

連携記事

橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS) の材料特性と実構造物への適用

Material Characteristics of Steels for Bridge High-Performance Structures (SBHS) and its Applications for Actual Bridge Structures

日本製鉄 (株) 高木優任
 建材開発技術部 橋梁開発技術室長 博士 (工学) Masahide Takagi

日本製鉄 (株) 壺岐 浩
 厚板技術部 厚板商品技術室 上席主幹 Hiroshi Iki

1 はじめに

橋梁用高降伏点鋼板 SBHS (Steels for Bridge High-performance Structures) は、鋼橋の経済設計や製作の効率化等に寄与しうる高性能な鋼材として産学連携で検討・実用化された鋼材である。橋梁分野では、鋼材の製造及び利用に関する技術の進歩に伴い、強度、破壊じん性、溶接性、加工性、耐候性などの諸性能を従来の鋼材よりも高めた「高性能鋼」の利用が推進されてきた。近年の構造用鋼材では、熱加工制御技術の進歩によって結晶組織の微細化などの制御が可能となり、鋼材の高強度化、破壊じん性の向上といった機械的性質の改善に加え、合金元素の添加量の低減による溶接性の改善など、鋼材性能の顕著な進歩がもたらされている。SBHS は、それらを最大限活用することで橋梁の高性能化を図ることを目的に、橋梁への適用という観点から鋼材に求められる特性を適切なレベルに高めた材料である。

本文では、橋梁向けの高性能鋼である SBHS 開発の経緯を振り返るとともに、その材料特性と実構造物への適用事例、ならびに諸特性の製造実績について紹介する。

2 橋梁用高降伏点鋼板 SBHS の概要

2.1 SBHS の開発経緯

SBHS の開発経緯を表1に示す。橋梁用高性能鋼は、米国での橋梁向けの High Performance Steel の開発に刺激を受け、東京工業大学の創造プロジェクト研究体 (代表：三木千壽教授 (当時)) において、鉄鋼メーカー、橋梁メーカー参画のもと、産学連携プロジェクトとして1994年に発足した「高性能鋼の利用技術研究会」にて検討が開始されたものがそのルーツである。研究会では、橋梁の性能を高めるために鋼材へ要求される性能やそれを受けて鋼材が備えるべき材料特性についての検討が行われ、その成果として橋梁用高性能鋼

表1 SBHS の開発経緯

年	できごと
1994~2000	「高性能鋼の利用技術研究会」における橋梁用高性能鋼(BHS)の概念提案
2003	橋梁用高性能鋼材(BHS500, 700)の提案
2004	NETIS 登録 (橋梁用高性能鋼材(BHS 鋼))
2005	BHS500, 500W, 700W(社日本鉄鋼連盟製品規定)設定
2006	臨海中央橋に約 1,200 トン初適用
2007	東京ゲートブリッジに約 16,100 トン適用
2008	SBHS500, 500W, 700, 700W 鋼材 JIS 規格公示
2010	鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物改訂 永田橋に約600トンJIS化後初採用
2011	SBHS400,400WがJISに追加
2011~	設計・施工に関する技術の蓄積とともに、多様な橋梁形式への適用が進む
2017	道路橋示方書(平成 29 年版)に SBHS400(W), SBHS500(W)が規定される

BHS (Bridge High-performance Steel) が提案された¹⁾。

研究会での高性能鋼の提案を受け、実橋梁への適用を意識して、2005年に日本鉄鋼連盟製品規定としてBHS (BHS500 (W)、BHS700W) が規格化され、東京ゲートブリッジなどへの適用検討が開始された。SBHSは、このBHSをベースとしてJIS規格化した鋼材で、2008年にJIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS500 (W)、SBHS700 (W)) として制定された。一部相違はあるものの、その規格内容はBHSを踏襲したものとなっている。また、2011年の改正でBHSでは提案されていなかったSBHS400 (W) が追加されている。SBHSの規格の概要を表2に示す。橋梁用鋼材は従来引張強度保証下限値を用いた記号表示がなされてきた (例えば50キロ鋼はSM490Y) が、橋梁設計には降伏強度が用いられることを考慮してSBHSでは降伏強度保証下限値を用いた記号表示とされている (例えば50キロ鋼はSBHS400)。SBHSは降伏強度の保証下限値が400, 500, 700 N/mm²の3種類からなり、各鋼種に橋梁分野において維持管理コスト軽減への期待から普及の進んできた耐候性仕様 (強度表記の後にWを付与) を加えた計6種類の鋼材で構成されている。

SBHS (JIS化前のBHSを含む) は、その開発過程で東京ゲートブリッジ (写真1) など実工事への適用実績を積上げ、材料としての信頼性を明らかにすることで、その適用範囲を広げてきた²⁾。さらに、JIS化完了後の次のステップとして、鋼材の一般化をはかるため、設計基準への反映を進めてきた。その過程で、大学や関係機関の協力を得て、材料特性や

耐荷力、疲労強度等の強度特性、さらには溶接施工試験などの製작성に関するデータを蓄積して、その信頼性を示してきた。例えば、座屈強度の検討では、自由突出板や両縁支持板などの構造物を構成する板要素、柱や桁などの橋を構成する部材のそれぞれで、降伏比が高いことによる強度低下がないことなどを実証するため、部材製作時の初期不整の影響も考慮した系統的な実大規模の破壊実験を数年間かけて実施し、十分な安全性を有することを検証してきた^{3,4)}。その成果として、2017年に道路分野における橋梁の設計基準である道路橋示方書⁵⁾に具体的な設計手法が規定されるに至った。

技術基準に記載されたことにより、鋼材としてはその利用



写真1 東京ゲートブリッジ

表2 SBHSの規格概要 (JIS G 3140)

(a)機械的性質

種類の記号	板厚(mm)	降伏点または耐力(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	シャルピー吸収エネルギー	PCM
SBHS400	6 ≤ t ≤ 100	400 以上	490~640	√E ₀ ≥ 100J @圧延直角方向	0.22 以下
SBHS400W					
SBHS500		500 以上	570~720	√E ₅ ≥ 100J @圧延直角方向	0.20 以下
SBHS500W					
SBHS700	6 ≤ t ≤ 75	700 以上	780~970	√E ₋₄₀ ≥ 100J @圧延直角方向	0.30 以下 (6 ≤ t ≤ 50) 0.32 以下 (50 < t ≤ 75)
SBHS700W					

(b)化学成分

種類の記号	単位 %											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	N
SBHS400	0.15 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	—	—	—	—	—	—	0.006 以下
SBHS400W	0.15 以下	0.15~0.55	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	0.30~0.50	0.05~0.30	0.45~0.75	—	—	—	0.006 以下
SBHS500	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	—	—	—	—	—	—	0.006 以下
SBHS500W	0.11 以下	0.15~0.55	2.00 以下	0.020 以下	0.006 以下	0.30~0.50	0.05~0.30	0.45~0.75	—	—	—	0.006 以下
SBHS700	0.11 以下	0.55 以下	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	—	—	—	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下
SBHS700W	0.11 以下	0.15~0.55	2.00 以下	0.015 以下	0.006 以下	0.30~1.50	0.05~2.00	0.45~1.20	0.60 以下	0.05 以下	0.005 以下	0.006 以下

が一般化したと考えられる。今後はそのメリットを上手に活かし、その利用をさらに拡大していくことが課題であると認識している。

2.2 SBHSの規格内容

SBHSと従来の構造用鋼材 (SM) の主要な材料特性の比較を表3に示す。前述のようにSBHSは橋梁構造への適用を前提として、橋梁としての性能を高めるための要求性能に合わせ、鋼材自身が有する諸性能を高めている。要求性能を満足するための製造方法として、SBHSではその製造に熱加工制御 (TMCP) を適用することが標準とされ、金属組織の微細化によって高い降伏強度を確保しながら、添加する合金元素の量を抑制して溶接性の向上、優れたシャルピー吸収エネルギーの保証などを実現している。

以下に、橋梁用鋼材に対する要求性能とSBHSの特性の関係について述べる。

(1) 強度レベル

わが国の鋼橋の設計は伝統的に降伏強度を基準とする弾性設計 (許容応力度設計) が主流であり、降伏強度が高いことが鋼重削減につながり、経済的なメリットが大きい。しかし一方で、鋼材重量は降伏強度だけで決まるものではなく、たわみなどの剛性や疲労強度も考慮する必要があり、鋼重を削減できる強度には適切なレベルがある。鋼橋で一般的なI形の桁断面を有する鈹桁橋を対象とした試算によると、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500N/mm²程度を超えると、たわみ制限や疲労強度が断面決定を支配する要因となり、それ以上の高強度化は鋼重低減につながらないことが明らかにされている⁶⁾。また、吊橋や斜張橋のような大規模な橋梁については、橋梁自身の重量である死荷重の比率が大きく、その軽減が経済性に大きな影

響を及ぼす。例えば、世界最長のスパンを誇る橋梁である明石海峡大橋では引張強度780N/mm²クラスの鋼材が多く用いられている。これらを考慮して、SBHSではまず最初に、降伏強度を500N/mm²、700N/mm²としたSBHS500およびSBHS700の2種類が制定された。さらにその後、一般的な橋の合理化を最大限にはかるため、鋼橋で最も多く用いられているSM490Yの降伏強度を10~23%引き上げた降伏強度400N/mm²のSBHS400が追加されている。

一方で、橋梁の建設技術のトレンドとして、橋梁の大型化や部材製作の省力化が進展してきたのに伴い、橋梁に使用される鋼材は厚肉化してきた。例えば、道路橋示方書では、使用する板厚は従来50mmまでに制限されていたものが、1996 (平成8) 年に100mmまで使用可と緩和され、50mm以上の厚肉の鋼材の使用が一般的となった。しかし、ここで問題となるのが降伏強度で、従来の汎用鋼種 (SM) では板厚が厚くなるほど保証降伏点が低減されるため、板厚に応じて強度が変化することになり、設計の煩雑化を招いていた。このような設計の煩雑さを回避するため、板厚40mm以上の鋼板については降伏点一定鋼 (-Hと表記) として、板厚40mm以下の降伏強度を保証した鋼板が一般的には用いられている (図1)。このように現在では、板厚100mmまで一定の降伏強度を保証することが可能であるため、SBHSでは板厚によらず降伏強度は一定の値を保証している。

(2) シャルピー吸収エネルギー

ぜい性破壊を防止し、構造物全体の信頼性向上を図るためには、鋼材は高いじん性を有することが求められる。一般に、厚板の強度や伸びについては圧延方向と圧延直角方向で大きな違いはないとされているが、シャルピー吸収エネルギーは圧延方向に比べ圧延直角方向が低下する傾向にある。このため、道路橋示方書では橋梁部材の製作においては主たる応力

表3 SBHSと従来鋼との主な性能の比較 (板厚50mmの場合)

		490N/mm ² 級鋼		570N/mm ² 級鋼		780N/mm ² 級鋼	
		SBHS400 SBHS400W	従来鋼 (SM490Y /SMA490W)	SBHS500 SBHS500W	従来鋼 (SM570 /SMA570W)	SBHS700 SBHS700W	従来鋼 (HT780*)
強度	降伏点 (N/mm ²)	≥400	≥335	≥500	≥430	≥700	≥685
	降伏点 一定	○ (6-100mm)	△ (≥40mm)	○ (6-100mm)	△ (≥40mm)	○ (6-75mm)	△ (≥40mm)
加工性 溶接性	高じん性	○ (100J@0°C: 圧 延直角方向)	△ (47J@0°C: 圧 延方向)	○ (100J@-5°C: 圧 延直角方向)	△ (47J@-5°C: 圧 延方向)	○ (100J@-40°C: 圧 延直角方向)	△ (47J@0°C: 圧 延方向)
	予熱低減	○ (予熱なし)	△ (≥80°C)	○ (予熱なし)	△ (≥80°C)	○ (≥50°C)	△ (≥100°C)
耐食性	耐候性	○ (SBHS400W)	○ (SMA490W)	○ (SBHS500W)	○ (SMA570W)	○ (SBHS700W)	-

○: 通常仕様で対応, △: 通常仕様では未対応

*: HBS G 3102

の方向と鋼材の圧延方向を一致させるのを原則としている。SBHSでは、じん性が低下する圧延直角方向に対し、100J以上と従来 (27Jまたは47J以上) よりも高いシャルピー吸収エネルギーを保証しており、圧延直角方向に対しても材料の信頼性が高い。このため、応力の方向を圧延方向と一致させる必要がなくなり、部材の板取りを自由にできる (図2)。さらには、トラス橋やアーチ橋で部材が交差する格点などの多方向から力が作用する部材についても、圧延方向、圧延直角方向のどちらに対してもその信頼性が保証されていることになるので、SBHSの適用により構造物としての信頼性は大きく向上する。

なお、SBHSで保証している100J以上という高いシャルピー吸収エネルギーは、鋼板の冷間曲げ加工に対する信頼性の向上などを目的に設定されたものであり、JISの解説⁷⁾にもその旨の記載がある。一般に、溶接部のシャルピー吸収エネルギーは母材よりも低下するため、溶接部で所要のじん性を確保することが重要である。橋梁の場合、溶接部のシャルピー吸収エネルギーは従来の実績等から47Jを確保すれば十分であると考えられるため、SBHSを使用した場合でも溶接部への要求値は47J以上 (試験温度は鋼種により異なる) とされており、母材のような高いじん性は求められていない。

(3) 溶接性

橋梁では部材の組み立てに溶接が不可欠であるため、橋梁用鋼材の溶接施工性の向上は、製作における効率化の観点で

重要である。特に従来のSM570以上の高強度鋼や拘束の強い厚肉の鋼板の溶接では低温割れの抑制対策として予熱を必要としており、製作効率低下の要因のひとつとなっていた。道路橋示方書では、平成8年から式 (1) に示す溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) を指標とする予熱温度の算定基準が採用されている。このため、SBHSでは、高強度と溶接性を両立させるためにP_{CM}を低く抑えることにより、予熱の省略または軽減を図っている (図3)。

$$P_{CM} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{20} + 5B (\%) \dots\dots\dots (1)$$

また、厚肉の鋼板の溶接施工の合理化には1パスあたりの入熱量を増やし、パス数の削減を図ることも有効である。SM570の溶接入熱の許容値 (7kJ/mm) はSM490Yなどの汎用鋼種 (10kJ/mm) よりも低く抑えられており、製作の効率化の妨げとなることがある。SBHSでは、SBHS400はもちろんのこと、SM570に相当するSBHS500においても溶接の入熱量は10kJ/mmまで許容される。また、降伏強度や引張強度などの強度やじん性の確保、溶接割れの防止など、溶接部の性能を確保するためには、溶接材料も重要な要素であるが、SBHSの母材特性に合わせた専用の溶接材料の開発も鋼板の開発と同時に進められており、溶接材料のJIS改正に合わせてJIS化されている⁸⁾。

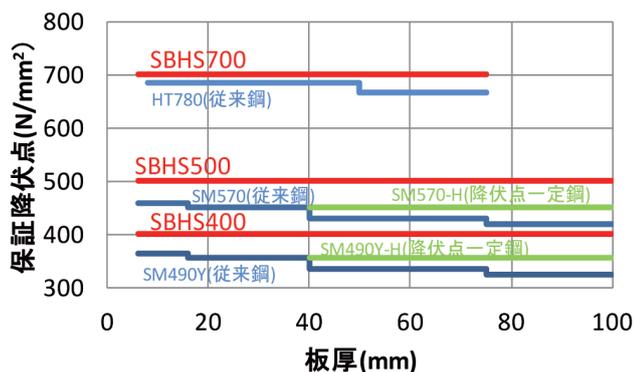


図1 鋼種ごとの板厚と保証降伏点の関係

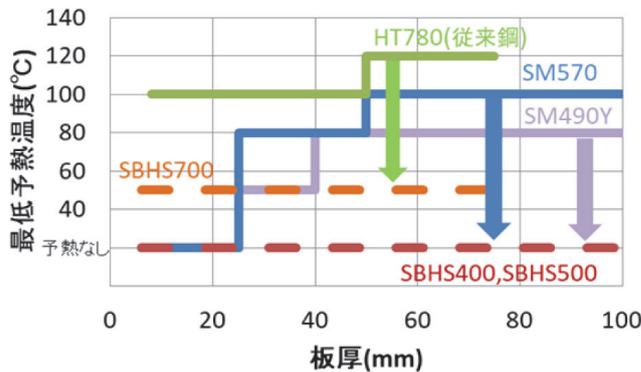


図3 SBHSによる予熱温度の低減

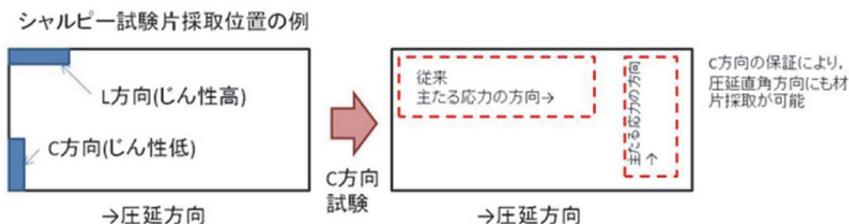


図2 板取りの方向の例

これらの溶接に対する性能を有するSBHS400、SBHS500は従来の汎用鋼種であるSM490Yと同等以上の優れた溶接性を有する鋼板であるといえる。製作性の向上を確認するため、SBHSを用いた実大のI桁の製作試験⁹⁾も行われており、橋梁製作における良好な溶接性が実証されている。

(4) 耐候性

耐候性鋼はある特定の合金元素の添加により、ち密なさびを形成して鋼材表面を保護し、腐食速度を抑制する鋼材である。近年では、わが国のインフラストックの高齢化を受けて、ライフサイクルコストの低減や維持管理の手間を最小化するミニマムメンテナンス橋に関する意識が高まってきており、この観点から塗装省略による維持管理の負担減を目指して、耐候性鋼を適用した橋梁が増加してきている¹⁰⁾。

溶接構造用の無塗装仕様の耐候性鋼はJIS G 3114にSMAのW種として規定されており、耐候性の向上に有効、かつ溶接性を損なわない元素であるCu、Cr、Niの添加量が規定されている。橋梁分野では、その利用は一般化しているが、適用できる環境や構造詳細に各種の制約があり、塩分濃度の高い環境や水が滞留するような湿潤環境では効果が期待できないため、適用にあたっては鋼道路橋防食便覧¹¹⁾などの技術基準に従って適切に利用する必要がある。

耐候性鋼の耐食性能は添加する合金元素の成分系によって決まるといえるが、SBHSでは耐候性鋼(W)仕様として、SMA-W程度の耐候性を付与することを目的に、Cu、Cr、Niの添加量が規定されている。なお、SBHSのJIS付属書では、各合金元素の添加量から耐候性の程度を計算できる耐候性合金指標(*v*値)¹²⁾が参考として記載されている。

(5) その他特性

SBHSでは、製鋼技術の進展による不純物(S、N)の低減も規格に盛り込まれ、構造物の信頼性向上に寄与している。

橋梁部材においては、板厚方向に力を受ける溶接継手も存在し、鋼板の表面に平行な割れの発生を防止する耐ラメラテア性など、厚さ方向特性に配慮しなければならない場合がある。SBHSでは、耐ラメラテア特性に影響する硫黄(S)含有量を0.006%以下と規定している。これは、厚さ方向特性としてJIS G 3199の最高レベルである厚さ方向絞り値Z35に相当するものである。

また、窒素(N)は冷間曲げ加工におけるひずみ時効硬化によるじん性の低下に影響するとされており、SBHSでは、その含有量はじん性低下への影響がないとされる0.006%以下に規制されている。

ただし、これらの性能は、厚さ方向の絞り値による耐ラメラテア性や、厳しい冷間曲げ加工後もじん性が所定の値を確保できることを保証するものではなく、そのような性能を求める場合には別途試験などを行い、性能を確認する必要がある。性能の保証が必要な場合は、道路橋示方書などの技術基準に示されている耐ラメラテア性や強冷間曲げ加工に対する特殊仕様を適用する必要があることに注意しなければならない。

3 実構造物への適用

SBHSの橋梁への主要な適用実績を表4に示す。JIS化前のBHSを適用した臨海中央橋、東京ゲートブリッジを皮切りとして、2008年のJIS化以降、自治体や高速道路会社向けに着

表4 SBHSの主要実績

	鋼材発注	橋名	構造形式	発注者	鋼種	最大板厚
1	2006	臨海中央橋	鋼床版箱桁	東京都	BHS 500	59mm
2	2006-2009	東京ゲートブリッジ	トラス・ボックス複合橋	国土交通省 関東地方整備局	BHS 500	50mm
3	2009	永田橋	スペーストラス	東京都	SBHS 500	67mm
4	2011	まご橋	箱桁	東京都	SBHS 500	50mm
5	2012	太田川大橋	複合アーチ	広島市	SBHS 500	67mm
6	2012	新名神／高槻JCT	橋脚(隅角部)	西日本高速道路	SBHS 500	57mm
7	2012	朝明川橋	複合アーチ	中日本高速道路	SBHS 500	86mm
8	2012	築地大橋	アーチ	東京都	SBHS 500	80mm
9	2014	沼田原橋	ラーメン	十津川村(奈良県)	SBHS 500W SBHS400W	27mm
10	2015-2017	横浜北西線港北地区	箱桁	首都高速道路	SBHS500	86mm
11	2016-2017	東西水路横断橋(仮称)	アーチ	東京都	SBHS500	50mm
12	2016	杭瀬川橋	鋼床版箱桁	国土交通省 中部地方整備局	SBHS400	16mm
13	2018-2019	羽田連絡道路橋梁部(仮称)	鋼床版箱桁	東京都・川崎市	SBHS500 SBHS500-CORSPACE	94mm

実に実績が積み上げられてきた。当初は強度、溶接性、冷間曲げ加工性などの特性が活かしやすい、トラス、アーチなどの大規模な橋梁での適用実績が多い。

例えば、東京ゲートブリッジでは、現地ヤードでの現場溶接による大ブロックの組み立て (写真2) と一括架設が採用され、SBHSの適用により大幅なコスト縮減が図られたと報告されている¹³⁾。その後の東京都・築地大橋の架設でも大ブロックの一括架設 (写真3) が採用され、大規模橋梁への適用では、SBHSの良好な溶接性を活かして施工工期の短縮などの大きな効果が得られている。現在建設中の東京都・東西水路横断橋 (仮称) (写真4) でも、現地での大ブロックの組み立てと一括架設が採用されており、その経験が活かされている。このような事例の積み重ねにより、SBHSは大規模な橋でのコスト縮減に有効であるとのイメージが形成されるようになった。

その一方で、SBHSは高強度化と製作性の向上による鈹桁や箱桁などの中小スパン橋の経済性向上を主目的に開発された鋼材であり、一般の桁橋でもコスト縮減を図ることができるとの試算¹⁴⁾や桁橋での採用実績もある。多様な橋梁形式への適用が進んできたことに加え、2017年に道路橋示方書の使用材料として規定され、その利用が公に認められた形になったことから、今後は一般的な橋梁での採用が増大していくはずであり、本格的な普及期を迎えると予想される。

4 SBHSの材料性能の実績

表4に示した実橋梁への適用に際し、各種の鋼材特性に関する調査、試験が行われている。以下では、それらについて紹介する。



写真2 東京ゲートブリッジでの大ブロックのヤード組立

4.1 機械的特性

国内で初めてSBHS (適用当時はBHS) を使用した橋梁である臨海中央橋、東京ゲートブリッジへの適用に際してのBHS500の製造実績から、板厚8~59mmの約1500枚におよぶ鋼板の機械的特性に関するデータが収集¹⁵⁾されている。降伏強度ならびにシャルピー吸収エネルギーの製造実績値の分布を図4に示す。

降伏強度に関しては、平均値が規格保証値の約1.15倍程度でばらつきも小さく、安定した強度が確保されている。また、じん性についても、平均値で262Jと規格下限 (100J) に対して十分高い値が確保されており、ばらつきの大きさを考慮しても圧延直角方向で100J以上という厳しい要求に十分にこたえられることが確認されている。

また最近では、板厚50 mm を超える厚肉のSBHS 500 が使用される例も増加している。新名神高速道路の朝明川橋や東京都の築地大橋 (いずれもアーチ橋) では、50 mm を超える板厚が約半数を占め、朝明川橋では最大板厚86 mm、築地大橋では最大板厚80 mmのSBHS 500 が使用された¹⁶⁾。図5に



写真3 築地大橋での大ブロック一括架設

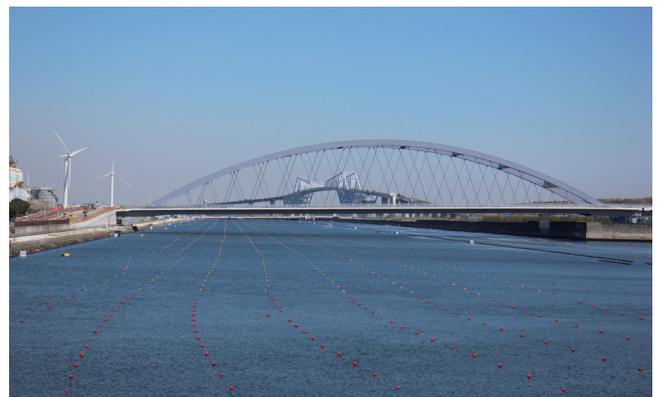


写真4 東西水路横断橋 (仮称)

築地大橋向けのSBHS 500 の降伏強度ならびに規格下限値を SM 570 の規格下限値と併せて示す。SBHSは板厚に関わらず一定の降伏強度を保証していることが特長の一つであるが、この製造実績から、板厚によらず安定した降伏強度が得られていることがわかる。

4.2 溶接性

良好な溶接性はSBHSの大きなアピールポイントであり、それをうまく活用すればコストを大幅に低減できる。東京ゲートブリッジでは、現場溶接によるヤードでの橋体の大ブロックの地組立が行われ、溶接性は施工の省力化と工期短縮を図る上での重要な指標であった。

臨海中央橋、東京ゲートブリッジでの鋼板の製造実績における化学成分の例および P_{CM} の分布を表5、図6にそれぞれ示す¹⁵⁾。各合金元素の化学成分は規格値の中に納まってお

り、なおかつ P_{CM} は予熱が不要となるレベルに抑えられている。 P_{CM} の実績の統計データにおいても、当然のことながら規格値をすべて下回っており、十分な性能を有していることが確認できる。実際の施工においても予熱なしの施工が可能になり¹⁷⁾、現場溶接の効率化に大いに貢献したと評価されている。

なお、SBHSの溶接性に関しては、橋梁メーカー各社において溶接施工試験がなされ、多くのデータが蓄積されている。

4.3 特殊仕様（強冷間曲げ加工、大入熱溶接）

SBHSでは、その高い性能を活かすべく、特殊な仕様が求められる橋梁での採用実績も多い。以下では、基本仕様を超える特殊な仕様が求められた事例について、その例を示す。

日本初のスペーストラス形式が採用された東京都の永田橋（写真5）では、SBHS500がJIS化後初めて採用された。強冷間曲げ加工（内側曲げ半径 $R=5t$ ）で製作された鋼管（最大板厚67mm、鋼管径800mm）を用いて現場溶接でトラスの骨組みの組み立てが行われた。このため、鋼材には、高強度であるとともに製作の効率化を図るため、良曲げ加工性と良溶接性が求められた。

鋼材を冷間加工すると加工後のひずみ時効によりじん性が劣化することが知られている。道路橋示方書では、構造物にぜい性破壊が生じないように、冷間曲げ加工後においても所定のじん性を確保することが求められており、曲げ加工後のじん性の低下を見込んで内側曲げ半径を板厚の5倍とする場合は200J以上、内側曲げ半径を板厚の7倍とする場合は150J

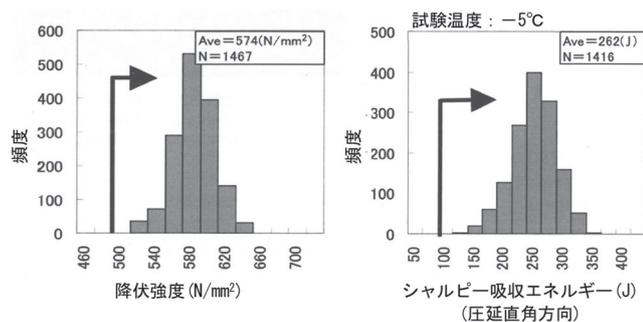


図4 製造実績

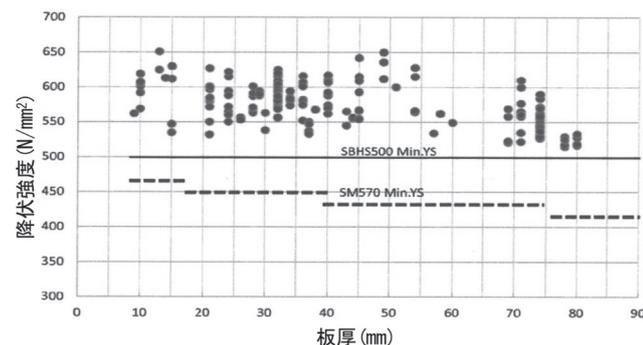


図5 築地大橋向けSBHS500の降伏点の実績

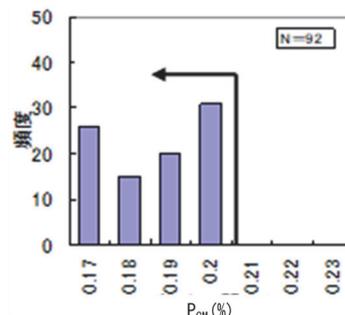


図6 P_{CM} の製造実績

表5 BHS500の化学成分の実績例

	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	N	P_{CM}
規格	≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.006	≤ 0.006	≤ 0.20
実績 (レードル分析値)	0.09	0.30	1.58	0.011	0.003	0.003	0.19

以上の吸収エネルギーを有し、ひずみ時効に影響する窒素 (N) の量を0.006%以下とすることが規定されている。永田橋の鋼管製作においては、表6に示すように、曲げ半径5tに相当する塑性ひずみ10%を与え、時効処理 (250℃×1Hr) を施した鋼材のシャルピー衝撃試験を実施し、冷間加工後も必要な特性を十分に満足することが確認されている。

また、永田橋の鋼管製作ではSBHS500に対して11 kJ/mmの大入熱溶接 (前述の通り従来のSM 570では7 kJ/mmの制限がある) が適用された。図7に、永田橋の鋼管の製作を想定した大入熱の潜弧溶接 (SAW) による溶接継手のシャルピー吸収エネルギーの例を示す。11 kJ/mmの大入熱溶接を行っても、永田橋の継手じん性の要求値である47 Jを満足していることがわかる。

このように、永田橋の建設では、SBHS500の適用により、板厚が削減されることによる溶接パス数の削減と、トラス骨組みの組み立て時の現場溶接の予熱省略によって、複雑な構造部材の製作が大幅に省力化された¹⁸⁾。



写真5 東京都・永田橋

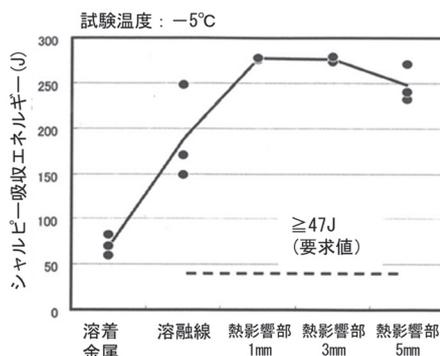


図7 大入熱溶接 (SAW) 継手のシャルピー吸収エネルギー

5 おわりに

建設コストの縮減、ならびに構造物の信頼性の向上をはかることで、橋梁の高性能化を推進することを目指して開発された高性能鋼SBHSについて、その開発の経緯と規格の内容を示し、実構造物への適用と鋼材特性の実績について紹介した。

本文では主として鋼材特性の観点からSBHSについて述べてきたが、それ以外にも様々なメリットが期待できる。例えば、鋼種の集約などもその一つである。現在、橋梁分野では、鋼種によりSS, SM、強度により400, 490, 490Y, 520, 570や-H、じん性によりA, B, Cなど多くの仕様があり、これらを組み合わせた約30種類の鋼材が使用されている。SBHSの導入により、橋に使われる溶接構造用の厚板は基本的にSM400, SBHS400, SBHS500の3種類でほぼ対応できることになるので、使用する鋼材の種類が大幅に削減される。これにより設計・製作・施工の各段階で鋼材の選択・管理に関する負荷の軽減が期待される。

SBHSは従来から橋梁に使用されてきた鋼材を、基本的にはその規格の範囲内で橋梁用として必要な性能に関して高性能鋼化したものであり、いわばベースとしての鋼材性能を高性能化したものといえる。必要があればJIS規格で保証されるSBHSの性能に加えて、さらに高い性能を付与することも可能である。例えば、近年は維持管理への関心の高まりから、防食の維持管理の手間を軽減することに対する関心が高まってきている。これに呼応して、塗装の塗り替え周期を延ばす

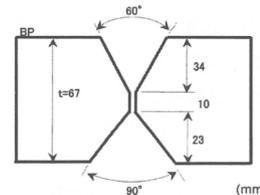
表6 SBHS500の塑性ひずみ加工によるシャルピー吸収エネルギーの変化の例

板厚 (mm)	予ひずみ (%)	シャルピー吸収エネルギー		
		試験片採取方向	v E(J)	試験温度
67	なし	圧延直角方向	255	-5℃
	10		185	

入熱量: 11kJ/mm(SAW)

板厚: 67mm (SBHS500)

開先形状:



ことを目的として、錫 (Sn) を微量添加した CORSPACE® などが最近開発されている¹⁹⁾。SBHSでもこの仕様が付与された事例 (表4参照) も出てきている。このようにSBHSの有する性能に止まらず、さらに高性能な鋼材が求められていくことは橋梁技術が進展していく上では必要なことであり、SBHSにはまだ、さらなる高性能化の余地が残されている。

国土強靱化、持続可能な社会基盤の構築、質の高いインフラ輸出による国際貢献など、橋梁に求められる役割は複雑化・高度化・多様化しているが、SBHSの有する高性能を活かし、橋梁全体での経済性、ならびに信頼性の向上を図っていくことは、今後の橋梁整備に求められるトレンドに合致するものであると筆者らは考える。SBHSの利用拡大を通して、国土の強靱化、安全・安心な社会の構築、日本の橋梁技術の国際競争力強化などに寄与していきたい。

参考文献

- 1) 三木千壽, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 土木学会論文集, No.738/I-64, (2003), 1.
- 2) 土木学会 新しい高性能鋼と利用技術調査研究小委員会: 新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書~SBHS500 (W), SBHS700 (W) の設計・施工ガイドライン (案) ~, (2009)
- 3) 野阪克義, 奥井義昭, 小室雅人, 宮下剛, 野上邦栄, 長井正嗣: 構造工学論文集, 59A (2013), 70.
- 4) 高木優任: 土木学会誌, 103 (2018) 5, 16.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋・鋼部材編, (2017)
- 6) 小西拓洋, 高橋和也, 三木千壽: 土木学会論文集, No. 654/I-52, (2000), 91.
- 7) 日本規格協会: JIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板, (2011)
- 8) 日本橋梁建設協会: 現場溶接施工管理の手引き (改訂版), (2013)
- 9) 安藤隆一, 田中睦人, 松田譲, 岡野重雄: 土木学会第61回年次学術講演会, I-143~I-145, (2006), 285.
- 10) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼橋梁実績資料集, 第24版, (2019)
- 11) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, (2014)
- 12) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 土木学会論文集, No.738, I-64, (2003), 271.
- 13) 森永真朗, 磯上知良, 千葉照男: 橋梁と基礎, 42 (2008) 9, 45.
- 14) 高木優任, 加藤真志, 松下政弘: 橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS) を用いた鋼橋設計の合理化, 土木学会第74回年次学術講演会, (2019) I-292.
- 15) 武野正和, 本間宏二, 田中睦人: 土木学会第63回年次学術講演会, I-384, (2008), 767.
- 16) 安藤隆一, 田中睦人, 本間宏二, 高木優任: 新日鉄住金技報, No.400, (2014), 114.
- 17) 村上貴紀, 坂根秀和, 矢部泰彦, 亀子学, 小笠原隆幸: 宮地技報, No.25, (2010), 41.
- 18) 大谷満, 瀬田真, 今井平佳, 近藤秀樹, 大植健: 川田技報, 30 (2011)
- 19) 青木康素, 高田佳彦, 菅江清信, 上村隆之, 那須和夫, 壺岐浩, 児玉正行: Sn添加耐食鋼の塗装寿命延長効果と鋼道路橋での適用事例, 橋梁と基礎, 53 (2019) 10, 掲載予定.

(2019年6月12日受付)