

第 4 編 鋼材性能の活用に向けた研究

1. まえがき

代表的な高性能鋼材に関して文献調査を実施し、主要な文献については、表-1.1 に示すようなフォーマットに整理した。対象とした鋼材は、橋梁用高性能鋼板、高強度鋼、降伏点一定鋼、狭降伏点レンジ鋼、低降伏比鋼、低降伏点鋼、橋梁用高強度ワイヤ、高じん性鋼、予熱低減鋼、大入熱溶接対策鋼、耐ラメラテア鋼、耐候性鋼、亜鉛めっき用鋼、ステンレス鋼、LP 鋼板、極厚鋼板の 16 種類である。これらを高性能となっている特性の観点で分類し、表-1.2 に示す。

表-1.1 鋼材性能の活用に関する文献調査結果の整理用フォーマット

No.	文献名称	対象鋼材等 キーワード	記述内容 (鋼材特性のポイントなど)	得られた知見

表-1.2 調査対象鋼材の分類

特性	強度	じん性・溶接性	耐食性	その他
鋼種	橋梁用高性能鋼板 高強度鋼 降伏点一定鋼 狭降伏点レンジ鋼 低降伏比鋼 低降伏点鋼 橋梁用高強度ワイヤ	(橋梁用高性能鋼板) 高じん性鋼 予熱低減鋼 大入熱溶接対策鋼 耐ラメラテア鋼	(橋梁用高性能鋼板) 耐候性鋼 亜鉛めっき用鋼 ステンレス鋼	LP 鋼板 極厚鋼板

次節からは、調査結果に基づき、各鋼材の(1)開発経緯、(2)これまでの研究事例、(3)今後の展望について述べる。これまでの研究事例については、その数の多寡により、研究成果まで詳細に紹介されている場合もあれば、ごく簡単に研究内容だけが紹介されている場合もあるなど、記述のレベルが鋼種によって異なっていることをご承知おきいただきたい。

2. 強度に関する高性能鋼材

2.1 橋梁用高性能鋼板

(1) 開発経緯

[三木千壽ら, 2003]¹⁾において、橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) が提案された。この背景として、様々な優れた特性を持つ鋼材が開発されているものの、それらの鋼材は必ずしも橋梁に必要とされる性能に適合したものになっているわけではなく、橋梁の性能に適合した鋼材を選定することができれば、橋梁の性能向上のほか、橋梁の建設コストを縮減することが可能となる、との指摘がある。そして、日本における高強度鋼材の開発と使用の歴史をレビューしたうえで、橋梁用鋼材として求められる性能をまとめ、その性能を満足する鋼材を橋梁用高性能鋼材 BHS500, BHS500W および BHS700W として提案している。BHS500 および BHS500W については、各種特性試験を行って要求性能を満足することを確認するとともに、これらの鋼材を用いると、どの程度のコスト縮減効果が得られるかを試設計により検討している。

ここでは、実在する鋼板桁橋を対象として、AASHTO LRFD のもと、使用鋼材の降伏強度をパラメータとした試設計を実施したところ、鋼材の降伏強度の増加に伴い鋼材重量は低減するものの、降伏強度が 500MPa を超えると、繰り返し荷重に起因する疲労限界状態が設計を支配する要因となり、そ

れ以上の高強度化は効果的ではないことから BHS500 が規定された。また、吊橋や斜張橋のように、鋼橋上部工の死荷重軽減が経済性に大きな影響を及ぼす橋梁形式においては、引張強度 780MPa（降伏強度 685MPa）の高強度鋼の活用が有効であり、鉄鋼製造技術の進歩もふまえて、降伏強度をさらに高めた 700MPa が設定され、BHS700 が規定された。

その後、BHS は JIS の呼称ルールに従って SBHS (Steels for Bridge High Performance Structure) と名称を変え、詳細は次項で述べるが、種々の検討の後、平成 20 年に、SBHS500 と SBHS700 が橋梁用高降伏点鋼板として JIS 制定 (JIS G3140) が進められた。その後、平成 23 年の改正で、新たに SBHS400 が JIS 規格に追加された。そして、SBHS のうち、SBHS400 および SBHS500 については、平成 29 年に改定された道路橋示方書のⅡ鋼橋・鋼部材編に具体的な設計法が記載された〔日本道路協会、2017〕²⁾。

SBHS は、高強度・加工性・溶接性を TMCP (Thermo-Mechanical Control Process : 熱加工制御) を適用することで、強度・加工性・溶接性を向上させた高性能鋼材であり、降伏強度が従来鋼より高く、板厚によらず降伏強度の保証値が一定である。また、高いじん性を有し、かつ圧延直角方向のじん性も保証されている。さらに、大幅に予熱温度低減が可能となるため、予熱作業及びその付帯作業の軽減あるいは省略が可能である。これは耐候性鋼仕様も同様である。

(2) これまでの研究事例

SBHS が提案されてから今に至るまで、SBHS と橋梁に係る研究事例として、大きく 2 つのフェイズに分類した。当初は、SBHS を用いた橋梁の試設計など、SBHS を橋梁に用いる利点や課題を抽出するためのフェイズ、その後、SBHS を実際に鋼部材へ適用することを想定し、SBHS の機械的特性や SBHS を用いた鋼部材の耐荷力曲線の検討に関するフェイズである。

a) フェイズ 1

〔本間宏二ら、2007〕³⁾ では、橋梁用高性能鋼材への要求性能とそれを達成するための鋼材仕様、提案する橋梁用高性能鋼材の各種性能確認と製作性の検証、橋梁用高性能鋼材を適用した鋼橋の試設計例、プロジェクト適用事例（東京港臨海道路プロジェクト）、について述べられている。

〔岡田淳ら、2007〕⁴⁾ では、橋梁用高性能鋼材の活用と従来鋼との組み合わせおよび最適配置により、連続合成 2 主 I 桁橋の長支間化の実現可能性について検討されている。その結果、耐風安定性が確保できる前提で中央支間 100m および 120m の 3 径間連続合成 2 主 I 桁橋の場合、負曲げ域に BHS700W、正曲げ域に BHS500、側径間端部や正負交番域に従来鋼を適切に配置し、かつ、ほぼ全ての断面で許容応力度が照査上の決定事項となるように断面を決定することで、従来鋼のみの使用ケースと比較して、大幅に断面を縮小でき、鋼重を低減できることが明らかとなった。

〔横関耕一ら、2011〕⁵⁾ では、SBHS を適用した鋼橋の最適化断面を支間 40 m から 120 m について試算され、3 種類の SBHS 鋼材を用い、設計に AASHTO LRFD を導入し、FEM をベースとして構造の最適化を図り、鋼重低減を目指すことが検討されている。その結果、既存鋼橋に比べ、大きく鋼重を低減することが可能（スパン中央で平均 16.8 %、中間支点上で平均 19.1 %）であり、支間 50 m 以下のモデルでは、全区間を SBHS400 としたモデルが、長支間では中間支点上付近でのフランジの鋼種を高強度としたものが最適断面となることが明らかとなった。

b) フェイズ 2

SBHS の材料特性に着目した研究事例

〔垂井敬寛ら、2012〕⁶⁾ では、SBHS500 と SBHS700 について、引張試験を行い、機械的性質の調査・整理が行われている。その結果、図-2.1 に示すように、SBHS500 の降伏比は 0.90～0.95 程度であり、既往の研究で得られた SM570 の降伏比平均値 0.86 と比較して大きな値を示し、SBHS700 の降伏比は 0.91～1.00 程度であり、非常に大きな値を示した。

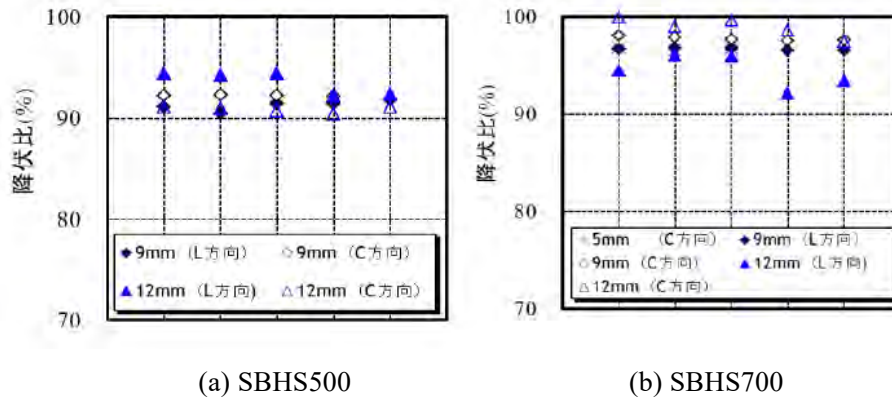


図-2.1 降伏比の分布⁵⁾

[出典：垂井敬寛，小野潔，松村政秀，吉山純平(2012)：SBHS500 および SBHS700 の機械的性質に関する研究，第 67 回土木学会年次学術講演会]

[山岸義之ら，2015]⁷⁾ では，SBHS400 の引張試験を通じて，表-2.1 に示すような機械的性質の調査・整理が行われるとともに，図-2.2 に示す構成式が提案され，さらに，SBHS400 を用いた自由突出板の耐荷力について解析的検討が行われた．その結果，図-2.3 に示すように SBHS400 は既往の耐荷力曲線で評価可能であることが確認された．また，[山東寛司ら，2015]⁸⁾ では，SBHS400 の繰返し載荷材料試験を行い，鋼材の繰返し塑性履歴特性を明らかにするとともに，構成則が提案され，SBHS400 の方が SBHS500 よりも繰返し載荷時に繰返し回数に応じて応力が増大しやすい傾向があることを明らかにした．

表-2.1 SBHS400 の機械的性質⁷⁾

[出典：山岸義之，衣川扶，大谷拓矢，宮下剛，小野潔，宮寄靖大(2015)：構成式の構築に向けた SBHS400 の引張試験と自由突出板の耐荷力解析，第 70 回土木学会年次学術講演会]

板厚 t	試験片採取方向	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏比 (%)	伸び (%)
9 mm	圧延	453	551	82	22
	圧延直角	460	552	83	22
27 mm	圧延	427	543	79	27
	圧延直角	435	546	80	27
全平均		444	548	81	24
【参考】JIS G3140		400以上	490～640	63～82%	$6 \leq t \leq 16$: 15%以上 $16 < t \leq 50$: 22%以上

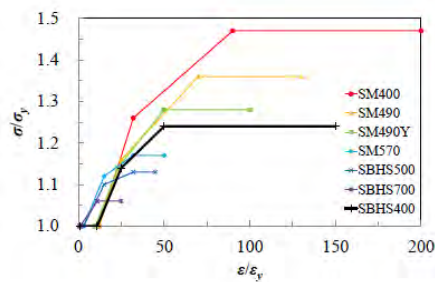


図-2.2 SBHS400 の応力・ひずみ関係のモデル化⁷⁾

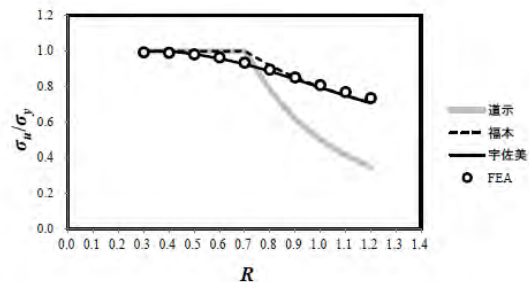


図-2.3 SBHS400 を用いた自由突出板の耐荷力曲線⁷⁾

[出典：山岸義之，衣川扶，大谷拓矢，宮下剛，小野潔，宮寄靖大(2015)：構成式の構築に向けた SBHS400 の引張試験と自由突出板の耐荷力解析，第 70 回土木学会年次学術講演会]

SBHS を用いた鋼部材の耐荷力に着目した研究事例

[宮下剛ら, 2015]⁹⁾では, SBHS500 を用いた溶接継手試験体を製作して溶接残留応力分布を計測し(図-2.4), この残留応力分布が自由突出板の耐荷力に与える影響の解析的検討から, 今後のさらなるデータの蓄積が必要なものの, 板厚方向の残留応力分布が自由突出板の耐荷力に対して与える影響は見られないことが確認されている(図-2.5). [安宅俊樹ら, 2017]¹⁰⁾では, SBHS500 を用いた自由突出板を対象として, 弾塑性有限要素解析が行われ, SBHS500 を用いた自由突出板の耐荷力特性は従来鋼の SM490Y と比較して, 傾向に明確な相違はなく, 従来の耐荷力曲線を用いて適切に評価できる可能性があることが明らかにされた(図-2.6). [Y. Tamtomo et. al., 2017]¹¹⁾では, SBHS400 で構成される十字柱の圧縮試験を行い, 自由突出板の耐荷力について検討され, SBHS400 から成る自由突出板の耐荷力特性は従来鋼と同様であり, 現行の耐荷力曲線で評価することができる可能性があることが明らかにされた(図-2.7). [J. Nie et. al., 2018]¹²⁾では, SBHS700 で構成される十字柱の圧縮試験を行い, 自由突出板の耐荷力について検討され, SBHS700 から成る自由突出板の耐荷力特性は従来鋼と同様であり, 現行の耐荷力曲線で評価することができる可能性があることが明らかにされた(図-2.8).

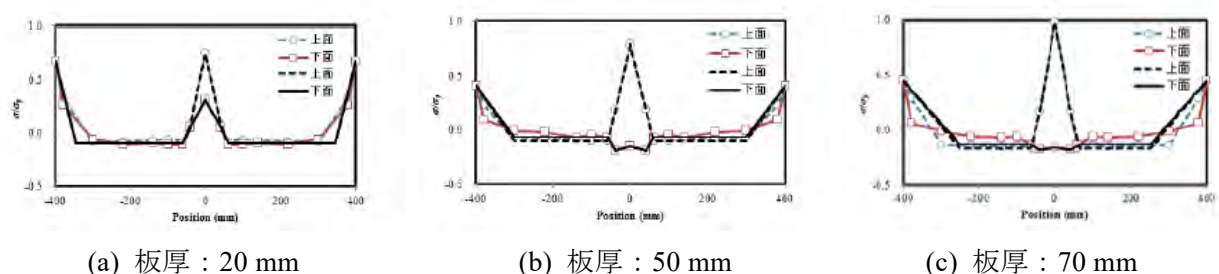
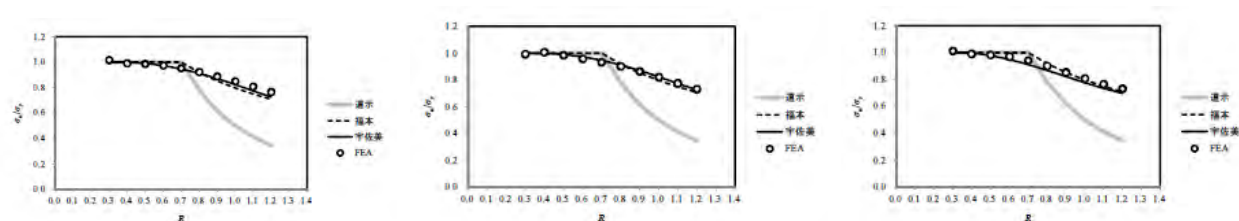


図-2.4 残留応力分布のモデル化⁹⁾

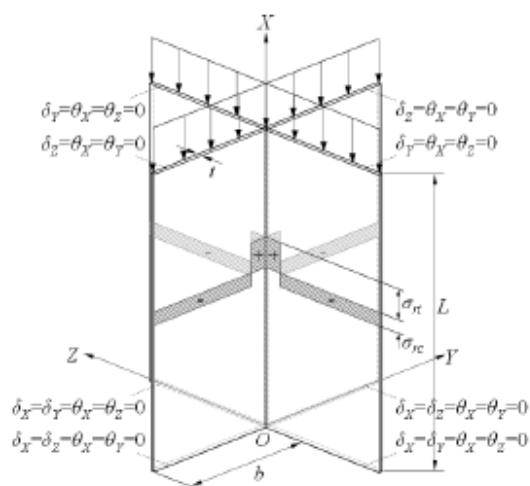
[出典：宮下剛, 衣川扶：SBHS500 の溶接残留応力の計測と自由突出板の耐荷力解析(2015), 第 70 回土木学会年次学術講演会]



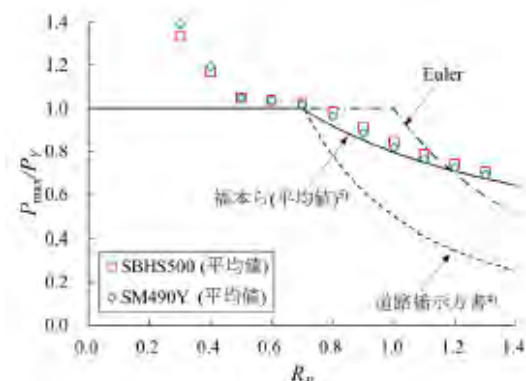
(残留応力分布：板厚方向一定) (残留応力分布：板厚方向一定) (残留応力分布：板厚方向分布)

図-2.5 SBHS500 を用いた自由突出板の耐荷力解析結果(板厚 50 mm)⁹⁾

[出典：宮下剛, 衣川扶：SBHS500 の溶接残留応力の計測と自由突出板の耐荷力解析(2015), 第 70 回土木学会年次学術講演会]



(a) モデル化



(b) 数値計算結果と耐荷力曲線の比較

図-2.6 SBHS500 を用いた自由突出板の耐荷力解析結果 (板厚 50 mm)¹⁰⁾

[出典：安宅俊樹，小野潔，加藤健太郎，宮下剛，松村政秀(2017)：SBHS500 を用いた十字断面短柱の耐荷力特性に関する解析的研究，第 72 回土木学会年次学術講演会]

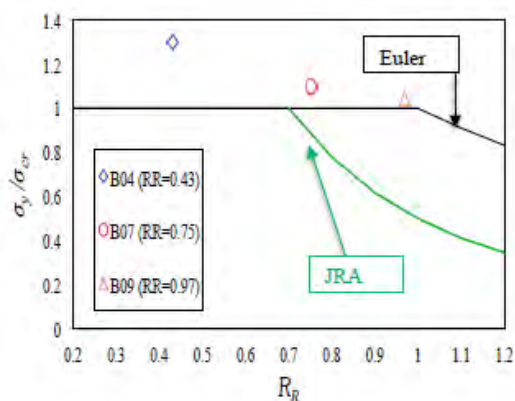
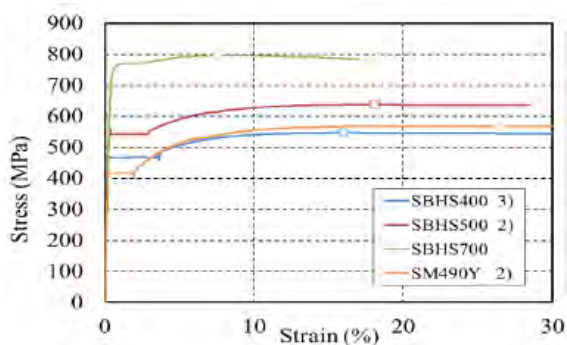
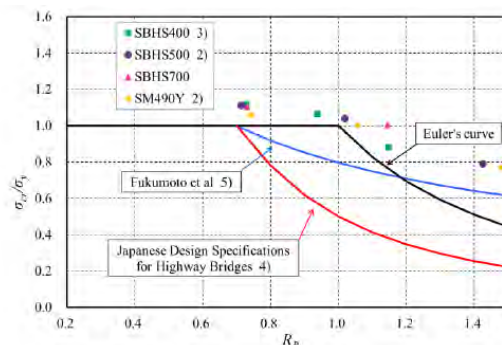


図-2.7 SBHS400 を用いた自由突出板の耐荷力解析結果¹¹⁾

[出典：Yoseph Michael Bimo Priyo Tamtomo, Thoshiki Adake, Kiyoshi Ono and Takeshi Miyashita(2017): An experimental study on load-carrying capacity of outstanding steel plates made of SBHS400, 第 72 回土木学会年次学術講演会]



(a) 応力・ひずみ関係



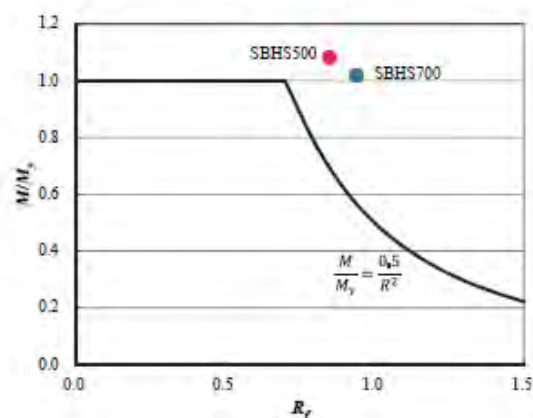
(b) 数値計算結果と耐荷力曲線の比較

図-2.8 SBHS700 を用いた自由突出板の耐荷力解析結果 (板厚 50 mm)¹²⁾

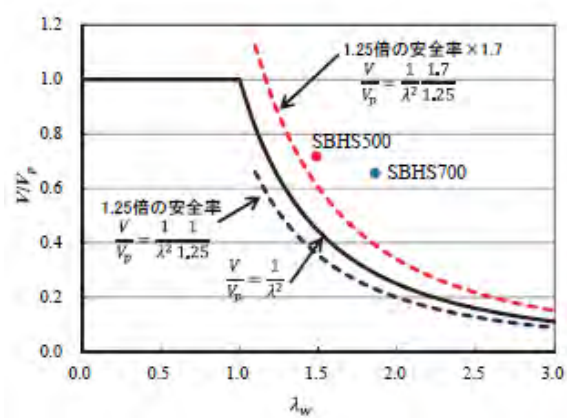
[出典：Jing Nie, Hikaru Sugimoto, Kiyoshi Ono, Takeshi Miyashita, Masahide Matsumura, Seiji Okada(2018): Load-carrying Capacity of SBHS700 Steel Plates with Cruciform Joint, 第 73 回土木学会年次学術講演会]

[野坂克義ら, 2013]¹³⁾ では, SBHS500, SBHS700 を用いた鋼 I 桁の静的載荷試験を行い, その挙動を把握するとともに, 提案されている照査式と耐力力とを比較し, 照査式の妥当性を明らかにするとともに, 以下の知見を得ている.

- SBHS を用いた場合, 高強度であるため降伏強度との比で表わした圧縮残留応力は全体的に小さくなり, 局部座屈などに対しては安全側となる.
- せん断耐力力は Basler の式を基本とした AASHTO LRFD の耐力力式で予測できる.
- H24 年版の道路橋示方書で用いられている圧縮を受ける自由突出板に対する基準耐力力曲線を用いても, SBHS に対して安全に許容応力度が定められることが実証できた (図-2.9(a)).
- せん断耐力力についても, せん断座屈強度を基準とした場合, H24 年版の道路橋示方書での安全率の考え方でも, SBHS を用いて十分に安全に設計できる (図-2.9(b)).
- 本実験の範囲内では, SBHS500, SBHS700 についても従来鋼と同様の設計式で評価可能であることを実証した.



(a) 曲げ試験



(b) せん断試験

図-2.9 実験結果と耐力力曲線の比較¹³⁾

[出典: 野坂克義, 奥井義昭, 小室雅人, 宮下剛, 野上邦栄, 長井正嗣(2013): SBHS を用いた鋼 I 桁の耐力力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 A, Vol.59, pp.70-79]

(3) 今後の展望

a) SBHS700 の活用

SBHS700 は, 引き続き材料特性や鋼部材の耐力力等の情報収集が必要であるものの, 他の SBHS と比較して, 降伏強度が非常に高く, 降伏比が大きい (約 95 %) ことから, 塑性化させてエネルギー吸収能を期待する部材や変形能が要求される部材に適用するよりも, 鋼製ラーメン橋脚, 鋼製タワー等の隅角部, 長大橋のタワーの隅角部等といった設計上, 塑性化を許容しない部材, 耐力が重要となる部材に適用することが望ましいと考えられる.

b) SBHS のハイブリッド構造への適用

例えば, 鋼製橋脚の補剛構造において, 縦リブに降伏強度が大きい SBHS700 を, フランジ・ウェブに従来鋼を使用するハイブリッド構造とすることで, フランジやウェブが降伏したとしてもリブが弾性域にあることから, 鋼セグメントの変形能の向上が期待される. 鋼セグメントの変形能の向上は, 鋼製橋脚のみならず, 高張力鋼が使用されることが多い吊橋, 斜張橋の主塔等, 鋼製橋脚以外の鋼部材への応用の可能性がある.

また, 鋼 I 桁において, そのフランジと比較してウェブに低強度な鋼材を使用するハイブリッド桁は, 鋼重低減によって鋼橋の競争力アップが期待されている [長井正嗣ら, 2012]¹⁴⁾ もの, 我が国

では設計法が整備されていないため、展開されていない。一方、H29年に道路橋示方書が改定され、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行したことに伴い、鋼桁を中心として、限界状態の設定ならびに塑性化を許容する設計法の確立に向けた研究開発が各機関で行われており、これらの研究を通じて、鋼桁の限界状態設計法が整備されることで、SBHSを用いたハイブリッド桁のメリットを活かされられると思われる。

参考文献

- 1) 三木千壽，市川篤司，楠隆，川端文丸(2003)：橋梁用高性能鋼材(BHS500, BHS700)の提案，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.1-10
- 2) 日本道路協会(2017)：道路橋示方書・同解説 II鋼橋・鋼部材編
- 3) 本間宏二，田中睦人，松岡和巳，糟谷正，川崎博史(2007)：橋梁用高性能鋼 BHS の利用開発技術開発，新日鉄技報，Vol.387，pp.47-52
- 4) 岡田淳，村上琢哉，川畑篤敬(2007)：橋梁用高性能鋼材の活用による連続合成 2 主 I 桁橋の長支間化に関する検討，土木学会論文集 F，Vol.63，No.2，pp.141-155
- 5) 横関耕一，三木千壽，鈴木啓悟(2011)：橋梁用高性能鋼材(SBHS)を用いたプレートガーダー橋構造の最適化の試み，鋼構造論文集，Vol.18，No.71，pp.15-25
- 6) 垂井敬寛，小野潔，松村政秀，吉山純平(2012)：SBHS500 および SBHS700 の機械的性質に関する研究，第 67 回土木学会年次学術講演会
- 7) 山岸義之，衣川扶，大谷拓矢，宮下剛，小野潔，宮寄靖大(2015)：構成式の構築に向けた SBHS400 の引張試験と自由突出板の耐荷力解析，第 70 回土木学会年次学術講演会
- 8) 山東寛司，小野潔，山田信司，橋本祥太，宮下剛，宮寄靖大(2015)：SBHS400 の構成則に関する検討，第 70 回土木学会年次学術講演会
- 9) 宮下剛，衣川扶：SBHS500 の溶接残留応力の計測と自由突出板の耐荷力解析(2015)，第 70 回土木学会年次学術講演会
- 10) 安宅俊樹，小野潔，加藤健太郎，宮下剛，松村政秀(2017)：SBHS500 を用いた十字断面短柱の耐荷力特性に関する解析的研究，第 72 回土木学会年次学術講演会
- 11) Yoseph Michael Bimo Priyo Tamtomo, Thoshiki Adake, Kiyoshi Ono and Takeshi Miyashita(2017): An experimental study on load-carrying capacity of outstanding steel plates made of SBHS400, 第 72 回土木学会年次学術講演会
- 12) Jing Nie, Hikaru Sugimoto, Kiyoshi Ono, Takeshi Miyashita, Masahide Matsumura, Seiji Okada(2018): Load-carrying Capacity of SBHS700 Steel Plates with Cruciform Joint, 第 73 回土木学会年次学術講演会
- 13) 野阪克義，奥井義昭，小室雅人，宮下剛，野上邦栄，長井正嗣(2013)：SBHS を用いた鋼 I 桁の耐荷力特性に関する実験的研究，構造工学論文集 A，Vol.59，pp.70-79
- 14) 長井正嗣，宮下剛，劉翠平，稲葉尚文，本間淳史(2012)：鋼及び合成ハイブリッド桁の設計と適用性に関する考察，土木学会論文集（構造・地震工学），Vol.68，No.1，pp.203-215

2.2 高張力鋼

高張力鋼 (high strength steel) は、その名の通り、高降伏点，高引張強さが特徴であり，構造の合理化，軽量化を可能とする。高張力鋼のイメージは，使用される用途，業界によって異なるものの，鋼橋の分野では，かつては 50 キロ鋼以上を高張力鋼と呼んでいた。最近では，調質鋼である 60 キロ鋼以上を指すことが多い [大田孝二ら，2000]¹⁾。ここでは，さらに高強度となる 80 キロ鋼を中心にして，高張力鋼について，開発経緯と研究事例，今後の展望について述べる。

(1) 開発経緯

1952年に、米国 U.S.Steel 社は、80 キロ鋼となる調質高張力鋼 (T-1 鋼) の製造に成功して量産に入り、我が国における調質高張力鋼の開発契機となった。その後、米国では、Carquinez 橋に初めて約 3,000 t の T-1 鋼が使用され、我が国でも 80 キロ鋼を鋼橋に適用することに関心が高まった。1960 年、調質 60 キロ鋼が初めて芦有道路の西村橋と平野橋に使用され、その後、名神高速道路、首都高速道路、阪神高速道路および一般道路にも用いられるようになった。この中で、名神高速道路木曽川橋梁は 3 径間連続合成桁で 60 キロ鋼を本格的に使用した代表的な橋梁である。1966 年に JIS G3106 の改正で SM58 が追加され、1967 年に SM58 が道路橋示方書に追補として組み入れられた。1980 年、実験橋というかたちで、80 キロ鋼が初めて京葉道路を跨ぐ花輪橋で使用された。花輪橋の支間は 29.1 m、幅員は 6.5 m であり、80 キロ鋼の使用部分は主桁の中央断面のみであった。その後、80 キロ鋼について活発な研究開発が行われ、その成果は阪神高速道路の港大橋や大和川橋梁 (HT70) に、そして本州四国連絡橋 (以下、本四連絡橋) に活用された。

港大橋は、1974 年に完成した支間 510 m のゲルバートラス橋であり、長大トラス橋特有の問題として、トラス格点の剛結により発生する大きな 2 次応力があった。この解決方法として、曲げ剛性を大きく増加させずに部材断面積を増加させる必要があり、厚板もしくは高強度の鋼材を使用せざるを得ず、中間支点近傍の上下弦材に最大 75 mm 厚の 80 キロ鋼が 4200 t 使用された。当時、70、80 キロ鋼は JIS にない鋼種であり、種々の研究成果を勘案して鋼材規格、許容応力度が定められた。この基本的な思想は本四連絡橋の基準に引き継がれた。

新井橋は、千葉縣市原市に架設された支間 19.2 m の単純活荷重合成桁であり、わが国ではじめてハイブリッド合成桁として設計が行われた。下フランジに、ウェブおよび上フランジよりも高い降伏点を有する鋼材 (HT80) が用いられている。[久保源三ら, 1975]²⁾ では、新井橋は小支間であり、各鋼種組合せによる設計の差はあまり大きくはなく、これは下フランジに高張力鋼を使用しても、ウェブの一部降伏を考慮した低減係数によって許容応力度が低下するためとされている。また、ハイブリッド合成桁の経済比較の結果、同一鋼種を鋼桁断面に用いたホモジニアス合成桁と比較して、7%程度のコストダウンが可能とされている。

大和川橋梁は中央支間 355 m の 3 径間連続斜張橋であり、主塔は独立 1 本柱で、側径間部に曲線が配置されている。このため、ケーブル面の偏心による大きな面外モーメントが付加されることで作用応力が大きくなり、最大板厚を 46 mm とし 80 キロ鋼が使用された。80 キロ鋼に関する鋼材、許容応力、製作に関する条件は、いずれも港大橋のものに準拠している。

本四連絡橋の道路鉄道併用橋では、疲労に関する検討が重要な課題であった。当時、鉄道橋での高張力鋼の実績はわずかであり、疲労に関するデータも少なかったことから、疲労試験や載荷試験など、活発な検討が進められた。その結果、大鳴門橋では 70 キロ鋼、児島～坂出ルート of 瀬戸大橋における 3 橋の吊橋と 2 橋の斜張橋では 60 キロ鋼までの鋼材使用に留まった。この理由は、吊橋の補剛桁には自重による部材力がほとんど発生せず、列車や自動車による活荷重が支配的となるためである。つまり、調質高張力鋼の溶接部の疲労強度は引張強さの増加から期待されるほどには向上せず、多くの部材は疲労許容応力範囲で断面寸法が決まってしまう、高張力鋼を使用するメリットがないためである。一方、鉄道併用の瀬戸大橋のうち、与島橋および番の洲高架橋の連続トラスの弦材には部分的に 80 キロ鋼が使用された。これは、連続トラスでは、死荷重の影響が大きく、活荷重による疲労の影響が小さくなるためである。また、中央支間 1991 m を有する明石海峡大橋の補剛桁には、死荷重軽減に向けて大量の 80 キロ鋼が使用され、上下弦材のうち、80 キロ鋼の占める割合は 26 % に及ぶ。明石海峡大橋では、予熱低減型の 80 キロ鋼が使用されたことも特徴として挙げられる。

高張力鋼の使用によって、主として高強度化による断面積低減の観点から、構造の合理化が可能となる場合がある一方で、最小板厚の規定や構造物の形状保持が構造設計の決定要因となる場合もある。曲げ部材では、断面の低減によって剛性が低下し、たわみや振動が大きくなり、桁橋の場合にはたわみ制限の規定から、断面増加が求められることもある。また、圧縮部材に高張力鋼を使用することで

細長比が大きくなり、高張力鋼を用いる利点が減少する場合があるので注意を要する。

(2) これまでの研究事例

耐荷力の観点では、軟鋼（SM41）ならびにその当時では新材料であった高張力鋼（HT80）を用いた溶接箱形断面柱の幅厚比制限に関する研究が〔奥村敏恵ら，1972〕³⁾で行われている。ここでは、純圧縮ならびに圧縮と曲げを受ける溶接箱形断面短柱を対象に、理論解析とあわせて、載荷試験が実施されている。その結果、純圧縮を受ける HT80 を用いた溶接箱形断面の限界幅厚比を 23 とすることが提案されている。また、〔宇佐美勉ら，1981〕⁴⁾では、HT80 を用いた溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する検討が行われている。ここでは、局部座屈と全体座屈の連成強度を精度よく推定することが可能な近似計算法が提案されるとともに、高張力鋼の場合、実際に使用される細長比を考えると、局部座屈の生じない断面構成にするよりも、局部座屈を許す断面構成にした方が経済的な設計になる可能性が大きいことが指摘されている。

一方、疲労強度の観点では、鋼素材の疲労強度は、高強度材になるに従って上昇するものの、溶接継手部の疲労強度は降伏強度や引張強度にはほとんど影響されない。このため、継手によっては高張力鋼の方が低くなることもあり、本四設計基準〔本州四国連絡橋公団，1989〕⁵⁾での疲労設計寿命曲線では、非調質、調質で分け、A～D の 4 等級が設定された。例えば、縦ビードの疲労強度等級は 60 キロ鋼以上の調質鋼では B 等級で、50 キロ級以下の場合の A 等級より 1 ランク低く規定された。また、〔C. Miki et. al., 1992〕⁶⁾では、明石海峡大橋の補剛トラス弦材とほぼ等しい断面の部材の曲げ疲労試験を通じて、角溶接部の疲労強度が検討された。角溶接部の要求品質レベルは B 等級であるものの、かなり大きな寸法のブローホールが含まれる場合、このような品質の角溶接部に対しては、本四連絡橋設計基準の D 等級の S-N 曲線（200 万回で 80 MPa）を適用することが適当であると指摘されている。

高張力鋼の利用による鋼橋の合理化の可能性については、〔村越潤，1996〕⁷⁾や〔小西拓洋ら，2000〕⁸⁾などで検討が行われている。〔村越潤，1996〕⁷⁾では、比較的短いスパン長（33 m）の単純合成鉄桁を対象に、AASHTO LRFD の限界状態設計にもとづく照査が行われ、鋼材の降伏点と鋼重の関係が整理された。その結果、鋼材の高強度化は一般に鋼重の低減につながるものの、AASHTO の規定ではコンパクト断面として扱える降伏強度が 485 MPa 以下であることから、降伏強度が 586 MPa 以上となる鋼材では疲労規定によって鋼重の増加が見られた。また、〔小西拓洋ら，2000〕⁸⁾でも、国内で標準的なスパン、幅員を有する 3 種類の合成連続 I 桁橋を対象に、AASHTO LRFD の限界状態設計にもとづく照査が行われ、各鋼材強度により異なる限界状態により断面が決定され、特に高強度化に伴い疲労限界状態が大きく影響することが指摘されている。

(3) 今後の展望

今後、我が国では、具体化しそうな長大吊橋プロジェクトなどがなく、一般橋では断面を小さくできるメリットがある一方で剛性確保に課題があることから、80 キロ級高張力鋼などが橋梁の分野で幅広く使用されることはあまり期待できない。しかし、設計の自由度を広げる観点から、トラス格点部や斜張橋ケーブル定着部などの局部的に高い応力が発生する部位への適用が考えられる。これらを実現するためには、求められる性能と品質のバランスを検討し、場合によっては要求品質を見直すなどにより製作方法を合理化して、製作費用を低減する努力も必要となる。製作コストが低減できれば、吊形式橋梁の主塔や合理化・省力化橋梁などでは、架設コスト低減の観点からの使用も考えられる〔大田孝二ら，2000；大江慎一ら，2018〕^{1)・9)}。また、コンパクト断面の適用断面を拡大させることが可能となれば、高張力鋼の適用メリットの増加に結び付くと考えられる。

参考文献

- 1) 大田孝二，深沢誠(2000)：鉄と鋼，建設図書

- 2) 久保源三, 石渡正夫, 大方茂: ハイブリッドビームの実橋への適用—その経済性と新井橋の架設—, 川崎製鉄技報, Vol.7, No.2, pp.269-284, 1975
- 3) 奥村敏恵, 西野文雄, 長谷川彰夫(1972): 箱型断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, Vol.205, pp.19-30
- 4) 宇佐美勉, 福本喙士, 青木徹彦(1981): 溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol.308, pp.47-58
- 5) 本州四国連絡橋公団(1989): 上部構造設計基準・同解説
- 6) C. Miki, A. Okukawa, S. Ooe and S. Ysui(1992): Fatigue Strength of Corner Welds of Truss Chords Containing Blow Holes, JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.9, No.2, pp.109s-116s
- 7) 村越潤(1996): 強度特性から見た高性能鋼材の橋梁への適用性について, 土木技術資料, Vol.38, No.2
- 8) 小西拓洋, 高橋和也, 三木千寿(2000): 高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.91-103
- 9) 大江慎一, 田中睦人, 舘石和雄(2018): 本州四国連絡橋プロジェクトに見る高張力鋼の開発, 土木学会誌 Vol.103

2.3 降伏点一定鋼

(1) 開発の経緯

鋼材は一般的に、板厚の増大によって降伏点が低下するため、鋼構造物の設計において板厚の大きい鋼材を使用する場合には鋼重の増大や経済性との兼ね合いに対して、十分な考慮が求められる。このような問題に対し、TMCP 技術などを用いて板厚 40mm 以上においても高い降伏点を保証できる鋼材が開発された。橋梁分野においては、平成 8 年 12 月の道路橋示方書・同解説 [日本道路協会, 1998]¹⁾ に、SI 単位表記への改訂とともに記載された。

(2) これまでの研究事例

2004 年に、橋梁に用いられた鋼材に関する実績調査が行われており [南邦明ら, 2004]²⁾、降伏強度と板厚の関係を回帰分析すると降伏点一定鋼の場合、SM570 材は一般鋼より板厚増加による降伏強度の低下率は小さいが、全くないわけではないことが示されている。また、SM490 材では、板厚増加による降伏強度の低下はほぼ見られないことが示されている。

2007 年に、橋梁用高性能鋼材の活用と従来鋼との組み合わせおよび最適配置により、連続合成 2 主 I 桁橋の長支間化の実現可能性について検討が行われており [岡田淳ら, 2007]³⁾、構造特性において、橋梁用高性能鋼材を利用することで、中央支間 100m および 120m の場合に従来鋼のみの使用ケースと比較して大幅に断面を縮小でき、鋼重を低減できることが明らかにされた。また経済性において、応力の小さい領域に従来鋼を適切に配置することで、経済的に優れた長支間 2 主 I 桁橋を実現できる可能性が示された。

2009 年に、部材の耐力の観点から降伏点一定鋼の適用性が検討されており [池田学ら, 2009]⁴⁾、板厚 41mm の降伏点一定鋼を用いた場合、普通鋼材で同等の耐力とするためには板厚を 44~47mm とする必要があり、鋼重を 4~7%低減することが可能であることが示された。また板厚 50mm の降伏点一定鋼を用いた場合には、鋼重 4~8%、鋼材費 5~14%低減できることが示されている。

2011 年に、降伏点一定鋼と同様の性質を有する鋼材として SBHS を使用した鋼橋の最適化断面の試算が行われており [横関耕一ら, 2011]⁵⁾、SBHS 材を使用した連続 2 主桁プレートガーターをはり理論ベースでの解析で鋼種配置の最適化を行ったところ、中間支点付近でのフランジを高強度としたものが最適断面となることが示された。また、FEM 解析による最適化を行うと、床版に荷重分配効果が考慮され、断面の低減を実現できることが報告されている。

(3) 今後の展望

鈑桁橋においては、近年、少数主桁とする構造形式も採用されている。この形式では主桁間隔および横桁間隔を拡大できることが利点として挙げられるが、合成床版などの性能を考慮した上でなお主桁断面を構成する板材の増厚が必要と考えられ、鋼重低減の観点から降伏点一定鋼の活用が考えられる。

現行、新設橋梁の架設数が減少しているが、従来の許容応力度設計の体系で設計されてきた既設橋では、経年劣化等に伴って補修や部材取り替えの需要が高まっている。このような場合に、板厚の大きい鋼製橋脚や鋼鈑桁橋のフランジ部などへ降伏点一定鋼を用いることにより鋼重低下を図り、構造全体として合理化を図ることなども考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会(1998)：道路橋示方書(I 共通編・II 鋼橋編)・同解説，丸善，p.112
- 2) 南邦明，三木千壽(2004)：橋梁で使用する鋼材の機械的性質の現状，鋼構造論文集，第 11 巻，第 42 号，pp.121-132
- 3) 岡田淳，村上琢哉，川畑篤敬(2007)：橋梁用高性能鋼材の活用による連続合成 2 主 I 桁橋の長支間化に関する検討，土木学会論文集 F，Vol. 63，No. 2，pp.141-155
- 4) 池田学，江口聡，加藤博之(2009)：性能照査型設計法における鋼部材の座屈耐荷力算定法，鉄道総研報告，Vol. 23，No. 5，pp.11-16
- 5) 横関耕一，三木千壽，鈴木啓悟(2011)：橋梁用高性能鋼材（SBHS）を用いたプレートガーター橋の最適化の試み，鋼構造論文集，第 18 巻，第 71 号，pp.15-25

2.4 狭降伏点レンジ鋼

(1) 開発の経緯

1981 年施行の建築分野における新耐震設計法で鉄骨の変形性能確保が重要な要素となり、降伏後の塑性変形性能が要求された [山口種美ら，1995；吉田譲，2007]^{1),2)}。そこで、1994 年 6 月に JIS G 3136 で SN 材の規格が制定され、A 種：変形させず本格的な溶接を行わない部材・部位，B 種：一般部材・部位，C 種：板厚方向に力を受ける部位へ適用となった。これらは、昭和 55 年建設省告示第 1794 号の第一および第二の表に追加され、許容応力度の基準強度として定められた。2000（平成 12）年には第 1794 号は廃止され、平成 12 年建設省告示第 2464 号に改められている。

また、1988 年より 5 年に亘り建設省の総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」が実施された。この一環として、(社)鋼材倶楽部の高性能鋼利用技術小委員会にて 60 キロ級の建築鉄骨向け高性能鋼（SA440）の研究開発が行われた。

(2) これまでの研究事例

ここでは SN 材および SA440 に関する研究事例について、いくつかを取り上げる。なお、いずれも建築分野における検討事例である。

降伏強度に着目した検討としては、澤田らが降伏強度のばらつきの大きさが最適設計された骨組みの経済性に与える影響について述べている [澤田樹一郎ら，1999]³⁾。この検討では 2 種類の骨組構造において、梁降伏型の全体崩壊機構を形成する確率に着目しており、素材試験の結果に基づき鋼材の平均値および変動係数の異なる 6 ケースについての検討を行っている。いずれのケースにおいても使用する鋼材重量を増加させると指定崩壊機構の形成確率の数値が大きくなるものの、降伏強さのばらつきが小さいケースの方が、わずかな重量の増加で梁降伏型の全体崩壊機構を形成する確率が高くなることを示している。この検討結果からは、指定崩壊機構の確実な形成を考える場合、降伏強度の

ばらつきが小さい SN490B を使用することが最も経済的となることが述べられている。

また、柱梁接合部を対象とした箱形断面柱部材の増厚補強により、製作過程における加工工数の低減を図りながら所定の構造性能が得られるかについて、1998 年～2000 年にかけて、一連の報告がなされている〔森田耕次ら，1998；藤田謙一ら，1998；藤田謙一ら，1999；藤田謙一ら，2000〕^{4)～7)}。これらの検討はいずれも柱梁接合部の挙動に着目して報告されているものであるが、柱部材、梁部材ともに SN490B を使用した試験体により、載荷試験を実施し検討がなされている。

SA440 に関しては、先述した（社）鋼材倶楽部の高性能鋼利用技術小委員会にて得られた成果がまとめて報告されている〔高梨晃一ら，1994〕⁸⁾。降伏強度（降伏点および 0.2% オフセット耐力）のばらつきについて 61 本の素材試験の結果について整理されており、平均値は 48.14 kgf/mm²，標準偏差が 1.82 kgf/mm² と報告されており，従来鋼に比べてばらつきが大きいことが示されている。このことを踏まえ，保有水平耐力を求める終局強度設計においては，従来鋼では基準強度の F 値を 1.1 倍して良いこととなっていたが，SA440 においては 1.05 倍とすることが提示されている。

(3) 今後の展望

狭降伏点レンジ鋼に関しては，SN 材および SA440 を用いた検討例は多くあるものの，全体を通して構造形式を対象とされた検討と比べて降伏強度の上下限に着目された検討例は多くない。特に，SN 材は降伏比が低く設定されていることもあり，材料性能としては低降伏比であることに着目されることが多いようである。

H29 道示においては，従来の許容応力度設計から限界状態設計へと大きく改定されているが，制限値の算出においては材料の特性値が限界状態の設定に寄与している。このことから，降伏強度の上下限が設計に与える影響，特に部材・構造係数との関係に着目して検討する余地は残されているものと考えられる。

参考文献

- 1) 山口種美，岡田忠義，長谷川博行，望月晴雄，萩原賢次，宇野暢芳，計良光一郎(1995)：建築構造用鋼材の開発と実用化，新日鉄技報，第 356 号，pp.22-30
- 2) 吉田譲(2007)：建築鉄骨用鋼材の最近の動向と今後について，溶接学会誌，第 76 巻，第 7 号，pp.7-11
- 3) 澤田樹一郎，中村雄治，松尾彰，岡崎章(1999)：降伏強さのばらつきを考慮した崩壊機構指定骨組の最小重量信頼性設計，鋼構造論文集，第 6 巻，第 23 号，pp.63-69
- 4) 森田耕次，藤田謙一，横井圭司，古沢恵三(1998)：増厚補強箱形断面柱-H 形断面梁接合部の構造性能に関する研究，鋼構造論文集，第 5 巻，第 19 号，pp.39-53
- 5) 藤田謙一，森田耕次，古沢恵三，横井圭司，濱野公男，松原洋一，古海賢二(1998)：増厚補強箱形断面柱-梁フランジ接合部の引張挙動に関する研究，鋼構造論文集，第 5 巻，第 20 号，pp.53-64
- 6) 藤田謙一，森田耕次，古沢恵三，横井圭司，濱野公男，松原洋一，古海賢二(1999)：増厚補強箱形断面柱-H 形断面梁部分骨組架構の構造性能，鋼構造論文集，第 6 巻，第 24 号，pp.39-54
- 7) 藤田謙一，森田耕次，古沢恵三，横井圭司，濱野公男，松原洋一，古海賢二(2000)：増厚補強箱形断面柱-H 形断面梁立体部分骨組架構の構造性能，鋼構造論文集，第 7 巻，第 25 号，pp.89-103
- 8) 高梨晃一，福田俊文，岡田忠義(1994)：60 キロ級高性能鋼の利用技術開発，鋼構造論文集，第 1 巻，第 1 号，pp.1-12

2.5 低降伏比鋼

(1) 開発の経緯

従来の鋼材には地震時の安全性確保の点で必要な塑性変形能力などに課題があり，その特性を改良するため開発された。

(2) これまでの研究事例

開発された低降伏比鋼 (TS520 および 580N/mm² 級低 YR 鋼) は、実験において TS580N/mm² 級低 YR 鋼を用いた柱-梁接合部は十分な耐力と変形能力を具備し、耐震性能が高いことが明らかにされた [上田修三, 1994]¹⁾。また、総括すると TS520 および 580N/mm² 級低 YR 鋼は母材性能、溶接継手性能とも良好であり、それらの構造性能も優れていることが紹介されている。

建築分野では、1980 年代から強地震に対する建造物の安全性が骨組みの塑性ひずみエネルギー逸散能力に依存することから、降伏比による耐震安全性への影響について検討がなされている [加藤勉, 1988]²⁾。3 点荷重のはり実験および圧縮と曲げを受ける柱部材の数値解析による検討より、最大耐力に至るまでの塑性変形能力を有するには降伏比をある程度、低い値とすることの重要性について言及されている。また、短柱実験の結果より、部材を構成するフランジ、ウェブの幅厚比が同程度ある場合、局部座屈発生後もある程度の耐力を維持するためには、降伏比の値が低く抑えられていることが必要であることを示している。

土木分野での活用に関して、溶接 H 形梁を対象に圧縮フランジの局部座屈に着目して実験的な検討が行われている [森脇良一, 1992]³⁾。60 キロ級高張力鋼の QT 鋼 (降伏比約 90%) と LY 鋼 (降伏比約 80%) の 2 種を用いて塑性断面 ($R=0.5$), コンパクト断面 ($R=0.8\sim 1.0$), ノンコンパクト断面 ($R=1.1$) の試験体について比較したところ、座屈開始荷重は QT 鋼の方が高いものの、ねじれ座屈が生じるまでの耐荷余力を比較すると LY 鋼の方が大きくなることが確認されている。また、荷重-変位関係より求まる吸収エネルギー W では、同じ幅厚比パラメータで比較すると QT 鋼の方が大きいものの、降伏荷重までの吸収エネルギーに対する比率 W_N で比較すると、幅厚比パラメータの値が小さくなるほど LY 鋼の方が、 W_N の値が大きくなることが示されている。

また、材料特性を考慮した鋼箱形断面部材の曲げ挙動に関する検討が行われている [岩坪要ら, 1998]

⁴⁾。幅厚比が大きなモデルでは鋼種による最大曲げモーメントの違いは見られず、ほぼ全塑性モーメントの耐力を有していた。幅厚比が 0.4 となるモデルでは、ひずみ硬化の影響により LYR 鋼は降伏回転角の 10 倍でも強度低下がみられなかった。また、幅厚比が 0.6 以上のモデルでは、ひずみ硬化の影響が現れるのは最大曲げ強度以降であった。LYR 鋼の降伏棚の長さを変えることで最大曲げモーメント以降の強度低下に違いが現れた。降伏比を下げることで最大曲げ強度や塑性変形能力の向上を図ることの可能性が示された。さらに、LYR 鋼の特徴を生かすには幅厚比が小さい部材に適用することが望ましいことが明らかとなった。

2000 年には、引張強度が 600N/mm² 級の低降伏比の性能を有する高張力鋼材 (HT440) について、従来の高張力鋼材 (SM570) と補剛板の純圧縮載荷試験に基づく比較が行われている [社団法人 日本鋼構造協会, 2000]⁵⁾。実験結果として、同一の幅厚比および補剛材剛比の試験体を比較すると、塑性率 (最大荷重時たわみ/降伏荷重時たわみ) は低降伏比鋼の方が高くなり、じん性に富むことが確認されている。また、累積エネルギーの比較では、両鋼種の履歴は部分的に一致するものの最大累積エネルギーは低降伏比鋼が従来鋼を大きく上回り、エネルギー吸収性能に優れていることが示された。

2004 年には、建築構造用鋼材 (SN490B) を用いた鋼柱の高温下での座屈強度に関する実験資料を得るための鋼柱小型模型の載荷加熱試験が実施されている [岡部猛ら, 2004]⁶⁾。一定温度で実験を行い、全体曲げ座屈を伴う柱材の荷重・変形関係を調べると、細長比 1.0 以下の領域では 400℃で常温時の約 5 割程度まで強度が低下した。また、一定荷重下漸増温度実験より、座屈強度は常温時軸力比で 6%程度低下することが示された。さらに、一次元有限要素法による弾塑性クリープ熱変形解析法を用いて、鋼柱部材の高温座屈実験の挙動について数値解析による検討が行われており、500℃よりも高い温度域では解析値は実験値よりも高めの崩壊温度となるが、高温クリープひずみの影響を考慮することにより、解析値は実験値よりも低めの崩壊温度となって安全側の評価となった。このことから、実験挙動を安全側で予測するためには、SN490B 材の高温クリープ特性の考慮が重要であると示された。

2007 年には、高強度低降伏比鋼材と高強度コンクリート、高強度せん断補強筋を用いた SRC 部材の耐力評価、および SRC 基準（2001 年）の終局曲げ耐力および終局せん断耐力の算定式の適用性について検討されている〔仲野喜晴ら，2007〕⁷⁾。検討の結果として、高強度低降伏比鋼を用いることで最大耐力以後の耐力低下率が小さくなること、一般化累加強度理論を適用すると、実験値を安全側に評価できること、塑性理論式を用いると、SRC 基準に比べて SRC 柱材の終局せん断耐力評価をより合理的に行えることが明らかにされた。

(3) 今後の展望

低降伏比鋼については、その開発経緯からも地震時の塑性変形能に着目されてきた背景からも明らかな通り、エネルギー吸収を期待する部材への適用が望ましいと考えられる。ただ、2000 年までに比較的多くの検討がなされてきたものの、近年は被災後の補修・補強など、維持管理分野での研究・検討へのシフトが大きく影響し、その数はかなり少なくなっている。

低降伏比鋼の活用については、例えば鋼製橋脚への適用でエネルギー吸収能の向上を図ることは考えられるが、曲げモーメントの勾配による局所的な降伏の発生で、鋼材の性能が十分に期待できない可能性も示唆されている〔社団法人 日本鋼構造協会，2000〕⁵⁾。鋼材性能を十分に活用するためには、部材のディテールに関しても合わせて検討することが必要であり、今後の検討が期待される。

参考文献

- 1) 上田修三(1994)：最近の建築・土木用高機能鋼材，鋼構造論文集，第 1 巻，第 1 号
- 2) 加藤勉(1988)：建築用鋼材の降伏比について，鉄と鋼，第 74 巻，第 6 号，pp.951-961
- 3) 森脇良一(1991)：降伏比の異なる 60 キロ級高張力鋼による溶接組立梁の極限強度と変形性能について，構造工学論文集，Vol. 37A，pp.155-166
- 4) 岩坪要，山尾敏孝，崎元達郎(1998)：材料特性を考慮した鋼箱型断面部材の曲げ挙動に関する研究，応用力学論文集，Vol. 1，pp.519-526
- 5) 社団法人 日本鋼構造協会(2000)：次世代土木鋼構造研究特別委員会，高機能鋼材の橋梁への利用小委員会 報告書，高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告，pp.240-249
- 6) 岡部猛，阿部武雄(2004)：建築構造用部材（SN490B）を用いた柱材の高温時の座屈強度，日本建築学会構造系論文集，第 585 号，pp.231-238
- 7) 仲野喜晴，難波隆行，藤澤一善，南宏一(2007)：高強度材料を用いた SRC 柱の弾塑性性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 3，pp.109-114

2.6 低降伏点鋼

(1) 開発の経緯

構造物が地震で破壊しないようにする考え方として、耐震、制振、免震の 3 つがある。このうち制振は、構造物中に組み込んだ装置（制振デバイス）に地震のエネルギーを吸収させて、構造物本体の負担を小さくする技術である。これまでに、オイルダンパーのような粘性材料や鉛などの粘弾性材料を用いたもの、摩擦を利用したものなどが実用化されているが、それらと同様の機能を持つ履歴エネルギー吸収型の制振デバイスを、鉄鋼材料を用いて実現することを目指して開発された鋼材である。

(2) これまでの研究事例

材料特性およびそのモデル化について、低降伏点鋼の低サイクル疲労特性〔佐伯英一郎ら，1995b〕

¹⁾ やヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性〔佐伯英一郎ら，1995b〕²⁾，極低降伏点鋼の溶接熱影響〔小野喜信ら，2001〕³⁾，速度依存性を考慮したダンパー用鋼材の履歴特性〔山田哲ら，2002〕

⁴⁾，極低降伏点鋼の 2 段多重振幅における累積疲労損傷〔瀬戸ら，2010〕⁵⁾ などが研究されており，

バウシinger効果を考慮したダンパー用鋼材の簡潔な履歴モデル〔山田哲ら，2004〕⁶⁾ や極低降伏点鋼の歪み速度依存型応力-歪み関係モデル〔吉田康治ら，2001〕⁷⁾ も提案されている。

建築分野では，1990年代半ばごろから低降伏点鋼の各種ダンパーへの適用が検討されている．代表的なダンパーであるブレースダンパーとせん断パネルダンパーに関しては，数多くの研究事例がある。

まず，ブレースダンパーについては，K型制振ブレース〔玉井宏章ら，1994〕⁸⁾ や偏心ブレース〔高橋泰彦ら，1997a〕⁹⁾ への適用が検討され，軸降伏型履歴ダンパー〔前田泰史ら，1998〕¹⁰⁾ や鋼管補剛平鋼ブレース〔中込忠男ら，2000〕¹¹⁾ の疲労特性，溝形鋼で補剛された座屈拘束ブレースダンパーの低サイクル疲労特性〔寺田岳彦ら，2002〕¹²⁾ などが研究されている．損傷評価法の確立や損傷制御性能の確認などを目的として，極低降伏点鋼を用いた損傷集中型耐震部材（耐力パネル）の定振幅繰返し載荷実験〔小山雅人ら，2002〕¹³⁾，座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験〔山口路夫ら，2002〕¹⁴⁾，制振ブレースを付与したRC架構の動的繰返し載荷実験〔薩川恵一ら，2005〕¹⁵⁾ なども行われている．近年では，異種鋼材を併用した偏心座屈ブレースの提案とその実験的検証〔稲益博行ら，2015〕¹⁶⁾ や十字型軸材を溶接組立箱形断面材で補剛した座屈拘束ブレースのひずみ振幅の入力順序による損傷度影響評価〔植木卓也ら，2017〕¹⁷⁾ などの研究がある。

次にせん断パネルダンパーについては，高靱性せん断パネルの開発〔人見泰義ら，1996〕¹⁸⁾，鉄骨造高層建物への適用について検討した研究〔田中清ら，1997〕¹⁹⁾，せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究〔高橋泰彦ら，1997b〕²⁰⁾，極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパー〔田中清ら，1998〕²¹⁾ や鋼種が異なるせん断型パネルダンパー〔田中清ら，1999〕²²⁾ の静的履歴特性に関する研究，極低降伏点鋼を用いたせん断型ダンパーの履歴モデル〔形山忠輝，2003〕²³⁾ や履歴挙動〔藤本利昭ら，2006〕²⁴⁾ に関する研究，一定鉛直変位下での力学性能に関する研究〔鈴木泉ら，2012〕²⁵⁾，等価せん断座屈変形角〔玉井宏章，2015a〕²⁶⁾ や累積損傷度〔玉井宏章，2015b〕²⁷⁾ に関する研究，拘束鋼製せん断パネルの終局耐力と変形性能に関する研究〔竹内崇ら，2020〕²⁸⁾ などが行われている．鉄骨架構の地震応答性状を準静的載荷によるオンライン地震応答実験および強制振動実験によって調査した例〔大井謙一ら，2000〕²⁹⁾，既存鉄骨造骨組の地震応答実験〔伊藤拓海ら，2003〕³⁰⁾ の実施例などもある．近年では，せん断型鋼板ダンパー〔野添順規ら，2013〕³¹⁾ やせん断型パネルダンパー〔西尾佳倫ら，2020〕³²⁾ の最適化に関する研究，ウェブ面外不整形形状の導入によるせん断パネル型ダンパーの力学特性の制御を試みた研究〔鈴木琢也，2019〕³³⁾ が報告されている。

それ以外には，鋼管を用いた履歴ダンパー〔谷口与史也ら，2001；金眞佑ら，2016〕^{34)，35)}，簡易型接合形式による間柱型履歴ダンパー〔松浦恒久ら，2009〕³⁶⁾，境界梁ダンパー〔熊谷仁志ら，2009a；熊谷仁志ら，2009b；篠崎洋三ら，2008〕^{37)～39)}，制震壁〔加村久哉ら，1998〕⁴⁰⁾，多段スリット入り鋼板耐震壁〔東郷拓真ら，2015；東郷拓真ら，2016〕^{41)，42)}，格子型制振壁システムに用いる鋼管振りダンパー〔仁野陽日ら，2016〕⁴³⁾，曲げ加工鋼板を用いた免震構造用履歴型ダンパー〔畑中祐紀ら，2019〕⁴⁴⁾ などへの適用が検討されている。

土木分野での検討は建築分野より遅れ，1990年代の終わりごろに始まっている．初期に耐震連結板〔小畑誠ら，1999〕⁴⁵⁾ への適用が検討されたが，その後は建築分野と同様，主にブレースやせん断パネルに関する研究が行われている．特に既設構造物の耐震補強を目的とする研究が多い。

ブレースについては，ダンパーブレースを組み込んだ上路アーチ橋部分構造の動的地震応答実験〔森下邦宏ら，2004〕⁴⁶⁾，座屈拘束ブレースを有する既設長大橋フレーム構造における制震性能評価〔金治英貞ら，2011〕⁴⁷⁾，鋼製ダンパー・ブレース付きRC鉄道高架橋脚の耐震性能評価〔松本信之ら，2009〕⁴⁸⁾，座屈拘束ブレースを用いた鋼管杭式栈橋の制震化〔塩崎禎郎，2015〕⁴⁹⁾，既設高架橋の鋼製橋脚基部の地震応答低減〔伊原茂ら，2016〕⁵⁰⁾ などが試みられている．鋼上部構造対傾構へのせん断型ダンパー・ブレースの適用性に関する研究〔岩田隆弘ら，2020〕⁵¹⁾ も行われている。

せん断パネルについては，せん断パネル型制震ストッパーの研究〔谷一成ら，2006〕⁵²⁾，せん断パネルダンパーの繰返し載荷実験〔劉陽ら，2007〕⁵³⁾，高機能補剛せん断パネル型ダンパーに関する研究〔小池洋平ら，2008；葛漢彬ら，2010〕^{54)，55)}，画像計測を利用したひずみ分布特性の把握〔劉陽

ら, 2008] ⁵⁶⁾, 高変形能を有する極軟鋼せん断パネルダンパーに関する研究 [張超鋒ら, 2011; 張超鋒ら, 2012] ^{57) ~58)} などがある. 阪神高速道路では, 管理橋梁の耐震補強を目的として, せん断パネルダンパーの弾塑性特性に関する実験的研究 [杉岡弘一ら, 2011] ⁵⁹⁾, 鋼下路アーチ橋 [杉岡弘一ら, 2012; 杉岡弘一ら, 2013] ^{60)・61)} や鋼中路アーチ橋 [杉岡弘一ら, 2014] ⁶²⁾ の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果, 鋼ゲルバー箱桁橋の桁連続化と制震デバイスの適用による耐震性能照査 [杉岡弘一ら, 2016] ⁶³⁾ などを行っている. さらに, 橋脚の合理化構造として, 履歴型ダンパー機能を有する横つなぎ材 (低降伏点鋼を用いたせん断パネル) で鋼管を集成した橋脚 (鋼管集成橋脚) を提案 [金治英貞ら, 2005] ⁶⁴⁾ し, 縮小モデル載荷試験による力学的特性と設計妥当性の検討 [金治英貞ら, 2006] ⁶⁵⁾, 地震応答特性の解析 [篠原聖二ら, 2012] ⁶⁶⁾, 実大せん断パネルの損傷過程と終局モードの実験的評価 [篠原聖二ら, 2015] ⁶⁷⁾, せん断パネルダンパーの構造パラメータが耐震性能に及ぼす影響の評価 [橋本国太郎ら, 2016] ⁶⁸⁾, せん断パネルダンパー溶接部の低サイクル疲労評価手法に関する検討 [清水優ら, 2017] ⁶⁹⁾, 縦補剛せん断パネルダンパーのボルト接合部を含む力学的挙動の検討 [禅野航平ら, 2018] ⁷⁰⁾, 高機能せん断パネルダンパーによる制震機能強化の検討 [橋本国太郎ら, 2019] ⁷¹⁾ など, 一連の研究を実施している. 最近では, コンクリート充填鋼管集成橋脚で支持された連続高架橋を対象として, レベル 2 以上の地震動に対する耐震性能を大型加振実験で検証した結果 [後藤芳顯ら, 2021] ⁷²⁾ も報告されている. 同構造に関連して, 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析 [篠原聖二ら, 2013] ⁷³⁾ も行われている.

(3) 今後の展望

低降伏点鋼は, 主に履歴エネルギー吸収型ダンパーとして活用されており, 座屈拘束ブレースやせん断パネルダンパーとして建築物や橋梁用に実用化されているものも多い. その性質から, 今後もエネルギー収集部材としての適用が主に検討されているものと思われる. 既存のものとは異なる新たなダンパーの開発, 実用化されているダンパーの有効な設置位置や性能制御方法, 材料特性や形状・寸法の最適設計などに関する研究が進み, 低降伏点鋼の利用が促進されることが期待される.

参考文献

- 1) 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 和田章(1995a): 低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 60 巻 472 号, pp.139-147
- 2) 佐伯英一郎, 杉沢充, 山口種美, 望月晴雄, 和田章(1995b): 低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 60 巻 473 号 pp.159-168
- 3) 小野喜信, 櫛部淳道, 金子洋文, 小川孝寿(2001): 極低降伏点鋼の溶接熱影響に対する検討, 材料, 50 巻 8 号, pp.889-894
- 4) 山田哲, 山口路夫, 竹内百合, 竹内徹, 和田章(2002): 動的繰り返し載荷実験結果に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価 ―速度依存性を考慮したダンパー用鋼材の履歴特性に関する研究その 1―, 日本建築学会構造系論文集, 67 巻 553 号, pp.121-128
- 5) 瀬戸洋平, 中込忠男, 塩川直(2010): 極低降伏点鋼の 2 段多重振幅における累積疲労損傷に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 75 巻 653 号, pp.1265-1270
- 6) 山田哲, 吉敷祥一(2004): バウシンガー効果を考慮したダンパー用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 69 巻 581 号, pp.109-116
- 7) 吉田康治, 阿部義, 長嶋文雄(2001): 極低降伏点鋼の歪み速度依存型応力-歪み関係のモデル化, 地震工学研究発表会講演論文集, 26 巻, pp.1093-1096
- 8) 玉井宏章, 竹中啓之, 近藤一夫, 中村雄治, 花井正実(1994): 低降伏応力度鋼の K 型制振ブレースへの適用について, 鋼構造論文集, 1 巻 1 号, pp.41-52
- 9) 高橋泰彦, 出中耕太郎(1997a): 偏心ブレースを利用した履歴減衰型制震ダンパーの実用化, 鋼構造論文集, 4 巻 14 号, pp.39-52

- 10) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章(1998): 軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 63 巻 503 号, pp.109-115
- 11) 中込忠男, 岩本剛, 加村久哉, 下川弘海, 原山浩一(2000): 低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 65 巻 530 号, pp.155-161
- 12) 寺田岳彦, 佐武直紀, 堀江竜巳, 真瀬伸治, 小川雄一郎, 磯田和彦(2002): 溝形鋼で補剛された座屈拘束ブレースダンパーの低サイクル疲労特性と累積損傷度評価, 日本建築学会技術報告集, 8 巻 16 号, pp.111-116
- 13) 小山雅人, 青木博文(2002): 繰返し変形を受ける鋼部材の累積損傷評価指標に関する研究 — 極低降伏点鋼を用いた損傷集中型耐震部材の定振幅繰返し載荷実験に基づく累積損傷評価および実用的損傷評価法の提案 —, 日本建築学会構造系論文集, 67 巻 562 号, pp.159-166
- 14) 山口路夫, 山田哲, 松本由香, 谷川敬祐, 小野森司, 竹内徹, 小川信行, 秋山宏(2002): 座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 67 巻 558 号, pp.189-196
- 15) 薩川恵一, 井戸建介, 田中豊延, 北村春幸, 石井匠, 向井智久, 上野悟(2005): 動的繰返し載荷実験に基づく制振ブレースを付与した RC 架構の破壊性状と制振効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 70 巻 591 号, pp.129-136
- 16) 稲益博行, 蕭博謙, 林和宏, 中島正愛(2015): 異種鋼材を併用した偏心座屈ブレースの提案とその実験的検証, 日本建築学会構造系論文集, 80 巻 713 号, pp.1165-1174
- 17) 植木卓也, 北村春幸, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 宮川和明, 村上行夫(2017): 十字型軸材を溶接組立箱形断面材で補剛した座屈拘束ブレースのひずみ振幅の入力順序による損傷度影響評価, 日本建築学会構造系論文集, 82 巻 738 号, pp.1275-1285
- 18) 人見泰義, 和田肇允, 許斐信三, 斉藤喜一郎, 中田安洋, 岩田衛(1996): 高靱性せん断パネルの開発研究, 日本建築学会技術報告集, 2 巻 3 号, pp.118-123
- 19) 田中清, 鳥居次夫, 佐々木康人, 川合廣樹, 岩田衛, 和田章(1997): 極低降伏点鋼制震パネルを用いた被害レベル制御構造の鉄骨造高層建物への適用, 日本建築学会技術報告集, 3 巻 5 号 pp.126-131
- 20) 高橋泰彦, 品部祐児(1997b): せん断降伏型薄鋼板の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 62 巻 494 号, pp.107-114
- 21) 田中清, 佐々木康人(1998): 極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 63 巻 509 号, pp.159-166
- 22) 田中清, 佐々木康人, 米山真一朗(1999): 鋼種が異なるせん断型パネルダンパーの静的履歴特性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 64 巻 520 号, pp.117-124
- 23) 形山忠輝, 徐培蓁, 河野昭彦, 崎野健治(2003): 極低降伏点鋼を用いたせん断型ダンパーの履歴モデル, 鋼構造論文集, 10 巻 37 号, pp.71-78
- 24) 藤本利昭, 稲井栄一, 富田将弘(2006): 極低降伏点鋼を用いたせん断型パネルダンパーの履歴挙動に関する研究 鋼構造論文集, 13 巻 49 号, pp.51-58
- 25) 鈴木泉, 佐々木聡, 桂大輔, 田原健一(2012): 一定鉛直変位下のせん断パネル型ダンパーの力学性能に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 19 巻 73 号, pp.45-52
- 26) 玉井宏章(2015a): せん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角について, 日本建築学会構造系論文集, 80 巻 707 号, pp.137-145
- 27) 玉井宏章(2015b): せん断パネルダンパーの累積損傷度について, 日本建築学会構造系論文集, 80 巻 707 号, pp.147-155
- 28) 竹内崇, 孫玉平(2020): 拘束鋼製せん断パネルの終局耐力と変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 85 巻 768 号, pp.263-273
- 29) 大井謙一, 李昇宰, 西田明美(2000): 履歴型ダンパー付鉄骨架構の地震応答性状, 日本建築学会

構造系論文集, 65 巻 538 号, pp.171-178

- 30) 伊藤拓海, 大井謙一, 嶋脇與助, 李玉順(2003): 履歴型ダンパー付観測用既存鉄骨造骨組の地震応答実験, 日本建築学会構造系論文集, 68 巻 566 号, pp.161-168
- 31) 野添順規, 大崎純, 渡邊秀和(2013): 有限要素解析と発見的手法によるせん断型鋼板ダンパーの最適化, 日本建築学会構造系論文集, 78 巻 689 号, pp.1247-1252
- 32) 西尾佳倫, 劉陽, 小野長門, 下田昌利(2020): 繰り返し荷重を受けるせん断型パネルダンパーの最適設計, 日本機械学会論文集, 86 巻 891 号, 20-00046
- 33) 鈴木琢也(2019): ウェブ面外不整形の導入によるせん断パネル型ダンパーの力学特性の制御に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 84 巻 765 号, pp.1401-1409
- 34) 谷口与史也, 藤田正則, 坂壽二, 和田章(2001): 鋼管による履歴型ダンパーの水平加力実験, 鋼構造論文集, 8 巻 31 号, pp.119-128
- 35) 金眞佑, 桑原進, 宮川和明, 喜多村亘, 木下智裕, 安井信行(2016): 低降伏点円形鋼管を用いたせん断履歴型ダンパーの力学性状, 日本建築学会構造系論文集, 81 巻 719 号, pp.101-110
- 36) 松浦恒久, 稲井栄一, 藤本利昭(2009): RC 造建築物に用いる簡易型接合形式による間柱型履歴ダンパーの構造性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 74 巻 644 号, pp.1821-1829
- 37) 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄(2009a): 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁に関する実験的研究ー低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究その 1ー, 日本建築学会構造系論文集, 74 巻 638 号, pp.755-763
- 38) 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄(2009b): 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁の復元力特性ー低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究その 2ー, 日本建築学会構造系論文集, 74 巻 643 号, pp.1677-1684
- 39) 篠崎洋三, 小室努, 藤野宏道, 河本慎一郎, 細澤治(2008): エネルギー吸收集約型制振システムの開発と建築物への適用 日本建築学会技術報告集, 14 巻 28 号, pp.453-458
- 40) 加村久哉, 形山忠輝, 伊藤茂樹, 廣田実, 和田章, 打越瑞昌(1998): 座屈補剛の違いに着目した極低降伏点鋼制震壁の研究, 鋼構造論文集, 5 巻 20 号, pp.9-16
- 41) 東郷拓真, 和留生, 林和宏, 倉田真宏, 中島正愛(2015): 極低降伏点鋼 LY100 を用いた多段スリット入り鋼板耐震壁の開発, 日本建築学会構造系論文集, 80 巻 709 号, pp.501-509
- 42) 東郷拓真, 和留生, 林和宏, 倉田真宏, 中島正愛(2016): 極低降伏点鋼スリット鋼板を用いた組立式耐震壁の耐震挙動とその設計法, 日本建築学会構造系論文集, 81 巻 720 号, pp.335-343
- 43) 仁野陽日, 金子洋文, 鈴木琢也, 山崎賢二(2016): 格子型制振壁システムに用いる鋼管振りダンパーの基本的力学性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 81 巻 727 号, pp.1531-1539
- 44) 畑中祐紀, 桑原進, 玉村典士, 平山達規, 戸張涼太, 吉永光寿, 宮川和明, 森岡宙光(2019): 曲げ加工された鋼板を用いた免震構造用履歴型ダンパーの変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 84 巻 759 号, pp.713-723
- 45) 小畑誠, 栗原位充, 後藤芳顯(1999): 高エネルギー吸収型耐震連結板の強度および変形特性, 土木学会論文集, 612 号, pp.239-249
- 46) 森下邦宏, 井上幸一, 川島一彦, 阿比留久徳, 平井潤, 本田誠(2004): ダンパーブレースを組み込んだ上路アーチ橋部分構造の動的地震応答実験, 土木学会論文集, 766 号, pp.277-290
- 47) 金治英貞, 尾立圭巳, 鈴木直人, 井上一朗, 藤野陽三(2011): 座屈拘束ブレースを有する既設長大橋フレーム構造における制震性能評価, 土木学会論文集 A1, 67 巻 1 号, pp.137-148
- 48) 松本信之, 涌井一, 曾我部正道, 岡野素之(2009): 鋼製ダンパー・ブレース付き RC 鉄道高架橋脚の耐震性能評価に関する研究, 土木学会論文集 E, 65 巻 2 号, pp.271-290
- 49) 塩崎禎郎(2015): 座屈拘束ブレースを用いた鋼管杭式栈橋の制震化に関する研究, 土木学会論文集 B3, 71 巻 2 号, pp.I_167-I_172

- 50) 伊原茂, 松崎久倫, 庄司学(2016): 既設高架橋の鋼製橋脚基部に着目した免震・制震デバイスによる地震応答低減に関する研究, 土木学会論文集 A1, 72 巻 4 号, pp.I_146-I_160
- 51) 岩田隆弘, 木下幸治(2020): 鋼上部構造対傾構へのせん断型ダンパー・ブレースの適用性の検討, 土木学会論文集 A1, 76 巻 4 号, pp.I_667-I_677
- 52) 谷一成, 佐合大, 谷中聡久, 小池洋平, 鵜野禎史, 姫野岳彦(2006): 低降伏点鋼板を用いたせん断パネル型制震ストッパーの研究, 第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-6
- 53) 劉陽, 青木徹彦, 高久達将, 福本喲士(2007): 低降伏点鋼せん断パネルダンパーの繰返し載荷実験 構造工学論文集 A, 53A 巻, pp.560-567
- 54) 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛漢彬, 尾下里治, 佐合大, 鵜野禎史(2008): 高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究, 構造工学論文集, 54A 巻, pp.372-381
- 55) 葛漢彬, 金子恵介, 宇佐美勉(2010): 高機能補剛せん断パネルダンパーの繰返し弾塑性挙動と復元力モデルに関する研究, 構造工学論文集, 56A 巻, pp.522-532
- 56) 劉陽, 水野千里, 青木徹彦(2008): 画像計測を利用したせん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握 構造工学論文集, 54A 巻, pp.394-402
- 57) 張超鋒, 青木徹彦(2011): 高変形能を有する極軟鋼せん断パネルダンパーの開発, 鋼構造論文集, 18 巻 72 号, pp.17-28
- 58) 張超鋒, 袁輝輝, 青木徹彦(2012): 極軟鋼せん断パネルダンパーの静的および動的低サイクル疲労性能, 鋼構造論文集, 19 巻 73 号, pp.21-32
- 59) 杉岡弘一, 濱田信彦, 小林寛, 西岡勉, 杉山尚希(2011): 長大橋用せん断パネルダンパーの弾塑性特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, 57A 巻, pp.528-541
- 60) 杉岡弘一, 島賢治, 松下裕明(2012): 長大鋼アーチ橋の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果, 土木学会論文集 A1, 68 巻 4 号, pp.I_748-I_759
- 61) 杉岡弘一, 藤林美早, 杉山 尚希(2013): 長大橋の耐震性能向上策におけるせん断パネルダンパーの適用効果, 土木学会論文集 A1, 69 巻 4 号, pp.I_358-I_365
- 62) 杉岡 弘一, 林 訓裕, 鈴木 直人(2014): 長大鋼中路アーチ橋の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果, 土木学会論文集 A1, 70 巻 4 号, pp.I_654-I_663
- 63) 杉岡弘一, 光川直宏(2016): 鋼ゲルバー箱桁橋の桁連続化と制震デバイスの適用による耐震性能照査, 土木学会論文集 A1, 72 巻 4 号, pp.I_940-I_953
- 64) 金治英貞, 鈴木英之, 野中哲也, 馬越一也(2005): 履歴型ダンパー付き鋼管集成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.559-566
- 65) 金治英貞, 米谷作記子, 林訓裕, 豊島径, 西海健二(2006): 鋼管集成橋脚の縮小モデル載荷試験による力学的特性と設計妥当性の検討, 鋼構造論文集, 13 巻 49 号, pp.59-72
- 66) 篠原聖二, 金治英貞, 鬼木浩二, 杉浦邦征(2012): 履歴型ダンパー機能を有する鋼管集成橋脚の地震応答特性, 構造工学論文集, 58A 巻, pp.471-483
- 67) 篠原聖二, 杉山裕樹, 金治英貞, 橋本国太郎, 杉浦邦征(2015): 鋼管集成橋脚における実大せん断パネルの損傷過程と終局モードの実験的評価, 土木学会論文集 A1, 71 巻 3 号 pp.402-415
- 68) 橋本国太郎, 大塚浩介, 杉浦邦征, 杉山裕樹, 金治英貞(2016): せん断パネルダンパーの構造パラメータが鋼管集成橋脚の耐震性能に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, 72 巻 1 号, pp.75-91
- 69) 清水優, 舘石和雄, 判治剛, 杉山裕樹, 曾我恭匡, 足立陸, 野田拓史(2017): 鋼管集成橋脚に設けられたせん断パネルダンパー溶接部の低サイクル疲労評価手法, 鋼構造論文集, 24 巻 96 号, pp.17-29
- 70) 禅野航平, 川上美幸, 田中将登, 曾我恭匡, 杉山裕樹, 橋本国太郎(2018): 鋼管集成橋脚における縦補剛せん断パネルダンパーのボルト接合部を含む力学的挙動, 土木学会論文集 A1, 74 巻 4 号, pp.I_864-I_872

- 71) 橋本国太郎, 大塚浩介, 杉浦邦征, 杉山裕樹, 金治英貞(2019): 高機能せん断パネルダンパーによる鋼管集成橋脚の制震機能強化の検討, 土木学会論文集 A1, 75 巻 3 号, pp.350-366
- 72) 後藤芳顯, 海老澤健正, 野中哲也, Yan XU, 金治英貞, 岡上政史, 安藤高士, 服部匡洋(2021): 大型加振実験によるレベル 2 とこれを超える地震動に対するコンクリート充填鋼管集成橋脚で支持された連続高架橋の耐震性能の解明, 土木学会論文集 A1, 77 巻 1 号 pp.199-218
- 73) 篠原聖二, 金治英貞, 鬼木浩二, 木村亮(2013): 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析, 土木学会論文集 C, 69 巻 3 号, pp.312-325
- 74) 多賀謙蔵, 小林正則, 近藤実, 吉田晴彦, 伊藤敦, 山際将司, 奥野哲也(2001): 履歴型鋼材ダンパーを用いた 200m クラスの超高層建物の性能設計, 日本建築学会技術報告集, 7 巻 12 号, pp.93-98

2.7 橋梁用高強度ワイヤ

(1) 開発経緯

現在の橋梁用高強度ワイヤは, 19 世紀初頭にアメリカやイギリスにて最初のワイヤケーブルが使用されて以来, ドイツからアメリカに移住した John Roebling により 1841 年に平行線ストランドによるケーブルの空中架線法が開発, Niagara の鉄道吊橋や Brooklyn 橋に適用が進められたことで, 高強度化に向けた研究開発が積極的に進められた [土木学会, 1996] ¹⁾.

一方, 我が国では, 昭和 30 年代後半より平行線ストランドの製造・架線技術の試作研究が進められ, 1969 年に初めて八幡橋で採用, 1973 年に関門橋に本格的に使用 [三木千壽, 2000] ²⁾ されたのを皮切りに, 本州四国連絡橋の建設に関連して研究開発が積極的に実施されてきた。

(2) これまでの研究事例

橋梁用高強度ワイヤに用いられる素線の引張強さに関しては, 1883 年に完成した Brooklyn 橋には, 初めて冷間引抜鋼線による素線 (引張強さ 112 kgf/mm^2 ($1,100 \text{ N/mm}^2$)) が使用されたが, その後, 1924 年に完成した Bear Mountain 橋で引張強さ 151 kgf/mm^2 ($1,481 \text{ N/mm}^2$), 1931 年に完成した George Washington 橋で引張強さ 155 kgf/mm^2 ($1,520 \text{ N/mm}^2$), 1972 年に完成した関門橋以降の吊橋では引張強さ 160 kgf/mm^2 ($1,569 \text{ N/mm}^2$) が使用され, 1998 年に完成した明石海峡大橋では, 引張強さ 180 kgf/mm^2 ($1,760 \text{ N/mm}^2$) が使用されている. このような素線の高強度化は, Si (ケイ素) の添加によるフェライト強化, 鉛パテイング材の強度引き上げ, ならびに亜鉛めっき処理時のワイヤの強度低下抑制により実現されている [高橋稔彦ら, 1989; 三田村武ら, 1992] ^{3), 4)}. Si 添加による亜鉛めっき処理時のワイヤの強度低下抑制メカニズムは, 亜鉛めっき時のパーライト中のフェライト/セメンタイト界面に Si 濃化層が生成し, セメンタイトの崩壊を抑制するためと報告され [樽井敏三ら, 2004] ⁵⁾, その後, TEM を用いた組織観察に基づき, 亜鉛めっき処理時の温度上昇 (400°C 以上) によるパーライト中のラメラセメンタイトのナノ粒子の粗大化抑制によることが具体的に明らかとされている [槇井浩一ら, 1997] ⁶⁾. この技術は, 引張強さ 200 kgf/mm^2 ($1,960 \text{ N/mm}^2$) ケーブルの開発にも継承されている [隠岐保博ら, 1999; 樽井敏三ら, 1999] ^{7), 8)}.

一方, 素線の直径に関しては, Brooklyn 橋で 4.75 mm が用いられて以降, 5.0 mm 程度が主流であったが, 1980 年代頃から, 5.0 mm よりも大きくなってきている. これは, 吊橋の長大化に伴い, ケーブル径が大きくなったことに起因している. 我が国の本州四国連絡橋には素線径が 5.0 mm を超えるものが採用されてきており, 本州四国連絡橋完成以降に建設された海外の長大吊橋では, 素線径 6.0 mm に近いものが採用されている. 2008 年に完成した豊島大橋では素線径 7.02 mm が採用されている. 素線径の太径化は, 建設コストの削減に貢献可能なため [三田村武ら, 1992] ⁴⁾, 更なる太径化が今後も進められると予想される。

(3) 今後の展望

2021 年 3 月に日本鋼構造協会の構造用ケーブル材料規格の内、平行線ストランドと被覆平行線ストランドが 25 年ぶりに改訂された〔日本鋼構造協会，2021〕⁹⁾。この改訂は，2000 年以降，明石海峡大橋で用いられた素線径 5.23 mm，1770 N/mm²の引張強さを持つ素線よりも，太径でかつ高強度の素線の採用実績が海外で蓄積されている状況が背景にある。2018 年に制定された ISO 19203 ならびに，2020 年に制定された JIS G 3571〔日本規格協会，2020b〕¹⁰⁾では，引張強さを 1570 N/mm²，1670 N/mm²，1770 N/mm²，1860 N/mm²，1960 N/mm²の 5 区分，標準素線径の上限は 6.00 mm に規定されている。JIG G 3504 に示される化学成分表より〔日本規格協会，2020a〕¹¹⁾，引張強さ 1770 N/mm²を超える素線では，上述した引張強さ 1770 N/mm²を実現するために，上述の Si の添加の効果を基に，Si や C（炭素）の量を増やし，Cr（クロム）を添加〔樽井敏三ら，1999〕⁸⁾することで高強度化を実現していることが伺える。最近では，B（ボロン）と Ti（チタン）の添加による組織制御により，延性をも高めた高強度ワイヤを実現している〔新日鉄住金，2015；真鍋敏之ら，2019〕^{12)，13)}。最近では，2020 年に完成した中国の道路鉄道併用斜張橋・滬蘇通長江公鉄大橋において，素線径 7 mm，2000 N/mm²の引張強さの素線が使用されている等，今後も橋梁用高強度ワイヤの太径素線の高強度化が益々想定される。なお，上記の改訂された日本鋼構造協会の構造用ケーブル材料規格の英語版も作成されており，我が国の橋梁用高強度ワイヤの海外におけるプロジェクトへの普及が期待されている。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼構造進捗調査小委員会(1996)：鋼構造シリーズ⑧ 吊橋－技術と変遷－，丸善
- 2) 三木千壽(2000)：鋼構造学，共立出版
- 3) 高橋稔彦，今野信一，佐藤洋，落合征雄，野口義哉，芹川修道，俵矢与文(1989)：橋梁用ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の開発，製鉄研究，第 332 号，pp.53-58
- 4) 三田村武，中井博，渡邊英一，杉井謙一(1992)：橋梁用ケーブルの最近の話題と展望，土木学会論文集，No.444，VI-16，pp.97-106
- 5) 樽井敏三，丸山直紀，高橋淳，西田世紀，田代均(2004)：高炭素鋼線の組織制御と高強度化，新日鉄技報，第 381 号，pp.51-56
- 6) 榎井浩一，家口浩，南田高明，鹿磯正人，茨木信彦，隠岐保博(1997)：亜鉛めっき鋼線の機械的性質に及ぼすラメラセメンタイトのナノスケール内部構造の影響，鉄と鋼，83 巻，8 号
- 7) 隠岐保博，茨木信彦，鹿磯正人，榎井浩一(1999)：200kgf/mm²級高強度亜鉛めっき鋼線の開発，R&D 神戸製鋼技報，Vol.49，No.2
- 8) 樽井敏三，西田世紀，吉江淳彦，大羽浩，浅野厳之，落合征雄，高橋稔彦(1999)：2000MPa 級亜鉛めっき鋼線及び 2300MPa 級 PC ストランド用線材の開発，新日鉄技報，第 370 号，pp.45-50
- 9) 日本鋼構造協会(2021)：構造用ケーブル材料規格〔平行線ストランド JSS II 06-2021，被覆平行線ストランド JSS II 11-2021〕
- 10) 日本規格協会(2020b)：平行線ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線及び亜鉛アルミニウム合金めっき鋼線，JIS G 3571
- 11) 日本規格協会(2020a)：橋りょう（梁）用線材，JIS G 3504
- 12) 新日鉄住金（2015）：第 47 回市村産業賞「本賞」を受賞，広報誌，Vol.11，pp.30-33
- 13) 真鍋敏之，山崎真吾，西田世紀，菅原寿晴(2019)：Si 添加高炭素鋼の恒温変態挙動に及ぼすボロン添加の影響，鉄と鋼，105 巻，1 号

3. じん性・溶接性に関する高性能鋼材

3.1 高じん性鋼

(1) 開発経緯

鋼材のじん性は、ぜい性破壊の防止の観点から重要な性質とされている。しかしながら、じん性は、部材製作時の冷間曲げ加工等による塑性ひずみの導入、低温環境下での使用、高いひずみ速度の影響などにより低下することが知られている。

高じん性鋼は、部材形状の自由度を向上させるために、より小さい曲げ半径による冷間曲げ加工を可能とする目的や、寒冷地での使用を可能とする目的で開発が進められてきた鋼材である。

(2) これまでの研究事例

鋼材のじん性は、ぜい性破壊を防止するための性能として検討が進められたものであり、第2次世界大戦中の船舶のぜい性破壊事故に対する材料調査結果を踏まえ、JISなどの規格において、Vノッチでのシャルピー衝撃試験を用い、試験温度0℃（あるいは-5℃）で27J（ジュール）以上（あるいは、47J以上）といった規定が溶接構造用圧延鋼材SM材のB種（あるいはC種）等に示されている。要求される鋼材のじん性レベルは、鋼材の用途に応じ異なると考えられる。我が国では様々な高性能鋼材が供給されている〔深沢誠ら，1995；大田孝二ら，1996；楠隆，1997；坂井藤一，1994；上田修三，1994〕^{1)～5)}が、特に、低温容器に用いられる低温用鋼材では、厳しいじん性レベル要求が設定されている〔日本溶接協会，1995〕⁶⁾。鋼材のじん性は、シャルピー衝撃試験により得られるシャルピー吸収エネルギーにより評価される場合が多く、シャルピー衝撃試験結果から得られるシャルピー吸収エネルギーの温度変化、延性－ぜい性遷移温度などに着目した評価がなされる。

塑性ひずみを受けた場合、時間の経過により鋼材がひずみ時効ぜい化する、すなわち、じん性が低下するという現象は、従来からよく知られており、鋼構造物を製作する際に用いられる鋼板の冷間曲げ加工には、加工により導入される塑性ひずみの量を抑制する目的で、曲げ半径に規定が設けられている〔深沢誠ら，1995〕¹⁾。道路橋示方書では、従来より、冷間曲げ加工における曲げ半径は、板厚の15倍以上とするように求められていた。これに対し、堀川〔堀川浩甫，1980〕⁷⁾は、その当時供給されていた各種鋼材を対象として、引張試験により導入した塑性ひずみに対し時効処理をし、その影響でじん性が低下する程度をシャルピー衝撃試験によって確認している。実験の結果から、道路橋示方書に規定されている板厚の15倍以上の曲げ半径は妥当なものであるとしている。その後、本間ら〔本間宏二ら，1997〕⁸⁾は、鋼材の品質の向上により、現状、冷間曲げ半径は、鋼板の有するじん性レベルに応じて緩和できる可能性を示した。この成果を受けて、現行の道路橋示方書〔日本道路協会，2017〕⁹⁾では、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した上で、使用鋼板のシャルピー吸収エネルギーが鋼種に応じて規定される試験温度で150J以上、200J以上を満たす場合には、それぞれ板厚の7倍以上、5倍以上を冷間曲げ加工半径として適用できるとしている。また、森ら・三木ら〔森好生ら，1990；三木千壽ら，1994〕^{10)・11)}は、破壊力学に基づいた許容き裂長に関する検討から、道路橋示方書の「曲げ半径は、板厚の15倍以上」は緩和できる可能性があることを指摘している。さらに、西川ら〔西川和廣ら，1996〕¹²⁾も、TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)鋼材等を対象に実験的な検討を行い、道路橋示方書に規定された半径より小さな曲げ半径の適用可能性について述べているほか、TMCP鋼材については塑性ひずみによるじん性低下の程度が小さいことを示している。小野ら〔小野哲郎ら，2000〕¹³⁾は、鋼材の窒素などの化学成分に着目し、シャルピー衝撃試験により検討し、ひずみ時効に窒素含有量が与える影響等について述べている。近年においては、SBHS材に対して、-5℃で100J以上という規定が設けられており、板厚の7倍までの曲げ半径の適用を検討することが可能となっている〔藤田敏明ら，2006〕¹⁴⁾。窒素含有量に注意する必要がある点は指摘されているものの、近年の鋼材品質の向上、さらにはTMCP技術の適用により、より小さい曲げ半径を適用してもぜい性破壊の観点から安全性に問題ない高じん性な鋼材の実現が可能となっている。

次に、寒冷地仕様について述べる。アメリカでは、道路橋に用いる鋼材について、AASHTO の定める基準 [AASHTO, 2020] ¹⁵⁾ の中で必要じん性値を地域に応じて定めている。基準では、年間最低気温に基づき、全米が 3 つの地域 (Zone I から III) に分けられ、それぞれの地域に対して、鋼材強度や部材の種別を考慮して、試験温度およびその試験温度で求められるシャルピー吸収エネルギーレベルが提示されている。この規定のベースとなったのは、構造物最低使用温度および橋梁で想定されるひずみ速度レベルの影響について示した Barsom の研究 [Barsom et al., 1999] ¹⁶⁾ であるとされている。これまで、我が国の構造物使用温度に関しては、石田ら・久保ら [石田良三ら, 1986 ; 久保雅邦ら, 1987] ^{17), 18)} の検討があり、本州などの平均的な地域では -10°C 、北海道などの寒冷地で -35°C 程度という分析結果を示している。表ら [表真也ら, 2013] ¹⁹⁾ は、北海道の気温分布から設計温度として -40°C をターゲットとして、近年適用が進む、40mm を超える厚鋼板のじん性について、溶接部のシャルピー衝撃試験により検討し、厚鋼板の選定法について述べている。表らは、その中でシャルピー吸収エネルギーの延性-ぜい性遷移温度が設計温度よりも低いことなどを確認し、例えば SM520C 材は、低温用溶材を利用することで、寒冷地においても -40°C まで適用できる可能性があることなどを示している。寒冷地仕様鋼材としては、地域に応じた構造物最低使用温度もしくは設計温度以下で、母材および溶接部のじん性を十分保証することが必要となる。

(3) 今後の展望

現在鋼材の品質は向上しており、既により小さい曲げ半径の適用や寒冷地仕様ができる高いじん性を有しているものが供給されている可能性がある。しかしながら、溶接部については適用する溶材の特性なども影響し、より向上・改善できる可能性もあり、検討すべき点が残されている。一方、地震時の安全性を考慮した場合には、地震に伴う塑性変形やひずみ速度の影響でぜい性破壊の発生が懸念される。構造的に塑性変形やひずみを抑制する対応のほか、繰り返し塑性ひずみ履歴による鋼材のじん性の低下 [大倉一郎ら, 1996 ; 中込忠男ら, 1996] ^{20), 21)} に対応する高じん性鋼材を適用する、耐震面での材料的なアプローチ [佐々木栄一ら, 2003 ; 田村洋ら, 2015] も考えられる。

参考文献

- 1) 深沢誠, 大田孝二(1995): 機能鋼材, 橋梁と基礎, pp.39-46
- 2) 大田孝二, 深沢誠(1996): これからの鋼材, 橋梁と基礎, pp.45-48
- 3) 楠隆(1997): 新しい鋼材, 橋梁と基礎, pp.117-129
- 4) 坂井藤一(1994): 土木構造物における高張力鋼利用の現状, 鋼構造論文集, Vol.1, No.1, pp.13-24
- 5) 上田修三(1994): 最近の建築・土木用高機能鋼材, 鋼構造論文集, Vol.1, No.1, pp.127-142
- 6) 日本溶接協会(1995): 低温用圧延鋼板判定基準 (WES3003-1995)
- 7) 堀川浩甫(1980): 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, No.300, pp.12-20
- 8) 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 笹尾英弥, 奥村健人, 原修一(1997): 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, pp.153-162
- 9) 日本道路協会(2017): 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編
- 10) 森好生, 塩崎正孝, 三木千壽, 栗原正好(1990): 歪時効による鋼材の靱性変化の評価, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.389-397
- 11) 三木千壽, 館石和雄, 船見純一(1994): 冷間加工を受けた構造用鋼材の破壊じん性に関する研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会講概集, pp.586-587
- 12) 西川和廣, 寺田和己, 木村貞夫, 中西保正, 飯田寛之, 後藤邦昭(1996): 橋梁用鋼材の冷間曲げ加工と要求じん性に関する検討, 橋梁と基礎, pp.31-36
- 13) 小野哲郎, 村山敬司, 増田克敏, 佐藤篤司, 横川貴之(2000): 予歪を受けた建築構造用鋼板の靱性に及ぼす微量元素の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.157-162

- 14) 藤田敏明, 湯田誠, 米山徹, 多田賢(2006): 橋梁用高性能鋼材の加工性・溶接性, 川田技報, Vol.25, p.24-29
- 15) AASHTO(2020) : LRFD Bridge Design Specifications.
- 16) Barsom J.M. and Rolfe T.R.(1987): Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications and Fracture Mechanics, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- 17) 石田良三, 久保雅邦, 北沢正彦, 堀江佳平(1986): 気温の統計分析と鋼製橋脚の構造物温度の推定, 第 40 回土木学会年次学術講演会概要集, I-157, pp.313-314
- 18) 久保雅邦, 石田良三, 北沢正彦, 川北司郎(1987): 気温と構造物温度の実態調査による温度荷重の検討, 第 41 回土木学会年次学術講演会概要集, I-170, pp.339-340
- 19) 表真也, 三田村浩, 西弘明, 今野久志, 廣畑幹人, 金裕哲(2013): 寒冷地における厚鋼板の選定法に関する提案, 寒地土木研究所月報, No.716
- 20) 大倉一郎, 田原潤, 西岡敬治, 安田修(1996): 繰返し予歪みが鋼材の破壊靱性に与える影響, 鋼構造論文集, 第 3 巻, 第 11 号, pp.1-11
- 21) 中込忠男, 山田丈富, 日高新悟, 大林郁良(1996): 繰返し歪みを受ける SM490A 材の材質劣化に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 489 号, pp.87-94
- 22) 佐々木栄一, 荒川泰二, 三木千壽, 市川篤司(2003): 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベル, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.93-102
- 23) 田村洋, 佐々木栄一(2015): 修正ワイブル応力に基づく鋼部材の地震時脆性破壊発生限界の評価, 土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 2, pp. 173-185

3.2 予熱低減鋼

(1) 開発経緯

鋼構造物の大型化や軽量化に対応するべく, HT780 材等の高張力鋼の利用が進む中で, これら高張力鋼を適用する際に溶接時に必要となる高い予熱が課題となった. 高い予熱は, 溶接時の低温割れを防止するために必要とされたが, 溶接時の作業効率や作業環境, 鋼材の温度変形などの問題があり, より低い予熱で低温割れが生じない高張力鋼材, すなわち, 予熱低減鋼の開発が重要な課題となった.

(2) これまでの研究事例

鋼構造物の大型化や軽量化のニーズから, 高張力鋼の適用が進む中で, より低い予熱温度でも溶接低温割れの生じない鋼材の開発が求められていた. 開発当時, HT780 は 100℃以上の予熱温度が必要であったため, その中での溶接作業は効率や環境の面で問題があり, 50℃以下を目標とした予熱低減を目指した鋼材の開発が進められた. 岡村ら [岡村義弘ら, 1995a ; 1995b] ^{1), 2)} は, 溶接 HAZ 部の硬さ上昇を抑えるため, 低 C (炭素) -B (ボロン) フリーとし, 強度確保およびじん性のバランスの観点から Cu-Nb-V の複合添加と DQT (直接焼入れ焼き戻し) を適用することで析出強化と細粒化を図り, 予熱低減型 HT780 鋼を開発した. その結果予熱温度 50℃でも溶接低温割れを防止することが可能となった. 開発された予熱低減型 HT780 鋼は, 実際に明石海峡大橋の補剛桁に適用される [岡村義弘ら, 1995b] ²⁾ など, 実用化されている. また, 岡野ら [岡野重雄ら, 2002] ³⁾ は, 引張強度 570MPa 級の鋼材 (SM570) を対象として, TMCP (Thermo Mechanical Control Process) を適用した鋼材の開発に取り組み, 従来不可欠であった 50℃~100℃程度の予熱を不要とし, 製作コスト低減を実現した. 開発においては, Ti 系の低 C-B 添加ベイナイト組織を活用し, 溶接割れ感受性の低減と強度の確保の両立を図った.

2008 年に JIS 規格化された橋梁用高性能鋼材 SBHS 鋼材については, SBHS500 では溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) が 0.2 以下と低く抑えられていることから, 予熱フリーでの適用が可能であることが確認されている [藤田敏明ら, 2006; 安藤隆一ら, 2006] ^{4), 5)}. 道路橋示方書においても SBHS400, SBHS400W,

SBHS500, SBHS500W については、板厚によらず予熱なしでの適用が可能となっている [日本道路協会, 2017] ⁶⁾。なお, SBHS700 については予熱 50°C 以上と予熱低減が図られた鋼材であるとされている [日本鉄鋼連盟, 2012] ⁷⁾ が, 木下ら [木下幸治ら, 2018] ⁸⁾ は, 超低水素系溶接材料を用いることにより軟質化することで, SBHS700 の予熱フリー化の可能性を示している。

(3) 今後の展望

高張力鋼材の適用は、構造物の軽量化や新しい構造の実現につながる可能性があり、その適用の際問題となる、予熱温度の低減は、新しい鋼材の開発により実現されてきている。今後も SBHS700 を対象とした検討 [木下幸治ら, 2018] ⁸⁾ にもあるように、更なる予熱低減、予熱フリーにつながる取り組みがなされることで、製作コストの低減が可能となると考えられる。高張力鋼材の適用の際には、溶接性の良い軟質継手の適用性などの課題もあり、今後の検討が期待される。

参考文献

- 1) 岡村義弘, 奥島基裕, 田中睦人, 為広博, 山場良太(1995a): Cu 析出強化型予熱低減 HT780 鋼の開発, まてりあ, Vo.34, No.5
- 2) 岡村義弘, 奥島基裕, 田中睦人, 山場良太, 為広博, 井上肇, 糟谷正, 瀬戸厚司(1995b): Cu 析出強化型予熱低減 HT780 鋼の開発, 新日鉄技報, 第 356 号, p.62-71
- 3) 岡野重雄, 児山拓郎, 小林洋一郎, 山内学(2002): 溶接性に優れた TMCP 型 HT570 鋼板, 神戸製鋼技報, Vol. 52, No. 1, p.20-24
- 4) 藤田敏明, 湯田誠, 米山徹, 多田賢(2006): 橋梁用高性能鋼材の加工性・溶接性, 川田技報, Vol.25, p.24-29
- 5) 安藤隆一, 田中睦人, 松田穰, 岡野重雄(2006): BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性 (第 1 報), 土木学会年次学術講演会
- 6) 日本道路協会(2017): 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編
- 7) 日本鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会(2012): 橋梁用高性能鋼材
- 8) 木下幸治, 梶田太一(2018): 超低水素系溶接材料を用いた SBHS700 軟質溶接継手の溶接性の y 形溶接割れ試験による検討, 鋼構造論文集, Vol.25,, No.98

3.3 大入熱溶接対策鋼

(1) 開発経緯

施工効率の向上を目的とした溶接の自動化に伴う大入熱溶接法の採用拡大に対し、大入熱溶接に対する溶接部の品質保証が注目されるようになった。そのため、溶接入熱の増大による影響を受けやすいボンド部や熱影響部のじん性確保に有用な添加元素に関する種々の研究が実施されてきた。

(2) これまでの研究事例

1978 年に提示された文献 [川口喜昭ら, 1978] ¹⁾ では, 60 キロ鋼 (引張強度 600 MPa 級鋼) に対し, Si, Cu, Ni, Mo, V, B の調整により 40mm 以上の厚板でも大入熱溶接ボンド部のじん性を確保できることが報告されている。1979 年に提示された文献 [笠松裕ら, 1979] ²⁾ では, 造塊, 分塊および圧延方法で製造した鋼板について, 大入熱溶接において熱影響部のじん性を確保するための Ti および N 量の最適範囲が調査された。調査の結果, Ti および N 量がサブマージアーク溶接熱影響部のじん性に影響を及ぼすことを明らかにし, Ti および N 量の調整により, 大入熱溶接用鋼板の製造が可能であると述べている。その後, 低 N-Ti-B 系により -60°C 用の大入熱溶接用鋼として優れたじん性を有する鋼材の作製において, 固溶 N の低減および破面単位の細粒化が, 熱影響部に優れたじん性を与えることが示された [大野恭秀ら, 1987] ³⁾。その後, 1995 年に提示された文献 [間渕秀里ら, 1995] ⁴⁾

では、各種元素が鋼板の機械的性質に及ぼす影響を調査し、Ni のような高価な合金元素でなくても、ミクロ組織制御に影響を及ぼす他の元素を利用して大入熱溶接対策鋼が実現できることが述べられている。さらに、板厚 50~100mm の HT780 鋼開発に関し、大入熱溶接部のじん性確保のため TMCP と添加元素を活用し、低炭素および B 無添加でも、Cu および Ti の添加により低炭素による強度不足が補えることが示されている [山場良太ら, 1995]⁵⁾。2000 年以降は、添加元素と熱処理の両方を駆使して熱影響部のじん性を確保した様々な大入熱溶接対策鋼の開発が行われた。例えば、TiN の固溶温度を従来よりも高温にする熱処理技術により、HAZ 粗粒域を狭小化する鋼材が作製され、造船、建築、原油タンク、ラインパイプ、海洋構造物への適用、建築鉄骨における四面ボックス柱の角溶接、内ダイヤフラムの溶接への適用が試みられた [鈴木伸一ら, 2004]⁶⁾。また、熱影響部のじん性確保のための熱処理技術を適用した大入熱溶接用鋼板（基本的には TiN 系）が開発され、降伏強度 390MPa 級の造船用鋼板（65mm）や、降伏強度 500MPa 級の海洋鋼構造物向けの厚鋼板に適用された [児島明彦ら, 2003]⁷⁾。その他にも、C 量の大幅な低減と Mn, Cr の添加により熱影響部のじん性確保を実現した鋼材が開発され、引張強度 590MPa 級鋼板（100mm）に対し、93kJ/mm の超大入熱でも、0℃でのシャルピー吸収エネルギー 70J 以上が確保されること、引張強度 780MPa 級鋼板（50mm）に対し、40kJ/mm の入熱で 0℃でのシャルピー吸収エネルギー 100J 以上が確保されるなどの実績が示されている [畑野等ら, 2004]⁸⁾。TiN 系に B 等の元素を添加し、なおかつ TMCP を駆使して熱影響部のじん性を確保した鋼材の開発では、500kJ/mm の入熱が想定される 80mm 鋼板のじん性確保が目標とされ、-40℃でシャルピー吸収エネルギー 238J が実現された [高橋祐二ら, 2008]⁹⁾。このように、大入熱溶接対策鋼に対する主たる要求性能である熱影響部のじん性確保（組織制御）は、成分調整と熱処理の組み合わせで実現される [大宮良信ら, 2012]¹⁰⁾。各産業分野において様々な種類の大入熱対策鋼が開発されてきており、鋼橋においても溶接法や条件に応じて、大入熱溶接対策鋼のなかでも適切な板を選定、使用すべきと言える。

(3) 今後の展望

近年、既往の大入熱溶接法（サブマージアーク溶接、エレクトロガス溶接）だけでなく、レーザ溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接など局所的に高い入熱が与えられる新しい溶接法の採用が試みられている。このような溶接継手では熱影響部が極めて狭小で熱影響部の硬化の度合いが大きく、熱影響部のじん性の特徴が既往の大入熱溶接継手とは異なることが指摘されている [猪瀬幸太郎, 2011; 猪瀬幸太郎, 2020]^{11), 12)}。今後は、レーザ溶接、レーザ・アークハイブリッド溶接のように新しい溶接法で作製された継手に対しても、熱影響部のじん性が確保される鋼材の開発が要求されることが想定される。

参考文献

- 1) 川口喜昭, 山口洋治, 大谷泰夫, 渡辺征一 (1978): 大入熱溶接用 60 キロ鋼板の成分設計とその試作鋼板の継手性能, 溶接学会誌, 第 47 巻, 第 3 号, pp.47-53
- 2) 笠松裕, 高嶋修嗣, 細谷隆司 (1979): 50kg/mm² 級高張力鋼板の大入熱溶接熱影響部の靱性におよぼす Ti および N 量の影響, 鉄と鋼, 第 65 巻, 第 8 号, pp.102-111
- 3) 大野恭秀, 岡村義弘, 松田昭一, 山本広一, 向井俊夫 (1987): Ti-B 系大入熱溶接用鋼の HAZ 微視組織の特徴, 鉄と鋼, 第 73 巻, 第 8 号, pp.94-101
- 4) 間渕秀里, 栗飯原周二 (1995): 厚鋼板の高性能化のための微量元素制御, まてりあ, 第 34 巻, 第 3 号, pp.302-305
- 5) 山場良太, 萩原行人, 望月春雄, 山下達雄, 金谷研, 深沢隆, 田沼良一 (1995): 建築用厚板 HT780 鋼板および溶接施工法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 巻, pp.129-137
- 6) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明 (2004): マイクロアロイング制御による大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL」および本技術を用いた厚鋼板の開発, まてりあ,

第 43 巻, 第 3 号, pp.232-234

- 7) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利 (2003): 微細粒子による溶接熱影響部の組織微細化技術「HTUFF」を適用した厚鋼板の開発, まてりあ, 第 42 巻, 第 1 号, pp.67-69
- 8) 畑野等, 岡崎喜臣, 川野晴弥, 岡野重雄 (2004): 微細低炭素ベイナイト技術による大入熱溶接熱影響部靱性に優れた高強度厚鋼板の開発, まてりあ, 第 43 巻, 第 3 号, pp.244-246
- 9) 高橋祐二, 泉学, 安部研吾, 高岡宏行, 岡崎喜臣 (2008): 超大型コンテナ船向け大入熱溶接用 YP355MPa 級厚肉鋼板の開発, 神戸製鋼所技報, 第 58 巻, 第 1 号, pp.42-46
- 10) 大宮良信, 名古秀徳, 岡崎喜臣, 畑野等 (2012): 大入熱溶接熱影響部の組織制御技術, 溶接学会誌, 第 81 巻, 第 1 号, pp.16-25
- 11) 猪瀬幸太郎 (2011): 橋梁へのレーザ溶接技術の適用, 溶接学会誌, 第 80 巻, 第 7 号, pp.24-27
- 12) 猪瀬幸太郎 (2020): 厚板レーザ溶接技術の本格的実用化における課題と方策, 溶接学会誌, 第 89 巻, 第 1 号, pp.38-44

3.4 耐ラメラテア鋼

(1) 開発経緯

鋼構造物の大型化かつ複雑化にともない, 構造上, 機能上, 景観上の面から拘束の厳しい溶接継手が選択され, 板厚方向に過大な引張応力を受ける部材が採用される場合がある. 板厚中央に存在する非金属介在物 (主に MnS) を起点としたラメラテアの発生を抑制するため, 耐ラメラテア鋼が開発された.

(2) これまでの研究事例

1970 年代には, 溶接分野においてラメラテアの発生要因と対策に関する研究 [西尾安弘ら, 1972; 金沢正午ら, 1976; 稲垣道夫, 1978] ^{1) ~3)} が実施され, 溶接継手の形式や入熱による鋼材の膨張, 収縮に起因する拘束応力, 水素ぜい化, ひずみ時効などがラメラテアの発生要因であることが示された. このことから, 鋼材にラメラテアに対する耐性を付与するには, S 含有量の抑制と, 板厚方向絞り値の確保が有用であることが示された. 1978 年にラメラテアに関する研究をとりまとめた文献 [稲垣道夫, 1978] ³⁾ では, S 量は 0.010%未満, 板厚方向絞り値は 15%以上であることがラメラテアの発生防止には望ましいとしている. その後, 1980 年頃にラメラテア感受性に対する鋼材分類 [笠松裕, 1979] ⁴⁾ や, 等級分類された耐ラメラテア鋼の等級分類 [稲垣道夫ら, 1981] ⁵⁾ が提案され, 日本溶接協会規格 WES3008 や JIS G3199 に板厚方向絞り値を保証した耐ラメラテア鋼が規定されるに至った. 近年では, 製鋼プロセスにおける脱硫技術の高度化に伴い S 含有量の低減が可能になってきており, 耐ラメラテア鋼の規定を大きく下回る S 含有量 (0.001~0.005%) の低硫鋼の製造も可能になってきている [斎藤幸介ら, 2019] ⁶⁾.

(3) 今後の展望

今後, SBHS の普及拡大に伴い SBHS による厚板を用いた構造や拘束の厳しい継手が採用されるようになれば, 耐ラメラテア性能の規定を設けていない SBHS についても, その検証が必要になる可能性がある. SBHS の S 含有量に関する規定は耐ラメラテア鋼の規定と同程度あるいはそれよりも厳しいため, 化学組成の観点からは SBHS の耐ラメラテア性能は高いと考えられる. 一方, 現状では特に規定が設けられていない SBHS の板厚方向絞り値については, データの収集, 蓄積が重要となることも想定される.

参考文献

- 1) 西尾安弘, 山本喜宏, 梶本勝也, 広実常登 (1972): 大脚長すみ肉溶接部に発生するラメラテ

イヤリングについて，溶接学会誌，第 41 巻，第 5 号，pp. 112-120

- 2) 金沢正午，山戸一成，井上尚志，橋本勝邦（1976）：ラメラテアの発生要因について，溶接学会誌，第 45 巻，第 2 号，pp.40-47
- 3) 稲垣道夫（1978）：鋼構造物のラメラテアに関する現状と課題，溶接学会誌，第 47 巻，第 1 号，pp.6-17
- 4) 笠松裕（1979）：鋼板のラメラテアとその対策，日本金属学会会報，第 18 巻，第 5 号，pp.368-376
- 5) 稲垣道夫，山戸一成，井上尚志（1981）：耐ラメラテア鋼の特性とその評価方法，圧力技術，第 19 巻，第 4 号，pp.14-20
- 6) 斎藤幸介，中村修也，酒井宏明，山本裕基，中須賀貴光，木村世意（2019）：新溶銑処理プロセス導入による高効率製鋼プロセスの構築，神戸製鋼技報，Vol. 69，No. 2，pp.32-36

4. 耐食性・その他に関する高性能鋼材

4.1 耐候性鋼

(1) 開発経緯

耐候性鋼は、アメリカにて 1930 年代に銅 (Cu)、クロム (Cr)、ニッケル (Ni)、リン (P) などの合金元素が添加された、良好な腐食環境下において表面に緻密な保護性さびを形成して腐食を抑制することで、無塗装での使用を可能とした鋼材として開発され、1960 年代に橋梁への本格的な適用がアメリカにて始まった [清水義明, 1978]¹⁾。我が国においても、1980 年代以降、ライフサイクルコストの観点から、塗装鋼橋に比べて魅力的となった無塗装耐候性鋼橋梁が本格的に採用されてきた [中山武典ら, 2014]²⁾。これに伴い、大気耐腐食性発現機構、腐食減耗量の予測方法、高耐候性鋼材の開発、耐候性鋼橋の実態調査、ならびに耐候性鋼を用いた溶接継手部の疲労強度などに関する多くの研究が実施されてきた。

(2) これまでの研究事例

耐候性鋼の緻密な保護性さび層が地鉄表面に形成されることによる大気耐腐食性発現機構に関する基礎的な知見には、さび層の役割・生成過程 [三沢俊平, 1983]³⁾、金属表面に大気中で形成される水膜厚さが $1\mu\text{m}$ 付近で腐食速度が最大となる水膜厚さと腐食速度の関係とさび層の電気化学的酸化還元モデルなどがある [三沢俊平, 1985]⁴⁾。それらの基礎的な知見に加えて、耐候性鋼のさび構造として、1 から 5 年間大気暴露された耐候性鋼を基に、地鉄の腐食反応を抑制する環境遮断機能を有する X 線的非晶質さび層を内層とした 2 層構造モデル [岡田秀弥ら, 1969]⁵⁾ が提示され、この 2 層構造モデルが長年支持されたことにより、教科書でも採用されている [三木千壽, 2000; 三木千壽ら, 2004]^{6)・7)}。その後、1990 年代以降には、四半世紀を超えた 26 年間長期大気暴露された耐候性鋼を基に、耐候性鋼のさび構造は、初期さびとして $\gamma\text{-FeOOH}$ を主体とするさび層が形成された後、数年間の間に X 線的非晶質さび層を内層とする 2 層構造が形成されるが、さらに大気暴露されると、時間の経過とともに、内層の X 線的非晶質さび層は Cr が濃化した $\alpha\text{-FeOOH}$ 層へと変化していくことが示された [三沢俊平ら, 1993]⁸⁾。この長期大気暴露された耐候性鋼のさび構造は、最近の 41 年間、ならびに 44 年間の大気暴露された耐候性鋼のさび層の分析からも実証されてきていることから [長澤慎ら, 2016; 木下幸治ら, 2022]^{9)・10)}、今後は長期暴露に伴い、X 線的非晶質さび層の Cr が濃化した $\alpha\text{-FeOOH}$ 層への変化までを含めた大気耐腐食性発現機構の解明が望まれる。

耐候性鋼の腐食減耗予測方法については、我が国の耐候性鋼材の黎明期に暴露試験結果に基づく経験的な予測式が提示 [堀川一男ら, 1967]¹¹⁾ された後、1990 年代に 9 年間の全国 41 橋暴露試験で得られた JIS 規格の耐候性鋼材の試験データ [建設省他, 1992; 1993]^{12)・13)} やさび安定化概念 [紀平寛ら, 2005]¹⁴⁾ に基づき、予測式の妥当性の検証、予測式中の各腐食速度パラメータの意味と関係が解明されてきている。2010 年代には、鋼材と環境状況の指標であるパラメータ値とその値に代わる腐食環境センサ計測値より、腐食速度パラメータ値を推定可能であることが示されている [田辺篤史ら, 2012; 2013]^{15)・16)}。

高耐候性鋼材の開発については、2000 年代以降に我が国で海岸地域に適用できる耐候性鋼材、すなわち、「ニッケル系高耐候性鋼材」と称する新鋼材が開発された [紀平寛ら, 2000; 2004]^{17)・18)}。この高耐候性鋼材の開発に伴い、鋼橋設計段階におけるニッケル系高耐候性鋼材を含む数ある耐候性鋼材の中から、それぞれの耐候性を評価した上で選定することを可能とする耐候性合金指標の提案 [三木千壽ら, 2003]¹⁹⁾、ニッケル系高耐候性鋼材の長期腐食量予測式の提示 [紀平寛ら, 2005; 鹿毛勇ら, 2006]^{14)・20)}、ならびにニッケル系高耐候性鋼材の機械的性質・化学成分の実態調査が実施されてきている [南邦明ら, 2012; 2013]^{21)・22)}。

耐候性鋼橋の実態調査については、1980 年以降に本格的に耐候性鋼が使用された実橋梁の経年変化が見られるようになったことから、全国的に耐候性鋼橋梁の実態調査が势力的に進められるようになった [山口栄輝ら, 2004; 原修一ら, 2005; 岩崎英治ら, 2006; 山口栄輝ら, 2006; 武邊勝道ら, 2007;

麻生稔彦ら, 2007 ; 岩崎英治ら, 2010 ; 国土交通省, 2014a ; 2014b] ^{23) ~31)}. 2014 年以降では, 2014 年度から開始された道路橋の法定点検が実施された耐候性鋼橋の健全性判定結果の傾向分析が行われ, 部分的な漏水による異常さびが多く認められ, 水仕舞いの重要性が再認識されている [日本鋼構造協会, 2020b] ³²⁾.

耐候性鋼を用いた溶接継手部の疲労強度については, 緻密な保護性さびの存在, ならびにその生成に伴う断面減少がその疲労強度に及ぼす影響について, これまでに 1977 年 9 月から大気暴露された耐候性鋼を用いた溶接継手試験体を用いて 2 年, 4 年 [山田健太郎ら, 1983] ³³⁾, 10 年 [近藤明雅ら, 1994] ³⁵⁾, 25 年 [近藤明雅ら, 2007] ³⁶⁾, 41 年 [日本鋼構造協会, 2020a ; 2020b ; 木下幸治ら, 2022] ^{37) , 32) , 10)} 経過時の疲労試験が実施されてきた. それらの試験結果にばらつきは見られるが, 41 年が経過しても疲労強度には大きな変化がないことが示されている.

(3) 今後の展望

2019 年度までの耐候性鋼の受注情報がまとめられた耐候性鋼橋梁実績資料集 [日本橋梁建設協会, 2021] ³⁸⁾ より, 耐候性鋼橋梁は, 建設当時から徐々に増加し, 2003 年頃には建設される鋼橋の 20% 程度になった. しかし, 2015 年から 16%程度に急激に減少, 2016 年以降は増減を繰返しており, 一時, 2018 年度に 10%程度まで減少したが, 2019 年度に 16%程度に回復した. この 2015 年度以降に見られた増減の一要因として, 実際の耐候性鋼橋の異常さび発生などの問題を受けて減少し, 2014 年の鋼道路橋防食便覧 [日本道路協会, 2014] ³⁹⁾ に示される適用可能な環境とまらない特定部位への部分塗装や耐候性鋼橋梁の補修工法などの異常さび対策が進んだことで回復したことが考えられる. このように, 今後も耐候性鋼橋梁の利用を推進していくためには, 耐候性鋼材の維持管理技術の高度化が不可欠である.

最近では, 耐候性鋼の凍結防止剤散布地域での適用性の評価や, 新たに AI や画像解析を用いたさび状態判定方法と異常さび時対応措置方法に関する研究が実施されている [日本鋼構造協会, 2020b ; 古川清司, 2014] ^{32) , 40)}. 従来, 異常さびが生じた箇所でもその発生要因を排除することができれば, 適切な環境の下では防食機能が回復することが知られているが [日本鋼構造協会, 2020b] ³²⁾, 新たな異常さび対策として, 耐候性鋼の大気耐腐食性発現機構, すなわち, さびの結晶構造といったさび層の性状に着目する「さびサイエンス」を活用した異常さび箇所の防食性能回復技術が提案されている [山下正人ら, 2017 ; 馬場梨瑛ら, 2021] ^{41) , 42)}. このように, さびでさびを制するという特性で利用され始めた耐候性鋼としては, 異常さび発生箇所の効率的な防食性能回復にも, さびサイエンスに基づく技術開発が要求されることが今後想定される.

参考文献

- 1) 清水義明(1978) : 橋梁用耐候性鋼材, 溶接学会誌, 第 67 巻, 第 7 号, pp.553-557
- 2) 中山武典, 田中秀和(2014) : 鉄鋼の腐食・環境脆化研究の進歩と将来, 鉄と鋼, 100 巻, 9 号, pp.1089-1096
- 3) 三沢俊平(1983) : 鉄さび生成の現状と未解明点, 防食技術, 32 巻, pp.657-667
- 4) 三沢俊平(1985) : 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物, 日本金属学会会報, 24 巻, 3 号, pp.201-210
- 5) 岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光(1969) : 耐候性鋼のさび層の構造, 鉄と鋼, 55 巻, 5 号, pp.355-365
- 6) 三木千壽(2000) : 鋼構造, 共立出版, pp.298
- 7) 三木千壽, 市川篤司(2004) : 現代の橋梁工学塗装しない鋼と橋の技術最前線, 数理工学社, pp. ??
- 8) 三沢俊平, 山下正人, 松田恭司, 幸英昭, 長野博夫(1993) : 四半世紀暴露した耐候性鋼の安定さび層, 鉄と鋼, Vol.79, No.1, pp.69-75
- 9) 長澤慎, 原田佳幸, 田中睦人(2016) : 44 年経過した耐候性鋼材のさび層の解析, I-042, pp.83-84, 土木学会第 71 回年次学術講演会

- 10) 木下幸治, 櫻井勇太, 馬場梨瑛, 蓮池里菜, 小野友暉(2022): 41 年間大気暴露された耐候性鋼溶接継手のさび組成と疲労強度, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.1, pp.190-202
- 11) 堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計(1967): 各種金属材料および防錆被覆の大気腐食に関する研究 (第 5 報) 金属素材類暴露 5 カ年の結果, 防食技術, Vol.16, No.4, pp.153-158
- 12) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会(1992): 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XV)
- 13) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会(1993): 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX)
- 14) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和己, 原田佳幸(2005): 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780, I-70, pp.71-86
- 15) 田辺篤史, 佐々木栄一, 三木千壽(2012): 環境条件に適した耐候性鋼材の選定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 68 巻, 3 号, pp.610-622
- 16) 田辺篤史, 佐々木栄一, 三木千壽(2013): 腐食環境センサ計測に基づく耐候性鋼材の腐食量推定法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 69 巻, 2 号, pp.275-282
- 17) 紀平寛, 伊藤叡, 溝口茂, 村田朋美, 宇佐見明, 田辺康児(2000): 海浜耐候性鋼の成分設計コンセプト創出, 材料と環境, 49 巻, 1 号, pp.30-40
- 18) 紀平寛, 田中睦人, 安波博道, 竹澤博, 楠隆, 松岡和己, 原田佳幸, 田辺康児(2004): 3%ニッケル高耐候性鋼の適用可能性検討方法, 新日鉄技報, 第 380 号, pp.28-32
- 19) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛(2003): 無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標及び耐候性評価方法の提案, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.271-281
- 20) 鹿毛勇, 塩谷和彦, 竹村誠洋, 小森務, 古田彰彦, 京野一章(2006): 実暴露試験に基づくニッケル系高耐候性鋼の長期腐食量予測, 材料と環境, 55 巻, 4 号, pp.152-158
- 21) 南邦明, 三木千壽, 横山秀喜(2012): 3%Ni 系高耐候性鋼の機械的性質の現状, 鋼構造論文集, 19 巻, 75 号, pp.67-67
- 22) 南邦明, 三木千壽, 徳富恭彦(2013): Ni 系高耐候性鋼の化学成分の現状, 鋼構造論文集, 20 巻, 77 号, pp.77-90
- 23) 山口栄輝, 坂口哲也, 原田和汀, 大木本崇(2004): 九州北東部, 南東部における耐候性鋼橋梁のさび状況, 構造工学論文集, Vol.50A, pp. 667-674
- 24) 原修一, 三浦正純, 内海靖, 藤原俊明, 山本雅貴(2005): 耐候性鋼さび性状に及ぼす凍結防止剤の影響-凍結防止剤の散布される耐候性鋼橋梁における析水洗の腐食抑制効果(1)-, 材料と環境, 54 巻, pp.337-343
- 25) 岩崎英治, 長井正嗣, 大久保雄介, 松岡寛和(2006): 新潟県内の飛来塩分と風向・風速の関係, 構造工学論文集, Vol.52A, pp. 773-780
- 26) 山口栄輝, 中村聖三, 廣門公二, 森田千尋, 園田佳巨, 麻生稔彦, 渡辺浩, 山口浩平, 岩坪要(2006): 九州・山口地区における耐候性鋼橋梁の実態調査, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.243-254
- 27) 武邊勝道, 松崎靖彦, 大屋誠, 安食正太, 古川貴士, 麻生稔彦(2007): 耐候性鋼橋梁の表面状態と付着塩類量の関係, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.2, pp.172-180
- 28) 麻生稔彦, 後藤悟史, 田畑晃, 宮本文穂(2007): 実橋調査に基づく耐候性鋼橋梁の腐食要因とさびレベル推定に関する検討, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.4, pp.460-468
- 29) 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡(2010): 耐候性鋼橋梁の断面部位別の腐食特性とその評価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.297-311
- 30) 国土交通省国土技術政策総合研究所(2014a): 耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究(I)-耐候性鋼材の適用環境評価手法に関する検討-, 国土技術政策研究所資料, 第 777 号.
- 31) 国土交通省国土技術政策総合研究所(2014b): 耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究(II)-凍結防止剤散布の影響に関する検討-, 国土技術政策研究所資料, 第 778 号

- 32) 日本鋼構造協会(2020b)：鋼橋の腐食耐久性・維持管理技術の高度化，JSSC テクニカルレポート，No.121
- 33) 山田健太郎，村山眞，近藤明雅，菊池洋一(1983)：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ，土木学会論文報告集，第 337 号，pp.67-74
- 34) 近藤明雅，山田健太郎，菊池洋一(1994)：10 年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.121-127
- 35) 岩崎英治，長井正嗣，加賀谷悦子，成田英樹，高橋拓也(2005)：新潟県内の耐候性鋼橋の腐食状況と腐食環境，構造工学論文集，Vol.51A，pp. 1119-1128
- 36) 近藤明雅，山田健太郎，小野彰之(2007)：25 年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労強度，土木学会論文集 A，Vol.63，No.3，pp.434-443
- 37) 日本鋼構造協会(2020a)：鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料，JSSC テクニカルレポート，No.120
- 38) 日本橋梁建設協会(2021)：耐候性鋼橋梁実績資料集第 26 版（2019 年度受注まで）
- 39) 日本道路協会(2014)：鋼道路橋防食便覧
- 40) 古川清司(2014)：耐候性鋼橋梁の維持管理に関する研究，愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程生産環境工学専攻博士論文
- 41) 山下正人，花木宏修，野村豊和，寺谷亨，宇木則倫，金暲泰，藤本慎司，林慶知，松井秀樹，木村晃彦(2017)：反応性塗料を塗布した発錆炭素鋼に生成するさび層の構造と防食性，材料と環境，66 巻，3 号，pp.93-98
- 42) 馬場梨瑛，木下幸治，竹渕敏郎(2021)：耐候性鋼材異常腐食部の環境遮断による腐食抑制効果と緻密なさび再生成，I-08，令和 2 年度土木学会中部支部研究発表会

4.2 亜鉛めっき用鋼

(1) 開発経緯

鋼材の腐食は適切な表面処理を行うことにより，防止することができるが，古くから行われ，現在でも重要な表面処理の一つに亜鉛めっきがある．亜鉛めっきによる防食は，まず大気中において安定な酸化亜鉛や塩基性炭酸亜鉛の薄膜が亜鉛表面に形成される内部の亜鉛自体の保護に加えて，亜鉛が鉄よりも卑な金属，すなわち，さびやすい金属であるための犠牲防食作用によるものである．我が国では，明治初頭にイギリスより亜鉛めっき鋼板が輸入されはじめ，需要の増加に伴い，官営八幡製鉄所で国産化がはじめられた．その後，続々と民間での生産がはじまり，1953（昭和 28）年に連続式溶融亜鉛めっき設備が導入され，生産規模と品質が一新された〔富樫幸作，1977〕¹⁾．さらなる需要の増加の基，1963 年に工業規格化（JIS H 8641）され，同年には，当時の小さなめっき槽でも浸漬が可能であった H 形鋼を用いた我が国初となる溶融亜鉛めっき橋（流藻川橋）が施工された．その後も溶融亜鉛めっきは鋼橋の主構造への有効な防食方法として採用されてきた．現在では「溶融亜鉛めっき鋼板及び鋼帯（JIS G 3302）」のみならず，アルミニウムが添加された「溶融亜鉛－5%アルミニウム合金めっき鋼板及び鋼帯（JIS G 3317）」や「溶融 55%アルミニウム－亜鉛合金めっき鋼板及び鋼帯（JIS G 3321）」，さらにマグネシウムが添加された「溶融亜鉛－アルミニウム－マグネシウム合金めっき鋼板及び鋼帯（JIS G 3323）」といった多くのラインナップがある〔日本鉄鋼連盟，2021〕²⁾．しかし，その一方で，亜鉛めっきによる部材溶接部の割れ防止の工夫や，亜鉛めっきが溶接部の疲労に及ぼす影響等の研究がなされてきている．以上のように亜鉛めっき鋼板に関しては，その耐食性に関する研究のみならず，亜鉛めっきに配慮した部材製作やその部材強度への影響に関する研究等が行われてきている．

なお，溶融亜鉛めっき法の歴史，すなわち，溶融亜鉛めっきの発明者，溶融亜鉛めっき法の確立と我が国のそのヨーロッパ諸国から伝来と発展の経緯等については，2014（平成 26）年に発刊された鋼

道路橋防食便覧に詳しく記載されているため、そちらを参照いただきたい〔日本道路協会，2014〕³⁾。また、鋼板の亜鉛めっきの方法は、熔融亜鉛めっきと電気亜鉛めっきに大別され、それぞれの方法によりメッキされた鋼板を熔融亜鉛めっき鋼板、電気亜鉛めっき鋼板として識別されている。ここでは、鋼橋に多く用いられている熔融亜鉛めっき鋼板を主体に述べる。

(2) これまでの研究事例

亜鉛めっき鋼板の防食性は、亜鉛自体の耐食性と亜鉛めっき鋼板を適用する部材の腐食環境に依存するが、大気中での亜鉛自体の耐食性は暴露期間に対して線形的であることから、亜鉛めっき鋼板の寿命は比較的簡単に予測できると言われている〔紀平寛，1999〕⁴⁾。具体的には、全国 25 箇所の 1 年間暴露試験データを対数正規プロットしたデータは直線で扱うことが可能であること、すなわち、我が国の腐食度データは対数正規確率分布に従うことが明らである〔篠原正，2011〕⁵⁾。よって、例えば、亜鉛めっきの基準付着量を 600 g/m^2 、残存亜鉛量を 50 g/m^2 、年間腐食減少量の最多値を $5 \text{ g/m}^2/\text{年}$ （使用環境と亜鉛めっき被膜の年間腐食減量に関する田園地帯の典型的値）とすると、次式のように算出可能である〔紀平寛，1999〕⁴⁾。

$$\text{亜鉛めっき鋼板の耐用年数} = (600 \text{ g/m}^2 - 50 \text{ g/m}^2) / 5 \text{ g/m}^2/\text{年} = 110 \text{ 年}$$

一方、これまでに環境促進試験により実環境下の亜鉛めっき鋼板の耐食性の評価が試みられている。しかし、塩水噴霧試験では、乾湿が繰り返される実環境と大きく異なるばかりでなく、エロージョン・コロージョンに感受性の大きい亜鉛では厳しすぎる条件であることがわかっている〔黒川重男ら，1986〕⁶⁾。さらには、塩水の噴霧と乾湿の繰返ししが可能な複合サイクル試験〔黒川重男ら，1986〕⁶⁾では、一般に噴霧液に臨界湿度 76%の NaCl が使われるが、実環境の海塩には臨界湿度 33%の MgCl_2 が含まれているという実態と異なる等、サイクル試験における噴霧液に実状を反映すべきといった議論の余地があるなど〔篠原正，2011〕⁵⁾、亜鉛めっき鋼板の耐食性評価への環境促進試験の利用には注意を要する。

他方、上述した亜鉛めっき中の鋼橋の部材溶接部の割れは、めっき中に生じる変形に伴う高ひずみによる割れと亜鉛ぜい化による割れに大別されるが〔阿部英彦ら，1996〕⁷⁾、送電鉄塔分野での研究成果を基礎に鋼橋のめっき割れ防止の検討のために、1986 年に発足した ZB 研究会により 1989 年に基礎的な研究が終了した後、日本鋼構造協会より「熔融亜鉛めっき橋梁の設計・施工指針」が 1996 年 1 月に提案された。その指針作成における研究の一環として、めっき割れ防止の研究が実施されたと記述されており〔阿部英彦ら，1996〕⁷⁾、めっき割れ発生メカニズムと設計施工上からの割れ防止指標の検討〔阿部英彦ら，1996；阿部英彦ら，1997；伊藤徳昭ら，1991；鈴木富雄ら，1991；成宮隆雄ら，1991〕^{7)・8)・9)・10)・11)}や板厚 40 mm までの 490 MPa 級鋼および 590 MPa 級鋼について亜鉛ぜい化による割れと高ひずみによる割れ対策鋼が開発されてきている〔井上尚志ら，1993；井上尚志ら，1994〕^{12)・13)}。めっき割れ防止に関しては、2000 年代に入ってもめっき割れが生じにくいスカルップ構造ディテールの検討がなされている〔小山明久ら，2004；西尾吉史，2015〕^{14)・15)}。

さらに、亜鉛めっきを施すことで焼鈍効果や急冷効果により溶接部近傍の残留応力の低減と亜鉛皮膜への応力の伝達による溶接止端部の局部応力の低減が期待されることから、防食のみならず疲労強度を向上できれば腐食と疲労の両面で有利になると考えられる〔南邦明ら，2003〕¹⁶⁾。この考えのもと、亜鉛めっきした小型・大型溶接継手試験体の応力性状と疲労強度の把握が進められたが〔南邦明ら，2003a；南邦明ら，2003b〕^{16)・17)}、亜鉛めっきを施したことにより残留応力が低減しているにも関わらず、亜鉛皮膜の影響により疲労強度が低下することが明らかとなった。具体的には、亜鉛皮膜の脆い組織であると層から初期にき裂が生じ疲労強度が低下すると推定された。亜鉛めっきよりもめっき浴槽の温度が高く、めっき槽に 10 分浸漬するアルミニウムめっきを施した溶接継手の疲労強度についても検討がなされ、顕著な焼鈍効果があるが、疲労強度が低下すること、疲労強度の低下は亜鉛めっきと類似し、合金層の脆い組織から初期にき裂が生じるためと推定された〔森猛ら，2004〕¹⁸⁾。その後、亜鉛めっき組織の詳細な解析も実施され、一般的な熔融亜鉛めっき皮膜は母材側から Fe 濃度が

高い δ_1 相，柱状組織である ζ 相，最表面にある η 相の3層構造を呈しているが，最表面にある軟質でかつ固執すべり帯の形成が容易な η 相の存在により疲労強度が低下することが明らかとなり，これまでの研究成果の裏付けがなされたといえる〔長谷川嘉代ら，2019〕¹⁹⁾。

(3) 今後の展望

亜鉛めっき鋼板は結露現象に伴い，炭酸亜鉛や酸化亜鉛などの白さびが発生することから，白さびの発生を防止するためにクロム酸処理〔富樫幸作，1977〕¹⁾，言い換えれば，クロメート皮膜が広く用いられてきたが，6価クロムが有害物質規制の対象となり，クロムフリー化成処理技術の開発が強く要望されたことから，近年ではクロメート皮膜のクロムフリー化が実現されてきた〔浦崎香織里ら，2016；井上学，2019〕^{20)・21)}。現在のSGDsの観点から，今後も環境に配慮した持続的な表面処理技術へと高度化することが不可欠と考えられる。特に，数十年のうちに亜鉛資源が枯渇する金属と言われている点からは〔原田幸明，2008〕²²⁾，将来的に代替めっき鋼板が必要になるといえる〔藤田栄，2014〕²³⁾。引き続き，アルミニウムやマグネシウムなどの他元素の添加量を増やした合金めっき鋼板の更なる高度化が必要となっている。

参考文献

- 1) 富樫幸作(1977)：溶融亜鉛めっき鋼板の現状と将来，実務表面技術，24巻，12号，pp.578-582
- 2) 日本鉄鋼連盟(2021)：亜鉛めっき鋼板，<https://www.jisf.or.jp/business/tech/aen/seihin.html>，2021年6月時点
- 3) 日本道路協会(2014)：鋼道路橋防食便覧，丸善
- 4) 紀平寛(1999)：鋼材の耐食性と鋼橋梁の長期耐久性，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集－鋼構造の新技术動向，土木学会鋼構造委員会，pp.63-70
- 5) 篠原正(2011)：亜鉛めっき鋼板の耐食機構，表面技術，Vol. 62，No. 1
- 6) 黒川重男，番典二，大和康二，市田敏郎(1986)：自動車車体外面錆および孔あき腐食に及ぼす腐食試験条件の影響，鉄と鋼，72巻，8号，pp.1111-1118
- 7) 阿部英彦，紫桃孝一郎，家澤徹，加藤昭夫，栗飯原周二(1996)：非分割箱桁橋の亜鉛めっき割れ防止に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 42A，pp.955-963
- 8) 阿部英彦，家澤徹，金沢正午，加藤昭夫，栗飯原周二(1997)：橋梁の亜鉛めっき割れ防止に関する熱弾塑性解析と鋼材の基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 43A，pp.1161-1170
- 9) 伊藤徳昭，土屋匡寛，磯上洋(1991)：溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の熱応力・変形に関する検討（川之江西ジャンクション橋の設計），宮地技報，No.7，pp.30-37
- 10) 鈴木富雄，青木清，中塚勲夫(1991)：溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の製作に関する検討とその成果，宮地技報，No.7，pp.38-46
- 11) 成宮隆雄，森下統一，林文男(1991)：溶融亜鉛めっき箱桁橋梁のめっき割れ防止に関する検討とその成果，宮地技報，No.7，pp.47-57
- 12) 井上尚志，金谷研，今井晴雄，米田剛(1993)：溶融亜鉛めっき橋梁用高張力鋼の開発，新日鉄技法，第349号，pp.63-70
- 13) 井上尚志，武田鉄治郎，金谷研，家沢徹，山下達雄(1994)：耐めっき割れ性に優れたフェライト析出・高温低YP型高張力鋼の開発，まてりあ，第33巻，第6号，pp.820-822
- 14) 小山明久，岩崎雅紀，永田晋，直原明(2004)：鉄骨柱仕口スカップの溶融亜鉛めっき割れに関する検討，溶接学会論文集，第22巻，第3号，pp.435-442
- 15) 西尾吉史，岩崎正二，出戸秀明，大西弘志(2015)：鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する実験的および解析的検討，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.72，No.2(応用力学論文集 Vol.18)，I_831-I_840
- 16) 南邦明，森猛，堀川秀信(2003a)：溶融亜鉛めっきを施した溶接部の応力性状と小型試験体による

- 疲労試験－溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の疲労強度 (第 1 報)－, 溶接学会論文集, 第 21 巻, 第 4 号, pp.576-583
- 17) 南邦明, 森猛, 堀川秀信(2003b): 溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の大型桁試験体による疲労試験－溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の疲労強度 (第 2 報)－, 溶接学会論文集, 第 21 巻, 第 4 号, pp.584-591
- 18) 森猛, 南邦明, 堀川秀信(2004): 溶融アルミニウムめっきを施した面外ガセット溶接継手の疲労強度, 溶接学会論文集, 第 22 巻, 第 4 号, pp.551-556
- 19) 長谷川嘉代, 盛田元彰, 元田慎一(2019): 溶融亜鉛めっき鋼材の疲労強度に及ぼすめっき組織の影響, 鉄と鋼, Vol. 105, No.7, pp.733-741
- 20) 浦崎香織里, 土井正, 桑原聡士, 寺西義一, 竹村昌太(2016): 亜鉛めっき用クロムフリー化成皮膜形成に関する検討, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 第 11 号, pp.102-103
- 21) 井上学(2019): 亜鉛, 亜鉛合金めっき技術の動向と課題, 表面技術, Vol. 70, No. 8
- 22) 原田幸明(2008): 金属資源の将来予測に基づく「元素戦略」の必要性, 表面技術, Vol. 59, No. 7
- 23) 藤田栄(2014): 自動車用表面処理鋼板の腐食研究の歴史と展望, 材料と環境, 63 巻, 4 号, pp.148-150

4.3 ステンレス鋼

(1) 開発経緯

ステンレス鋼は鉄を主成分にクロムなど特定の元素を加えた鉄合金であり, かつては「クロムを概ね 13%以上含んだ鋼」と定義されていた. その後 1988 年 1 月に WCO (World Customs Organization/世界税関機構) で「炭素が 1.2%以下で, クロムを 10.5%以上含む合金鋼」と定義され, 現在に至っている.

ステンレス鋼の歴史は, 1820 年頃にイギリスの王立研究所にいたファラデー (M.Faraday) が行った「クロムを鋼に入れたときの性質変化を調べる合金研究」が始まりだと言われている. その後, 1912～1915 年に今日のステンレス鋼のうち基本的な 3 系統 (オーステナイト系, マルテンサイト系およびフェライト系) の工業的発明は行われた. オーステナイト系, マルテンサイト系はともに 1912 年にドイツで開発され, 1913 年にはイギリスでもマルテンサイト系が開発された. フェライト系は 1914 年にアメリカで開発された. もともとさびにくい鉄の研究をしていた訳ではなく, さまざまな材料研究の中で, クロムが多く入った鋼の組織を顕微鏡で見ようとして, その耐食性がたまたま発見されたとのことである. 2 相系ステンレス鋼は 1930 年ごろにスウェーデンとフランスで開発された. オーステナイトステンレス鋼中にフェライト相が少量存在すると粒界腐食が起こりにくく, 耐力の向上も認められたことが開発のきっかけとなった. 析出硬化系ステンレス鋼は第 2 次大戦中にアメリカにおいて開発され, 航空機用に利用された. それが戦後の 1945～46 年に U.S.Steel 社から Stainless W として発表された. 我が国では, 1916 年に呉海軍工廠の製鋼部で 13Cr 鋼の製造実験を行ったのが始まりである. 民間では 1920 年に八幡製鉄所で 13Cr 鋼が試作され, 1926 年末までには 13Cr 鋼を国産でまかなえるまでになった.

1951 年にはステンレス鋼の JIS が制定され, マルテンサイト系 (18Cr) 1 種, オーステナイト系 12 種 (18Cr-8Ni が 4 種, 18Cr-8Ni-Ti が 2 種, 18Cr-8Ni-Mo が 3 種, 18Cr-8Ni-Mo-Cu が 3 種) が登録された. その後, 初期にはオーステナイト系とマルテンサイト系の鋼種数が徐々に増え, 1972 年からはオーステナイト系とフェライト系が増え始め, 特に 1981 年の改正時に多くのフェライト系鋼種が登録されるなどして, 現在では 82 種が規定されている [遅沢浩一郎, 2011]¹⁾.

鋼構造への適用に関しては, 以下のような経緯がある.

建築構造に関しては, ステンレス協会は 1984 年から構造設計・施工法の開発に取り組み, 1989 年に「ステンレス鋼構造設計・施工規準(案)」を刊行した. この設計施工規準の対象とするものは, ステンレス協会規格 PS235-SUS304 材を用いた中小規模建物である. この材料は従来の SUS304 とは機

械的性質が若干異なり、降伏耐力が 0.1%オフセット耐力で定義され、その値は SS400 と同じに設定されている。これは、降伏点を 0.2%オフセット耐力と定義すると、ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線が普通鋼のものと異なり、低応力で剛性の低下が始まるため、この時点での剛性が低くなり過ぎ、建物全体としての変形が無視し得なくなること、およびステンレス鋼と普通鋼の併用も十分考えられることから、その際の構造設計上の便利さを意図したことによる。また、降伏耐力を引張強さで除した降伏比も新たに設定されている。これは、降伏後の十分な塑性変形を確保するには、降伏してから引張強さまで一定の応力上昇の余力が必要であることによる。

ステンレス鋼を普通鋼と同じように建築構造に利用したいという要望を受けて、ステンレス鋼を建築物の構造骨組として利用できるようにするため、必要な研究を実施しその結果を基に技術指針を作成することを目的として、建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」（新素材総プロと呼ぶ）が 1988 年度から五か年計画で開始された。そこでは、素材・部材・接合部・接合要素の性能、耐火設計、薄板の設計基準、施工管理、耐久性、意匠設計に関する研究が行われ、それらの研究成果に基づいて「新ステンレス鋼利用技術指針」が作成された。このプロジェクトにより、2000 年の建築基準法および同施行令の改正でステンレス鋼（SUS304A、SUS316A、SUS304N2A）が建築構造材として炭素鋼と併記されるとともに、高さ 60m までのすべての建築物への適用が可能となった。2004 年には、1999 年に JSSC に設置された委員会の軽量形鋼の構造安全性に関する研究成果として、「軽量ステンレス構造デザインマニュアル」が発刊されている。

土木分野では、1960 年代から、ダム、堰、水門などにおいて常時水に接する部分に、機能維持とメンテナンス軽減を目的として、ステンレス鋼の適用が始まった。現在では、戸当たり部分や扉体本体など多くの部材に適用されている。ダム・堰施設技術協会から「ダム・堰施設技術基準(案)」も発刊されており、構造設計法のほか、防食に関する留意点なども示されている。

水管橋や地上設置型の配水池への適用も進んでいる。日本水道鋼管協会により、水管橋に関しては「WSP 068-2004 水道用ステンレス鋼管設計・施工指針」が、配水池に関しては「WSP 073-2010 ステンレス鋼製角形配水池設計指針」が整備されている。

橋梁の構造部材への適用は他の構造物より遅れており、国内では比較的最近になって、歩道橋への適用事例が数例 [森川久ら, 2005 ; 吉川一成, 2018] ²⁾ ³⁾ あるのみである。一方、海外では鉄道橋や道路橋への適用事例 [Zahurul et al., 2011] ⁴⁾ もある。

RC 構造物へのステンレス鉄筋の適用については、2002 年にステンレス協会で規格化の取り組みが開始され、2008 年に JIS G4322「鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」が制定された。同年には土木学会から「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針 (案)」も発刊された。

2010 年に「(社) ステンレス構造建築協会」と「(社) 日本鋼構造協会」が合併し、新たな「(社) 日本鋼構造協会」(以下、JSSC)が発足した。その際、JSSC 内に、ステンレス構造建築協会の成果を引き継ぎ、ステンレス鋼の技術開発等を掌握する「ステンレス技術・標準委員会」が設置された。「ステンレス技術・標準委員会」はステンレス構造建築協会の活動成果を土木分野に移転する活動として、「ステンレス鋼構造物(土木分野)の設計指針」および「環境性能(LCC、長寿命化等)を考慮した土木分野におけるステンレス鋼種の選定指針」等の策定を掲げ、活動を開始した。2011 年には、ステンレス鋼構造物(土木分野)の設計指針を検討・作成を実施する組織として、「ステンレス土木鋼構造物の設計施工指針案作成小委員会」が設置され、同小委員会は「ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(草案)」を作成した。2014 年にその後継小委員会として発足した「ステンレス鋼土木構造物設計施工指針活用小委員会」は、草案の査読を関係各所へ依頼し、査読結果への対応、反映等を行った後、2015 年に「ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(案)」を発刊した。JSSC からは翌 2016 年にテクニカルレポート No.109「SUS304A 用高強度溶材料の開発」も発刊されている。

(2) これまでの研究事例

開発されてからの歴史も古く、多くの研究がなされている。大気腐食、座屈・耐荷力、疲労に関する

る主な研究を以下に紹介する。

1) 大気腐食

環境ごとの腐食性や適材を把握するため、多くの大気暴露試験が行われている。武藤泉(2001)は1980~1998年の主な報告に自身らが実施した試験の結果をもとに、以下のように述べている⁵⁾。

- a) 海浜大気環境でのステンレス鋼のさび発生は、暴露開始1年以内に起こり3年程度で定常的な腐食状態となり、普通鋼のように、長い年月をかけて徐々に進行するものではない。
- b) したがって、環境の腐食性を上回る耐食性を有する鋼種の適用により、長期にわたり腐食を防止できる。
- c) ステンレス鋼の耐候性は、CrやMoなど塩化物水溶液中での耐孔食性を向上させる元素により改善される。

近年では、横浜と丹沢大山における腐食〔南齋勉ら、2013〕⁶⁾、SUS 304に生成する不動態皮膜におよぼす微量塩類の影響〔鄭楽薫ら、2013〕⁷⁾、ステンレス鋼の耐発錆性に及ぼす不動態皮膜の安定度の影響〔富士浩行ら、2015〕⁸⁾、21%Crフェライトステンレス鋼の食孔深さに及ぼすNiの影響〔芝辻ら、2016〕⁹⁾、乾湿繰り返し試験におけるすきま部の腐食挙動〔平出信彦ら、2015；平出信彦ら、2016；平出信彦ら、2017〕^{10)~12)}などに関する研究や、ステンレス鋼と炭素鋼を接合した厚板の大気暴露試験〔西脇天太ら、2017〕¹³⁾、結露生成・乾燥挙動の実験室的解析〔西田修司ら、2018〕¹⁴⁾、塩化物液滴下における孔食発生・成長過程の観察〔大井梓ら、2019〕¹⁵⁾などが行われている。

2) 座屈・耐荷力

建築構造物への適用を想定した研究が1990年代に数多く行われている。局部座屈を伴うステンレス鋼部材の最大耐力と変形能力〔山田哲ら、1991；松下吉男ら、1992；松下吉男ら、1994；松下吉男ら、1995〕^{16)~19)}、H形断面部材の横座屈耐力〔中村武ら、1993〕²⁰⁾、局部座屈耐力と変形能力〔松下吉男ら、1993〕²¹⁾、曲げ振り座屈挙動〔井上哲郎、1994a；井上哲郎、1996〕^{22), 23)}、箱形断面短柱の応力-歪特性〔井上哲郎、1994b〕²⁴⁾、高温時耐力〔倉本真介ら、1994〕²⁵⁾、薄肉I形断面梁の終局耐力と変形〔松下吉男ら、1997〕²⁶⁾などの研究がある。

2000年代初頭には、軽量ステンレス構造に関する研究が精力的に行われ、薄肉短柱の局部座屈〔桑村仁ら、2001a〕²⁷⁾、長柱の曲げ座屈〔桑村仁ら、2001b〕²⁸⁾、薄板ファスナ接合部の終局挙動〔桑村仁ら、2002〕²⁹⁾、薄肉パイプ溶接継手部の力学性状〔小河利行ら、2002〕³⁰⁾、クロム系ステンレス鋼圧縮材の局部座屈〔桑村仁ら、2004〕³¹⁾などに関する研究成果が報告されている。近年では、せん断パネルの履歴特性に関する実験的研究〔倉富洋ら、2014〕³²⁾も行われている。

橋梁を想定した研究は2000年代前半に加速しており、琉球大学のグループによって、ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐荷力特性〔松下裕明ら、2003〕³³⁾、I形断面桁腹板のせん断耐荷力〔松下裕明ら、2004〕³⁴⁾が研究されている。同グループでは、その後もせん断を受けるステンレス鋼板の耐荷力特性〔松下裕明ら、2005〕³⁵⁾、圧縮フランジ板の耐荷力評価〔有住康則ら、2009〕³⁶⁾、ステンレス鋼-構造用鋼ハイブリッド圧縮補剛板の耐荷力評価〔松下裕明ら、2013〕³⁷⁾などの研究を行っている。2000年代後半には、大阪大学のグループが研究を始めている〔森省吾ら、2007；三好崇夫ら、2007a；三好崇夫ら、2007b〕^{38)~40)}。以降、同グループのメンバーは現在に至るまで、精力的に研究を行っており、材料特性や残留応力〔三好崇夫、2016；佐藤信輔ら、2016；宮寄靖大、2017〕^{41)~43)}、圧縮板の終局強度〔三好崇夫ら、2009；宮寄靖大ら、2010；宮寄靖大ら、2013；加藤健太郎ら、2015；杉田吏絵ら、2016；播磨武信ら、2016〕^{44)~49)}、箱形断面柱部材〔三好崇夫、2014〕⁵⁰⁾やH形短柱〔三好崇夫、2017〕⁵¹⁾の終局強度、ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成されるI形断面梁の曲げ強度〔和田勇輝ら、2017〕⁵²⁾や圧縮補剛板の強度〔井比亨ら、2017〕⁵³⁾、部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度〔堀澤英太郎ら、2017；堀澤英太郎ら、2019〕^{54), 55)}、SUS323LおよびSM570製溶接組立て短柱の圧縮強度特性〔宮寄靖大ら、2018〕⁵⁶⁾などに関する成果が報告されている。

また、新しい材料の実用化に向けて、リーニ二相ステンレス鋼溶接角変形の加熱矯正の適用に関す

る検討〔鳥形啓輔ら，2017〕⁵⁷⁾なども行われている。

3) 溶接継手の疲労

物質・材料研究機構（NIMS）では，前身の金属材料研究所（NRIM）時代から各種鋼材の疲労試験データを蓄積し，疲労データシートとして発刊している．ステンレス鋼の溶接継手についても，以下のようなデータシートがある．

No.53：熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP(18Cr-8Ni)突合せ溶接継手の疲れ特性データシート－応力比の効果－(1986)

No.54：熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP(18Cr-8Ni)突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート－応力比の効果－(1986)

No.65：熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP(18Cr-8Ni)突合せ溶接継手の溶接金属及び母材の疲労特性データシート(1990)

近年の研究としては，フェライト系ステンレス鋼の溶接継手を対象として，フランジヘリ溶接継手の溶接残留応力と疲労強度〔貝沼重信ら，2004〕⁵⁸⁾，SUS444 溶接継手の疲労挙動〔秋田正之ら，2005〕⁵⁹⁾ や疲労挙動に及ぼす溶接金属と試験温度の影響〔秋田正之ら，2012〕⁶⁰⁾，3%NaCl 水溶液中における腐食疲労挙動〔秋田正之ら，2006〕⁶¹⁾，フェライト系ステンレス鋼 SUS444 溶接継手の，溶接材料の異なる SUS430 継手における溶接部微視組織・機械的特性および疲労挙動〔秋田正之ら，2016〕⁶²⁾ に関する研究などが行われている。

オーステナイト系ステンレス鋼については，疲労強度に及ぼす応力比および腐食環境の影響〔中村侑香ら，2009〕⁶³⁾，オーステナイト系ステンレス鋼と各種機械構造用炭素鋼ばり付摩擦圧接継手の疲労特性〔長谷川正義ら，2010〕⁶⁴⁾，荷重伝達型および荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度に与える腐食環境の影響〔飯田ちひろ，2010〕⁶⁵⁾，溶接接合管材の疲労強度に及ぼす微小欠陥と水素の影響〔松本圭純ら，2011〕⁶⁶⁾，ケミカルタンカーに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼板の疲労強度〔内村秀之ら，2012〕⁶⁷⁾，高圧水素ガス中における溶接金属 317L の SSRT 特性と疲労寿命特性〔中村眞実ら，2018〕⁶⁸⁾ などが研究されている。

二相ステンレス鋼板・オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度〔緒方洋典ら，2017〕⁶⁹⁾ や Nb 含有フェライト系ステンレス鋼溶接継手の大気中および塩水中における疲労挙動に及ぼす溶接金属の影響〔秋田正之ら，2018〕⁷⁰⁾ も研究されている。

溶接継手部の疲労強度向上法については，各種ピーニングの効果が研究されており，溶接止端部のき裂に対するピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化〔笛木隆太郎ら，2015〕⁷¹⁾，水噴流を利用した各種ピーニング処理による疲労強度向上〔高桑脩ら，2017〕⁷²⁾，レーザーピーニングによるき裂状表面欠陥の疲労限度改善と欠陥の無害化〔笛木隆太郎ら，2019〕⁷³⁾ などに関する研究成果が報告されている。

(3) 今後の展望

(2)に記したように，座屈・耐荷力に関する研究は既に多く実施されており，橋梁等の土木構造物へ適用を図るための基本的なデータは得られているものと思われる．一方，溶接継手の疲労に関しては，SUS304 のような特定の鋼種を除き，基本的なデータが不足している．土木構造物で用いられる代表的な溶接継手に各種ステンレス鋼を用いた場合の疲労強度やき裂進展特性に関するデータの蓄積が望まれる．また，ステンレス鋼は普通鋼材に比べて優れた耐食性を有するものの高価であることから，その利用促進を図るためには，必要な耐食性を確保した上での低廉化，普通鋼とのハイブリッド利用などの有効な利用方法に関する研究を推進する必要がある。

参考文献

- 1) 遅沢浩一郎(2011)：ステンレス鋼活用の基礎知識－歴史，特性，耐食性－ 1. ステンレス鋼の歴史と製造，材料，Vol.60，No.7，pp.680-686

- 2) 森川久, 和村一彦, 荻野晴海(2005): 湯ノ沢大橋の設計 《ステンレス形鋼補剛による木製吊り橋の設計》, ステンレス建築, No.27, pp.14-27
- 3) 吉川一成(2018): 清澄排水機場吐出樋門における隅田川テラス橋梁へのステンレス鋼の適用, JSSC, No.33, pp.28-29
- 4) Zahurul Islam, S.M., Young, B.(2015): Use of stainless steel as structural members in bridge construction and fiber reinforced polymer strengthening, Proceedings of IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, pp.164-173
- 5) 武藤泉(2001): 建築建材用ステンレス鋼の最近の動向と大気腐食研究の最先端, 材料と環境 50(5), pp.203-209
- 6) 南齋勉, 大村公一, 山岸恒介, 井川学(2013): 横浜と丹沢大山における亜鉛めっき鋼とステンレス鋼の腐食, 材料と環境 62(11), pp.460-465
- 7) 鄭楽薫, 土谷博昭, 藤本慎司(2013): 大気環境中にて SUS 304 ステンレス鋼に生成する不働態皮膜におよぼす微量塩類の影響, 材料と環境 62(4), pp.148-152
- 8) 富士浩行, 青木聡, 石井知洋, 酒井潤一(2015): ステンレス鋼の耐発錆性に及ぼす不働態皮膜の安定度の影響, 材料と環境 64(5), pp.178-182
- 9) 芝辻雄一, 西村瑞希, 石井知洋, 青木聡, 酒井潤一(2016): 大気腐食環境下における 21Cr フェライトステンレス鋼の食孔深さに及ぼす Ni の影響, 材料と環境 65(6), pp.259-263
- 10) 平出信彦, 坂本俊治, 梶村治彦(2015): 乾湿繰り返し試験におけるステンレス鋼すきま部の腐食挙動—すきま内環境の評価—, 材料と環境 64(8), pp.358-365
- 11) 平出信彦, 梶村治彦(2016): 乾湿繰り返し試験におけるステンレス鋼すきま部の腐食挙動 —鋼種の影響—, 材料と環境 65(5), pp.211-219
- 12) 平出信彦, 梶村治彦(2017): 乾湿繰り返し試験におけるステンレス鋼すきま部の腐食挙動 —合金元素の影響—, 材料と環境 66(6), pp.214-222
- 13) 西脇天太, 宮寄靖大, 小見恒介, 中野幸広(2017): ステンレス鋼と炭素鋼を接合した厚板の 2 年間大気暴露試験, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.696-703
- 14) 西田修司, 石井知洋, 藤澤光幸, 杉原玲子(2018): ステンレス鋼板の大気腐食現象における結露生成・乾燥挙動の実験室的解析, 材料と環境 67(8), pp.336-345
- 15) 大井梓, 伊勢八起, 多田英司, 西方篤(2019): 塩化物液滴下におけるステンレス鋼の孔食発生・成長過程の観察—孔食発生・成長・再不働態化におよぼす S 含有量の影響—, 材料と環境 68(12), pp.347-354
- 16) 山田哲, 加藤勉(1991): 局部座屈を伴うステンレス鋼部材の最大耐力と変形能力, 構造工学論文集, Vol.37B, pp.239-245
- 17) 松下吉男, 加藤 勉(1992): ステンレス鋼(SUS304)部材の非弾性局部座屈強さと変形能力, 構造工学論文集, Vol.38B, pp.361-368
- 18) 松下吉男, 加藤 勉(1994): 局部座屈を伴う閉断面ステンレス鋼部材の最大耐力と変形能力, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.637-644
- 19) 松下吉男, 加藤勉(1995): ステンレス鋼薄板構造の局部座屈挙動, 構造工学論文集, Vol.41B, pp.543-548
- 20) 中村武, 梶田洋子(1993): ステンレス鋼 H 形断面材の横座屈耐力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39B, pp.583-592
- 21) 松下吉男, 加藤勉(1993): ステンレス鋼 SUS304N2 を用いた H 形断面部材の局部座屈耐力と変形能力, 構造工学論文集, Vol.39B, pp.575-582
- 22) 井上哲郎(1994a): ステンレス鋼 H 形断面柱部材の曲げ振り座屈挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.653-664
- 23) 井上哲郎(1996): ステンレス鋼 H 形断面柱部材の曲げ振り座屈解析, 構造工学論文集, Vol.42B,

pp.457-466

- 24) 井上哲郎(1994b): ステンレス鋼箱形断面短柱の応力-歪特性, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.627-636
- 25) 倉本真介, 染谷朝幸, 窪田伸, 作本好文, 上杉英樹, 齋藤光(1994): ステンレス鋼を用いた箱型断面柱の高温時耐力, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.571-584
- 26) 松下吉男, 加藤勉, 安楽秀嶽(1997): ステンレス薄肉 I 形断面梁の終局耐力と変形, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.329-336
- 27) 桑村仁, 稲葉雄一郎, 磯崎あゆみ(2001a): ステンレス鋼薄肉短柱の局部座屈と有効幅: 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集 66(544), pp.155-162
- 28) 桑村仁, 稲葉雄一郎, 磯崎あゆみ(2001b): ステンレス鋼薄肉長柱の曲げ座屈: 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集 66(549), pp.135-142
- 29) 桑村仁, 磯崎あゆみ(2002): ステンレス鋼薄板ファスナ接合部の終局挙動: 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 4, 日本建築学会構造系論文集 67(556), pp.159-166
- 30) 小河利行, 木村祥裕, 郡谷知宏, 五十畑徹: ステンレス鋼薄肉パイプ溶接継手部の力学性状に関する研究: 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 3, 日本建築学会構造系論文集 67(551), pp.133-139
- 31) 桑村仁, 加藤太一(2004): クロム系ステンレス鋼圧縮材の局部座屈: 軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その 5, 日本建築学会構造系論文集 69(582), 163-170
- 32) 倉富洋, 稲田達夫(2014): ステンレス鋼を用いたせん断パネルの履歴特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 84 号, pp.37-45
- 33) 松下裕明, 岩田節雄, 有住康則, 矢吹哲哉(2003): ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐力特性, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.833-844
- 34) 松下裕明, 矢吹徹哉, 有住康則, 岩田節雄(2004): ステンレス鋼を用いた I 形断面桁腹板のせん断耐力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.799-808
- 35) 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則, 岩田節雄(2005): せん断を受けるステンレス鋼板の耐力特性, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.865-874
- 36) 有住康則, 矢吹哲哉, 下里哲弘, 池宮真人, 松下裕明(2009): ステンレス鋼を用いた圧縮フランジ板の耐力評価, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.70-79
- 37) 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則, 下里哲弘(2013): ステンレス鋼一構造用鋼ハイブリッド圧縮補剛板の耐力評価, 土木学会論文集 A1, 69 巻 1 号, pp.121-132
- 38) 森省吾, 三好崇夫, 越智内士, 宮寄靖大, 奈良敬(2007): ステンレス鋼の応力ひずみモデルが終局強度に及ぼす影響について, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 巻, pp.645-652
- 39) 三好崇夫, 宮寄靖大, 奈良敬(2007a): SUS410L の応力-ひずみモデルとそれを用いた板の圧縮強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 巻, pp.633-638
- 40) 三好崇夫, 越智内士, 森省吾, 宮寄靖大, 奈良敬(2007b): ステンレス鋼圧縮板の設計基準強度に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 15 巻, pp.639-644
- 41) 三好崇夫(2016): SUS821L1 溶接 I 形断面部材の材料特性値と残留応力, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.305-312
- 42) 佐藤信輔, 宮寄靖大(2016): 静的引張試験による二相系ステンレス鋼の材料特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.297-304
- 43) 宮寄靖大(2017): SUS323L および SM570 製溶接組立部材断面の残留応力分布, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.397-403
- 44) 三好崇夫, 宮寄靖大, 奈良敬(2009): 二相系ステンレス鋼板の極限圧縮強度特性, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.80-91
- 45) 宮寄靖大, 奈良敬(2010): 無補剛ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.122-134

- 46) 宮寄靖大, 奈良敬(2013): 応力ひずみ関係に基づくステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法, 鋼構造論文集, 20 巻 79 号, pp.67-79
- 47) 加藤健太郎, 宮寄靖大, 奈良敬(2015): 単軸面内準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の圧縮強度特性および極限圧縮強度評価法, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.49-61
- 48) 杉田吏絵, 奈良敬(2016): リーン二相系ステンレス鋼板の材料強度と終局圧縮強度の関係, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.321-328
- 49) 播磨武信, 奈良敬(2016): 二相系ステンレス鋼板の終局圧縮強度評価法, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.329-335
- 50) 三好崇夫(2014): ステンレス鋼溶接箱形断面柱部材の終局圧縮強度, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.114-125
- 51) 三好崇夫(2017): 二相系ステンレス鋼 H 形短柱の終局強度に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.67-77
- 52) 和田勇輝, 宮寄靖大(2017): ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成される I 形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.92-105
- 53) 井比亨, 宮寄靖大, 奈良敬(2017): ステンレス鋼と炭素鋼で構成される圧縮補剛板の強度評価法, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.78-91
- 54) 堀澤英太郎, 宮寄靖大(2017): 部材両端をステンレス鋼とした炭素鋼製長柱の圧縮強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.404-411
- 55) 堀澤英太郎, 宮寄靖大(2019): 部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.1-14
- 56) 宮寄靖大, 大垣賀津雄(2018): SUS323L および SM570 製溶接組立て短柱の圧縮強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 26 巻, pp.462-469
- 57) 鳥形啓輔, 阿部大輔, 松岡孝昭(2017): リーン二相ステンレス鋼溶接角変形の加熱矯正の適用に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.418-425
- 58) 貝沼重信, 中根竜二, 細見直史(2004): フェライト系ステンレス鋼のフランジヘリ溶接継手の溶接残留応力と疲労強度, 溶接学会論文集 22(1), pp.117-124
- 59) 秋田正之, 中島正貴, 戸梶恵郎, 高井洋輔(2005): フェライト系ステンレス鋼 SUS444 溶接継手の疲労挙動, 日本機械学会論文集 A 編 71(705), pp.769-774
- 60) 秋田正之, 植松美彦, 柿内利文, 中島正貴, 山岸敬之, 懸幸男(2012): フェライト系ステンレス鋼 SUS444 溶接継手の疲労挙動に及ぼす溶接金属と試験温度の影響, 日本機械学会論文集 A 編 78(788), pp.432-441
- 61) 秋田正之, 中島正貴, 戸梶恵郎, 高井洋輔(2006): 3%NaCl 水溶液中におけるフェライト系ステンレス鋼溶接継手の腐食疲労挙動, 日本機械学会論文集 A 編 72(713), pp.120-126
- 62) 秋田正之, 植松美彦, 柿内利文, 中島正貴, 懸幸男, 滝野晃平(2016): 溶接材料の異なるフェライト系ステンレス鋼 SUS430 継手における溶接部微視組織・機械的特性および疲労挙動, 溶接学会論文集 34(3), pp.167-174
- 63) 中村侑香, 飯田ちひろ, 見村博明(2009): オーステナイト系ステンレス鋼の疲労強度に関する研究:(応力比および腐食環境の影響), 鋼構造論文集 16(61), pp.55-64
- 64) 長谷川正義, 角亮磨(2010): オーステナイト系ステンレス鋼と各種機械構造用炭素鋼ばり付摩擦圧接継手の疲労特性, 溶接学会論文集 28(4), pp.355-361
- 65) 飯田ちひろ, 見村博明(2010): オーステナイト系ステンレス鋼を用いた荷重伝達型および荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度 (腐食環境が疲労強度に与える影響), 日本建築学会構造系論文集 75(647), pp.223-229
- 66) 松本圭純, 久保田祐信, 近藤良之(2011): オーステナイト系ステンレス鋼における溶接接合管材の疲労強度に及ぼす微小欠陥と水素の影響, 日本機械学会論文集 A 編 77(781), pp.1554-1558

- 67) 内村秀之, 宅野正夫, 村上幸治, 後藤浩二(2012): ケミカルタンカーに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼板の疲労強度に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集 16 巻, pp.89-97
- 68) 中村眞実, 岡崎三郎, 松永久生, 松岡三郎(2018): 高圧水素ガス中におけるオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属 317L の SSRT 特性と疲労寿命特性, 日本機械学会論文集 84(857), 17-00437-17-00437
- 69) 緒方洋典, 堺田和昌, 篠崎賢二, 山本元道, 谷野忠和, 福井努, 矢島浩(2017): 二相ステンレス鋼板・オーステナイト系ステンレスクラッド鋼板溶接継手部の疲労強度に関する一考察, 圧力技術 55 巻 3 号, pp.112-120
- 70) 秋田正之, 植松美彦, 柿内利文, 小山敦弘, 中島正貴, 高瀬徹, 縣幸男, 竹尾友佑, 今里周平, 杉本大志(2018): Nb 含有フェライト系ステンレス鋼 JFE429EX 溶接継手の大気中および塩水中における疲労挙動に及ぼす溶接金属の影響, 溶接学会論文集 36(4), pp.238-246
- 71) 笛木隆太郎, 安部央矩, 高橋宏治, 安藤柱, 北條恵司, 半田充(2015): 溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化, 圧力技術 53(3), pp.40-148
- 72) 高桑脩, 祖山均(2017): 水噴流を利用した各種ピーニング処理によるステンレス鋼溶接部の疲労強度向上, 噴流工学 33(1), pp.4-9
- 73) 笛木隆太郎, 高橋宏治, 桑野文亮, 澁谷 紀仁(2019): き裂状表面欠陥を有するステンレス鋼溶接継手の疲労限度改善と欠陥の無害化:-レーザピーニングの効果-, 圧力技術 57(2), pp.82-91

4.4 LP 鋼板

(1) 開発経緯

橋梁等の構造物では, 位置によって断面力が変化するため, 鋼板の所要板厚が変化する. 通常, 板厚や材質の異なる鋼板を溶接等で接合して断面を変化させるが, 設計上の所要厚に応じて連続的に板厚が変化する鋼板が利用できれば理想的である. このような発想から LP 鋼板は開発された.

Garrigues et al. (1991)¹⁾によると, 初めての LP 鋼板は, 1983 年 Usinor Sacilor グループのドイツ Dilliner 製鉄所, およびフランスの GTS 社によって製造された. 1990 年までにフランスおよびドイツで 43 橋以上の橋梁に使用され, Somme 橋 (1990 年完成) では LP 鋼板の使用により, 鋼重が 126 トン (7%), 40m の径間中でフランジの溶接数も 3 箇所から 1 箇所に削減され, 工期も短縮されたと報告されている.

国内でも 1990 年代前半には LP 鋼板の製造が可能となり, 造船用や橋梁用として用いられてきた. 橋梁への初適用は 1994 年の深沢川橋であり, 主桁フランジに用いられた. 従来設計と比べ, 鋼重は 15%増加したものの, 溶接長は 40%に, 大型材片数は 1/3 に減少したと報告されている [板橋壮吉ら, 1996]²⁾. その後, 多くの I 桁または箱桁のフランジに適用されている. I 桁・箱桁の腹板, 斜張橋の主塔腹板にも採用された例もある [堀田ら, 2000]³⁾. 合理化桁に関するデザインマニュアル [日本鋼構造協会, 2000]⁴⁾には橋梁への使用実績がまとめられている.

(2) これまでの研究事例

LP 鋼板を I 桁や箱桁のフランジに用いるため, 多くの研究が行われている. 堀田毅ら(1996, 1997)^{5), 6)}, 村上茂之ら(1997)⁷⁾は, LP 鋼板をフランジに用いた I 断面桁の耐荷力実験, および板厚変化を考慮した LP 鋼板フランジの弾塑性有限要素解析を実施している. その結果, 初期たわみに対する板厚変化の影響は小さいが, 残留応力分布に関しては軸応力の応力変化に対応したせん断応力を考慮する必要があること, 変厚圧縮フランジの局部座屈強度は道路橋示方書に基づき最小板厚で断面を設計すると安全側過ぎること, 桁の横倒れ座屈に対する板厚変化の影響は小さいことを明らかにしている. また, 等価幅厚比パラメータおよび等価板厚を用いて LP 鋼板フランジの圧縮強度を評価する方法を提案している. 奈良敬ら(2002)⁸⁾は, LP 鋼板をフランジに用いた鋼 I 桁の実物大供試体による曲げ載荷試験

および初期不整量の測定を実施し、現行の設計手法では合理的な設計が困難であると指摘している。井川大裕ら(2012)⁹⁾は、LP 鋼材を梁フランジに用いて梁端の梁フランジ厚を大きくした TF (Thick Flange) 工法を提案し、実験的に力学的性能を検証し、スカラップ底の延性亀裂発生防止と、梁端塑性化抑制の 2 つの条件を同時に満足するように増厚形式の形状・寸法を決定する方法として、梁端のひずみを増厚開始位置のひずみの 0.9 倍とする条件から導かれる方法を提案している。永藤壽宮ら(2014)¹⁰⁾は、純圧縮力を受ける有孔 LP 補剛板を対象として、板厚差や孔径を変化させた数値シミュレーションを実施し、それらが耐荷力に及ぼす影響を調査している。

LP 鋼板の高力ボルト継手に関して亀井義典ら(2000)¹¹⁾は、連結板内折れおよび外折れ 2 つのタイプについて、等厚部を省略した LP 鋼板の高力ボルト摩擦接合継手の引張試験を行い、テーパー勾配 4.8/1000 程度までの範囲であれば、いずれの連結板タイプについても、連結板にプレバントを与える必要はなく、等厚継手と同様の摩擦接合としての機能が十分に得られることを確認している。

鋼製橋脚に LP 鋼板を用いるための研究も多い。上野谷実ら(2003)¹²⁾は、LP 鋼板を用いた正方形補剛箱形断面柱 4 体と定厚鋼板を用いた正方形補剛箱形断面柱 1 体の準静的載荷実験を実施し、同一重量のテーパー部材は塑性変形性能やエネルギー吸収性能において、等断面部材より優れていることを明らかにしている。熊野拓志ら(2005)¹³⁾は、基部に LP 鋼板を用いた鋼製橋脚の繰返し載荷実験を行い、強度と変形性能の把握を試みている。実験結果に基づき、LP 鋼板を橋脚に用いる場合、外側に板厚変化させるのが、力学的、製作性の観点から有利であること、板継ぎ位置はテーパー開始位置より上部に設置するのが良いこと、変形性能が最大となるのはテーパー部の応力勾配を適合勾配とした場合であるが、実橋の設計では、適合勾配から若干正勾配となるようにテーパー率を設計するのが良いこと等を指摘している。高久ら(2005)¹⁴⁾は、LP 鋼板を用いた鋼製橋脚を対象として、構造実験、FEM 解析をもとにその耐震性能を評価し、さらに耐震設計法を提案している。

LP 鋼板の初期不整に着目した研究もおこなわれており、熊野拓志ら(2009)¹⁵⁾は板厚の製作誤差、圧延および溶接による残留応力分布性状を実測し、考察を加えている。

LP 鋼板と類似した変厚鋼板である幅方向テーパー鋼板を対象とする、以下のような研究もおこなわれている。奈良敬ら(1997)¹⁶⁾は、幅方向テーパー鋼板を腹板に用いた鋼桁断面の弾塑性挙動を解析し、従来断面と比較している。その結果、「同鋼板を腹板に用いることで圧縮域での腹板のたわみが抑制される結果、鋼桁断面の極限曲げ強度が定厚鋼板を用いたものよりも高くなる。その効果は板厚比の増加に伴い高くなるが、板厚比が 2 を超えると上昇率は鈍化する」と述べている。杉浦邦征ら(2005)¹⁷⁾は、板幅方向にテーパーを有する鋼製周辺単純支持板を対象に、鈴木康夫ら(2006)¹⁸⁾は、板幅方向にテーパーを有する鋼製自由突出板を対象に、テーパー率、幅厚比パラメータを変化させたパラメトリック解析を行い、その圧縮強度、変形能およびエネルギー吸収能を検討している。その結果、周辺単純支持板では中央部を薄くした凹型の板で、自由突出板では支持辺部の板厚を厚くした凸型の板で、等厚の場合と比べて、圧縮強度、変形性能およびエネルギー吸収性能が向上することを確認している。熊野拓志ら(2008)¹⁹⁾は、アスペクト比 1 の周辺単純支持板と自由突出板を対象に FEM 解析によるパラメトリックスタディを実施し、軸方向テーパー鋼板と幅方向テーパー鋼板の圧縮強度の推定方法を検討している。橋本国太郎ら(2009)²⁰⁾は、凹型（テーパー率 0.01）および凸型（テーパー率 0.004）の板厚形状を腹板に適用した鋼 I 桁の曲げ挙動およびせん断挙動を載荷実験と数値解析で検討し、前者を適用することで曲げ耐荷力が、後者を適用することでせん断座屈強度がわずかではあるが向上することを示している。橋本国太郎ら(2011)²¹⁾は、幅方向テーパー鋼板を用いた箱型断面鋼製橋脚を新たに提案し、幅厚比パラメータおよびテーパー率をパラメータとした正負交番載荷実験、複合非線形 FEM 解析、ハイブリッド実験および動的複合非線形 FEM 解析（地震応答解析）を行い、幅方向テーパーによってエネルギー吸収性能や塑性率が向上すること、幅厚比パラメータならびにテーパー率が大きいほどエネルギー吸収性能が向上することを明らかにしている。また、ハイブリッド実験および地震応答解析により、阪神大震災クラスの地震を受けた場合、幅厚比パラメータ $R=0.4\sim0.5$ では、幅方向テーパーをつけることで、応答変位量が 5%程度小さくなることも明らかにしている。

(3) 今後の展望

上述したように、LP 鋼板に関するこれまでの研究は、主に座屈耐荷力や変形性能を明らかにすることを目的として実施されている。適用対象としては、鋼桁フランジと鋼製橋脚基部である。幅方向テーパ鋼板については、LP 鋼板の研究で想定されていた適用範囲に加え、鋼桁腹板に用いることを意図した研究も行われているが、これらの目的は耐荷力や変形性能を明らかにすることに限られている。今後それ以外の力学特性、例えば疲労強度やき裂の伝播特性、破壊じん性等に関する研究が行われるとともに、それらの知見を総合的に勘案して、より合理的かつ有利な適用方法が開発されることが望まれる。

参考文献

- 1) Garrigues, G. , Granboulan, J. , Mazuo, J.(1991) : A Smart Product for Steel Structures Tapered Plates. Also called Longitudinally Profiled Plates, Association Francaiese pour la Construction, Contributions for the Symp. Of IABSE, Leningrad, USSR, 1991.
- 2) 板橋壮吉(1996) : 深沢川橋（日本道路公団）の省力化設計, 高田機工技報, No.12
- 3) 堀田毅, 工藤純一, 谷俊寛, 西村宣男(2000) : 鋼橋への LP 鋼板の適用, 橋梁と基礎, Vo.34, No.4, pp.11-14
- 4) 日本鋼構造協会(2000) : 合理化桁に関するデザインマニュアル, pp.231-254
- 5) 堀田毅, 西村宣男, 村上茂之, 滝英明(1996) : テーパープレートフランジ桁の耐荷力特性と設計法, 鋼構造年次論文報告集, 第 4 巻, pp.257-264
- 6) 堀田毅, 西村宣男, 村上茂之, 滝英明(1997) : テーパープレートを用いた I 断面桁の局部座屈設計法, 鋼構造年次論文報告集, 第 5 巻, pp.239-246
- 7) 村上茂之, 西村宣男, 堀田毅(1997) : 自由突出テーパプレートの圧縮強度, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.107-116
- 8) 奈良敬, 村上茂之, 都竹哲郎, 森脇幸次, 庄司眞(2002) : 圧延変厚鋼板をフランジに用いた鋼 I 桁の曲げ載荷試験, 鋼構造年次論文報告集, 第 10 巻, pp.181-188
- 9) 井川大裕, 吹田啓一郎, 多賀謙蔵, 田邊義和, 塚越治夫, 坂井悠佑(2012) : 変厚鋼板を梁フランジに用いた梁端溶接接合部の塑性変形能力と破断防止設計法, 鋼構造論文集, 第 19 巻, 第 75 号, pp.27-39
- 10) 永藤壽宮, 渡辺望, 良川賢斗(2014) : 有孔 LP 鋼板の極限強度解析, 長野工業高等専門学校紀要, 第 48 巻, pp.1-7
- 11) 亀井義典, 中村貴史, 秋山寿行, 高木優任, 西村宣男(2000) : 等厚部を省略した LP 鋼板の高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度試験, 構造工学論文集 46A, pp.1241-1250
- 12) 上野谷実, 中村雅樹, 佐屋裕之, 福本嘯士, 山本定弘(2003) : 板厚テーパ補剛板を用いた箱形断面柱の繰返し性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.115-125
- 13) 熊野拓志, 青木徹彦, 塚本芳正, K.A.S. SUSANTHA(2005) : テーパー鋼板 (LP 鋼板) を有する鋼製橋脚の強度と変形性能に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.794, I-72, pp.267-280.
- 14) 高久達将, 福本嘯士, 青木徹彦, K.A.S. SUSANTHA(2005) : LP 鋼材を用いた鋼製橋脚の耐震性能と耐震設計法, 橋梁と基礎 39(2), 56-62, 2005-02
- 15) 熊野拓志, 鈴木康夫, 北原武嗣, 杉浦邦征, 山口隆司(2009) : テーパー鋼板およびそれを用いた箱桁の初期不整に関する実測と考察, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.977-984
- 16) 奈良敬, 簗島茂樹(1997) : 変厚鋼板を腹板に用いた鋼桁断面の極限曲げ強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 5 巻, pp.255-260
- 17) 杉浦邦征, 山口隆司, 熊野拓志, 渡邊英一(2005) : 板幅方向にテーパを有する鋼製周辺単純支持版の圧縮強度と変形能, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.231-239

- 18) 鈴木康夫, 山口隆司, 熊野拓志, 杉浦 邦征, 渡邊 英一(2006): 板幅方向にテーパーを有する鋼製自由突出板の圧縮強度と変形能, 土木学会論文集 A, 62 巻 3 号, pp.531-542
- 19) 熊野拓志, 山口隆司, 杉浦邦征, 鈴木康夫, 橋本国太郎(2008): 軸方向および幅方向テーパー鋼板の圧縮強度評価方法の一提案, 鋼構造論文集, 第 15 巻, 第 57 号, pp.87-102
- 20) 橋本国太郎, 山口隆司, 大塚浩介, 杉浦邦征, 鈴木康夫, 熊野拓志(2009): 幅方向テーパー鋼板を腹板に用いた鋼 I 桁の曲げおよびせん断挙動, 構造工学論文集, Vol55A, pp.144-153
- 21) 橋本国太郎, 杉浦邦征, 山口隆司, 熊野拓志(2011): 幅方向テーパー鋼板を用いた箱型断面鋼製橋脚の耐震性能に関する研究, 土木学会論文集 A1, 67 巻 1 号, pp.177-192

4.5 極厚鋼板

(1) 開発経緯

どの程度の板厚を極厚と考えるかは, 分野によって異なると思われる. 道路橋では, H8 年版の道路橋示方書までは鋼橋に適用可能な鋼板の板厚は 50mm までに制限されていたため, ここでは板厚 50mm を超えるものを極厚鋼板と考えることとする.

1970 年代には, 原子炉圧力容器に用いるための極厚低合金鋼板が製造されていた [中尾仁二ら, 1976; 小野寺真作, 1981]¹⁾・²⁾. 1980 年代初めには, 深海船用耐力 900MPa 級極厚強靱鋼に関する報告 [森山康ら, 1982]³⁾ もある. その時期, 極厚鋼板の溶接金属横割れ防止を目的とした中間焼なましを省略できる溶接施工法の開発 [伊藤慶典ら, 1979]⁴⁾ などが行われている.

道路橋については, 1996 年の道示改定で使用可能な板厚が 100mm までに拡大されて以降, 少数主桁橋 [増田博次ら, 1998; 望月秀次ら, 2000 など]⁵⁾・⁶⁾ を中心に, 橋脚 [佐々木昇ら, 1998]⁷⁾ やアーチ橋 [長坂康史ら, 2008]⁸⁾ を含め多くの橋梁で極厚鋼板が用いられている. しかし, 1974 年に供用を開始した港大橋には, すでに最大 75mm の HT80 鋼材が利用されている. 吊橋主塔のベースプレートには, 以前から板厚が 100mm を超える鋼板も利用されている.

近年も, 各社で高性能な厚板を製造するための技術が開発されている [岡山豊ら, 2004; 遠藤茂ら, 2014]⁹⁾・¹⁰⁾.

(2) これまでの研究事例

1980 年代に, 原子炉用超厚鋼板のき裂伝ば停止じん性 [酒井譲ら, 1981]¹¹⁾, 極厚鋼板の靱性に及ぼす Al と N の影響 [菊竹哲夫ら, 1988]¹²⁾ などが研究されている. 1990 年代には, 海洋構造物のジャッキアップリグのラックに使用するため, 50~150mm 厚の 780MPa 級鋼について母材と再現 HAZ の強度・靱性に及ぼす Ti, N の影響 [長谷川俊永ら, 1997]¹³⁾ が研究されている.

1996 年に道示で適用可能板厚が 100mm に拡大されてからは, すみ肉溶接サイズ基準 [南邦明ら, 2005]¹⁴⁾ が検討されたり, 実際に極厚鋼板を用いてはいないものの, 極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ崩壊形式と変形能 [入川充夫ら, 2009]¹⁵⁾ や変形能と断面区分 [川見周平ら, 2010]¹⁶⁾ が研究されたりしている.

極厚鋼板の材料特性と残留応力およびその静的強度への影響 [藤井堅ら 2010]¹⁷⁾, 極厚フランジを有する鋼 I 桁の溶接残留応力の計測方法の提案と終局曲げ耐力に与える影響 [宮下剛ら, 2012]¹⁸⁾ も報告されている. 高力ボルト継手 [山口隆司ら, 2010; 南邦明ら, 2019]¹⁹⁾・²⁰⁾ に関する研究もある.

造船分野では近年, ぜい性き裂伝播停止挙動に関する研究が多く実施されており, T 継手部の脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす未溶着寸法の影響 [半田恒久ら, 2008]²¹⁾, 長大脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす荷重負荷点間距離の影響 [半田恒久ら, 2012]²²⁾, 板厚方向組織制御と脆性き裂伝播停止挙動 [津山青史ら, 2012]²³⁾, 長大脆性亀裂伝播停止挙動に及ぼす板厚方向靱性分布の影響 [半田恒久ら, 2016]²⁴⁾ などが検討されている. また, 小型引張試験片で極厚鋼板およびその溶接継手部の破壊靱性値を評価しようという試み [勝田順一ら, 2019]²⁵⁾ も行われている.

(3) 今後の展望

板厚 50mm を超える鋼板は既に様々な構造物に一般的に利用されている。今後は、近年造船分野で実用化が進んでいるアレスト鋼のように、ぜい性破壊などに対する安全性を向上させるとともに、より高付加価値を付けた鋼材とその利用技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 中尾仁二, 山場暁太, 青木至, 川合亜之, 間淵秀里, 高石昭吾(1976): 極厚低合金鋼板の圧延と熱処理, 鉄と鋼, 62 巻 13 号, pp.1708-1719
- 2) 小野寺真作(1981): 原子力圧力容器用鋼材, 鉄と鋼, 67 巻 7 号, pp.880-890
- 3) 森山康, 吉村博文, 加来勝夫(1982): 深海船用耐力 900MPa 級極厚強靱鋼, 鉄と鋼, 68 巻 13 号, pp.1823-1829
- 4) 伊藤慶典, 中西睦夫, 勝本憲夫, 小溝裕一, 瀬田一郎(1979): 極厚鋼板の溶接金属横割れ防止について—中間焼なましを省略できる溶接施工法の開発—, 圧力技術, 17 巻 1 号, pp.20-27
- 5) 増田博次, 横山弘則, 内田修平, 塩田圭三, 岩崎祐次, 本摩敦(1998): 第二東名自動車道 東海大府高架橋(鋼上部工) 工事の設計・工場製作・現場施工, 川田技報, Vol.17, pp.62-68
- 6) 望月秀次, 築山有, 成瀬隆弘, 雨森慶一, 中嶋浩之(2000): 宿茂高架橋の計画・設計, 橋梁と基礎, Vol.34, No.4, pp.25-32
- 7) 佐々木昇, 鴨井祥昭, 石川貴雄(1998): 極厚 SM570 材を用いた小半径曲げ加工部を有する橋脚の製作 駒井技報, Vol.17, pp.28-37
- 8) 長坂康史, 鶴飼昌一, 北村正見(2008): 新桜宮橋の製作と架設～全断面現場溶接による下路式ローゼ橋の施工について～, 川田技報, Vol.27, pp.36-41
- 9) 岡山豊, 川副文宏, 安洋二, 梅木進, 原賢一, 加藤久詞, 上島良之, 星野学(2004): 新型鑄造設備による高品質極厚鋼板の製造, 新日鉄技報, 第 380 号, pp.50-56
- 10) 遠藤茂, 中田直樹(2014): JFE スチールの TMCP 技術の進歩とそれによる高性能厚板, JFE 技報 No.33, pp.1-6
- 11) 酒井譲, 小倉信和, 安藤柱, 安藤良夫(1981): 原子炉用超厚鋼板のき裂伝ば停止じん性に関する研究 圧力技術, 19 巻 2 号 98-109
- 12) 菊竹哲夫, 徳永良邦, 中尾仁二, 伊藤亀太郎, 高石昭吾(1988): 極厚鋼板の靱性に及ぼす Al と N の影響, 鉄と鋼, 74 巻 5 号 847-854
- 13) 長谷川俊永, 富田幸男(1997): 780MPa 級鋼の母材と再現 HAZ の強度・靱性に及ぼす Ti,N の影響, 鉄と鋼, 83 巻 3 号 221-226
- 14) 南邦明, 糟谷正, 三木千壽(2005): 道路橋示方書におけるすみ肉溶接サイズ基準の考察, 溶接学会論文集, 23 巻 3 号, pp.422-430
- 15) 入川充夫, 藤井堅, 川見周平, 南鉄木(2009): 極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ崩壊形式と変形能 構造工学論文集, Vol.55A, pp.134-143
- 16) 川見周平, 藤井堅(2010): 極厚フランジを有するプレートガーダーの変形能と断面区分, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.135-144
- 17) 藤井堅, 石川晋介, 中茂泰則, 田中雅人(2010): 極厚鋼板の材料特性と残留応力およびその静的強度への影響, 土木学会論文集 A, 66 巻 2 号, pp.253-263
- 18) 宮下剛, 稲葉尚文, 平山繁幸, 劉翠平, 長井正嗣(2012): 極厚フランジを有する鋼 I 桁の溶接残留応力の計測方法の提案と終局曲げ耐力に与える影響, 土木学会論文集 A1, 68 巻 2 号, pp.465-480
- 19) 山口隆司, 彭雪, 鈴木康夫, 宮尾修平(2010): 極厚鋼板を対象とした多列高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 17 巻 66 号, pp.23-33
- 20) 南邦明, 横山秀喜, 斉藤雅充, 村上貴紀(2019): 厚膜型無機ジンクリッチペイントを施し 15%増

し締めした高力ボルト継手に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文集 A1, 75 巻 2 号, pp.127-140

- 21) 半田恒久, 鈴木伸一, 木治昇, 豊田昌信, 宮田隆司(2008): T 継手部の脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす未溶着寸法の影響, 溶接学会論文集, 26 巻 2 号, pp.124-130
- 22) 半田恒久, 伊木聡, 遠藤茂, 津山青史, 潮海弘資(2012): 長大脆性き裂伝播停止挙動に及ぼす荷重負荷点間距離の影響, 溶接学会論文集, 30 巻 3 号, pp.213-219
- 23) 津山青史, 竹内佳子, 西村公宏, 半田恒久(2012): 造船用厚肉鋼材の板厚方向組織制御と脆性き裂伝播停止挙動, 溶接学会論文集, 30 巻 2 号, pp.188-195
- 24) 半田恒久, 伊木聡, 大井健次, 西村公宏, 田近久和, 田川哲哉, 津山青史(2016): 造船用厚肉鋼板の長大脆性亀裂伝播停止挙動に及ぼす板厚方向靱性分布の影響, 溶接学会論文集, 34 巻 4 号, pp.211-217
- 25) 勝田順一, 賈子萌, 山本元道, 谷野忠和, 矢島浩(2019): 極厚鋼板およびその溶接継手部の小型引張試験片による破壊靱性値評価に関する一考察, 圧力技術, 57 巻 4 号, pp.201-211