

橋梁「材料編」*

加藤 真志**, 西村 公宏**



加藤 真志



西村 公宏

Structural Steels for Bridges (Materials) *

by KATO Masashi** and NISHIMURA Kimihiro**

キーワード 橋梁用, 道路橋示方書, 耐候性鋼, SBHS, TMCP

1. はじめに

国内では橋梁は年間どのくらい造られているのか？図1は日本橋梁建設協会の年度別鋼橋受注実績^①を1964年度からグラフ化したものである。なお、受注実績は年度に架けられた橋梁の鋼重とは異なる。同図によれば、ピーク時の1995年には90万トンに達しているが、至近の2011年度は約27万トンまで落ち込んでいる。これは過去約50年間の推移を見ても極めて低いと言える。

我が国の橋梁数は、橋長15m以上の橋は15万橋、橋長2m以上の橋は70万橋存在すると言われている^②。図2は鋼橋、コンクリート橋他全ての15m以上の橋梁箇所数を年度毎にまとめたものである^③。高度成長期に多くの橋梁が建設されたことが分かる。最新技術が集約された現在の橋梁に対して該当するか明確ではないが、古く造られた橋梁の多くは建設後50年で老朽化が進み、50年を目処に架け替えられていると言われている^④。現在の橋梁新設数の落ち込みを考慮すると、図2に示されるように1980年頃までに建設された橋梁は、これから約20年後に供用50年を超える。その橋梁の割合は、大雑把に見積もっても全体の約半数に達することとなる。その結果、補修や新設が順調に進まないと仮定すれば、現在の橋長15m以上の15万橋は維持できなくなり、経済活動に弊害が生じるものと考えられる。我が国の持続的な経済発展を維持していくためには、橋梁の更新や再生は必須である。従って、橋梁需要は現在の量よりも将来的には増加し、図1に示した年度毎の橋梁受注量や図2に示した総橋梁数は、将来的には右上がりに回復することが期待される。

本報告では、船舶、自動車、建産機、建築、基礎工、特

殊容器等、橋梁以外の分野における技術者の方々に対し、橋梁用鋼材がどのような基準、考え方で使われているのか、製造や溶接のポイントは何か？基本的な部分を解説する。また、紙面の都合により、一般的な道路橋に話題を絞ることとする。

2. 適用材料と製造プロセス

2.1 適用材料

2.1.1 橋梁用鋼材の概要

日本の道路において、その根幹となる法律は道路法である。道路法と、その関係法令である道路構造令は、必要な技術的基準を政令で定めることができるとしており、その技術的基準が道路橋示方書である。国土交通省の都市・地域整備局長、道路局長より、「橋、高架の道路等の技術基準」として通達されるものであり^④、最近では2012年（平成24年）に改訂が行われた^⑤。

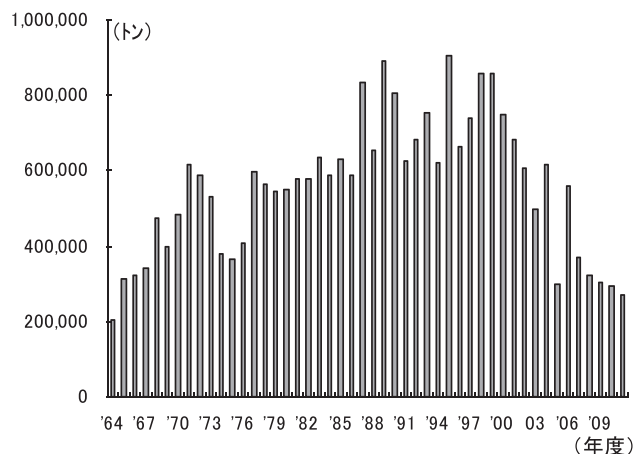


図1 橋梁受注実績

*原稿受付 平成24年11月26日

** JFEスチール(株) JFE Steel Corporation

***正 員 JFEスチール(株) Member, JFE Steel Corporation

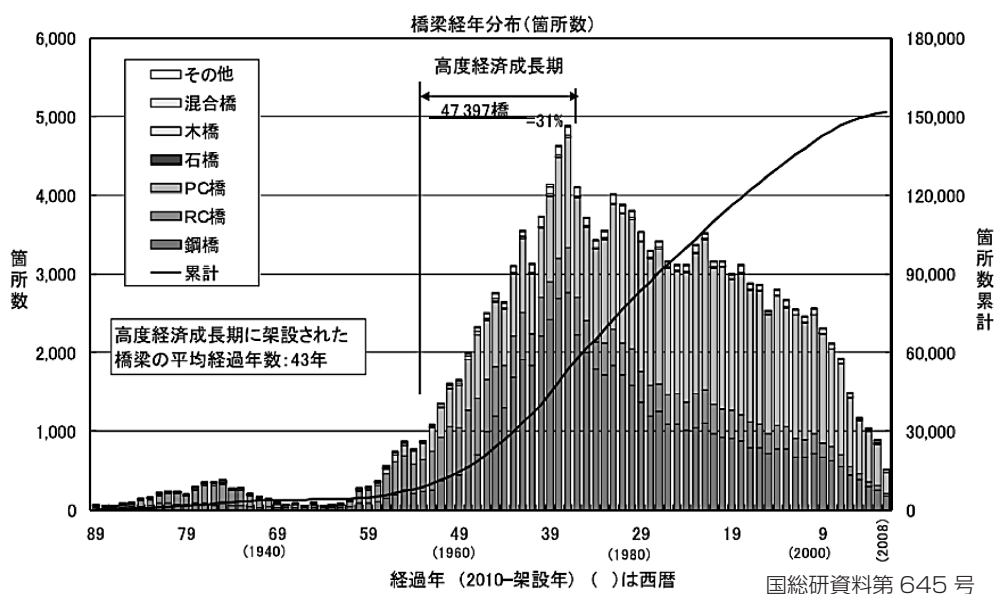


図2 道路橋ストックの現状

道路橋示方書の対象は、支間 200 m までの設計および施工が対象であり、それ以上の規模を有する橋梁に対しては、道路橋示方書に適正な補正を行うことにより準用できるとされている。

道路橋示方書の使用材料について、鋼材は、強度、伸び、じん性等の機械的性質、化学組成、有害成分の制限、厚さやそり等の形状寸法の特長や品質が確かなものでなければならない、と規定されている。

なお、構造用鋼材（橋梁上部工の桁や横構など主構造を構成するもの）、鋼管（下部工に適用される鋼管杭）、接合用鋼材（鋼材同士を締め付け力で接合する部品）、溶接材料、鍛造品（主として二次的な付属品）、線材と棒鋼（コンクリート構造に適用されるプレストレス締め付け部材、引張強度不足を補うための鉄筋）、頭付きスタッド（鋼部材とコンクリート部材を接合するための部材）は各々 JIS で規定されており、道路橋示方書に明記されたものであれば、上記の機械的性質等を満たすものとみなす、とされている⁵⁾。

つまり、橋として、全体構造及び構造部材の安全性、耐久性、又は溶接等の施工性等の使用目的に応じて要求される種々の特性や品質を保証するのは JIS 材であり、そのため鋼材検査証明書を確認することによって、所要の特性や品質を有するという基準が定められている。なお、製作、施工の合理化や経済性、又は耐久性等の性能向上を目的とした新しい鋼材の適用にあたっては、鋼材特性が構造物の性能に及ぼす影響を試験等によって確認するとともに、品質についても JIS 規格と同等であることを確認することが要求されている⁵⁾。

以降、紙面の都合もあるため、本報告では構造用鋼材を中心に述べる。

道路橋示方書の構造用鋼材を見ると、構造用鋼材としては、一般構造用圧延鋼材、溶接構造用圧延鋼材および溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材（W 種のみ）が示されている。昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書⁶⁾では、現在の規格に相当する JIS G 3101 の一般構造用圧延鋼材

である SS41 のみが規定されていた。現在の道路橋示方書⁹⁾では、SS400、SM400 の A、B、C、C-H、SM490 の A、B、C、C-H、SM490Y の A、B、SM520 の C、C-H、SM570、SM570-H、SMA400 の AW、BW、CW、CW-H、SMA490 の AW、BW、CW、CW-H、SMA570 の W、W-H の 25 種に至っている。鋼種の選定にあたっては、部材の応力状態、製作方法、架橋位置の環境条件、防せい防食法等に応じて、鋼材の強度、伸び、靱性等の機械的性質、化学組成、有害成分の制限及び厚さやそりなどの形状寸法等の特長や品質を考慮して適切に選定することとなっている⁹⁾。

なお、鋼種の選定において特に配慮すべき事項は下記のとおりである。

1. 低温度地域への適用
2. 溶接による拘束力を受ける部材で板厚方向に引張力を受ける場合
3. 主要部材において小さい曲げ半径で冷間曲げ加工を行う場合
4. 予熱温度を低減して溶接施工を行う場合
5. 溶接入熱量の大きい溶接法を適用する場合

1. は気温が著しく低下する地方での低温じん性に対する配慮である。2. の板厚方向に引張応力を受ける主要部材に対しては、表 1 の厚さ方向の絞り値を規定するが、この場合は溶接継手の種類や、応力状態によって必要な特性値が異なることに注意する必要がある。なお、この特性値の決定には文献⁷⁾等が参考になる。3. の曲げ加工に関しては、曲率半径が板厚 t の 15 倍、即ち $15t$ 以上が一般的な規定であるが、表 2 のように、所要のシャルピー吸収エネルギーが保証されれば、曲率半径を $7t$ あるいは $5t$ のように下げることが許容されている。溶接に関する 4. と 5. については、次節で述べる。

表 3 は、板厚による鋼種選定基準である。同じ強度グレードでも板厚が厚い場合はシャルピー靱性値が保証された鋼種（B または C）を使用することが規定されている。JIS 規格では、表に示した 25 種については、全てにおいて適用

が JIS SMA に対する飛来塩分量 0.05 mdd であり、この値は 50 年後推定板厚減少量が、概ね 0.3 mm 以下となる値として設定された¹⁰⁾。しかし、その後鉄鋼各社でニッケル系高耐候性鋼が開発され¹¹⁾、Ni 等の合金元素を高めた結果（概ね Ni が 1% から 3% であり、JIS SMA の Ni よりも一桁多い）、0.05 mdd を超える環境においても無塗装使用が可能なるものである。JIS 規格化はされておらず、各社の評価基準（想定橋梁地点環境下での長期間腐食量予測）によって、適用判断がされているが、飛来塩分量は JIS SMA よりも大きい値が想定されている¹¹⁾。

それでは、JIS SMA、ニッケル系高耐候性鋼はどのような判定基準で橋梁への適用評価がされるのか？その評価フローの例として腐食予測の例を図 3 に示す¹²⁾。先ず入力データとして、対象とする橋梁の場所、離岸距離を入力する。次にその値から、近傍の気象官署のデータから温度、湿度を抽出し、飛来塩分量を文献 13) に示される式（飛来塩分量が離岸距離の -0.6 乗に比例して減少する式）から計算する。その次に腐食量の式である X 年に対する腐食量 Y を $Y = AX^B$ として計算し、100 年後の腐食量を鋼種に応じた腐食特性により評価する。結果的に、鋼種の 100 年後の腐食量が環境条件に応じて計算されるため、その地点に適した耐候性鋼のグレードを定めることができる。

2.1.3 橋梁用高性能鋼材 SBHS

平成 24 年の道路橋示方書改訂後、以下の記述が加わった。従来の鋼材に対して降伏強度が高く、予熱の省略や低減が可能な施工性を向上させた鋼材が開発され、JIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS) として制定されている。適用にあたっては、条文に規定される鋼材と同等の安全性

が確保されるように設計するとともに、製作・施工において所定の品質が確保されることを確認する等、十分に検討する必要がある⁹⁾。

BHS 鋼は、TMCP 技術を駆使することにより、高い降伏強度、製作性（溶接性、加工性）および耐候性に優れた性能を有する鋼材として開発され、2005 年に（社）日本鉄鋼連盟製品規定により規格化¹³⁾され、東京ゲートブリッジの 3 径間連続複合トラス橋部分の鋼重約 2 万トンのうち、約 1 万トンに SBHS500 が採用された¹⁴⁾。その後、より広く普及させるため、2008 年に SBHS500、SBHS500W (W は耐候性仕様)、SBHS700、SBHS700W が JIS G 3140 に規定された。2011 年には、SBHS400、400W が加えられ現在に至っている¹⁵⁾。

SBHS の特性を表 4 に示す¹⁶⁾。SBHS400 (W)、SBHS500 (W)、SBHS700 (W) の強度別の 3 鋼種は、いずれも板厚増加による降伏強度の低下が無く、従来鋼に対して降伏強度が高めであり、鋼重を低減可能である。また、 P_{CM} は低め、シャルピー値は高めに設定されており、溶接性や冷間曲げ加工性が高く、結果的に製作の合理化に役立つ万能な鋼材である¹⁶⁾。

SBHS を適用した場合、実際の橋梁にはどの位のメリットが生じるのだろうか？ 図 4 に 2 主 I 桁断面の 3 スパン連続合成桁の平米当り工事費を示す¹⁷⁾。この時適用されたのは、当時の鉄鋼連盟規定であった BHS500、BHS700 であるが、鋼材特性は JIS の SBHS500、SBHS700 と同一である。ただし、論文は 2007 年のものであり、現在のコスト体系にそのまま適用できる結果ではない。しかしながら、中央支間 120 m までは 2 主 I 桁橋で実現できること、またそ

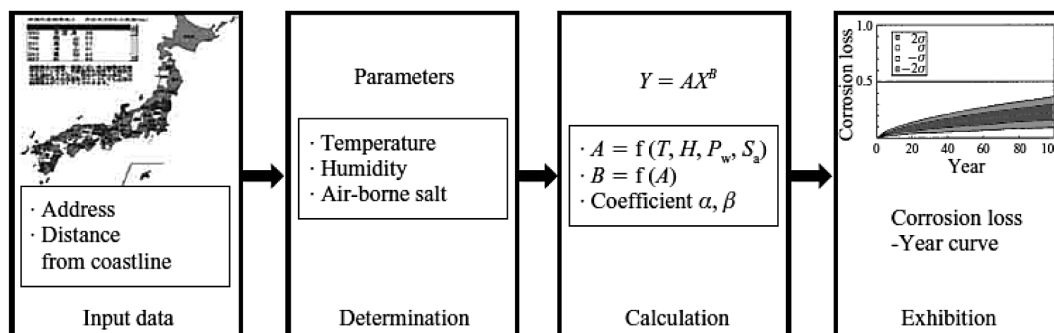


図 3 腐食予測フロー

表 4 SBHS の従来鋼との比較

特性		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	≥ 700	≥ 685
	降伏点一定	○	△	○	△	○	○	△
加工性	高靱性	○	△	○	△	○	○	△
	溶接性	予熱温度低減	○	△	○	△	○	○
耐食性	耐候性	○ (SBHS400W)	○ (SMA490W)	○ (SBHS500W)	○ (SMA570W)	—	○	—

○ 通常仕様で対応 △ 通常仕様では未対応

* HBS G3102 (HT780)

日本鉄鋼連盟：橋梁用高性能鋼材（2012）

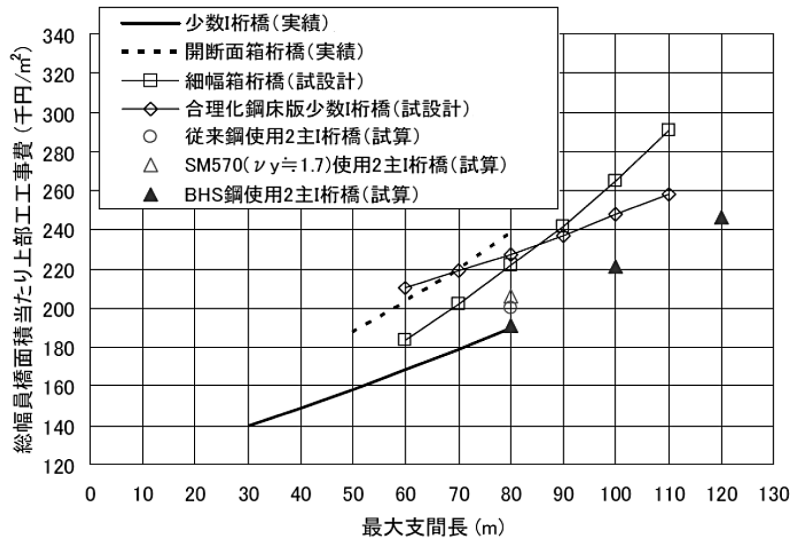


図4 BHS 試設計：最大支間長と工事費

	圧延まま (従来圧延)	TMCP		熱処理 焼入-焼戻し
		非水冷型 (制御圧延)	水冷型 (制御圧延+加速冷却)	
製造プロセス				
マイクロ組織	フェライト-パーライト	フェライト-パーライト	フェライト-パーライト ベイナイト	焼戻マルテンサイト ベイナイト
強化機構	(フェライト)結晶粒微細化 制御圧延, 加速冷却, Nb, Ti添加 変態強化 ← 合金添加(Cu, Ni, Cr, Mo等) 加速冷却, 熱処理(焼入) 固溶強化 ← 合金添加 析出強化 ← 合金添加(V, Nb, Cu等)			
鋼材強度(TS)	400~490MPa級		490~570MPa級(TMCP)	570MPa級 熱処理

図5 鋼板の製造プロセスと強化機構、強度

の総コストである工事費が、従来鋼(支間60mまで)の延長線上で実現できることが確認され、経済性に優れた橋梁の実現性が示唆された。このような鋼材が、鋼橋の鋼重、製作、架設等の合理化に寄与していくことが期待される。

2.2 橋梁用鋼材の製造プロセス

鋼材の機械的特性は、鋼の化学成分の調整と製造プロセスにより造りこまれる。厚鋼板の強度グレードとその製造プロセスを図5に示す。プロセスは通常圧延、TMCP、熱処理に大別されるが、引張強度570N/mm²以上の高強度鋼を製造するためにはTMCPまたは熱処理プロセスが適用される。

TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) は加熱から圧延、冷却までのプロセス条件を制御して、鋼のマイクロ組織をオンラインで造り込み、機械的特性を向上させる技術である。その特徴を図6に示すが、低い炭素当量(Ceq)で高強度化が達成できるため、同じ強度でも溶接性に優れ

た鋼材が製造できる。また、TMCPプロセスは結晶粒微細化をマイクロ組織制御の基本原則としており、高強度と高靱性を両立できるプロセスである。前述したSBHSはこのTMCPを最大限に活用して製造が可能になった新鋼材であり、低P_{CM}成分での高強度化と高いシャルピー靱性値はTMCP技術の進歩によるところが大きい。

3. 材料の特性と溶接性

橋梁の製作には一般的な溶接法が適用され、その溶接部特性も母材と同等以上の性能を有することを基本としている。

溶接部の品質で考慮すべきこととして低温割れの防止がある。低温割れは溶接熱影響部の水素脆化に起因する割れである。その防止のために溶接部の水素の拡散除去を目

的として予熱が行われるが、一方で予熱作業は施工能率の低下を招く。予熱温度を低減するためには、溶接金属の水素量が少ない溶接方法、溶接材料を使用するとともに、鋼材として溶接部の硬化が抑制できる、すなわち P_{CM} が低い材料を選択することが必要である。

表5は溶接方法と P_{CM} 、及び板厚で区分された予熱温度の標準である。 $P_{CM} \leq 0.22$ の鋼材は予熱なしでの施工が可能となっている。

溶接入熱量の大きい溶接法を適用する場合についても配慮が必要である。道路橋示方書では下記の場合については、別途溶接施工試験により、溶接品質が確保されていることを確認しなければならないとされている²⁾。

- (1) SM570, SMA570W, SM520, SMA490W において1パスの入熱量が7,000J/mm を超える場合
- (2) SM490, SM490Y において、1パスの入熱量が

- 10,000J/mm を超える場合
- (3) 被覆アーク溶接法(手溶接のみ)、ガスシールドアーク溶接法(CO₂ガス又はArとCO₂の混合ガス)、サブマージアーク溶接法以外の溶接を行う場合
- (4) 鋼橋製作の実績がない場合
- (5) 使用実績のないところから材料供給を受ける場合
- (6) 採用する溶接方法の施工実績がない場合

大入熱溶接部の品質で問題となるのは、結晶粒の粗大化に起因する溶接熱影響部 HAZ (Heat Affected Zone) の靱性低下である。大入熱 HAZ 靱性を支配する第1の因子は鋼の化学成分であり、低 C_{eq} とすることが主要な対策となる。ここでも前述した TMCP は不可欠な技術となる。

さらに、大入熱溶接部での靱性を向上させるためには、鋼中に微細な析出物を分散させて、HAZ での結晶粒粗大化を抑制する技術などが実用化されており^{18, 19)}、溶接施工

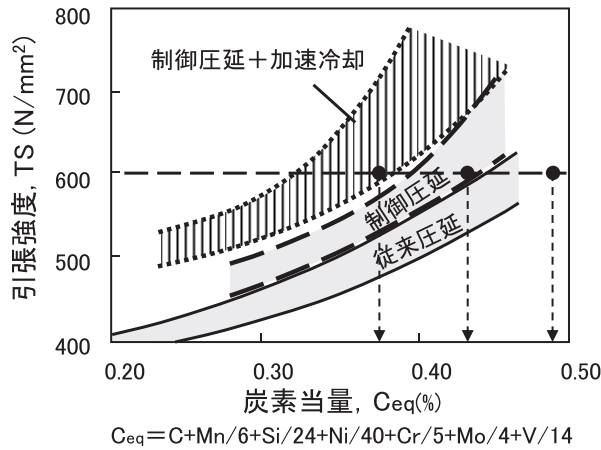


図6 鋼板の強度に及ぼす C_{eq} と製造プロセスの影響

表5 P_{CM} 値と予熱温度の標準

P_{CM} (%)	溶接方法	予熱温度(°C)		
		板厚区分(mm)		
		$t \leq 25$	$25 < t \leq 40$	$40 < t \leq 100$
0.21	SMAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.22	SMAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.23	SMAW	予熱なし	予熱なし	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.24	SMAW	予熱なし	予熱なし	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.25	SMAW	予熱なし	50	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	50
0.26	SMAW	予熱なし	50	80
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	50
0.27	SMAW	50	80	80
	GMAW, SAW	予熱なし	50	50
0.28	SMAW	50	80	100
	GMAW, SAW	50	50	80
0.29	SMAW	80	100	100
	GMAW, SAW	50	80	80

注) SMAW: 低水素系の溶接棒による被覆アーク溶接
 GMAW: ガスシールドアーク溶接
 SAW: サブマージアーク溶接

に適した鋼材を用いることが必要である。

その他、溶接施工に関わる事項として、平成24年の道路橋示方書の改訂²⁾において、疲労耐久性に影響を与える溶接品質確保の徹底が加えられたことが挙げられる。既設の鋼道路橋溶接継手部の疲労損傷、溶接品質に起因する疲労問題の顕在化が背景である。具体的には、施工事例の調査に基づき溶接施工の各段階において守るべき事項及び標準的な施工方法、並びに非破壊試験を行う技術者の資格要件の明確化や、疲労強度を確保するための詳細が記述されている。

4. ま と め

本報告では、橋梁用の鋼材として、構造用鋼材を道路橋示方書に沿う形で紹介し、また SBHS や耐候性鋼のトピックスを若干ながら紹介した。従って、橋梁の技術者の方々にとっては些か退屈な内容であったと考えている。しかし、自動車、船舶、建築、建産機など他分野の技術者の方々にとっては、道路橋示方書を読まなくても本報告を読んでもいただければその概要を知ることができるのではと考えている。冒頭でも述べたが、現在鋼橋市場はかつてない小規模なものとなっており、老朽化した橋梁が増加しているにも関わらず、予算の不足や新設橋の不足により、老朽化橋梁の比率がどんどん増加している。また、幾つかの橋梁は老朽化により通行止めされている³⁾。

道路、そして橋梁は、日本経済を活性化させるための大動脈であり、道路交通の閉鎖や渋滞による交通の停滞は、大きな経済損失に繋がる結果となる。

今後も鋼橋の合理的性、耐久性、維持管理性、全体的な品質を向上させる設計法や技術革新が無いと、橋梁市場の向上と経済の活性化は望めない。僭越ではあるが、我々も厚板技術者として、鋼橋の発展を願う次第である。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会 HP：橋梁の受注実績、鋼橋の統計データ。
- 2) 依田照彦：老朽化進む道路橋－今対策を行わないと手遅れに、2012維持保全・リニューアル特集、日刊建設工業新聞、2012年5月31日。

- 3) 玉越隆史, 大久保雅憲, 北村岳伸：平成21年度・平成22年度道路構造物に関する基本データ集, ISSN 1346-1328, 国総研資料第645号, (2011), 22-35.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会, (社)日本橋梁建設協会：国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書, 道路橋の技術評価に関する研究—新技術評価のガイドライン(案)一, ISSN 1346-7328, 国総研資料第609号, (2010).
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, (2012).
- 6) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書 鋼道路橋製作示方書 解説, (1956).
- 7) (社)日本溶接協会：鋼板および平鋼の厚さ方向特性 WES3008, (1999).
- 8) 松島巖：鉄鋼技術の流れ 第1シリーズ 第7巻 低合金耐食鋼 一開発, 発展, そして研究一, 地人書館, (1995), XX.
- 9) (社)日本鉄鋼連盟：2007年度米国鋼橋市場動向調査報告書(詳細版), (2008).
- 10) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)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), 一無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改訂版), 共同研究報告書第88号, (1993).
- 11) 鹿毛勇, 松井和幸, 川端文丸：橋梁用のミニマムメンテナンス実現のための耐候性鋼板とその利用技術—社会インフラ資産を支える環境調和型ライフサイクルコスト縮減に対応する厚板一, JFE 技報, 5, (2004), 31-37.
- 12) 鹿毛勇, 京野一章, 松田稔：耐候性鋼の腐食予測技術, JFE 技報, 18, (2007), 62-66.
- 13) (社)日本鉄鋼連盟：(社)日本鉄鋼連盟製品規定, MDCR 0014-2004, 降伏点 500 N/mm² 及び降伏点 700 N/mm² 溶接構造用圧延鋼材, (2005).
- 14) (社)土木学会鋼構造委員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・製作ガイドライン(案)～, (2009).
- 15) JIS ハンドブック②, 鉄鋼 II 2012, JIS G 3140 橋梁用高降伏点鋼板, 2012年1月.
- 16) (社)日本鉄鋼連盟, 橋梁用鋼材研究会：一般橋梁から長大橋にいたるまで建設コスト縮減に寄与する橋梁用高性能鋼材, (2012).
- 17) 岡田淳, 村上琢哉, 川畑篤敬：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, 63-2, (2007), 141-155.
- 18) 植森龍治：高性能厚鋼板の HAZ 韌性向上技術-1, ふえらむ, 14-7, (2009), 472-480.
- 19) 大井健次：高性能厚鋼板の HAZ 韌性向上技術-2, ふえらむ, 14-8, (2009), 524-529.