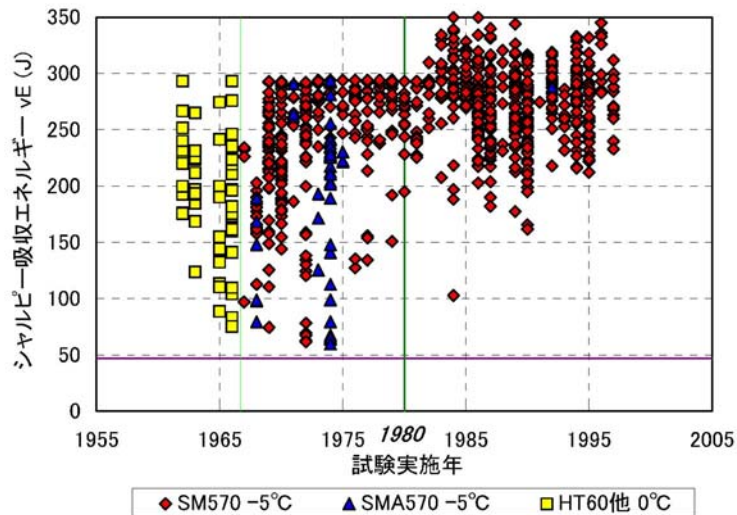


図-2.1.2 炉別生産率・造塊連鋳比率及びJIS規格におけるS量の推移と鋼製橋脚数^{2.6)}



※1980年頃まで300Jを超えるものがないのは、当時の試験機的能力上の問題のため

図-2.1.3 シャルピー吸収エネルギーの年代変化（600N/mm²級鋼材）^{2.7)}

現在の厚鋼板の製造プロセスの例を図-2.1.4に示す。鉄鉱石から酸素を除去する還元材としてコークスが使われ、鉄鉱石をコークスとともに高炉へ入れ、熱風でコークスを燃焼させる。燃焼で生じた一酸化炭素が鉄鉱石中の酸素と結合して鉄鉱石を還元するとともに、鉄に炭素が入り融点を下げることになる。熔融鉄は炉底に沈み、高炉の底部の出銑口より銑鉄として取り出される。銑鉄は、溶けたままSiやP、Sを除去する溶銑予備処理の工程を経て、転炉がある製鋼工場に運ばれる。転炉では合金添加物などを入れ、酸素を湯面に吹き付けて余分な炭素を燃焼させ減量するとともに、発熱、攪拌しながら吹錬する。転炉で溶銑は溶鋼へと転換される。その後、取鍋に移し、脱酸剤としてSi、Al、Tiなどを添加する。また、取鍋を再加熱して合金成分の添加、真空脱ガス処理を二次精練（取鍋精練）として行うこともある。取鍋精練法は、高純化・高纯净度化が進められてきている。精練を終了した溶鋼は、鋼片として固めるための連続鋳造工程へと運ばれ、スラブと呼ばれる半製品になる。スラブは、圧延工程を経て厚鋼板に加工される。

熱加工制御技術とは、制御圧延技術と制御冷却技術を組み合わせた製造技術のことであり、一般にTMCP（Thermo Mechanical Control Process）とも呼ばれている。この製造技術を適用して製造された鋼材をTMCP鋼と呼ぶ。TMCPは、スラブ加熱に始まる鋼の熱間圧延、冷却過程を、単に成形プロセスとしてではなく、熱加工制御プロセス、すなわち鋼の高強度化、高靱化のプロセスとして有効に活用した製造技術である。TMCP鋼は、制御圧延、制御冷却による結晶粒の微細化により、同一強度レベルの従来鋼に比較して、炭素当量 C_{eq} 及び溶接割れ感受性組成 P_{CM} の低減が可能となり、また、従来オフラインの熱処理で行われていた高強度化、高靱化をオンラインにおいて実現することが可能である。熱加工制御プロセスの例を図-2.1.5に示す。

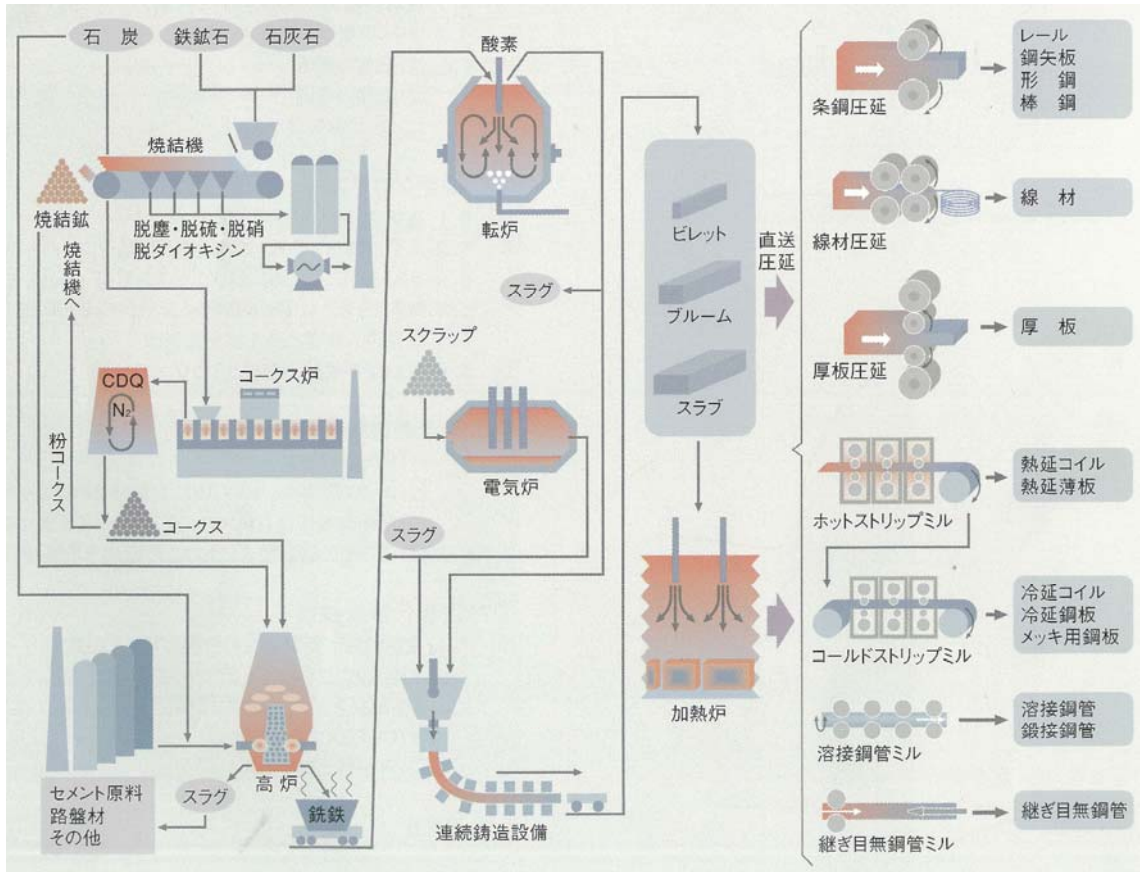


図-2.1.4 現在の厚鋼板の製造プロセスの例 ^{2.8)}

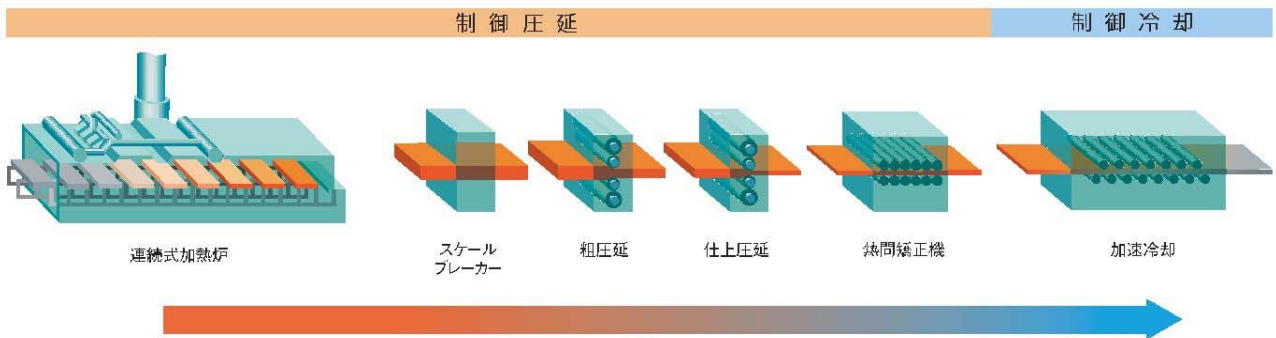


図-2.1.5 熱加工制御プロセスの例 ^{2.9)}

2.1.3 鋼道路橋の技術基準の変遷

(1) 道路橋示方書の変遷

鋼道路橋の技術基準である道路橋示方書、及び使用鋼材の変遷を表-2.1.12 に示す。道路橋示方書の改定と JIS の鋼材の制定及び改正は、ほぼ同時期である。JIS の鋼材の規格及び道路橋示方書の鋼材の規定を整理したものを表-2.1.13 に示す。なお、前述したその当時の鋼材の加工上の注意点も整理した。

1957 年に、溶接鋼道路橋示方書として溶接構造の鋼道路橋について規定された。使用鋼材は、JIS として制定された JIS G 3101-1952 及び JIS G 3106-1952 である。1964 年には SM50 (JIS G 3106-1959)、1967 年には SM50Y、SM53、SM58 (JIS G 3106-1966)、1972 年には耐候性鋼材が加えられ、現在とほぼ同じ鋼種となった。1996 年には、耐候性鋼材を除く鋼材の適用板厚が 100mm に拡大された (耐候性鋼材は 2001 年に適用板厚が 100mm に拡大)。また、JIS では SS400 の化学成分として P と S のみを規定し、溶接性を確保するための化学成分が規定されていないので、JIS 規格材であれば無制限に使用可能との誤解を避けるために、SS400 の鋼道路橋への適用を非溶接部材に限定された。

表-2.1.12 道路橋示方書と使用鋼材の変遷

西暦 (元号)	技術基準	使用鋼材 (主な規定)	規格
1926 年(大正 15 年)	道路構造に関する細則案		—
1939 年(昭和 14 年)	鋼道路橋設計示方書案 鋼道路橋製作示方書案	JES 第 20 号	JES 第 20 号
1940 年(昭和 15 年)	電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案	SS41	JES 第 430 号
1956 年(昭和 31 年)	鋼道路橋設計示方書 鋼道路橋製作示方書	SS41	JIS G 3101-1952
1957 年(昭和 32 年)	溶接鋼道路橋示方書	SS41, SM41, SM41W	JIS G 3101-1952 JIS G 3106-1952
1964 年(昭和 39 年)	鋼道路橋設計示方書 鋼道路橋製作示方書 溶接鋼道路橋示方書	SS41, SS50, SM50A SS41, SM41A・B, SM50A・B	JIS G 3101-1959 JIS G 3106-1959
1967 年(昭和 42 年)	溶接鋼道路橋示方書 (追補)	SM50Y, SM53, SM58 の追加	JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966
1968 年(昭和 43 年)	溶接鋼道路橋示方書 (追補)		JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966
1972 年(昭和 47 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SMA41, SMA50, SMA58 の追加	JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966 JIS G 3114-1968
1980 年(昭和 55 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		同上
1990 年 (平成 2 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		JIS G 3101-1988 JIS G 3106-1988 JIS G 3114-1988
1993 年 (平成 5 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		同上
1996 年 (平成 8 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	適用板厚を 100mm に拡大 (耐候性鋼材は除く) 運用上、SS 材の適用を非溶接部材に限定	同上
2001 年(平成 13 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	耐候性鋼材の適用板厚を 100mm に拡大	JIS G 3101-1988 JIS G 3106-1988 JIS G 3114-1998
2012 年(平成 24 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		JIS G 3101-2010 JIS G 3106-2008 JIS G 3114-2008

表-2. 1. 13 JIS の鋼材の規格と鋼道路橋の技術基準の変遷

西暦 (元号)	鋼材の規格	鋼道路橋の技術基準		鋼材の特徴や加工上の注意点
		技術基準	規定されている使用鋼材	
1920 (T9)	1925 JES第20号制定 SS39	1926 道路構造に関する細則案		1920年頃の鋼材 ・Ceq、P _{tot} ともに高い値を示しており、溶接には不向きと考えられる。
1930 (S5)	1938 JES第430号制定 SS00, SS34, SS41, SS50	1939 鋼道路橋設計示方書案 鋼道路橋製作示方書案	JES第20号	1925年～1952年頃 ・りん(P)と硫黄(S)の化学成分の規定は0.06%以下であり、現在のSS材よりも多い。 ・衝撃値は現在のSS材と比較して低い。 ・靱性が低いため、溶接部付近の加熱矯正を行うと割れが生じる可能性があるため注意が必要である。 ・フラスレーションや介在物の内在にも注意が必要である。
1940 (S15)	1948 JES金属3101制定 SS34, SS41, SS50, SS00廃止	1940 電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案	JES第430号 SS41	1948年：JES第20号に比べると曲げ性能が向上し、不純物であるP、Sの低減が図られている。
1950 (S25)	1952 JIS G 3101制定 SS34, SS41, SS50 1952 JIS G 3106制定 SM41, SM41W 1959 JIS G 3101改定 P.Sの一部変更 1959 JIS G 3106改定 SM41, SM50 C,Si,Mn,P,Sの成分規定及び 衝撃値の規定。 ほぼ現在の規格内容が完成。	1956 鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書 1957 溶接鋼道路橋示方書	SS41 SS41, SM41, SM41W	1952年～1959年頃 ・SS材とSM材のJIS規格が制定され、SM41WはC/Mnの値(2.5以上)を規定しており、溶接性を向上させている。 ・SM材も衝撃値の規定がなく、現在のSM材よりも衝撃値は低いことが多いため、必要に応じ加工前に確認するのがよい。 ・SS41を溶接構造に適用しており、必要に応じ溶接部の靱性を確認するのがよい。
1960 (S35)	1966 JIS G 3101改定 SS39, SS49を削除し、SS50を規定 P.Sの上限を0.060%→0.050% 降伏点、耐力について、板厚別に規定 JIS G 3106改定 SM50Y, SM53, SM58の追加 一部Sの上限を0.05%→0.04% 1968 JIS G 3114制定 SMA41, SMA50, SMA58	1964 鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書 溶接鋼道路橋示方書 1967 溶接鋼道路橋示方書(追補) 1968 溶接鋼道路橋示方書(追補)	SS41, SS50, SM50A SS41, SM41, SM50 SS41, SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58 SS41, SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58	1959年～1980年頃 ・SM材のJIS規格で化学成分及び衝撃値が規定され、現在の規格とほぼ同様となった。 ・現在のSM材よりも衝撃値は低いことが多く、必要に応じ加工前に衝撃値を確認するのがよい。 ・SS41を溶接構造に適用しており、必要に応じ溶接部の靱性を確認するのがよい。 ・フラスレーションや介在物の内在にも注意が必要である。 ・昭和41年以前の鋼材については溶接時のフラマテアに対する注意が必要 ・昭和43年追補でSM58のみCeqの規定。基本的に0.44%以下、硬さ350Hv以下もしくはビード曲げ試験の規定に適合している場合、0.44%を超えて良い。熱処理を伴わない60キロ鋼材やCeqの高い50キロ鋼材に溶接補修を行う場合注意が必要。
1970 (S45)		1972 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SS41, SS50 SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58 SMA41, SMA50, SMA58	1970年頃 ・連続鋳造法の導入 連続鋳造技術 ・溶銲予備処理技術が実用化 ・錬鉄はほぼ純鉄に近い成分であるが、多量のP(0.5%)を含み伸びが著しく低く、溶接には適さない。
1980 (S55)	1983 JIS G 3114改正 SMA-P, SMA-Wの規定 1988 JIS G 3101改正 SI単位への変更 JIS G 3106改正 SI単位への変更 適用厚さの拡大 P.S上限を0.04%→0.035% Mnの上限値を一部引き上げ JIS G 3114改正 SI単位への変更	1980 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	1973年版と同様	1980年頃以降 ・製鋼方法の躍進により衝撃値が向上している。 ・加工熱処理技術(TMCP)の導入 ・高純化が進み、板厚方向特性が向上した。
1990 (H2)	1992 JIS G 3199制定 耐ラメラア制定 1998 JIS G 3114改正 100mmを超える場合の降伏点を規定	1990 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 1993 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 1996 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SS50削除 SI単位に変更 SS400 SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570 SMA400, SMA490, SMA570 適用板厚を100mmに拡大(耐候性鋼材は除く)	・連続鋳造技術が急速に普及。溶銲予備処理技術が実用化され、低S鋼が普及。 ・1996年の道路橋示方書で運用上、SS材の適用を非溶接部材に限定した。
2000 (H12)	2004 JIS G 3101改正 100mmを超える場合の降伏点を規定 JIS G 3106改正 平鋼の一部の最大板厚を規定 2008 JIS G 3114改正 ISOに準拠 JIS G 3106改正 上限板厚を拡大 JIS G 3140制定 500(W)・700(W) 2009 JIS G 3199改正 ISOに準拠	2001 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	耐候性鋼材の適用板厚を100mmに拡大	
2010 (H22)	2010 JIS G 3101改正 記述修正 2011 JIS G 3140改正 SHBS400(W)追加 2015 JIS G 3101改正 JIS G 3106改正	2012 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	1994年版と同様	

(2) 道路橋示方書における鋼材の加工性に関する規定の変遷

道路橋示方書及びその解説は、その年代毎の鋼材の特性を考慮した鋼種の選定や加工に関する規定及びその留意点を示している。板厚による鋼種選定の規定の変遷を表-2.1.14に示す。

1956年(昭和31年)の鋼道路橋設計示方書及び鋼道路橋製作示方書での適用鋼種はSS41(JIS G 3101-1952)のみであるが、鋼道路橋設計示方書の解説において、「高炭素鋼、低合金鋼などの高張力鋼のような特殊な鋼材は、一般的な規格がないので材質や許容応力度については規定せず、設計者の判断に任せ、用いることができる」とされている。

1957年(昭和32年)の溶接鋼道路橋示方書での適用鋼種は、SS41(JIS G 3101-1952)、SM41またはSM41W(JIS G 3106-1952)であり、板厚22mm以上の場合はSM41またはSM41Wを用いるのがよいとしている。溶接鋼道路橋示方書の解説には、SS41を用いる場合は、規格証明書が添付され、サルファバンドやラミネーション等の欠陥のないものを用いるのがよいとしており、溶接割れへの配慮がされている。SM41及びSM41Wは、SS41と比べてPとSの上限値が低く、曲げ試験の曲げ半径も小さく規定されていることから、自動溶接のように溶け込みの深い溶接を行う場合や、現場溶接のような大きな拘束を受ける溶接を行う場合は、特にSM41またはSM41Wを用いるのがよいとしている。ここでの自動溶接とはサブマージアーク溶接のことである。また、気温が著しく低い地方に架設する橋の場合は、低温脆性への配慮としてSM41Wを用いるものとし、板厚14mm以上の鋼材は溶接部の脆化傾向が著しいため、使用する鋼材のシャルピー吸収エネルギーの要求値を $3.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上としている。

1964年(昭和39年)の鋼道路橋設計示方書及び鋼道路橋製作示方書では、JIS規格の改正により、SS50(JIS G 3101-1959)とSM50A(JIS G 3106-1959)が追加された。鋼道路橋設計示方書の解説には、当時、 $60\text{kg}/\text{mm}^2$ 構造用鋼の研究が進められていたが、強度が高くなるにつれて製鋼が困難になるので表面欠陥や内部欠陥の検査により品質の確認が必要なこと、及び一般的な規格がないことから、材質や許容応力度については特別の配慮をほらう必要があるとしている。

1964年(昭和39年)の溶接鋼道路橋示方書での適用鋼種は、SS41とJIS規格の改正にあわせSM41A、SM41B及びSM50A、SM50Bとしている。溶接鋼道路橋示方書の解説には、鋼材を選定するにあたっての留意点は1957年(昭和32年)版とほぼ同じで、自動溶接のように溶け込みの深い溶接を行う場合や現場溶接のような大きな拘束を受ける溶接を行う場合はSM41A、SM41BまたはSM50A、SM50Bを用いるのがよく、板厚が22mm以上32mm以下の場合はSM41AまたはSM50Bを、板厚が32mmを超える場合はSM41BまたはSM50Bを用いるのがよいとしている。ただし、板厚が23mm以上のSM41B及びSM50Bは、架設される地方の温度や構造物の重要度などによって、使用する鋼材のシャルピー吸収エネルギーの要求値を $3.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上としている。

1967年(昭和42年)の溶接鋼道路橋示方書(追補)では、JIS規格の改正にあわせて、SM50Y、SM53及びSM58(JIS G 3106-1966)が追加され、さらに鋼種の選定の基準が明確になった。解説には、製鋼方法による鋼材の特徴から選定の際の留意点も示しており、当時、SM50Yにはキルド鋼とセミキルド鋼とがあり、当時のセミキルド鋼は厚板になるに従いラミネーションが生じやすくなること、及びSM50Yの製造経験が浅いことから、25mmを超える厚板ではSM50Yであってもキルド鋼が望ましく、板厚32mmを超える厚板はSM53を用いるとしている。

1968年(昭和43年)の溶接鋼道路橋示方書(追補)では、施工(工作、組立溶接)に関する追加規定が示された。鋼板の切断は原則ガス切断と規定された。解説には、厚板の切断はガス切断が多いこと

だけでなく、ラミネーションが存在する鋼板をガス切断すると切断部に異常が生じ、内部欠陥を検査する役割も果たすことができる理由もあり、原則ガス切断としている。このラミネーションが発見された場合の処置についても規定しており、当時の鋼材の品質が不安定であったことがうかがえる。冷間加工及び熱間加工は、現在の道路橋示方書と同様に冷間曲げ加工の内側半径は板厚の15倍以上(15t以上)、SM570Qの熱間加工は禁止している。線状加熱によるひずみ取りは、鋼材の材質を損なわないようにとしている。なお、当時、耐候性鋼材は、JIS規格に制定されていたが(JIS G 3114-1968)、今後の研究を待つところが多いことから見送られ、1972年(昭和47年)の道路橋示方書で規定された。

1980年(昭和55年)の道路橋示方書では、SM50YBを32mmまで使用できると規定している。解説にて、SM50Yは全てキルド鋼として製鋼されるためとしている。施工に関しては、線状加熱における鋼材表面温度と冷却方法が規定され、解説にて線状加熱による熱影響部が板厚表面数mmのため機械的性質への影響はわずかであるとしている。

1996年(平成8年)の道路橋示方書では、製作や施工の省略化の観点から板厚拡大が望まれ、適用板厚が100mmまで拡大され(耐候性鋼材は除く)規定された。板厚区分はJIS規格と整合させている。解説にて、耐ラメラテア鋼や予熱低減鋼などの高性能鋼の適用について示しており、多くの種類の高性能鋼が適用され始めた。SS400は、JISにおける化学成分としてPとSの量のみを規定し、溶接性を確保するための化学成分が規定されていないことから、鋼道路橋への適用は非溶接部材に限定している。ただし、板厚22mm以下のSS400を仮設資材に用いる場合や、二次部材に用いられる形鋼や薄い鋼板等でSM材の入手が困難な場合には、事前に化学成分を調査したり、溶接施工試験等により、溶接性に問題がないことを確認したうえで使用できるとしている。

表-2.1.14 板厚による鋼種選定の規定の変遷(耐候性鋼材は除く)

鋼種	板厚 (mm)										
	6	8	16	22	25	32	35	38	40	50	100
1957(S32)											
SS41											
SM41											
SM41W											
1964(S39)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM50A											
SM50B											
1967(S42)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM41C											
SM50A											
SM50B											
SM50C											
SM50YA											
SM50YB											
SM53B											
SM53C											
SM58											
1996(H8)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM41C											
SM50A											
SM50B											
SM50C											
SM50YA											
SM50YB											
SM53C											
SM58											

※キルド鋼塊とする

2.2 鋼材の温度履歴と機械的性質

2.2.1 熱履歴を受けた鋼材の機械的性質

鋼材は、加熱・冷却の熱履歴を受けると鋼材の特性が変化し、その影響の度合いは加熱温度、冷却開始温度及び冷却速度、化学成分、鋼材の製造プロセスによって異なる。鋼橋に使用される鋼材として普通鋼材と耐候性鋼材があり、化学成分は異なるが、熱履歴への影響は道路橋示方書の熱間加工やひずみとり（線状加熱等）の規定において普通鋼材と耐候性鋼材で分けていないことから同程度として考えてよい。ここでは、現在の鋼材の製造プロセスごとに、熱履歴を受けたときの機械的性質について示す。

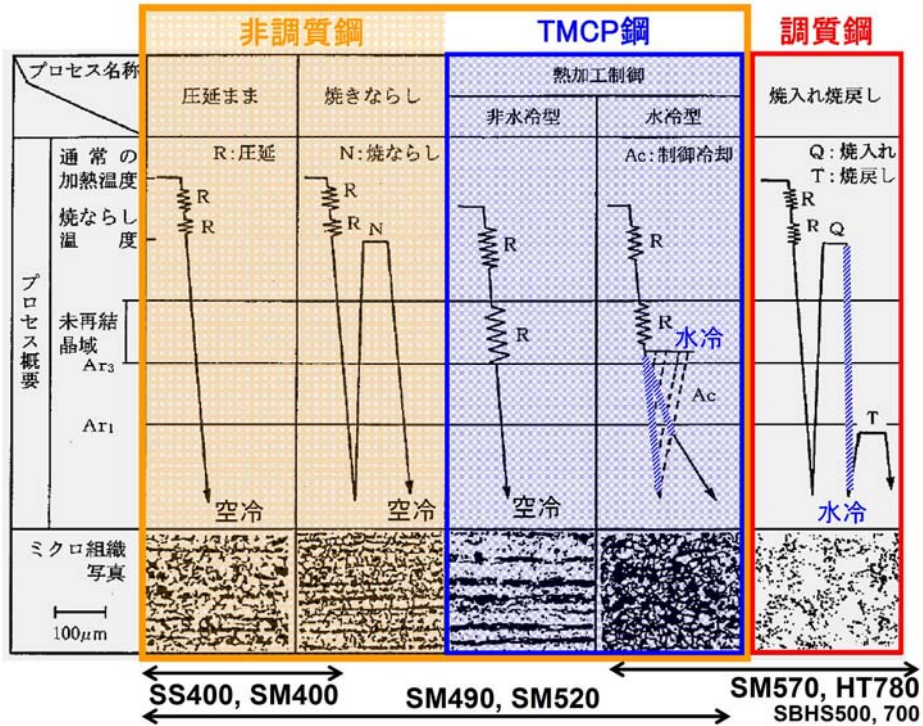
鋼橋に使用される鋼材を熱処理方法により分類すると、圧延まま（熱処理なし）または焼きならしを行う非調質鋼、焼入れ焼戻しを行う調質鋼、制御圧延と制御冷却を行う TMCP 鋼に分かれる。この3つの製造プロセスを図-2.2.1に示す。鋼材の機械的性質は、鋼材のマイクロ組織が最終的に形成された温度を超えて加熱すると、結晶粒微細化強化や変態強化などの強化機構が徐々に失われ、強度が低下する。例えば、図-2.2.1に示した製造プロセスの鋼材を加熱後空冷した場合、一般に以下のことが言える。

- 非調質鋼（圧延まま、焼きならし） → 加熱の影響を大きく受ける製造プロセス（固溶強化、析出強化、加工硬化、結晶粒微細化強化など）がないため加熱の影響は小さい。ただし、変態完了温度（600～700℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 非水冷型の TMCP 鋼 → 変態完了温度（600～700℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 水冷型の TMCP 鋼 → 冷却停止温度（500～650℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 調質鋼 → 焼戻し温度（550～650℃）以上の加熱を行うと強度低下が顕著

上記の他、鋼材は製造プロセスに関係なく加熱温度が Ac1 温度（加熱時の変態開始温度で約 720℃）を超えると鋼材のマイクロ組織が大きく変化し、強度の変化、延性やじん性の低下が顕著になる。さらに、950℃以上に加熱した場合、組織粗大化により徐々に硬化とじん性低下が進み、1100℃を超えるとさらにじん性低下が顕著になる。また、Ac1 温度以上の加熱を行うと、加熱後の冷却中に変態が起きることにより冷却速度の影響度合いが大きくなる。製造プロセスに係わらず、720℃以上の加熱後に急冷すると硬質相が生成し（図-2.2.2）、じん性が低下するため、加熱後の冷却方法は空冷とするのが望ましい。

以上により、鋼材の加熱温度の上限は、鋼材の製造時の熱処理の温度より、次に示すとおりと考え設定した。非調質鋼（圧延まま、焼きならし）の場合、720℃以上の加熱を行うと強度が低下するとされているが、600～700℃でのその程度は一般的に小さく^{2.10)}、加熱温度の上限は、720℃以下としてよいと考えられる。TMCP 鋼は、製造時の冷却方法によって加熱温度の上限が異なるが、少なくとも 650℃を超えないように、調質鋼も同様に少なくとも焼戻し温度以下となる 650℃を超えないようにする必要がある。

上記の加熱温度と冷却方法の場合、1回の熱履歴による機械的性質への影響は小さいが、繰り返し熱履歴を受けると影響度は累積されると考えてよい^{2.11)}。よって、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加熱温度を下げるのが望ましい。



Ar₁ : 750°C付近 (冷却時、オーステナイトがフェライトまたはパーライトへの変態を完了する温度)
 Ar₃ : 850°C付近 (冷却時、フェライト変態が始まる温度)
 焼きならし温度 : 900°C付近

図-2.2.1 現在の鋼材の製造プロセス

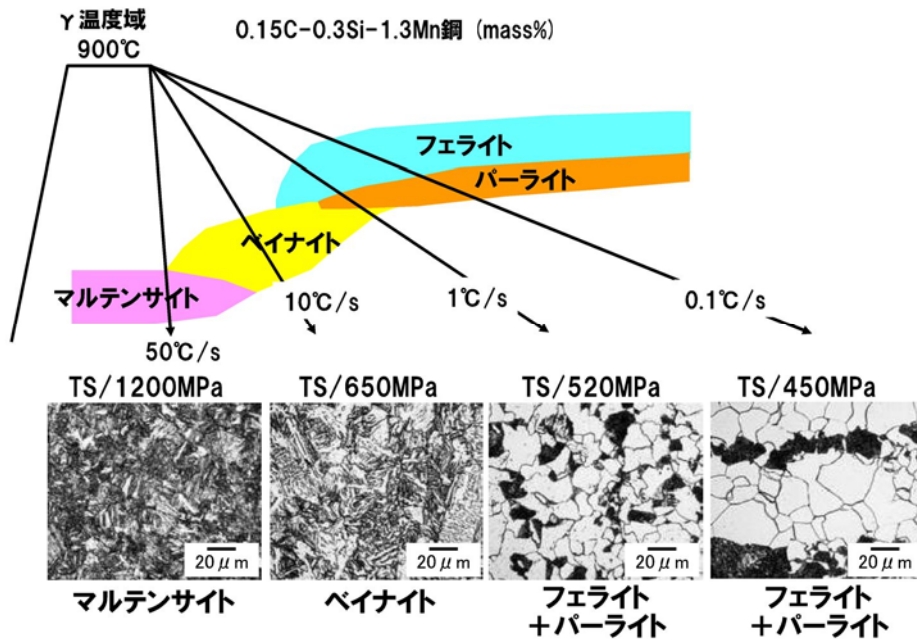


図-2.2.2 900°Cに加熱後の冷却速度の違いによるマクロ組織

高温の状態を長時間保持した場合の鋼材の機械的性質は、文献 2. 10) で示されている。試験の条件は、常温と、500～800℃で1時間保持し、徐冷（20～70℃/h、一部 140～200℃/h あり）している。加熱・冷却後の引張試験結果を図-2. 2. 3～図-2. 2. 7 に示す。SS41 は 800℃でも強度の低下は小さく、SM50B は 700℃で若干の強度低下が認められる。SM50YB 及び SM53B は 650℃から強度が低下している。SM58 のうち焼入れ焼戻しの鋼材は、焼戻し温度の 650℃以上で強度が低下し、SM50YB や SM53B と比べて低下の程度は大きい。

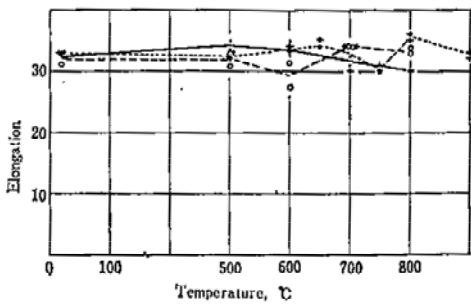
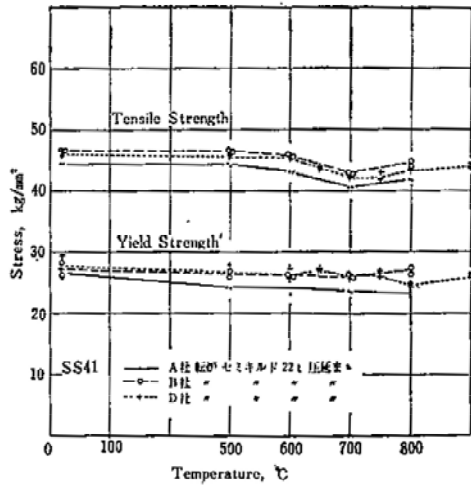


図-2. 2. 3 SS41 の加熱後の強度 ^{2. 10)}

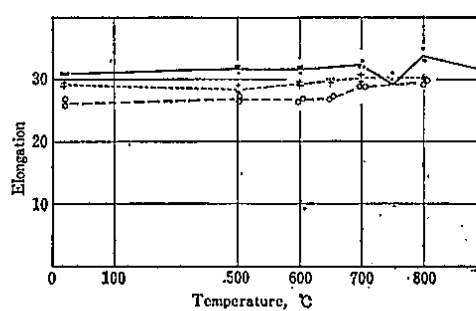
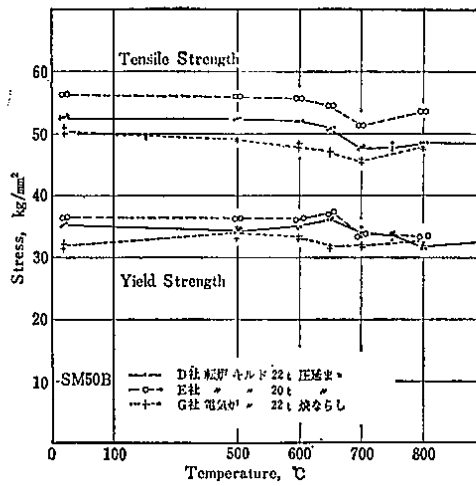


図-2. 2. 4 SM50B の加熱後の強度 ^{2. 10)}

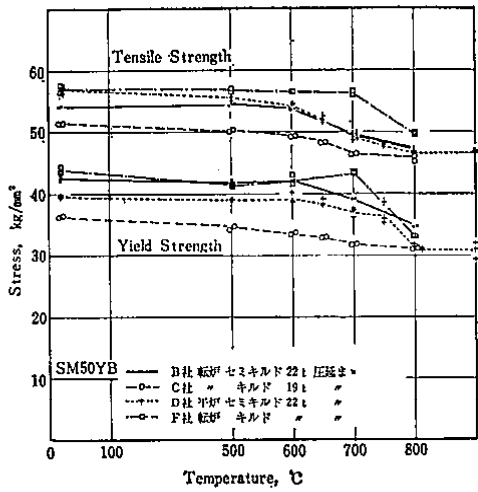


図-2.2.5 SM50YB の加熱後の強度^{2.10)}

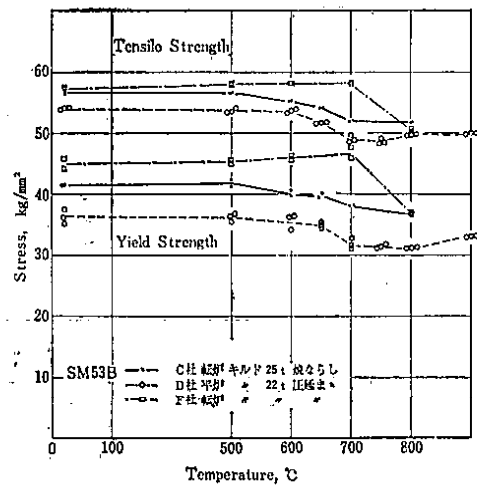


図-2.2.6 SM53B の加熱後の強度^{2.10)}

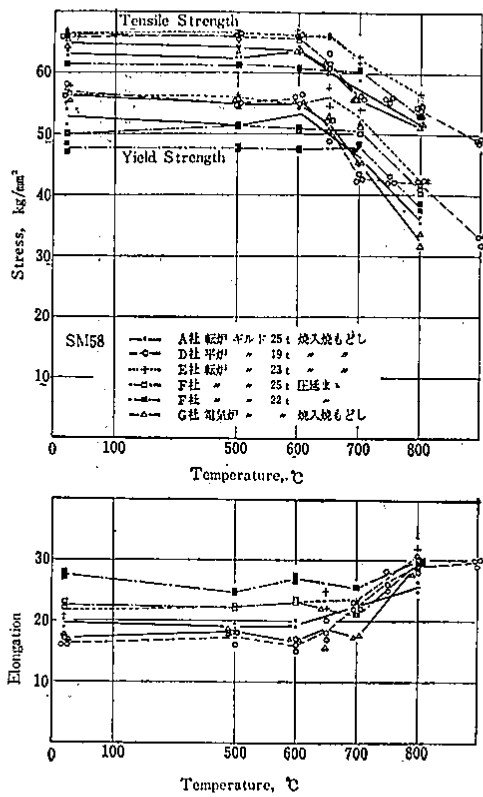


図-2.2.7 SM58 の加熱後の強度^{2.10)}

加熱して塑性変形を加える熱間加工においては、特に、赤熱脆性及び青熱脆性に注意する必要がある。赤熱脆性は、鋼材を加熱した際に加熱色が赤くなる 900～1100℃の範囲の加工で現れる脆化のことであり、一般的に鋼材の S 含有量が多いほど生じやすく、融点が高い FeS が結晶粒界に形成され、加工時に鋼材の表面に割れが生じる。近年では、精錬の脱硫技術の向上により、鋼橋で使用される鋼材で赤熱脆性が生じることはほとんどないが、S 含有量が多い JIS 制定前の鋼材を加熱して塑性加工する場合は注意が必要である。

青熱脆性は、図-2.2.8 に示すように、150～400℃の範囲で強度は上昇し、延性は低下して、脆くなる現象である。この温度は鋼材の加熱色が青くなるため、青熱脆性と呼ばれる。青熱脆性が生じる温度範囲での塑性加工は避ける必要がある

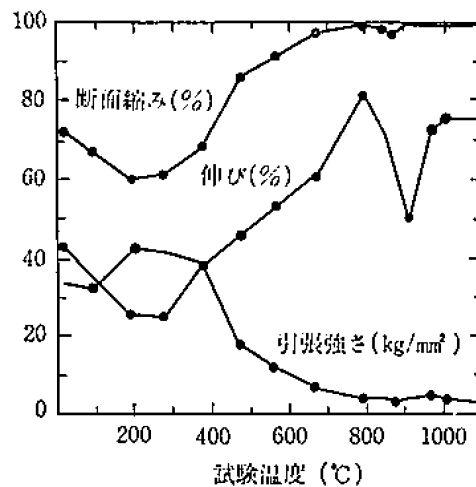


図-2.2.8 高温時の鋼材（軟鋼）の機械的性質^{2.12)}

2.2.2 線状加熱による鋼材の機械的性質への影響

溶接によって生じた変形の矯正や部材の曲げ成形は、プレスなどによる機械法、ガス炎加熱法等によって行われている。ガス炎加熱法は、一般に鋼材の表面の一部を加熱し、塑性ひずみを生じさせて変形させる線状加熱によって行われており、道路橋示方書ではひずみとりの線状加熱時の鋼材の表面温度及び冷却法を表-2.2.1に示すとおり規定している。2.2.1では、鋼材の加熱温度の上限を鋼材の製造時の熱処理の温度から設定し示したが、例えば、調質鋼の加熱温度は焼戻し温度以下の 650℃以下と設定したのに対し、表-2.2.1は焼戻し温度以上となる 750℃までの加熱を許容している。これは線状加熱の加熱・冷却による熱影響は鋼材の表面数mm程度の深さに限られ、鋼材の機械的性質に及ぼす影響はわずかであることからであり、線状加熱に限定した規定であることに注意する必要がある。この線状加熱による鋼材の材質変化については多くの研究がなされており、文献 2.13) では軟鋼、50 キロ級高張力鋼、60 キロ級高張力鋼（調質鋼）などの各種構造用鋼材の線状加熱による鋼材の材質変化について整理されている。また、文献 2.14) では TMCP 鋼について研究を行っており、この研究成果を基に表-2.2.1に示す熱加工制御鋼（TMC）の線状加熱の条件を設定している。

表-2.2.1 ガス炎加熱法による線状加熱時の鋼材の表面温度及び冷却法

鋼種		鋼材表面温度	冷却法
調質鋼 (Q)		750℃以下	空冷または空冷後 600℃以下で水冷
熱加工制御鋼 (TMC)	$C_{eq} > 0.38$	900℃以下	空冷または空冷後 500℃以下で水冷
	$C_{eq} \leq 0.38$	900℃以下	加熱直後水冷または空冷
その他の鋼材		900℃以下	赤熱状態からの水冷を避ける

線状加熱における鋼材の材質変化の要因として、表-2.2.1 に示す加熱温度及び冷却条件のほかに、加熱の重畳回数が考えられる。この加熱の重畳回数については文献 2.13) で整理されており、軟鋼及び 50 キロ級高張力鋼は 5 回繰り返す、60 キロ級高張力鋼 (調質鋼) は 3 回繰り返すの試験を行った結果、強度及びシャルピー吸収エネルギーは 1 回の加熱の場合とほとんど変化せず、加熱の重畳回数による影響はあまり認められないとしている。加熱温度が 900℃ 以下のため赤熱脆性が生じることはほとんどないが、鋼材の化学成分の S 含有量が不明な場合は、事前に S 含有量を確認するのがよく、特に JIS 制定前の鋼材を線状加熱する場合は脆化に注意が必要である。

2.2.3 熱間加工による鋼材の機械的性質への影響

道路橋示方書^{2.15)}では、「調質鋼 (Q) 及び熱加工制御鋼 (TMC) の熱間加工は、原則として行ってはならない」と規定している。これは、調質鋼のような焼入れ焼戻しの熱処理が施された鋼材は、熱間加工のために焼戻し温度以上に加熱されると、熱処理により得られた特性が失われ、強度が低下するためである。道路橋示方書に示されている調質鋼を種々の温度に加熱したのち空中放冷したときの機械的性質の変化を図 2.2.9 に示す。焼戻し温度の 650℃ 以上に加熱すると機械的性質が低下することがわかる。TMCP 鋼についても、調質鋼と同様に 650℃ 以上の加熱で機械的性質が低下する。

非調質鋼の熱間加工については、多くの事例はあるが、2.2.1 で述べたように、鋼材の機械的性質を確保するためには加熱温度は 720℃ 以下と設定するのが望ましく、加熱温度には注意が必要である。

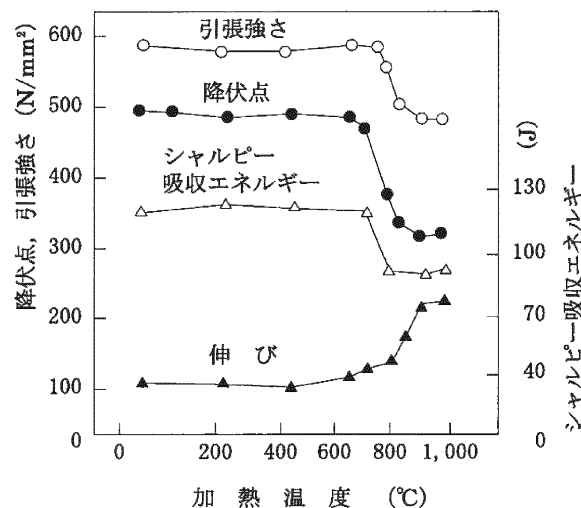


図-2.2.9 調質鋼の加熱による機械的性質の変化

2.2.4 冷間加工による鋼材の機械的性質への影響

鋼材は、冷間塑性加工により塑性ひずみを与えると加工硬化し、さらにはひずみ時効によりじん性の低下をもたらすことが知られている。このことより、道路橋示方書では解説で「主要部材において冷間曲げ加工を行う場合、内側半径は板厚の 15 倍以上とするのが望ましい」とされており、内側半径が板厚の 15 倍で曲げ加工を行ったときの鋼材表面のひずみは約 3%である。図-2.2.10 は、文献 2.16) で示される当時の各種鋼材に予ひずみを与えた後に 250°C で 1 時間の時効処理を行った試験片のシャルピー衝撃試験結果であり、SM58Q を除き予ひずみが 3%でもシャルピー吸収エネルギーの低下が大きいことがわかる。一方、図-2.2.11 は、文献 2.17) で示される文献 2.16) の結果も含めた 1970 年代の鋼材と 1990 年代の鋼材のシャルピー衝撃試験結果であり、素材のシャルピー吸収エネルギーが大きいと予ひずみによる吸収エネルギーの低下は小さいことがわかる。この研究成果より、道路橋示方書では解説で「鋼材規格で衝撃試験が規定されている鋼種で JIS Z 2242 に規定するシャルピー衝撃試験の結果が表-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%を超えない材料については、内側半径を板厚の 7 倍以上または 5 倍以上としてもよい」としている。

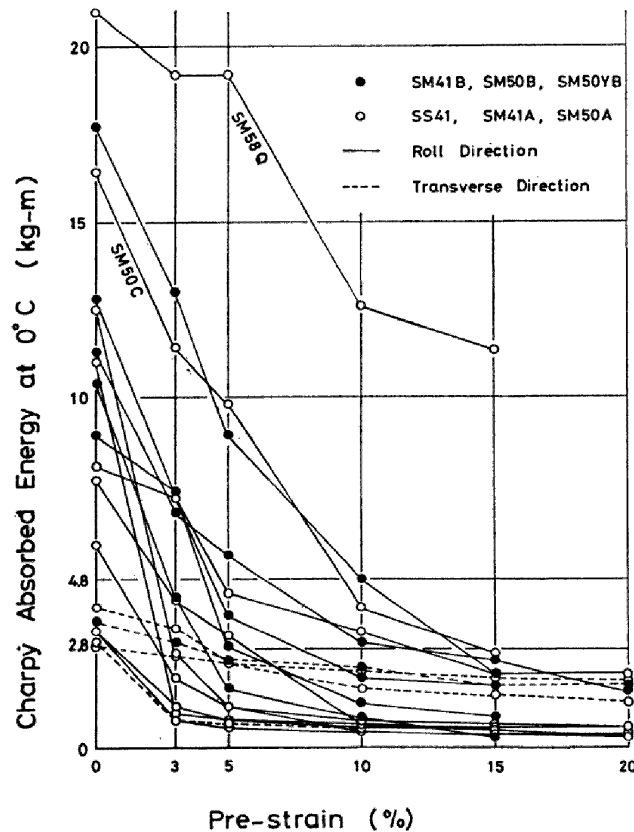
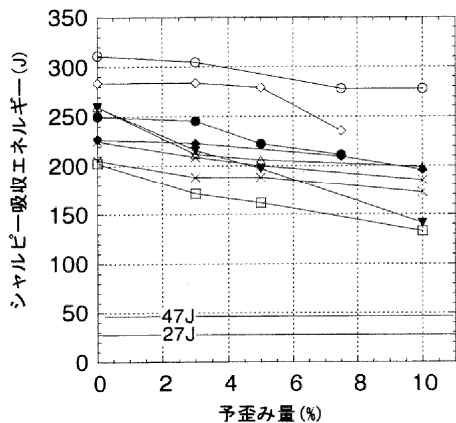


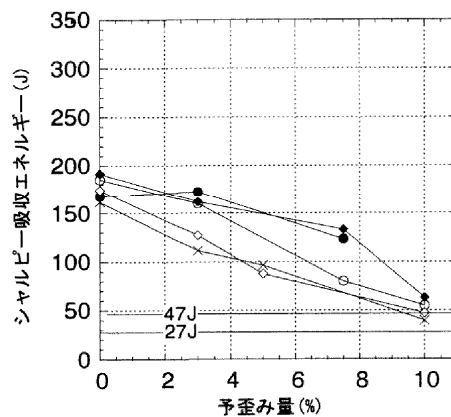
図-2.2.10 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギー^{2.14)}

○ No.1 SM490B-TMC@0°C □ No.11 SMA490BW@0°C
 ● No.2 SM490YB-CR@0°C ▼ No.12 SMA490BW@0°C
 ● No.7 SM400B@0°C ▲ No.13 SMA490BW@0°C
 ◇ No.8 SM520B@0°C × No.14 SM570Q@-5°C
 × No.10 SMA490BW@0°C



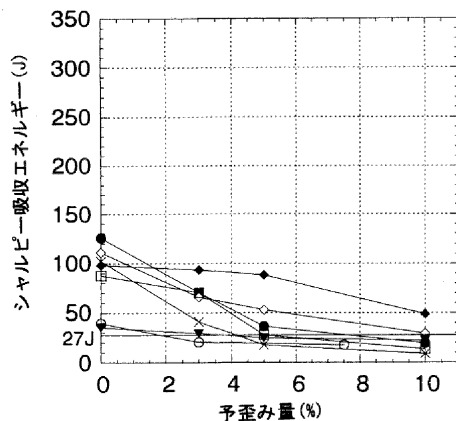
(a) $vE \geq 200J$

○ No.3 SM570Q@-5°C ◇ No.15 SM490B@0°C
 ● No.4 SM490B@0°C × No.16 SM490C@0°C
 ● No.5 SM400B@0°C



(b) $150J \leq vE < 200J$

○ No.6 SM490YB@0°C × No.19 SM400B@0°C
 ● No.9 SMA490BW@0°C □ No.20 SM490B@0°C
 ● No.17 SM490YB@0°C ▼ No.21 SM490YB@0°C
 ◇ No.18 SM490YB@0°C



(c) $vE < 150J$

図-2.2.11 規定温度でのシャルピー吸収エネルギーの予ひずみ量による変化^{2,16)}

表-2.2.2 シャルピー吸収エネルギーに対する冷間曲げ加工半径の許容値

シャルピー吸収エネルギー (J)	冷間曲げ加工の内側半径	付記記号 ^{注)}
150 以上	板厚の 7 倍以上	-7L, -7C
200 以上	板厚の 5 倍以上	-5L, -5C

注) 1 番目の数字 : 最小曲げ半径の板厚の倍率

2 番目の記号 : 曲げ加工方向 (L : 最終圧延方向と同一方向

C : 最終圧延方向と直角方向)

第2章 参考文献

- 2.1) (一社) 日本橋梁建設協会：鋼橋技術の変遷，2010.5
- 2.2) (一社) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），JSSC テクニカルレポート No. 51，2002.1
- 2.3) (一社) 日本鉄鋼協会：鋼中不純物元素の低減とその効果，第90・91回西山記念技術講座，1983.5
- 2.4) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.7
- 2.5) (一社) 日本鋼構造協会 JSSC，Vol. 2，No. 8，1966
- 2.6) 柳沼安俊，澁谷敦，平林泰明，三木千壽：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について，土木学会第57回年次学術講演会，I-291，2002.9
- 2.7) 一宮充，平林泰明，柳沼安俊，下里哲弘，三木千壽：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について（その2），土木学会第58回年次学術講演会，I-485，2003.9
- 2.8) (公財) JFE21世紀財団：大学教材鉄鋼工学《プロセス編》製鉄・製鋼・塑性加工，2007
- 2.9) 新日鐵住金（株）：厚板／総合カタログ，2018
- 2.10) (一社) 日本鋼構造協会：JSSC，Vol. 4，No. 33，1968
- 2.11) (一社) 日本高圧力技術協会：日本高圧力技術協会規格 [HPIS] 溶接後熱処理基準とその解説，1994.9
- 2.12) (株) 彰国社：鉄鋼の性質と高張力鋼，1967
- 2.13) (一社) 日本溶接協会：溶接などの各種熱加工により生ずる熱ひずみ履歴にともなう材質変化と継手性能，1979.2
- 2.14) (一社) 日本溶接協会：溶接施工管理標準（Ⅱ），1987.12
- 2.15) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.11
- 2.16) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，第300号，1980.8
- 2.17) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，No. 570/ I -40，1997.7

第3章 塑性変形を熱間加工した鋼材の機械的性質及び組織への影響の確認

3.1 試験概要

2.2.3 に熱間加工による鋼材の機械的性質、2.2.4 に冷間加工を受けた鋼材の機械的性質について示したが、地震や衝突による塑性変形の損傷を熱間加工にて補修するような、冷間加工後に熱間加工を行った鋼材の機械的性質に関する研究は調べた範囲ではなかった。塑性変形を熱間加工にて補修する場合、鋼材の機械的性質にどのような影響を及ぼすか明確ではない。

このことより、冷間曲げ加工後に熱間加工にて曲げ戻した場合において、鋼材の機械的性質及び組織への影響について検討する。また、参考として、冷間曲げ加工後に再度、冷間加工にて曲げ戻した場合の機械的性質及び組織への影響についても検討する。

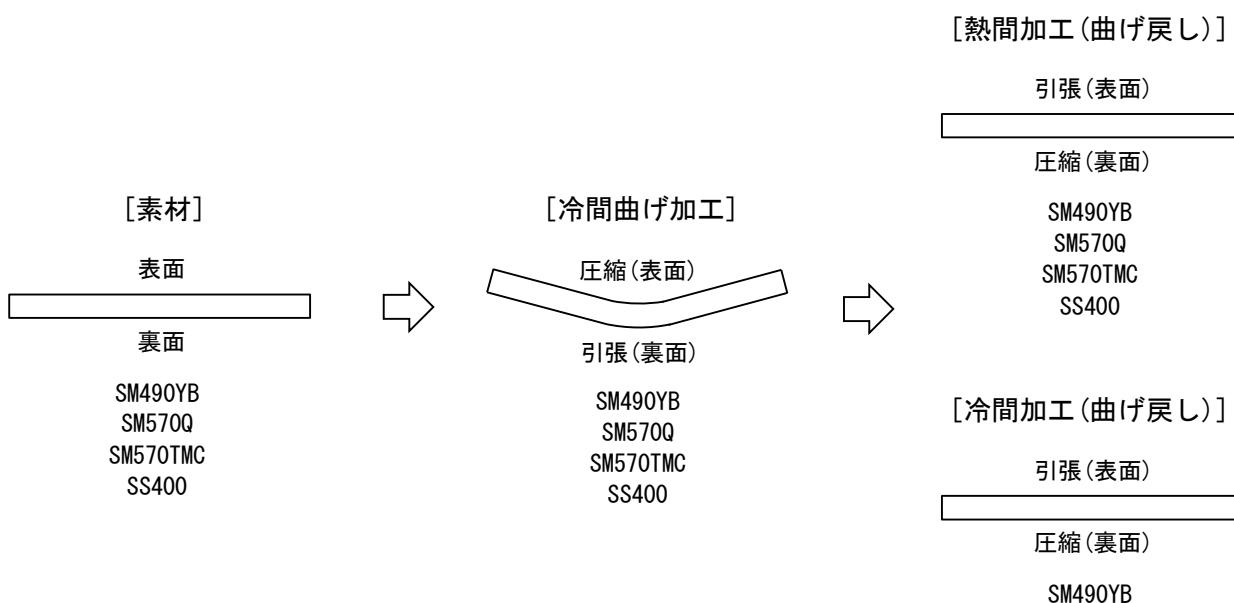


図-3.1.1 試験概要

3.2 試験方法

3.2.1 試験体

(1) 鋼材の種類

試験体に使用する鋼材の種類は、鋼材の製造プロセスでの熱処理方法により機械的性質及び組織への影響が異なるため、非調質鋼の SM490YB、調質鋼の SM570Q、TMCP 鋼の SM570TMC とした。さらに、古い年代の鋼材についても試験を行うものとし、撤去橋梁（1964 年竣工）から試験体を採取した。撤去橋梁の鋼材の材質は、化学成分分析及び金属組織確認により SS400（当時の SS41）と判断した。試験体を使用した鋼材の種類を表-3.2.1、各鋼材の化学成分と機械的性質（SS400 は除く）を表-3.2.2、表-3.2.3 に示す。

表-3.2.1 試験体に使用した鋼材の種類

鋼種		板厚	備考
非調質鋼	SM490YB	32 mm	新規ロール材
調質鋼	SM570Q	32 mm	新規ロール材
TMCP 鋼	SM570TMC	32 mm	新規ロール材
古い年代の鋼材	SS400	25 mm	撤去橋梁から採取（1964 年竣工）

表-3.2.2 SM490YB、SM570Q 及び SM570TMC の化学成分と機械的性質（ミルシート値）

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Ceq	Pcm
SM490YB	32	0.16	0.38	1.44	0.008	0.003	0.01	0.01	0.02	0	0.01	0	0	0.42	0.25
SM570Q	32	0.09	0.22	1.55	0.012	0.003	0.02	0.02	0.13	0	0.02	0.06	0.0001	0.39	0.19
SM570TMC	32	0.10	0.23	1.59	0.014	0.002	0.01	0.02	0.13	0	0.02	0.06	0.0001	0.41	0.20

鋼種	板厚 (mm)	引張試験					衝撃試験			
		採取位置	試験片	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	採取位置	試験片	試験温度 (°C)	平均値 (J)
SM490YB	32	ロール 直角方向	1A 号	394	534	32	ロール 方向	2 mm V ノッチ	0	240
SM570Q	32		5 号	587	678	44			-5	281
SM570TMC	32		5 号	553	668	45			-5	289

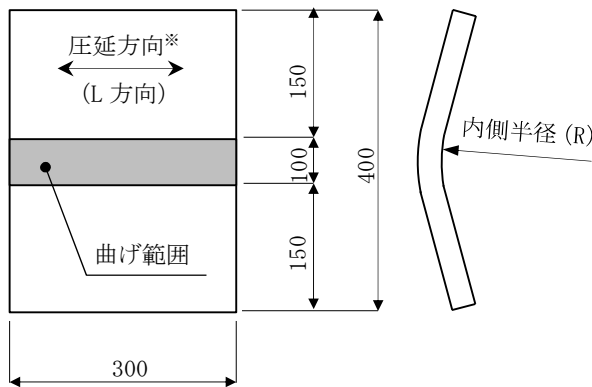
表-3.2.3 SS400 の化学成分（t/4 の位置の成分分析結果）

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Ceq	Pcm
SS400	25	0.13	0.46	1.31	0.015	0.008	0.29	0.11	0.11	0.019	—*	<0.000001	0.0003	0.40	0.25

※：Nb の成分分析は未実施

(2) 試験体形状

冷間曲げ加工の際の試験体形状を図-3.2.1に示す。冷間曲げ加工の曲げ方向は、素材の機械試験片の採取方向と合わせるために圧延直角方向（C方向）とした。なお、圧延方向と圧延直角方向にひずみを与えた場合のひずみ時効脆化によるシャルピー吸収エネルギーの低下量は、両者に有意な差は認められないとされている^{3.1)}。ただし、SS400については撤去橋梁からの試験体採取の都合上、試験体寸法400mmが撤去橋梁の橋軸方向としており、冷間曲げ加工の曲げ方向は圧延方向（L方向）と想定した。冷間曲げ加工後、熱間加工がしやすいように鋸盤にて幅100mmに切断し（SS400は除く）、1試験体あたり3体の熱間加工の試験体とした。熱間加工時の試験体形状を図-3.2.2に示す。



※：SS400の圧延方向は逆方向
(試験体寸法400mmの方向)

図-3.2.1 冷間曲げ加工の際の試験体形状

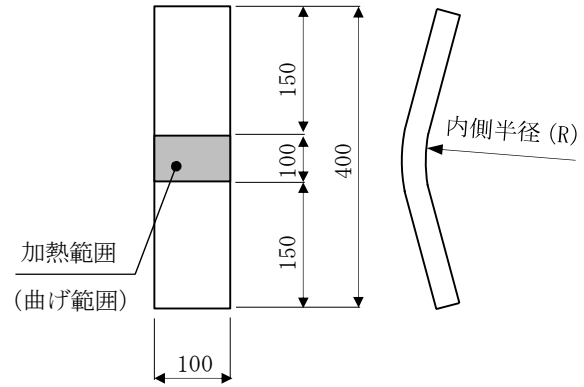


図-3.2.1の試験体を熱間加工前に幅100mmで鋸切断

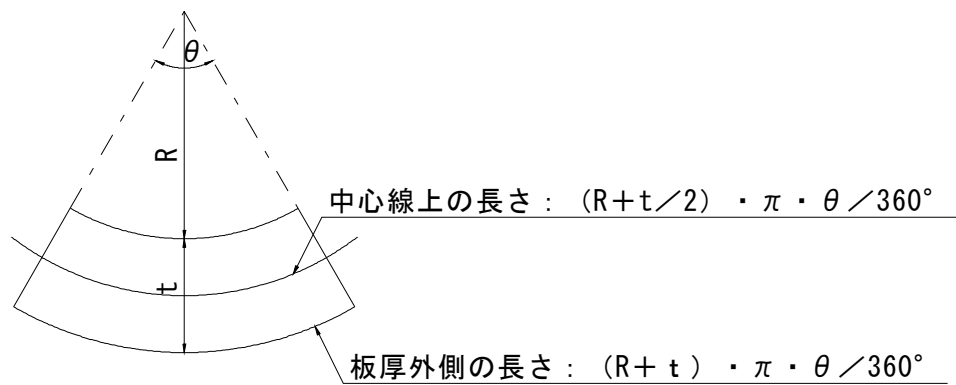
図-3.2.2 熱間加工時の試験体形状

3.2.2 冷間曲げ加工

鋼道路橋の主要部材の製作において冷間曲げ加工を行う場合、内側半径（R）は板厚の15倍以上（15t以上）とするのが望ましいとされている。本試験の冷間曲げ加工の内側半径（R）は、地震や衝突による変形が板厚の15倍（15t）よりも小さくなることもあることから、板厚の7倍（7t、ひずみ6.7%）程度を目標とし、曲げ加工治具の都合により表-3.2.4に示すとおりとした。冷間曲げ加工の内側半径（R）とひずみ（ ϵ ）の関係は図-3.2.3に示す。冷間曲げ加工の施工状況は写真-3.2.1に示す。

表-3.2.4 冷間曲げ加工の内側半径

鋼種	板厚	内側半径	ひずみ
SM490YB	32 mm	200R (6.25t)	7.4%
SM570Q	32 mm		
SM570TMC	32 mm		
SS400	25 mm	150R (6t)	7.7%



$$\begin{aligned} \varepsilon &= \left\{ (R+t) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ - (R+t/2) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ \right\} \\ &\quad / \left\{ (R+t/2) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ \right\} \times 100 \\ &= (t/2) / (R+t/2) \times 100 \end{aligned}$$

ここに、

ε : ひずみ (%)

R : 内側半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

図-3. 2. 3 冷間曲げ加工の内側半径とひずみの関係



a) 冷間曲げ加工の施工中



b) 冷間曲げ加工の施工後

写真-3. 2. 1 冷間曲げ加工の施工状況

3.2.3 熱間加工

(1) 加熱温度

鋼材の特性を考慮した加熱温度の上限は、2.2.1 で非調質鋼は 720℃以下、調質鋼及び TMCP 鋼は 650℃以下と鋼材の製造時の熱処理の温度から設定した。しかし、熱間加工の施工性を考えると加熱温度が高い方がよい。そこで、本試験では 900℃の熱間加工での機械的性質を確認することとした。調質鋼の SM570Q 及び TMCP 鋼の SM570TMC については、650℃を超えた場合の強度の低下は明らかであるため、機械的性質への影響がないと考えられる 650℃の熱間加工も行った。表-3.2.5 に本試験での熱間加工の加熱温度を示す。

表-3.2.5 熱間加工の加熱温度

鋼種		熱間加工の加熱温度
非調質鋼	SM490YB	900℃
調質鋼	SM570Q	900℃
		650℃
TMCP 鋼	SM570TMC	900℃
		650℃
古い年代の鋼材	SS400	900℃

(2) 加熱方法

加熱方法は、実際の施工方法と同様に加熱バーナーを用い、試験体の板厚中心が表-3.2.5 に示した熱間加工の加熱温度付近となるように試験体の両面から加熱した。また、試験体両面の加熱範囲全体が目標とする加熱温度に達するように、両面の表面温度を計測しながら加熱した。表面温度は、加熱時の加熱炎の影響が小さく、瞬時に表面温度が計測できる赤外線非接触表面温度計にて計測した。試験体の加熱方法を図-3.2.4、加熱状況を写真-3.2.2 に示す。なお、試験前に試験体の板厚中心が熱間加工の加熱温度付近となる加熱方法を確認している。

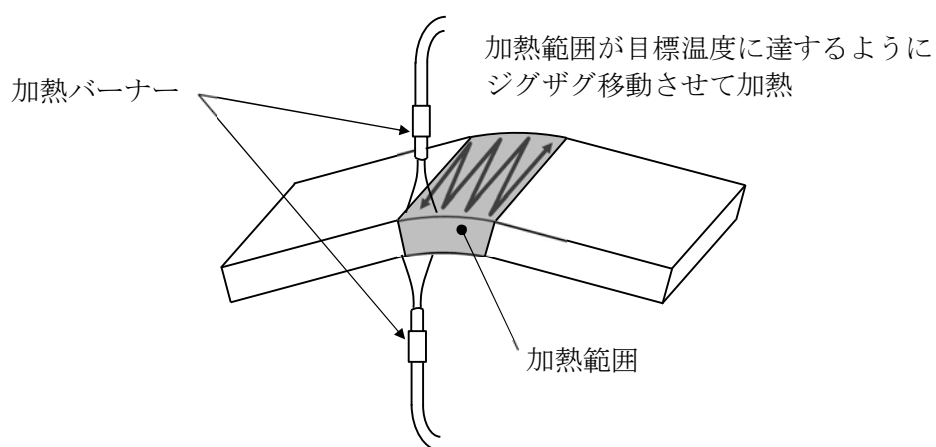


図-3.2.4 試験体の加熱方法



a) SS400、SM490YB 試験体の加熱

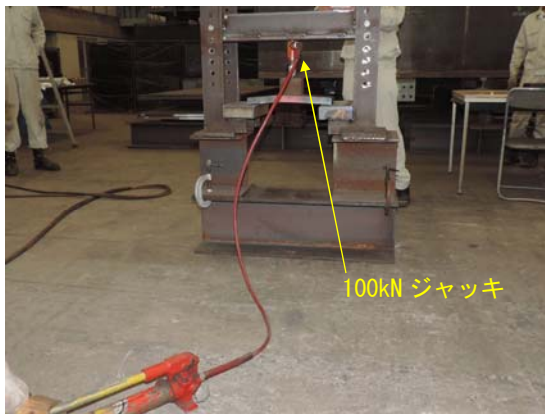


b) SM570Q、SM570TMC 試験体の加熱

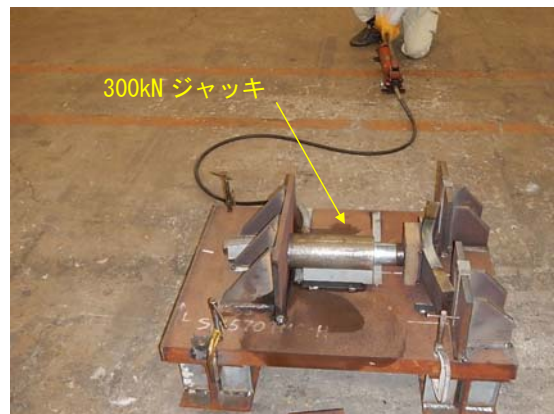
写真-3.2.2 試験体の加熱状況

(3) 矯正方法

加熱後の矯正は、目標とする加熱温度とした直後に油圧ジャッキにて外力を加え、試験体が平坦になるまでとした。矯正中の温度は、青熱脆性（強度は上昇するがじん性は低下）が生じる 150～400℃に低下することのないようにした。なお、矯正後の試験体は若干の凹凸が生じたが、その凹凸を矯正するための再加熱や再矯正は行わなかった。加熱後の冷却法は、急冷によるじん性低下を避けるため、空冷とした。矯正が完了した時の表面温度は、加熱温度が 900℃の場合は 600～700℃、650℃の場合は 500℃前後であった。矯正状況を写真-3.2.3 に示す。



a) SS400、SM490YB 試験体の矯正



b) SM570Q、SM570TMC 試験体の矯正

写真-3.2.3 試験体の矯正状況

3.2.4 冷間加工による曲げ戻し

地震や衝突による変形が大きい場合（内側半径（R）が小さい場合）、または板厚が大きい場合は、冷間加工による曲げ戻しはじん性が低下したり、矯正に必要な外力が大きくなるため、一般的に行われていないが、機械的性質及び組織を確認するために SM490YB については冷間加工による矯正（曲げ戻し）を行った。熱間加工と同様に、矯正後の試験体は若干の凹凸が生じたが、その凹凸を矯正するための再加熱や再矯正は行わなかった。

3.2.5 時効促進処理

試験体は、冷間曲げ加工及び熱間加工による曲げ戻しによるひずみ時効脆化を考慮する。しかし、ひずみ時効脆化は、冷間曲げ加工により塑性ひずみが与えられ硬化し、これに伴い長い時間をかけてじん性が低下するので長時間の暴露が必要になる。そこで、時効促進処理により、ひずみ時効脆化を促進させる。時効促進処理は、文献 3.2) と同様に 250℃の環境下で 1 時間保持の条件にて行った。この条件は、文献 3.1) にて自然放置によるひずみ時効との対比がなされ、半年ないしそれ以上の自然放置に対応するものと判断されると、その妥当性が示されている。時効促進処理の時期を図-3.2.5、時効促進処理の施工状況を写真-3.2.4 に示す。

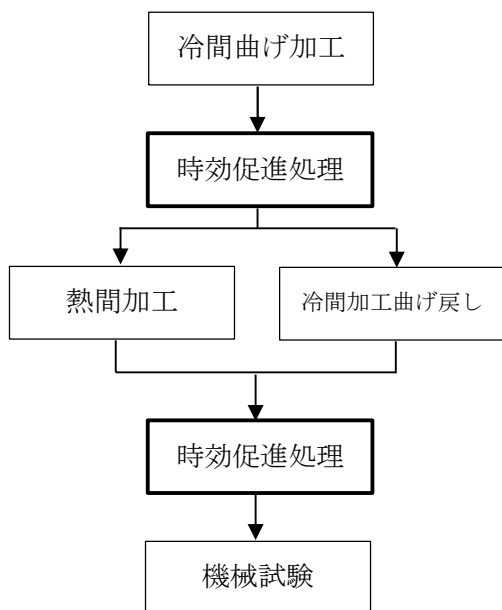


図-3.2.5 時効促進処理の時期



写真-3.2.4 時効促進処理の施工状況

3.3 金属材料試験の種類と試験片の採取要領

金属材料試験の種類は、引張試験、衝撃試験、金属組織試験、硬さ試験とした。SM570Q と SM570TMC は、加熱温度 900℃と 650℃の両温度とも上記の 4 種類の試験を行った。

引張試験片は、5 号試験片 (JIS Z 2241) とし、試験体の熱間加工範囲が 5 号試験片の平行部の全体となるようにした。なお、冷間曲げ加工後では、まっすぐな板状試験片 (5 号試験片) の採取ができないため、引張試験は行わない。

衝撃試験片 (JIS Z 2242 : V ノッチ試験片) の板厚方向の採取位置は、鋼材の JIS の規定と同様に板厚 (t) の 1/4 とした。試験温度は、シャルピー吸収エネルギーの遷移温度を確認するために、JIS で規定されている試験温度の他、SM490YB と SS400 は -40℃、-20℃及び 20℃、SM570 は -60℃、-40℃及び -20℃ の試験温度についても行った。また、本試験は曲げによるひずみを導入しており、引張側と圧縮側のひずみが生じるが、文献 3.3) では圧縮予ひずみのほうが引張予ひずみよりも鋼材をより脆化させる傾向にあるとされていることから、その傾向を確認するために SM490YB は引張側と圧縮側の両側で衝撃試験を行い、その他の鋼種は SM490YB の衝撃試験結果でシャルピー吸収エネルギーの低下率が大きい側のみ衝撃試験を行うものとした。

金属組織試験は、熱間加工による加熱や矯正が金属組織にどの程度影響するかを確認するために、表裏面近傍と板厚中心の 3 箇所を 100 倍と 400 倍にて観察した。

硬さ試験は、ビッカース硬さ試験とし、金属組織試験後の試験片を用いて板厚方向に計測した。

金属材料試験の種類を表-3.3.1、試験片の採取要領を表-3.3.2 に示す。

表-3.3.1 金属組織試験の種類

鋼種	試験体の種類	試験の種類
SM490YB、SM570Q、 SM570TMC、SS400	素材	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB、SM570Q、 SM570TMC、SS400	冷間曲げ加工後	衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB、SM570Q※、 SM570TMC※、SS400	冷間曲げ加工後 熱間加工	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験

※：熱間加工の加熱温度が 900℃の場合と 650℃の場合の 2 種類

表-3.3.2 試験片の採取要領

鋼種	試験体の種類	試験の種類	試験片採取位置	試験片形状	個数	備考
SM490YB	素材	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	表面と裏面の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後	衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）と圧縮側（表面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）と圧縮側（裏面） で t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）と圧縮側（裏面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	SM570Q SM570TMC	素材	引張試験	圧延 直角方向	5号	1
衝撃試験			圧延 方向	Vノッチ	各3	表面の t/4 から採取 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
金属組織試験			圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
冷間曲げ加工後		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）の t/4 から採取* 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
冷間曲げ加工後 900℃熱間加工、 650℃熱間加工		引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）の t/4 から採取* 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
SS400		素材	引張試験	圧延 方向	5号	1
	衝撃試験		圧延 直角方向	Vノッチ	各3	表面の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
	金属組織試験		圧延直角 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後	衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）と圧縮側（表面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	引張試験	圧延 方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 直角方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）の t/4 から採取* 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延直角 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験

※：SM490YBの衝撃試験結果より、加工後に引張側となる方向から採取

3.4 試験結果

3.4.1 引張試験結果 (JIS Z 2241 : 5号試験片)

各試験体の引張試験結果を表-3.4.1～表-3.4.4、図-3.4.1～図-3.4.4に示す。

SM490YBは、素材の降伏点または0.2%耐力(以降、降伏点)が 396N/mm^2 に対し、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工の降伏点は 320N/mm^2 と低下し、さらに降伏点の規格値($\geq 355\text{N/mm}^2$)も下回った。引張強さは、素材が 534N/mm^2 に対し、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工は 519N/mm^2 と若干低下したが、引張強さの規格値($490\sim 610\text{N/mm}^2$)を満足している。しかし、素材の強度のばらつきを考慮すると、もともと規格値ぎりぎりのものは、加熱により引張強さも規格値を下回ることがあると考えられる。SM490YBは 900°C 加熱の熱間加工では強度に影響すると言える。なお、強度の低下の程度は、2.2.1の図-2.2.5で示した高温の状態を長時間保持した場合と同程度である。伸びについては素材が49.1%、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では51.5%であり、伸びへの影響は小さい。冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは、降伏点が 451N/mm^2 、引張強さが 576N/mm^2 、伸びが43.0%であり、素材と比較して降伏点及び引張強さが大きくなり、伸びが低下している。これは、冷間塑性加工による加工硬化の影響である。

SM570Qは、素材の降伏点が 589N/mm^2 、引張強さが 681N/mm^2 に対し、冷間曲げ加工後 650°C 熱間加工では降伏点が 539N/mm^2 、引張強さは 631N/mm^2 と両方とも低下する傾向ではあるが、規格値(降伏点 $\geq 450\text{N/mm}^2$ 、引張強さ $570\sim 720\text{N/mm}^2$)を満足している。伸びも、素材が41.8%に対し、冷間曲げ加工後 650°C 熱間加工では42.4%とほとんど変化していない。一方、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では、焼戻し温度以上での熱間加工のため、降伏点が 383N/mm^2 、引張強さが 500N/mm^2 と両方とも大きく低下し、規格値も大きく下回っている。伸びは、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工で53.8%であり、強度が低下したため大きく増加している。

SM570TMCはSM570Qと同じ傾向であり、素材の降伏点が 551N/mm^2 、引張強さが 677N/mm^2 に対し、冷間曲げ加工後 650°C 熱間加工では降伏点が 564N/mm^2 、引張強さが 648N/mm^2 であり、規格値(降伏点 $\geq 450\text{N/mm}^2$ 、引張強さ $570\sim 720\text{N/mm}^2$)を満足している。伸びも、素材が42.4%に対し、冷間曲げ加工後 650°C 熱間加工では44.4%とほとんど変化していない。冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では、冷却停止温度以上での熱間加工のため、降伏点が 389N/mm^2 、引張強さが 504N/mm^2 と両方とも大きく低下し、SM570Qと同様に規格値を大きく下回っている。伸びは、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工で53.7%であり、SM570Qと同様に大きく増加している。

古い年代の鋼材のSS400は、素材の降伏点が 402N/mm^2 、引張強さが 538N/mm^2 に対し、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では降伏点が 434N/mm^2 、引張強さが 533N/mm^2 と強度への影響はほとんど認められない。ただし、素材の引張強さが高く、引張強さは規格値($400\sim 510\text{N/mm}^2$)を上回っている。この要因として、SS400以外は圧延直角方向から引張試験片を採取しているが、SS400は撤去橋梁からの試験体採取の都合上、圧延方向と思われる方向での試験であることから、試験片の採取方向の違いにより規格値を上回ったと考えられる。なお、当時の基準である溶接鋼道路橋示方書(昭和32年)はSS41、SM41またはSM41Wのみ適用するとしており、 41kgf/mm^2 級以外の鋼材は適用していないと推測され、化学成分分析及び金属組織確認による鋼種の判断が間違っていないと考える。

表-3.4.1 SM490YB 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	破断 位置
SM490YB	(規格値)	—	(≥ 355)	(490~610)	(≥ 19) ※	—
	素材	AT	396	534	49.1	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	HT	320	519	51.5	A
	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	MT	451	576	43.0	A

※：SM490YB の伸びの規格値は 1A 号試験片での値

表-3.4.2 SM570Q 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	破断 位置
SM570Q	(規格値)	—	(≥ 450)	(570~720)	(≥ 26)	—
	素材	QAT	589	681	41.8	A
	冷間曲げ加工後 650℃熱間加工	QH6T	539	631	42.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	QH9T	383	500	53.8	A

表-3.4.3 SM570TMC 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	破断 位置
SM570TMC	(規格値)	—	(≥ 450)	(570~720)	(≥ 26)	—
	素材	TAT	551	677	42.4	A
	冷間曲げ加工後 650℃熱間加工	TH6T	564	648	44.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	TH9T	389	504	53.7	A

表-3.4.4 SS400 (古い年代の鋼材) 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	破断 位置
SS400	(規格値) <当時の規格値>	—	(≥ 235) < ≥ 23 >	(400~510) <41~50>	(≥ 21) ※ < ≥ 20 >	—
	素材	SAT	402	538	47.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	SHT	434	533	49.0	A

※：SS400 の伸びの規格値は 1A 号試験片での値

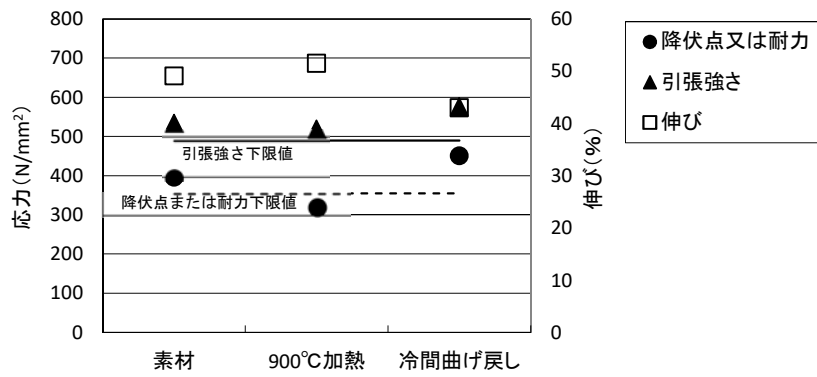


図-3.4.1 SM490YB 引張試験結果

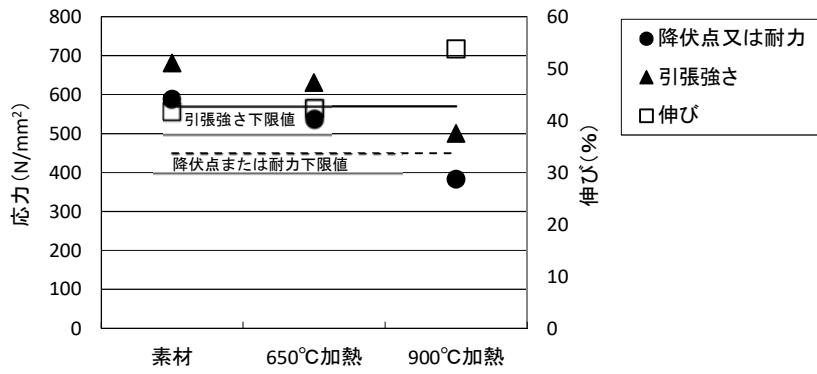


図-3.4.2 SM570Q 引張試験結果

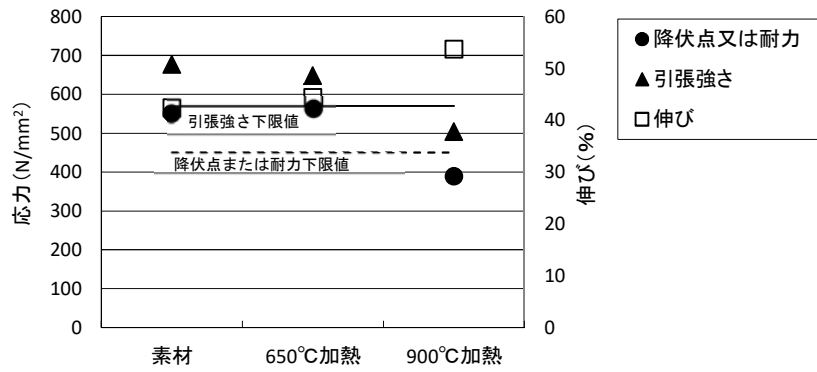


図-3.4.3 SM570TMC 引張試験結果

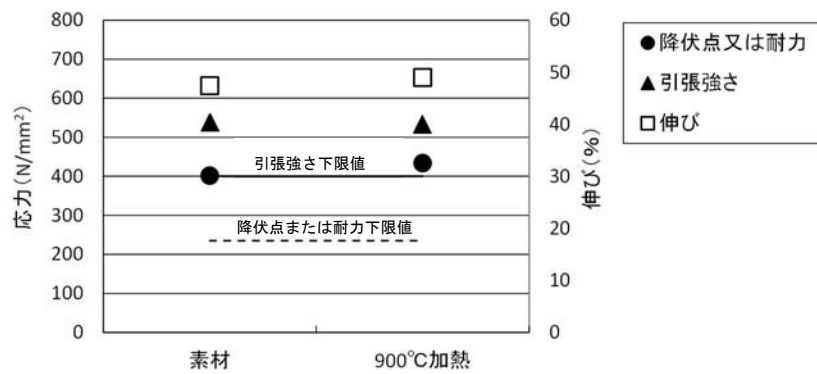


図-3.4.4 SS400 引張試験結果

3.4.2 衝撃試験結果 (JIS Z 2242 : V ノッチ試験片)

SM490YB の衝撃試験結果を表-3.4.5、図-3.4.5 に示す。衝撃試験片の採取位置は表-3.3.2 に示すとおり板厚 (t) の 1/4 で、SM490YB では、素材の表面と裏面、及び冷間曲げ加工、熱間加工、冷間加工による曲げ戻しによる引張側と圧縮側から試験片を採取している。

素材は、図-3.4.5 の a) **素材の吸収エネルギー** を見てわかるように、表面と裏面の吸収エネルギーの差異はなく、両面とも試験温度の低下 (-20°C、-40°C) による急激な吸収エネルギーの低下が見られず、遷移温度は-40°C よりも低い。冷間曲げ加工後は (図-3.4.5 の b) **冷間曲げ加工後の吸収エネルギー**)、試験温度 0°C の吸収エネルギーでの素材との差異は認められないが、試験温度-40°C の吸収エネルギーでは素材の表面が 140J で裏面が 138J に対し、冷間曲げ加工後の表面 (圧縮側) が 101J で裏面 (引張側) が 55J であり、冷間塑性変形によるひずみの影響により大きく低下している。一方、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工は (図-3.4.5 の c) **900°C 熱間加工の吸収エネルギー**)、冷間曲げ加工後で大きく低下した試験温度-40°C の吸収エネルギーで比較すると、表面 (引張側) が 140J で裏面 (圧縮側) が 141J であり、素材の吸収エネルギーに近い値となっており、これは 900°C の加熱により組織が細粒化したためと考えられる。

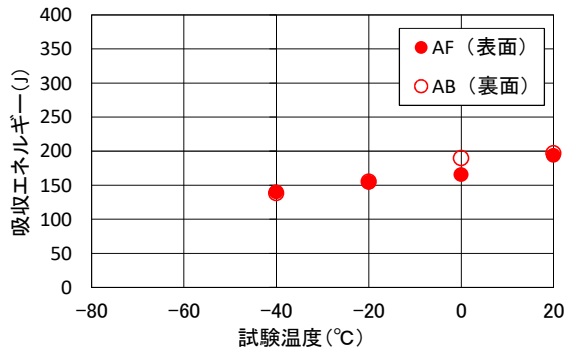
なお、900°C は組織の変態点付近であるため、冷間曲げ加工によるひずみの影響はなくなる。冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは (図-3.4.5 の d) **冷間加工曲げ戻しの吸収エネルギー**)、素材と比較すると試験温度 0°C の吸収エネルギーは低下し、-20°C と -40°C では大きく低下しており、ひずみの影響がさらに大きくなっている。冷間曲げ加工後と比較すると、冷間曲げ加工後よりも遷移温度が高温側にシフトしていることがわかる。

素材を除く試験体の種類での引張側と圧縮側の吸収エネルギーは明瞭な差異は認められず、本試験でのひずみ量では引張側と圧縮側の吸収エネルギーに差はない。また、素材の表側と裏側でも吸収エネルギーの差はない。このことより、SM570Q、SM570TMC 及び SS400 については、素材は表面から、加工後は引張側となる面から試験片を採取することにした。この採取位置での SM490YB の加工状態ごとの吸収エネルギーを図-3.4.6 に示す。

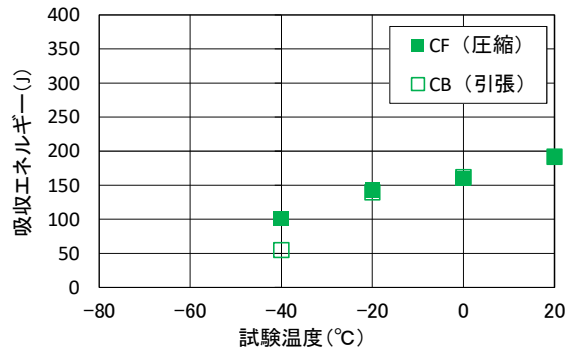
表-3.4.5 SM490YB 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SM490YB	27J 以上 (試験温度 0°C)	素材	表面	AF1	20	194
				AF2	0	166
				AF3	-20	154
				AF4	-40	140
			裏面	AB1	20	197
				AB2	0	190
				AB3	-20	155
				AB4	-40	138
		冷間曲げ加工後	表面 (圧縮側)	CF1	20	191
				CF2	0	160
				CF3	-20	143
				CF4	-40	101
			裏面 (引張側)	CB1	20	192
				CB2	0	162
				CB3	-20	139
				CB4	-40	55
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	HF1	20	202
				HF2	0	216
				HF3	-20	159
				HF4	-40	141
			裏面 (圧縮側)	HB1	20	209
				HB2	0	198
				HB3	-20	171
				HB4	-40	147
		冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	表面 (引張側)	MF1	20	161
				MF2	0	140
				MF3	-20	110
				MF4	-40	19
裏面 (圧縮側)	MB1		20	169		
	MB2		0	141		
	MB3		-20	102		
	MB4		-40	28		

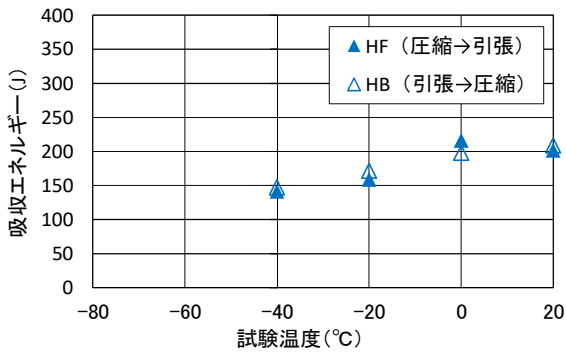
※ : 3 個の試験片の平均値



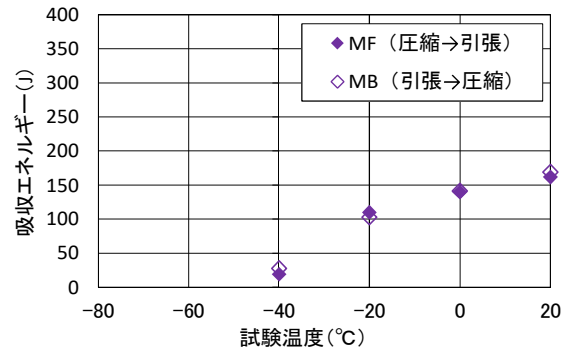
a) 素材の吸収エネルギー



b) 冷間曲げ加工後の吸収エネルギー



c) 900°C熱間加工の吸収エネルギー



d) 冷間加工曲げ戻しの吸収エネルギー

図-3.4.5 SM490YB 衝撃試験結果

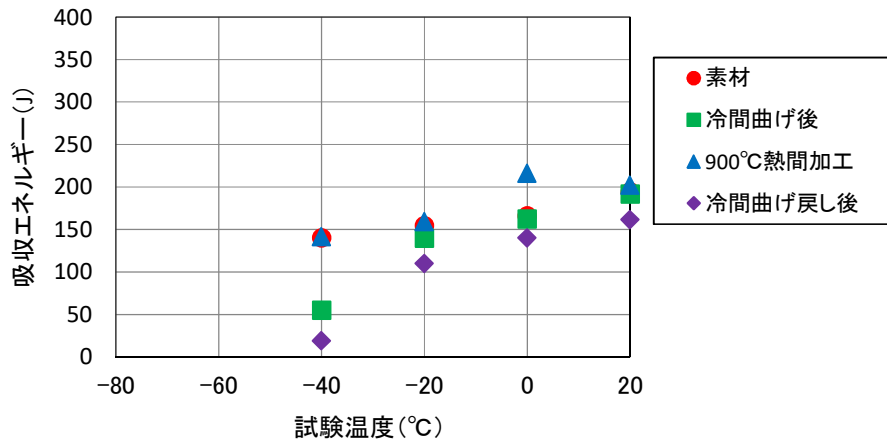


図-3.4.6 SM490YB の加工状態ごとの吸収エネルギー

SM570Q、SM570TMC 及び SS400 の衝撃試験結果を表-3.4.6 及び表-3.4.7、図-3.4.7～図-3.4.9 に示す。

SM570Q と SM570TMC は図-3.4.7 及び図-3.4.9 を見てわかるように、まず素材の遷移温度は -60°C よりも低い、冷間曲げ加工後は試験温度 -5°C での吸収エネルギーはほとんど変化していないものの、冷間塑性変形によるひずみの影響により -60°C では大きく低下し、遷移温度が高温側にシフトしている。つぎに冷間曲げ加工後 650°C 熱間加工では、SM570Q と SM570TMC とも素材と同程度の吸収エネルギーまで回復しており、再結晶温度付近である 650°C の加熱によりひずみの影響が非常に小さくなったと考えられる。冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では、素材の吸収エネルギーと同等以上となっており、鋼材の製造プロセスの熱処理温度を超えた加熱により組織が変化したためと考えられる。

SS400 (図-3.4.9) の素材の吸収エネルギーは SM490YB、SM570Q 及び SM570TMC と比較して低く、遷移温度も高温側である。冷間曲げ加工後では 0°C で大きく低下しており、この理由として SS400 はシャルピー吸収エネルギーを要求していないこと、及び古い年代の鋼材であることが言える。冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工では、SM490YB と同様に組織の変態点付近である 900°C の加熱のため冷間曲げ加工によるひずみの影響がなくなり、さらに組織が細粒化したことにより素材の吸収エネルギーと同程度となっている。

表-3.4.6 SM570Q 及び SM570TMC 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SM570Q	47J 以上 (試験温度-5°C)	素材	表面	QA1	-5	286
				QA2	-20	262
				QA3	-40	205
				QA4	-60	193
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	QC1	-5	271
				QC2	-20	275
				QC3	-40	187
				QC4	-60	88
		冷間曲げ加工後 650°C熱間加工	表面 (引張側)	QH61	-5	316
				QH62	-20	296
				QH63	-40	245
				QH64	-60	193
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	QH91	-5	328
				QH92	-20	327
				QH93	-40	283
				QH94	-60	271
SM570TMC	47J 以上 (試験温度-5°C)	素材	表面	TA1	-5	273
				TA2	-20	271
				TA3	-40	265
				TA4	-60	259
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	TC1	-5	255
				TC2	-20	251
				TC3	-40	227
				TC4	-60	169
		冷間曲げ加工後 650°C熱間加工	表面 (引張側)	TH61	-5	265
				TH62	-20	258
				TH63	-40	252
				TH64	-60	230
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	TH91	-5	284
				TH92	-20	315
				TH93	-40	273
				TH94	-60	269

※：3 個の試験片の平均値

表-3.4.7 SS400 (古い年代の鋼材) 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SS400	—	素材	表面	SA1	20	125
				SA2	0	101
				SA3	-20	87
				SA4	-40	42
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	SC1	20	81
				SC2	0	43
				SC3	-20	31
				SC4	-40	18
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	SH1	20	117
				SH2	0	122
				SH3	-20	81
				SH4	-40	43

※：3 個の試験片の平均値

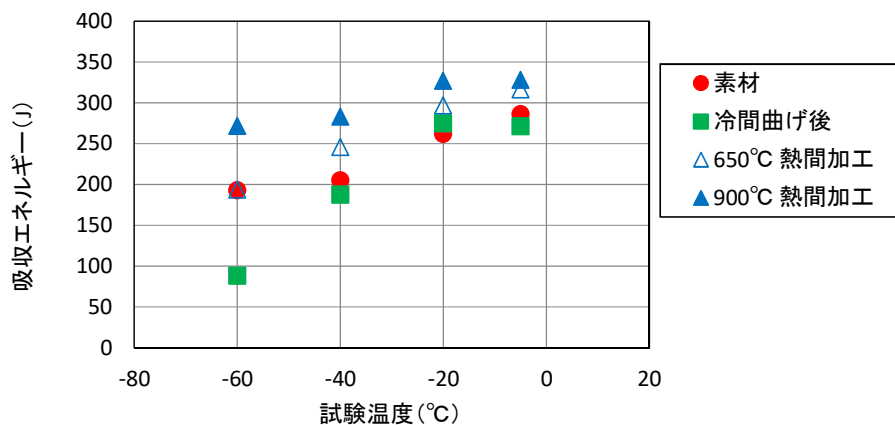


図-3. 4. 7 SM570Q の加工状態ごとの吸収エネルギー

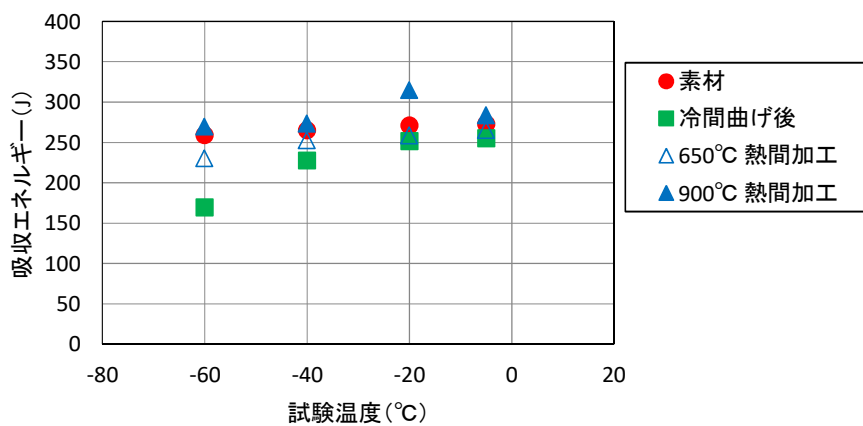


図-3. 4. 8 SM570TMC の加工状態ごとの吸収エネルギー

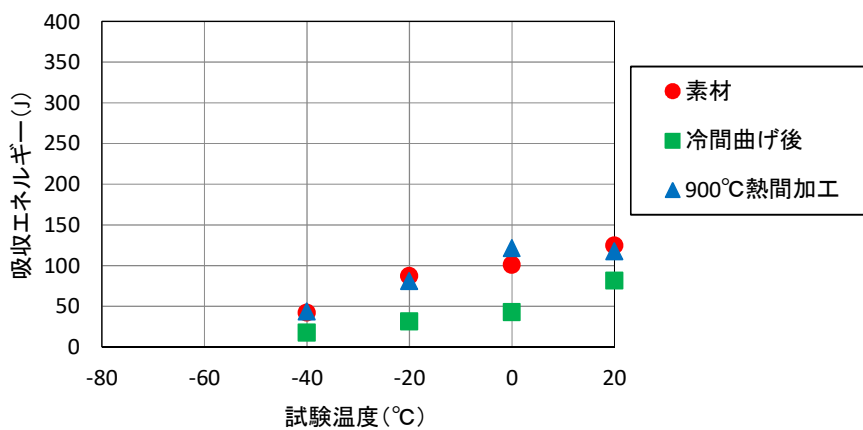


図-3. 4. 9 SS400 の加工状態ごとの吸収エネルギー

3.4.3 金属組織試験結果

金属組織試験は、鋼材の金属組織が熱間加工によりどのように変化したのかを確認するために行い、各試験体の素材と熱間加工後の試験体表面の金属組織を写真-3.4.1～写真-3.4.4に示す。各試験体の素材と熱間加工後の金属組織は、以下のとおりであった。

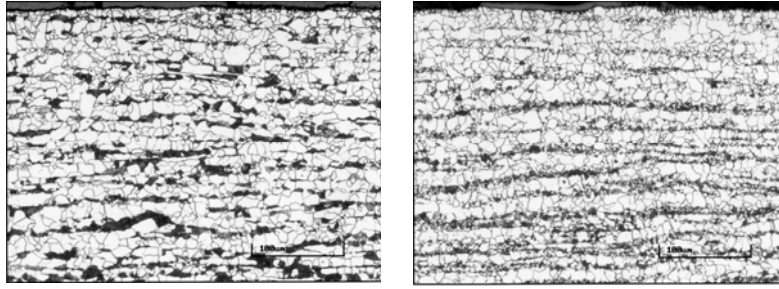
素材の金属組織

- ・ SM490YB、SS400 : フェライト・パーライト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC : 焼戻しベイナイト組織

熱間加工後の金属組織

- ・ SM490YB、SS400 の冷間曲げ加工後 900℃熱間加工後 : 素材よりも結晶粒が若干微細化されたフェライト・パーライト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC の冷間曲げ加工後 650℃熱間加工後 : 素材とほとんど変化がない焼戻しベイナイト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC の冷間曲げ加工後 900℃熱間加工後 : フェライト・パーライト組織に変化

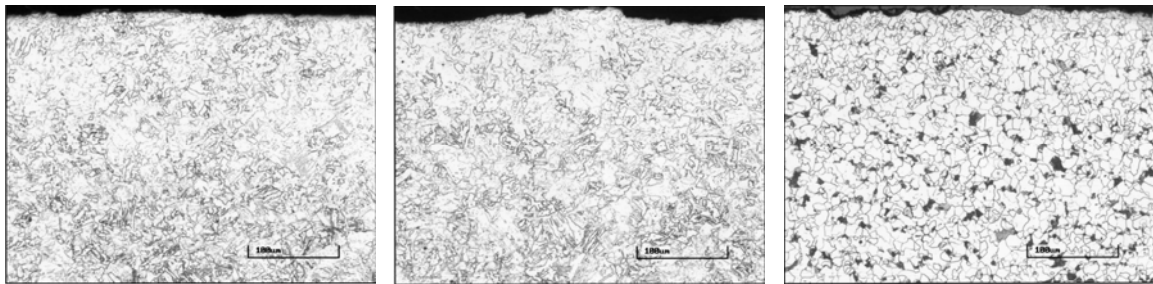
なお、各鋼材の素材と冷間曲げ加工後（SM490YB は冷間加工曲げ戻しも含む）の金属組織を比較すると、結晶粒の変形が見られず、ほとんど変化がなかった。



a) 素材

b) 900°C熱間加工後

写真-3.4.1 SM490YB 金属組織（試験体表面）

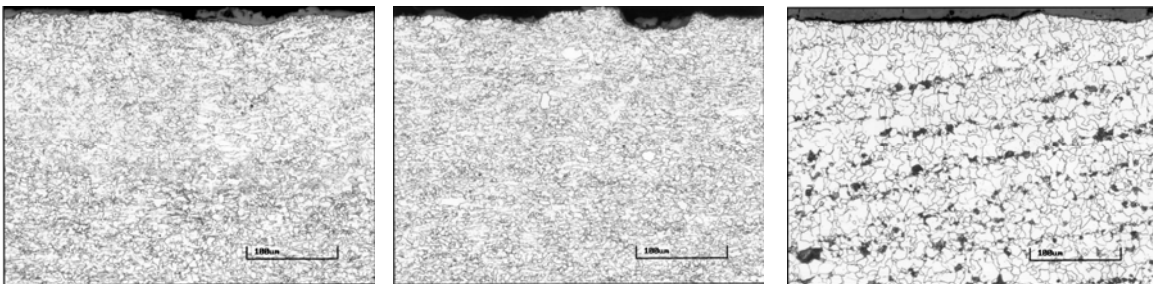


a) 素材

b) 650°C熱間加工後

c) 900°C熱間加工後

写真-3.4.2 SM570Q 金属組織（試験体表面）

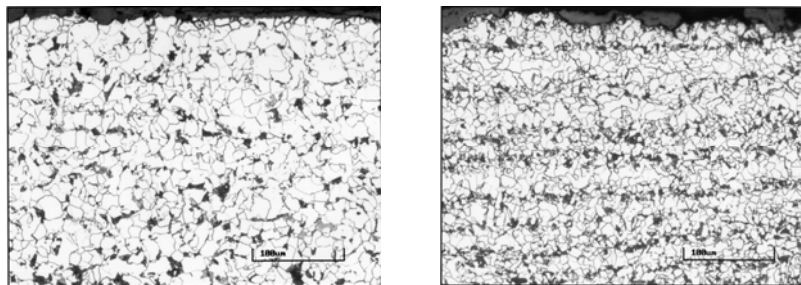


a) 素材

b) 650°C熱間加工後

c) 900°C熱間加工後

写真-3.4.3 SM570TMC 金属組織（試験体表面）



a) 素材

b) 900°C熱間加工後

写真-3.4.4 SS400 金属組織（試験体表面）

3.4.4 硬さ試験結果 (JIS Z 2244 : 硬さ記号 HV10)

各試験体の硬さ試験結果を図-3.4.10～図-3.4.13に示す。いずれの鋼材においても、冷間曲げ加工後の硬さが表層から10 mm付近まで上昇しており、冷間塑性加工による加工硬化が生じている。SM490YBの冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは、さらに硬さが大きくなっている。硬さと引張強さは比例関係にあることから、冷間塑性加工により強度が高くなり、冷間曲げ加工戻しのような加工を行うと、さらに強度が高くなることがわかる。SM490YBとSS400の冷間曲げ加工後900℃熱間加工、並びにSM570QとSM570TMCの冷間曲げ後650℃熱間加工の硬さは、素材とほぼ同じになっている。SM570QとSM570TMCの冷間曲げ加工後900℃熱間加工の硬さは、引張試験結果と同様に大きく低下しており、図-3.4.10に示すSM490YBの素材と同等の硬さまで低下している。

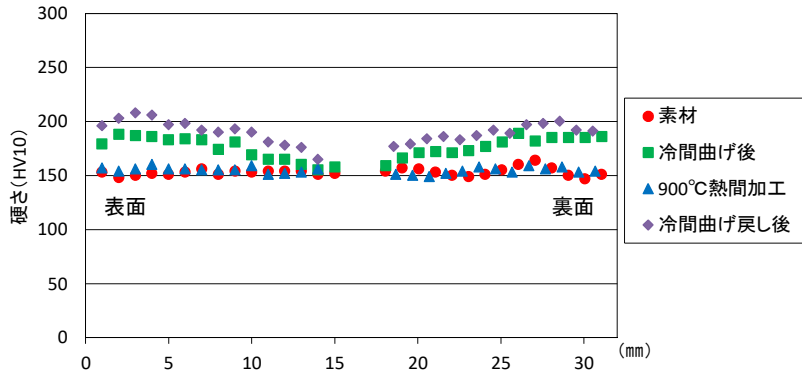


図-3.4.10 SM490YB の加工状態ごとの硬さ

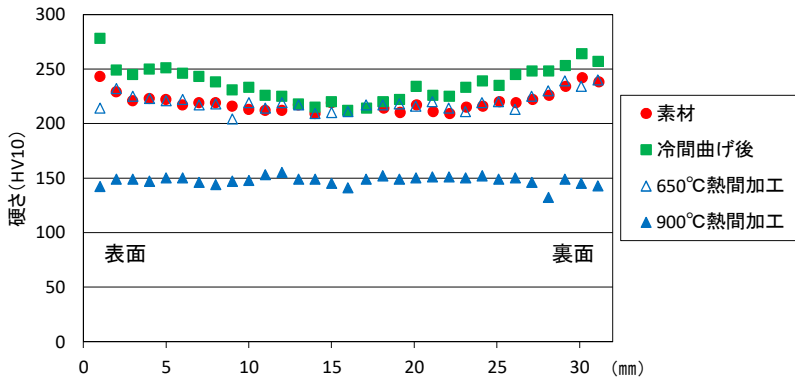


図-3.4.11 SM570Q の加工状態ごとの硬さ

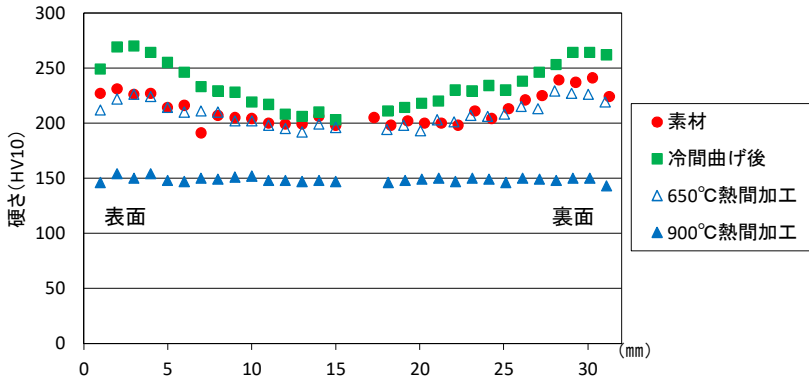


図-3.4.12 SM570TMC の加工状態ごとの硬さ

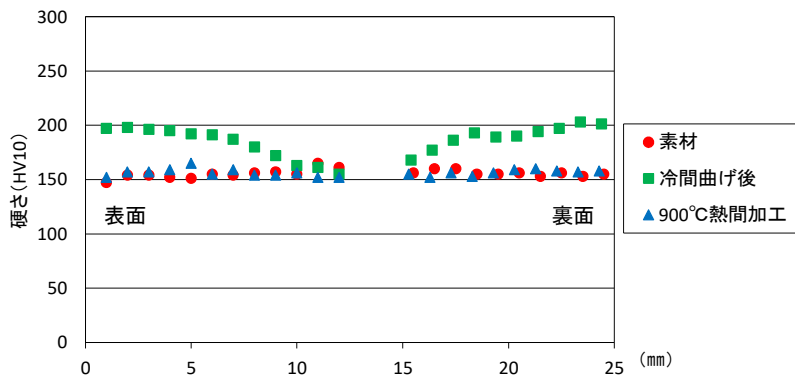


図-3.4.13 SS400 の加工状態ごとの硬さ

第3章 参考文献

- 3.1) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，第300号，1980.8
- 3.2) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，1997.7
- 3.3) 三木千壽，佐々木栄一，休場裕子，竹之井勇：引張および圧縮の塑性歪み履歴による鋼材の破壊靱性劣化，土木学会論文集，No.640/I-50，2000.1

第4章 加熱矯正による補修事例と考察

加熱矯正による補修が報告された文献を示すと共に、本節でその概要を紹介し、考察を行う。

4.1 下フランジの変形に対する補修事例

4.1.1 損傷および補修事例概要

(1) 文献

亀山誠二（瀧上工業）、「加熱プレス矯正を用いた既設橋の主桁フランジ変形部の補修」、第19回土木施工管理技術論文集 No.30、（一社）全国土木施工管理技士会連合会

(2) 損傷状況

河川を跨ぐ鉄桁の下フランジが損傷した事例である。車両の衝突によるものと推定されている。下フランジの変形とそれに伴う垂直補剛材下端の変形が確認されている。（写真-4.1.1）



写真-4.1.1 損傷状況

(3) 補修概要

垂直補剛材については、前後に山形鋼を用いた垂直補剛材を新設している。また、下フランジに関しては、加熱矯正で変形を戻した上で当て板補強を施している。

加熱矯正のステップを図-4.1.2に、補修状況を写真-4.1.2に示す。

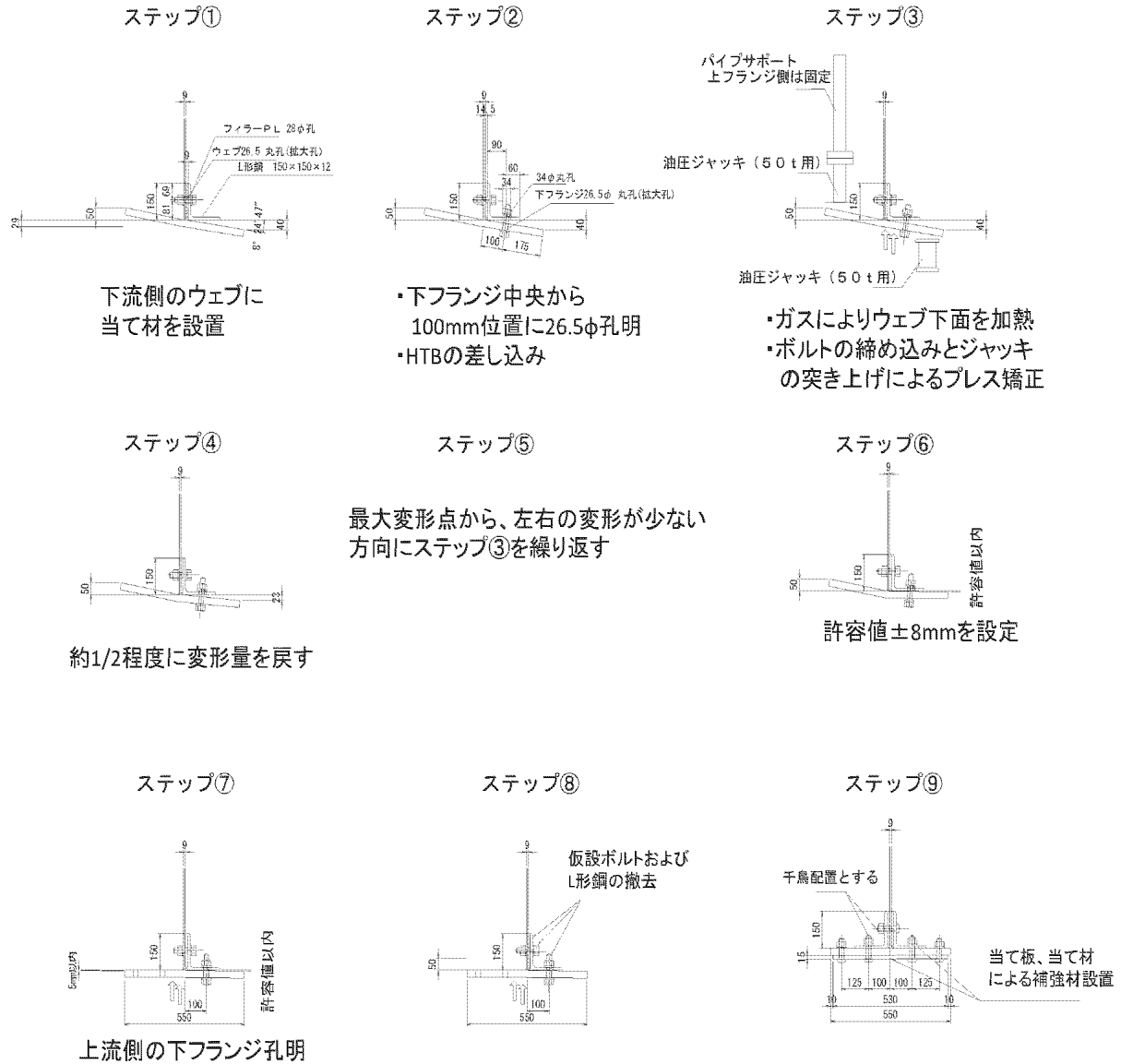


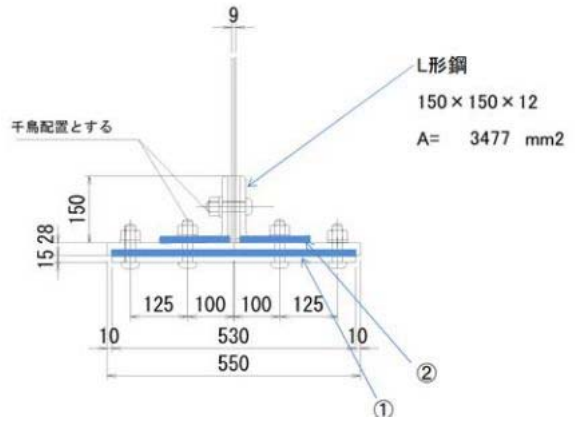
図-4.1.1 補修ステップ

矯正は、設置したベント上からのジャッキ（上向き）と、上フランジから設置したパイプサポートとジャッキ（下向き）、および補強部材を流用した部材のボルトの締め付力によって行っている。加熱箇所は、下面からは下フランジ中央、上面からはウェブの下端としている。

作業は、一度に全変形量を矯正するのではなく、最大変形点から両側に徐々に矯正し、それを何度か繰り返すことにより管理値以下まで変形を矯正している。（図-4.1.2）



垂直補剛材追加状況



当て板概要図



ウェブ下端加熱矯正状況



下フランジ下面加熱矯正状況



当て板設置完了状況

写真-4.1.2 補修状況

(4) 加熱矯正時の管理

温度管理については、600℃を目標として、デジタル表面温度計（写真-4.1.3）にて管理したが、実際には300℃程度での矯正であったと報告されている。報告通りであれば、青熱脆性領域での矯正となり矯正後の鋼材の機械的性質が低下する。しかし、本工事では下フランジに当て板補強も行うことにより、矯正部分の鋼材の機械的性質の低下の影響を補い、部材の強度に影響を及ぼさないようにしたとされている。



写真-4.1.3 デジタル表面温度計

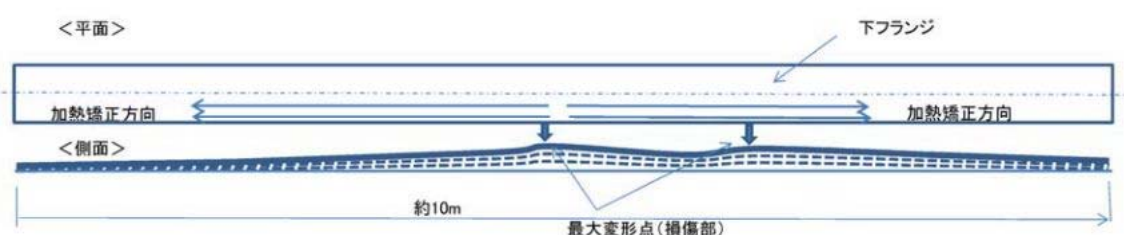


図-4.1.2 加熱順序

(5) 加熱矯正前後の管理

変形箇所近傍の溶接部については、被災時の過大な外力により、溶接に損傷が発生している可能性が十分にある。また、補修の加熱矯正によっても損傷が発生する可能性は否定できない。これに対して、本工事では、加熱矯正の前後において磁粉探傷試験（MT）によりき裂がないことを確認している。

本工事では、フランジ直角度 8mm 以内という管理値を設け、加熱矯正後にレーザースキャナで計測し、最大 7mm に収まっていることを確認したと報告されている。

4.1.2 補修事例に対する考察

- ① 本工事では矯正後の下フランジ断面を全断面有効とせず、当て板補強により補っている。これは矯正作業を温度管理下で行ったとしても、前述したように青熱脆性領域での矯正となる可能性があることに対する、対応と考えられる。一方、当て板等により断面を補うことができない場合は、より厳密な温度管理が必要となる。
- ② 本工事では矯正後の管理値を 8mm 以下と設定している。これは初期の変形量が大きく、矯正部材が引張材であることや引張フランジのフランジの勾配が桁の耐力に影響しないことを勘案して設定された値と報告されている。しかし、部材が圧縮材であったり、変形が部材の耐力に大きく影響する場合は、道路橋示方書の製作時の管理値程度まで厳しくする必要性を検討するのが良い。
- ③ 本工事では矯正時の加熱箇所は、下フランジ中央とウェブの下端としている、これは変形状態を考慮したうえで、加熱箇所を最小限となるように選定した結果と報告されている。加熱矯正箇所は、厳密な温度管理を行ったとしても、不測の強度低下等が発生する可能性を考えると、できる限り最小の範囲にとどめることが重要である。
- ④ 本工事では溶接部に対して、矯正の前後で磁粉探傷試験 (MT) によりき裂の有無を確認している。対象となる変形が溶接部近傍にある場合、当初の損傷時や矯正時に溶接部にき裂が発生・進展する可能性があるため、何らかの方法でき裂の有無を確認しておくことは重要である。また、き裂がどの段階で発生・進展したのかを明確にするために、損傷直後や補修前・補修後といった、段階ごとに確認しておこうことが必要である。
- ⑤ 本工事ではウェブと下フランジを補強部材で連結している。これは④で述べたように溶接部に損傷がある可能性を考慮して、溶接部の補強として設置したものと報告されている。この構造は当該部材をボルト締めすることにより下フランジの変形を戻す外力となり、矯正時の補助的な役割も担っていると考えられる。このように部材の設計は、設計的な観点のみでなく、施工方法や万が一の損傷等も踏まえたうえで、設計しておく必要がある。

4.2 ウェブの変形に対する補修事例

4.2.1 損傷および補修事例概要

(1) 文献

後藤浩靖、坂本正、國島正弘他（宮地エンジニアリング）、「東日本大震災で被災した合成床版を有する鋼2主桁桁橋の復旧工事報告」、橋梁と基礎 2013年10月号

(2) 損傷状況

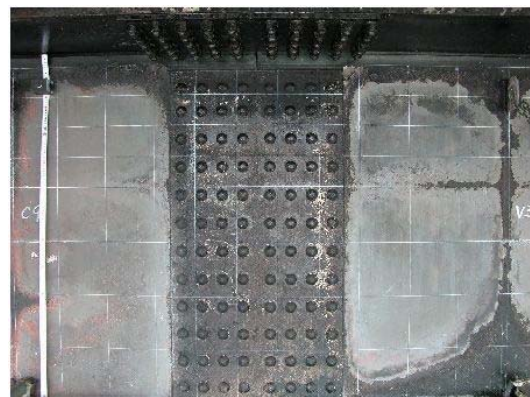
東日本大震災により、津波の直撃を受け、さらには引き波で押し寄せた流失物が本橋梁で堰き止められ、何らかの原因で引火して炎上し、延焼して大きな損傷を受けた。

主桁ウェブについては、局所的な変形は見られたものの、致命的な損傷は見られなかった。塗膜の残存状況などより鋼材の受熱温度は500℃前後と判断された。

火災の状況と主桁ウェブの損傷状況を写真-4.2.1に示す。



火災の状況



主桁ウェブの損傷状況

写真-4.2.1 損傷状況

(3) 補修概要

本工事では加熱矯正で不陸を修正した上で、当て板補強（CT 鋼補強）を施している。補修状況を写真-4.2.2に示す。塗膜の損傷状況から火災時の受熱温度は想定できたものの、青熱脆性領域（150℃～400℃）における塑性変形により材料の機械的性質が低下していることが予想されたため、加熱矯正だけでなく、当て板補強を併用したと報告されている。



主桁ウェブの加熱矯正状況



主桁ウェブの補強材設置完了状況

写真-4.2.2 補修状況

(4) 加熱矯正前後の管理

本工事では加熱矯正後にはウェブの平坦度が道路橋示方書の規定を満たしていることを確認している。

また、本工事では補強材設置時においては、仮ボルトの状態だったため数箇所において肌隙が確認されたが、補強部材とウェブのそれぞれの剛性を考慮すると補強部材とウェブはなじむと期待し、高力ボルトの締め付けを行い、想定通りに肌隙が解消されたことを確認している。

補修完了後の全景を写真-4.2.3に示す。



写真-4.2.3 補修完了後の全景

4.2.2 補修事例に対する考察

- ① 本工事において当該ウェブの熱履歴は塗膜の残存状態等により 500℃以下であると考えられたが、青熱脆性領域 (150℃～400℃) における塑性変形により材料の機械的性質が低下していることが予想されたためウェブの変形を矯正するだけでは不十分と考え、形鋼を設置し補強を行ったと報告されている。損傷時の詳細な熱履歴は分からないことから、最も条件が悪いことを想定して設計を行ったため、強度が低下したと想定されるウェブの座屈を抑える必要があったためと報告されている。火災等の損傷を受けた桁は、基本的には強度がかなり低下していることを想定して、補強を検討する必要がある、場合によっては部材交換や架け替えも検討する必要がある。
- ② 本工事ではウェブの平坦度を道路橋示方書の製作時の規定以下まで矯正したうえ補強部材を取り付けている。しかし加熱矯正箇所は、厳密な温度管理を行ったとしても、不測の強度低下等が発生する可能性が考えられるため、加熱矯正をできる限り最小の範囲にとどめたほうがよく、場合によってはウェブの平坦度の管理値を緩くして補強部材の取り付けで矯正することも検討すべきである。特にウェブのように比較的板厚の薄い部材は、剛度の高い補強部材により変形が矯正されることが十分考えられるため、矯正後の形状管理値は、施工手順や取付け部材、最終構造・形状を十分考慮して設定することが重要である。

第5章 まとめ

第2章では、鋼橋に使用される鋼材の歴史的変遷と規格の変遷、及び鋼道路橋の技術基準の変遷、並びに鋼材の温度履歴と機械的性質を示した。第3章では、地震や衝突による塑性変形の損傷の補修のような冷間加工後に熱間加工を行った場合の鋼材の機械的性質への影響は明確ではないことから、冷間曲げ加工後に熱間加工にて曲げ戻した場合の鋼材の機械的性質及び組織への影響について確認した。これらの研究成果について、以下にまとめる。

第3章における、内側曲げ半径が板厚の約7倍（約7t）の冷間曲げ加工後に熱間加工にて曲げ戻しを行った際の機械試験結果を以下に示す。なお、試験結果を整理すると表-5.1となる。

- ・非調質鋼（SM490YB）の場合

加熱温度 900°Cでは、強度は低下し、降伏点の規格値を下回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織は素材よりも若干微細化されたが、硬さにはほとんど影響は見られなかった。

- ・調質鋼（SM570Q）の場合

加熱温度 650°Cでは、強度は若干低下したものの、強度の規格値を上回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織の変化はほとんど見られず、硬さについても素材と同程度となった。

加熱温度 900°Cでは、強度は大きく低下し、降伏点・引張強ともに規格値を大きく下回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織は明らかに変化しており、硬さについても大きく低下した。

- ・TMCP 鋼（SM570TMC）の場合

加熱温度 650°Cでは、強度は若干低下したものの、強度の規格値を上回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織の変化はほとんど見られず、硬さについても素材と同程度となった。

加熱温度 900°Cでは、強度は大きく低下し、降伏点・引張強ともに規格値を大きく下回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織は明らかに変化しており、硬さについても大きく低下した。

- ・古い年代の鋼材（SS400）の場合（1964年竣工の撤去橋梁から採取）

加熱温度 900°Cでは、強度はほとんど低下せず、強度の規格値を上回った。吸収エネルギーは素材と同程度であった。金属組織は素材よりも若干微細化されたが、硬さにはほとんど影響は見られなかった。

なお、撤去橋梁から採取した試験体は、鋼種は化学成分の分析及び金属組織の確認を行い SS400（当時の SS41）と判断し、引張試験は試験体の採取の都合上、圧延方向での試験と思われる。

表-5.1 冷間曲げ加工後に熱間加工を行った際の機械的性質及び組織への影響（内側曲げ半径：約 7t）

鋼材の種類		熱間加工の 加熱温度	機械的性質		組織観察結果 硬さ
			強度 基準値比較	シャルピー 吸収エネルギー	
非調質鋼	SM490YB	900℃	低下 降伏下回る	素材と同程度	組織微細化 硬さ変化なし
調質鋼	SM570Q	650℃	若干低下 規格値以上	素材と同程度	組織変化なし 硬さ変化なし
		900℃	大きく低下 規格値以下	素材と同程度	組織変化あり 硬さ低下
TMCP 鋼	SM570TMC	650℃	若干低下 規格値以上	素材と同程度	組織変化なし 硬さ変化なし
		900℃	大きく低下 規格値以下	素材と同程度	組織変化あり 硬さ低下
古い年代の鋼材 (昭和 30 年代)	SS400	900℃	変化なし 規格値以上	素材と同程度	組織微細化 硬さ変化なし

参考として、冷間曲げ加工後に冷間曲げ加工にて曲げ戻しを行った試験体の機械試験を実施したが、素材と比較して降伏点及び引張強さが大きくなり、伸びが低下した。シャルピー吸収エネルギーは、曲げ戻し前よりも遷移温度が高温側にシフトした。

上記の試験結果と第 2 章の内容より、熱間加工による施工条件は以下のとおりとなる。なお、以下の内容を鋼材の製造時期で整理したものを表 5-2 に示す。

非調質鋼の SM490YB は、冷間曲げ後の 900℃での熱間加工により素材よりも結晶粒が微細化されたフェライト・パーライト組織になり、シャルピー吸収エネルギーは素材と同等以上となる。しかし、強度が低下し、素材の強度によっては規格値を満足できないこともあると考えられる。よって、2.2.1 で示したように、非調質鋼の鋼材の特性を確保する熱間加工での加熱温度は 720℃以下であり、後述する調質鋼と TMCP 鋼の 650℃の熱間加工で冷間曲げのひずみの影響が小さくなっていることから、熱間加工の加熱温度は 720℃以下とするのが良いと考えられる。

古い年代の鋼材については、本試験では素材の強度が高く、冷間曲げ後の 900℃での熱間加工を行っても機械的性質への影響はなかったが、当時の鋼材の化学成分や機械的性質のばらつきを考えると、熱間加工の加熱温度は 720℃以下としたほうが安全である。

調質鋼の SM570Q と TMCP 鋼の SM570TMC は、冷間曲げ後の 650℃での熱間加工では強度や組織への影響は小さく、シャルピー吸収エネルギーは 650℃の加熱により冷間曲げのひずみの影響が小さくなり、素材と同程度まで回復している。一方、冷間曲げ後の 900℃での熱間加工では、900℃の加熱によりフェライト・パーライト組織となり、シャルピー吸収エネルギーは素材と同等以上となるが、組織が変化したことにより強度が大きく低下する。よって、熱間加工後も素材の機械的性質を確保するためには、熱間加工の加熱温度を 650℃以下とするのが良いと考えられる。

なお、本試験は内側曲げ半径約 7t の冷間曲げ加工を行っており、7t 以上の冷間曲げ加工であれば、上記の加熱温度における熱間加工後の機械的性質及び組織への影響は本試験結果と同じようになると考える。

冷間曲げ後の JIS の規定温度におけるシャルピー吸収エネルギーは、古い年代の鋼材の SS400 を除き素材から若干低下する程度であった。2.2.4 の図-2.2.11 の予ひずみ量 7.5% でのシャルピー吸収エネルギーの低下率と比較すると、本試験のほうが低下率は小さく、あたかも問題がないように見える。これは、本試験は冷間曲げ加工にて塑性ひずみを導入しているのに対し、図-2.2.11 の文献 2.15) は引張試験にて塑性ひずみを導入しており、本試験のシャルピー衝撃試験片の採取位置での予ひずみ量が小さいためと考えられる。よって、冷間曲げ加工後のシャルピー吸収エネルギーが母材の要求値を満足しているかの判断は、2.2.4 の表-2.2.2 に示すように、母材のシャルピー吸収エネルギーが 150J 未満の場合は内側曲げ半径 15t 以上、150J 以上の場合は 7t 以上、200J 以上の場合は 5t 以上とするのが良いと考えられる。

冷間曲げ後に冷間曲げにて曲げ戻しの場合、強度は高くなり、シャルピー吸収エネルギーの遷移温度が高くなり、鋼材の機械的性質への影響は大きい。本試験のように内側曲げ半径が小さい変形の場合は、冷間曲げ戻しのような加工は避けるのが良いと考えられる。

表-5.2 加熱矯正法の施工条件

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 1925年～1952年	—	—	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
	JIS E 20号：第1,2種 JIS 第430号：SS34,SS41 JIS 金属3101：SS34,SS41	非調質鋼	基本的に可	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 3101-1952：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 3106-1966：SM58Q	調質鋼 (焼入れ焼戻し)	基本的に可	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ので注意する
	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3期 1980年以降	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ので注意する

第4章では、実際の事例を紹介し現場で熱間加工を行う際の、注意点を示した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 矯正作業を温度管理下で行ったとしても、青熱脆性領域での矯正となる可能性があるため、当て板等により断面を補うことができない場合は、より厳密な温度管理が必要となる。
- ・ 矯正後の管理値は、部材の特性や施工性等を十分検討して設定する必要がある。特に部材が圧縮材であったり、変形が部材の耐力に大きく影響する場合は、より厳しい管理値の設定が必要である。
- ・ 加熱矯正箇所は、厳密な温度管理を行ったとしても、不測の強度低下等が発生する可能性があるため、加熱範囲は最小の範囲にとどめることが重要である。
- ・ 矯正の対象となる変形が溶接部近傍にある場合、当初の損傷時や矯正時に溶接部にき裂が発生・進展する可能性があるため、何らかの方法でき裂の有無を確認しておくことが必要である。
- ・ 補強部材の設計は、設計的な観点のみでなく、施工方法や万が一の損傷等も踏まえたうえで、設計しておく必要がある。
- ・ 火災等の損傷を受けた桁は、基本的には強度がかなり低下していることを想定して、補強を検討する必要がある。場合によっては部材交換や架け替えも検討する必要がある。
- ・ ウェブのように比較的板厚の薄い部材は、剛度の高い補強部材により変形が矯正されることが十分考えられるため、矯正後の形状管理値は、施工手順や取付け部材、最終構造・形状を十分考慮して設定することが重要である。

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。

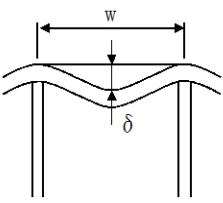

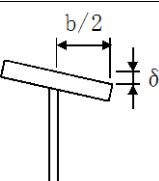
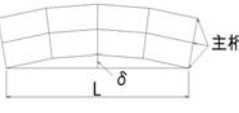

また、緊急の仮支持が必要な場合等もあり得る。ベント等を設置するときの留意点は 4.1.3 が参考になる。

- 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。

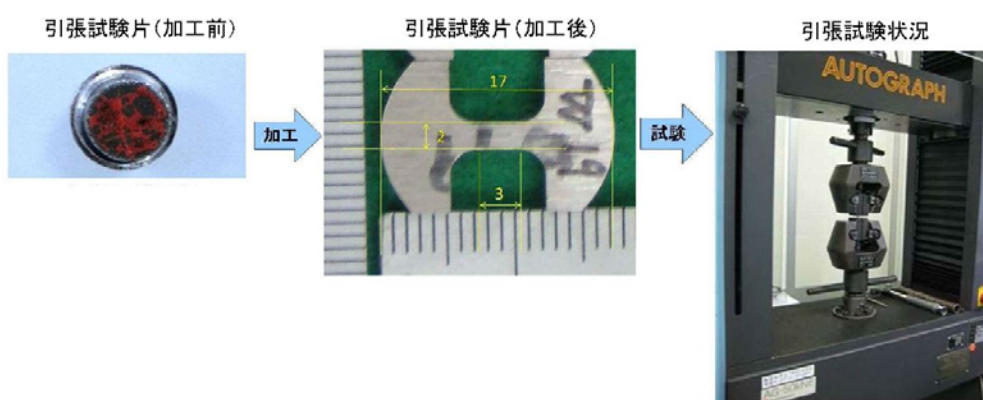
恒久対策ための調査項目例を参-表-2.1.2に示す。各調査方法の詳細について以下に述べる。

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

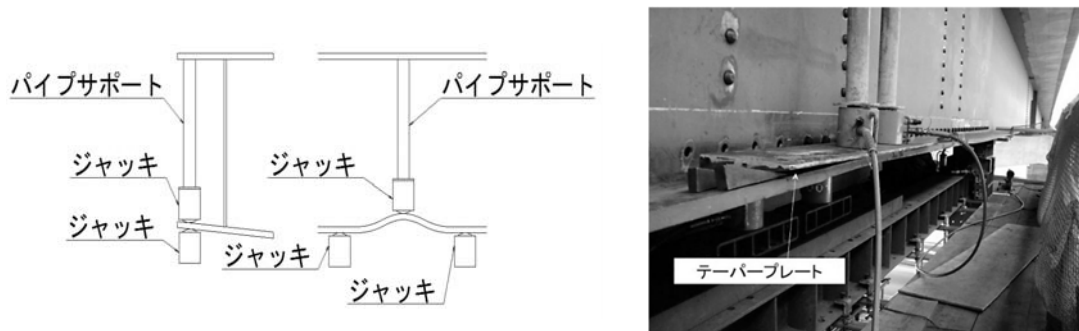
2.1.3 ベントやジャッキの設置に関する調査

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。

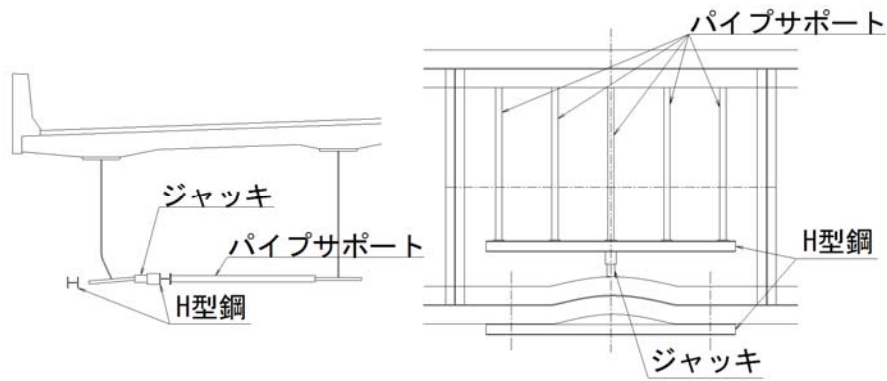
2.1.4 ジャッキ反力を負担する部材の調査

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



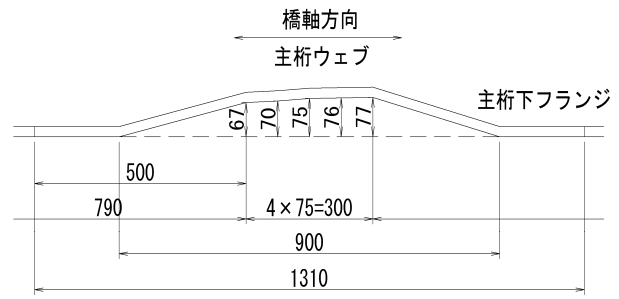
参-図-2.1.2 ジャッキ水平反力を負担させる例

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。



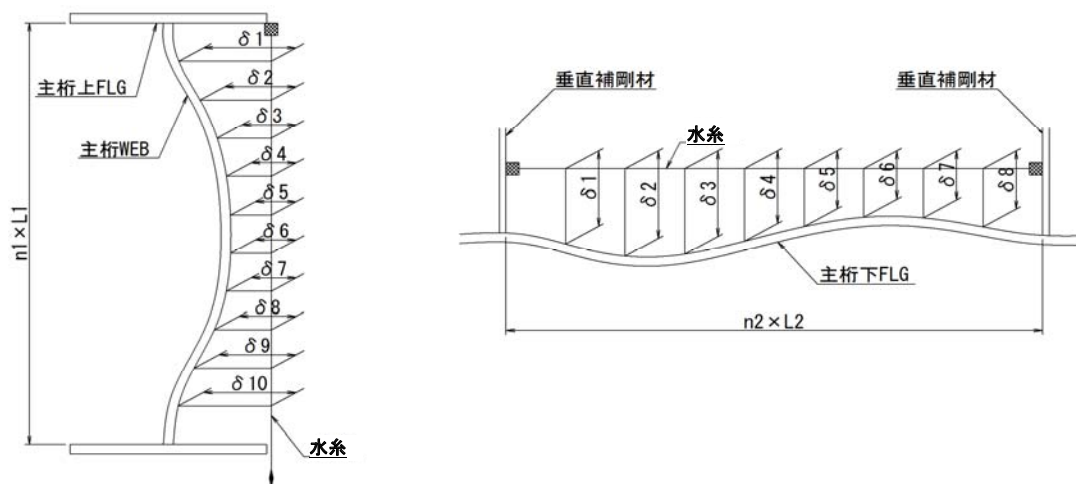
参-写真-2.1.2 損傷部の写真



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

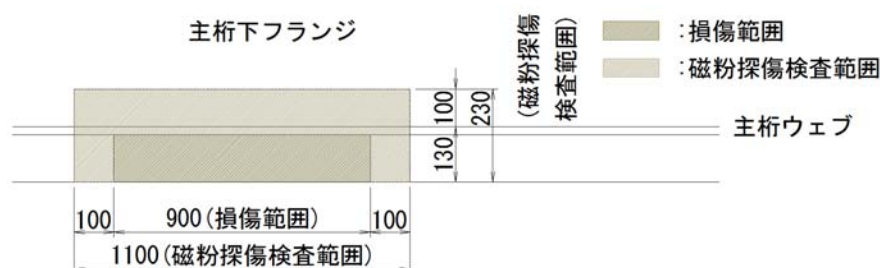
2.1.7 破断・き裂の調査

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。

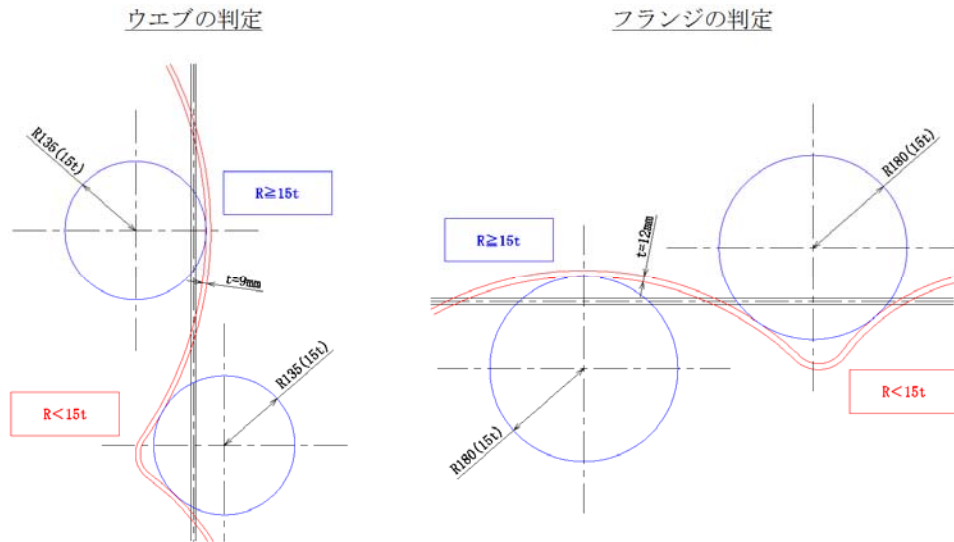


参-図-2.1.5 磁粉探傷検査例

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

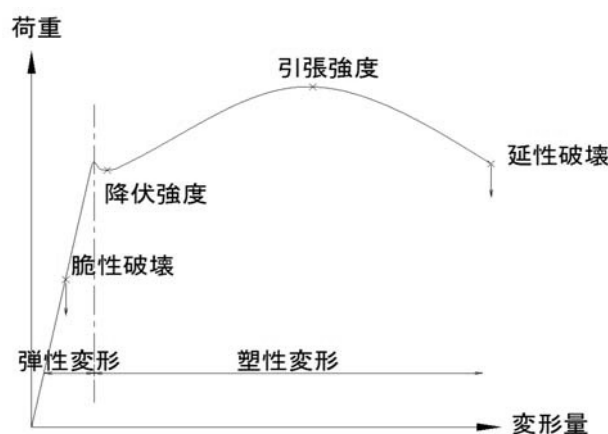
2.1.9 補修の要否の判断

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。

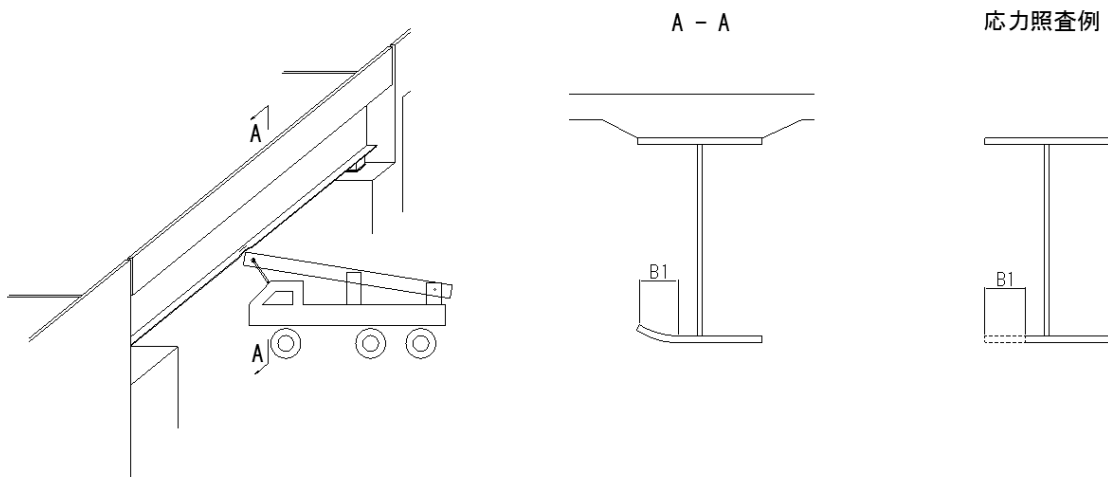
2.2.2 部材残存性能の評価（断面欠損法）

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。

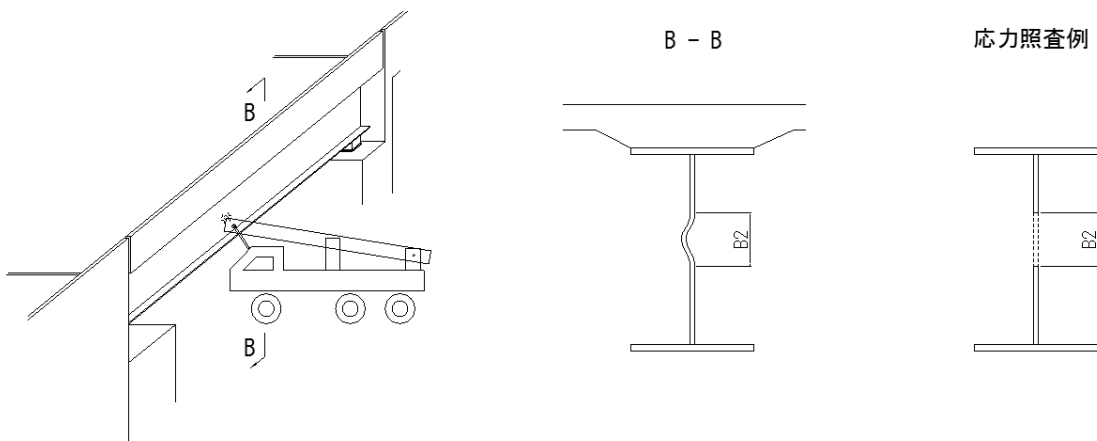
なお、歩道橋等で断面に応力上の余裕が十分にあり、ベント等で死荷重応力を除去することなく加熱矯正を行う場合、加熱範囲を断面欠損しているとみなして死荷重載荷状態に対して応力照査を行い、加熱矯正作業中の安全性を確認するのがよい。ただし、架設手順を調べるなどをしないと誤った評価になり得るので注意すること。

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。

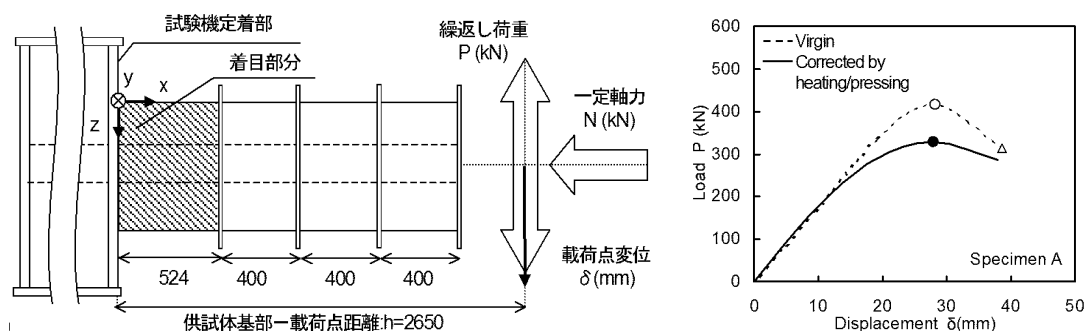


参-図-2.2.2 断面欠損法の照査例（下フランジ）



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

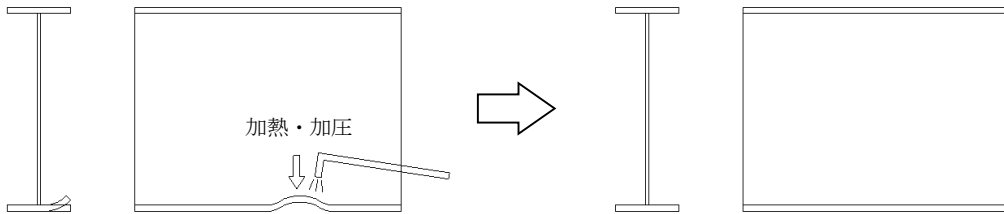
が知られている^{7)、8)}。塑性変形が生じたということは、その変形量が小さくても橋梁が降伏応力以上の応力を経験したことを意味し、拘束条件によっては部材に大きな残留応力が生じている可能性がある。そのまま放置した場合、活荷重の作用により、変形量が大きく進展する場合がある。

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。

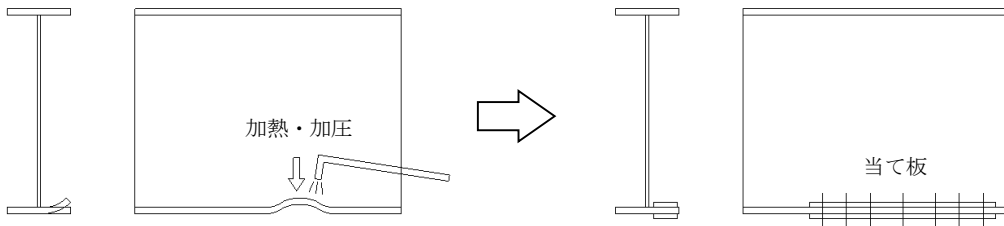
3. 補修工法の種類と選定にあたっての留意点

3.1 各補修工法の特徴

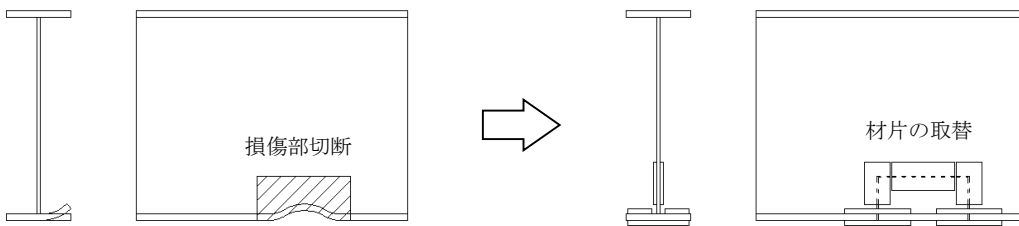
塑性変形した部材に対する補修工法としては、一般的に、①加熱矯正工法（温度管理型）、②加熱矯正（非温度管理型）+当て板工法、③材片の取替工法、④材片追加工法が採用されることが多い。各工法の概念図を参-図-3.1.1~3.1.4に示す。また、各工法の特徴や適用条件について工法ごとに記載する。



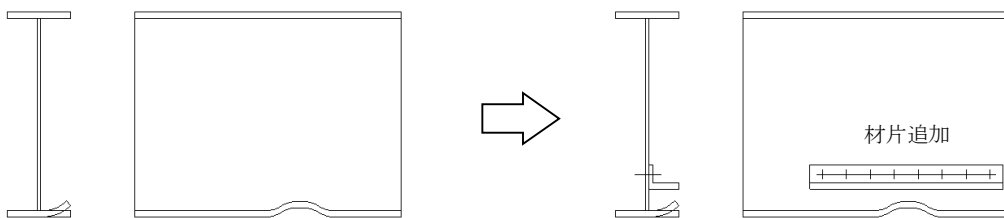
参-図-3.1.1 加熱矯正工法（温度管理型）の概念図



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・締付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。



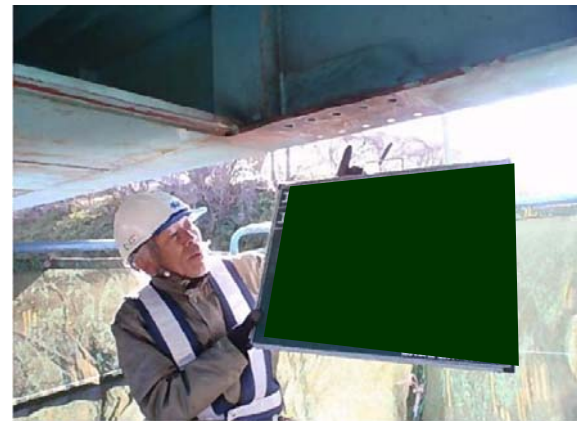
損傷状況（化粧パネル有）



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



鋳桁の中間対傾構



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）



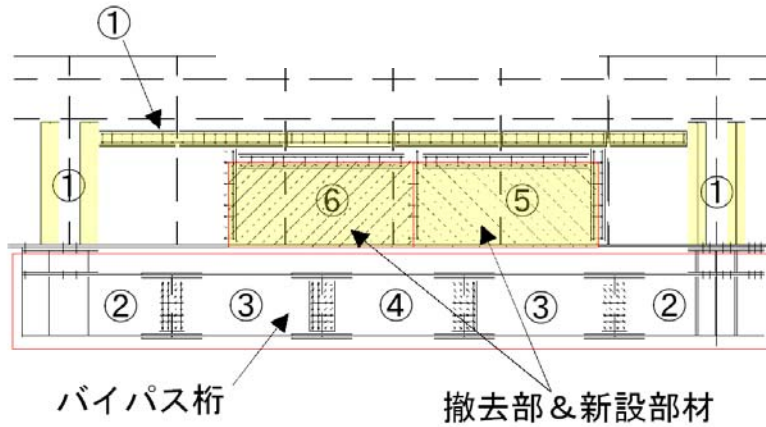
切断・撤去状況



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。

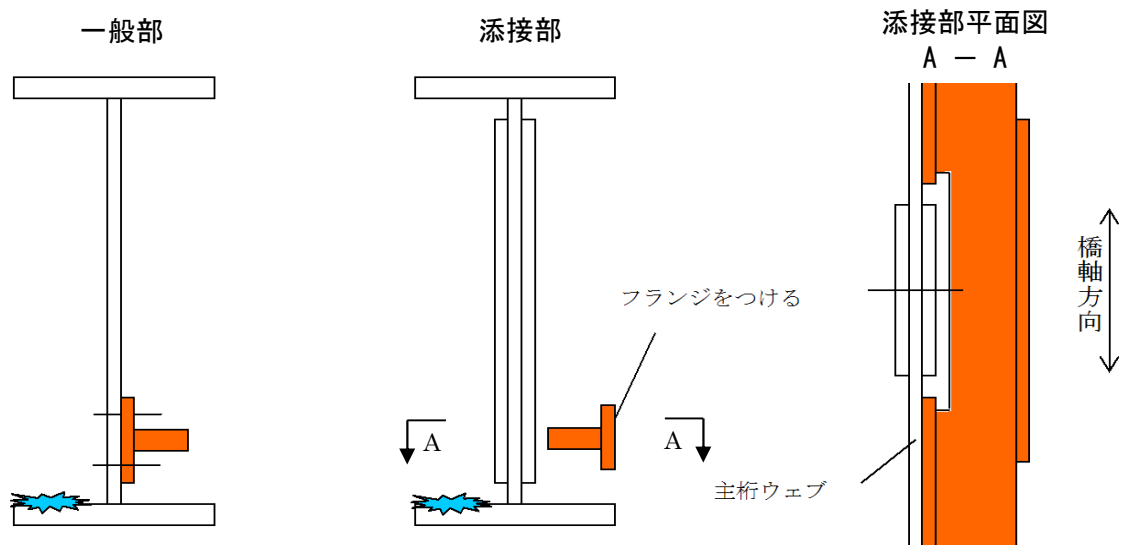


図-3.1.6 下フランジ腐食欠損部の断面補填を目的とした補強材片の概要図



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。

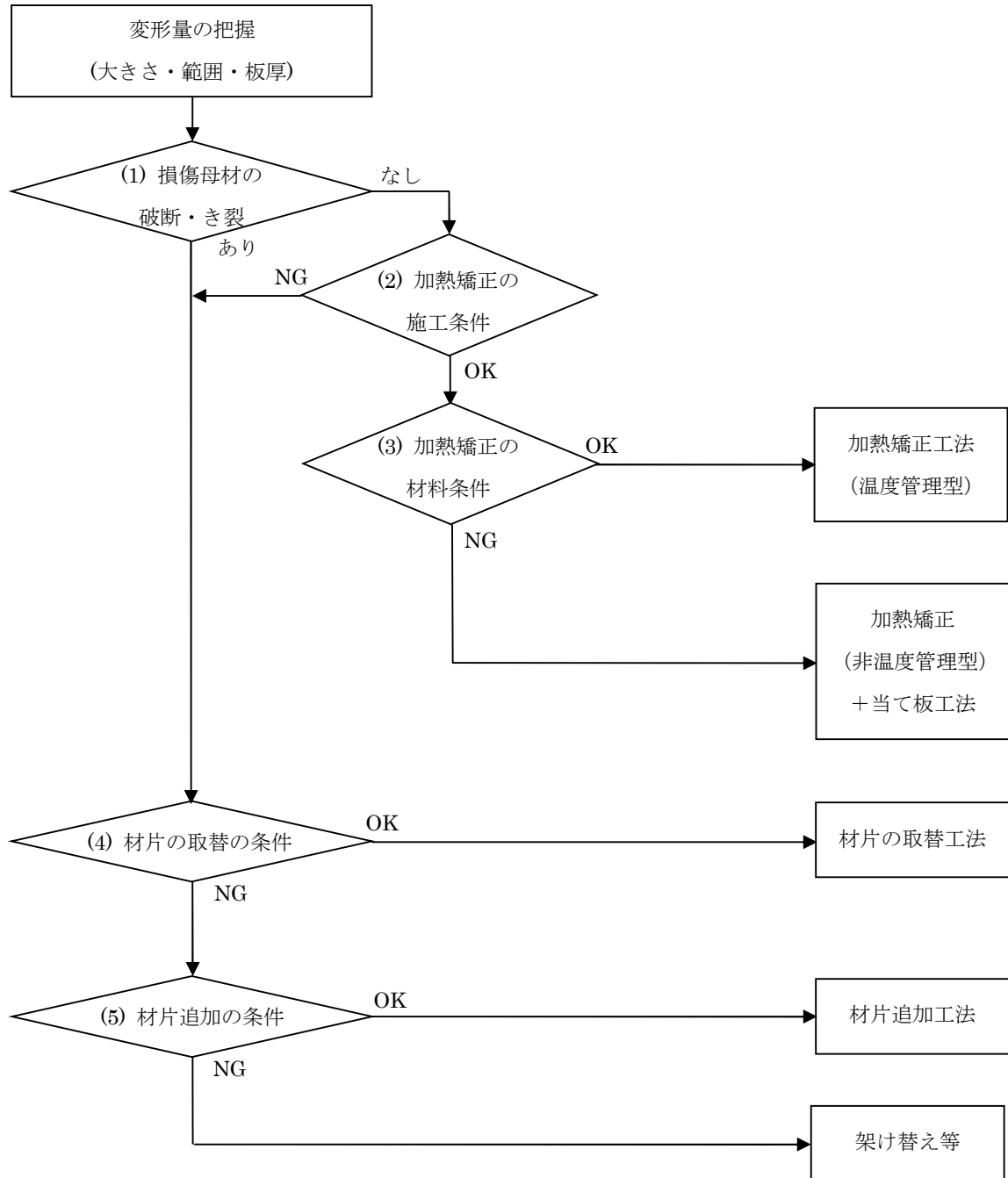
特に加熱矯正を伴う「加熱矯正工法」や「加熱矯正+当て板工法」については、施工条件や材料条件により採用可否が分かれることから、注意が必要である。

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

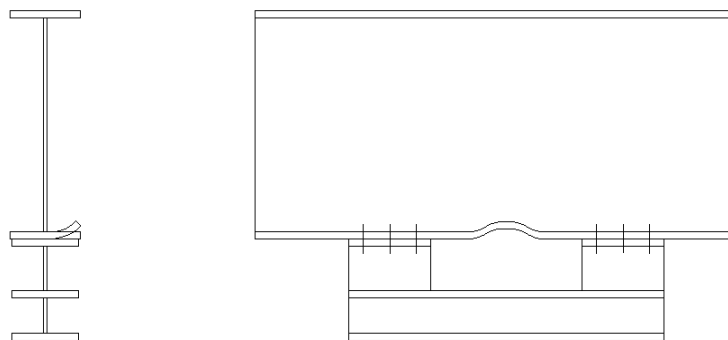
損傷した部材に破断・き裂が存在する場合、加熱矯正で変形を戻しても破断・き裂が残り、たとえそれが小さなものでも破断・き裂部への応力集中による疲労き裂や脆性破壊の恐れがある。き裂の補修方法も含めて、合理的となるよう補修工法を選定する必要がある。

(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。

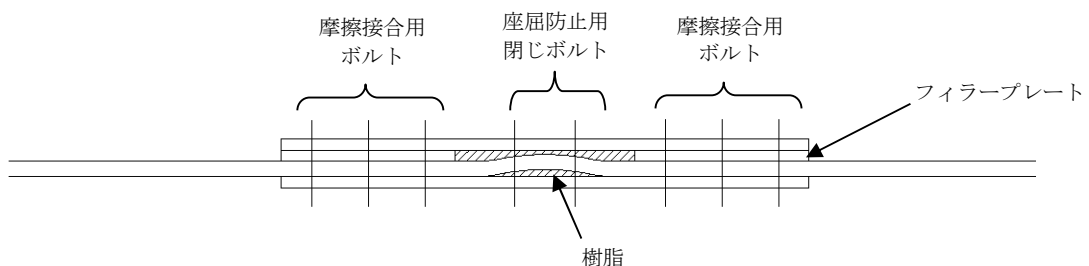
- ① 変形部の曲げ半径が $7t$ 以上であること。もしくは、本編の第 2 章を参考にすることとして事前の実験等で確認すること
- ② 靭性脆性領域 ($150\sim 400^{\circ}\text{C}$) で加熱矯正を行わないこと
- ③ 非調質鋼であれば、加熱矯正時の温度を 700°C 以下に抑えること
- ④ 調質鋼、TMCP 鋼であれば、加熱矯正時の温度を 630°C 以下に抑えること

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	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 3101-1959：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							
		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

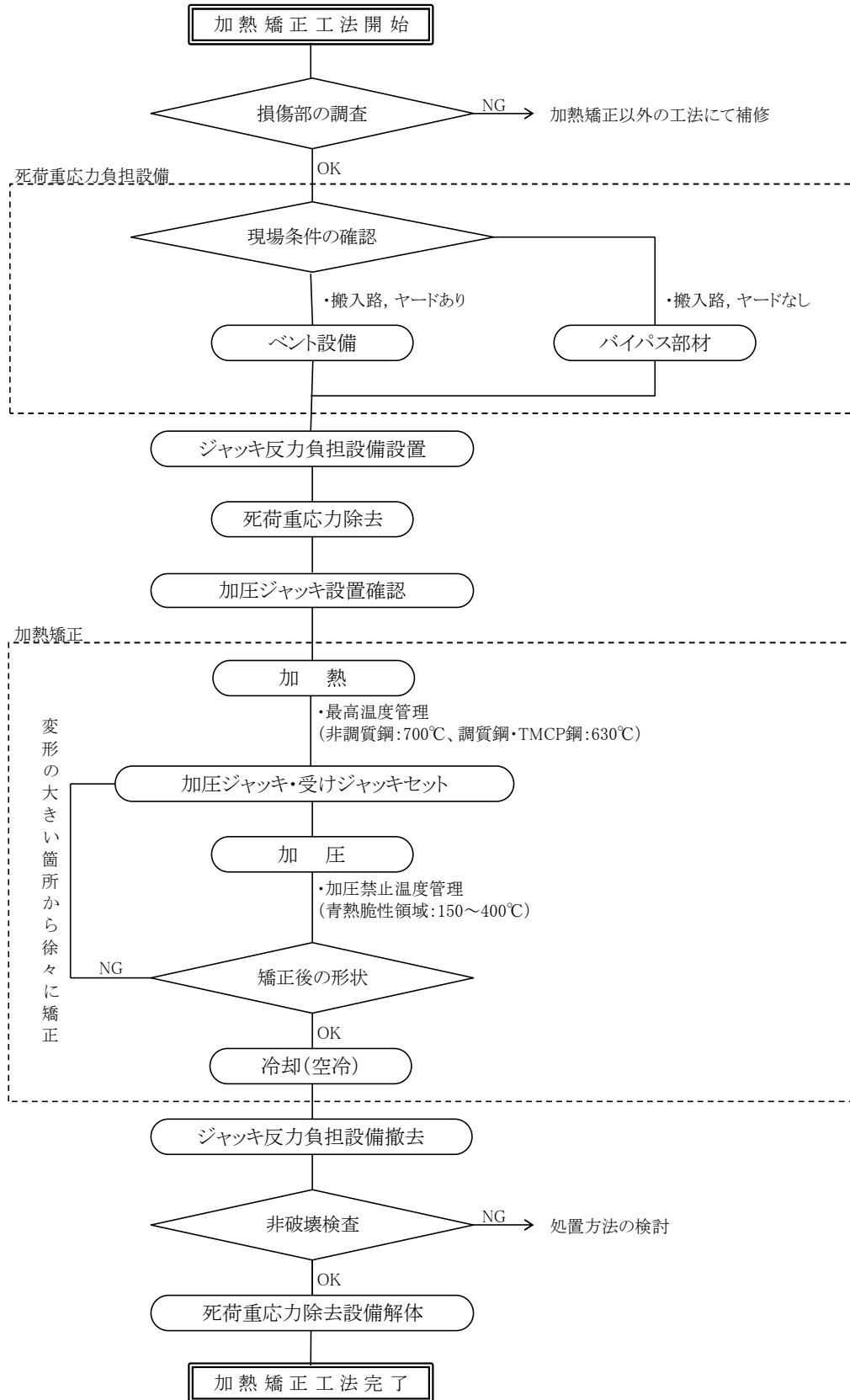
- ① 加熱矯正工法により変形の補修が可能な変形量、板厚、作業空間であること。実作業で補修不可となり工法の変更にならないように、あらかじめ現地調査や試験等で確認するのがよい。
- ② 変形部の内側曲げ半径が 7t 以上であること。もしくは、文献 9) の 2 章を参考にするなどして事前に実験等で確認すること。
- ③ 変形範囲の母材や溶接部にき裂がないこと。
- ④ ジャッキを用いて加圧するため、ジャッキ反力を負担できる部材または設備があること。
- ⑤ 加熱矯正中は部材のヤング係数が著しく低下し、死荷重応力を負担できなくなるため、ベント支持によるジャッキアップやバイパス材の設置により死荷重応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



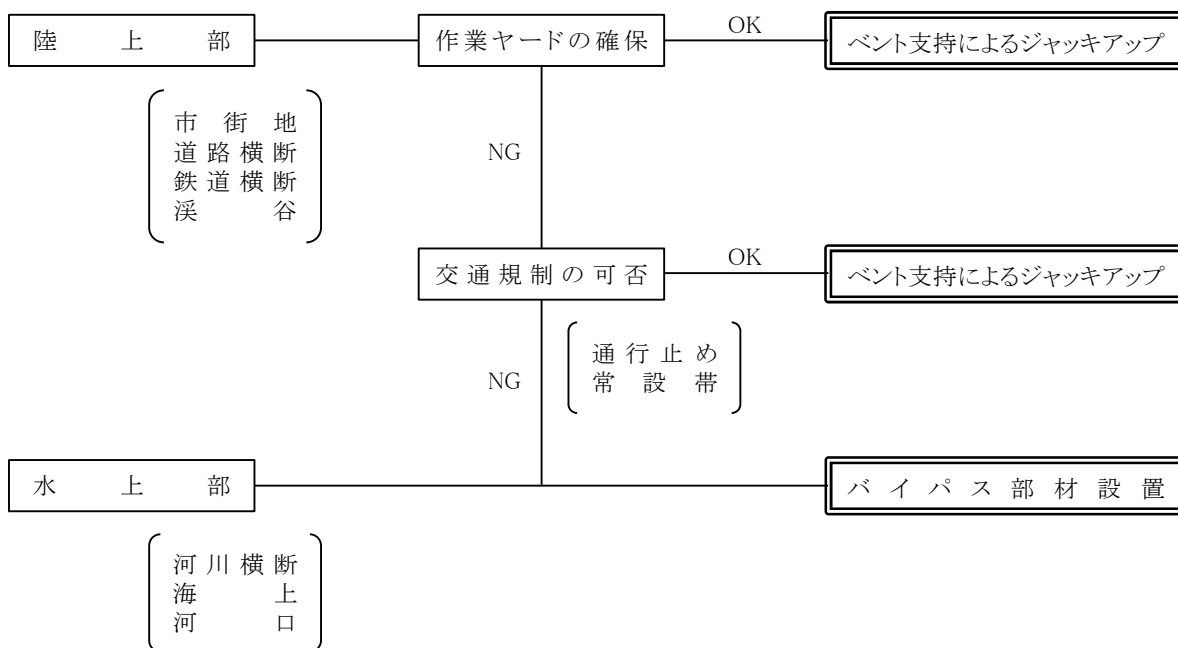
参-図-4.1.1 加熱矯正工法の施工フロー

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

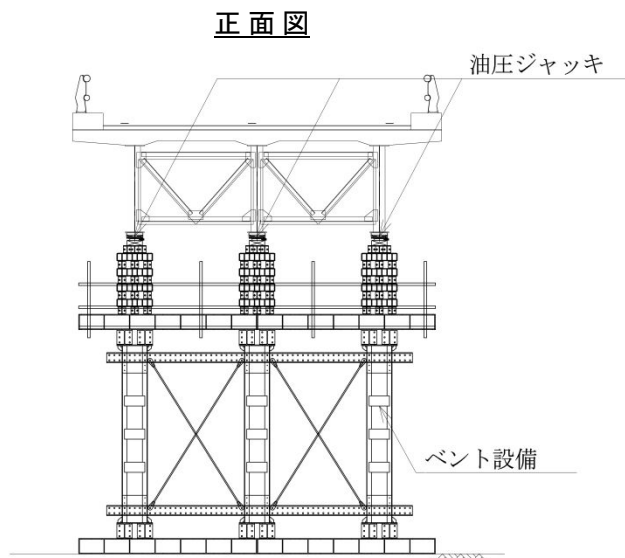
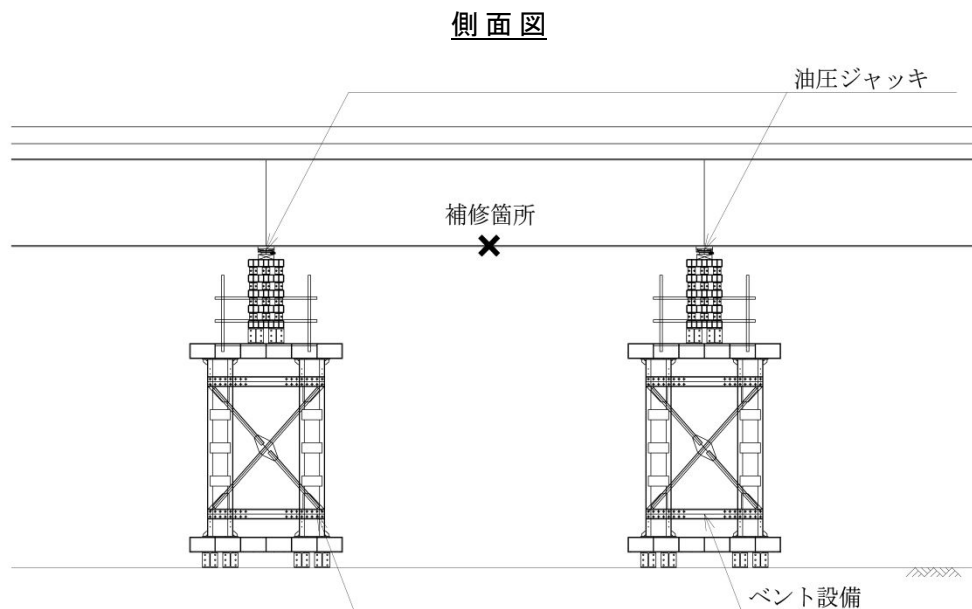
死荷重応力負担設備の選定フローを以下に示す。死荷重応力負担設備はベント支持が容易であり、さらにジャッキアップをすることで死荷重応力を除去できることから、作業ヤードの確保、施工期間中の通行止めや常設帯の設置が可能であれば、ベント支持を優先して選定に関する検討を進めるとよい。



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。

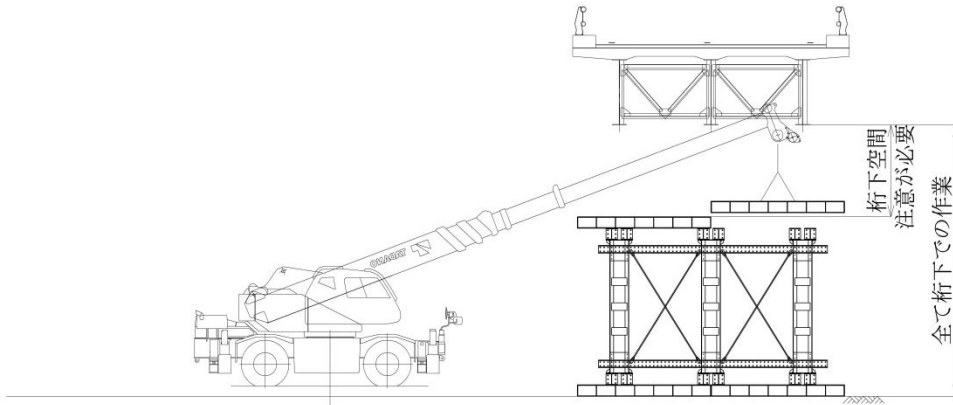


参-図-4.1.3 ベント設備図(例)

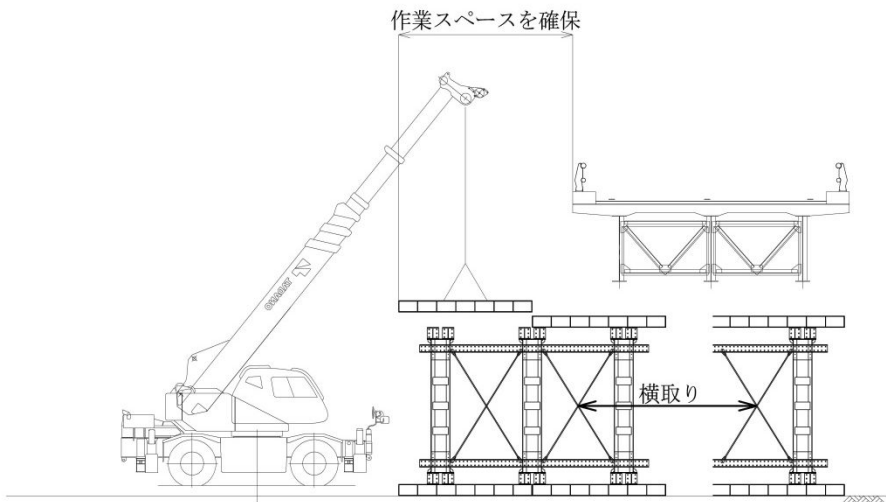
1) ベント設備

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。

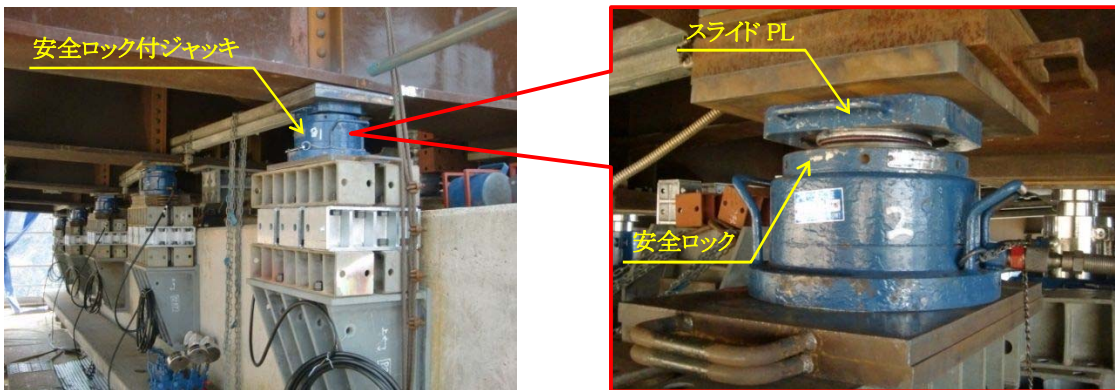
また、支保工を設置したり、バックアップ部材を取り付けたりする場合の、一般的な注意点を以下に示す。ただし、安全性は現地現物の状態に依存するものであり、ここに記載の留意点だけを考慮すればよいというものではないことを十分に認識したうえで、適切に実施される必要がある。

- 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。

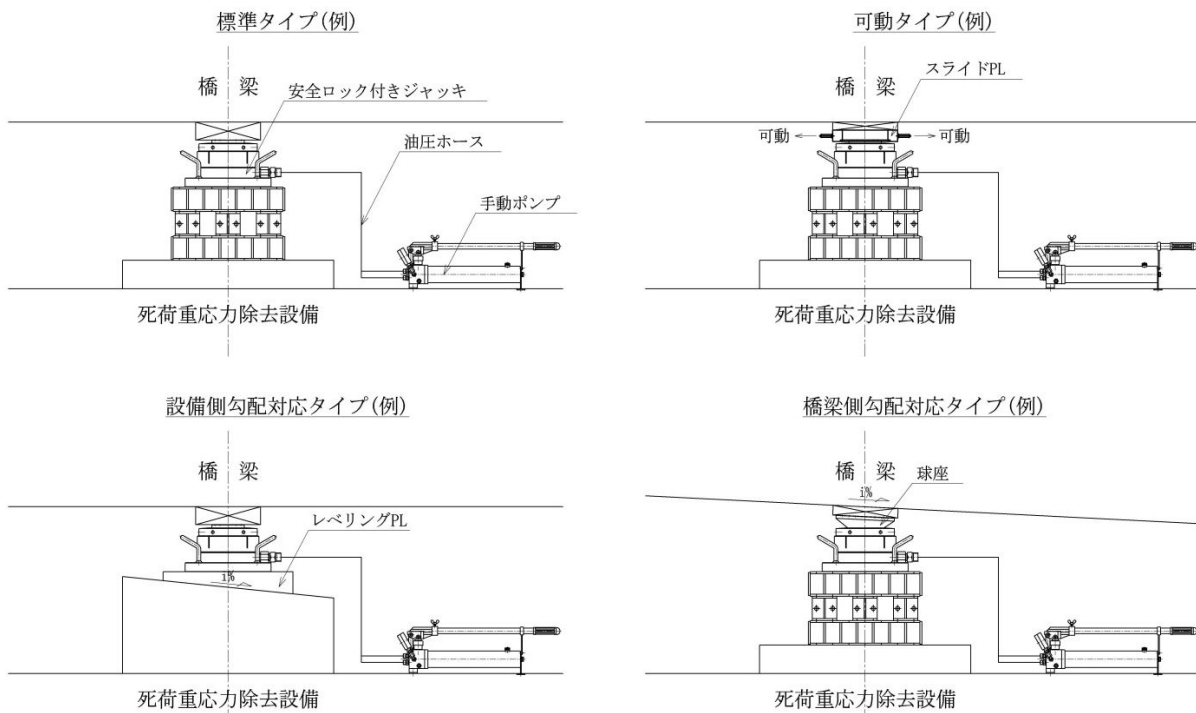
2) 死荷重応力除去用ジャッキ

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



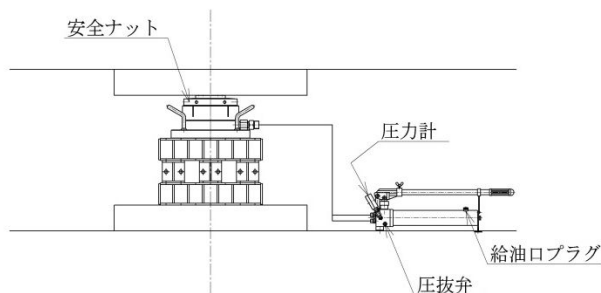
参-図-4.1.5 ジャッキの使用例

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。

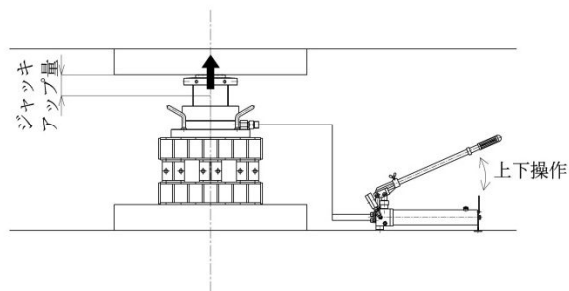
死荷重応力が除去されているかの判断は、ジャッキアップ量とジャッキ反力を目安に行う。ジャッキアップ量の管理は、ベント設備のなじみや地盤の沈下、梁にたわみが生じることもあるため、ベント設備以外に不動点を設け、不動点と桁との間隔にて管理することが望ましい。ジャッキ反力はポンプの圧力計の読み値にて確認を行う。設計反力と著しく異なる場合は、何かしらの原因があるため、作業を一旦中止し、橋梁およびベント設備の点検を行う、点検項目の例としては、設計反力になっても扛上しない場合は部材干渉の有無、設計反力以下で扛上した場合はベント設備の異常の有無等が挙げられる。

Step1



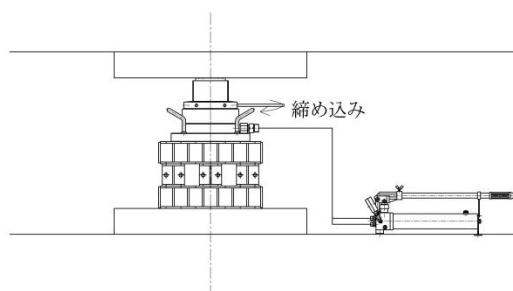
ジャッキ、ポンプ設置、ホースの配管を行い、ポンプの給油ロプラグを開き、圧抜弁を閉める。

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。

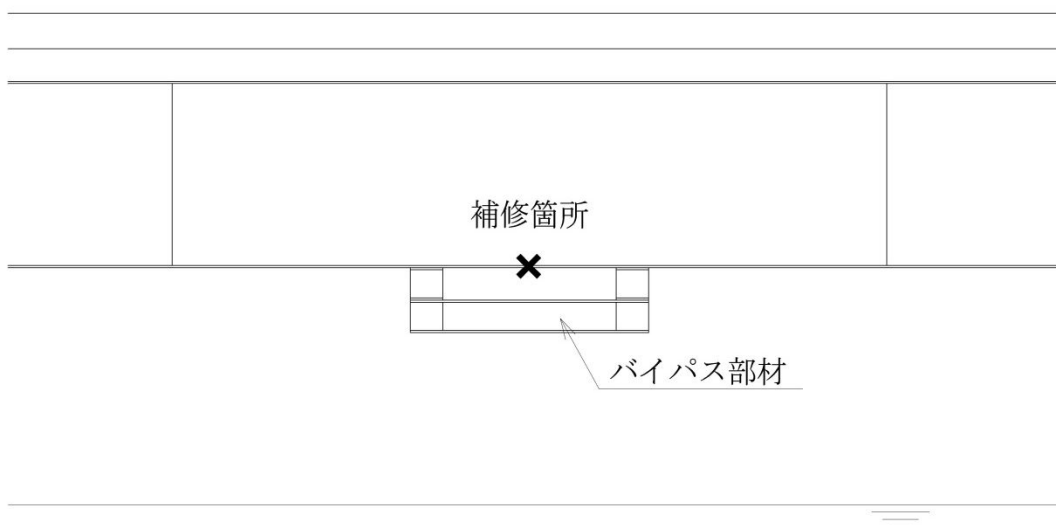
参-図-4.1.6 ジャッキ操作の手順

(3) バイパス部材の設置

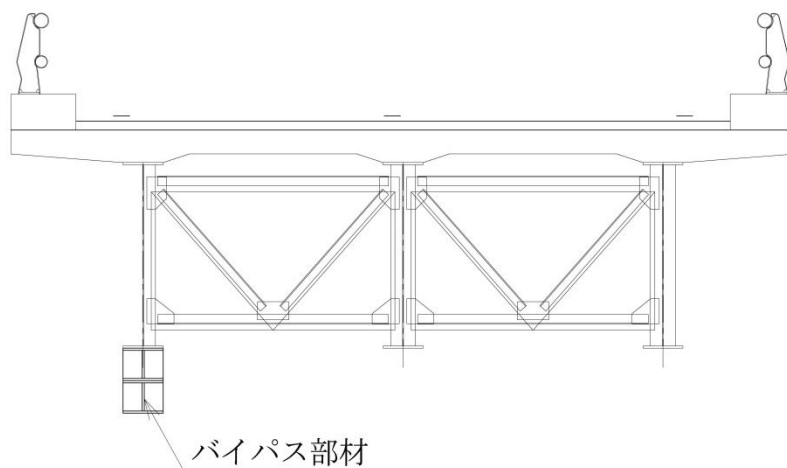
ベント支持によるジャッキアップと同様に活荷重のない状態でバイパス部材（参-図-4.1.7）の設置を行う。この場合、死荷重応力は加熱時にバイパス部材へ、バイパス部材撤去時に補修箇所へ伝わるため、無応力状態での作業とならないことから、施工方法等は別途検討が必要である。

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



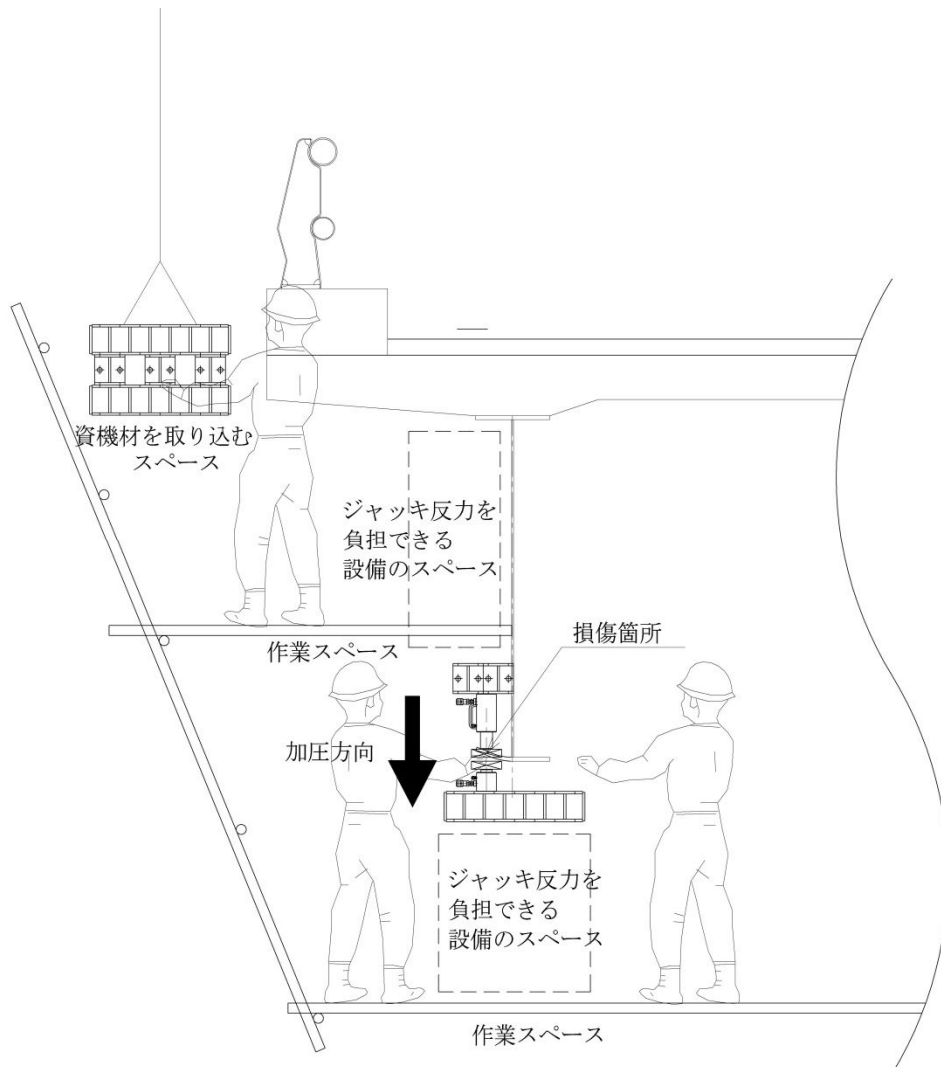
参-図-4.1.7 バイパス部材(例)

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 $400^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ 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)



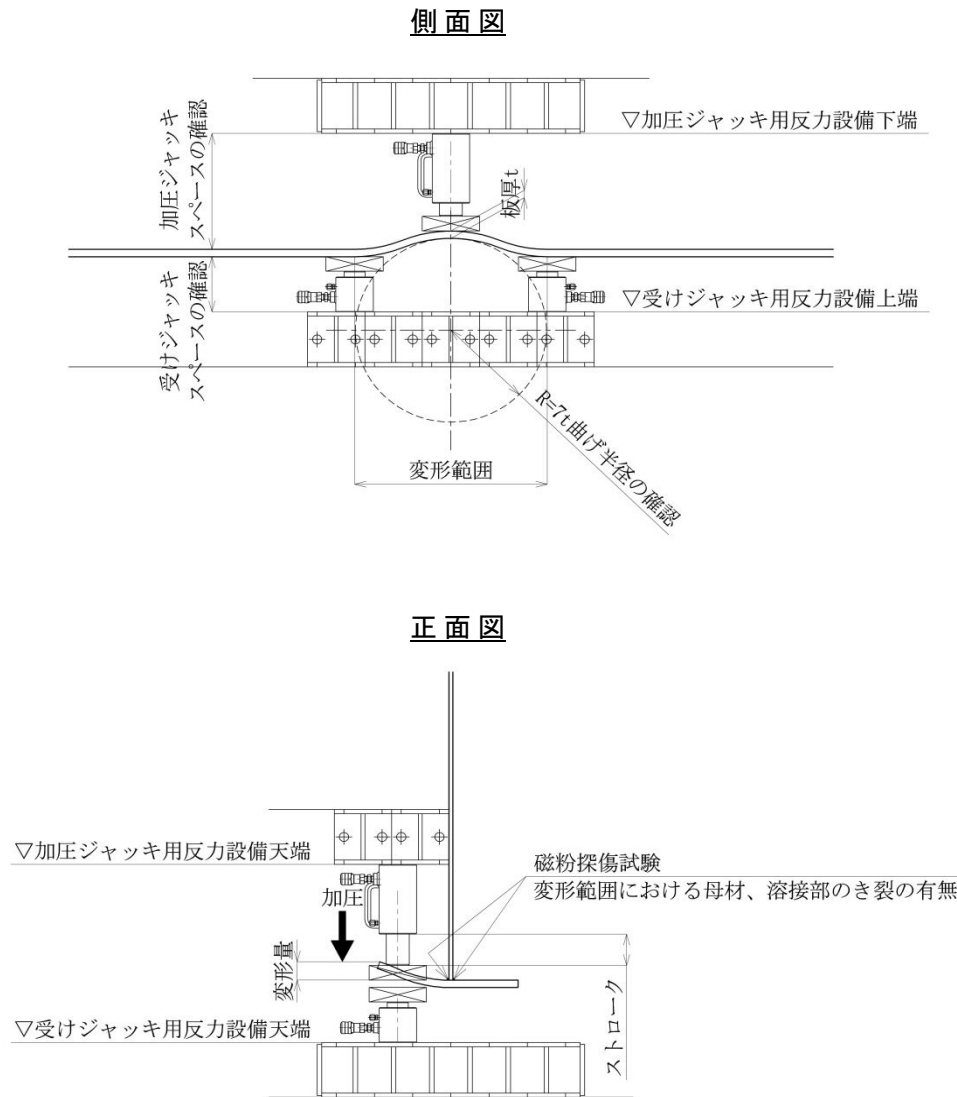
参-図-4.1.8 設備例 (下フランジ補修例)

(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)



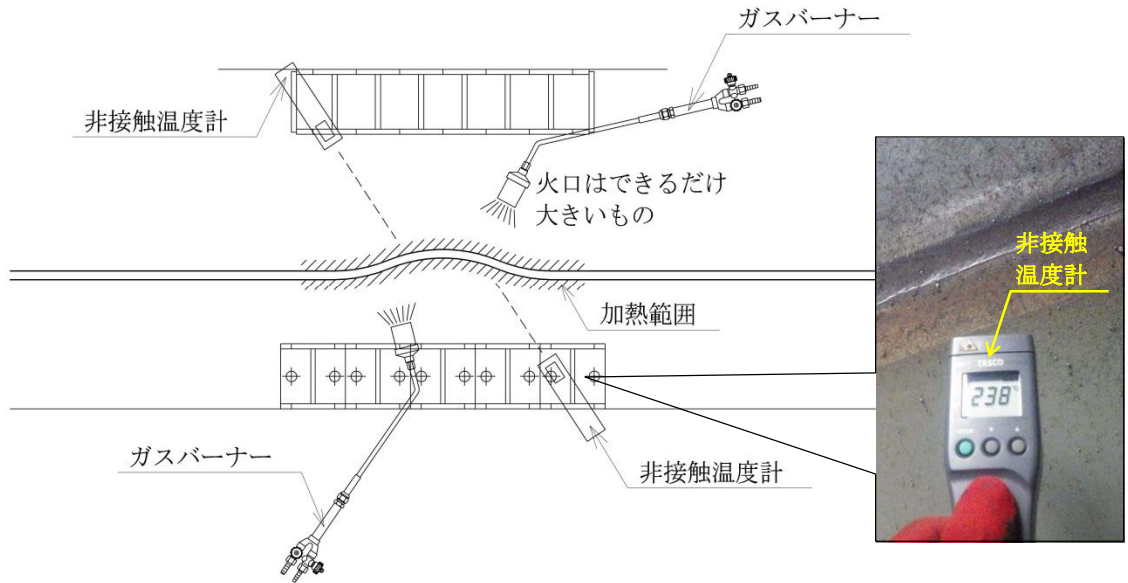
参-図-4.1.9 加熱矯正イメージ図 (下フランジ補修例)

2) 加熱方法

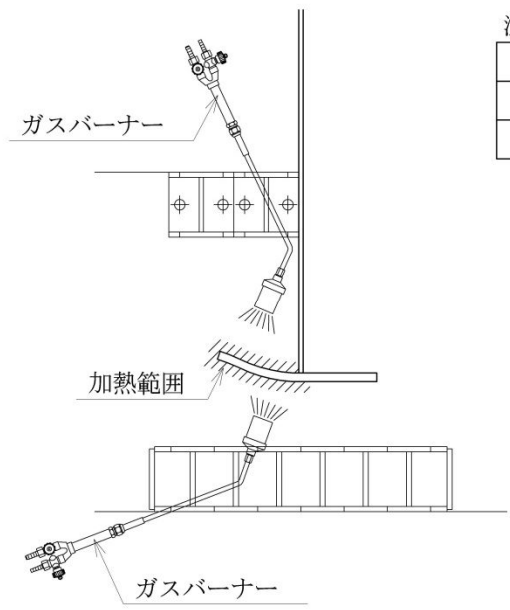
加熱はガスバーナー（火口のできるだけ大きいもの）を用い、変形した部位を均一に行う。板厚の厚いものは板厚中央まで温度が均一になるように両側から加熱する。(参-図-4.1.10)

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	

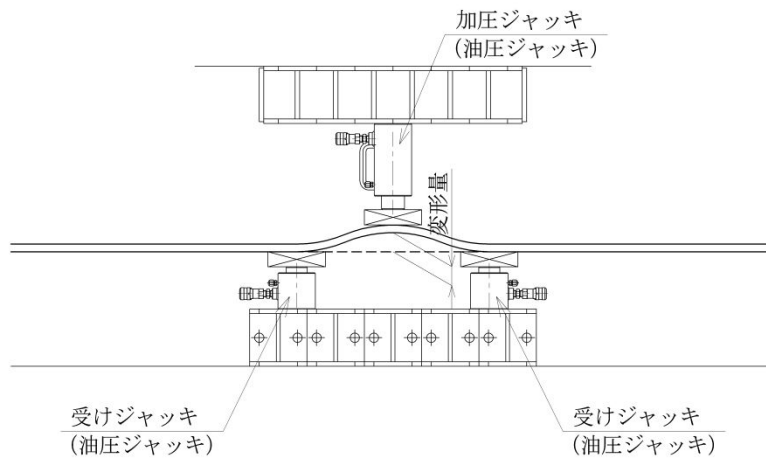


写-4.1.2 油圧ジャッキ（加圧ジャッキ、受けジャッキ）

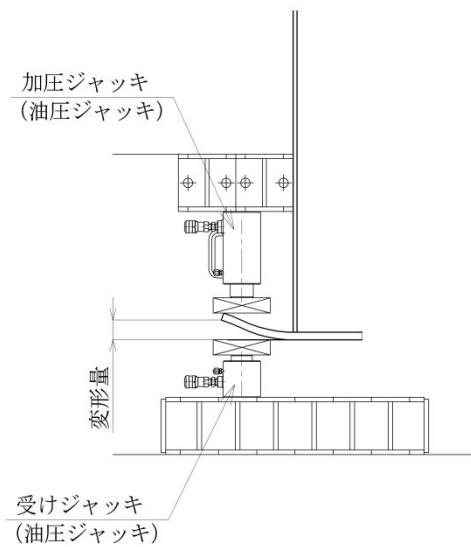
2) 加圧ジャッキ、受けジャッキのセット

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

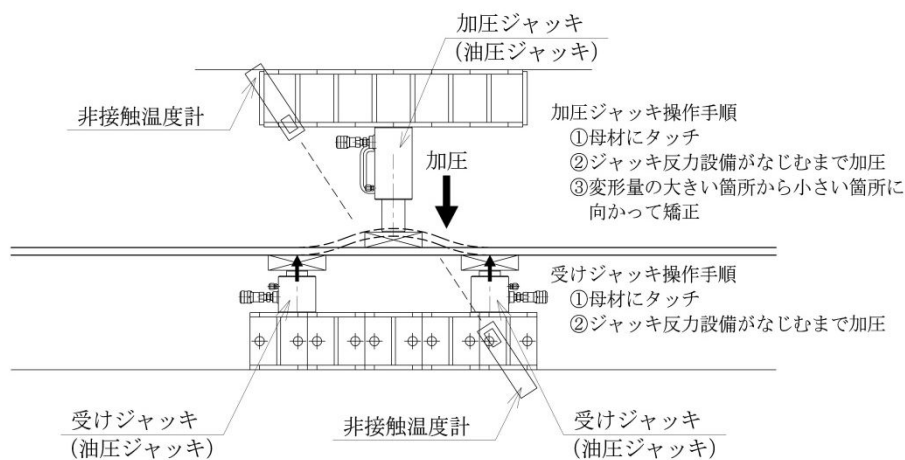
加圧ジャッキ、受けジャッキを母材にタッチさせ、ジャッキ反力設備がなじむまで加圧し、その後加圧ジャッキにて変形量の大きい箇所から小さい箇所に向かって徐々に矯正する。加圧により変形部位が戻りすぎないように定規等で確認しながら加圧ジャッキの操作を行う。また、ジャッキ反力を負担できる設備に異常がないかも合わせて確認を行う（参-図-4.1.12）。

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。



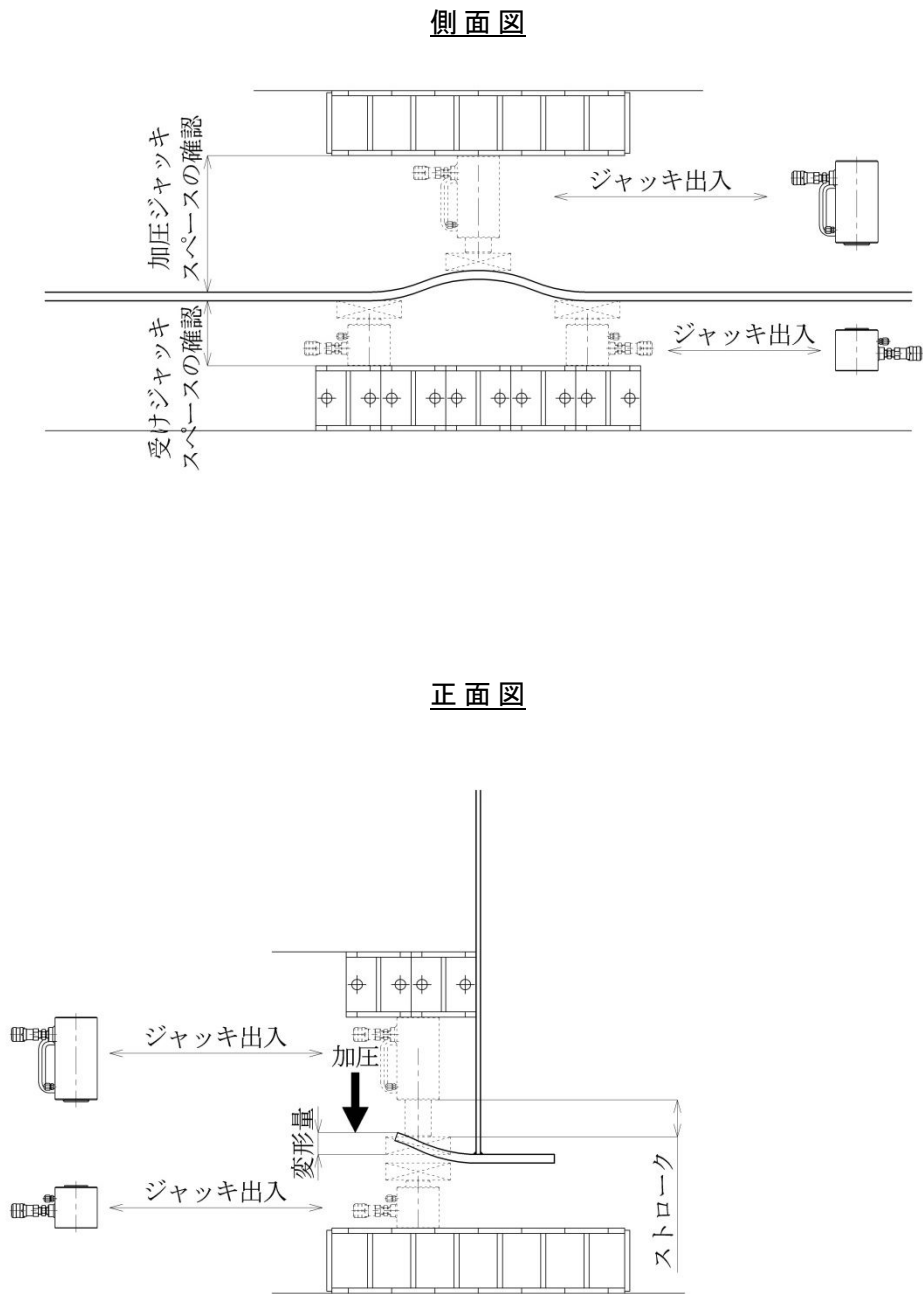
参-図-4.1.12 加圧方法（下フランジ補修例）

(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

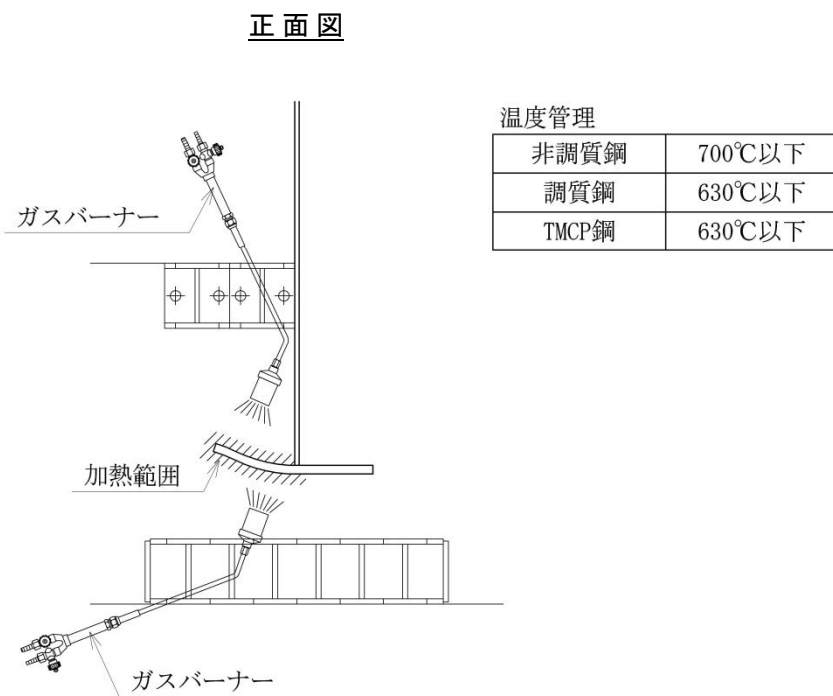
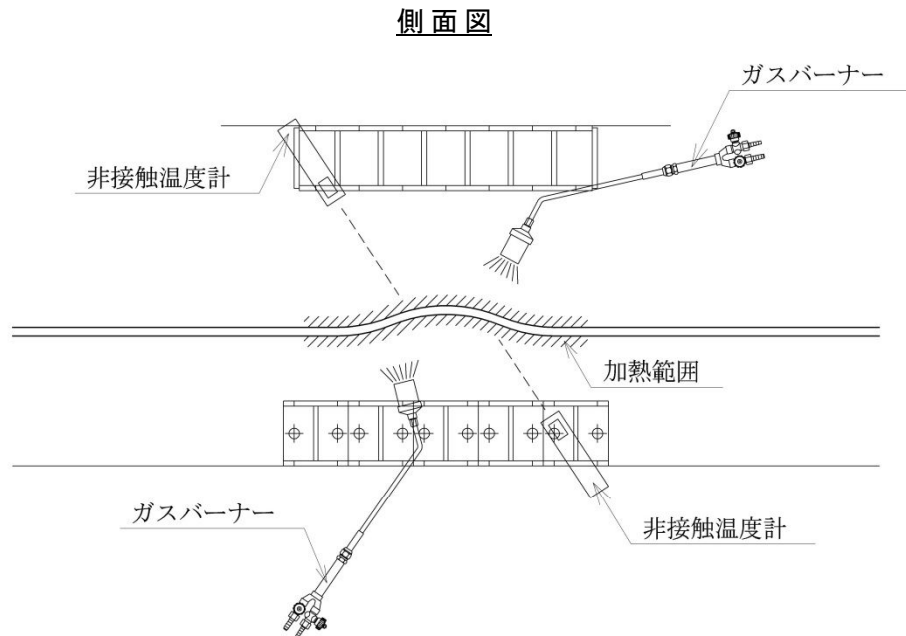
- ・加圧ジャッキは変形量を満足するストロークのものを採用する。
- ・加圧ジャッキ、受けジャッキのスペースを確認しておく。



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。

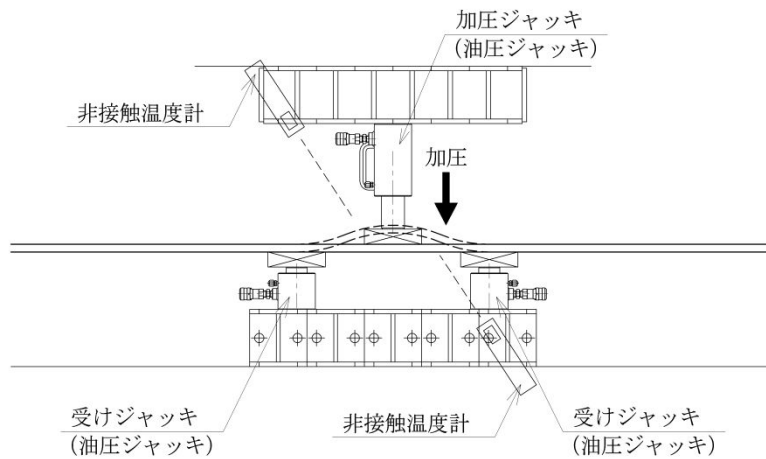


参-図-4. 1. 14 加熱矯正ステップ図（下フランジ補修例）

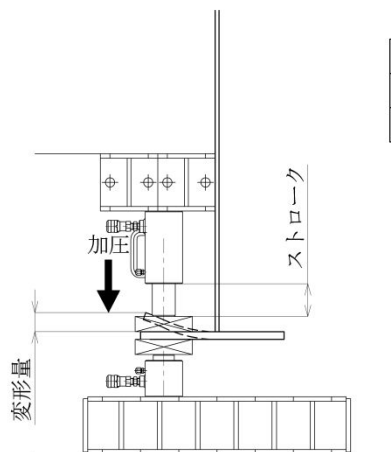
Step3 : ジャッキによる加圧矯正

- 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

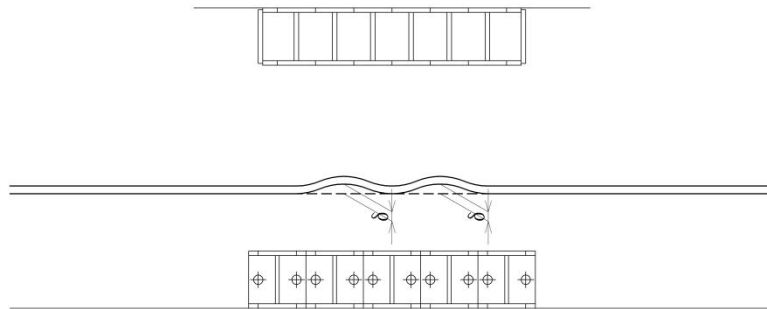
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 15 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

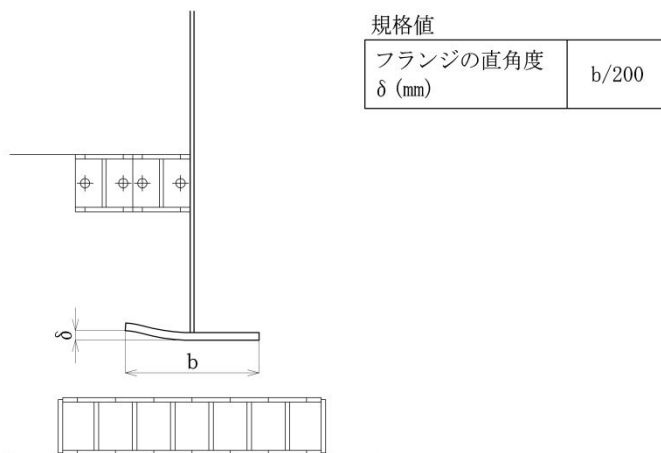
Step4 : 矯正後の形状確認

- ・ 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



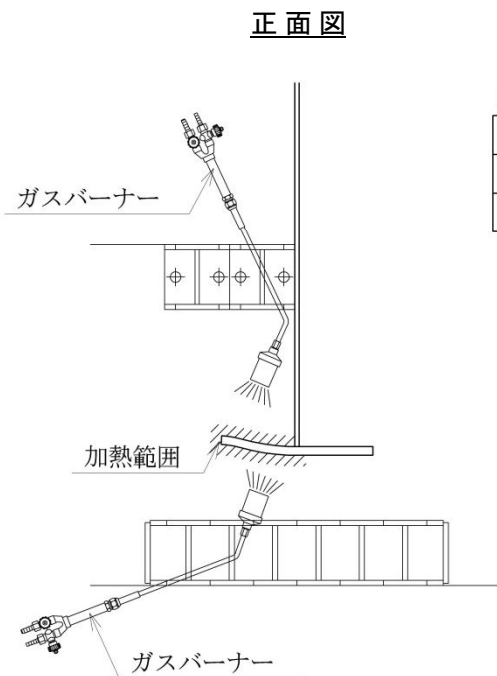
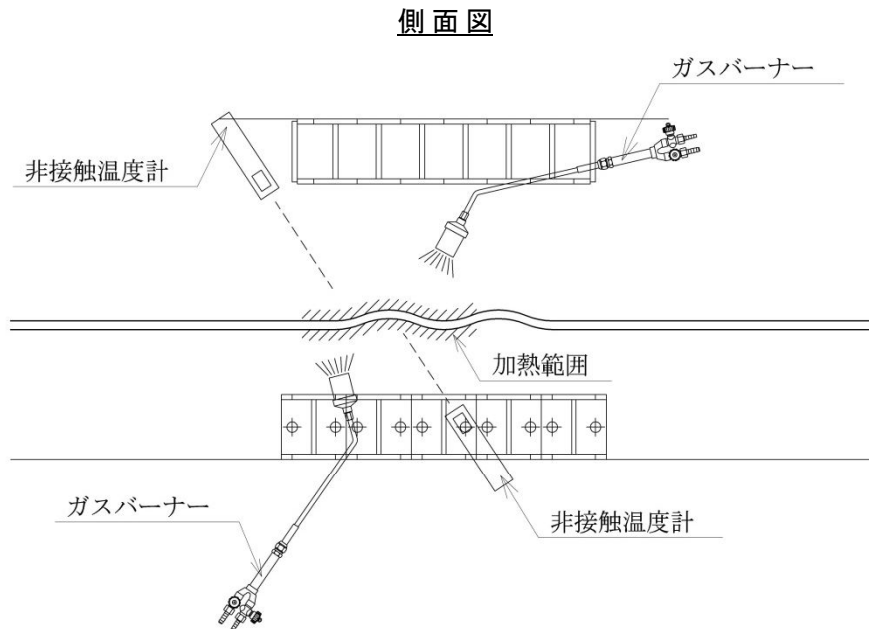
正面図



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。



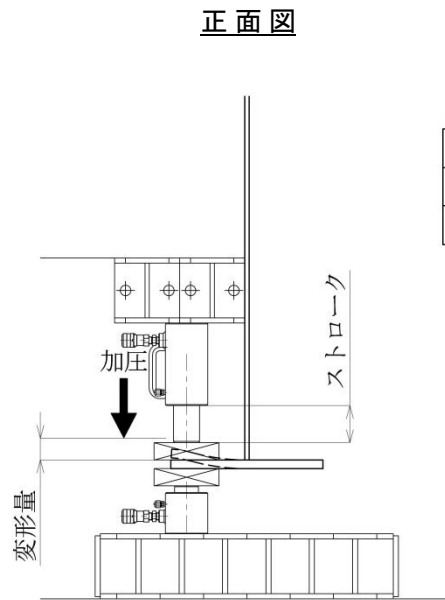
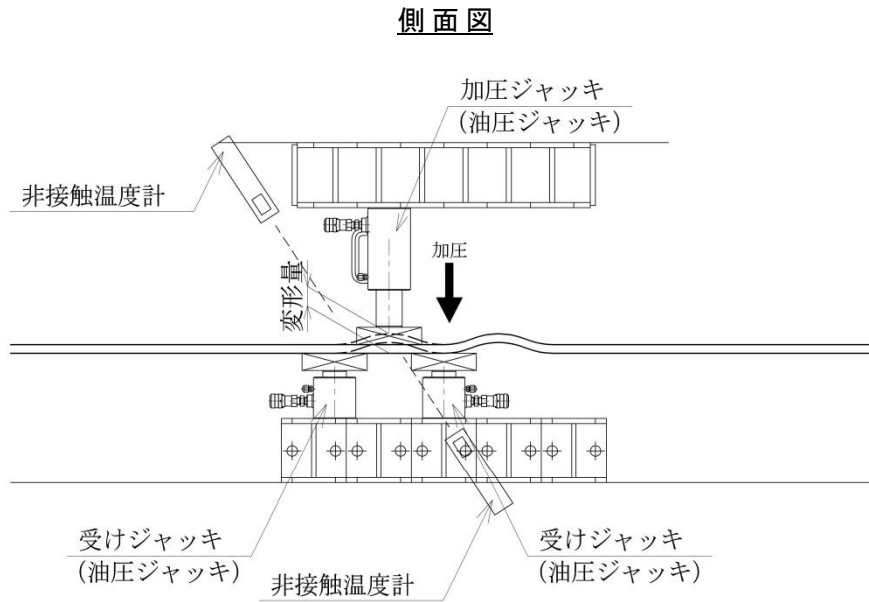
温度管理

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

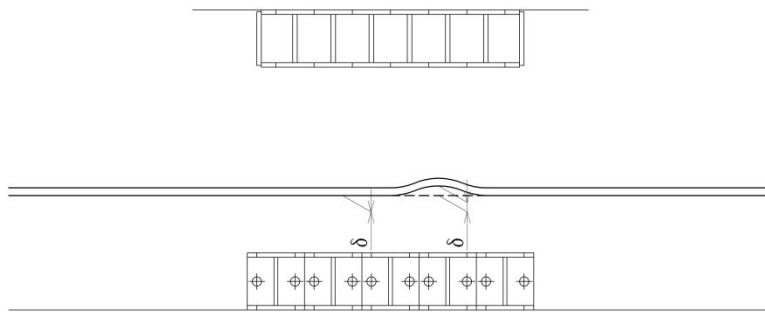
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 18 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

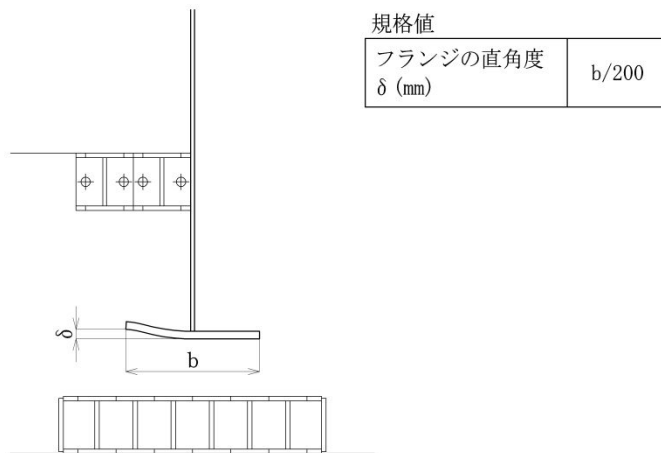
Step7 : 矯正後の形状確認

- ・ 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



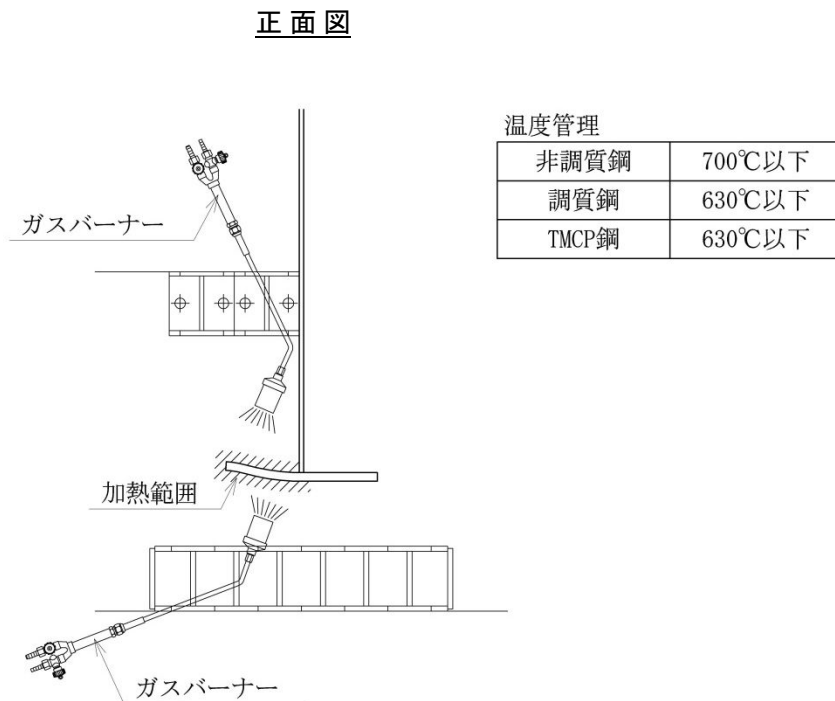
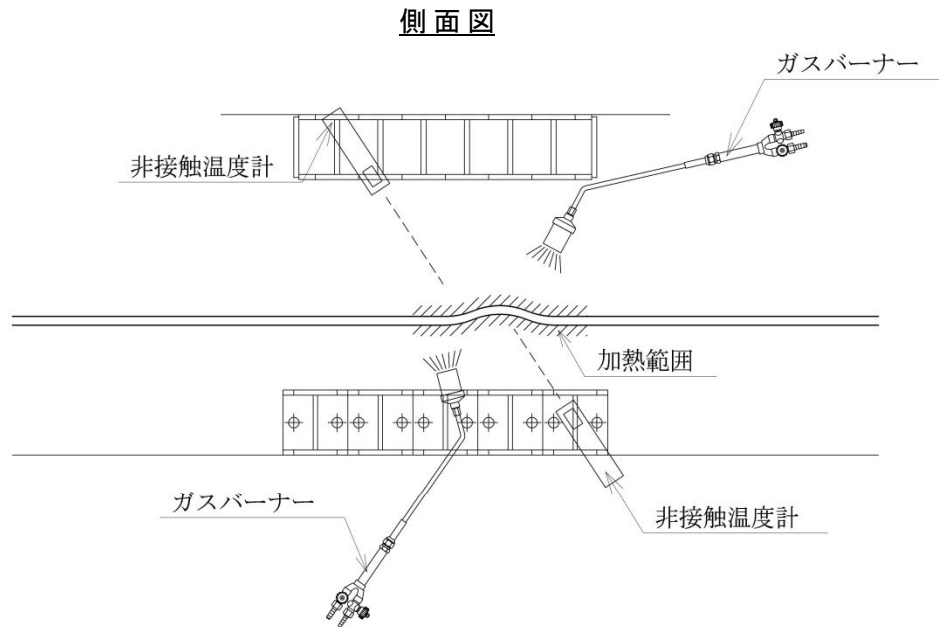
正面図



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。

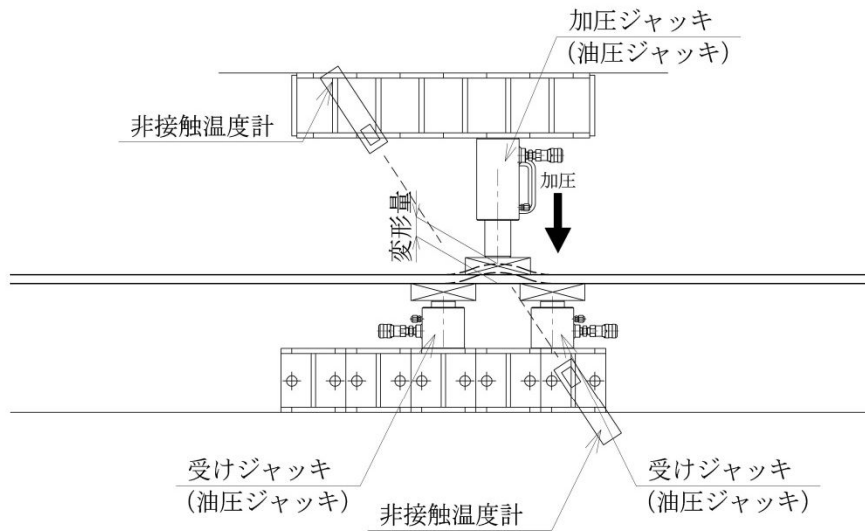


参-図-4. 1. 20 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

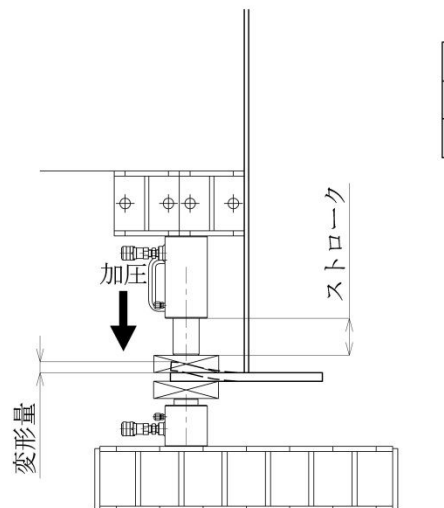
Step9 : 加圧矯正

- ・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

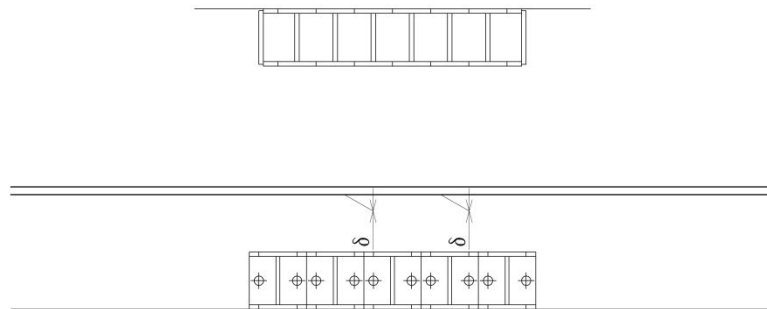
非調質鋼	400℃以上
調質鋼	400℃以上
TMCP鋼	400℃以上

参-図-4. 1. 21 加熱矯正ステップ図 (下フランジ補修例)

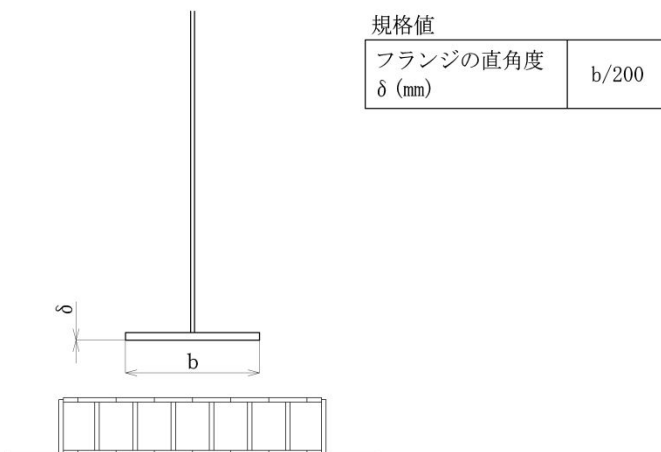
Step10：矯正後の形状確認

- ・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。

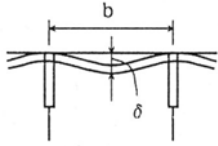
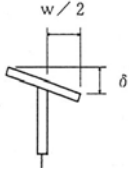
参-表-4.2.2 プロセス管理（温度管理）記録表（例）

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

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.1108 April 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国土技術政策総合研究所 企画部 研究評価・推進課
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 電話 029-864-2675