

招待論文

橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案

PROPOSAL OF NEW HIGH PERFORMANCE STEELS FOR BRIDGES (BHS500, BHS700)

三木千壽¹・市川篤司²・楠 隆³・川端文丸⁴

Chitoshi MIKI, Atsushi ICHIKAWA, Takashi KUSUNOKI and Fumimaru KAWABATA

¹ フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: miki@cv.titech.ac.jp

² フェロー会員 工博 東京工業大学客員教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(同上)³ 非会員 工修 新日本製鐵株式会社 厚板営業部
(〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)⁴ 非会員 工博 JFE スチール株式会社 厚板セクター室
(〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 日比谷国際ビル)**Key Words**: high strength steel, toughness, weldability, bridge, large heat input, weathering steel

最近、様々な優れた特性を持つ鋼材が開発されている。しかし、それらの鋼材は、必ずしも橋梁の性能と適合したものになっているわけではない。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も可能になる。

本論文では、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 BHS700 として提案する。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た。

1. はじめに

鋼はその優れた強度、延性、韌性、加工性、あるいは比較的低い価格、さらにはリサイクル性の高さから、もっとも優れた構造材料である。鋼材が橋梁の構造材料に使われるようになって 150 年が経つが、製鉄・製鋼技術の進展により、その性質はますます改善され、構造物への利用技術もそれに伴って発展してきた。一方、橋梁などの構造物側からの要求により鋼材性能が発展してきた面もある。

最近、様々な優れた特性を持つ鋼材が開発されており、それらの特性を利用すると橋梁に要求される性能を高め、ひいては橋梁建設のコスト縮減にもつながる。本論文では、橋梁の性能の観点から、橋梁に用いる鋼材にどのような特性をどの程度付与すべきかを検討し、橋梁の性能に適合した鋼材を橋梁用高性能鋼材として提案するものである。

橋梁用高性能鋼材としてはさまざまな性能が必要とされる。その第 1 は高強度化であるが、それについては次章で概説するようすにすでに必要十分なレベルに達している。したがって、橋梁用高性能鋼材とは、降伏

強度や引張り強度に加えて、破壊韌性、溶接性、加工性、耐候性を高度化した鋼材を指している。

橋梁用高性能鋼材の研究は 1992 年より米国で開始されている。これは 1980 年代後半から進められていた米国海軍の高性能鋼材を利用した Fleet in Future プロジェクトの民間への技術移転とも位置づけられる。また、この研究開発は、1994 年から 10 年間、予算 \$2 Billion でスタートした CONMAT (Construction Materials) と呼ばれる国家プロジェクトの一部でもある。このプロジェクトは、“Materials for Tomorrow’s Infrastructure, A Ten Year Plan for Deploying High-Performance Construction Materials and Systems” としてアナウンスされており、鋼材のほか、コンクリート、木材、複合材料、アルミなどの 10 グループの建設材料について、安全性、信頼性、耐久性の優れた材料と構造物の性能を高めるための研究開発が行われている。

米国では、様々な材料開発や技術検討を経て 1997 年には HPS70W が ASTM 規格化されている。その後、全米でこの HPS を橋梁に適用するパイロットプロジェクトがスタートしており、HPS の使用により 15% ほどのコストダウンが実現されている。そして 2002 年 8 月

時点で、25の橋が建設され、約100の橋が設計されていると報告されている²⁾。その中には支間が127mの3径間連続のプレートガーダー橋であるFord City橋のような、チャレンジングな橋も含まれている³⁾。米国の高性能鋼材としてはHPS70WとHPS100Wが提案されており、様々な形式の橋梁が試設計されている。

筆者の一人は米国での高性能鋼材の研究グループからの依頼により、わが国の高強度鋼材とそれらの橋梁への応用事例などの技術情報を提供するとともに、同様の研究を進めてきた。わが国における高性能鋼材の研究は、1994年より東京工業大学の産官学連携研究プロジェクトを推進するための組織である創造プロジェクト研究体の中に設置された高性能鋼材の利用技術研究会でスタートした。この研究会は、新日本製鉄、川崎製鉄、住友金属の3社の厚板技術者と橋梁会社の研究開発技術者および大学の産学連携の研究プロジェクトとして実施され、その後、鋼材倶楽部の大学への研究助成制度により研究費の補助を受け、同時に日本鋼管と神戸製鋼所が研究会に参加し、大規模な産学連携プロジェクトとなった。共同研究に参加している鉄鋼5社は別途、鋼材倶楽部（現在は日本鉄鋼連盟）に橋梁研究会を設立し、鋼材の製造面からの検討を進めてきた。橋梁用の高性能鋼材として付与すべき特性が整理され、それに対する鋼材の試作まで終了したことから、ここにその内容を公表する。

2. 高強度鋼材の橋梁への利用の変遷¹⁾

1928年に完成した永代橋には高張力マンガン鋼であるデュコール鋼が使われている。これは当時海軍で研究中であった60キロクラスの造船用鋼材であった。しかし、溶接性、加工性、切欠靱性などの点で問題があり、その後橋梁には使われることはなかった。わが国で50キロクラスの鋼材が本格的に使用されたのは1954年の相模大橋であり、1959年にはSM50（現SM490）のJIS規格が制定され、溶接の採用とともに急速に普及していった。

60キロ鋼は1960年に兵庫県の平野橋と西村橋で使用され、その後、名神高速道路の木曾川橋、長良川橋などで用いられ、首都高速道路の橋脚にも多量に使用されている。この鋼材は1966年にSM58（現SM570）としてJIS規格に追加された。首都高速道路の橋脚の設計図にはSM60と表記されたものがかかなりあるが、当時の関係者によれば、JISがSM60ではなくSM58となった理由は、各社の製造能力を考えた上での判断もあったとのことである。さらに1964年には80キロ鋼が京葉道路の花輪跨道橋に使用され、1969年完成の大

阪の港大橋では70キロ鋼、80キロ鋼が大量に使われた。その後、本四連絡橋にも大量のSM58、70キロ鋼、80キロ鋼が使われた。1969年には橋梁構造に対する要求性能から、SM50の降伏強度を高めた鋼材であるSM50Y（現SM490Y）がJIS規格に追加され、その後のこの鋼材が鋼橋の設計でのベースとして使われている。1998年完成の明石海峡大橋では予熱温度を低く抑えた80キロ鋼が用いられている。

図-1は橋梁建設協会発行の橋梁年鑑を調査して得られた鋼橋の建設総重量、および橋数と高強度鋼材の適用の状況を示したものである。わが国の高強度鋼材の開発とその橋梁への利用は世界をリードしてきたと言える。しかし、SM58以降の高強度鋼材については、それらを標準化あるいは規格化して積極的に橋梁構造に取り入れ、その合理化を図るような動きにはつながってこなかったことも事実である。

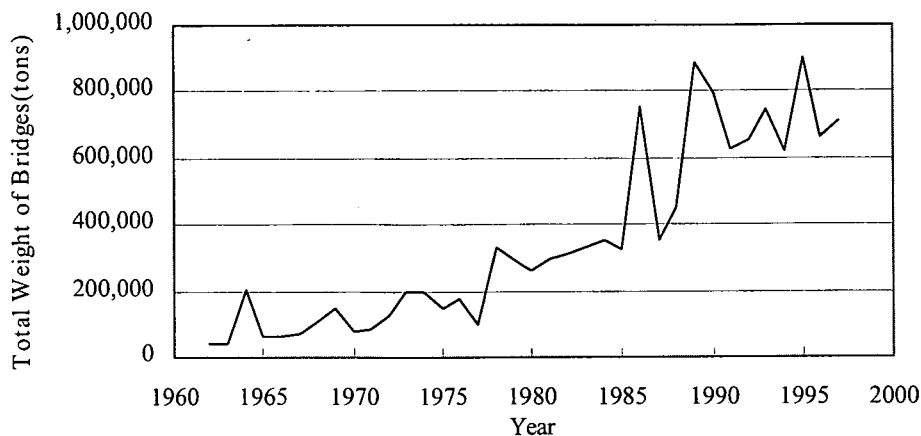
近年、鋼橋の合理化がしばしば話題にされる。一例として図-2に3径間連続合成鉄桁（支間長60m、4主桁）の工事費の内訳を示す。これから、合理化やコストダウンのために注目されるのは、支承費、製作費、現場溶接費、床版工事費であると考えられるが、これに対する実際の動向としては、部材数を少なくして製作費を抑えようとするものがほとんどである。一方、最新の製鉄・製鋼技術により製造される鋼材の性能と最新の橋梁の設計・製作技術を組み合わせることは、今後、より合理的な橋梁構造、より経済性の高い橋梁を目指す上での極めて実現性の高い戦略ともいえる。また、橋梁構造としての性能要求から鋼材の性能を要求することも橋梁の合理化に繋がる。ここでの橋梁用高性能鋼材の提案は、そのような、材料、設計、製作、維持管理の一連の鋼橋技術に、真の意味での合理化の循環を引き起こすことを目的としている。

3. 橋梁用高性能鋼材に対する要求性能

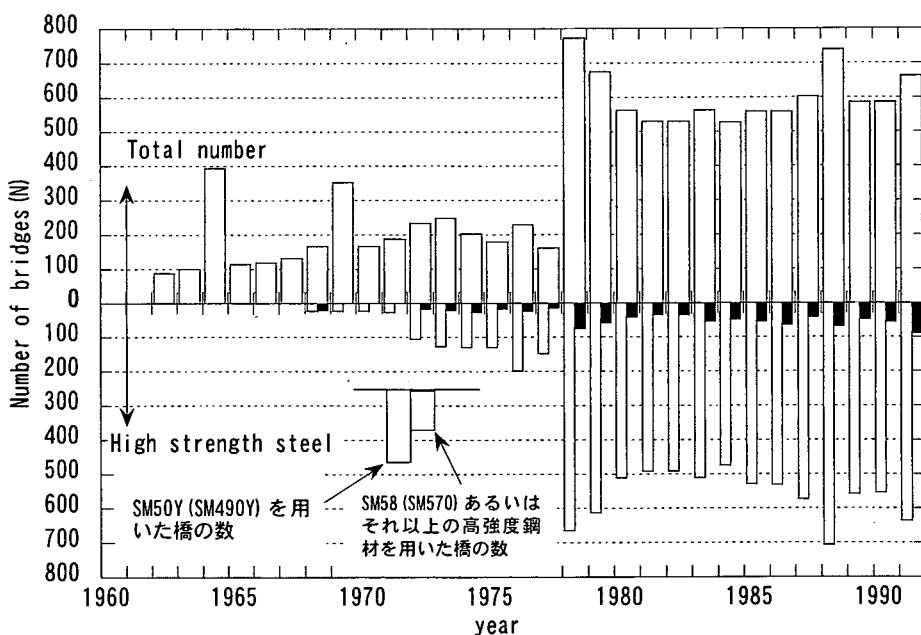
提案する橋梁用高性能鋼材は、降伏強度500MPaおよび700MPaの2種類で、それぞれをBHS500、BHS700、またそれぞれに耐候性能を付与したものをBHS500W、BHS700Wと呼ぶ。以下に、橋梁用高性能鋼材に対する要求性能、およびこれらの鋼材に付与した特性を示す。

a) 強度レベル（保証降伏点500MPa、700MPa）

橋梁の多くは、支間が数十m程度の中小橋梁である。このような一般的な橋梁として、標準的な交通下の道路における支間60m程度の少数主桁橋を想定し、鋼材強度をパラメータにした試設計を行うと、鋼材重量を最も小さくできる強度レベルは、降伏点が500MPa程度である（図-3）。もちろん、この強度レベルは疲労に



(a) 鋼重の推移



(b) 橋数ベースでの推移と高強度鋼材の割合

図-1 高強度鋼材使用の推移

対する厳しさ、支間、橋梁の形式によって変化するが、中小橋梁ではこの程度の強度レベルがあれば十分である。BHS500は、このような橋梁への使用を想定している。

一方、それより長支間に用いられ、鋼材の引張特性を最大限利用できるトラス構造のような橋梁形式では、港大橋等で使用された80キロ鋼のような高強度鋼材が有利になる。BHS700は、このような橋梁への使用を想定している。また、BHS700の製作性は現在のSM570と同程度と考えており、支間の長い少数主桁橋などで75mmを越えるような板厚となる部位に対して適用すると、板厚を小さくすることができ、製作や検査の合

理化の面からも有効と考えられる。

b) 予熱

予熱は鋼橋の製作コストに強く関わり、予熱温度を下げることにより、製作コストを低減することが可能になる。BHS500は、清浄度の高さやTMCP化により低 P_{cm} 化および低 C_{eq} 化することによって予熱フリーを目指した。BHS700については、予熱温度を50°C以上とする。

c) 冷間加工と冷間曲げ ($R/t \geq 7$)

橋梁部材では構造ディテールの都合上、曲げ加工を行うことがある。その曲げ加工の半径は板厚の7倍程度までのケースが多い。そこで、橋梁用高性能鋼材と

して、 $R/t \geq 7$ が目標になる。

この場合、現行の道路橋示方書では、鋼材のシャルピー吸収エネルギーは 150J 以上なければならないと規定している。150J の値は、歪により靱性値が低下した後もその値として 27J を満足するように設定されたもので、鋼種および年代の様々な広範囲の試験データに基づいている。しかし、最近の鋼材のデータのみで見直すと 100J でも時効後に 27J を十分満たしており、シャルピー吸収エネルギーとして要求する値を 100J とした。なお、歪時効には窒素が関係するとされているが、その窒素が大幅に低減されていることが関係していると考えられる⁵⁾。

d) 大入熱溶接への対応 (10kJ/mm)

橋梁部材では建築鉄骨と比較して大入熱溶接に対する要求はさほど高くない。最近の少数主桁橋の現場溶接で特にウェブにエレクトロスラグ溶接を使用する場合に 15 kJ/mm 程度になることがあるが、施工性と品質から採用の実績は多くない。橋梁の各種の継手部に

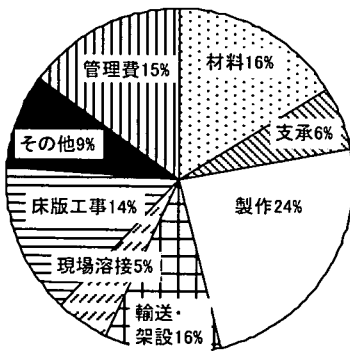


図-2 3@60m 連続鉄桁工事費内訳

に対する溶接の検討より、鋼材に対して 10kJ/mm を保証できれば対応が可能であることが明らかとなった^{6),7)}。ただし、この場合に問題となるのが熱影響部の靱性値であり、溶接金属の靱性値についても注意を要する。

e) 耐ラメラティア性能の保証 (Z35)

橋梁部材中には板厚方向に力を受けるような継手数が多く存在する。また、ラメラティアの発生の可能性のある溶接継手も多数使われている。高架道路の鋼製橋脚では当初よりラメラティアの発生が重要な課題であり、その防止のために様々な工夫がされてきた。そのために、板厚方向引っ張り試験による絞り値をベースとした耐ラメラティア鋼材が規定されているが、BHS 材ではその内の最高レベルである Z35 の耐ラメラティア性能を保証するものとする。

f) 耐候性

最近無塗装橋梁が増加しつつあり、ミニマムメンテナンス橋梁としての期待も高い。そこで、BHS 材では、JIS に規定される SMA 材程度の耐候性を付与した鋼材シリーズを別途用意することにした。BHS500 については、合金元素を添加することにより耐候性を付与したが、BHS700 はその強度を発現させるために耐候性に有効な合金元素を多く含んでおり、そのまま通常の耐候性鋼材の性能を有するものとなっている。

4. BHS500 の試作とその性能確認

(1) 鋼材の高性能化技術の進歩

a) 鋼材の高清浄化

鉄鋼材料は製鋼技術における高清浄化技術の進歩とともに大きく高性能化を果たした。鋼材の特性は、炭

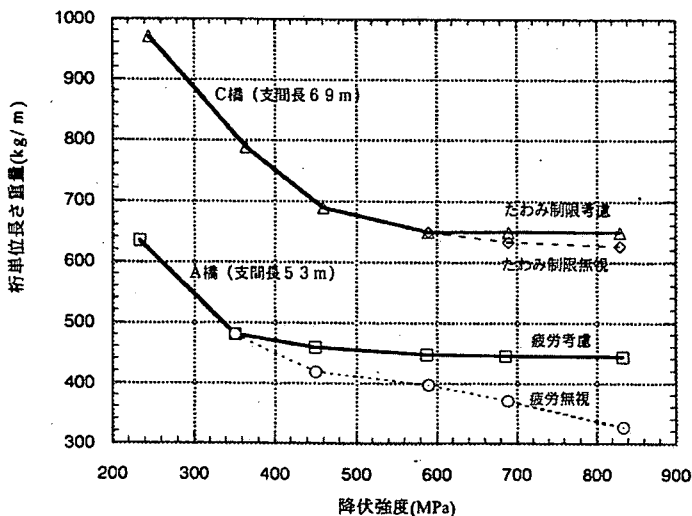


図-3 降伏強度と鋼重の関係⁴⁾

素、硫黄、燐および窒素等の不純物元素の影響を受ける。これらの不純物低減の要請は鋼材品質の向上面からのものが多いが、連続焼鈍、圧延技術の高度化、表面疵発生防止などプロセスの発展や省エネルギーを達成することを目的としたものもあるとされている⁹⁾。表-1に鋼中の不純物元素の低減の限界値の変遷を示す。これから、製鉄製鋼技術の発展とその結果としての鋼材の清浄度は、現行 JIS の SM570 が制定された時代のそれと比較すると、はるかに高まっていることがわかる。

b) 圧延技術の進歩

厚鋼板は制御圧延法を基盤として高性能化が進められてきたが、制御冷却技術と融合した TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術により更なる高強度

高性能化を実現した。現在の厚鋼板は通常圧延から進歩し、制御圧延と制御冷却を巧みに駆使した TMCP 技術により製造されるようになってきており、高度なマイクロロイング技術とともに高強度・厚肉化への組織制御が取り入れられてきた。さらには最新の圧延技術としては高度に冷却制御した TMCP や高速冷却を活かした直接焼入れ焼き戻し (DQ-T) 法などがあり、これらの技術革新により、従来に比べて格段の低 C_{eq} 、低 P_{cm} 化が達成され、従来の SM570、80 キロ鋼の溶接施工時に大きな負担となっていた予熱処理の軽減に大きな効果をもたらしている。

(2) BHS500 の試作例

図-4 は TMCP で製造された SM570 の降伏強度の実績であるが、降伏強度 500 MPa は従来の SM570 でほぼ実現されている。そこで、TMCP で製造された SM570 をベースに BHS500 を試作した。

表-2 に BHS500 の基本特性を満足させるため行った成分設計と試作鋼の化学成分を示す。最新の TMCP 技術を適用し、制御圧延と制御冷却による組織制御およびマイクロロイングによる析出強化機構を最大限に活かして、その強度および切り欠き靱性値 (シャルピー値) を高めたものである。従来の QT 法に比べて圧延

表-1 鋼中不純物精錬限界の変遷⁹⁾

elements	Year			
	1970	1980	1990	2000
C	56	22	8	3
S	18	6	2	0.5
P	148	41	12	3
O	23	11	5	2
N	30	17	10	5
H	2.0	1.3	0.8	0.5

(ppm)

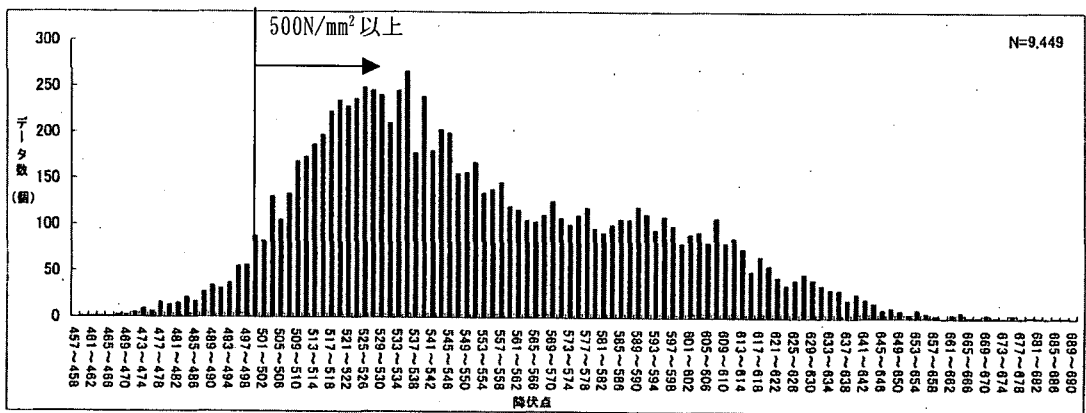


図-4 SM570 の降伏強度の分布

表-2 BHS500 の化学成分

steel type	No.	t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	P_{cm}
BHS500	required value		≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.006	added if needed			≤ 0.20
	1	22	0.08	0.29	1.56	0.009	0.002				0.17
	2	50	0.08	0.29	1.56	0.009	0.002				0.17
	3	100	0.09	0.29	1.57	0.011	0.002				0.18
BHS500W	required value		≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.006	0.30-0.50	0.05-0.30	0.45-0.75	≤ 0.20
	4	25	0.05	0.21	1.35	0.006	0.002	0.33	0.26	0.47	0.17
	5	60	0.05	0.21	1.35	0.006	0.002	0.33	0.26	0.47	0.17
	6	100	0.04	0.19	1.35	0.003	0.001	0.35	0.26	0.49	0.18

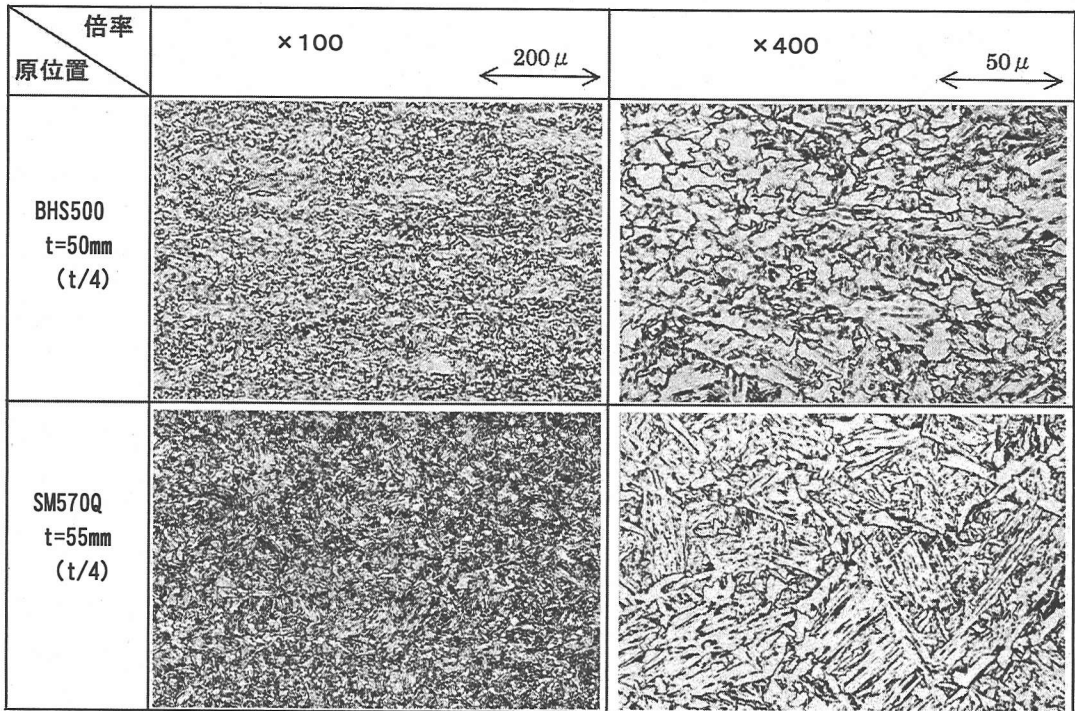


図-5 鋼材組織の比較

表-3 BHS500 の力学特性

steel type	No.	thickness (mm)	test position	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)		vE-5 (J)
required value (lower limit)				500		$t \leq 16$	19	100
						$16 < t$	26	
						$20 < t$	20	
BHS500	1	22	1/4t	560	645	30		324
	2	50		504	609	32		317
	3	100		534	624	27		291
BHS500W	4	25	1/4t	566	646	38		324
	5	60		564	638	26		175
	6	100		517	608	27		174

鋼板寸法などにより細かく条件を設定し、圧延温度スケジュール、制御冷却条件を圧延ライン上で実現するという高度な制御、管理技術の積み重ねにより製造が可能となった。同時に TMCP 技術の適用により、炭素量を低く抑え、溶接時の予熱フリーを可能とする低 P_{cm} を実現している。また、S 量を極めて低く抑えているために、Z35 レベルの耐ラメラティア性能を確保することができた。また、細粒高靱化技術により、HAZ の靱性劣化を低く抑え、大入熱溶接も可能にした。

図-5 に BHS 材および従来の SM570Q の組織写真を示す。この写真より、両者とも基本的には同じ主にベイナイトの組織ではあるが、BHS 材の方が顕著に細粒化されており、SM570Q の比較的に粗い金属組織に比

べて、強度・靱性バランスに優れているであろうことが推定される。これは、図-5 の金属組織写真から BHS 材では明らかに扁平したオーステナイトから変態したと判断でき、BHS 材の方がより低温あるいは高い圧下率で制御圧延が行われていることによる。

表-3 に各種試験により得られた BHS500 の力学特性を示す。これより、まず BHS500 と BHS500W の両方について、板厚 100 mm に至るまで降伏強度と伸びの要求性能を満たしていることがわかる。また、シャルピー値としても大きな値を示している。この鋼材を、耐震性能が要求される部材に用いる場合には、 -50°C の温度シフトを考慮すればよい¹⁰⁾ が、特に BHS500 については 100 mm の厚板でも十分な耐震性能を発揮し

表-4 BHS500 の歪時効特性

steel type	strain aging post heat	No.	thickness (mm)	test position	test direction	before aging	after aging
						vE-5 (J)	
required value (lower limit)						100	47
BHS500	10% 250°C × 1 hr	1	22	1/4t	L	324	271
		2	50		L	317	299

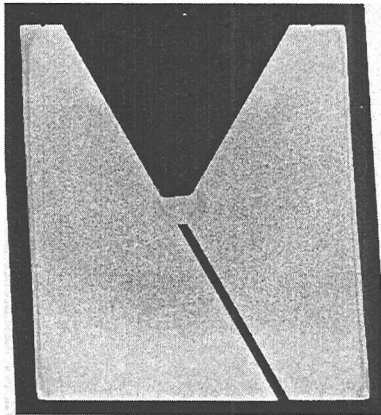


図-6 Y 割れ試験体断面

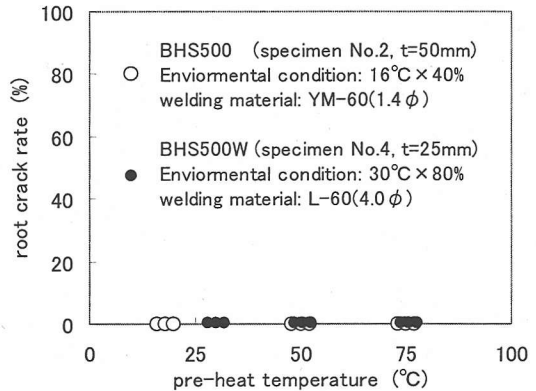


図-7 Y 割れ試験の結果

表-5 溶接継手特性

steel type	No.	thickness (mm)	welding type	heat input (kJ/mm)	TS (N/mm ²)	vE-5 (J)				
						WM	FL	HAZ1	HAZ3	HAZ5
required value (lower limit)						47				
BHS500	1	22	SAW	19.5	582	131	82	74	85	109
	3	100	CO2	3.4	632	120	138	204	220	276
BHS500W	4	25	EGW	19.2	593	97	101	94	220	312

表-6 線状加熱特性

steel type	No.	thickness (mm)	heating temperature	Cooling method	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	vE-5 (J)
BHS500	1	22	900	water	555	641	30	305
			1000		553	644	29	310
	3	100	1000	water	535	641	25	245

うると考えられる。

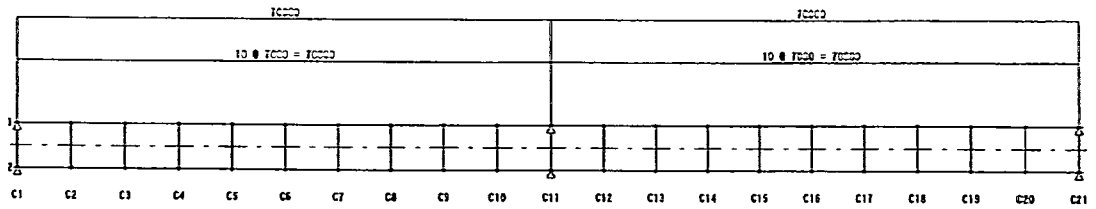
表-4 に BHS500 の歪時効特性を示すが、10%のひずみに対しても要求値を上回る性能を示しており、板厚の7倍の半径での冷間曲げに十分耐えうる事がわかる。

BHS 材は、 P_{cm} が低く靱性も優れていることから、二つのメリットが期待できる。一つは、冷間割れ特性の向上である。これより、現在道路橋示方書で規定されているすみ肉溶接脚長 $\sqrt{2}t$ の規定を緩和できると考えられる。この特性により、板厚が大きくなる2主桁構造の橋梁においてフランジとウェブの首溶接の脚長が上記規定によって1パスで済まなくなっている場合についても、1パスで溶接できる脚長で冷間割れを生じずに溶接ができるようになることが期待される。また、もう一つのメリットは大入熱溶接である。やはり

2主桁の厚いウェブなどに、エレクトロスラグ溶接などの大入熱溶接法を適用することによって、製作コストを削減することができる。

これらの特性のうち、冷間割れに関しては表-2 での P_{cm} の値で基本的な特性が把握できるが、要求性能を十分に満たしていることがわかる。また、図-6 に実際に冷間割れの特性を確認するための Y 型割れ溶接試験体の断面写真を、そして図-7 にその試験結果を示す。これより、予熱を行わない場合でも全く割れが生じておらず、非常にすぐれた耐冷間割れ特性を持っていることがわかる。

表-5 に溶接継手性能試験の結果を示す。まず、10 kJ/mm 以下の入熱に対して、100 mm 厚の BHS500 (No.3) で評価した全ての継手部位において、要求値を満足



(a) KEY PLAN

していることがわかる。また、10kJ/mm 以上の大入熱で試験を行った場合も、シャルピー値は低下するが要求値を満足している。

表-6 に線状加熱試験の結果を示す。1000°C の線状加熱条件で加熱した後も、引張特性および靱性が十分な性能を示しており、加工時に線状加熱を行っても問題ない。

以上の結果より、BHS500 および BHS500W は少なくとも溶接、曲げ加工および加熱矯正に関して、SM490 等の従来鋼と同等以上であり、SM570 に課せられていたような工数割増の根拠となる要素は存在しない。また、前述したようにすみ肉溶接脚長 $\sqrt{2}t$ の規定を低減することができると思われる。

(3) BHS700 の設計

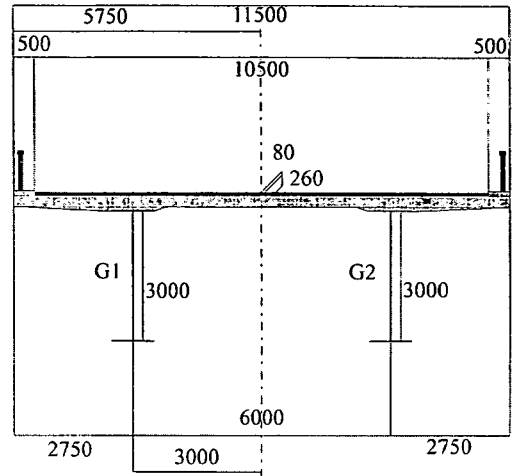
明石大橋などで使われてきたいわゆる低予熱型 HT780 をベースにすることにより、降伏強度 700MPa を保証する鋼材を実現することが可能である。すなわち、TMCP 技術による析出強化機構を活用することにより、炭素量を低く抑え溶接時の予熱低減を可能とする低 P_{cm} を実現できる。また、細粒高靱化技術により、HAZ の靱性劣化を低く抑えることができ、大入熱溶接も可能になる。ただし、BHS700 は鋼材の試作段階であり、BHS500 で行った各種特性検討など、その応用技術についてはまだ十分には検討していない。

5. BHS500 の活用による効果

(1) 降伏強度と引張強度

提案する橋梁用高性能鋼材は降伏強度をベースとしている。鋼材の特性に引張強度あるいは降伏比を要求する場合は、エキストラの要求として追加できる。

鋼橋上部構造の部材が引張応力に対する限界状態は降伏強度で規定され、いわゆる静的な引張強度が直接的に関係するような限界状態は通常は考えられない。材料特性のうちで降伏後の構造物の性能に関するものは後座屈強度や繰返し荷重に対するエネルギー吸収能力（降伏棚の存在とその長さ、歪硬化域の勾配、またそれらを包括的に代表する降伏比）であるが、橋梁の



(b) 道路橋示方書による設計 2 主桁

図-8 試設計対象橋梁

上部構造がそのような特性がクリティカルになることは考えられない。鋼製橋脚等の構造物で耐震性能が支配的な場合については、今後の課題としたい。

現行の道路橋示方書における許容応力度は、降伏に対して約 1.7、引張に対して約 2.2 の安全率を設定となっている。この許容応力度の設定方法は港大橋に高強度鋼を適用する際に用いられた考え方であり、当時の記録やその検討に関わった有識者によれば、高強度鋼材に対する品質のばらつきや新しい技術に対する不安感から高強度鋼材の許容応力度を低めに設定するようにしたとされている。この安全率の考え方は本州四国連絡橋の設計にも踏襲されている¹¹⁾。なお、降伏に対する安全率は 1957 年の溶接鋼道路橋示方書では 1.76 (SS41, 基準降伏強度 2300 kgf/cm², 許容応力度 1300 kgf/cm²) である¹²⁾。また、現在の鉄道の設計基準では、許容応力度法ではないので直接の比較はできないが、それに相当する値は 1.449~1.594 (SM400, 荷重係数×材料係数×部材係数×構造物係数) となる¹³⁾。

(2) 鋼材強度と設計

図-3 はプレートガーダーを対象として降伏強度をパラメータとして試設計を行った結果である。試設計で

表-7 全体コストの試算

TYPE	SM570W	BHS500W	BHS700W	
鋼重 (t)	350	308	296	
単位面積あたり鋼重 (t)	0.238	0.210	0.201	
鋼材費	t 単価 (万円)	15.3	15.3	16.2
	価格 (万円/m ²)	3.6	3.2	3.3
製作費	t 単価 (万円)	28.1	24.2	24.2
	価格 (万円/m ²)	6.7	5.1	4.9
架設費	t 単価 (万円)	38.6	38.6	38.6
	価格 (万円/m ²)	9.2	8.1	7.8
床版費	平米単価/m ²	4.0	4.0	4.0
合計平米単価 (万円/m ²)	23.5	20.4	19.9	
比率	1.0	0.87	0.85	

は AASHTO の LRFD を適用し、それぞれの径間について最小となる鋼材重量を求めた。AASHTO の LRFD を適用した理由は、現行の道路橋示方書で採用している許容応力度設計法では最適値が求めにくいことによる。疲労設計は鋼構造協会の疲労設計指針を適用している。

通常の桁橋では降伏点が 500 MPa を超えると疲労限界が支配的になり、それ以上の鋼材強度を高めても鋼材量は減少しない。

高強度鋼材の適用は連続桁の負モーメント領域で有効である。また、現行の道路橋示方書に従った場合も、経済的な効果は得られる。図-8 に試設計を行った橋梁の基本図を示す。設計条件は以下の通りである。

- 床版：合成床版
- 支間長：2@70 m
- 幅員：11.5 m (総幅員), 10.5 m (有効幅員)
- 床版厚：26 cm (合成床版)
- 舗装厚：80 mm
- ウェブ高さ：3 000 mm (基準値)
- 下フランジ幅：850 mm
- 対傾構間隔：7.0 m
- ブロック長：13 m 以内
- コンクリート強度： $\sigma_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$

この条件で、鋼材を従来の SM570W を用いた場合と、BHS500W を用いた場合とで比較を行うと、前者の鋼重 350 t (238 kg/m²) に対し、後者は 308 t (210 kg/m²) となる。すなわち、10%以上の鋼重低減が可能となる。BHS700 を用いた場合は、296 t (201 kg/m²) である。BHS 700 はプレートガーダーに使うより、トラスの弦材等で大きな引張力の発生する部材に使う場合に大きなメリットが得られると考えられる。

上記のケースについて、工費の簡単な試算例を表-7 に示す。表中の鋼材種別は、使用する最大強度の鋼材を示す。鋼材費については、BHS700 の単価を BHS500W

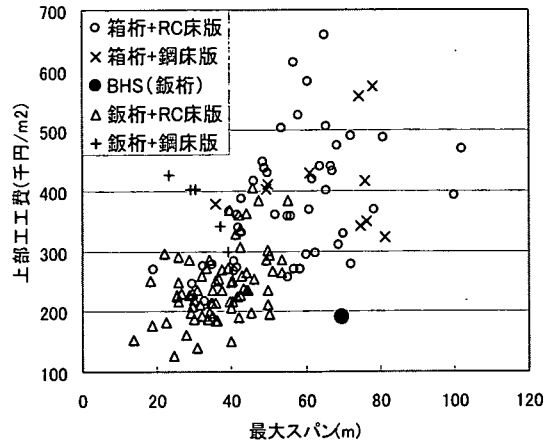


図-9 箱桁との比較

の 83%程度高く設定した(表中の単価は全鋼材の平均単価である)。製作費については、SM570W で現在考慮されている工数の割り増し 25%を考慮した。BHS 材については、溶接性が良いため SM490Y と同程度とした。また、床版の単価については合成床版として 4 万円/m² を考えている。この結果から、高性能鋼材を利用することにより、従来鋼に対して 10%以上のコスト縮減が可能になる。また、図-9 に試算結果と従来の鋼橋の工事費実績¹⁴⁾との比較を示す。支間 70 m で BHS を用いた 2 主合成桁は、非常に大きなコストメリットがあることがわかる。

6. まとめ

橋梁用鋼材に求められる性能をまとめ、その要求性能を満足する橋梁用高性能鋼材 BHS500、および BHS700 を提案した。BHS500 については、各種特性試験を行い、要求性能を確かに満足していることを確認した。また、試設計により、提案した鋼材を用いることにより橋梁建設費のコストダウンが可能であることを示した。

今後は、BHS700 についても同様の基本特性を確認していくとともに、これらの鋼材の性能をより活用するための設計技術を発展させる必要があると考えている。また、溶接に関しても、すみ肉溶接脚長 $\sqrt{2}t$ の規定を緩和するなど、提案した鋼材に適用する新しい脚長規定を作る必要がある。

このように、実際に開発の軸となる鋼材の特性を明確にしたことによって、周辺技術の開発の目標値が決まってきた。これが刺激となって、設計・製作・架設に関わるフルセットの技術が揃い、全体のコストダウンが実現されることを期待している。

謝辞：本研究は東京工業大学創造プロジェクト研究体に設置された高性能鋼材研究会と鋼材倶楽部から鋼構造協会に委託された次世代土木鋼構造研究特別委員会の高機能鋼材研究小委員会の研究として実施されたものである。委員各位には様々な有益なるご意見をいただいた。鋼材の提案には新日本製鐵，日本鋼管，川崎製鉄，住友金属，神戸製鋼所の厚板技術グループの全面的なご協力を賜った。また，本論文をまとめるにあたっては，東京工業大学博士課程学生の富永知徳氏から助力を得た。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木鋼構造物の技術史，鋼材倶楽部，1995.9
- 2) John Fisher Symposium, Lehigh University, 16-17, 2002.8
- 3) Chaval, B. and Earls, C. J. : Evaluation of Constructing Issue and Inconsistent Detailing of Girders and Cross-Frame Members in Horizontal Curved Steel I-Girder Bridge, International Bridge Conference 2002, IBC-02-43, 2002
- 4) 小西拓洋，高橋和也，三木千壽：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, 2000.7

- 5) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪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, 1997.7
- 6) 南邦明，三木千壽：橋梁製作における入熱制限の考察，JSSC 鋼構造論文集，第6巻23号，pp.105-116, 1999.9
- 7) 南邦明，三木千壽：HAZ部の軟化を考慮した橋梁製作における入熱制限の考察，JSSC 鋼構造論文集，第8巻第30号，pp.1-14, 2001.6
- 8) 社団法人日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧（第4版），2002
- 9) 省部実：精錬技術の進歩と不純物元素低減の実現性，日本鉄鋼協会西山記念技術講座，1983.5
- 10) 佐々木栄一，荒川泰二，三木千壽，市川篤司：鋼製橋脚の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, 2003.4
- 11) 土木学会本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会，鋼材分科会：鋼上部構造用鋼材の所要性能，報告書，別冊4, 1973.3
- 12) 日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書，1957
- 13) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，丸善，2000.7
- 14) 日本道路協会：道路橋年報（平成9・10年度版），2001.3

(2003. 4. 18 受付)

This paper reviews the history of the development and use of high strength steels for bridge structures in Japan. The required performance of high performance steels for bridge are proposed. The new steels BHS500, BHS500W and BHS700, which satisfy the proposed required performance, were developed. The basic properties of the developed steels are tested and the results are shown. The trial design using the high performance steels was done. It gives the example of economical benefit by the use of developed steels. Also the excellent welderility is proved, therefore benefit is obtained from fabrication process.