

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℃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℃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℃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℃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℃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℃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。