

溶接鉄道橋のあゆみ

(溶接橋の疲労損傷事例とディテールの改良)

佐々木 秀弥¹⁾

わが国の鉄道橋に実用的に溶接法が活用され始めてから、約60年の年月が流れた。溶接工法が採用された当初は、腐食により弱少した橋梁の既存桁の現場での溶接による補強工事であった。現在においては、当然のように橋梁はほとんどすべて溶接構造で設計・製作および架設が行われている。

今回は鉄道橋において最初に溶接による補強が採用されて以来、昭和30年代の溶接構造の設計示方書が作成されるまでにどのような変転があったか、収集した文献や情報をもとに溶接技術の開発経緯と、溶接橋の疲労による損傷例および溶接ディテールの改良などの概要をまとめ、溶接鉄道橋のあゆみについて報告する。

はじめに

鉄の橋の歴史は、英国で鑄鉄によるコールブルックデール橋（アイアンブリッジ・1781年）が造られてから約210年、わが国では明治7年に錬鉄製トラス橋が架けられてから110年を超える。当然のことながら、この間に構造形式、使用鋼材および施工法はいずれも著しい進歩発達を遂げてきたが、製作面では何と云っても、リベットから溶接への移行が画期的であって、このことが構造形式や材料の発展に及ぼした影響も大きなものがあった。

わが国における鉄道橋への溶接工法の導入は、昭和初期に行われた、老朽した鉄桁に対する現場補強工事が始まりで、この工法は戦後の橋梁応急対策において、多数の実施例があり¹⁾、十分にその効果が発揮されている（写真-1）。

一方、新設橋梁については昭和10年（1935年）に田端駅構内の田端大橋（写真-3）が、工場製作、現場継手のすべてを溶接により建設された。これはゲルバー型構造の道路橋であり、当時では世界最長の全溶接橋であった。現在でも歩道専用橋として使用中である。

本報告では、わが国の鉄道橋がリベットから溶接への脱皮をはかった胎動期から始めて、東海道新幹線橋梁が溶接構造で設計・製作され、合理化

の進んだ経緯について、収集した文献等により幾つかの事例を挙げ回顧し報告したいと思う。

1. 溶接技術の開発および導入

(1) 溶接工法の出現

わが国における鋼構造への溶接の採用は早くから行われており、その着手時期は欧米諸国とあまり差はないようである。

わが国に最初に溶接法が伝えられたのは、明治37年（1904年）で、当時はおそらく鑄鉄のきず直しに使用されていたと云われている。欧米では大正



写真-1 下フランジの溝型溶接補強の施工例

1) 東京橋梁営業本部 部長代理

9年頃には、鋼構造に対するアーク溶接工法の応用が実現し、その後10年位の間には全溶接の大型建築や鋼橋が出現するまでに発達していた(表-1)。

わが国で本格的な溶接の実用化のさきがけを切ったのは造船分野であり、大正3年に三菱長崎造船所ではスウェーデンのKjellberg社に技術者を派遣し技術を習得させ、翌年溶接機を購入している。大正9年(1920年)には、三菱長崎造船所は全溶接船・諏訪丸(港内運搬船421t)を進水している。

橋梁への溶接の導入もかなり早期に開始され、昭和6年(1931年)には、奥羽本線松山川橋梁で初の溶接によるリベット鉋桁の主桁の補強工事が行われた。また、横浜港瑞穂埠頭の鉄道橋(昭和9年)および東京の田端大橋(道路橋,昭和10年)などが初期のものである。

国鉄技術陣の溶接への取組は特に早く(表-2)、昭和初期に建設されたいわば溶接橋梁創世紀時代に主導的役割を果たしている。

昭和6年には、プレートガーダーの溶接による補強を始めるとともに、鉄道橋溶接工技量検定試験を開始し、また「電弧溶接鋼構造物設計及び製作示方書案」を作成するなど、技術基準類の整備にいち早く着手している。

(2) 鉄道橋の溶接による補強工事

昭和6年鉄道省は、電弧溶接鋼構造物設計・製作示方書案を規定するとともに、電弧溶接工資格取得試験が実施され、昭和6年10月に初の溶接による鉄桁の補強工事が奥羽本線松山川橋梁で実施された²⁾(写真-2)。

鉄道橋の補強工事は列車荷重の増大化に対処するため、すでに大正末期から検討が始められており、まず最初に既設鉋桁の下方部分にトラス状の部材を追加するフイック式補強が行われていた。これらの実績をふまえ、また既設橋梁への施工の容易さから次第に溶接補強が採用されるようになり、昭和16年頃までに1300連余りの鉋桁に溶接による補強工事が施工されている¹⁾。溶接による最初の溝型補強が施工された松山川橋梁は、補強後に20余年の使命を果たして架替えられたが、列車荷重というきびしい試練に耐え、一部のすみ肉溶接に亀裂を生じた程度であったことと、溝型補強の密閉断面の内部がほとんど錆びてなかったという貴重な経験を教えてくれた。このことは当時の溶接でも相当の信頼性があったことで、密閉部材断面の設計採用に貴重な確信を与えるものとなった。

表-1 溶接構造物関係の年表

明18.	1885	ロシア人 Benardos 電弧溶接の発見 炭素棒と溶加材の棒を使用
25.	1892	ロシア人 Slavianoff 金属棒からアークをとばす溶接法の発見 スウェーデン人 Kjellberg 溶滓を塗った金属被覆溶接棒の発見
45.	1912	鋼鉄道橋設計示方書(達第111号)制定 広軌 E45, 狭軌 E33
大 9.	1920	三菱・長崎造船 職工通勤用の全溶接船 諏訪丸進水 英国 500ton 全溶接船 Fellarge号進水 鉄道建設規定(省令2号)公布 荷重 E40, E33となる
大14.	1925	フランス セーヌ河の既設橋梁補強工事 鋼鉄道橋製作示方書(達第168号)制定
昭 2.	1927	アメリカ 全溶接鋼鉋桁の完成
3.	1928	鋼鉄道橋設計示方書(達第158号)公布 (メートル制, K S 荷重)
5.	1930	ドイツ 豆戦艦 Deutschland号進水 日本 全溶接の軍艦建造
6.	1931	奥羽本線 松山川橋梁(40ft上路鉋桁)に溶接補強を初めて施工 電弧溶接鋼構造物設計及び製作示方書(案)発表
9.	1934	瑞穂橋側径間(横浜瑞穂埠頭全溶接鉄道橋)架設
10.	1935	田端大橋(全溶接ラーメン道路橋 総支間134m)架設(日本最初の全溶接橋)
16.	1941	可部線に全溶接 I 形桁架設(支間7.2m)
17.	1942	電弧溶接鋼構造物工事示方書(案)作成
26.	1951	鋼鉄道橋製作示方書(案)作成
27.	1952	鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書(達第142号)制定
30.	1955	飯田線 天竜川橋梁に支間70.4+61.6+70.4m 3径間連続溶接トラス 支間22.3m 溶接上路プレートガーダー架設
31.	1956	鋼鉄道橋設計示方書(達第630号)制定
34.	1959	大阪環状線 安治川橋梁(支間120m 溶接ランガー・ガーダー)架設 高張力鋼鉄道橋設計示方書(案)作成 溶接鋼鉄道橋設計及び製作示方書(案)作成 SM41, SM50に適用
35.	1960	
36.	1961	新幹線構造物設計基準(案)制定
39.	1964	東海道新幹線(東京~新大阪間)開業

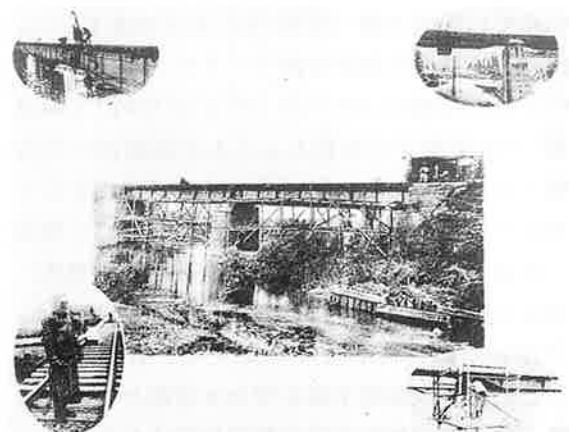


写真-2 鉄道橋最初の松山川橋梁の溶接補強工事(昭和6年)
(出典;日本の橋, 日本橋梁建設協会編)

表-2 昭和初期鉄道橋の溶接施工に関する文献一覧表

1) 中原 寿一郎, 大津 寛, 飯田 三郎 鋸桁のトラスビーム式補強法並に其の効果を就いて 業務研究資料17-2 昭和4年2月
2) 中原 寿一郎 鋸桁の並列式補強に就いて 業務研究資料17-2 昭和4年5月
3) 大西 信三郎 熔接に就いて 業務研究資料18-20 昭和5年7月
4) 田中 武次 記 熔接鉄道橋梁に対する仕様書案並に計算例 業務研究資料18-16 昭和5年11月
5) 田中 豊, 黒田 武次 松山川橋梁腐蝕桁電気熔接修理補強工事に就いて 業務研究資料20-11 昭和7年3月
6) 星 源蔵 米国における電気熔接作業(ガス切断による部材の 製作) 業務研究資料22-26 昭和9年8月
7) 天竺 良吉 電弧熔接鉄道橋・瑞穂橋 論説報告 21-2 昭和10年2月
8) 稲葉 権兵衛 全溶接江戸坂跨線道路橋設計概要 土木学会誌 21-5 昭和10年5月
9) 板倉 武治 夏井川橋梁外10ヶ所電弧熔接桁補強工事に就いて 業務研究資料23-20 昭和10年7月
10) 稲葉 権兵衛 獨逸における溶接鉄道橋の設計に就いて 業務研究資料24-32 昭和11年12月
11) 大津 寛 熔接による鉄道橋の補強に就いて 土木学会第1回年次学術講演会 昭和12年4月
12) 田中 豊 熔接鉄道橋の安全率に就いて 論説報告 26-12 昭和15年12月
13) 友永 和夫 鉄道橋の保守並に補強法に就いて 土木学会夏期講習会テキスト 昭和24年8月

(3) 溶接橋梁の出現

全溶接または主要部分を溶接構造とした道路橋は昭和5年頃から架設された記録があるが、鉄道橋では表-1に示すとおり、昭和9年に瑞穂橋や昭和10年に田端大橋(写真-3)などがある。

田端大橋は、田端駅北側ヤードの上を横断して架けられた支間40.5m+53.0m+40.5mのこの線道路橋³⁾で現場継手も溶接としたわが国最初の全溶接橋であり、また当時世界最大級の溶接橋としても有名であった。構造は3径間連続ゲルパー型式で、鉄道大臣官房研究所(後の鉄道技術研究所)の設計(図面番号;とく-30,昭和9年7月)である。

使用した鋼材は溶接性の良くない普通鋼材であったため、現場継手部を突合せ溶接とした施工試験では、収縮割れを生じ使用に耐えられなかったという結果となり、結局、現場継手は突合せ溶接のみの継手ではなく、溶接長の長い挿入鋸による

斜め突合せ溶接と添鋸によるすみ肉溶接との併用溶接を主体とした継手が用いられている。また、フランジと腹板との溶接は断続溶接により施工されている。

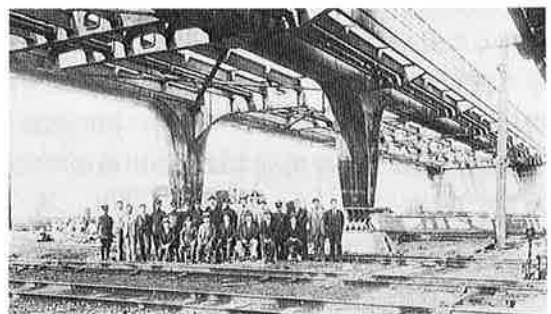
当時は溶接機も溶接棒もその発達が十分でなかったため、溶接機も直流機を用いて電弧の安定と溶け込みの完全がはかられ、さらに確認のため橋梁完成後には約900tのレールを移動載荷し、設計荷重に近い状態での荷重試験が行われている。

本橋は架設後約60年を経過しており、現在でもなお健在であるが、道路橋としての使命は昭和62年3月で車両運行の役割を終了し、その後歩行者専用橋として継続使用が検討され、補強・補修工事(道路面を1.9m嵩上)が平成3年度に完成し、歩行橋として現存している。

溶接橋梁の技術と実績の積み重ねにより、昭和15年(1940年)内務省の「電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書案」が公布され、溶接橋梁の指針を生み出す原動力ともなった。

しかし、この当時すでに国内・国外の情勢は極度に緊迫してきており、国策的見地から軍需物資である鋼材の使用は統制下におかれ、国内での橋梁建設事業は衰退の一途をたどることになった。

このようにして、戦前の溶接橋梁の歴史は終るが、溶接工法の導入時期こそ造船に遅れたが、実



けた架設完了時の記念写真(昭和10年)

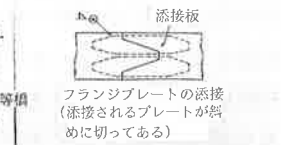
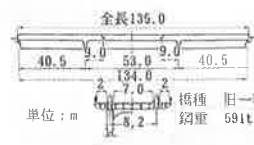


写真-3 昭和10年架設した田端大橋の全景と現場溶接継手(出典:構造物設計資料 No. 73)

用化の成果としては大差なく、当時架設された橋梁が未だに現存している。溶接工法の導入と実用化は昭和初期の技術的な成果であったと思われる。

戦後においては全溶接試験桁が製作され、各種試験が開始された。これらは戦後の溶接橋梁の先駆けとなり、本格的な溶接橋梁の時代へと入った。戦前の溶接技術の蓄積が、戦後の溶接橋梁隆盛の基盤となっているものと考えられる。

(4) 全溶接プレートガーダーの載荷試験

橋梁への溶接工法の導入および実験研究は、造船より遅れること約15年と推定されるが、すでに造船分野での先行により、溶接機、溶接棒、溶接施工法などの関連技術が整いつつあった状況から、研究の着手から実用化までの時間は比較的短かったものと思われる。

昭和3年(1927年)民間橋梁会社において溶接工法の研究を目的とした実験が行われ、交流、直流のアーケ溶接機を用い、支間2.7mのプレートガーダー各1連が試作された。同時に比較のためリベット接合による同一寸法の桁を製作し、同年に鉄道省大臣官房研究所構造物実験室に持ち込んで破壊試験が行われた。この結果は溶接による試作桁2連とも好成績を残し、溶接構造は理論上期待された通りの強度があり、リベット構造に劣らないことが実証されている。

昭和23年(1948年)には、溶接プレートガーダーの実際の耐荷力を実験により検討し、各部の応力および構造上の弱点を調査して設計上の資料を求める目的のために荷重載荷による破壊試験⁴⁾が鉄道技術研究所によって行われた。

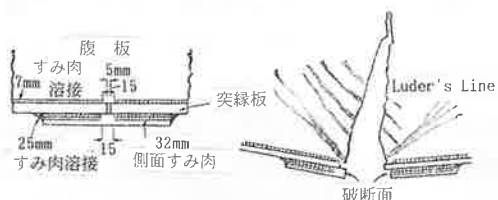
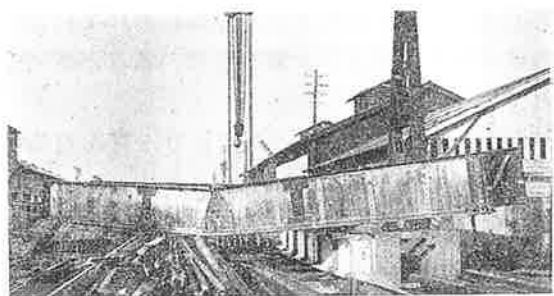


写真-4 全溶接プレートガーダーの破壊試験

(出典;参考文献⁴⁾)

この試験は、全溶接プレートガーダー (KS-10, 支間12.9m)を製作し、荷重として古軌条を搭載して破壊試験を行った。この結果荷重425 tにおいて中央溶接継手に破壊が生じた (写真-4)。

全溶接桁と比較のため行われた同一設計荷重で同支間の定規リベット桁の破壊荷重は430 tであり、破壊荷重においてはほとんど差はなかった。ただし荷重たわみ曲線において全溶接桁はリベット桁に比べ幾分早く降伏たわみを開始したが (溶接桁は280 tで、リベット桁は350 tで直線変形からずればはじめたが両者の曲線の差は小さく、350 t以上において全溶接桁のたわみはとくに大きくなった) 破壊時におけるたわみは全溶接桁では非常に大きくなった。

またこの試験の結果、座屈、亀裂は溶接部以外の部分に生じ、溶接部にはなんらの損傷がなかった。以後の溶接桁普及への貴重なデータとなった。

本試験においては、静的荷重に関するかぎり今日の設計方式にて施工に注意すれば全溶接桁は十分な安全率があがることが確認されている。

(5) 初期の溶接鋼構造物の設計示方書

溶接継手をリベットによる継手と比べたときの決定的な長所は、図-1に示したように添接板をやめ母材と母材を直接連結できることである。

初めて溶接が採用された当時の溶接による部材継手の設計はどのように行われたのか、当時の示方書で調べるものとした。

表-3は、1932~33年時代の外国とわが国の溶接鋼構造物示方書から、溶接部の許容応力と突合せ継手に関する規定を比較したものである。共通した特徴は、

- ①溶接許容応力の母材のそれに対する比率、継手の効率が0.75~0.85%で現行の100%に比して著しく低い。
- ②特に突合せ継手の引張り許容値をさげている。また、外国の橋梁ではともに引張り部材の突合せ継手を禁止している。

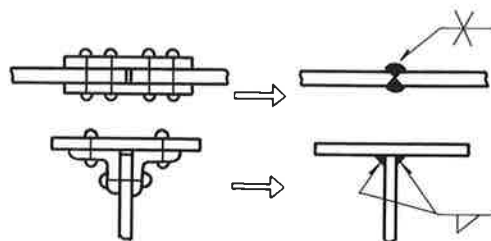


図-1 リベット接合と溶接継手

2. 溶接用鋼材の変遷と部材の組合せ

(1) 橋梁用鋼材の変遷

鉄道橋の使用鋼材は、明治30年代の錬鉄の時代から鋼の時代へと移り、昭和30年代に入り溶接の採用が進むまでは、40キロ級の構造用鋼 (SS39A, SS41) を用いるリベット結合の時代であった⁵⁾。

溶接の採用は昭和6年より既存桁の補強方法として始まったが、同10年に当時世界最長の支間53m (総支間134m, ゲルバー形ガーダー, 溶接構造) の田端こ線道路橋を建設するに至った。

全溶接鉄道橋は昭和16年、可部線でKS-12, 支間7.2mのI断面桁の試用に始まったが、第二次世界大戦による中断の後、昭和26年頃より先ず橋梁床組への部分的採用から、同30年には支間70.4m + 61.6m + 70.4mの3径間連続トラスおよび支間34.0mの上路プレートガーダーに工場製作全溶接を採用するに至った (飯田線天竜川橋梁)。

昭和27年、JISで溶接構造用圧延鋼材 (SM41, SM41W) の規格が制定されたが、その頃は溶接用鋼材は特殊材と考えられ、入手困難な場合もしばしばあり、一部にはSS41で引張強さ45kgf/mm²以下、伸び25%以上の制限を付したのも溶接構造用に使用されていた。

昭和32年にはSM41材を対象とした溶接橋の設計示方書が作られ板厚別にSM41, SM41Wの採用基準が与えられた。さらに昭和35年にはこれが改訂され、SM50が加えられた。

高張力鋼の採用は昭和14年、ジューコール鋼が東京の源助架道橋に用いられたが、その後大戦による中断後、同30年の神田大通架道橋 (神田駅付近) などから50キロ鋼の採用が始まり、同33年に

は信越線・犀川橋梁として支間3×63.35=190mの3径間連続トラスが架設された (いずれもリベット結合)。また、SS50材の検討も行われ、昭和34年、五反田架道橋 (支間24m, 道床式下路プレートガーダー) が架設された。しかし、SS50材はその後の溶接用鋼材の発達とともに使用されなくなった。

溶接構造は昭和30年時代、急速に増加したが、上路プレートガーダーはまくら木を直接支持する部分である上フランジと腹板との溶接部に対する

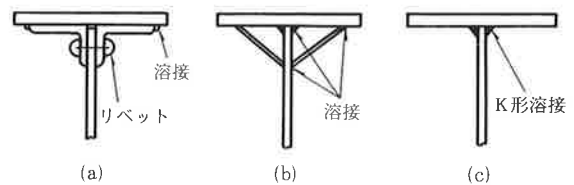


図-2 溶接上路プレートガーダーのフランジ取付け形式

懸念から、図2-(a)のようなりベットとの混用構造が昭和30年前後に作られ、あるいは図2-(b)のように斜側板を付けた構造も用いられた。

しかしその後、模型実験と現場測定、多数の床組縦桁あるいは一部の上路桁の使用実績などから、1966年形上路プレートガーダー標準設計では、単純なI断面とし、図2-(c)のように上フランジと腹板との溶接部を、K形溶接とした形式が採用されることになった⁶⁾。

溶接構造の普及は東海道新幹線橋梁780余連、約9.3万tがすべて工場溶接で製作されている。

溶接用鋼材は、板厚に応じてSM41A, B, CおよびSM50A, B, Cが使分けられているが、北海道地区のような特別寒冷地では、使用箇所に応じて-25℃あるいは-40℃などの温度において所要の衝撃値を保証するような鋼材を用いることも考慮されていた。

SM50の使用範囲は広がっており、東海道新幹線では約20%に当る橋桁に採用されており、複線トラス、長大プレートガーダー、合成桁などに多く使用されている。支間120mのランガー桁、安治川橋梁 (昭和34年架設) の上弦アーチ部材もSM50である。また降伏点36kgf/mm²を保証する新50キロ鋼は、東北線・新河岸川橋梁のトラスの横桁に試用 (昭和39年) され、その後、東京外環状線南浦和こ線橋 (支間49.3m道床式上路プレートガーダー) には、耐候性鋼材とともに使用された。また当時、橋梁用としてその使用を増している耐候性鋼材は、昭和34年に床組張板への使用から、

表-3 各国溶接鋼構造設計示方書の比較

許容応力	突合せ	引張 圧縮 剪断	アメリカ鉄道技術協会 (1932年) 溶接並びに ガス切断仮仕様書	ドイツDIN4100 (1933年) 溶接 鋼構造物規格	日本溶接研究会(19 32年)電弧溶接鋼構 造物示方書
					工場
偶肉	各種	13,000psi (914kg/cm ²)	0.75 σ ₀	900kg/cm ²	700kg/cm ²
		15,000psi (1,055kg/cm ²)			800kg/cm ²
		11,300psi (794kg/cm ²)	0.65 σ ₀	700kg/cm ²	600kg/cm ²
		11,300psi (794kg/cm ²)	0.65 σ ₀	700kg/cm ²	600kg/cm ²
突合せ継手の 規定		プレートガーダー ウェブの接合は両側 の添接板による フランジの接合は偶 肉溶接による トラス 引張部材に突合せ溶 接を用いてはなら ない	橋梁では突合せ 溶接のみによる引 張応力、曲げ応力の 伝達を許さず	禁止条項なし	

東海道新幹線の木曾川・長良川橋梁などの床組縦桁(溶接構造)への採用とすすみ(昭和39年), 腐食環境のはげしい所として総武線・旧中川橋梁(支間46.8m, 複線下路プレートガーダー)は主桁にも, また中央線の新桂川橋梁(昭和43年架設, 支間70m+130m+70m)においてはトラスの部材にも耐候性鋼材が用いられている。

耐候性鋼材の許容応力度は, はじめSM50と同様にしていたが, 降伏点 $36\text{kgf}/\text{mm}^2$ を保証されていることから, 南浦和こ線橋および新桂川トラス橋ではSM50Yなみとして使用されている。

(2) 溶接橋梁の構造形式

1) プレートガーダーの形

プレートガーダーの標準的な主桁の形式はI形断面であるが, 支間の増大とともに箱形断面主桁の採用が多くなった。箱形断面はリベット結合の時代にもすでに採用された例があるが, 溶接橋の採用とともにその使用が多くなっている。

箱形断面主桁の形は, 図-3(a)のような溶接とリベットを併用した例が山陰本線・小深原橋梁(支間19.2m, 昭和31年)にみられたが, 現在一般的には図-3(b)のようであり, 中央本線・新木戸沢橋梁(支間36.4m, 昭和41年)では図-3(c)のように台形とし, 桁の安定, 剛性を保ち, まくら木の左右の支持間隔は通常の桁と同程度にした形も採用された。なお合成桁では図-3(d)のようにU形の鋼桁を用い, コンクリート床板によって箱形断面が完成する形式も東海道新幹線橋梁以来, 多数設計されるようになった。

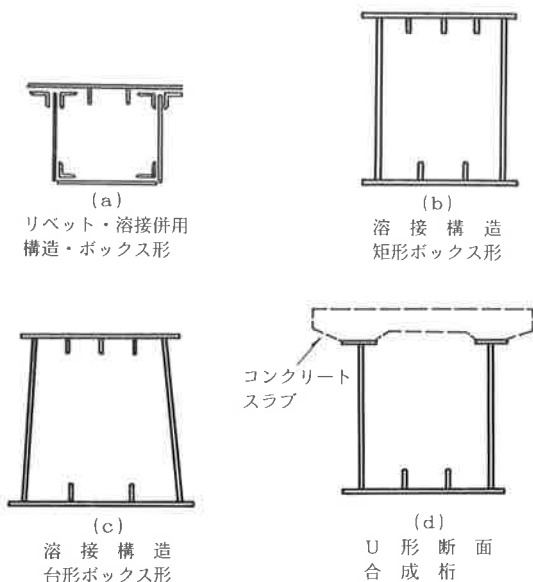


図-3 上路ボックスガーダーの種類

2) 下路トラスの形

リベット結合によるトラスは図-4(a)のようにワーレン形式であったが, その後, 垂直材を有するワーレン図-4(b), およびペチット, パルチモア, シュエドラー, ポーストリング, プラットトラス形式など種々用いられた。溶接によるトラス橋としては, 昭和30年, 飯田線・天竜川に架設したトラス以来, 垂直材のないワーレントラス図-4(c)が溶接下路トラスの標準的な形式となった。

なお, 外観を特に重視する場合には, 図-4(d)のようにトラス橋上弦材間に疑似連結構造を設けて桁の連続性を保つことがしばしば行われた。また, その部分に特殊なひっかけ装置を設けて耐震構造を工夫した例もある(昭和41年, 東海道線・下淀川橋梁)。

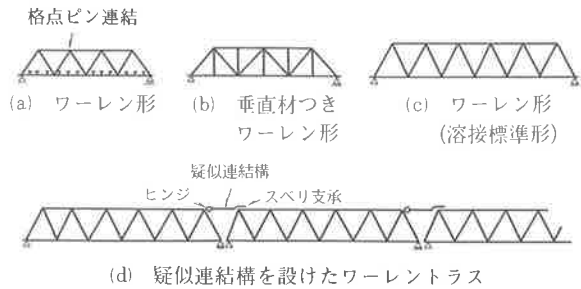


図-4 下路トラス形式の種類

(3) 現場における溶接継手と施工例

鉄道橋では現場補強工事から始まった溶接であったが, 信頼性と能率の面から新規架設の橋梁では主要部材の現場継手の溶接には, 前述の田端こ線道路橋以来用いられなかった。しかし鋼床板の溶接は水密性, 防水工の施工の容易さなどの点より有利であり, 昭和41年に水道橋駅の鋼床板(支間14.4m)および大崎電車庫の床部分(溶接延長2,866m)に現場溶接が採用され, 自動溶接により施工されている。

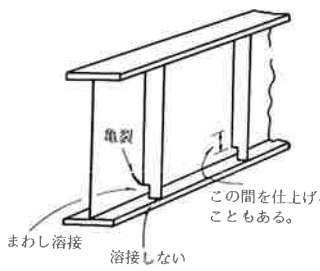
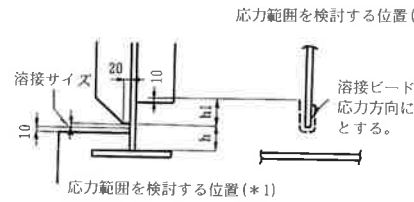
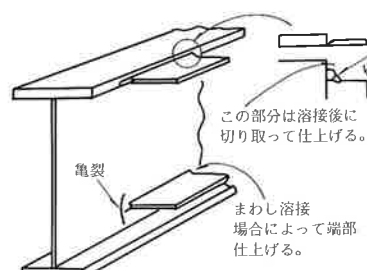
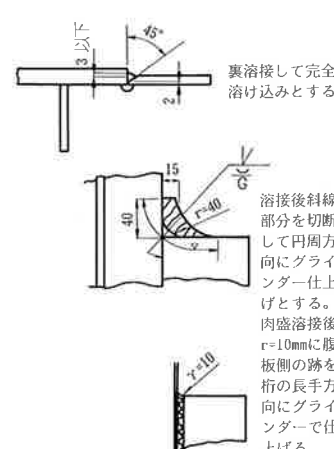
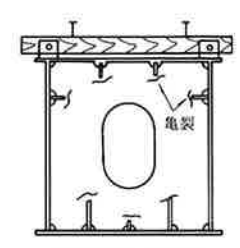
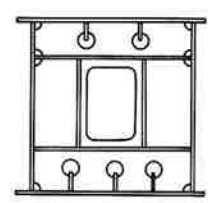
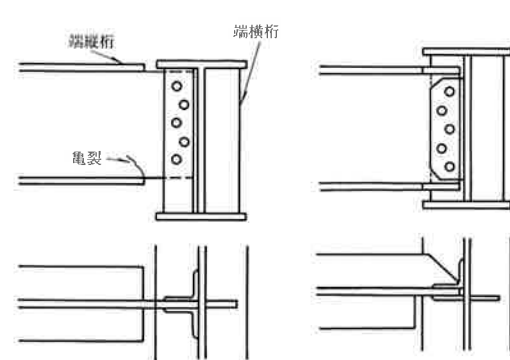
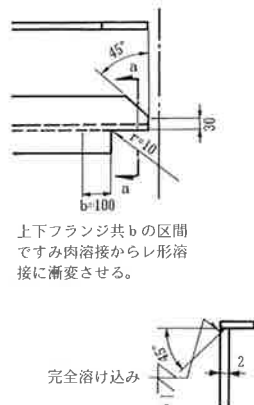
最近では平成1年(1989年)鉄道建設公団で建設した, 北総線・都計道3,4,20架道橋, 2径間連続合成桁, 馬桁付(中間支持梁支間26.0m)の橋梁で美観を配慮して馬桁の現場接合には高力ボルトをやめ, 全断面現場溶接により接合し, 好成績により完成した施工例⁷⁾がある。

3. 溶接橋の疲労による損傷と溶接ディテール

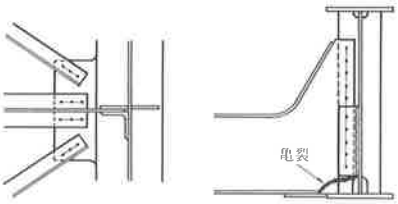
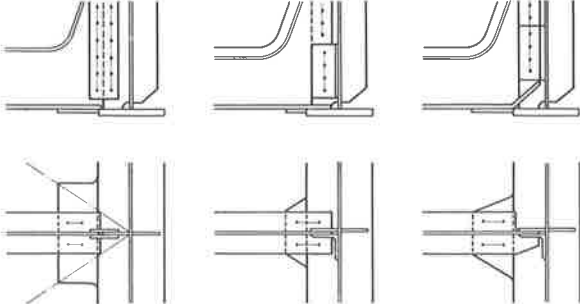
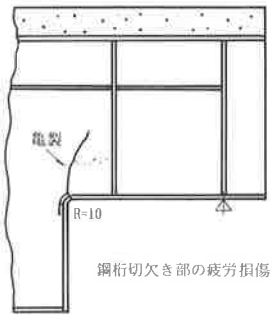
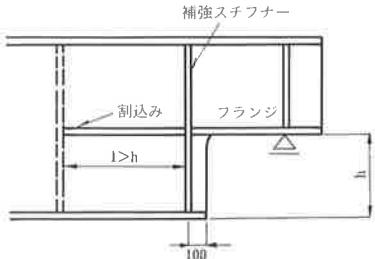
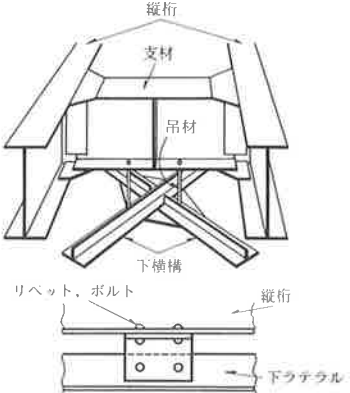
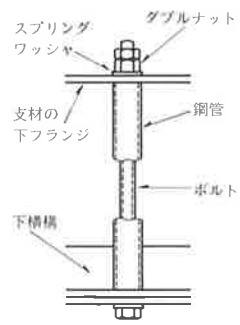
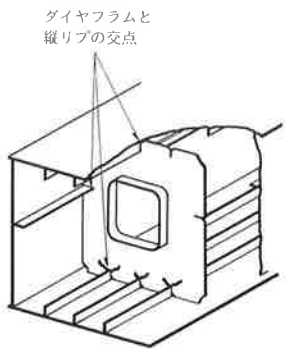
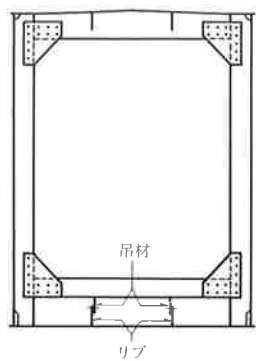
(1) 鉄道橋では疲労の考慮が必要

鉄道橋には設計荷重に近い大きさの列車が高い頻度で載荷されるので, 鋼材の疲労が問題になる。

表-4 損傷を考慮した溶接ディテールの例(1)

継手の部位	当初ディテール	改良ディテール	記事
a) 補剛材の下端部	 <p>亀裂</p> <p>この間を仕上げることもある。</p> <p>まわし溶接</p> <p>溶接しない</p>	 <p>応力範囲を検討する位置(*2)</p> <p>溶接サイズ 20</p> <p>10</p> <p>10</p> <p>溶接ビードの止端を応力方向にG仕上げとする。</p> <p>応力範囲を検討する位置(*1)</p> <p>b</p> <p>h</p>	補剛材下端の腹板の亀裂
b) ガセット	 <p>亀裂</p> <p>この部分は溶接後に切り取って仕上げる。</p> <p>仕上げ</p> <p>まわし溶接</p> <p>場合によって端部仕上げる。</p>	 <p>3以下</p> <p>45°</p> <p>裏溶接して完全溶け込みとする。</p> <p>2</p> <p>15</p> <p>40</p> <p>r=40</p> <p>G</p> <p>溶接後斜線部分を切断して円周方向にグラインダー仕上げとする。</p> <p>肉盛溶接後 r=10mmに腹板側の跡を桁の長手方向にグラインダーで仕上げる。</p> <p>7×10</p>	ガセット溶接部の亀裂
c) ダイヤフラム	 <p>亀裂</p> <p>ダイヤフラムの亀裂</p>		ダイヤフラムの補剛材下端部の亀裂
d) 縦桁端部	 <p>端縦桁</p> <p>端横桁</p> <p>亀裂</p> <p>(a) 損傷が生じた構造</p> <p>(b) 標準的な構造</p>	 <p>45°</p> <p>a</p> <p>30</p> <p>r=10</p> <p>b=100</p> <p>a</p> <p>上下フランジ共bの区間ですみ肉溶接からレ形溶接に漸変させる。</p> <p>完全溶け込み</p> <p>G</p> <p>2</p>	縦桁端部の腹板の亀裂

損傷を考慮した溶接ディテールの例(2)

継手の部位	当初ディテール	改良ディテール	記事
e) 横桁端部	 <p>(a) 損傷が現れた構造</p>	 <p>(b) 改良型の例</p>	<p>横桁端部の腹板の亀裂</p>
f) 端部切欠き部	 <p>鋼桁切欠き部の疲労損傷</p>	 <p>端部切欠きガーダーの現在の標準設計</p>	<p>主桁切欠き部の腹板の亀裂</p>
g) 下横構吊材			<p>下横構吊材のリベット、ボルトの弛み</p>
h) 箱桁ダイヤフラム			<p>ダイヤフラムと下フランジ縦リブの交点の腹板の亀裂</p>

古くは明治の頃のリベット構造に対する設計示方書でも、すでに疲労が考慮されていたが、溶接構造になるに及んで疲労の現象が複雑になっている。

鉄道橋の構造の代表的なものとして図-5に示す下路プレートガーダーを例にとり、列車通過時の荷重の伝達の仕方について説明する。

列車荷重は車輪からレールという縦方向の梁に伝達され、それをまくら木が横方向に支持する。その横方向のまくら木を縦方向の縦桁が支え、その縦桁が次に横方向の横桁で、そして横桁を今度は縦方向の主桁が支え、最後に横方向の橋脚や橋台が支えてやっと列車荷重は大地に達するもので、その応力の伝達距離は短く、この現象は常に繰り返されているので鉄道橋の場合は、比較的設計荷重に近い荷重が繰り返し載荷されるのが特徴である。

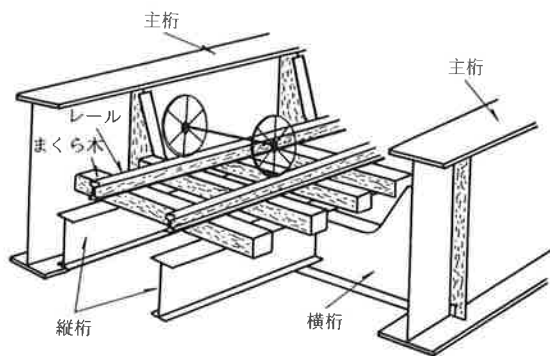


図-5 鉄道橋下路プレートガーダーの構造と部材名称

(2) 疲労を考慮した溶接ディテール

プレートガーダーのフランジと腹板を接続するすみ肉溶接は、応力方向と平行なのであまり疲労による許容応力の低下はないが、応力方向と直角のすみ肉溶接は完全なものでも、不溶着部により応力の流れが急変し、応力の集中が起こって疲労に対して不利になる。

例えばフランジ断面を途中で増加する時、特に引張り側では突合せ溶接の方がカバープレート添えるよりも効率がよい。

疲労や水密の点で、鉄道橋では連続溶接を用いて断続溶接や、みぞ溶接は用いていない。疲労を考慮した設計の主な溶接ディテールの例⁹⁾を表-4に示す。

表-4・a) はプレートガーダーの腹板の補剛材を溶接でつける場合で、中立軸に近づいて応力が減り応力に直角のすみ肉溶接(仕上げ)の許容応力になる所まで切り込む。

表-4・b) はフランジに直接ガセットプレートをつける場合で、すみ肉溶接であると許容応力を相当低くしなければならないので、ガセットに開先を取り、突合せ溶接としたものである。またすみ角部は少し大き目に作っておき溶接後に滑らかな形にすれば繰り返し応力に有利になる。

表-4・d), e) は床組の縦桁や横桁の端部の処理を示す。縦桁を連続桁にしたり横桁の下フランジを主桁とガセットプレートでつなげることは繰り返し荷重に対して有利である。

表-4・h) はボックスガーダーの下フランジの補剛であるが、それに直接横断方向にリブをつけず、縦方向のリブからT型の部材を介して横方向の支材に固定する。上フランジは圧縮なので直接すみ肉溶接でつけてもよい。

鉄道橋では応力集中、二次応力、腐食、振動および疲労などの原因によって、過去に損傷が発生した構造ディテールについては、その損傷の発生によって耐久性が低下しないようにディテールを改良し、設計の標準化を行っている。表-4は、損傷により改良したディテールと損傷を想定した設計ディテールの例を示したものである(鋼構造物の寿命に関する調査、日本鋼構造協会、JSSCレポートNo19、1991年)。

(3) 溶接橋の疲労による損傷事例

鉄道橋には前述のように明治、大正時代のリベット構造に対する設計示方書でもすでに疲労が考慮されていたが、当時の桁においても縦桁横桁との連結部のリベットの緩みや、連結山形鋼の亀裂、横構の振動による亀裂、まくら木を直接支える桁のフランジ部分、ピントラスのアイバーなどに、繰り返し荷重による損傷を生じたものがあつた。

溶接による補強形式のうちで比較的多く用いられたのが溝型補強であつたが、上フランジ側はまくら木からの直接荷重を受けて、直下の溶接部に亀裂が発生したものがあつた⁹⁾(図-6)。しかし、疲労応力の低い引張り下フランジ補強材端部には、列車本数が所定の量まで達しなかつたことと、設計荷重と実働荷重との差もあつて異常は認められなかつた。

初期の溶接鉄道橋としては昭和15年頃のI形桁もあるが、溶接構造の増加は昭和30年に入ってから著しく、その後半からは部材(縦桁、横桁の床組部材)はほとんど溶接によって形成されるようになった。

それらの橋梁は当然設計示方書にしたがって設計されたものであるが、設計計算がなされている主要部材の部分には損傷は生じていない。損傷の発生は、細部構造や製作の悪さ、振動、支承部の損傷による変位などが原因となって、亀裂が生じた例が大部分であった。

亀裂発生の大部分は、供用開始後10～20年を経過した橋梁に多く見受けられており、以下に溶接鉄道橋の主な疲労による亀裂の損傷事例^{10), 11), 12)}を示す。

〔事例1〕補剛材下端部の腹板の亀裂

腹板の補剛材下端の疲労損傷は、下路トラス縦桁および上・下路プレートガーダーの主桁に発生している。この損傷は設計標準で検査が義務付けられている性状のものではなく、列車通過時のフランジの横振動および腹板の面外振動に起因するものと考えられる。

(原因)

トラスの縦桁のような開断面と箱形断面桁のような閉断面では、補剛材下端付近の応力状態に影響を与える面外振動の性質に多少差がある。また、同じ構造でも腹板高の相異や載荷荷重の繰り返し速度によっては原因が面外振動であったり、梁としての面内応力であったりする。前者（原因が振動）の場合の局所的な応力状態は実測値や解析結果から下フランジの横振れと腹板の面外振動に左右され、亀裂は橋軸方向に水平に進展していくことが確かめられている。

一方、後者（原因が梁としての面内応力）の場合、亀裂は腹板上をビードに沿って、もしくは橋軸に斜め方向に進展していくが、この亀裂は桁高が小さいため載荷位置の応力が補剛材下端まで直接影響するもので、かつ、初期の溶接橋に多く発生している。

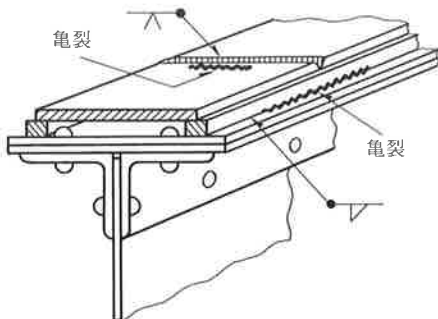


図-6 溝型補強溶接部の亀裂

(対策)

いずれの場合も、対策は、そこに発生する局部的応力を小さくしてやる必要で、亀裂の発生したものではその部分を十分にはつりとって開先溶接し、リップ付き当て板で補修するようにしている。また、防振用のストラットも効果がある(図-7)。

今後の設計への反映としては、応力集中を起こす溶接欠陥をできるだけなくすため、表-4(a)に示すようなディテールを採用することにしている。

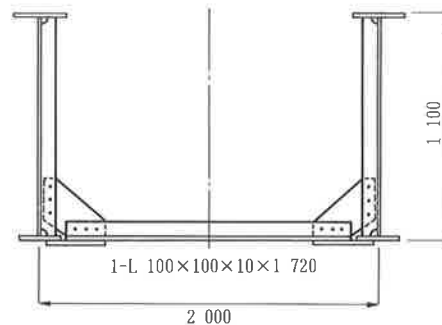


図-7 トラス縦桁補剛材下端のストラット補強

〔事例2〕ダイヤフラム腹板の亀裂

箱断面のプレートガーダーでは、ねじり剛性を増加させるために5～6 mおきにダイヤフラムを設けているが、各種形状のダイヤフラムのうちフルウェブのものに亀裂の発生が見られる。

亀裂は補剛リップとの交点の溶接ビード止端から発生し、斜め方向に進んでいる。この種の亀裂の発生状況をみると、同一設計図を使用し、同時に同じ箇所に架設されたにもかかわらず、多発しているものとほとんど発生していないものがあった。

(原因)

この種の亀裂の発生原因として、リップ溶接部が列車の通過によってダイヤフラムの面外振動による繰り返し応力を受けたこと、および製作時の溶接欠陥が考えられる。

この箇所の設計ディテールを表-4(c), (h)に示す。この部分は組立時に1 mm以内の間隙になるようにして溶接しているが、ディテールの拘束溶接となり大きな残留応力が発生しやすい。特にフルウェブの場合はその傾向は著しく、溶接時の間隙が広くなった場合、製作時に亀裂が発見される場合もある。した

がって製作時の施工の良否は、特にこの種の変状の発生に大きな影響を与える。このことは同じ設計図のもとで製作され、また外力などの条件が全く同一でありながら、製作メーカーの違いによって発生状況が異なっている。

(対 策)

損傷の発生したものの中には、1つの桁で多数発生しているものもあり、いかに経済的かつ効果的な補修方法を採用かが問題となる。この種の変状の大きな原因は、製作精度の悪さからくる溶接部の応力集中と考えられ、ダイヤフラムに発生している構造的応力状態からのものではないため、桁の安全性に重大な影響を与えるものではない。

この部分の設計に関しては従来から良いディテールの改良を加えているが、表-4(c)に示すような配慮をしている。

〔事例3〕 縦桁切欠き部腹板の亀裂

下路プレートガーダーや下路トラスの縦桁腹板の切欠き部において切欠きコーナー部の溶接ビード止端から発生したものである。

(原 因)

この変状の原因は局部的には前述の横桁の場合と似たものであるが、加えて次のことが考えられる。つまり、縦桁は列車荷重を直接受ける部材で、車両の横揺れや衝撃の影響を大きく受け、これによって縦桁の下フランジが横桁に連結されていないものでは面外に横揺れを起こし、切欠き部の応力集中箇所から亀裂が発生したものと考えられる。通常の桁では図-8(1)に示すように下フランジを横桁と連続した構造とするか、表-4(d)に示すように下フランジを半分延ばして締結しているが、このようなディテールのものには、この種の損傷は発生していない。

(対 策)

亀裂の発生したものに対する補修は、図-8(2)に示すとおり補強当て板による方法に加

えて下フランジの横揺れ防止工による方法を用いている。

縦桁は列車の通過によって多大の繰り返し応力を受けるため、橋梁部材の中で最も疲労損傷を受けやすい部材といえる。したがって、いったん亀裂が入ると進展も他の部材より速く、また、破断に至った場合は列車の走行にも直接影響を与えるので、注意を払う必要がある。

〔事例4〕 下路プレートガーダー、横桁切欠き部腹板の亀裂

この損傷は下路プレートガーダーの横桁切欠き部のコーナーから発生しているもので、切欠きコーナー部もしくは溶接ビード止端から発生し主応力の方向に亀裂が成長したものである。

(原 因)

この部分の疲労亀裂は切欠きコーナーの局部的な応力状態に支配されるので、製作時の切断精度、溶接ビード止端の形状などによって発生の差異があるが、種々の試験などによって2つの主要因によることが、確かめられている。すなわち、

- ①下フランジが桁端まで伸びていないことにより、切欠き箇所からフランジとの応力伝達が始まり、その結果、切欠き部に引張り応力が発生したこと
- ②シュー座の破損による支点沈下がこれを助長したこと

が考えられる。この亀裂の特徴は、ほとんどのものが桁端の横桁に発生しており、しかもシュー座の破損している箇所に限られていることである。

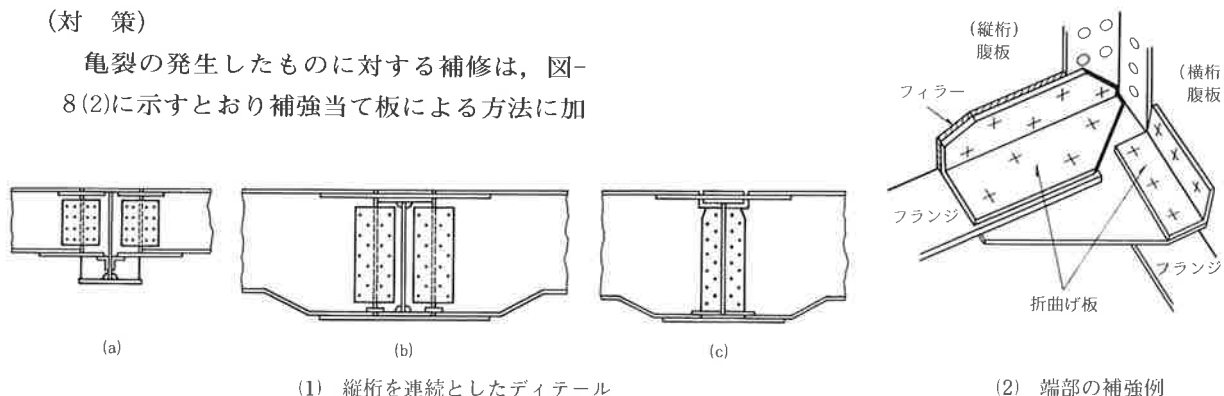


図-8 縦桁の連結と端部切欠き部の補強

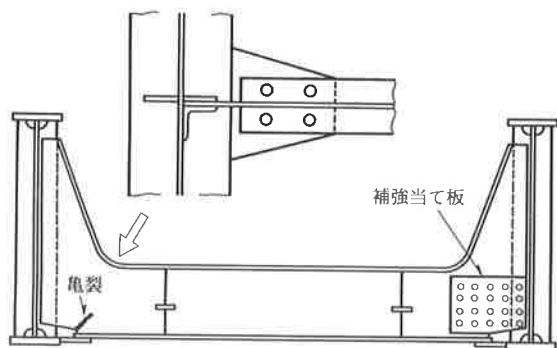


図-9 横桁の亀裂と補強

(対策)

亀裂の発生したものおよび亀裂の発生が予想される端横桁については、図-9に示す補強当て板による補修および補強をしている。

この損傷の発生に最も大きな因果関係をもつ支点沈下については、同一桁にある他の各支点を同一平面上にくるようにセットし、シュー座の破損を十分にはつり補修している。

新しい設計に用いるディテールは、表-4(e)に示すものとしている。これは、多少シュー座に異常が出て横桁には問題が生じないように、切欠き部をなくしたものである。

あとがき

以上鉄道橋に初めて溶接が用いられてから、現行の溶接設計がごく普通に行われるようになるまでにどのような技術開発や経緯があったか、調査を行い溶接橋のあゆみを紹介した。

今後の溶接鉄道橋の設計や維持管理の参考になれば幸いです。溶接橋の損傷例はわが国の溶接技術の開発途上期に製作された橋梁で、また材料の品質もよいものではなかったため、これが現在の橋梁にあてはまるとは考えられない。今日では鋼材や溶接材料の品質も飛躍的に向上し、橋梁の構造形式や溶接ディテールも改善され、また維持管理の状況も良好になったので、橋梁自体の原因による損傷は今後大幅に減少するものと考えられる。

現場溶接については溶接の当初から、現場での溶接の品質は工場溶接に劣るという考え方から、鉄道橋では新橋梁の製作にはあまり用いられていない。十分な管理体制を整え、注意深い施工管理の基に経験を重ねていくことにより、橋梁の機能、美観、経済性にこたえるものとして発展が期待される。

最後に本文のまとめに当り、ご助言とご指導をいただいた鉄道総合技術研究所・構造物研究室の関係者に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 友永和夫：鉄道橋の保守並びに補強法に就いて，土木学会夏期講習会テキスト，1949.
- 2) 田中 豊・黒田武次：松山川橋梁腐蝕桁電気溶接修理補強工事に就いて，業務研究資料，20-11，1932.3.
- 3) 稲葉権兵衛：全溶接江戸坂跨線（田端大橋）道路橋設計概要，土木学会誌，21-5，1935.3.
- 4) 田中 豊・平井 敦：鋼橋（1）第11章プレートガーダー，社文社，1950.
- 5) 久保田敬一：本邦鉄道橋ノ沿革ニ就テ，業務研究資料，22-2，鉄道大臣官房研究所.
- 6) 構造物設計のあゆみ，構造物設計資料，No. 13，1968.3.
- 7) 奥田 庸・八巻康博・佐々木秀弥・佐藤哲也・井関治郎：北総線・都計道3・4・20架道橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol. 24 No. 12，1990. 12.
- 8) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説・鋼鉄道橋，1983.4.
- 9) 田島二郎・阿部英彦：溶接構造と疲労，土木学会誌増刊号，1981.
- 10) 阿部英彦：補強の現状と問題点(国鉄)，橋梁と基礎，Vol. 8 No. 10，1974. 10.
- 11) 野沢三三・山田幸男：新幹線橋梁の現状と諸問題，鉄道土木，19-3，1977.3.
- 12) 阿部英彦・谷口紀久・阿部 充：鋼鉄道橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol. 17 No. 8，1983.8.