

鋼鉄道橋への電炉鋼の適用

APPLICATION OF ELECTRIC-ARC-FURNANCE- STEEL TO RAILWAY BRIDGES

保坂鐵矢*

Tetsuya HOSAKA

ABSTRACT Electric arc furnace steel of scraps is pretty useful from the environmental point of view. We made researches on applying them to main members of steelbridges.

Electric arc furnace steel often have some tramp elements, its sulfur content is higher than blast furnace steel, and their plate edge has round corner due to rolling process and Mill scale is thicker than the blast furnace steel. Fatigue strength of these welded joints satisfied corresponding allowable fatigue strength specified by the JRCC and JSSC Fatigue design Recommendation.

KEYWORDS : 電気炉平鋼、溶接性、疲労強度、実橋への適用

Electric Arc Furnance Steel, Weldability, Fatigue Strength, Application To Bridge

まえがき

鋼材のリサイクル材としての屑鉄を再生した鋼材（電炉鋼）を用いた構造は経済性は基より、「限りある資源の有効利用」という観点からもライフサイクル評価を有する素材である。鉄屑を主原料とする電炉鋼の粗鋼生産量（ただし、普通鋼のみ）は1999年度、約2200万トンで、これは全国粗鋼生産量（約9800万トン）の約22%を占めている。社会資本の充実に伴い原料のリサイクルが可能な電炉鋼は求められる社会環境の中でニーズが高まるものとみられている。

現在、土木構造物に使用される主な鋼板材は高炉厚板である。電炉鋼として土木構造物、特に鋼橋のように溶接主要部材への適用が期待されている製品は広幅平鋼で、この広幅平鋼メーカーは「広幅平鋼の力学的性能・溶接性等に関する特性研究」¹⁾を積極的に行い品質管理の強化を図り鋼板の信頼性が高まっている。また、土木学会鋼材規格小委員会が行った「電炉鋼板の土木構造物への適用」の調査研究報告書²⁾によると、品質はJIS規格を十分満足し、高炉厚板と比較しても特に差異は見られない。しかし、板厚方向の靱性やコバ形状のデータ不足、製品寸法品質管理方法など製鋼各社に差があるため、統一した品質体制づくりなど対応すること等の要望も提案され、これらをクリアーにして安定した品質保証が確認できれば十分適所に用いられると結んでいる。

この電炉鋼の広幅平鋼を主要部材に用いた鋼鉄道桁の開発・実用化を行う上で、開発当時、電気炉平鋼を鋼桁橋の溶接主要部材への適用例は無かった。このため、電気炉広幅平鋼の化学成分、機械的性質、鋼板としての形状寸法等、さらに溶接性、疲労強度等の諸特性を調査・各種試験等^{3)~5)}を行い所定の品質が確保できた

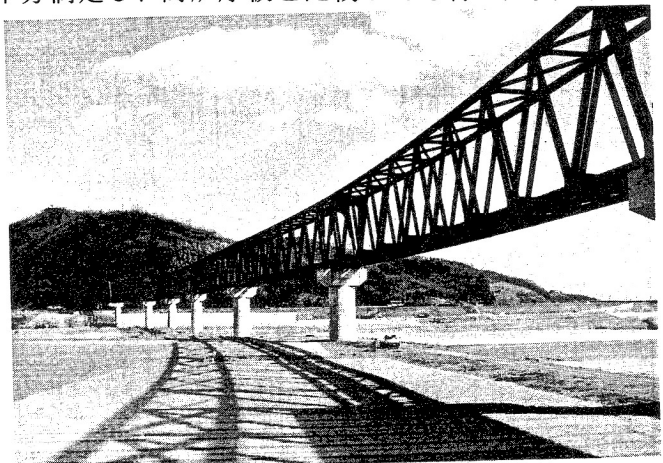


写真-1 広幅平鋼を用いたトラス桁橋・全景
(高梁川橋梁の例)

*日本鉄道建設公団・本社設計技術室 調査役 (〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

ので、仕様：電炉鋼板（広幅平鋼）使用の手引き（「手引き」）⁶⁾を定め、写真-1に示す「井原線・高梁川橋梁⁷⁾」の鋼鉄道橋の主要部材（トラス桁・主要部材）に初めて採用した。

本稿では電炉鋼・広幅平鋼の鋼鉄道橋・主要部材へ本格的採用に至る調査・各種試験等、特に溶接性、疲労強度、そして実橋梁における製作施工性等について概要を報告する。

1. 電炉鋼・広幅平鋼の特徴

1-1 高炉鋼との比較

広幅平鋼が高炉厚板と比較し、主たる異なる点を以下に示す。

- ① 電炉鋼はアーク熱を利用した電気炉で溶解・酸化精錬・還元を行い脱硫・脱酸した鋼材で、製鋼設備が小さく建設費や維持費が少ないことより固定費も少なく、価格が比較的廉価である。
- ② 鋼材は成形されたままの形状で使用されるため、圧延方向の切断加工が不要でコストメリットがある。
- ③ 圧延工程から要求される形状、寸法（幅×厚さ）に制約がある。鋼板寸法は幅が520mmで厚さが40mm程度まで、鋼板形状は板断面形状に丸み（コバ形状の丸み）や通りが切板（高炉鋼）と異なり精度の差が生じている。
- ④ 化学成分では鉄屑の質によっては除去困難なトランプエレメント（Cu、Sn、Cr等精錬では除去困難な元素）が微量残ることや溶鋼中のSが高めである。
- ⑤ 鉄屑等の原材料や圧延工程から生じる鋼板表面のミルスケールが若干厚い、つまりミルスケール過多である。

上記の③④⑤については、後述する溶接施工試験や実橋への適用において、仕様による規制を行うことにより鋼鉄道橋への適用において十分所定の品質の確保がで切ることが判明できた。

1-2 溶接品質確認に対する検討内容

鋼鉄道橋の主部材に広幅平鋼を適用するには、これらの性状が溶接性や疲労強度にどのように影響するか適切に判断する必要があり、次の試験を実施した。

- ① コバ丸み及びミルスケール厚さを考慮した広幅平鋼を供試材とした溶接手試験体を作成し、溶接性試験を実施、品質及び性能を確かめた。（2. 溶接継手試験体による溶接施工試験、参照）
- ② 鉄道建造物等設計標準・同解説（標準⁸⁾）に示す内から溶接継手種類を選定し、疲労試験を行い疲労特性を検証した。（3. 溶接継手試験体による疲労試験、参照）
- ③ 実橋を模したトラス箱断面试験体による溶接施工性および疲労試験により疲労特性を確認した。（4. 実橋トラス箱断面を模した試験桁による溶接試験と疲労試験、参照）

なお、供試材には日本鉄鋼連盟広幅平鋼研究委員会（広幅平鋼メーカー5社による構成）の報告¹⁾に基づくE級鋼（Z方向に応力がかかる部位に使用される鋼材で板厚tにより硫黄Sの含有率を決めた鋼材である。板厚tと硫黄sの関係は、 $6\text{mm} \leq t < 20\text{mm}$ の時、 $S \leq 0.018\%$ 、 $20\text{mm} \leq t < 30\text{mm}$ の時、 $S \leq 0.013\%$ ）を対象とした。

材料No.	コバ形状の丸み (mm)	コバ形状スタンプ図 (一例)
C, D, E	c ₁ 1.4以下	
	c ₂ 3.4以下	
	t=28	

図-1 広幅平鋼の断面形状の例

2. 溶接継手試験体による溶接施工試験

溶接性は鉄道橋に用いている代表的な継手である突合せ継手、十字継手、T継手、カバープレート、角継手を試験体として製作し、溶接継手品質の確認試験を行った。

2-1 試験供試体

供試材はSM490A-Z（SM490A-UT相当）、板幅300mm、板厚t=28mmと16mm、の広幅平鋼を用い、比較材としてSM490A板厚t=28mmの高炉厚板を用いた溶接性試験

材料No.	平部のミルスケール厚 (mm)	平部ミルスケール厚の実績 (0.015mm)
B, D (t=28)	0.03以下 0.02	

図-2 平部ミルスケールの状態の例

体を製作した。

供試材はミルスケール、コバ丸みを3水準選定し、断面形状（コバ形状丸み）の例を図-1、ミルスケールの状態の例を図-2、ミルスケールとコバ丸みの供試体条件を表-1、-2に示す。コバ丸み大、小はユニバーサル圧延の条件を変えて、コバ丸み無しはガス切断で、ミルスケール厚みは圧延中のディスクローラー（圧延中に高圧水を噴射し鋼材表面のスケールを除去）による高圧水噴射の有無、圧延後のショットブラストの有無によりその水準を変えて、試験供試体を作成した。

2-2 溶接試験結果

2-2-1 溶接部の機械的性質

1) 引張り試験

引張試験は突合せ溶接継手と十字すみ肉溶接継手で行った。

突合せ溶接継手の引張試験結果では用いた溶接材料の引張強度（550N/mm²）が母材より高く、破断位置はすべて母材であり、溶接部および熱影響部の強度は十分でSM490Aの規格値を満足している。高炉厚板の溶接継手性能と同等と考えられる。

十字すみ肉溶接継手の引張試験においてもSM490Aの母材強度規格値以上の値を示している。コバの丸みによるルート部溶込み状態は良好で、静的強度に影響を与えないものと判断できた。

2) 衝撃試験

突合わせ溶接継手部の衝撃試験結果は28mmの例で、0℃における吸収エネルギーの平均値は、depoからbondまで全域で48J以上であった。

3) 断面硬度試験

溶接継手部の断面硬度はt=28mmの突合わせ溶接（X形開先）の例で、Hv(10kg)で最高270と通常の硬度分布を示している。初層部に近い板厚tの1/2位置および、溶接パス層数の多い1/4位置において測定した結果は一般の多層溶接による限り、硬度分布に極端な差はなく均一化され、良好な結果であった。

2-2-2 コバ形状による溶接性（断面マクロ観察）

T継手のすみ肉溶接部断面マクロ写真の例を図-3に示す。観察の結果、ルート部溶接金属ともに欠陥は発生しておらず、のど厚も確保されている。コバ丸みの大きい供試体Bでは、ルート部に隙間が生じて若干

表-1 供試材の条件（幅300mm×板厚28mm）

平部のミルスケール厚 (mm)	コバ形状の丸み (mm)*1								
	丸み大			丸み小			丸みなし		
	記号	c ₁	c ₂	記号	c ₁	c ₂	記号	c ₁	c ₂
なし*2	A	1.5 ~2.5	4.0 ~6.0	C	1.4 以下	3.4 以下	F	0.0*4	0.0
0.03以下*3	B	1.5 ~2.5	4.0 ~6.0	D	1.4 以下	3.4 以下	-	-	-
0.04~0.10	-	-	-	E	1.4 以下	3.4 以下	-	-	-

注) *1: コバ形状の丸みは下図に示す。

*2: 圧延中に高圧水噴射によりスケールを除去するとともに、圧延後に製品をショットしミルスケールを完全に除去する。

*3: 圧延中に高圧水噴射によりスケールを除去する。ショットはしない。

*4: コバ部をガス切断する。

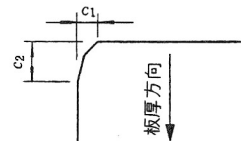


表-2 供試材の条件（幅300mm×板厚16mm）

平部のミルスケール厚 (mm)	コバ形状の丸み (mm)*1								
	丸み大			丸み小			丸みなし		
	記号	c ₁	c ₂	記号	c ₁	c ₂	記号	c ₁	c ₂
なし*2	G	1.5 ~2.5	3.5 ~4.5	I	1.4 以下	3.5 以下	L	0.0*4	0.0
0.03以下*3	H	1.5 ~2.5	3.5 ~4.5	J	1.4 以下	3.5 以下	-	-	-
0.04~0.10	-	-	-	K	1.4 以下	3.5 以下	-	-	-

注) *1~*4は表-1と同じ。

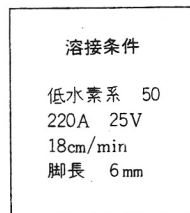
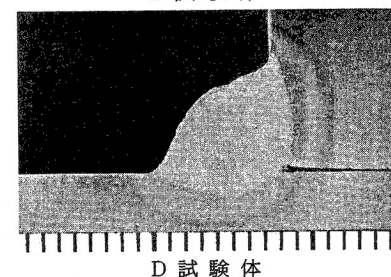
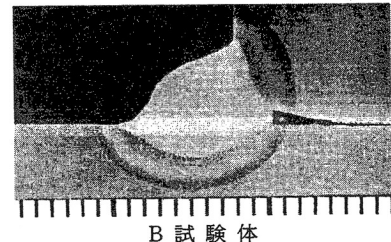
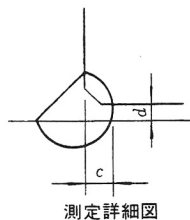


図-3 T継手のすみ肉溶接部（マクロ結果の例）

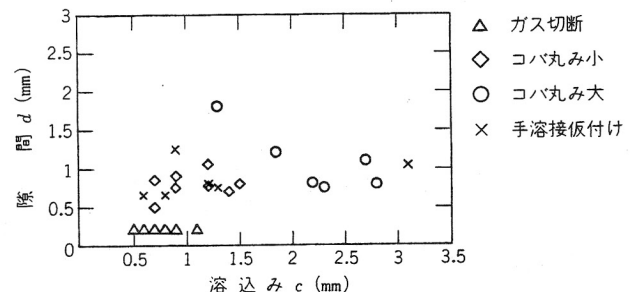


図-4 ルート部の溶込みcと隙間dとの関係の例

スラグが詰まっているのが観察された。ルート部の溶込みcと隙間dの関係を図-4に示す。溶込みcはガス切断材で約0.5~1.7mm、コバ丸み小の場合が0.8~1.5mm、コバ丸み大の場合が1.3~2.8mmとなっている。なお、隙間dは溶接前に1mm以下の管理のうえ組立て、本溶接を行った。

電炉材の形状特徴であるコバ丸みによる溶接性の影響は溶接後の断面マクロを観察すると、コバ丸みの増加に伴って溶込みが得られる反面、隙間も増加している傾向がみられた。一方、前述に示す隙間dが1mm以上あってもビード裏側の非溶着部側のビード形状が比較的なめらかで丸みを有している。高炉材のd<1mmに比べても良好な形状である。これはコバ丸みが溶接開先形状の役目を有し、溶込み量が大きく非溶着部の溶接形状がなめらかになる働きを行ったものと思われる。この傾向は後述する疲労強度(3-3、②)にも評価されている。

3. 溶接継手試験体による疲労試験

3-1 疲労試験体

試験体の種類と形状は開先にコバ面を持つ溶接継手(縦ビード、フランジガセット、リブ十字、腹板ガセット、十字すみ肉、十字横グループ)を6タイプ7系列選定し、開先溶接を設けている継手には溶接止端部から5mm離れた位置にひずみゲージを貼っている。この内、最も溶接条件が厳しいと思われる十字すみ肉継手には同条件の高炉厚板を加え比較を行った。材質は2.に述べた溶接試験と同じ鋼材を使用した。なお、電気炉平鋼が持つ「コバ形状の丸み」「スケール過多」は $C_1=1.4\text{mm}$ 、 $C_2=3.5\text{mm}$ 以下、スケールの厚さ0.03mm以下の水準を市場に提供する鋼材と考え選定した。

3-2 試験方法

疲労試験は電気油圧サーボ式1MN疲労試験機を使用し、応力比0.1の片振引張で行った。試験結果は試験荷重を試験体の断面積で割った公称応力範囲にて整理・評価した。

3-3 溶接試験結果

溶接継手の疲労試験結果は、鋼構造物の疲労設計指針・同解説(JSSC⁹⁾)および「標準」の疲労設計曲線、ECCS疲労設計指針(ECCS¹⁰⁾)そして過去に行われた高炉材の溶接継手の疲労試験結果〔山田らのデータベース:(データベース¹¹⁾〕と比較した。なお、「JSSC」、「標準」等では板厚28mmの場合、板厚による低減係数である $\sqrt{25/t}=0.972$ を考慮することになっているが大差がないので補正は行わなかった。

(1) 溶接性

- ① すみ肉溶接ルート部の溶込み状態はガス切断材と同等である。
- ② コバ丸み大の場合は継手の隙間が大きくなりルート裏側の不溶着部にスラグが若干残存し、溶け込み線が比較的なめらかな波状になるなどの傾向がみられる(2-2-2 溶接性(断面マクロ試験)参照)。この溶け込み状況はコバ丸み大の溶接部におよぼす影響がかえって疲労強度向上に寄与している傾向にみられる。(図-3参照)
- ③ ミルスケール厚みはコバ丸み大小で比較すると、大きくなると隙間の空気層の影響と推測されるがブローホールが少なくなる。また、 CO_2 溶接ではコバ丸みの大小に関わらずブローホールの発生はなかった。

本試験におけるこの程度のミルスケール厚みでは溶接品質を害う事はないと判断できるが、素材圧延中にディスクレーによる高圧水噴射によりスケールを除去することとした。

- (2) 溶接継手の疲労強度は「JSSC」、「標準」および「ECCS」で規定する疲労設計曲線を満足している。
- (3) 高炉厚板に関する「データベース」との比較において腹板ガセット継手の疲労強度は若干低くなっている。一方、フランジガセット継手、十字横すみ肉継手の止端き裂、および十字横すみ肉継手のルートき裂についての疲労強度は若干高い値を示している。これはガス切断面に比べ電気炉平鋼のコバ丸みのある形状が応力集中に対して有利に働いたためと思われる。
- (4) 疲労き裂の発生は継手の応力集中が支配的で、溶接欠陥(ブローホール)があったものを除き、本試験で行った水準の範囲では、材質、コバ形状、ミルスケール過多が溶接品質に対して問題ないと判断できた。しかし、(1)、③で述べたようにミルスケール厚みはブローホールの発生の原因となる恐れがあるのでミルスケール除去を行うこととした。

4. 実橋トラス箱断面を模した試験桁による溶接施工試験と疲労試験

4-1 試験桁の製作

広幅平鋼の市場性から板幅 500mm程度で構成される鋼鉄道トラス橋への適用を考慮した大型模型試験桁を製作した。試験桁は箱断面を想定し、トッププレートがウェブより突出した構造である。これはトラス橋の箱形下弦材に横桁や支材などの取り合いを考慮したことによる。また、電炉平鋼の長尺材を初めて使うことから、素材板幅の寸法公差と大曲（おおまがり）が箱断面組立て精度に与える影響に着目し、電気炉平鋼の素材段階での寸法・形状特性が及ぼす影響を箱断面の腹板が上下フランジで拘束され、上下フランジ縁端が自由突出している断面の大型模型試験桁により確認することとした。図-5に試験桁の組立・溶接概要を示す。

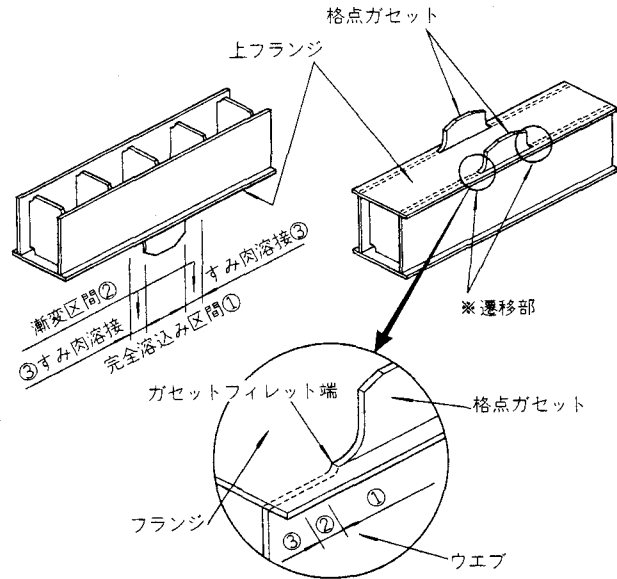


図-5 トラス桁を模した試験桁概要

この構造の溶接施工上と疲労強度上の着目点は格点ガセットのフランジ差込みファイレット部の溶接施工健全性と完全溶け込みからすみ肉溶接部への遷移部の局部応力の影響度である。

試験桁は図-6に示すように8.5mの実物長で、このうち6m区間は溶接施工試験体で、2.5m区間は疲労試験体とした。試験桁は新しく制定したマニュアル〔電炉鋼板（広幅平鋼）使用の手引き（手引き⁶⁾〕により製作した。「手引き」は溶接継手試験体による品質試験から電炉材使用上のマニュアルとして制定した。表-3に製作に用いた製作基準許容差^{6) 1 2)}を示す。

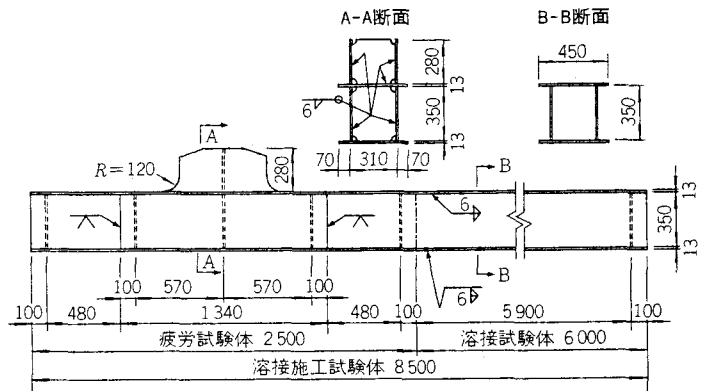


図-6 トラス桁を模した試験桁の構造

表-3 試験桁・部材形状の測定結果

		測定値	基準許容値 ²⁾
溶接後の部材変形量	幅	許容範囲以内	± 2mm
	大曲がり	1mm以下	$\delta = L/1000 \max 8mm$ ($L=8.5m$ $\delta=8mm$)*
	部材長	トップ4mm収縮 ボトム2mm収縮	$\delta = (5 + 0.15L)$ ($L=8.5m$ $\delta=6.27mm$)*
	部材反り	8mm	$\delta = 3 + 0.15L \max 12mm$ ($L=8.5m$ $\delta=4.3mm$)*
部材組立て時仮付け	すみ肉溶接部	許容範囲以内	1mm以下
溶接後の肌すき量	スリット部	1.3~1.9mm	1mm (設計目標値)

注) 1. 基準許容値は鋼鉄道橋製作要領²⁾抜粋
2. 表中の*印値は部材長(L)に対する基準許容値(δ)を示す。

4-2 溶接施工試験

4-2-1 試験内容と結果

溶接施工試験桁の溶接部材組立て形状の測定値と製作基準許容差^{6) 1 2)}との比較を表-3 および、次に示す。

- ① 素材の大曲り精度に対する矯正：主部材の曲がりとは土木工事標準示方書^{1 2)}に示す製作寸法許容差： $L/1000$ 以下に対して、電気炉平板の圧延時の素材寸法測定結果が若干オーバーしているものもあった。溶接後の部材の曲がり測定値は1mm程度で所定の品質は満足していた。ただし、

素材の直線性を出すため、けがき切断の工程段階で加熱矯正を行っているが、後述（5.項参照）する実橋での実績から高炉厚板のガス切断時における矯正と同程度の軽微な作業で、十分組み立て精度が確保できることが確認できた。なお、引き続き実橋でのデータ集積を行い精度管理に反映し品質管理に努めたい。

- ② すみ肉溶接部の肌すき量：ほとんどなく良好であった。
- ③ ガセット・スリット部の肌すき：設計上の隙間 1mm（K 開先継手ルート間隔）のに対して、1.3～1.9mm となっていた。ガスによるスリットの加工であり、電気炉平鋼の形状公差上の問題ではなかった。溶接性については溶込み量や内部欠陥（後述④参照）など良好であった。
- ④ 超音波探傷試験の結果、すみ肉溶接部には最大 1.5mm のブローホールが 1 個であった。スリット部の完全溶け込み部は、JIS Z 3060 の等級で 1 級である。

以上のことから、比較的製作難易度の高いトラス格点に着目した溶接施工試験において、計画した製作基準許容値^{6) 12)}を満足することが確認できた。

4-3 疲労試験

1) 载荷試験方法

载荷試験は状況を図-7 および写真-2 に示すように、2 点支持（支間：2300mm）、2 点载荷（载荷位置間距離：1150mm）によって 300 万回の繰り返し载荷を行った。試験対象着目点は切抜きガセットの溶接部およびダイヤフラム溶接部の 2 カ所である。

着目する継手と疲労許容応力度を「標準」から、

- 1) 切抜きガセット → D 等級 : 100 MPa
- 2) ダイヤフラム → E 等級 : 80 MPa

として载荷荷重を定めることとし、载荷荷重は 2 点载荷における等曲げ区間での応力範囲が、103MPa（D 等級）になるように設定し $\Delta P=882\text{KN}$ （90 t）とした。なお、応力比は $R=0.05$ である。

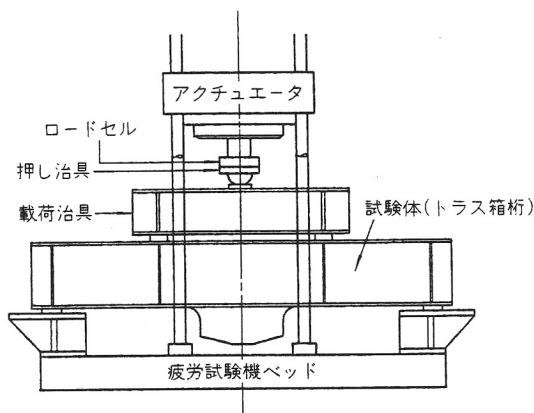


図-7 疲労試験の载荷方法

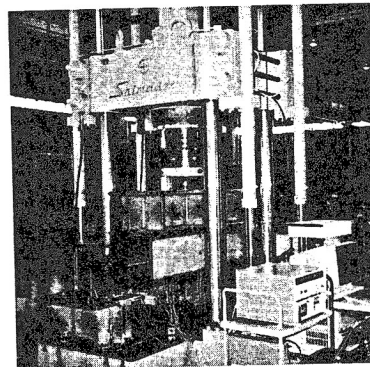


写真-2 疲労試験状況

2) 試験結果

疲労試験の結果を図-8 に S-N 線図で示す。

- ① 300 万回载荷の結果、切抜きガセットおよびダイヤフラム溶接部に疲労き裂の発生はなかった。
- ② 本試験体を作用応力公称範囲 103MPa（D 等級）と载荷回数 300 万回で評価した場合、継手区分 D 等級（「標準」⁸⁾）及び強度等級（「JSSC」⁹⁾）の各疲労設計曲線を満足した。
- ③ ダイヤフラムの溶接部の強度区分は「データベース」¹¹⁾と比較した結果、「データベース」の高炉材と同等レベルであることが確認できた。

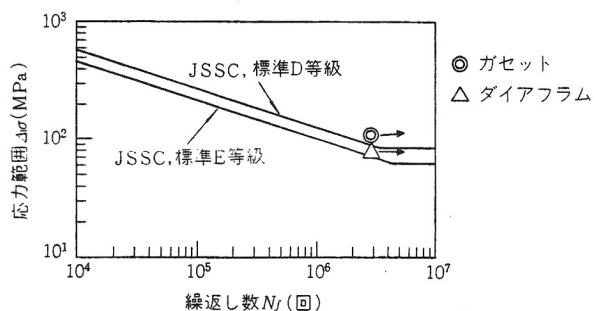


図-8 疲労試験結果

5. 実橋梁への適用

電炉鋼・広幅平鋼板の特性を考慮した溶接品質確認試験、実橋を模した桁モデルによる溶接性施工試験や疲労試験により高炉材と遜色がないことが確認されたので実橋の主要部材に適用することとした。適用に当たり「手引き」を作成し施工品質管理の標準化を行った。

広幅平鋼の溶接部材として初めての採用は先ず、京葉都心線・地下鉄駅の列車が载荷しないSRC部材に用い、前述した溶接施工試験で安全性の確認の上、列車が直接载荷する鋼鉄道橋の主要部材に適用することとした。写真-3に高梁川橋梁で広幅平鋼を用いた主要部材（主構や床組等の部材）の全景を示す。

5-1 適用部位

広幅平鋼は生産可能サイズが限定され、各電炉メーカーにより若干異なる。このため板厚・板幅の組み合わせ単位で各1種類の鋼重を出来るだけまとめるように設計する必要がある。材質・板厚・板幅の組み合わせは市場性により異なるが、一般に同一種類の組み合わせで鋼材重量単位として3~5トンまとめる等の設計上の配慮が必要である。

鉄道橋への適用部材は図-9に示すように比較的板幅の小さいトラスの主構や、钣桁の縦桁・横桁の上下フランジ等や、そして縦リブ、水平・鉛直補剛材適用可能である。製作過程において、鋼板が「手引き」に規定した寸法公差管理基準値以内でも矯正作業を必要とする場合があった。

5-2 使用実績

鉄道公団における鋼鉄道橋主要部材に用いた主たる実績は井原線・高梁川橋梁（広幅平鋼の使用量：約301ton）、土佐黒潮鉄道・第二中筋川橋梁（同：約80ton）、山梨リニア実験線・小形山架道橋（同：約120ton）の3橋梁で合計：約500tonである。

実績内容の例の概要を以下に示す。

① 高梁川橋梁はT1~T4の全長716m

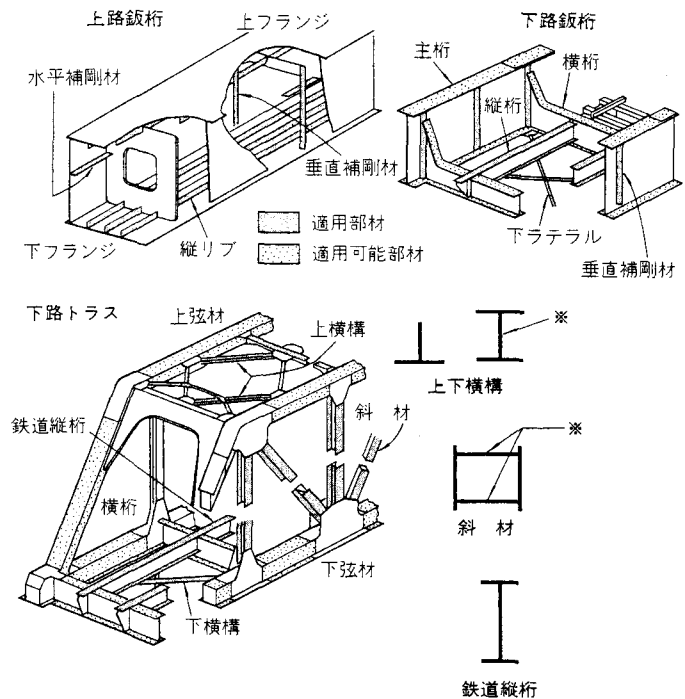
の単線トラス桁橋である。T1桁は単純・開床式トラス（126m）で、T2桁とT3桁は3径間連続・開床式トラス（3@83.3m）で、T4桁はコンクリート床版との合成トラス（81.9m）である。

広幅平鋼の使用量はT1桁は約12ton（同2%）、T2桁とT3桁の平均138t（桁全体鋼重に占める割合約22%）、T4桁は約13ton（同4%）である。これは、T1桁は長支間で、T4桁は死荷重が大きいこと等より部材断面が大きくなり、適用範囲が限られ少なくなったためである。

広幅平鋼を使用した主たる部材および使用比率（該当部材の鋼板重量に占める比率）はT2桁の例で示すと上下横構（約58%）、斜材（約35%）、縦桁（約39%）および弦材（約2%）であった。弦材への採用例が少ないのは箱断面で自由突出部位が少ないことと寸法が大きいことが原因と思われる。



写真-3 広幅平鋼を用いた鉄道トラス（高梁川橋梁の例）



※印部位には第2中筋川橋梁で適用しない

図-9 広幅平鋼の適用可能部材

- ② 第二中筋川橋梁は全長 252m の単線・3 径間連続開床式単線トラス桁橋である。電気炉平鋼の適用をフランジ等の自由縁の部位を主体に採用した。適用鋼材は約 14% (80ton) と少なかった。
- ③ 小形山架道橋は支間 136.5m のコンクリート床版付き複線ニールセン桁橋である、部材断面が大きいため適用部位は補剛桁やアーチリブの水平補剛材や縦リブに用い、約 10% (約 120ton) と少ない使用量となっている。

5-3 鋼材の化学成分と機械的性質

電炉鋼・広幅平鋼は溶接構造用圧延鋼材 (JIS G 3106) および溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (JIS G 3114) に規定される 5 元素 (C、Si、Mn、P、S) に加えて微量ながら他の元素が含有される。この微量な元素は機械的性質や溶接性に大きく影響するため含有量を規制することとした。「手引き」に規定した化学成分の規制値は表-4 に示すとおりであるが、当面この規制値をクリアした材料でも実績がない場合は同「手引き」による示す溶接試験を行い、所定の品質を確認して採用することとした。

表-4 広幅平鋼の化学成分規制目標値⁶⁾

鋼種	炭素当量 C _{eq}	化学成分の管理目標値 (%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Ni
SM400A	0.36以下	0.18	0.25	1.00	0.0035 以下	*1	0.25 以下	0.05 以下	—	—
SM400B・C		0.16	0.25	1.05					—	—
SMA400AW	0.42以下	0.18	0.25	1.00	[0.04] 以下	[0.04] 以下	0.50 0.30	0.05 以下	0.55	0.30
SMA400BW・CW		0.16	0.25	1.05					0.45	0.05
SM490A・B・C	0.44以下	[0.02] 以下	[0.55] 以下	[1.5] 以下	[0.04] 以下	[0.04] 以下	0.25 以下	—	—	—
SM490YA・YB		—	—	—					—	—
SMA490AW・BW・CW	0.47以下	0.18	0.40	1.50	[0.04] 以下	[0.04] 以下	0.50 0.30	0.04 以下	0.30	0.30
SM520C		0.08	0.20	1.00					0.05	0.05

*1: 硫黄(S)含有量の規制値は、

6mm≦板厚<20mm	0.018%以下
20mm≦板厚<30mm	0.013%以下
30mm≦板厚<40mm	0.008%以下

注) 1. 表中の化学成分の規制目標値は上段が上限値, 下段が下限値を示す。

2. 表中の〔 〕内の数値は JIS G 3106 の SM50A の規格値を示す。

3. 成分規制値は「手引き」抜粋。

4. 表中の化学成分 S の管理目標値 * 1 は左表に示す。

5-4 部材組立と精度

① トラスけたの製作において、箱断面の下弦材や斜材、I 断面の縦桁や上下横構などにおいて、広幅平鋼使用部材の溶接組立作業や組立精度は高炉厚板と何ら危惧するところはなく同等の精度確保ができた。

② 広幅平鋼の素材圧延精度は「手引き」に示す素材管理基準 (表-5) により管理した。横曲がりとして任意の 1m につき 2mm、幅±2mm の精度は高炉厚板の切断 (ガス切断) 精度と同等とし、暫定案として全体大曲りを 10m 当たり 5mm とし管理したところ、後述するように部分的に矯正作業を必要とする場合が生じた。部材組立施工性より全体大曲がり精度が±3mm 程度にグレードアップできれば部材の製作精度が確保できることとなる。さらなる圧延技術の改善を期待しているところである。

表-5 広幅平鋼の形状寸法公差管理目標値⁶⁾

項目	寸法公差管理目標値	
	厚さ	6mm≦t<12mm
12mm≦t<25mm		±0.7mm以下
25mm≦t<40mm		±0.8mm以下
幅	±2.0mm以下	
長さ	7m以下	+40mm~-0mm
	7mを超えるもの	長さ1mまたはその端数を増すごとに上記+側許容値に5mmを加える。
横曲がり	任意の1mにつき2mm以内とする	
角落ち*	板幅方向 (C1)	1.4mm以内
	板厚方向 (C2)	板厚の15%以内
平坦度	任意の長さ2mにつき1mm以内	
ミルスケール	0.03mm以下	

注) *印名称はコバ形状の丸みと同じ。

③ ダイヤフラムや落とし込みフランジなどは特に板幅寸法精度を要求されるため、現在の広幅平鋼板では組立精度確保が難しいと考えられる。このため、フランジ等の自由縁の部位を主体として用いるのが良策と思われる。

④ 実橋梁（高梁川橋梁の例）における素材の横曲がり、板厚・板幅、および板厚・板幅方向のコバ面の角落ちについて測定した形状寸法誤差を図-10~12に示す。素材の全体大曲りは平均値 2.57mm で、5mm を超えている素材は総度数 180 のわずか 20 程度で、そのうち最大値は 9mm であった。製作寸法許容差^{6) 12)}の「主要部材の曲がり：任意の長さで最大 8mm」に一部抵触することとなるので、素材の段階において矯正することとした。

⑤ 実橋梁（高梁川橋梁の例）の部材組立精度の例を図-13に示す。斜材の部材横曲がりは平均 0.11mm で -3~+5mm の範囲で分布、縦桁は -2~+1mm の範囲に分布し、いずれも製作基準を満足し、良好な品質を示している。高炉厚板で製作する部材組立精度に比し遜色は無かった。

⑥ 部材組み立てにおいて広幅平鋼の素材の大曲りやそり等の部分的な矯正を行った。これは高炉材・厚板の切板材と電炉鋼・広幅平鋼のロール材との素材精度管理を同等条件下で行ったことによる。素材により品質管理を変えることは橋桁製作品質上、好ましいことではない。このため、当面の製作水準は素材寸法の部分矯正が必要となる場合が生じる。

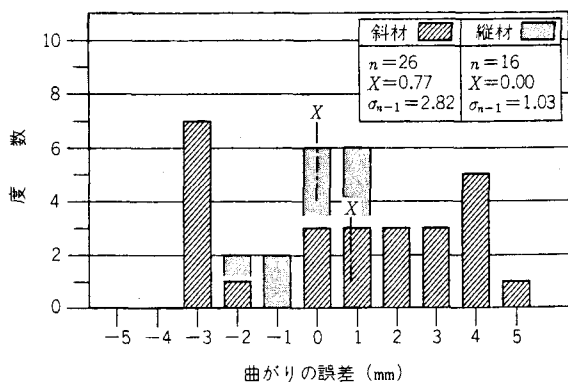
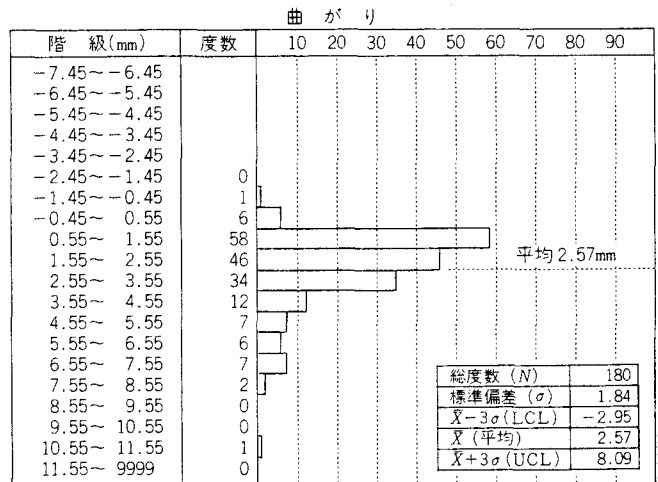
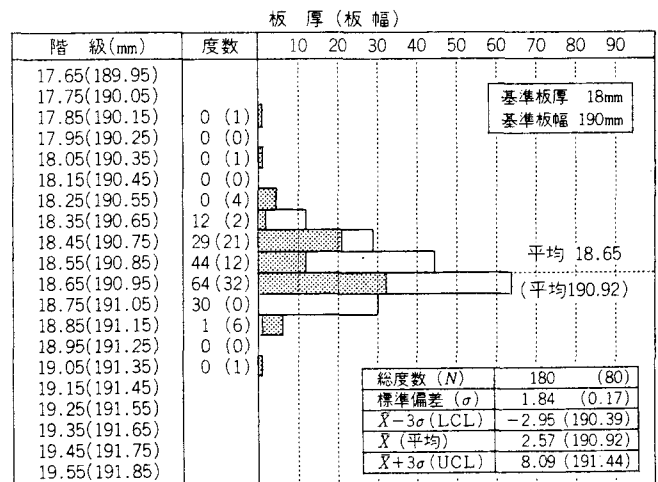


図-13 部材（縦桁・横桁）：曲がり測定実績（高梁川橋梁の例）



注) 図中の階級は測定値の範囲を示す。

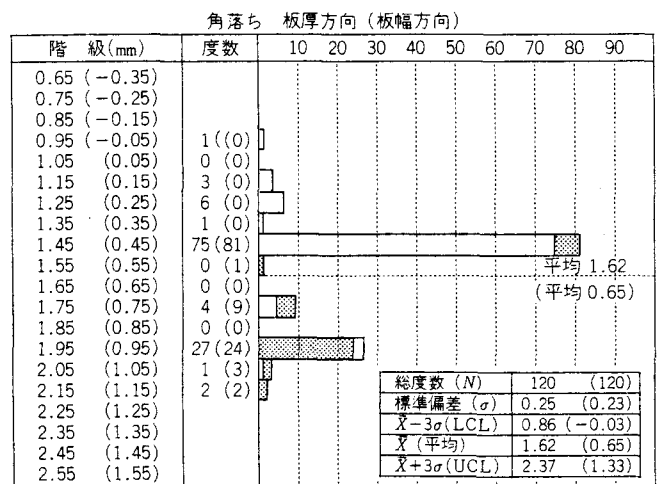
図-10 広幅平鋼・素材曲がり測定実績（高梁川橋梁の例）



注) 1. 図中の階級は測定値の範囲を示す。

2. 図中の()方法は板幅について示す。

図-11 広幅平鋼・素材板厚・板幅測定実績（高梁川橋梁の例）



注) 1. 図中の階級は測定値の範囲を示す。

2. 図中の()数値は板幅方向の角落ちを示す。

図-12 広幅平鋼・素材コバ形状の丸み測定実績（高梁川橋梁の例）

6. まとめ

- ① 電気炉平鋼特有の形状や材料特性を考慮した溶接継手の溶接性と疲労強度の品質は高炉材厚板と遜色がないことが確認できた。しかし、電気炉広幅平鋼を鋼鉄道橋の主要部材に適用する場合は「手引き」に示す規定をクリアする材料を用いるとともに、当面、「手引き」に示す所定の溶接施工試験や疲労試験を行い、事前に品質を確認するものとした。
- ② 実橋を模したトラス試験体の溶接施工試験結果、溶接において一部、高炉厚板と異なる変形挙動が見られた。実橋では部材の大きさや板厚等を考慮した素材のそり、曲がりの管理を行った結果、試験桁の試験値より大きくなることなく所定の規格を十分満足できた。実橋での素材の矯正は高炉厚板の切断や縦シーム溶接による矯正と同等程度の作業であった。
- ③ 以上の結果より、「手引き」に示す品質管理基準で管理すれば実橋への適用は可能であると判断し、トラス橋等の主要部材に用い良好な結果を得られた。
- ④ 高梁川橋梁での製作実績において所定の品質は十分満足できる結果が得られた。しかし、電炉鋼・広幅平鋼で部材を構成するための溶接・組立て作業は、初めての経験であったため精度確保に伴う品質管理に若干の戸惑いが生じたのが現状であった。また、製作メーカーは板の切断加工を外注しているところが多く、切断加工に伴うひずみ矯正ラインを有しないメーカーもあったこともトラブルの要因であったと推測される。そして、2橋目以降の第二中筋川橋梁等においてはこれらの経験が製作に反映でき品質向上できた。

あとがき

構造物のライフサイクルを評価する上でコストの面からLCC（ライフサイクルコスト）とエネルギーの面からLCA（ライフサイクルアセスメント）が用いられ、資源の生産性を高める考え方として資源の循環、リサイクルが重要な要素となる。鉄鋼材料は最も優れた資源の一つで、屑鉄を主原料とした電炉鋼はリサイクル資源で限られた資源を有効に利用した地球環境にやさしい素材である。最近、首都高速道路公団において積極的な採用¹⁾³⁾があり、タイ国バンコック市内の鋼道路橋にも約900トン用いられているという情報も得ている。関係者の協力をいただき、耐久性にすぐれた環境に優しい構造物の研究・開発・実用化に積極的に取り組んで行く所存である。

最後に、電気炉平鋼の鋼鉄道橋への実用化において、足利工業大学：阿部英彦教授、大阪大学接合科学研究所：堀川浩甫教授、名古屋大学土木工学科：山田健太郎教授に実験や現場でご指導をいただきました。そして、実験に協力いただいた関係者、直接鋼橋の製作・架設に従事した関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟広幅平鋼研究委員会：電炉広幅平鋼（SM490A）の力学的性能、溶接性等に関する特性研究 昭和63年6月、
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：電炉鋼板の土木構造物への適用、平成元年8月、
- 3) 稲葉紀昭、保坂鐵矢、根本弘、酒井吉永：鉄道トラス橋への電気炉平鋼適用についての試験、JSSC鋼構造論文集第1巻3号（1994年9月）pp.187-198、
- 4) 保坂鐵矢、玉木史郎、根本弘、酒井吉永：電気炉平鋼を用いた溶接継手の性能と疲労強度、橋梁と基礎98-3、pp.37-44、
- 5) 保坂鐵矢、津金昭一、津澤稔、酒井吉永：電気炉平鋼の鋼鉄道橋への適用と試験桁による疲労試験、橋梁と基礎98-4、pp.21-26、
- 6) 日本鉄道建設公団：電炉鋼板（広幅平鋼）使用の手引き、平成3年3月、
- 7) 保坂鐵矢、森脇衛、津澤稔：電気炉平鋼を用いた下路合成トラスの設計と製作（井原線：高梁川橋梁）、土木技術47巻11号、pp.49-61、1992.11、
- 8) 運輸省監修・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、丸善、平成4年10月、
- 9) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂、平成5年2月、
- 10) ECCS-第6技術委員会「疲労」：日本鋼構造協会No.43 Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures、1985、
- 11) 名古屋大学 土木工学科 山田研究室：疲労試験データベース、
- 12) 日本鉄道建設公団 土木工事標準示方書 鋼鉄道橋製作要領 平成8年12月、
- 13) 半野：鋼構造に求められる要求性能、次世代土木鋼構造研究報告会、パネルディスカッション（これからの鋼構造とその性能評価技術）、鋼材倶楽部、日本鋼構造協会、H12.6.6、pp.5-8