

溶接などの各種熱加工により生ずる熱ひずみ履歴
にともなう材質変化と継手性能

——— 総 合 報 告 書 ———

昭和 54 年 2 月

社団法人 日本溶接協会 鉄鋼部会
技術委員会 H S E 委員会

ま え が き

社団法人日本溶接協会 鉄鋼部会に昭和51年度に組織されたHSE委員会では溶接、ガス切断、火焰加工など局部加熱にともなう各種熱加工によって生ずる熱ひずみ履歴にともなう材質の変化および継手性能へのそれら変化の影響について基礎的知見を得ることを主目的とした調査研究を共同で行なってきた。

本委員会では、まず研究の第一段階として従来からこの種の問題について各方面で行なわれた研究成果を調査し、そのまとめと問題点を抽出する作業を進め、昭和52年2月には“鋼溶接部の熱ひずみ脆化(レビュー)”を溶接学会技術資料No.2(HSE委員会編)として公表を行った。引続き各種研究成果の取まとめと共同実験を実施し、そこで得られた成果の主要なものをまとめてここに本委員会総合報告書として公表するものである。

なお、本研究を行うにあたり、数々のご高配をたまわった関係各社各位とくに絶大なるご理解とご援助をいただいた製鉄各社ならびに実験を担当していただいた委員各位に対し深く謝意を表す。

また、本報告書のとりまとめについては本委員会ワーキンググループ、とくに豊田副主査(阪大)(1.2.4.7章)、川口幹事(住金)(3章)、堀川委員(阪大)(5章)、中島委員(日立造船)(6章)の各位に分担いただいた。

以下にHSE委員会の構成名簿を付し、委員各位に誌して謝意を表す。

昭和54年2月

(社) 日本溶接協会 HSE委員会

主 査 佐 藤 邦 彦

H S E 委 員 会 名 簿

(○印 HSE-WG委員会委員)

| | | | |
|-------|---|-----------|----------------------------|
| 主 査 | ○ | 佐 藤 邦 彦 | (大阪大学工学部) |
| 副 主 査 | ○ | 豊 田 政 男 | (大阪大学工学部, HSE-WG 委員会 : 主査) |
| 幹 事 | | 出 口 義 治 | (日本鋼管(株)津研究所) |
| 〃 | ○ | 川 口 喜 昭 | (住友金属工業(株)中央技術研究所) |
| 委 員 | | 青 木 真 一 | (川崎製鉄(株)技術開発部) |
| 〃 | | 明 石 重 雄 | (株)横河橋梁製作所研究所) |
| 〃 | | 足 立 孝 夫 | (株)日本製鋼所, 室蘭製作所) |
| 〃 | | 粟 飯 原 周 二 | (東京大学工学部) |
| 〃 | ○ | 安 藤 政 明 | (日本鋼管(株), 津研究所) |
| 〃 | | 石 沢 隆 夫 | (株)神戸製鋼所・鉄鋼生産本部) |
| 〃 | ○ | 印 藤 弘 郷 | (三井造船(株)千葉研究所) |
| 〃 | | 上 田 幸 雄 | (大阪大学溶接工学研究所) |
| 〃 | | 大 塚 昭 夫 | (名古屋大学工学部) |
| 〃 | | 大 野 章 | (新日本製鉄(株)技術開発部) |
| 〃 | | 大 橋 明 | (株)日本製鋼所・鉄鋼技術部) |
| 〃 | ○ | 大 橋 延 夫 | (川崎製鉄(株)技術研究所) |
| 〃 | | 岡 林 久 喜 | (石川島播磨重工業(株)溶接研究所) |
| 〃 | | 奥 村 敏 恵 | (埼玉大学理工学部) |
| 〃 | | 小 倉 信 和 | (横浜国立大学工学部) |
| 〃 | | 小 山 内 真 二 | (株)日本製鋼所技術管理部) |
| 〃 | | 落 合 治 | (住友金属工業(株)東京技術部) |
| 〃 | | 笠 松 裕 | (株)神戸製鋼所鉄鋼生産本部) |
| 〃 | | 金 沢 武 | (東京大学工学部) |
| 〃 | | 金 子 康 弘 | (日本鋼管(株)鋼板技術部) |
| 〃 | ○ | 河 井 清 和 | (三菱重工業(株)神戸造船所) |
| 〃 | | 桐 原 誠 信 | (株)日立製作所・日立研究所) |
| 〃 | ○ | 工 藤 純 一 | (川崎製鉄(株)技術研究所) |
| 〃 | ○ | 小 林 卓 也 | (船舶技術研究所溶接工作部) |
| 〃 | | 五 代 友 和 | (株)神戸製鋼所溶接棒事業部) |
| 〃 | ○ | 阪 野 賢 治 | (石川島播磨重工業(株)技術研究所) |

| | | | |
|-------|---|-----------|--------------------|
| 委 員 | | 佐 野 精 二 郎 | (株)小松製作所技術研究所) |
| " | | 島 崎 正 英 | (株)日本製鋼所室蘭製作所) |
| " | | 鈴 木 是 明 | (株)日本製鋼所室蘭製作所) |
| " | | 鈴 木 充 | (住友重機工業(株)平塚研究所) |
| " | | 砂 本 大 造 | (三菱重工業(株)高砂研究所) |
| " | | 須 清 修 造 | (川崎重工業(株)技術研究所) |
| " | | 瀬 尾 健 二 | (姫路工業大学工学部) |
| " | ○ | 多々良 敏 行 | (住友重機工業(株)平塚研究所) |
| " | | 田 中 甚 吉 | (日本鋼管(株)技術研究所) |
| " | | 寺 井 精 英 | (川崎重工業(株)技術研究所) |
| " | | 寺 崎 俊 夫 | (大阪大学工学部) |
| " | | 永 井 欣 一 | (広島大学工学部) |
| " | | 永 尾 敏 男 | (日本鋼管(株)津研究所) |
| " | ○ | 中 島 宏 幸 | (日立造船(株)技術研究所) |
| " | ○ | 中 村 明 弘 | (株)酒井鉄工所技術部) |
| " | ○ | 萩 原 行 人 | (新日本製鉄(株)製品技術研究所) |
| " | | 長谷部 茂 雄 | (住友金属工業(株)東京技術部) |
| " | | 平 井 征 夫 | (川崎製鉄(株)技術研究所) |
| " | | 藤 井 英 輔 | (船舶技術研究所溶接工作部) |
| " | | 藤 城 能 教 | (川崎重工業(株)鉄構事業部) |
| " | ○ | 堀 川 浩 甫 | (大阪大学溶接工学研究所) |
| " | ○ | 町 田 進 | (東京大学工学部) |
| " | ○ | 松 岡 雅 典 | (株)神戸製鋼所鉄鋼生産本部) |
| " | ○ | 松 井 繁 明 | (川崎重工業(株)技術研究所) |
| " | ○ | 松 下 久 雄 | (三井造船(株)千葉研究所) |
| " | | 三 村 宏 | (新日本製鉄(株)製品技術研究所) |
| " | | 森 田 耕 次 | (千葉大学工学部) |
| " | | 森 山 康 | (新日本製鉄(株)技術開発部) |
| " | | 弓 場 愛 作 | (東京芝浦電気(株)重電技術研究所) |
| " | | 渡 辺 十 郎 | (株)日本製鋼所室蘭製作所) |
| 事 務 局 | | 池 原 平 晋 | (社)日本溶接協会鉄鋼部会) |
| " | | 長谷川 義 治 | (" ") |

目 次

| | |
|--|----|
| ま え が き | 1 |
| H S E委員会名簿 | 2 |
| 1. 概 要 | 6 |
| 1.1 研究の目的とその経緯 | 6 |
| 1.2 研究項目と共同実験・自主研究 | 6 |
| 1.3 本報告書の内容と重点 | 7 |
| 2. 溶接熱ひずみ脆化が継手破壊性能へ及ぼす影響 | 8 |
| 2.1 緒 言 | 8 |
| 2.2 切欠付広幅溶接継手の破壊挙動と熱ひずみ脆化 | 8 |
| 2.3 熱ひずみ脆化材の破壊様式と性能劣化機構 | 13 |
| 3. 各種鋼材の熱ひずみ脆化感受性 | 18 |
| 3.1 熱ひずみ脆化感受性の鋼種による差 ¹⁾ | 18 |
| 3.2 熱ひずみ脆化感受性試験 (P B C T) ²⁾ | 19 |
| 3.3 熱ひずみ脆化の材質因子 ²⁾ | 20 |
| 4. 溶接による熱ひずみ脆化感受性 | 24 |
| 4.1 溶接熱ひずみ脆化と溶接諸条件 | 24 |
| 4.2 溶接熱ひずみ脆化感受性把握のための実験 | 24 |
| 4.3 溶接熱ひずみ履歴の解析 | 25 |
| 4.4 溶接熱ひずみ脆化に及ぼす溶接諸条件の影響 ^{1), 2)} | 26 |
| 4.5 溶接熱ひずみ材質劣化の関係 | 32 |
| 4.6 ま と め | 34 |
| 5. 冷間塑性加工に伴なう構造用鋼材のひずみ時効脆化 | 36 |
| 5.1 はじめに | 36 |
| 5.2 実 験 | 39 |
| 5.3 ま と め | 44 |
| 付録1 時効の有無について | 46 |
| 付録2 トラフリブ形状から試験片を採取した実験 | 46 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 6. 線状加熱加工にともなう材質変化 | 4 7 |
| 6.1 まえがき | 4 7 |
| 6.2 各種構造用鋼材の線状加熱による材質変化 | 4 8 |
| 6.3 まとめ | 5 3 |
| 7. 継手性能の見地からみた熱ひずみ脆化の評価 | 5 5 |
| 7.1 低応力脆性破壊遷移温度の評価 | 5 5 |
| 7.2 継手破断延性におよぼす局部的熱ひずみ脆化の影響 | 5 6 |
| 7.3 まとめ | 5 7 |

1. 概 要

1.1 研究の目的とその経緯

鋼構造物はその製作過程において溶接・ガス切断・火焰加工などの種々の熱加工をうける。これらの熱加工によって生ずる局所的な熱・ひずみ履歴は場合によっては鋼材およびその溶接部の機械的性質，特に破壊靱性に大きな影響を与えることは従来からいくつかの文献によって指摘されてきている（本委員会編“鋼溶接部の熱ひずみ脆化（レビュー）”参照）。したがって熱加工条件が鋼材およびその溶接部の機械的性質におよぼす影響を定量的に把握し，これを施工条件の決定に反映させることは鋼構造物の使用性能の見地からみて重要なことであるといえる。

本委員会ではこのような観点から，主として構造用鋼材とその溶接部を対象として，熱ひずみ履歴による鋼材の材質変化を熱加工条件との関連において定量的に把握するとともに，構造物の性能確保の見地に立つときの熱ひずみ履歴による材質変化の問題点を明確にしてゆくことを目的として共同研究が実施された。本研究委員会は昭和51年度に日本溶接協会 鉄鋼部会に設立され，初年度には従来の研究成果の調査研究と問題点の抽出を行なう作業を実施するとともに，昭和52年度から共同実験も実施し，さらにその共同実験と平行して各委員による 溶接熱ひずみ脆化などに関連する多くの自主研究が実施されてきた。本研究委員会は当初の研究計画をほぼ終えるに当り，ここに総合報告書として公表することにした。

1.2 研究項目と共同実験・自主研究

本委員会においては溶接などによる熱加工にともなう熱ひずみ履歴による材質変化の基本的挙動とその評価方法を明らかにする目的に沿って，次のような各項目の調査研究を行なってきた。

- (1) 熱ひずみ履歴に伴う鋼の材質変化に関する従来研究成果に関する調査
- (2) 溶接などの熱加工に伴う熱応力・ひずみ履歴
- (3) 予ひずみを受けた鋼材の材質変化とひずみ時効
- (4) 各種鋼材の熱ひずみ脆化感受性とその評価方法
- (5) 溶接による熱ひずみ脆化とその評価方法
- (6) 溶接以外の熱加工による材質変化
- (7) 熱加工にともなう材質劣化が継手性能に及ぼす影響

上記のような研究項目に注目し，

項目(1)の調査研究にはHSE-WG委員会（主査：豊田，本委員会副主査）が組織され，報告書を既に発表するに至った。

また項目(7)については本委員会として一部共同実験を実施した。実験は50キロ高張力鋼を対象とし，素材およびその溶接部が溶接熱ひずみを受けた場合の靱性劣化についてPBCTおよび小型のWells-木原試験を実施して把握するとともに一般構造用鋼として最低使用温度に近い-10℃近傍の破壊性能におよぼす溶接熱ひずみの影響を調べることを主目的としてなされたものである。

実験の対象（溶接方法と切欠位置）と実施分担委員の一覧は表1.1に示す通りである。

表 1.1

| 実 験 対 象 | | 分 担 委 員 |
|------------|---------|---------|
| 溶 接 法 | 切 欠 位 置 | |
| 母 | 材 | 阪大，川重 |
| 被覆アーク溶接 | ボンド部 | 住友重機械 |
| | 溶接金属 | 三菱重工 |
| サブマージアーク溶接 | ボンド部 | 日本鋼管 |
| | 溶接金属 | 三井造船 |
| CES溶接 | ボンド部 | 日立造船 |
| | 溶接金属 | 石川島播磨重工 |
| PBCT（ボンド部） | | 住友金属工業 |

本総合報告書は上記項目(1)~(7)の成果をふまえ、次のような5項目の形にまとめてあり、本報告書に引用した自主研究を新たに実施した分担委員を項目別に挙げると次のようになる。

- (1) 溶接熱ひずみ脆化が継手性能へ及ぼす影響： H S E 委員会共同実験および大阪大学，東京大学，住友金属工業
- (2) 各種鋼材の熱ひずみ脆化感受性： 大阪大学，住友金属工業
- (3) 溶接による熱ひずみ脆化感受性： 大阪大学，東京大学
- (4) 冷間加工にともなうひずみ脆化： 都立大，建設省土木研究所，川崎製鉄，日立造船，横河橋梁，日本鋼管，栗本鉄工，川崎重工業
- (5) 線状加熱加工にともなう材質変化： 大阪大学，日立造船

なお，自主研究結果で発表されている論文のある場合および各項目に引用した従来発表されている文献などについては各章ごとに参考文献として付す。

1.3 本報告書の内容と重点

本報告書の内容は次の通りである。

2. 溶接熱ひずみ脆化が継手破壊性能へ及ぼす影響

溶接などの熱ひずみ履歴によって生ずる材質劣化や残留応力の存在が継手の破壊強度や延性にどのような影響を与えるかについてWells・木原 type の破壊試験結果をもとにその傾向を把握し，性能低下が著しくなる場合には溶接熱ひずみ脆化が主要な役割を果していることを指摘する。さらに熱ひずみ脆化をうけた材の破壊発生とき裂の伝播挙動について考察し，性能低下の機構をひずみ時効との関連から検討し，熱ひずみ脆化の主要な問題点を明らかにしてゆく。

3. 各種鋼材の熱ひずみ脆化感受性

溶接熱ひずみをうけた切欠材の曲げ試験によって熱ひずみ脆化感受性は鋼材により異なることを指摘し，まず鋼材の熱ひずみ脆化感受性を把握するための試験法の開発について検討を行ない，その試験法をもとに鋼材の熱ひずみ脆化の材料面からみた支配因子とその影響について詳細な考察を加え，脆化機構は鋼材中に存在する Free Nitrogen に起因する Dynamic strain aging であろうことを指摘する。

4. 溶接による熱ひずみ脆化感受性

先在き裂部近傍を溶接したときに生ずる先在き裂先端近傍の熱ひずみ脆化に注目し溶接入熱，多層溶接などの溶接諸条件や先在き裂と溶接の位置関係などの影響を把握するために溶接諸条件の影響を調査するための簡易試験法の開発および溶接による熱ひずみ履歴についての解析的検討を通じて溶接による材質劣化の定量的把握方法などについて明らかにしてゆく。

5，6章では溶接以外の加工による材質変化を取り挙げる。

5. 冷間塑性加工に伴う材質劣化

橋梁などでみられる鋼板の冷間曲げ加工および後続の溶接熱に伴うひずみ時効による材質劣化に注目し，室温予ひずみを与えた各種鋼材の延性や靱性試験を実施して，予ひずみ量がそれらに及ぼす影響を明らかにするとともに，従来の冷間曲げ加工に関する規則（曲げ半径 $\leq 15 \times$ （板厚））との関連について考察し，靱性値の面からは現行の規制がほぼ適当のようであることなどを明らかにしている。

6. 線状加熱加工にともなう材質変化

加工ひずみ矯正のための線状加熱などの火焰加工による加熱部の材質変化に注目し，それらに関して従来からなされている実験検討結果を鋼種別にまとめ，その一般的傾向を示すとともに，本委員会で調査した各種構造物の線状加熱に関する規制も合わせて示す。

7. 継手性能の見地からみた熱ひずみ脆化の評価

これまでの研究・考察を基礎に継手の破壊強度や破断延性が溶接熱ひずみ履歴をうけるとどのように低下するかを評価する方法について考察を加えるとともに，鋼材の選定や溶接施工上の対策への今後の問題点についてふれる。