

橋梁用高性能鋼BHSの利用技術開発

Development of Application Technologies for Bridge High-performance Steel, BHS

本 間 宏 二^{*(1)}

Koji HOMMA

川 崎 博 史^{*(5)}

Hirofumi KAWASAKI

田 中 睦 人^{*(2)}

Mutsuto TANAKA

松 岡 和 巳^{*(3)}

Kazumi MATSUOKA

糟 谷 正^{*(4)}

Tadashi KASUYA

抄 録

橋梁用鋼材において、鉄鋼製造技術の進歩を反映した高性能な鋼材を使用することで、鋼橋の経済設計、製作面での効率化に寄与し、また、鋼橋としての性能向上にも寄与する可能性があることに着目し、新しい橋梁用高性能鋼材BHS(Bridge High-performance Steel)の開発を行ってきた。BHS鋼は高強度、高靱性、優れた製作性能(溶接施工性、加工性)、耐候性を有する鋼材であり、その適用によって鋼橋の設計の合理化や製作効率化など経済性の向上が期待される。橋梁の要求性能に応じて提案したBHS鋼の諸特性、及び、BHS鋼の性能検証とその適用効果について述べた。

Abstract

BHS, Bridge High performance Steels, produced by the recent advanced steel making technologies such as thermo-mechanical control process are developed. The Bridge High performance Steels contribute to the economical design, efficient fabrication and higher performance of steel bridges. BHS has excellent properties such as high strength, high fracture toughness, good weldability, and ease of fabrication with the choice of weathering performance. This paper describes the proposed properties of BHS based on the required performance for bridge, the confirmed results of the basic properties of BHS and the merits of BHS in the design and fabrication of steel bridges.

1. 緒 言

“橋梁用高性能鋼”とは、強度、破壊靱性、溶接性、加工性、耐候性等、橋梁に要求される性能を、従来より高め、橋梁に要求される性能の観点から、それぞれの特性を最適なレベルに高めた材料と定義している¹⁾。近年の構造用鋼材では、熱加工制御技術の進歩によって微細な結晶組織の制御が可能となり、鋼材の高強度化、破壊靱性の向上といった機械的性質の改善に加えて、炭素当量や溶接割れ感受性組成の最適化による溶接性の改善等、顕著な進歩がもたらされており、それらを最大限活用した鋼材の活用が期待される。

従来、橋梁用鋼材の規格体系は1960年代に定められた道路橋示方書の体系(以下道示)を基本としており、道示適用範囲の橋梁においては、基本的にJIS G 3106のSM規格の鋼材が使用されている。鋼橋の設計、製作の体系はSM規格下限の材料が使用されても要求性能が満足される前提に構成されている。従って、例えば、現状のSM規格より高強度で溶接性の高い“橋梁用高性能鋼”を使用することによって、より軽量で効率的な鋼橋の設計や、溶接施工性の向上によって鋼橋製作の合理化に可能性があると考えられる。本論文では、1)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、2)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、3)橋梁用高性能鋼材を適用した鋼橋の試設計例、4)プロジェクト適用事例、について述べる。

2. 新しい橋梁用高性能鋼BHSについて

橋梁用高性能鋼BHSは、東京工業大学の創造プロジェクト研究体に設置された高性能鋼の利用技術研究会において、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の中で橋梁における要求性能や鋼材仕様についての検討が行われてきた¹⁾。著者らはその中で、橋梁用高性能鋼BHSの仕様決定に先立ち、鋼橋における最適な降伏強度の検討を実施し、鋼材性能向上により、鋼構造物の軽量化、溶接構造物の信頼性向上、破壊に対する安全性確保といった鋼構造物の性能向上と、溶接性、冷間曲げ加工性といった鋼構造物の製作性を改善する可能性について、各種検討を行ってきた²⁻⁴⁾。

橋梁の要求性能に適合した特性の検討として、まず降伏強度の面から、鋼橋の代表的な形式である鈑桁を対象として、有効活用可能な鋼材降伏点の検討を実施した^{2,5)}。図1は、実在の鋼鈑桁橋梁を対象として、限界状態設計法のもと使用鋼材の強度をパラメータとする試設計を実施し、主桁断面の鋼重の変化を示したものである。本

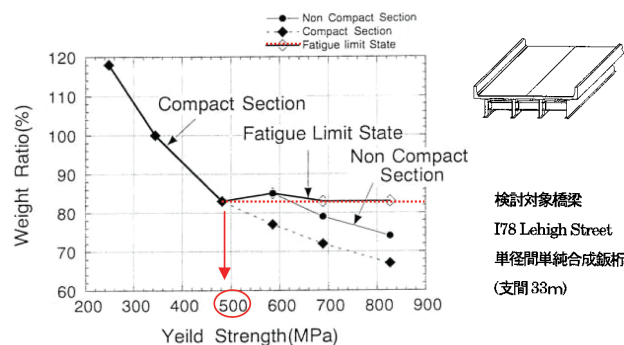
*⁽¹⁾ 建材開発技術部 橋梁開発技術グループ マネジャー 工博
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7719

*⁽²⁾ 厚板営業部 厚板商品技術グループ マネジャー

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員 工博

*⁽⁴⁾ 鉄鋼研究所 接合研究センター 主幹研究員 工博

*⁽⁵⁾ 厚板営業部 部長

図1 鋼鉄桁橋梁における使用鋼材の降伏点と鋼重の関係^{2,5)}

Relationship between yield strength and steel weight in plate girder bridge

検討によれば、鋼材の降伏強度の増加に伴い鋼材重量は低減すること、但し、降伏強度500N/mm²程度を越えると、橋梁に作用する繰り返し荷重に起因する疲労限界状態 (Fatigue Limit State) が設計を支配する要因となり、鋼鉄桁橋梁におけるそれ以上の高強度化は効果的でないことが示されている。その後、同様の検討^{6,7)}が種々行われ、鋼橋の大半を占める桁橋を対象とした場合、降伏強度500N/mm²が有効活用できるほぼ上限にあることから、BHS鋼の基本的な降伏強度を500N/mm²とすることが提案された^{1,8)}。

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、本州四国連絡橋で使用された引張強度780N/mm²レベル(降伏強度680N/mm²)の高強度鋼の活用が有効であることから、橋梁用高性能鋼BHSの降伏強度として500N/mm²に加えて700N/mm²が提案された^{1,8)}。これを受けて、BHS鋼の降伏点または耐力、引張強さに関する規格を表1のように定めた⁹⁾。

橋梁用鋼材の溶接施工性の向上は、製作面での効率化の観点で重要である。特に従来のSM570級以上の高強度鋼では冷間割れの抑制の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。BHS鋼では、高強度と溶接性を両立させるべく、予熱要否や予熱温度の指標となる溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) を低く抑えることによって、予熱の軽減、または、省略を図っている。表2に示すように、特にBHS500(W)では P_{CM} を0.20以下にすることによって予熱省略が可能な仕様としている。

また、溶接入熱量についても、BHS500(W)では従来のSM570で上限とされている1パスあたり7kJ/mmの制約をSM490材と同等である10kJ/mmに緩和することによって、溶接パス数を減らした大入熱溶接が適用可能な仕様とした。また、ニーズに応じて15kJ/mmへの対応も可能としている。

表1 BHS鋼の降伏点または耐力、引張強さ、シャルピー吸収エネルギー

Yield strength, tensile strength and Charpy absorbed energy of BHS steels

種類の 記号	鋼板の厚さ (mm)	降伏点又は 耐力(N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	シャルピー吸収 エネルギー(J)
BHS500 BHS500W	6 t 100	500以上	570 ~ 720	100 @ - 5 ¹
BHS700W	6 t 100	700以上	780 ~ 970	100 @ - 40 ²

1 Vノッチ圧延直角方向, 2 Vノッチ圧延方向

表2 BHS鋼の溶接割れ感受性組成、予熱条件と適用可能な溶接入熱 Weld cracking parameter (P_{CM}), preheating temperature condition and applicable heat Input for BHS steels

種類の 記号	鋼板の厚さ (mm)	P_{CM}	予熱条件	溶接入熱 (kJ/mm)
BHS500 BHS500W	6 t 100	0.20	予熱なし	10 以下
BHS700W	6 t 50	0.30	50	5 以下
	50 < t 100	0.32		

さらに、鋼橋において鋼材の冷間曲げ加工は、主桁、塔、橋脚、床版、鋼管構造を始め各種の部材で用いられており、鋼橋製作の有用な手法の一つである。しかしながら、鋼材の冷間加工は、歪時効による脆化に対して十分な配慮が必要であり、検討の結果^{3,4)}、道示でも、最小の冷間曲げ加工半径(通常R 15t)に一定の制限を設けている。BHS鋼では、表1に示すシャルピー吸収エネルギーを確保することによって、より設計の自由度の高い、曲率の小さな曲げ加工半径に対応可能な仕様としている。

また、橋梁部材においては、板厚方向に力を受ける継手も多数存在しており、厚さ方向特性にも配慮した。BHS鋼では、耐ラメラテア特性に影響する硫黄含有量を0.006%以下に抑えるとともに、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を目安とした。

橋梁用高性能鋼BHSでは、以上の各種性能に加えて、ミニマムメンテナンスのニーズに応えて、降伏強度500N/mm²、700N/mm²とも耐候性鋼仕様(BHS500W, BHS700W)を用意している。

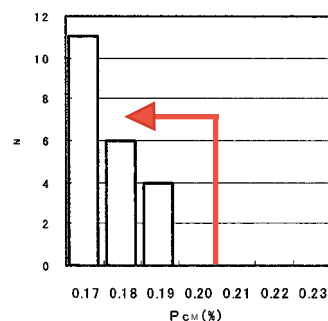
3. BHS500鋼実施例

3.1 BHS500鋼母材性能

BHS鋼を用いた国内初の物件である東京都南北水路橋には、板厚8 ~ 59mmのBHS500鋼が約1200トン使用された。その製造実績について紹介する。表3に化学成分実績値を示す。燐、硫黄、窒素の低減と共に、低炭素、低合金成分により溶接割れ感受性指数(P_{CM})は予熱なしで溶接が可能な0.20%以下を満足している(図2)。次に、

表3 BHS500の化学成分例(%)
Example of chemical compositions (%) of BHS500

	C	Si	Mn	P	S	V	N	P_{CM}
規格	0.11	0.55	2.00	0.020	0.006	-	0.006	0.20
実績	0.09	0.30	1.58	0.011	0.003	0.04	0.003	0.19

図2 BHS500の P_{CM} 実績
Measured P_{CM} of BHS500

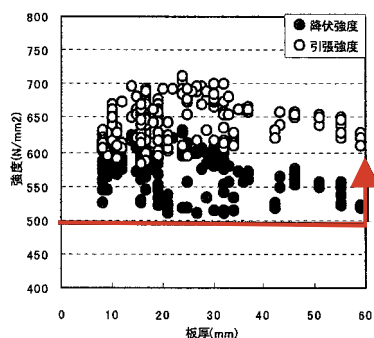


図3 BHS500の引張試験結果
Results of tensile test of BHS500

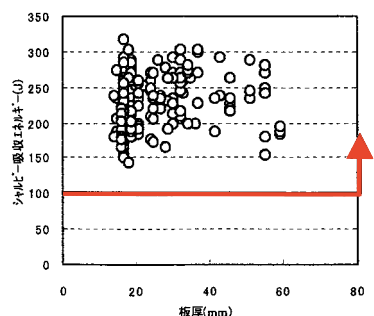


図4 BHS500の母材じん性(- 5)
Charpy absorbed energy at - 5 of BHS500

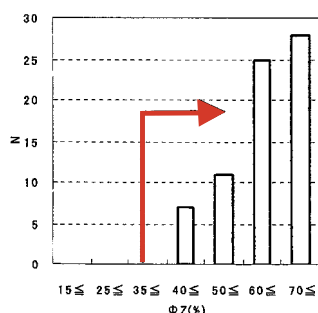


図5 BHS500の厚さ方向特性

Through thickness characteristics (percentage reduction of area, ϕ_z) of BHS500

機械的性質の実績を図3～5に示す。引張試験では降伏強度500N/mm²を十分満足し、シャルピー試験では一般的に圧延方向に比べ厳しい圧延直角方向で規格値である - 5 , 100Jを十分満足している。また、BHS500鋼では標準的な鋼材が有する母材性能として厚さ方向特性として絞り値35%以上が示されており、参考試験を行い満足していることを確認した。

3.2 BHS500鋼の製作性能

BHS500鋼は、高強度で有りながらSM490Y材相当の製作性能を有することがもう一つの特長である。冷間加工では歪み時効により靱性が劣化することが知られており、道示では構造物に脆性破壊が生じないように、時効後においても母材の要求靱性値を満足するように求められている。BHS500鋼では標準的な鋼材が有する性能として板厚の7倍以上の内側曲げ半径の冷間曲げ加工後も母材靱性値を確保するとされており、化学成分では窒素を60ppm以下に抑制している。これらを確認するために、歪み時効試験を実施した。歪み量としては曲げ半径5tに相当する10%(時効処理250 × 1hr)を与えたが、上記特性を十分満足することを確認した(表4)。

表4 BHS500の歪時効後のシャルピー試験結果
Charpy absorbed energy after strain aging

板厚 (mm)	歪量 (%)	シャルピー吸収エネルギー	
		方向	$\sqrt{E_a}$ (J)
40	0	圧延直角方向	316
	10		298

表5 BHS500の線状加熱試験
Results of line heating test

板厚 (mm)	条件		引張試験			シャルピー吸収 エネルギー (J)
	温度 ()	冷却	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI (%)	
40	900	空冷	534	637	30	293
	1000		529	633	29	295
	900	水冷	536	637	28	295
	1000		538	637	30	289

表6 BHS500のy形溶接割れ試験結果
Result of y-groove weld cracking test for BHS500

板厚 (mm)	溶接方法	溶接材料 (径mm)	入熱 (kJ/mm)	環境条件 温度() 湿度(%)	結果(予熱なし)
40	SMAW	L62CF(4.0)	1.7	20	割れなし
	GMAW	YM-60Q(1.2)		60	割れなし

次に、歪をガス炎によって矯正する場合には、靱性の劣化を防止するために、道示ではTMCP鋼の場合($C_{eq} = 0.38$)鋼板表面温度900以下で加熱直後水冷または空冷と制限されている。低 P_{CM} で製造されるBHS500鋼の特長を評価するために、新たに1000の線状加熱試験を追加して確認した。機械的性質はいずれも規格値を満足することを確認し(表5)、ひずみ矯正においても製作性向上が図れることが確認できた。

予熱温度低減は、BHS500鋼の最大の特長であり、道示に定められている P_{CM} 値に比べ低く規定(0.20%以下)し一般の施工であれば予熱不要の性能を持つ。そこで、y形溶接割れ試験により実際に予熱不要である事を確認した(表6)。

3.3 BHS500鋼溶接継手性能

道示では、継手性能を確保する観点からSM490クラスでは溶接入熱10kJ/mm以下、SM570クラスでは入熱7kJ/mm以下とするよう定められ、高強度鋼における製作性低下の一つの要因となっていた。そこで、BHS500鋼では溶接入熱をSM490クラスと同等とすることにより製作性改善を図ることとした。更に、本州四国連絡橋基準ではパス間温度が230以下と定められており、製作性低下の一因となっている。本開発では大入熱特性の確認と合わせ、パス間温度については橋梁製作段階で十分と考えられる300までの性能評価を行なった(表7)。その結果、強度(図6)、靱性(図7)とも規格値を満足し、溶接継手特性からも、BHS500鋼がSM490材相当の製作性能を有することが確認できた。

4. BHS700W鋼の製作性能

BHS700W鋼もBHS500鋼同様、製作性能向上が得られる鋼材であるが、BHS500鋼に比べ更に高強度であり、シャルピー試験温度も

表7 BHS500の継手性能評価条件
Welding conditions for weld joint tests of BHS500

溶接方法	板厚 (mm)	溶接材料		最高バス間温度 ()			最大入熱 (kJ/mm)
		ワイヤ (径mm)	フラックス	狙い	区分	実績	
SAW	40	JIS Z 3351	JIS Z 3352	200	1st	198	9.3
		YS-M5	FS-FG3		2nd	200	10.0
		銘柄Y-DM (4.8)	銘柄NF-320 32×D	250	1st	248	9.3
					2nd	248	10.0
				300	1st	288	9.3
					2nd	288	10.0

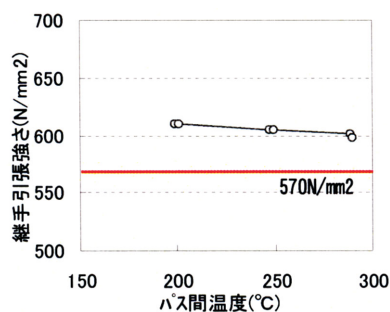


図6 継手引張試験結果
Result of weld joint tensile test

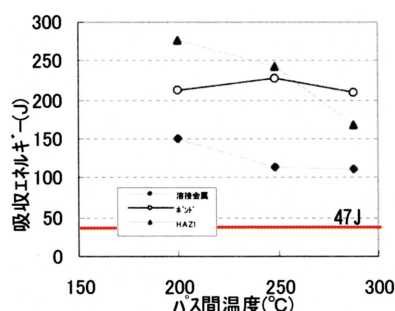


図7 継手シャルピー試験結果
Result of charpy test for weld joint

厳格となるため、例えば予熱温度は溶接金属割れを防止する目的で50℃，最大溶接入熱を5kJ/mm以下としている。BHS700W鋼について、BHS500鋼と同様の評価試験のうち特に製作性能について紹介する。

BHS700Wは、新日本製鐵が1994年に明石海峡大橋の補剛桁用に予熱温度低減(120→50℃)を目的に、低炭素、ボロン無添加とし、強度確保のためCu析出を活用し^{10,11)}、約4200トン納入実績のある製造方法に準じ下限保証降伏強度を15N/mm²向上させたものである。

前述の成分設計思想に基づきBHS700W鋼の製造を実施した。表8に化学成分を、表9に機械的性質を示す。BHS700W鋼としての性能を十分確保できていることが判る。製作性能評価では、曲げ特性として歪み時効試験により、曲げ半径5t(t:板厚)相当の歪みで

表9 BHS700Wの機械的性質
Mechanical properties of BHS700W

板厚 (mm)	引張試験			シャルピー吸収 エネルギー(圧延 方向)(J)	板厚方向 絞り (%)
	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)		
60	782	820	24	245	54

表10 歪み時効後のシャルピー試験結果
Charpy absorbed energy after strain aging

板厚 (mm)	歪量 (%)	シャルピー吸収エネルギー	
		方向	$\sqrt{E_{40}}$ (J)
60	0	圧延方向	245
	11		185

表11 BHS700Wの線状加熱試験結果
Results of line heating test for BHS700W

板厚 (mm)	条件		引張試験			シャルピー吸収 エネルギー (J)
	温度 (℃)	冷却	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	
60	900	空冷	785	827	25	250
	1000		768	827	24	269
	900	水冷	783	830	23	251
	1000		780	833	24	255

表12 BHS700Wのy形溶接割れ試験
Result of y-groove weld cracking test for BHS700W

板厚 (mm)	溶接方法	溶接材料 (径mm)	入熱 (kJ/mm)	環境条件 温度(℃) 湿度(%)	試験結果	
					予熱なし	予熱50
60	SMAW	L80EL(4.0)	1.7	20	17%(溶着金属)	割れなし
	GMAW	YM-80Q(1.2)		60	割れなし	割れなし

も十分な特性を有していることを確認した(表10)。線状加熱試験では、BHS500鋼同様1000℃水冷条件でも劣化は少なく(表11)、予熱温度に関しても溶着金属割れ防止のため50℃予熱で割れが無いことを確認した(表12)。

5. BHS鋼を適用した鋼橋の試設計

BHS鋼を鋼橋に適用した場合の試設計を実施しメリットについて検討を行った。支間長60mの連続合成桁橋を対象とし、鋼桁断面を決定、普通鋼材(道示記載SM570まで)とBHS鋼を用いた場合で検討した。

図8に従来のSM570とBHS500の降伏強度の比較を示す。また、対象橋梁の諸元を図9に示す。検討方法は以下の二通りで行った。

- 1) 道示に基づく許容応力度設計法の連続合成桁設計プログラムを利用して、表13にあるようなBHS500、BHS700Wの許容応力度を仮定し、断面設計を行った。BHS鋼には許容応力度が設定されてい

表8 BHS700Wの化学成分例(%)
Example of chemical compositions(%) of BHS700W

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	P _{CM}
規格	0.14	0.50	2.00	0.015	0.006	0.30	0.30 / 2.00	0.80	0.60	0.05	0.005	0.32*
実績	0.06	0.26	1.30	0.004	0.001	1.13	1.46	0.59	0.44	0.04	0.0002	0.28

* : t > 50

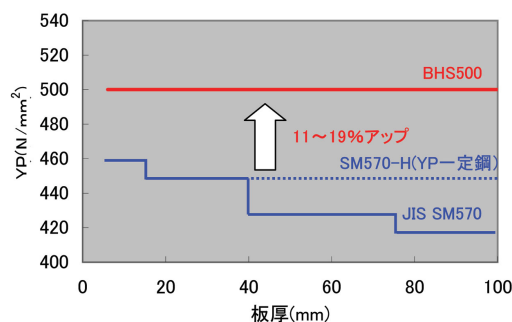


図8 SM570とBHS500の降伏強度の比較
Comparison of yield strength between SM570 and BHS500

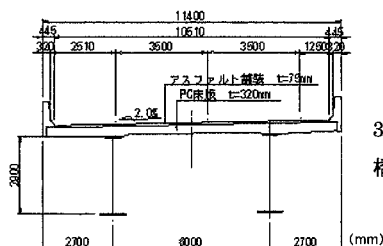


図9 対象橋梁の諸元
Dimension of bridge for trial design

表13 仮定したBHS鋼の許容応力度
Assumption of allowable stresses for BHS

		単位	BHS500	BHS700W
基準降伏点	σ_y	N/mm ²	500.0	700.0
許容引張応力度	σ_{ta}	N/mm ²	285.0	355.0
安全率	σ_y / σ_{ta}	-	1.75	1.97
許容せん断応力度	τ_a	N/mm ²	160.0	200.0

ないため、BHS500の許容引張応力度の安全率はSM570同等の1.75、BHS700Wの安全率はHT780同等の1.97を仮定した。

2)限界状態設計法(AASHTO-LRFD)に基づき、表14、15に示す荷重係数、抵抗係数を用いて、終局限界状態、使用限界状態の照査を行い、断面設計を行った。

以上の方法に基づき、従来鋼材との数量比較と国土交通省の積算基準を用いてコスト比較を行い、定量的メリットを算出した結果の一例を以下に示す。

製作工数に関してSM570材相当品による影響割増はBHS鋼について未定であるので、SM490Y相当の1.00からSM570相当の1.28の両ケースを含む4ケース(表16)で試算した。

1)SM570との比較で、BHS500、BHS700Wの使用により鋼材重量は高強度化に伴い減少し、許容応力度設計法によると、BHS500の場合約7%、BHS700Wの場合約15%減少する。

2)工事費(材工)ではBHS500適用ケースが最も優れ(表17参照)。

BHS500の製作工数の条件をSM570同等(1.28)とすると4%工費削減、SM490Y同等(1.00)とすると約10%削減が可能である。図10に工事費(比率)の比較を示す。

3)BHS500を適用した場合、SM570との比較で、上下フランジで最大19%の板厚低減が可能となり、特に厚手材での接合コスト低減

表14 抵抗係数
Resistance factors

Type of resistance	Resistance factor ϕ
For flexure	$\phi_f = 1.00$
For shear	$\phi_v = 1.00$
For axial compression	$\phi_c = 0.90$

表15 荷重係数
Load factors

Load combinations and load factors							
Limit state	Load factors						
	DC	DW	LL	IM	CR	SH	TU
Strength I	1.25	1.50	1.75	1.75	-	-	-
Service II	1.00	1.00	1.30	1.30	1.00	1.00	1.00
Constructibility	1.00	-	-	-	-	-	-

表16 検討ケース
Study case

	材 質	製作工数 割増係数
Case 1	SM570	1.28
Case 2	BHS500	1.00
Case 3	BHS500	1.28
Case 4	BHS700W	1.28

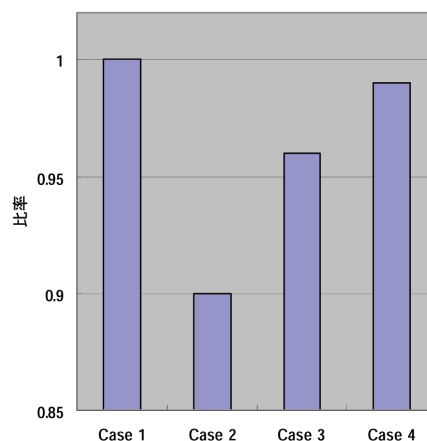


図10 試算工事費(比率)の比較
Comparison of total construction cost

表17 鋼重と試算工事費(比率)の比較
Comparison of steel weight and total construction cost

	Case 1 SM570 (YP = 450N/mm ²)	Case 2 BHS500 (YP = 500N/mm ²)	Case 3 BHS500 (YP = 500N/mm ²)	Case 4 BHS700W (YP = 700N/mm ²)
鋼重	1.00	0.93	0.93	0.85
コスト(材工)	1.00	0.90	0.96	0.99

4) 限界状態設計法 (AASHTO-LRFD) によると、負曲げモーメント断面では、上記条件での許容応力度設計による結果とほぼ同等の鋼重であり、正曲げモーメント断面では、許容応力度設計による結果に比べてさらに10%の鋼重低減が見られた。なお、これら上部工鋼重低減の効果は下部工のコスト縮減にも大きく寄与するが、その部分の試算は実施していない。

BHS鋼は東京港臨海道路(東京都江東区中央防波堤外側埋立地から若洲の4.6km)の橋梁に採用された。その一部となる南北水路横断橋(東京都発注)は、橋長256m、中央径間100mの鋼3径間連続鋼床版箱桁で、製作重量3988トン、内BHS500が29%に相当する1143トン使用されている。さらに、第三航路に位置する主橋梁となる仮称東京港臨海大橋(国土交通省発注)は、図11に示す橋長760m、中央径間440mのトラスボックス複合構造で、製作重量20250トン、内BHS500が51%に相当する10250トン使用される。国土交通省によれば、BHS鋼を使用したことで、東京港臨海大橋において鋼重で3%の減、トータルコストで12%のコストダウンが見込まれている。東京港臨海道路全体では、総鋼重約43000トン、内BHS鋼約16000トンの使用が計画されており、プロジェクト全体のコストダウンに大きく貢献することが期待される。

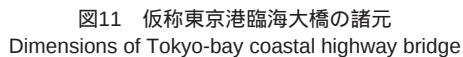


図11 仮称東京港臨海大橋の諸元
Dimensions of Tokyo-bay coastal highway bridge

鋼材の高性能化によって、鋼橋の経済的設計や、製作の効率化に寄与することを目標に、橋梁用高性能鋼BHS鋼の開発を行ってきた。本論文では、橋梁において求められる鋼材への要求性能とそれを実現するBHS鋼について検討の経緯と製造実績、経済性を含めたメリットについて概観した。今後、関係機関と連携して、高性能鋼材が広く活用できる設計や製作に関する技術基盤を整備し、良質で経済性の高い鋼橋の創出に貢献していきたいと考えている。

- 1) 三木千壽, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 橋梁用高性能鋼材(BHS500, BHS700W, BHS900W)の提案. 土木学会論文集, (738/I-64), 1-10(2003.7)
- 2) 本間宏二: 鋼橋部材における高性能鋼の活用に関する基礎的研究. 東京工業大学学位論文, 1997
- 3) 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 筈尾英弥, 奥村健人, 原修一: 冷間曲げ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, (570/I-40), 153-162(1997.7)
- 4) Homma, K., Miki, C., Yang, H.: Fracture Toughness of Cold Worked and Heat Affected Structural Steel, Engineering Fracture Mechanics, 59(1), 17-28(1998)
- 5) Homma, K., Sause, R.: Potential for High Performance Steel in Plate Girder Bridges. Proceedings of Structural Congress. American Society of Civil Engineers (ASCE), XIII, 1, 1995, p.177-192
- 6) 村越潤: 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, 38-2, 1996
- 7) 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, (654/I-52), 91-103(2000.7)
- 8) (社)日本鋼構造協会: 高機能・高性能鋼材の橋梁への利用報告書. 次世代土木鋼構造研究特別委員会, 2001.3
- 9) (社)日本鉄鋼連盟: 降伏点500N/mm²及び降伏点700N/mm²溶接構造用圧延鋼材. 日本鉄鋼連盟製品規定(MDCR0014-2004), 2005.3
- 10) 岡村義弘, 田中睦人, 奥島基裕, 山場良太, 為広博, 井上肇, 糟谷正, 瀬戸厚司: Cu析出強化型予熱低減HT800鋼の開発. 新日鉄技報, (356), 62-71(1995)
- 11) 岡村義弘, 糟谷正, 山場良太, 田中睦人, 為広博: Cu析出強化型予熱低減HT800鋼の開発. 鋼構造論文集, 1(1), 53-62(1994.3)
- 12) Miki, C., Homma, K.: High Performance Steel for Bridge Structures. Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Bangkok, Thailand, 3-5 August 2006