

高耐候性鋼材・高性能鋼材（BHS）の鉄道橋への適用性評価

北 健志* 杉 館 政雄* 杉 本 一朗*

Applicability Evaluation of Railway Steel Bridge Composed of
Ni-advanced Weathering Steels and High Performance Steel Materials

Kenji KITA Masao SUGIDATE Ichiro SUGIMOTO

The revised design standard of railway steel structures and composite girders adapted the recently developed steel materials including Ni-advanced weathering steels and Bridge high performance steels (BHS). There is a possibility that Ni-advanced weathering steels can be applied without painting even more corrosive environment. BHS have high strength and good weld ability. This paper explains the applicability evaluation method of the Ni-advanced weathering steels, which was obtained from the result of exposure tests, and the advantages of application of BHS for composite girders from the result of trial design.

キーワード：Ni系高耐候性鋼材，高性能鋼材（BHS），ワッペン式曝露試験，適用性評価，試設計

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）では、鋼・合成構造物を設計する際に、照査の基本として要求性能を満足することとしている。また、設計において、製作から維持管理までを視野に入れた構造計画を行うことが重要であるとしている。製作から維持管理の各段階において、コスト低減を図ることができれば有益である。このコスト低減に関する方策の一つとして、近年開発されている新しい材料を適用することが考えられる。

そこで、新しい材料の検討として、既実績があり、ニーズが非常に高い材料として、海岸近くでも無塗装で適用できるように耐候性を高めたNi（ニッケル）系高耐候性鋼材と、強度や溶接作業性の向上を図った橋梁用高性能鋼材（BHS：Bridge High performance Steel）の2種類の鋼材を対象とし、適用上の課題を挙げながら、具体的な事例に基づいて評価法を検討したのでその結果を以下に示す。

2. Ni系高耐候性鋼材の適用性評価

2.1 耐候性鋼材とNi系高耐候性鋼材について

耐候性鋼材は、表面に緻密なさび層（保護性さび）を形成し腐食を次第に抑制する特性がある。一方、塩分量が多く腐食環境が厳しい場合には、保護性さびは生成せずに耐荷性の低下等の影響をおよぼす層状剥離さびが形成される。このため、現在JIS G 3114で規定されている

溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材（以下、「JIS耐候性鋼材」と称す）の適用においては、適用地域が制限されている^{1, 2)}。

これに対して、Ni系高耐候性鋼材は、JIS耐候性鋼材が適用できなかった地域への適用拡大を目的として開発されたものであり、JIS耐候性鋼材と比較して、主にニッケルを多く添加し、耐候性をさらに高めた鋼材である。表1にNi系高耐候性鋼材の種類と成分の特徴等を示す。また、Ni系高耐候性鋼材が適用されている例を図1に示す。

表1 Ni系高耐候性鋼材の種類と成分の特徴

種類の記号	成分の特徴	機械的性質等の規定
SMA400W-MOD	3%Ni-Cu系 2.7%Ni-Cu-Ti系	JIS耐候性鋼材 SMA400W と同一
SMA490W-MOD	2.5%Ni-極低炭素系 1.5%Ni-Mo系	JIS耐候性鋼材 SMA490W と同一
SMA570W-MOD	1.2%Ni-Cu系 1.0%Ni-Cu-Ti系	JIS耐候性鋼材 SMA570W と同一



図1 北陸新幹線（北陸道架道橋）
（写真提供：鉄道・運輸機構，新日鐵株）

* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）

特集：鋼・合成構造物の設計技術

2.2 無塗装橋梁の新しい評価法

2.2.1 現行のJIS耐候性鋼材の評価法

現行のJIS耐候性鋼材を用いた無塗装橋梁の適用に関しては、全国曝露試験等の研究成果²⁾をもとに飛来塩分量(側方遮蔽条件)を指標とした評価法を手引き³⁾に規定し、実務上への考慮から離岸距離による適用の可否を定めている(図2)。しかし、この評価法には、飛来塩分量以外の腐食因子やNi系高耐候性鋼材の優位性等は考慮されていない。

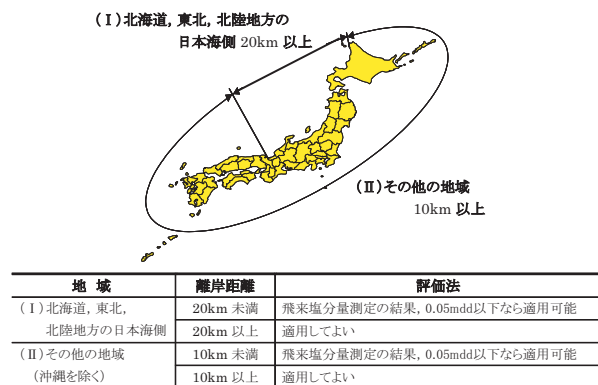


図2 現行のJIS耐候性鋼材の評価法

2.2.2 曝露試験による評価法

曝露試験は、飛来塩分量や湿度・気温等のすべての腐食因子の影響が含まれた腐食減耗量を直接把握できる方法であり有用である。近年では、従来の曝露試験方法を改良した曝露試験(以下、「ワッペン式曝露試験」と称す)を用いた評価法も提案されている。これは薄い軽量の曝露試験片(ワッペン)を使用し、建設予定地や近隣の既設橋梁で1年間の曝露試験を行うものである。この腐食減耗量を求めることにより、次項に示す腐食減耗量の予測式に適用することができる。

2.2.3 腐食減耗量の予測式を用いた評価法

腐食減耗量を予測する方法としては、例えば、文献1)に示す予測式が提案されている。

この方法は、建設予定地の腐食環境や鋼材の合金成分等から決まる腐食速度パラメータA、Bおよび曝露期間X(年)を用いて、累積腐食減耗量Y(mm)を予測するものであり、式(1)にて示される。

$$Y = A \cdot X^B \quad (1)$$

ここに、Y：累積腐食減耗量(mm)、X：曝露期間(年)
A：局部環境腐食性指標、B：保護性さび形成指標

式(1)において、X=1(年)を代入するとY=Aとなり、Aは1年間の耐候性鋼材の腐食減耗量(mm)に相当する。Bは鋼材表面に形成される保護性さびの機能により、腐食速度が低下する度合いを示す。また、Ni系高耐候性鋼材の累積腐食減耗量は、文献6)に基づき、耐候性合金

指標(V値)を介してJIS耐候性鋼材のAおよびBに関連付けることでも予測できる。

この累積腐食減耗量の予測値と各耐腐食性能レベルの要求指標¹⁾との比較を行うことにより、無塗装橋梁の適用性を評価することが可能となる。耐腐食性能レベルは、3段階のレベルが規定されており、通常は耐腐食性能レベルIを満足することが目標となり、要求指標は片面平均0.50mm/100年以下の腐食減耗量である。

上述した無塗装橋梁の適用性の評価に関しては、腐食減耗量予測プロセスを総合化したソフトウェアが開発されている⁷⁾。このソフトウェアでは、任意の建設地点における長期の累積腐食減耗量を予測し、鋼材種別の選定に役立てることが可能となっている。

2.3 ワッペン式曝露試験による評価事例

2.2.2および2.2.3の評価法を検証するため、耐候性鋼材等のワッペン式曝露試験を実施した例を示す。

曝露試験を行った地域環境は、日本海から60mの距離に位置し、冬季は強い北風にさらされることもあり、非常に腐食環境が厳しい。特に図3の4P下段では、飛来塩分量が1.70mddに達し、JIS耐候性鋼材の適用の制限値(0.05mdd)の34倍にもなる。

曝露試験の設置位置は、過去に飛来塩分量測定を行った橋脚の上部・下部の4カ所とした。そして、各橋軸方向の梁部材の4方向に、表2に記す3種類のワッペン式曝露試験片を設置した(図4)。曝露期間は、1年、3年および5年とした。

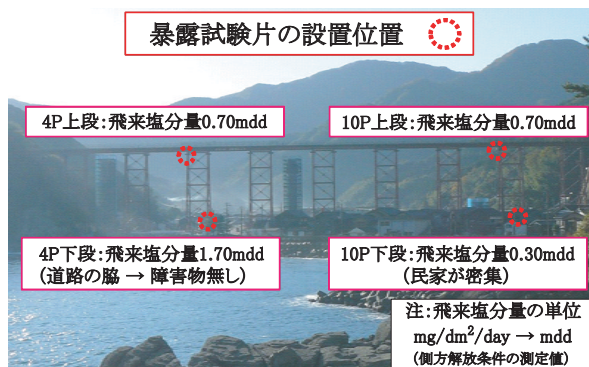


図3 曝露試験片の設置位置と飛来塩分量

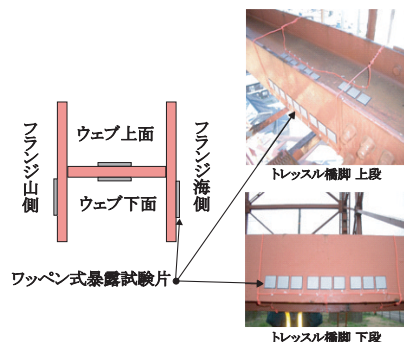


図4 ワッペン曝露試験片の設置部位

表2 ワッペン式曝露試験片の種類

曝露試験片の種類	成分の特徴
Ni系高耐候性鋼材	3%Ni-0.4%Cu
Ni系高耐候性鋼材	1.5%Ni-0.3%Mo
JIS耐候性鋼材	0.3%Cu-0.5%Cr

2.4 ワッペン式曝露試験の結果

1, 3年および5年後に回収したワッペン式曝露試験片より腐食減耗量やさびの外観等の評価を行った。

今回の評価は、付着した塩分が雨水により洗浄されないために腐食が発生しやすい^{4, 5)} ウェブ下面に着目部位とした。図5に、1年後の試験片の腐食減耗量を示す。腐食減耗量は、試験片の種類間での差は小さく、10P下段で約0.015mm、10P上段および4P上段で約0.030mm、そして、飛来塩分量の最も多い4P下段で約0.075mmであった。

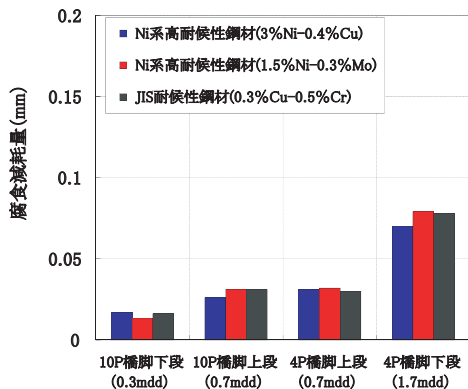


図5 各試験片の腐食減耗量（1年曝露）

図6に、3年後の試験片の腐食減耗量を示す。10P下段は、曝露1年目からの変化量が小さく腐食減耗量が抑制されて

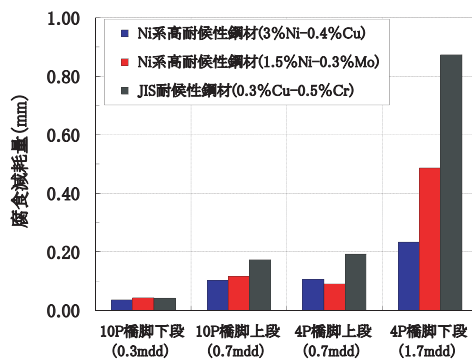


図6 各試験片の腐食減耗量（3年曝露）

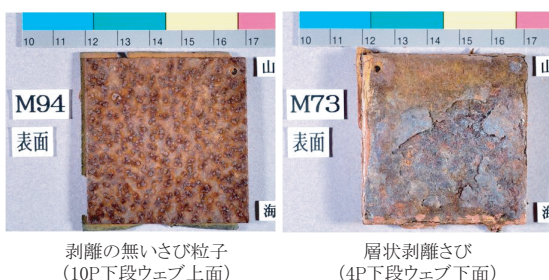


図7 ワッペン式曝露試験片のさび外観の例

いることを確認した。一方、他の曝露位置の腐食減耗量は大きく増加しており、4P下段等の試験片の表面には、層状剥離さびが発生していた（図7）。また、腐食環境の厳しい設置位置では層状剥離さびが生じていたものの、その中で見るとNi系高耐候性鋼材の腐食減耗量は、JIS耐候性鋼材と比較して小さいことを確認した。

2.5 累積腐食減耗量の予測による評価結果

1, 3年および5年後の曝露試験結果と式(1)から、累積腐食減耗量の予測を行い、10P下段における無塗装橋梁の適用性の評価を行った。図8に、腐食減耗量の測定値（実線）および累積腐食減耗量の予測値（破線）を両対数グラフで示す。

100年後の累積腐食減耗量の予測値について、JIS耐候性鋼材は1.00mmを超えているが、Ni系高耐候性鋼材はJIS耐候性鋼材と比べて小さな値となっており、3%Ni-0.4%Cuの鋼種は耐腐食性能レベルIの要求指標(0.50mm/100年)を満足する結果となった。

このため、本評価法を用いることにより、Ni系高耐候性鋼材を適切に評価することが可能となり、特別な維持管理を要さない程度に腐食速度を低減させることができるものと思われる。

これより、現行の適用性の評価法では、離岸距離および飛来塩分量の指標により、JIS耐候性鋼材の適用は不可と評価されていたが、今回の曝露試験の結果と累積腐食減耗量の予測による評価法を用いることにより、Ni系高耐候性鋼材を用いた無塗装橋梁の適用が可能となる傾向を見出した。

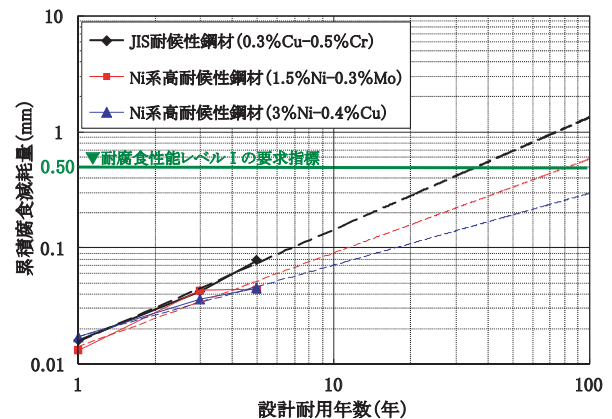


図8 腐食減耗量の予測結果（10P下段ウェブ下面）

2.6 無塗装橋梁の評価法のとめ

無塗装橋梁の適用に関する評価法について、近年提案されている累積腐食減耗量の予測式の適用性を検討した。そして、腐食環境の厳しい地域にて、JIS耐候性鋼材やNi系高耐候性鋼材のワッペン式曝露試験を実施し、雨がかりの無いウェブ下面に着目して累積腐食減耗量の測定を行った。

累積腐食減耗量の予測式と今回得られたワッペン式曝

特集：鋼・合成構造物の設計技術

露試験の結果を用いて、設計耐用期間における累積腐食減耗量を予測し、耐腐食性能レベルの要求指標との比較を行った。これより、累積腐食減耗量の予測式を用いることで、現行の評価法よりも詳細な評価を行うことができ、Ni系高耐候性鋼材を適切に評価することが可能となった。

なお、以上の結果を踏まえて、今回改訂する標準では、第I編5章材料および第II編5章耐久性の検討において、累積腐食減耗量の予測による評価法の記述を盛り込む予定である。

3. 橋梁用高性能鋼材の新しい評価法

3.1 橋梁用高性能鋼材について

橋梁用高性能鋼材（BHS）は、鋼橋の高品質化と製作コスト削減を目的として開発された鋼材であり、製鋼過程における高度な熱加工制御技術による組織制御等を経て、従来の鋼材に対して降伏強度、溶接性および加工性等を向上している。実用化に向けた研究の結果⁷⁾、2008年11月に橋梁用高降伏点鋼板（Higher yield strength steel plates for bridges）として日本工業規格（JIS G 3140）に制定されている。また、橋梁用高降伏点鋼板（以下、「SBHS」と称す）には、SBHS500、SBHS500W、そしてSBHS700、SBHS700Wの4種類の規格が制定されている。

3.2 試設計の概要と設計条件

SBHSを鉄道橋に使用した場合の試設計を実施し、適用性や利点について検討を行った。試設計では、新幹線合成桁の標準的なスパン40m、60m、80mの単純合成桁を対象とした。鋼材は、SBHSに対して、一般に鋼鉄道橋に用いられている普通鋼材の中で、最も強度の高いSM570を比較の対象とし、SBHSは、SBHS500を想定して試設計を実施した。なお、SBHS700については、疲労強度など設計上検討すべき課題⁷⁾が残されていると考えられることから検討の対象外とした。

表3に設計条件を、表4には基本強度を示す。ここで、SBHS500の基本強度はJIS G 3140の保証降伏点強度と

表3 設計条件

項目	条件
構造形式	合成桁（複線2主桁：箱形）
スパン	40m, 60m, 80m
列車荷重	新幹線荷重 P-16 (作用修正係数 $\rho_i = 1.23$)
列車速度	260km/h
軌道構造	スラブ軌道（ロングレール）

表4 基本強度 f (N/mm²)

SM570	SBHS500
450	500

表5 軸方向圧縮強度の特性値 σ_{cu} (N/mm²)

SM570	SBHS500
$0 < l/r \leq 7$ 450	$0 < l/r \leq 6$ 500
$7 < l/r \leq 95$ $450-3.56(l/r-7)$	$6 < l/r \leq 90$ $500-4.16(l/r-6)$
$95 < l/r$ $1234000(r/l)^2$	$90 < l/r$ $1227000(r/l)^2$

ここに、 l ：部材の座屈長、 r ：断面二次半径

している。表5に軸方向圧縮強度の特性値を示す。図9に試設計の対象橋梁のうちスパン60mの断面図を示す。なお、SM570およびSBHS500における材料係数などの安全係数は同じ値とした。

3.3 試設計の比較項目

試設計の比較は、現行の設計標準の終局限界状態に相当する項目として安全性（耐荷性）と、疲労限界状態に相当する項目として安全性（耐疲労性）、安全性（走行安全性）、そして使用限界状態に相当する項目として使用性（乗り心地）について行った。ここで、安全性（走行安全性）と使用性（乗り心地）は、変位制限標準⁸⁾に準じて照査を行った。

なお、耐久性の検討は、適切な防錆・防食方法と維持管理を行うことを前提とすることにより、今回の試設計においては、その検討を省略した。

断面図

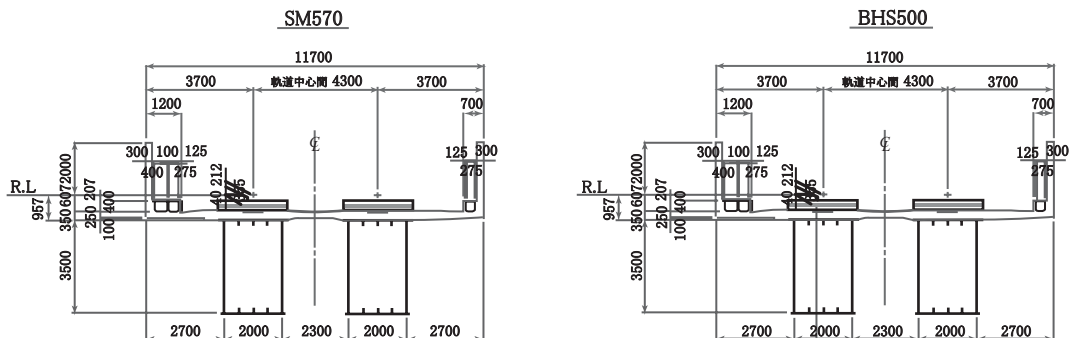


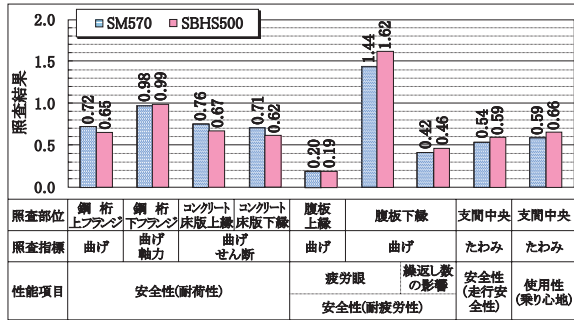
図9 本試設計の対象橋梁（スパン60m）の断面図

3.4 試設計結果

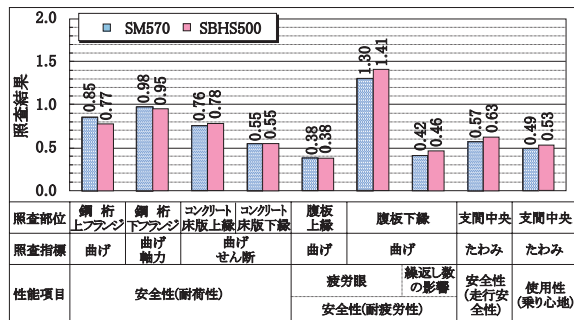
図10の(a)～(c)にスパン40m, 60m, 80mにおける照査結果を、表6に、照査を満足したときのスパン中央の断面構成を示す。ここで、照査は、(2)式にて行った。

$$\gamma_i \cdot I_{Rd} / I_{Ld} \leq 1.0 \quad (2)$$

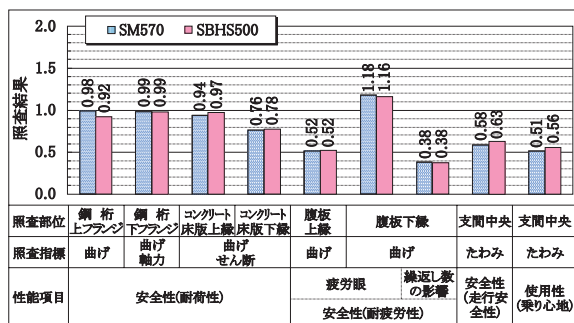
ここに、 γ_i は構造物係数、 I_{Rd} は設計応答値、 I_{Ld} は設計限界値である。図10の(a)～(c)の縦軸には、(2)式の



(a) スパン40mの照査結果



(b) スパン60mの照査結果



(c) スパン80mの照査結果

図10 各スパンにおける照査結果

左辺により算定される値を照査結果として記している。

また、図11は、各スパンにSM570, SBHS500を用いた場合の鋼重の比較結果を示したものである。

以下に、照査結果から認められる傾向を記す。

(1) 安全性(耐荷性)の照査では、下フランジ部の照査結果が最も1.0に近く、これにより桁断面が決定していることが読み取れる。また、基本強度が高いSBHS500を用いることで、SM570と比較して5～7%の鋼断面積の低減が可能となる(図11)。

以上より、安全性(耐荷性)に関しては、SBHS500を使用した方が有利であると考えられる。

(2) 安全性(耐疲労性)の照査では、腹板下縁の溶接部(E等級)が最も厳しい結果であり、照査結果はSM570と比較して、SBHS500を用いた場合の方が若干厳しかった。これはSBHS500を用いて桁断面を低減したことで、設計応答値が大きくなる一方、設計限界値については、溶接継手の疲労強度が鋼材の種類によらずに一定であるためである。

しかし、本試設計の照査結果は0.50以下であり、桁断面が決定するケースは無いことから、実用上はSBHS500の適用が十分可能であると考えられる。

(3) 安全性(走行安全性)および使用性(乗り心地)の照査では、SBHS500を用いて桁断面を低減したことで、桁断面の剛性が低下し、たわみが増加する。そのため、一般に、高強度鋼材等を用いて桁断面を

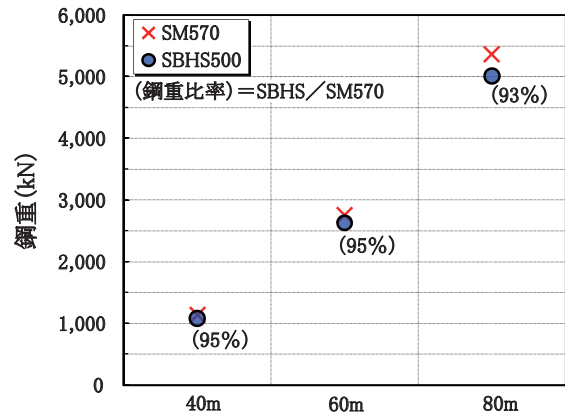


図11 鋼重の比較結果

表6 スパン中央の断面構成と主な諸元

対象橋梁		スパン 40m		スパン 60m		スパン 80m	
断面	材質	SM570	SBHS500	SM570	SBHS500	SM570	SBHS500
中央断面 断面構成等	コンクリート床版	1- C 5850 × 250 = 14625.0	1- C 5850 × 250 = 14625.0	1- C 5850 × 250 = 14625.0	1- C 5850 × 250 = 14625.0	1- C 5850 × 250 = 14625.0	1- C 5850 × 250 = 14625.0
	上フランジ	1- PL 2300 × 15 = 345.0	1- PL 2300 × 15 = 345.0	1- PL 2300 × 16 = 368.0	1- PL 2300 × 16 = 368.0	1- PL 2300 × 20 = 460.0	1- PL 2300 × 18 = 414.0
	腹板	1- PL 2341 × 9 = 210.7	1- PL 2341 × 9 = 210.7	1- PL 3500 × 14 = 980.0	1- PL 3500 × 14 = 980.0	1- PL 4200 × 17 = 1428.0	1- PL 4200 × 17 = 1428.0
	腹板	1- PL 2200 × 9 = 198.0	1- PL 2200 × 9 = 198.0	1- PL 3500 × 14 = 980.0	1- PL 3500 × 14 = 980.0	1- PL 4200 × 17 = 1428.0	1- PL 4200 × 17 = 1428.0
	下フランジ	1- PL 1500 × 26 = 390.0	1- PL 1500 × 22 = 330.0	1- PL 2300 × 23 = 529.0	1- PL 2300 × 19 = 437.0	1- PL 2300 × 38 = 874.0	1- PL 2300 × 32 = 736.0
諸元	腹板中心間	上側 2000 (mm) 下側 1200 (mm)		上側 2000 (mm) 下側 2000 (mm)		上側 2000 (mm) 下側 2000 (mm)	
	鋼桁断面積	120,250 (mm ²)	114,250 (mm ²)	195,170 (mm ²)	185,970 (mm ²)	284,900 (mm ²)	266,080 (mm ²)
	鋼桁 Isx	0.1134 (m ⁴)	0.1056 (m ⁴)	0.3962 (m ⁴)	0.3699 (m ⁴)	0.8204 (m ⁴)	0.7436 (m ⁴)
	合成桁 I _{vx}	0.2512 (m ⁴)	0.2277 (m ⁴)	0.8414 (m ⁴)	0.7711 (m ⁴)	1.640 (m ⁴)	1.509 (m ⁴)

特集：鋼・合成構造物の設計技術

低減した場合には、走行安全性や乗り心地の照査結果が厳しくなる傾向にある^{9, 10)}。

しかし、本試設計の安全性（走行安全性）および使用性（乗り心地）の照査結果には余裕があることから、実用上はSBHS500の適用が十分可能であると考えられる。

以上の結果、SM570, SBHS500ともに安全性（耐荷性）の照査で桁断面が決定しており、SBHS500を使用した場合には、SM570と比較して5～7%の鋼重低減が可能となった。なお、今回の試設計では、安全性（走行安全性）や使用性（乗り心地）の照査結果に余裕があったが、複数連の場合には、たわみの限界値が厳しくなるため、これらの性能項目から桁断面が決まる場合もありうる。

3.5 溶接作業の合理化による製作費の低減

SM570等の高強度鋼を用いた鋼桁の工場や現場での溶接においては、予熱作業の負担が大きく、予熱費用の増加や工程的にも多くの時間が必要となる。これに対して、SBHSは、非常に優れた耐冷間割れ特性を有するため、溶接時に必要な予熱の工程を省略化することができる。

SM570では必要となる予熱工程に対して、SBHSを用いることにより下記の桁断面の予熱工程を省略することが可能となる。

- ・下フランジ板継組立および溶接
- ・ダイアフラム、横リブ組立および溶接
- ・フランジパネル組立および溶接
- ・ウェブパネル組立および溶接

スパン80mの工場製作費（鋼材費を含まない）について、これらの予熱工程の省略による工場製作費を試算した。この結果、SM570使用の場合と比較して、工場製作費を約8%低減できる結果となった。これより、SBHS500の使用は溶接作業の合理化に寄与するものと期待される。

4. まとめ

本研究では、近年開発されたNi系高耐候性鋼材とSBHS500の鋼鉄道橋への適用性の評価法を検討した。Ni系高耐候性鋼材に関しては、ワッペン式曝露試験による腐食減耗量の測定と、累積腐食減耗量の予測式から、従来の評価法よりも精度の高い評価法が適用できることを示した。SBHSに関しては、新幹線合成桁の標準的なスパンを対象として試設計を行いSBHS500の特徴と利点を示した。そして、本結果を踏まえて、新しく開発された

鋼材を適切に適用できるように、設計標準を改訂し、今回紹介した以外の新しい鋼材についても、それらの特徴を活かした評価法を検討していく予定である。

謝辞

本検討は、国土交通省からの委託を受けて実施した「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として行ったものである。

ワッペン式曝露試験は、西日本旅客鉄道(株)および(株)日本鉄鋼連盟橋梁用鋼材研究会の協力を受けて実施した。また、SBHSの適用性検討の一部については、国土交通省からの補助金を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

文献

- 1) (株)日本鋼構造協会：耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術、2006.10
- 2) 建設省土木研究所, (株)鋼材倶楽部, (株)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) 整理番号 88 号, 1993.3
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：無塗装鋼鉄道橋設計施工の手引き, 1994
- 4) 市川篤司, 加藤健二, 川原田亨：海岸線近くに架設された鉄道無塗装トラス橋の調査, 鉄道総研報告, 1998.9
- 5) 山口栄輝, 中村聖三, 廣門公二, 森田千尋：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, No.62, 2006
- 6) 三木千壽, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋：無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, 2003.7.3
- 7) 三木千壽, 市川篤司, 楠 隆, 川端文丸：橋梁用高性能鋼 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集 No. 738/I-64, 2003.7
- 8) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (変位制限), 丸善, 2006
- 9) 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, 2000.7
- 10) 杉舘政雄, 後藤貴士, 村田清満, 市川篤司：高強度鋼の鋼鉄道橋への適用性に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.14, No.8, 2008