

## § 2. 溶接割れに関する既往の知見の整理

### 2-1. 溶接施工に関する技術的な変遷

#### 2-1-1. 製鋼技術の変遷<sup>1~5)</sup>

##### (1) 製鉄の起源

人類と鉄との付き合いは古く、紀元前より鉄づくりは行われてきた。

自然界に存在する鉄の多くは、酸化鉄の形で存在しているため、酸化鉄から鉄を得るためには、酸化鉄を還元して鉄を得る必要があった。古くは、たたら吹きに代表されるような直接製鋼法によって、酸化鉄から直接炭素量の少ない銑鉄や鋼鉄を得ていた。しかし、1400年ごろにドイツのライン川流域で水車を送風の動力源とした高炉が発明されて高温が得られるようになると、大量の鉄を溶けた状態で生産できるようになった。高炉で熔融された銑鉄は炭素量が多く融点が高いため、型に流し込んで鑄鉄として利用できたが、炭素量が多いため脆く、そのままでは刃物などの鋼としての利用はできなかった。そこで、高炉から取り出した銑鉄から炭素や不純物を取り除く製鋼技術が発生した。初期の製鋼は、銑鉄を木炭と一緒に焼き脱炭を行ったり、反射炉を用いてパドル攪拌を行いながら脱炭を行ったが、産業革命がおこり動力が発達するとともに鉄の需要が急激に増加していく中、効率的に銑鉄から鋼鉄をつくる方法が求められた。

##### (2) 現代の製鋼技術の発達

高炉で作られる銑鉄には4.5%程度の炭素が溶け込んでいる。また、鉄鉱石の性質により含有量は異なるものの、有害なリン・硫黄が含まれている。これらの有害元素を取り除き、有用な元素を添加して鋼の性質を作りこむ事を製鋼と呼ぶ。

現代の製鋼は1856年のヘンリー・ベッセマーによる転炉法の発明により始まる。それまで銑鉄を脱炭するためには何かしらの熱源を必要としたが、ベッセマーは高炉から取り出した溶銑を溶けたまま別の炉に移し、炉の底から空気を吹き込むことで、空気中の酸素で溶銑中の炭素を燃焼させて脱炭するとともに、その熱で溶銑の熔融状態を維持することに成功した。ベッセマー転炉は、大量の溶銑を短時間で熔融状態のまま脱炭することができる画期的な発明であったが、リンや硫黄の除去ができず、それらを含まない良質な鉄鉱石を用いた溶銑でしか、実用的な鋼を作ることができなかった。

同じ年にウィリアム・ジーメンスとフリードリヒ・ジーメンスの兄弟によって蓄熱法が完成された。反射炉において、鉄の溶解の際の排ガスの熱をいったん耐火煉瓦に蓄熱し、その熱を再利用して空気と燃料ガスを予熱して燃焼させることで高温を得て、溶鋼を作ろうとしたのである。しかし、ジーメンス兄弟の反射炉では溶鋼を実用的に作ることはできなかった。溶鋼を作るための高温に、炉の耐火物が耐え切れなかったためである。その後、製鉄業を営んでいたピエール・マルタンはジーメンス兄弟の蓄熱法の特許を買い取り、密閉しない炉床を用いたオープン・ハース法と組み合わせて1864年に平炉を完成させる。しかし、この平炉もリンや硫黄の除去が出来ず、良質な鉄鉱石を用いた溶銑でしか実用鋼を作ることができなかった。この問題を解決したのがジドニー・トーマスである。トーマスは、銑鉄中のリンや硫黄が高温酸素に酸化されてもスラグとならず、鋼との分離ができない問題を、スラグに石灰石などの塩基性のスラグを添加することで酸化物をスラグに吸着させて解決しようとした。当時、転炉も平炉も内貼りには酸性耐火物である珪石煉瓦が使われており、塩基性のスラグであ

る石灰などを添加すれば、珪石煉瓦と石灰が激しく反応してしまい、炉壁が浸食されてしまう。塩基性のスラグを使用するには、塩基性の耐火物の開発が必要であった。しかし、当時塩基性の耐火物は当時存在せず、1878年、トーマスはこの問題を解決するために、塩基性耐火物にドロマイドを用いて作ることを発明し、転炉に応用した（トーマス転炉）。その後、この耐火物は平炉にも適用され、転炉・平炉での塩基性スラグによるリン・硫黄の除去が可能となったのである。しかし、トーマス転炉は炭素だけでなくリンの酸化熱を熱源として必要としていたため、今度は高リン鉱石による銑鉄（トーマス銑）を使用する必要があるという制約を抱えていた。一方、塩基性平炉は外部燃料を使い、熱効率のいい蓄熱炉で原料の制約は大きく受けず、また転炉法では反応速度が速く十分に除去しきれなかったリン・硫黄も十分に除去することができたため、高品質な鋼を作ることができた。そのためトーマス転炉はドイツ・フランスや北欧の高リン鉱石を用いる製鋼においては重要な役割を演じたが、そのほかの主要な製鉄国においては、平炉法が支配的であった。

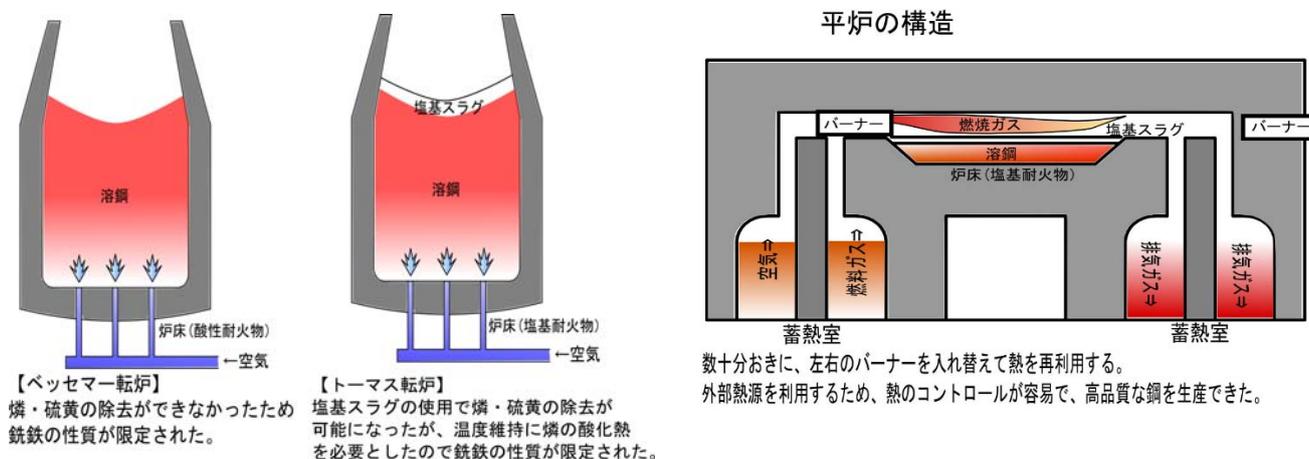


図 2-1-1 ベッセマー転炉・トーマス転炉と平炉の構造

### (3) 純酸素 LD 法の出現、平炉の衰退

1905年に空気中の酸素を空気から分離する方法が開発されてから、転炉に純酸素を用いる試みがなされた。純酸素を用いることで低リン鉱石でも十分な熱量が得られるうえ、空気中の窒素が鋼に溶け込むのをコントロールすることができた。しかし、純酸素を炉底から吹き込むと、その高熱により炉底の耐火物が激しく消耗し、結局酸素濃度を十分にあげることができず純酸素による転炉法は限定的であった。1949年、オーストリアでこの問題を解決する純酸素 LD 法が開発される。従来、銑鉄の攪拌のために炉の底から吹き込むのが当たり前であった酸素を、炉の上から吹き込んでも十分に攪拌されることが分かったのである。これにより炉底の消耗の問題を解決した転炉は、その生産性と品質の高さから、世界中でこれまで優位であった平炉から置き換えられた。日本においては特に平炉から LD 転炉への置き換えは顕著で、1956年に当時日本で唯一ベッセマー転炉を運用していた日本鋼管（現 JFE）が日本側の代表としてオーストリアの Alpine 社と技術導入契約を結び、国内高炉各社にサブライセンスとして供与する形で 1956年～1971年の 15年間で一気に置き換えが進んだ。1971年にはすべての国内メーカーが平炉での生産を終了している。なお、同時期に純酸素を平炉に適用する試みもなされているが、純酸素により発生するガスと熱の問題と平炉との相性が悪く、技術的には転炉法が

優位であった。また、戦後の屑鉄安の銑鉄高の時代から、高度成長期を迎えて屑鉄高・銑鉄安となり、屑鉄をつかう平炉の経済的優位性が失われてきたこと、鋼材のニーズが造船材主体から、自動車用鋼板（低炭素鋼）主体へと移り変わったことで低炭素鋼の生産に有利な転炉に優位性が生まれたこと、日本鋼管を中心として、技術の開示と指導が業界内で積極的に行われていたことなど、様々な要因が日本の迅速な転炉への置き換えに影響したと言える。

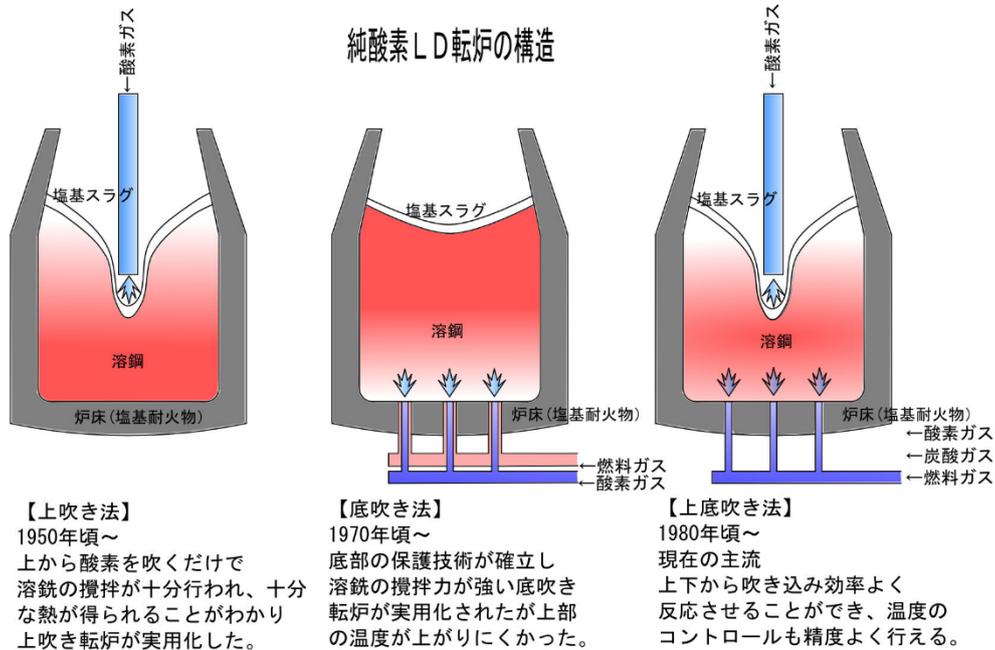


図 2-1-2 純酸素LD転炉の構造

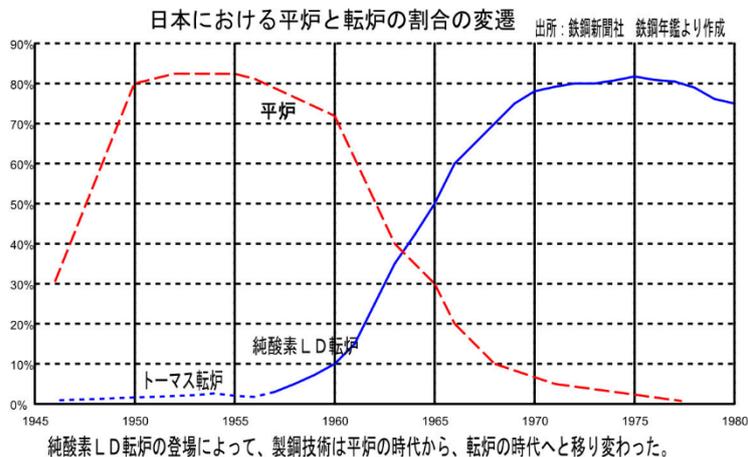


図 2-1-3 日本における平炉と転炉の生産割合の変遷

#### (4) 真空脱ガス技術

1960年代になると、転炉により一次製錬が完了した溶鋼を更に真空槽の中で二次製錬する技術が誕生する。溶鋼を転炉から取鍋へ移したのちに、真空槽の中に吸い上げて、ガス成分である水素・窒素・一酸化炭素を発泡させて除去する方法である。DH 真空脱ガス法とよばれるこの方法により、鋼材中の有害な水素・窒素・一酸化炭素などのガス成分を更に除去することが可能になった。その後 1970年代になると RH 真空脱ガス法と呼ばれる方法が、転炉と連続鑄造の発達とともに主要な脱ガス設備

として普及していく。1980年代に入ると1970年代には16%程度であった真空処理比率も1985年には50%を超えるとともに、当初は脱ガスを目的としていた真空槽での脱炭・脱硫・脱酸が可能となり極低硫・低炭素鋼の安定製造が行われるようになる。

### (5) 鑄造技術の変遷

転炉で作られた溶鋼は、いったんスラブ・ブルーム・ビレットと呼ばれる鋼片に加工して、再加熱後に厚板・薄板・形鋼への加工を行う。溶鋼を半製品の鋼片に加工する工程が、造塊法と連続鑄造法である。1960年代までは造塊法とよばれる方法で、脱酸した溶鋼をいったん鑄型に流し込み冷やして鋼塊としたのち、分塊圧延機と呼ばれる圧延装置で圧延して各種の鋼片を製造していた。鑄型に流し込んだ溶鋼の脱酸具合により、鋼の性質と鋼塊の歩留りが変わるため、その鋼片の最終製品に応じて、脱酸具合を調整していた。いわゆるリムド鋼とキルド鋼である。1970年代になって連続鑄造法が開発されると、真空脱ガス技術の発展と共に、生産性・歩留り・製品品質に優れた連続鑄造法が生産のほとんどを占めるようになり、日本においては1980年には60%を超え1985年には特殊な事情がなければ連続鑄造で生産されるようになった。なお、連続鑄造で作られる鋼片は連続鑄造の特性上、すべてキルド鋼である。造塊法では歩留りのよかったリムド鋼も、連続鑄造の生産性には到底及ばず、リムド鋼相当のキルド鋼として姿を消していった。

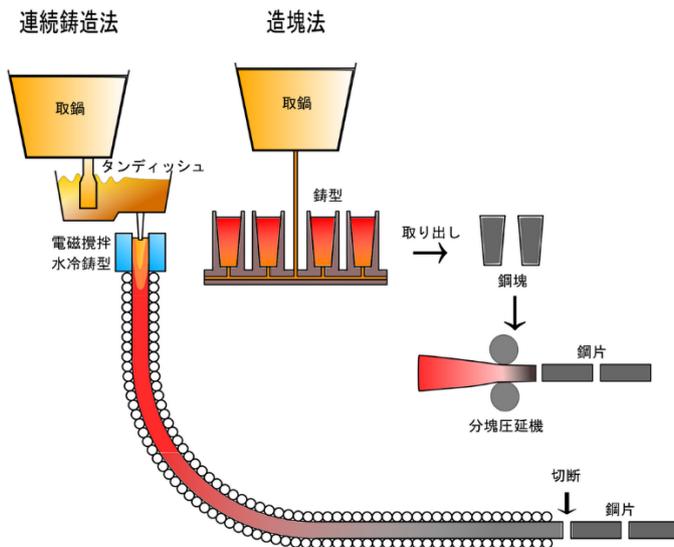


図 2-1-4 連続鑄造法と造塊法

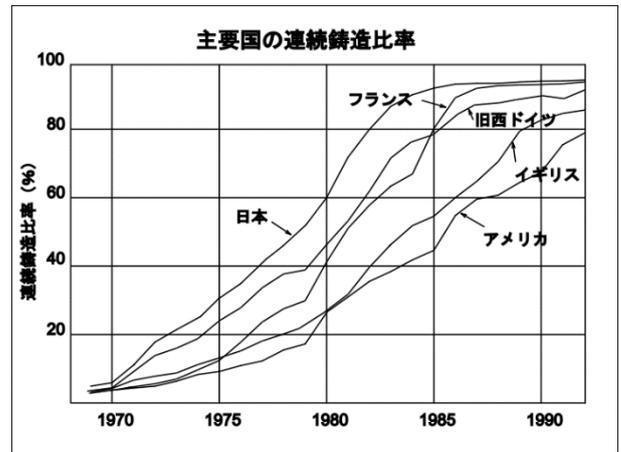


図 2-1-5 主要国の連続鑄造比率グラフ

### (6) 圧延技術の進化 (TMCP 鋼の開発)

1980年代になると、従来合金元素を添加して固溶強化によって強度を確保していた高強度の鋼材に新しい製造技術であるTMCP(Thermo-Mechanical Control Process)が導入され始める。厚板の圧延工程における制御圧延技術と制御冷却技術を組み合わせて、圧延中に鋼の組織の状態を作りこむ事により優れた機械的性質を引き出す製造技術である。

これにより、溶接割れ影響のある成分量の  $C_{eq}$  や  $P_{CM}$  を抑えた高強度鋼の製造が可能になった。近年はTMCPの技術によってさらに高性能な、橋梁用高性能鋼板 (SBHS) などの高性能鋼板が開発されている。

## 2-1-2. 溶接技術の変遷<sup>6~8)</sup>

### (1) 溶接の起源

金属を高温にして叩いて接合する鍛接や、融点の低い異金属を溶かして接合する、ろう付けや鋳掛などの広義での溶接は古くから行われてきた。接合する金属同士を完全に溶融させて接合するいわゆる融接としての溶接は、局部的に鉄を融点まで温度上昇させる必要があり、その熱源が発見されることにより実用化された。ここでは、抵抗発熱を利用した抵抗溶接、アセチレン等のガス炎を利用したガス溶接等には触れず、アーク熱を利用したアーク溶接について述べる。

### (2) アーク溶接の誕生

電気の短絡によって発生するアーク現象は、電池が発明されて以来広く知られていたものであった。1807年、イギリスのハンフリー・デービーがアークを安定的に発生させることに成功する。当初はアーク光による照明のために開発された技術であった。

このアーク灯が発生する熱が6000°C近いことから、それを利用して金属を溶解させて接合しようという試みが各所でなされ、1865年にウエルデ(WELDE)が小さな鉄片を、アークを用いて溶接することに成功する。これがアーク溶接の初めての特許であった。1885年には炭素電極と母材間にアークを飛ばし溶加材をして溶接する、炭素アーク溶接法の特許を、ベナードス(N.V.BENERDOS)とオルチュエスキ(S.OLSZEWSKI)の連名で、英国で取得する。この溶接方法は、炭素棒と母材間にアークを出して加熱し、溶加棒を加える現在のTIG溶接に代表される非消耗電極アーク溶接の最初のものである。1892年には、ロシアのスラビヤノフ(N.G.SLAVYANV)によって金属アーク溶接法が発明される。これは現在の被覆アーク溶接の被覆のない裸棒によるアーク溶接で、消耗電極型溶接の最初のものである。



図 2-1-6 アーク溶接の初期の変遷

### (3) 被覆アーク溶接の誕生

1907年にスウェーデンのチェルベルヒ（OSCAR KJELLBELG）によって被覆アーク溶接棒が考案される。当初は裸棒アーク溶接のアークの発生と継続の難しさを簡便にするための工夫だったが、次第にアークによる溶融金属を大気から保護する重要性が認識し、棒の外周に塗布したフラックスにアークの継続性、大気遮断機能、冶金機能などの様々な機能を持たせた厚被覆アーク溶接棒を1910年に発表した。この被覆アーク溶接棒は1913年にイギリスで市販されたが、裸棒に比べて割高だったため、あまり普及せず、各工場で石灰液などにどぶ漬けするなどした自家製棒によって溶接を行っていた。1920年頃になると被覆棒を使って全溶接船が建造されるようになる。1938年にはベルギーの溶接構造の道路橋 HASSELT 橋が、完成後まもなく活荷重に関係なく夜間の気温低下が原因で崩壊する事故が発生する。また、1943年ごろにはアメリカの戦時標準船（リバティ船）2580隻中114隻が溶接を原因とした割れ事故を起こす。これらの事故により溶接による脆性破壊の研究が進み、鋼材の規格 SM 材が生まれることとなる。

一方、被覆アーク溶接は戦後も溶接の主要な位置を占め、戦後の能率化の要請にこたえてグラビティ溶接が普及する。水平すみ肉溶接の多い船の溶接に、一人で数台の溶接を操作できるように工夫された溶接棒ホルダをもちいて、重力で自動溶接する溶接法である。

グラビティ溶接は高能率であったが、被覆アーク溶接の欠点の一つである棒の継ぎ目の補修溶接の欠点を克服することができなかった。また、被覆アーク溶接は被覆の乾燥を十分に行い管理しないと吸湿してしまい、その水分が溶接時に拡散性水素として溶接金属中に入り込んでしまい溶接割れを誘発するという問題があった。

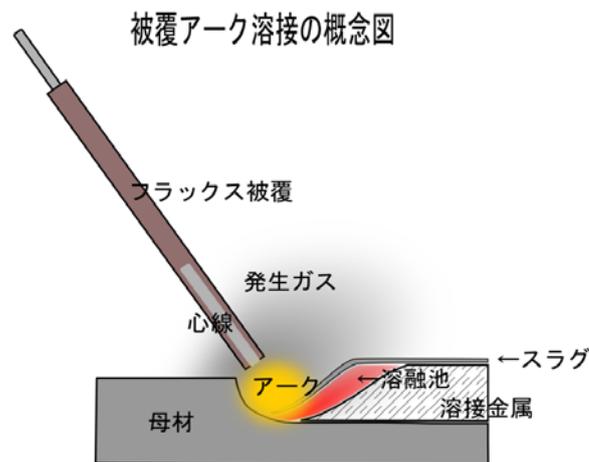


図 2-1-7 被覆アーク溶接の概念図

#### (4) サブマージアーク溶接法

金属アーク溶接の時代から、溶接を自動化しようという試みはさまざまに試されていた。

当時からコイル状に巻いたワイヤを用いて、自動台車で倣い溶接を行っていたものの、裸ワイヤではどうしてもビード形状・溶接金属の性質・作業性に問題があった。1935年にフラックスを粒上にして事前に溶接個所に散布して裸ワイヤで溶接する方法がアメリカで発明された。このサブマージアーク溶接は1000Aを超える大電流が扱えるうえ、ビード表面が滑らかで高速・高能率の自動溶接として発展し、1950年頃には日本に導入され現在に至っている。

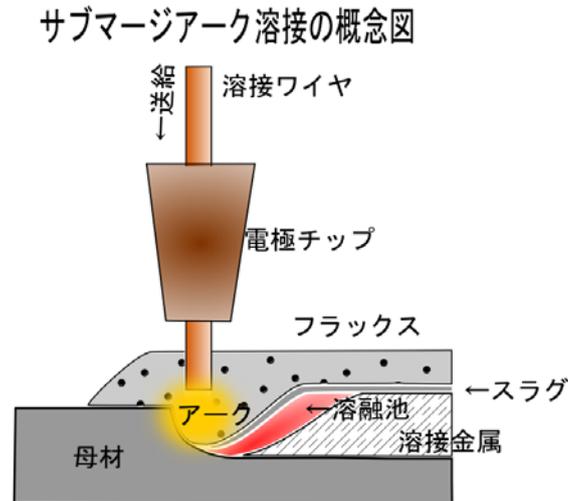


図 2-1-8 サブマージアーク溶接の概念図

### (5) ガスシールドアーク溶接法

初期の炭素アーク溶接法の発展系として、炭素に変わりアークによる消耗に強いタングステンを電極にし、アークをアルゴンなどの不活性ガスでシールドした TIG 溶接が 1930 年に発明され、アルミニウムなどの非鉄金属の溶接に用いられていたが、厚板のアルミニウム板を効率よく溶接するために、この溶接と消耗電極方式を組み合わせた MIG 溶接 (Metal Inert Gas) が 1948 年に開発される。この溶接方法は、アルゴンやヘリウムといった不活性ガスで溶融金属を大気からシールドし、消耗電極の溶接ワイヤを連続的に送給するため、きわめて能率の良い溶接が行える方法である。この溶接法は鉄系の溶接にも応用されたが、不活性ガスが高価なため、シールドガスに炭酸ガスを使用したのが炭酸ガスアーク溶接である。炭酸ガスはアーク雰囲気内で分解され溶着金属の酸化が起きてしまうため、溶接には不向きであるとされていたものの、1953 年に鉄系のワイヤに Mn や Si といった脱酸材を適当に含ませることによって、安価で高能率な溶接ができることがわかり一気に普及する。

炭酸ガスアーク溶接はその後フラックス入りのワイヤの高性能化に伴い、溶着金属に様々な性質をもたせることができるようになり、被覆アーク溶接にとってかわるようになっていった。これに伴い溶接金属中の拡散性水素量は格段に低下し、拡散性水素に起因する割れはめったに起こらなくなった。

ガスシールドアーク溶接法の概念図

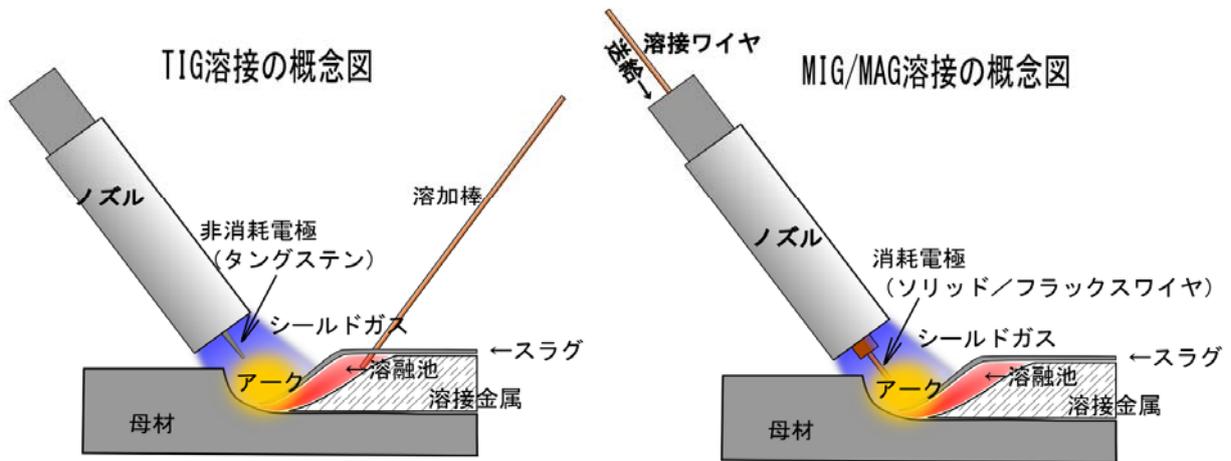


図 2-1-9 ガスシールドアーク溶接の概念図

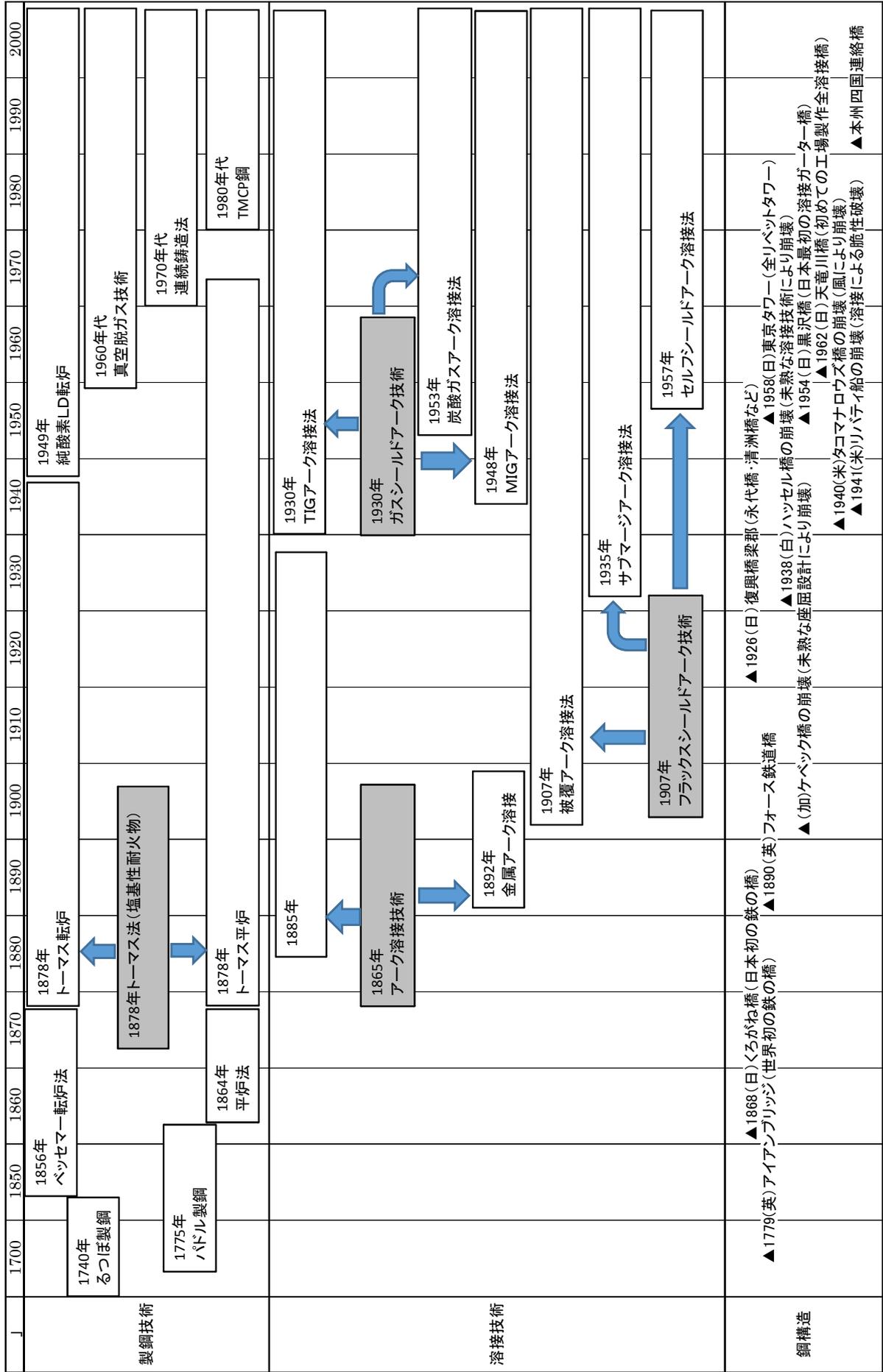


図 2-1-10 製鋼技術・溶接技術・鋼構造の変遷

## 2-1-3. 技術基準

### (1) 道路橋

鋼道路橋の溶接に関する基準としては、現在では、「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 平成 24 年 3 月 (社)日本道路協会」が用いられている。

II 鋼橋編の「18 章 施工 18.4 溶接」に記載されている内容（溶接作業に関する事項のみを対象とし、きず検査は除く）について、表 2-1-1 に過去の基準の変遷を整理する。

表 2-1-1 対象とする基準類

番号	基準名	主な内容
1	鋼道路橋設計並製作示方書案 S14.9 内務省 土木局	・総則，荷重，活荷重負荷の方法，荷重の分布，許容応力，部材の設計，設計細目，雑則／鋼道路橋製作示方書案：総則（ <b>鋸による製作基準</b> ），製作監督，製作，工場塗工，記号と発送，架設，現場塗工，雑則
2	鋼道路橋設計示方書案解説 S15.6 日本道路技術協会編纂	・総則，荷重，活荷重負荷の方法，荷重分布，許容応力，部材の設計，設計細目，雑則／附録；鋼道路橋製作示方書案：総則（ <b>鋸による製作基準</b> ），製作監督，製作，工場塗工，記号と発送，架設，現場塗工，雑則
3	電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書案解説 S15	・適用範囲：鋸結に代るべき電弧溶接に適用する。・規定項目：総則の章；鋼材，電極棒，溶接機など／設計の章；溶接の種類，許容応力，溶接継手の寸法及び設計法など／その他；施工，検査，溶接工の章。・鋼材：SS41 を標準。・溶接の種類：応力を伝達する溶接は突合せ溶接と隅肉溶接を標準。・溶接部の許容応力度：母材の許容応力度に低減係数を考慮
4	鋼道路橋設計示方書案解説 S25.12	・総則，荷重，活荷重負荷の方法，荷重分布，許容応力，部材の設計，設計細目，雑則／附録；鋼道路橋製作示方書案：総則（ <b>鋸による製作基準</b> ），製作監督，製作，工場塗工，記号と発送，架設，現場塗工，雑則
5	鋼道路橋設計示方書／鋼道路橋製作示方書解説 S31.5	・総則，荷重，鉄筋コンクリート床版，許容応力度，構造物の設計／総則（ <b>リベットによる製作基準</b> ），材料，工作，仮組立および組立記号，工場塗装，運搬，架設，現場塗装，雑則
6	溶接鋼道路橋示方書 解説 S32.7	・総則，設計， <b>施工</b> ，修理および補強，検査および試験
7	鋼道路橋の合成桁設計施工指針 S35.1	・総則，材料，設計一般，設計細目，施工（支保工および架設，床版，鋼桁およびずれ止め） ・ <b>溶接に関する記述無し</b>
8	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.6	・総則，設計， <b>施工</b> ，修理および補強，検査および試験
9	鋼道路橋設計示方書／鋼道路橋製作示方書 S39.6	・総則，荷重，鉄筋コンクリート床版，許容応力度，構造物の設計／総則（ <b>リベットによる製作基準</b> ），材料，工作，仮組立および組立記号，工場塗装，運搬，架設，現場塗装
10	鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針 S40.6	・総則，材料，設計一般，設計細目，施工（支保工および架設，床版，鋼ゲタおよびずれ止め，応力調整）
11	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.5 (S43.5 増補)	・総則，設計， <b>施工</b> ，修理および補強，検査および試験
12	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S48.2	・総則，許容応力度，部材に関する一般事項，連結，対傾構・横構，床版，床組，プレートガーダー，合成げた，トラス，アーチ，ケーブル，鋼管構造，ラーメン構造， <b>施工</b>
13	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S55.2	・総則，許容応力度，部材に関する一般事項，連結，対傾構・横構，床版，床組，プレートガーダー，合成げた，トラス，アーチ，鋼管構造，ラーメン構造，ケーブル， <b>施工</b>
14	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H2.2	・同上
15	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H6.2	・同上
16	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H8.12	・同上
17	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋 H14.3	・総則，設計の基本，許容応力度，部材の設計，耐久性の検討，連結，対傾構・横構，床版，床組，鋼げた，コンクリート床版を有するけた構造，トラス，アーチ，鋼管構造，ラーメン構造，ケーブル構造， <b>施工</b>
18	道路橋示方書・同解説 <sup>18)</sup> H24.3	・総則，設計の基本，許容応力度，部材の設計，耐久性の検討，疲労設計，連結，対傾構及び横構，床版，床組，鋼桁，コンクリート床版を有する桁構造，トラス，アーチ，鋼管構造，ラーメン構造，ケーブル構造， <b>施工</b>

以下に、上記示方書内の溶接の項目に着目し、整理した結果を示す。

### 1) 溶接材料

番号	基準名	規程内容の概要
3	電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書 案 解説 S15	【電極棒の直径 第 35 条】: 応力を伝達すべき溶接に使用する電極棒の直径は 4mm または 6mm を標準とする。電極棒は十分に乾燥させるものとする。
6	溶接鋼道路橋示方書 解説 S32. 7	【溶接棒 49 条】: 使用する溶接棒の種類は、工事前に監督者の承認を受けなければならない。応力を伝える溶接に使用する溶接棒の直径は、4mm ないし 6mm を標準とする。乾燥器の使用などの考慮を必要とする。溶接棒を赤熱するまで使用してはならない。
8	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39. 6	【溶接棒 59 条】: 溶接棒は溶接する鋼材の性質に適応したものを選定しなければならない。応力を伝える溶接に用いる溶接棒の直径は、4mm ないし 6mm を標準とする。乾燥器の使用などの考慮を必要とする。溶接棒を赤熱するまで用いてはならない。
1 1	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39. 5 (S43. 5 増補)	同上
1 2	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S48. 2	被覆アーク溶接棒使用区分（軟鋼用被覆アーク溶接棒と低水素系被覆アーク溶接棒の適用鋼種および板厚）、溶接棒乾燥の標準（軟鋼用被覆アーク溶接棒と低水素系被覆アーク溶接棒の乾燥温度と乾燥時間）、フラックスの乾燥標準（サブマージアーク溶接に用いる溶融フラックスと焼成フラックスの乾燥温度と乾燥時間）が規定されている。
1 3	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S55. 2	同上
1 4	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H2. 2	溶接材料使用区分（強度の同じ鋼材を溶接する場合と強度の異なる鋼材を溶接する場合）、耐候性鋼材を溶接する場合の溶接材料、被覆アーク溶接で施工する場合で低水素系溶接棒を使用する場合の規定、溶接棒乾燥の標準（軟鋼用被覆アーク溶接棒と低水素系被覆アーク溶接棒の乾燥温度と乾燥時間）、フラックスの乾燥標準（サブマージアーク溶接に用いる溶融フラックスとボンドフラックスの乾燥温度と乾燥時間）が規定されている。
1 5	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H6. 2	同上
1 6	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H8. 12	同上。但し、被覆アーク溶接で施工する場合で低水素系溶接棒を使用する場合の規定の内、「板厚 25mm 以上 38mm 未満の SS400, SM400 を予熱を行わないで溶接する場合」の条文は削除された。
1 7	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋 H14. 3	同上。但し、溶接材料使用区分の場合分けが 2 ケースから 6 ケースに増えている（強度の同じ鋼材を溶接する場合、強度の異なる鋼材を溶接する場合、じん性の同じ鋼材を溶接する場合、じん性の異なる鋼材を溶接する場合、耐候性鋼と普通鋼を溶接する場合、耐候性鋼と耐候性鋼を溶接する場合）。
1 8	道路橋示方書・同解説 H24. 3	同上。但し、「CO <sub>2</sub> ガスシールドアーク溶接に用いる CO <sub>2</sub> ガスは、JIS K 1106 (液化二酸化炭素 (液化炭酸ガス)) に規定する 3 種とする。」が解説から条文内に記載箇所が変更されている。

## 2) 温 度

番号	基 準 名	規程内容の概要
3	電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書 案 解説 S15	【作業場 第 40 条】：作業所の気温が零下 5° C 以下に達する場合は作業の中止を命ずる。
6	溶接鋼道路橋示方書 解説 S32.7	【気温 66 条】：気温が 5° C 以下の場合には、溶接を行ってはならない。ただし、気温が -15° C 以上の場合において、溶接線から 10cm 以内の母材部分を溶接時に適当な温度になるように予熱すれば溶接を行ってもよい。 なお、気温が -15° C より低い場合には溶接を行ってはならない。
8	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.6	【気温 76 条】：気温が 0° C 以下の場合には、溶接を行ってはならない。ただし、気温が -15° C 以上の場合において、溶接線から 10cm 範囲内の母材部分を溶接時に適当な温度になるように予熱すれば溶接を行うことができる。 【解説】：なお、気温が -15° C より低い場合には溶接を行ってはならない。
1 1	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.5 (S43.5 増補)	同上
1 2	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S48.2	温度に関して予熱の該当条件として記載されている。 (9) 予熱：気温（室内の場合は室温）が 5° C 以下の場合には、予熱しなければならない。 【解説】：〈予熱必要範囲を 5° C 以下としたのは、実績の少ない耐候性鋼や SM50Y, SM53 などに対して安全を考えたためである〉
1 3	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S55.2	同上
1 4	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H2.2	同上
1 5	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H6.2	同上
1 6	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H8.12	P <sub>CM</sub> を基本に予熱の規定を見直すことになり、温度に関しては、「予熱温度の標準」の注記に記載が残った。 注：1) ”予熱なし” については、気温（室内の場合は室温）が 5° C 以下の場合には 20° C 以上に予熱する。
1 7	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋 H14.3	P <sub>CM</sub> を基本に予熱の規定を見直すことになり、温度に関しては、「予熱温度の標準」の注記に記載が残った。 注：”予熱なし” については、気温（室内の場合は室温）が 5° C 以下の場合には 20° C 程度に加熱する。
1 8	道路橋示方書・同解説 H24.3	同上

### 3) 仮付あるいは部材の保持

番号	基準名	規程内容の概要
3	電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書 案解説 S15	－（該当規定なし）
6	溶接鋼道路橋示方書 解説 S32.7	【仮付け 56 条】：仮付けはできるだけ最小限度にとどめ、本溶接の一部となる仮付けは特に欠陥のない溶接でなければならない。ひびわれの入った仮付け部に本溶接をするときには、底まで十分はつり取った後、溶接しなければならない。
8	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.6	【仮付け 66 条】：本溶接の一部となる仮付け溶接は最小限度にとどめ、とくに欠陥のない溶接でなければならない。仮付け溶接の最小長は 40mm とする。
1 1	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.5 (S43.5 増補)	同上
1 2	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S48.2	(6) 仮付け溶接：・本溶接の一部となる仮付溶接には、本溶接を行なう溶接工と同等の技術をもつ者を従事させ、使用溶接棒および溶接姿勢は、本溶接の場合と同様に管理しなければならない。 ・仮付け溶接の長さは 80mm 以上とし、すみ肉(または換算)脚長は 4 mm 以上とする。 ・仮付け溶接は、組立て終了時までにはスラグを除去するものとし、少なくとも溶接部表面にわれがないことを確認しなければならない。もし、われが発見された場合には、その原因を究明し、適当な対策を講じなければならない。
1 3	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S55.2	同上
1 4	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H2.2	(6) 仮付け溶接：1) 本溶接の一部となる仮付け溶接には、本溶接を行なう溶接工と同等の技能をもつ者を従事させるものとする。2) 溶接姿勢は本溶接の場合と同じとするのを原則とする。3) 使用溶接棒は本溶接の場合と同様に管理しなければならない。4) 仮付け溶接のすみ肉(または換算)脚長は 4 mm 以上とし、長さは 80mm 以上とする。ただし、厚い方の板厚が 12mm 以下の場合、または鋼材の炭素当量が 0.36% 以下の場合には 50mm 以上とすることができる。5) 仮付け溶接は、組立終了時までにはスラグを除去するものとし、溶接部表面にわれがないことを確認しなければならない。もし、われが発見された場合には、その原因を究明し、適当な対策を講じなければならない。
1 5	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H6.2	同上
1 6	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H8.12	同上
1 7	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋 H14.3	3) 組立溶接：i) 組立溶接は、本溶接の場合と同様に管理して施工しなければならない。ii) 組立溶接のすみ肉(又は換算)脚長は 4 mm 以上とし、長さは 80mm 以上とする。ただし、厚い方の板厚が 12mm 以下の場合、又は鋼材の溶接割れ感受性組成 $P_{CM}$ が 0.22% 以下の場合には 50mm 以上とすることができる。iii) 組立溶接は、組立終了時までにはスラグを除去するものとし、溶接部表面にわれがないことを確認しなければならない。もし、われが発見された場合には、その原因を究明し、適当な対策を講じなければならない。
1 8	道路橋示方書・同解説 H24.3	同上

## 4) 予 熱

番号	基 準 名	規程内容の概要
3	電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書 案 解説 S15	－ (該当規定なし)
6	溶接鋼道路橋示方書 解説 S32.7	【予熱 64 条】：板厚が 25mm を越える場合には、溶接部から 10cm 以内の母材部分が溶接時に 60°C 以上となるように予熱しなければならない。板厚が 35mm を越える場合には、此の温度を 80°C とする。ただし、低水素系の溶接棒を使用する場合には、予熱温度を 40°C まで下げることができる。
8	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.6	【予熱 74 条】：SS41, SM41 に対しては板厚が 32mm 以上の場合、SM50 に対しては板厚が 25mm をこえる場合には溶接線から少なくとも 10mm の範囲内の母材部分が溶接時 50°C ~ 100°C になるように予熱しなければならない。
11	溶接鋼道路橋示方書 解説 S39.5 (S43.5 増補)	同上
12	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S48.2	(9) 予熱：下記事項のいずれかに該当する場合は、溶接線の両側 10cm およびアークの前方 10cm の範囲内の母材を「予熱温度の標準」に示す標準によって予熱しなければならない。ただし、サブマージアーク溶接に関してはこの項を適用しない。また、特別な実験資料によってわれ防止が確実に保証される場合にはもこの項の適用を除外することができる。 1) 鋼材のミルシートからつぎの式により計算した炭素当量が 0.44% をこえる場合。 2) 溶接施工試験の最高硬さ試験において予熱なしで最高硬さ(Hv)が 370 をこえた場合 3) 気温 (室内の場合は室温) が 5°C 以下の場合 * 「予熱温度の標準」：鋼種と板厚の関係から予熱温度を設定したもの。また、低水素系の溶接棒を使用する場合と使用しない場合でも予熱温度を分類している。
13	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 S55.2	同上
14	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H2.2	同上
15	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H6.2	同上
16	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 H8.12	(9) 予熱：鋼材の溶接われ感受性組成 $P_{CM}$ が「予熱温度の標準を適用する場合の $P_{CM}$ の条件」を満足する場合には、鋼種、板厚および溶接方法に応じて、溶接線の両側 10cm およびアークの前方 10cm の範囲の母材を「予熱温度の標準」により予熱することを標準とする。 * 「予熱温度の標準」：鋼種、板厚および溶接方法に応じて予熱温度を設定したもの。
17	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋 H14.3	4) 予熱：鋼種、板厚及び溶接方法に応じて、溶接線の両側 100mm 及びアークの前方 100mm 範囲の母材を「予熱温度の標準」により予熱することを標準とする。 * 「予熱温度の標準」：鋼種、板厚および溶接方法に応じて予熱温度を設定したもの。 ** H8 道示から変更となった点：耐候性鋼の予熱規定が板厚 100mm まで記載されている。
18	道路橋示方書・同解説 H24.3	同上

## (2) 鉄道橋

鋼鉄道橋の設計示方書は図 2-1-11 に示す制定及び改訂を行っている。図の資料は設計標準であるため、当時の鉄道構造物の標準的な設計手法に関する内容となっており、平成4年以降の鉄道構造物等設計標準・同解説では鋼構造物の工場製作あるいは施工に関する規定が含まれている。

平成4年以前の工場製作及び施工に関する事項は表 2-1-2 に示す示方書及び基準が制定されている。

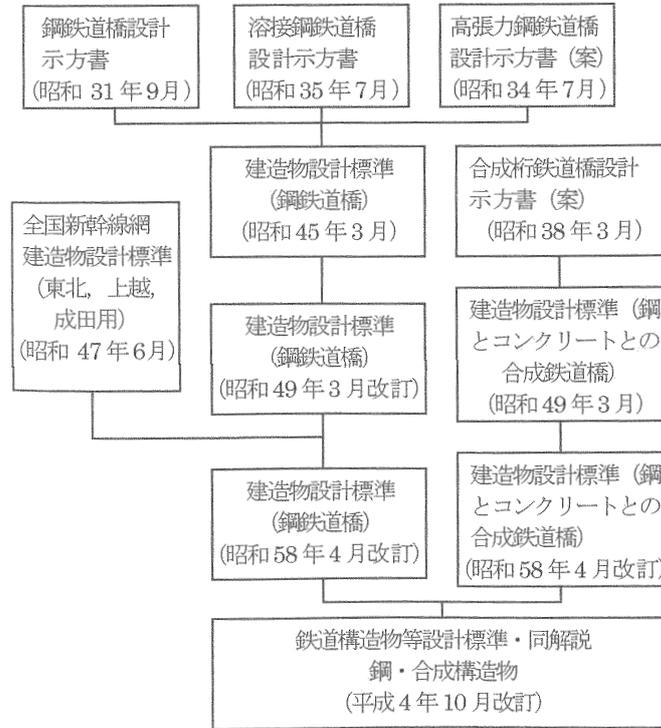


図 2-1-11 設計標準制定及び改訂の経緯

表 2-1-2 設計標準制定及び改訂の経緯

番号	基準名	主な内容
1	鋼鉄道橋設計示方書：明治45年	荷重・許容応力及部材の設計・設計細目 溶接に関する記載なし。
2	鋼鉄道橋設計示方書：昭和3年	荷重・許容応力及部材の設計・設計細目・鋼鉄道橋製作示方書 溶接に関する記載なし。
3	電弧溶接鋼構造物設計および製作示方書案：昭和6年	設計・施工・検査・溶接工手・製図
4	鋼鉄道橋標準設計示方書：昭和15年	荷重・許容応力・部材及桁の設計・設計細目 溶接に関する記載なし。
5	鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書および解説：昭和27年	従事員・溶接器材・溶接作業・検査
6	鋼鉄道橋設計示方書：昭和31年	荷重・許容応力・部材及び桁の設計・設計細目

		溶接に関する記載なし。
7	アーク溶接鋼鉄道橋設計示方書案 ：昭和31年	材料・許容応力・設計計算・設計細目
8	自動溶接鋼鉄道橋設計及び製作示 方書案および解説：昭和32年	材料・設計・施工・承認試験
9	溶接鋼鉄道橋設計示方書案および 解説：昭和35年	材料・許容応力・設計計算・設計細目
10	溶接鋼鉄道橋製作示方書案 ：昭和36年	材料及び溶接器材・従事員・溶接作業・検査
11	溶接鋼鉄道橋製作示方書案 ：昭和38年	材料及び溶接器材・従事員・溶接作業・検査
12	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和39年	材料・製造方法・構造，形状および寸法・工場塗装・試験 および検査・資格
13	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和42年	材料・製造方法・構造，形状および寸法・工場塗装・試験 および検査・資格
14	鋼鉄道橋設計標準解説 ：昭和45年	荷重・材料・許容応力度・設計一般・溶接継手
15	J R S 鋼鉄道橋：昭和46年	材料・切断・溶接継手・リベット継手およびボルト継手・ 部材の加工・構造，形状および寸法・試験および検査・資 格と施工試験
16	鋼鉄道橋設計標準解説 ：昭和49年	荷重・材料・許容応力度・設計一般・溶接継手 溶接に関する記載なし。
17	J R S 鋼鉄道橋：昭和50年	材料・切断・溶接継手・ボルト継手・部材の加工・構造， 形状および寸法・試験および検査・資格と施工試験
18	J R S 鋼鉄道橋：昭和53年	材料・切断および曲げ加工・溶接継手・ボルト継手・部材 の加工・構造形状及び寸法・試験及び検査・資格，施工試 験及び超音波探傷試験とその承認
19	J R S 鋼鉄道橋：昭和56年	材料・切断および曲げ加工・溶接継手・ボルト継手・部材 の加工・構造形状及び寸法・試験及び検査・資格，施工試 験及び超音波探傷試験とその承認
20	建造物設計標準解説：昭和58年	荷重・材料・許容応力度・設計一般・溶接継手 溶接施工に関する記載なし。
21	鉄道構造物等設計標準・同解説 ：平成4年	荷重・材料・材料の強度・限界状態の照査・連結に関する 一般事項・鋼構造物の製作標準
22	鉄道構造物等設計標準・同解説 ：平成21年	構造物の要求性能と性能照査・作用・材料・応答値の算定・ 照査・連結部・施工（工場製作，輸送および架設）

以下に上記示方書内の溶接の項目に着目し整理した結果を示す。また、整理した内容は付属資料に各々の示方書の抜粋を示す。

### 1) 溶接材料

番号	基準名	規程内容の概要
3	電弧溶接鋼構造物設計および製作 示方書案：昭和 6 年	溶接棒の化学成分の規格あり。
5	鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書解 説：昭和 27 年	JISG3524 によるものとし、使用する溶接棒は種別 D4300, D4310, D4311 のに属する証明を有するものとする。
7	アーク溶接鋼鉄道橋設計示方書案 ：昭和 31 年	JISG3524 の規格に適合するものを標準とする
8	自動溶接鋼鉄道橋設計及び製作示 方書案および解説：昭和 32 年	心線とフラックスには多くの種類があるため、最も適した 組合せを選定して使用しなければならない。
9	溶接鋼鉄道橋設計示方書案および 解説：昭和 35 年	SM41 および SS41 は JISZ3211 により、SM50 に使用する溶 接棒は引張強度を指定。いずれも低水素系の溶接棒を用い るのを標準とする。
10	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和 36 年	SM41 および SS41 は JISZ3211 により、SM50 においては JISZ3212 のうち、D5014, D5016, D5025 又は D5026 の規格 に適合するもの。いずれも低水素系の溶接棒とする。
11	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和 38 年	同上
12	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和 39 年	同上
13	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和 42 年	同上+以下追加 サブマージアーク溶接の場合、ワイヤの規格は、JISZ3311 とし、フラックスはこれに歴号するものを用いるものとす る。
14	鋼鉄道橋設計標準解説 ：昭和 45 年	同上+以下追加 SM50Y, SM53, SMA50 を使用する際の溶接棒の記載あり。
15	J R S 鋼鉄道橋：昭和 46 年	同上
16	鋼鉄道橋設計標準解説 ：昭和 49 鋼年	同上
17	J R S 鋼鉄道橋：昭和 50 年	同上
18	J R S 鋼鉄道橋：昭和 53 年	同上+以下追加 JISZ3213, JISZ3312 の溶接材追加。炭酸ガス JISK1106, アルゴン JISK1105 の規定あり。
19	J R S 鋼鉄道橋：昭和 56 年	同上

2 1	鉄道構造物等設計標準・同解説： 平成4年	同上+以下変更 手溶接：JIS3213 削除，JISZ3214 追加。 サブマージアーク溶接：JISZ3351，JISZ3352 による。 ガスシールドアーク溶接：JISZ3312，JISZ3313，JISZ3315， JISZ3320 による。
2 2	鉄道構造物等設計標準・同解説： 平成21年	同上 母材と同等以上の機械的性質を有する溶接材料。

## 2) 温度

番号	基準名	規程内容の概要
5	鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書解 説：昭和27年	気温が0℃以下の場合は溶接を行ってはならない。承認を 得て予熱を行うことで作業可。溶接部の急冷を避けるよう に考慮しなければならない。 溶接開始点の付近約8cm <sup>2</sup> 程度を約60℃に予熱。以後の溶 接はそれ以前の溶接熱で温められているため予熱不要。た だし-15℃以下は溶接を行ってはならない。
1 0	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和 36年	室温が0℃以下の場合は溶接を行ってはならない。承認を 得て予熱を行うことで作業可。溶接部の急冷を避けるよう に考慮しなければならない。
1 1	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和 38年	同上
1 2	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和39年	室温が0℃以下の場合は原則として溶接を行ってはならな い。
1 3	J R S 溶接鋼鉄道橋：昭和42年	同上
1 5	J R S 鋼鉄道橋：昭和46年	同上
1 7	J R S 鋼鉄道橋：昭和50年	同上
1 8	J R S 鋼鉄道橋：昭和53年	同上
1 9	J R S 鋼鉄道橋：昭和56年	同上
2 1	鉄道構造物等設計標準・同解説： 平成4年	同上
2 2	鉄道構造物等設計標準・同解説： 平成21年	同上

### 3) 仮付あるいは部材の保持

番号	基準名	規程内容の概要
5	鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書解説：昭和27年	材片に過度の拘束を与えないように仮締め, 又は仮付溶接をしなければならない。仮付溶接は最小限度にとどめ, 本溶接の一部となる場合は欠陥のない溶接でなければならない。
10	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和36年	同上+以下追加 仮付溶接の最小長：40mm 仮付溶接に際し, 条件により 50℃~100℃の予熱が必要。
11	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和38年	同上
12	JRS溶接鋼鉄道橋：昭和39年	同上（予熱条件一部変更）
13	JRS溶接鋼鉄道橋：昭和42年	同上（予熱条件一部変更）
15	JRS鋼鉄道橋：昭和46年	同上+以下追加 組立用溶接サイズ：4mm以上 組立用溶接間隔：400mm以下
17	JRS鋼鉄道橋：昭和50年	同上（予熱条件一部変更, 材料追加）+以下追加 ストロングバックを用いてはならない。
18	JRS鋼鉄道橋：昭和53年	同上
19	JRS鋼鉄道橋：昭和56年	同上
21	鉄道構造物等設計標準・同解説：平成4年	同上+以下変更 組立溶接の最小長：80mm
22	鉄道構造物等設計標準・同解説：平成21年	同上（予熱条件一部変更）

#### 4) 予熱

番号	基準名	規程内容の概要
10	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和36年	条件により溶接始端から100mmの範囲を50℃～100℃の予熱が必要。自動溶接には適用しない。
11	溶接鋼鉄道橋製作示方書案：昭和38年	同上
12	JRS溶接鋼鉄道橋：昭和39年	同上
13	JRS溶接鋼鉄道橋：昭和42年	同上（予熱条件一部変更）＋以下変更 予熱範囲：溶接線肩に沿って両側50mmの範囲を予熱。
15	JRS鋼鉄道橋：昭和46年	同上＋以下追加 炭素当量の記述あり。
17	JRS鋼鉄道橋：昭和50年	同上（予熱条件材料追加）
18	JRS鋼鉄道橋：昭和53年	同上
19	JRS鋼鉄道橋：昭和56年	同上＋以下変更 サブマージアーク溶接にも予熱適用。
21	鉄道構造物等設計標準・同解説：平成4年	同上
22	鉄道構造物等設計標準・同解説：平成21年	同上（予熱条件一部変更）＋以下追加および変更 溶接割れ感受性組成の記述あり。 予熱範囲：溶接線から100mmの範囲を予熱。

#### 5) その他

番号	基準名	規程内容の概要
22	鉄道構造物等設計標準・同解説：平成21年	入熱量に関する記載あり。

## 2-2. 低温割れの発生に及ぼす因子

### 2-2-1. 炭素当量の影響<sup>9)</sup>

一般に、鋼の熱影響部は急冷されて変質硬化する傾向にあるが、熱影響部の硬化が著しいと、延性が低下するため低温割れが発生しやすい。熱影響部の硬化を支配するのは、冷却速度と母材の化学成分である。冷却速度については後述するが、母材の化学成分のうち、熱影響部の硬化に最も大きな影響を与えるのはC（炭素）含有量である。その他、Mn、Cr、Moなどの合金元素も影響があるが、これらをC量に換算したものは炭素当量と呼ばれている。

炭素当量は実験的に求められたものであり、研究者によりその算定式が異なる。代表的なものに以下のようなものがある。

#### (1) $C_{eq}$

1940年にDearden, O'Neillが熱影響部の最高硬さを推定する式として提案した $C_{eq}$ は、木原、鈴木、田村などによる修正が反映され、JISや道路橋示方書では式(1)が用いられている。伊藤らは、 $C_{eq}$ と割れ率との関係を調査した結果、非常に大きなばらつきを有することを示し、溶接割れ感受性の指標としては十分ではないと結論付けている<sup>10)</sup>。

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \left(\frac{Cu}{13}\right) \quad (\%)$$

ただし、( )の項は、 $Cu \geq 0.5\%$ の場合に加える。

(1)

※  $C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V, Cu$ は、合金元素の含有量(%)を表す。

#### (2) $P_{CM}$

伊藤らは溶接割れに影響を与える因子として、鋼の化学成分の他に水素、拘束の効果を炭素の効果に換算した式(2)に示す溶接割れ感受性指数( $P_C$ )をy形溶接割れ試験結果から提案した<sup>10,11)</sup>。日本溶接協会では、WES3002-1973(溶接構造用高張力鋼板の溶接割れ感受性組成に関する規格)でこれを採用し、溶接割れ感受性指数( $P_C$ )の中で式(3)に示す化学成分の項について、溶接割れ感受性組成( $P_{CM}$ )として規定した<sup>12)</sup>。道路橋示方書では平成8年の改定で、それまで予熱適用条件の判定に用いられてきた $C_{eq}$ が、 $P_{CM}$ に変更された<sup>13)</sup>。

$$P_C = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{t}{600} + \frac{H}{60} \quad (\%)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (\%)$$

※  $C, Si, Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B$ は、合金元素の含有量(%)を、 $H$ は溶着金属の拡散性水素量(cc/100g)、 $t$ は板厚(mm)を表す。

#### (3) $P_N$

伊藤らの研究はy形溶接割れ試験で実施されていたことに対し、田中らはすみ肉溶接には応力の多軸性、冷却速度の複雑さ、ルート部と止端部の応力集中等の要因のため、不明な点があるとしていた。また、すみ肉溶接部には、ルート部に発生して熱影響部をボンド部にそって進展するヒールクラック

が生じることに着目し、すみ肉溶接試験を実施することにより、式(4)に示すヒールクラックの割れ感受性指数 ( $P_N$ ) を提案した<sup>14)</sup>。

$$P_N = C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{10} + \frac{4P}{3} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{30} + \frac{Mo}{20} \quad (\%) \quad (4)$$

※  $C, Si, Mn, P, Cu, Cr, Mo$  は、合金元素の含有量 (%) を表す。

#### (4) CEN<sup>15, 16)</sup>

百合岡、糟谷は、 $C_{eq}$  と  $P_{CM}$  の合金元素の係数について、 $C$  と合金元素成分の係数の違いから、 $C$  が多めに添加されている鋼材では  $C_{eq}$  が、低  $C$  の鋼材では  $P_{CM}$  を用いるのが適切と考え、 $Mn$  等の合金元素成分の係数を  $C$  の関数とした式(5)に示す  $CEN$  を提案した。

$$CEN = C + A(C) \left( \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right) \quad (\%)$$

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\} \quad (5)$$

※  $C, Si, Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, Nb, V$  は、合金元素の含有量 (%) を表す。

#### (5) ISO の動向<sup>17)</sup>

CEN (The European Committee for Standardization : 欧州規格機構) /TC121(溶接)/SC4(アーク溶接)/WG1 では鋼材溶接時の低温割れ防止の予熱温度について、1997年に英国規格(BS5135 : IIW の炭素当量  $CE_{IIW}$ ) とドイツの方法( $CE_T$ ) が適切であるとし、この2方法を欧州規格 prEN1011-2 とし、ISO (International Organization for Standardization : 国際標準化機構) /TC44(溶接)/SC10(溶接の品質要求) の N357 報告として発表した。しかし、欧州規格機構の当該 WG 委員の他の方法も比較検討すべきとの意見を受け、米国溶接協会(AWS)の方法と日本の  $CEN^{15, 16)}$  を追加した検討が行われた。2001年に4種類の鋼種について4方法によって算出された予熱温度を比較した結果が N351 報告(prCR ISO TR 17844)として発表されたが、供試鋼材の軟鋼の  $C$  量が低く(0.08%)高張力鋼(YS690)の  $C$  量が高い(0.17%)という日本の鋼材の常識と異なる材料での結果で、ドイツの方法( $CE_T$ )が適切な方法のように見える。ISO は各国関係者に N351 報告のコメントを求め、日本は日本の溶接構造用鋼の成分の軟鋼、HT490, HT580, HT780, 低  $C$  のラインパイプ鋼, 0.23C の構造用鋼, 予熱低減型 Cu 析出鋼を加えた7鋼種に4方法で比較した N500 報告 (ISO TR 17844) を発表した。N500 報告ではドイツの方法( $CE_T$ )の予熱温度は高すぎるという内容となっているが、WG 内で予熱温度の基準の統一されるに至っていない。

## 2-2-2. 拘束度の影響

溶接部は溶接入熱により融解して膨張し、その後冷却され、固化する過程で収縮する。この冷却過程において、当該個所が周囲の部材により拘束されていると溶接部に残留応力が導入され、溶接割れの原因の一つとなる。

拘束度  $K$  は、拘束の度合いを示す指標であり、「溶接継手のルート間隔を単位長さ短くさせるに要する単位溶接長あたりの力の大きさ ( $\text{N}/\text{mm} \cdot \text{mm}$ )」と定義され、以下の式であらわされる。

$$K = K_0 \times t$$

$K_0$  : 拘束係数「溶接継手のルート間隔を単位長さ短くさせるに要する溶接線直角方向の応力」  
( $\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$ )

$t$  : 板厚 (mm)

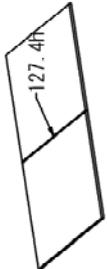
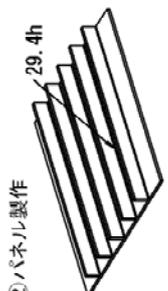
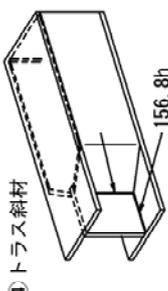
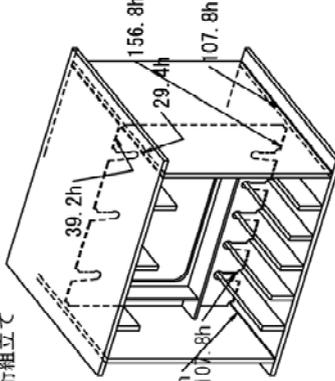
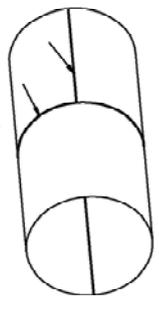
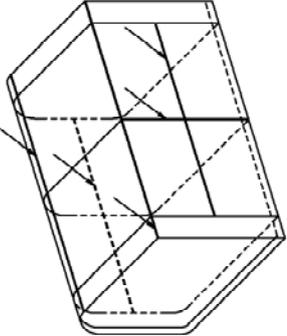
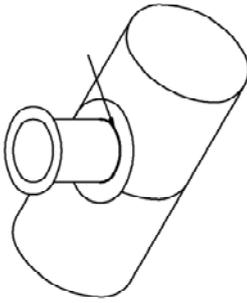
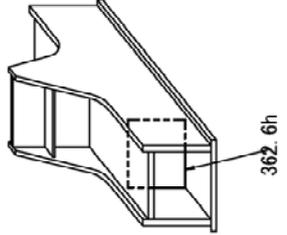
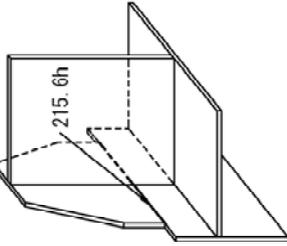
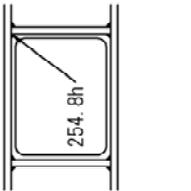
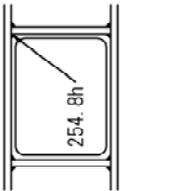
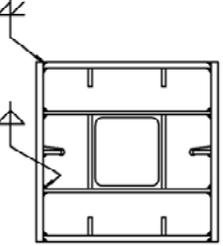
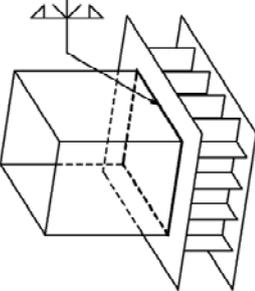
拘束度の概念は、突合せ溶接継手の一次元拘束を基本として確立されたものであるが、T型の溶接継手に対しても水平板とそれに溶接される立板のルート間隔短縮について適用される。

鋼橋に用いられる溶接継手の拘束度について、道路橋示方書<sup>18)</sup>では予熱温度を算定する際の橋梁溶接継手の平均的な拘束度  $K$  として、板厚の 200 倍 (拘束係数  $K_0 = 200 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$ ) を想定している。拘束度については種々の計測あるいは解析事例がある。計測手法や解析手法には標準的なものはなく、個々に専用の治具が製作され、計測・解析についても平均値をとるための対象延長等の仮定が異なるため、単純に比較することは出来ない。実橋製作時に種々の部材を対象として計測された拘束度の例<sup>19)</sup>を表 2.2.2 示す。道路橋示方書にある拘束係数  $K_0 = 200 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  は小拘束継手に対応していることがわかる。

この他の橋梁に着目した計測事例として、鋼床版のデッキプレートの溶接を対象とした計測では奥村ら<sup>20)</sup>が模型を用いて行った事例がある。また、小西ら<sup>21)</sup>の実橋における現場溶接を対象とした計測では、拘束係数が 4.6 あるいは  $12 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  であったことが報告されている。

次に、模型箱桁を用いた拘束係数の計測事例として、明石ら<sup>22)</sup>の計測では、フランジとウェブの溶接が最大  $85 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  程度、縦リブとダイアフラムの溶接部で  $1000 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  を超える場合があること、ダイアフラムとウェブの溶接のフランジ近傍部では反対側が溶接されていない場合で  $61 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$ 、であったものが、逆側を溶接することにより  $337 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  まで増加すること等が示されている。そして、井藤ら<sup>23)</sup>の計測事例では、フランジとウェブの溶接で  $39 \sim 833 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$ 、フランジとダイアフラムの溶接では  $69 \sim 882 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$ 、フランジと縦リブの溶接で  $108 \sim 598 \text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$  という結果が示されている。

表 2-2-1 各種継手における拘束度の分類例

	継手	形式
小拘束継手 K=0 ~196h	<p>① 素材板継ぎ</p>  <p>② パネル製作</p>  <p>③ I桁組立て</p>  <p>④ トラス斜材</p>  <p>⑤ 箱桁組立て</p>  <p>⑥ 鋼管・ハット、シーム溶接</p>  <p>⑦ その他 ダイヤフラム小組立 トラフ小組立 トラス組材 etc.</p>	<p>⑥ 水門扉大組立 (ブロック同志の場合)</p>  <p>⑦ 人孔管</p>  <p>⑧ その他 仕口補強材 分岐管の突合せ 各種剪断拘束継手 etc.</p>
中拘束継手 K=196 ~392h	<p>① トラス弦材端ダイヤフラム</p>  <p>② Box桁仕口</p>  <p>③ ダイヤフラム補剛材</p>  <p>④ Box桁 内面溶接後、外面 Webx上Flg 323.4h</p>  <p>⑤ 橋脚角継手ダイヤフラムの隅肉</p> 	
大拘束継手 K=392 ~686h	<p>① 橋脚基部十字継手</p>  <p>② その他 スリットの溶接 はめ込み継手 貫通材の溶接 海構部材 斜めY型スリット開先(試験片):499.8h</p>	<p>拘束度 <math>K = K_0 \cdot h</math>  <math>K_0</math>: 拘束係数 N/mm<sup>2</sup> mm  <math>h</math>: 板厚 mm          ※値は1kgf=9.8Nの換算値</p>

### 2-2-3. 拡散性水素量の影響<sup>24)</sup>

溶接時に侵入した水素は原子状に解離して熔融金属中に溶解し、周囲の鋼材より高い濃度となっている。凝固した直後にはこの水素は過飽和の状態（平衡状態より高い濃度の状態）となっているが、時間の経過とともに水素は周辺に移動（拡散）し、一部は表面から大気中に放出し、一部は熱影響部（硬化部）に集積する。金属が水素を固溶すると脆くなり、引張応力の存在で割れが生じる。水素の放出は溶接後の冷却過程で 100℃以上の高温領域に滞留している時間を長くすると効果的とされており、実施工では予熱という作業により実施されている。

拡散性水素量の測定方法としては JIS Z3118（鋼溶接部の水素量測定方法）に規定されている。ここでは、45℃の恒温器内に 72 時間保持して捕集された水素を 0℃で 1 気圧にしたときの体積について、溶接直後の溶接金属 100g 中の水素量で表現する。上述のように、溶接直後の冷却過程で水素量が放出されるため、この試験では溶接終了 5 秒後に試験片を急冷して水素量を捕集する。具体的な手順を以下に記す。

#### (1) 溶接材料の準備

板厚 12mm×幅 25mm×長さ 40 の試験板 1 枚と、長さ 45mm のエンドタブを 2 枚用意する。材質は SM400 とする。これらはあらかじめ 400～650℃の温度の大気雰囲気中に 1 時間保持し、水素除去実施する。また、試験板とエンドタブの全面について表面研削及び洗浄を行い、試験板の質量を測定する。

#### (2) 試料の作製

鋼製固定治具を用いて試験板及びエンドタブを固定し、溶接を行う。試料は一つの条件あたり 3 個製作する（写真 2-2-1(1)～(2) 参照）。

#### (3) 拡散性水素の捕集準備

溶接終了後、5 秒後に氷水につけて急冷し、60 秒以内に液化窒素中に保存する。十分に冷却した段階で試験板とエンドタブを切り離し、試験板のみを冷却する（写真 2-2-1(3)～(6) 参照）。

液化窒素から取り出した試験板をメタノールで洗浄し、30 秒以内に捕集容器内に挿入し、アルゴンガスを流して容器内の空気を置換する（写真 2-2-1(7)～(10) 参照）。

#### (4) 拡散性水素の捕集

水素量測定試料を挿入した捕集容器を 45℃の温度に保った恒温器内に 72 時間保持し、拡散性水素を捕集する（写真 2-2-1(11) 参照）。

#### (5) 水素量の測定

捕集容器をガスクロマトグラフに接続し、試料から放出された水素量を測定する。水素量測定後、試料の質量を測定する（写真 2-2-1(12) 参照）。



(1) 試料及び鋼製固定具



(2) 溶接施工状況



(3) 試料取り出し状況

写真 2-2-1 水素量測定試験



(4) 氷水での1次冷却



(5) 液化窒素での冷却



(6) エンドタブ除去状況



(7) メタノール洗浄状況



(8) メタノールの拭き取り



(9) 捕集容器への試料挿入



(10) アルゴンガス置換



(11) 45°C72時間後に水素量測定  
写真 2-2-1 水素量測定試験 (つづき)



(12) 試料の質量測定

#### 2-2-4. 入熱量の影響<sup>25)</sup>

溶接サイズが小さい場合、溶接部は急冷されて割れなどの欠陥を生じやすくなることから、道路橋示方書では溶接サイズの最小値が規定されている。南らは、溶接サイズ他をパラメータとしたすみ肉溶接割れ試験での割れの発生について入熱量で整理した結果、例えば $P_{CM}$ が0.24の鋼材を被覆アーク溶接で施工する場合に、入熱量が14,000J/cmでは割れが発生し、21,000J/cmでは割れが発生しないことを明らかにした。当該研究の結論では、 $P_{CM}$ 値、溶接方法（被覆アーク溶接とガスシールドアーク溶接）に応じた適切な溶接サイズを提案している。

## 参考文献

- 1) 鉄と鉄鋼がわかる本 新日本製鐵(株)編著 日本実業出版社
- 2) 鉄のメルヘン 中澤譲人 アルク
- 3) 橋と鋼 大田孝二・深沢誠 建設図書
- 4) 100万人の金属学 技術編 作井誠太編 アグネ
- 5) 戦後日本における技術導入と普及：鉄鋼業における BOF の受容中村豪 東京経大会誌 第 253 号
- 6) 溶接・接合技術特論 溶接学会編 産報出版
- 7) 溶接の歴史 産報 WEB <http://www.sanpo-pub.co.jp/library/history/>
- 8) 特許庁 特許マップ 溶接技術 [http://www.ipa.go.jp/shiryou/s\\_sonota/map/kikai03/hajime.htm](http://www.ipa.go.jp/shiryou/s_sonota/map/kikai03/hajime.htm)
- 9) 佐藤邦彦：溶接構造要覧，黒木出版社，1988.3
- 10) 伊東慶典，別所清：高張力鋼の溶接割れ感受性指数について，溶接学会誌，第 37 巻，第 9 号，pp.983-991，1968.9
- 11) 伊東慶典，別所清：高張力鋼の溶接割れ感受性指数について（第 2 報），溶接学会誌，第 38 巻，第 10 号，pp.1134-1144，1969.10
- 12) WES3001:2012，溶接高張力鋼板：日本溶接協会，2012.1
- 13) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，日本道路協会，丸善，1996.12.
- 14) 田中甚吉，北田豊文：すみ肉溶接割れに関する研究，溶接学会誌，第 41 巻，第 8 号，pp.915-924，1972.8
- 15) 百合岡信孝：TMCP 鋼の溶接，溶接学会誌，第 61 巻，第 4 号，pp288-304，1992.6
- 16) 糟谷正：溶接部の低温割れ感受性と防止，溶接学会誌，第 70 巻，第 6 号，pp.32-40，2001.9
- 17) 百合岡信孝：予熱温度選定法規格化の ISO の動向，溶接学会誌，第 72 巻，第 4 号，pp266-271，2003
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2014.3
- 19) 三菱重工業横浜造船所：橋梁部材の溶接継手の拘束度と溶接施工について S50.2.，鋼橋技術研究会施工部会資料，1990.
- 20) 奥村敏恵，堀川浩甫，井上啓一：溶接継手の構造拘束について，土木学会第 24 回年次学術講演会講演集，I-114，pp.315-316，1969.
- 21) 小西一郎，佐伯章美，近藤淳，牛尾正之：鋼床版の現場つき合せ溶接による拘束応力について，土木学会第 24 回年次学術講演会講演集，I-115，pp.317-320，1969.
- 22) 明石重雄，夏目光尋：溶接割れと継手の拘束度について，横河橋梁技報，No.2，pp.39-46，1972.
- 23) 井藤昭夫，渡辺昇：すみ肉溶接継手の拘束度に関する実験的研究，土木学会論文集，第 362 号 I-4，pp.233-238，1985.10.
- 24) 糟谷正：国内における予熱温度決定方法と今後の課題，溶接学会誌，第 75 巻，第 4 号，pp.238-243，2006
- 25) 南邦明，糟谷正，三木千壽：道路橋示方書におけるすみ肉溶接サイズ基準の考察，溶接学会論文集，第 23 巻，第 3 号，pp422-430，2005.8