

溶接〔II〕

鋼橋の溶接(2)

田中五郎*

II編 ぜい性破壊と鋼材

(I) 溶接とぜい性破壊

1) ぜい性破壊例と残留応力 1935年ドイツの Zoo 橋が完成後間もなく気温 -10°C で、ケタのフランジと腹板との突合せ溶接部にいくつかの横き裂が発生した。また 1938 年には Rüdersdorf 橋の開通に先立つて気温 -12°C で同じような引張フランジに接する T 形継手の腹板中に重大なき裂が発生した。同じころベルギーでも フィーレンディール トラスに事故が起きている。

米国では戦時中に大量生産した輸送船に大小多数の事故が起つており、压力容器やタンクの事故例も多い。

最近の例としてはカナダのケベック州の Three River Bridge が開通後約 4 年の 1951 年 1 月、気温 -34°C のとき爆弾でこわれたかのように局部的粉砕が起つて溶接連続プレート ガーダー橋のいくつかが墜落した。

この種の事故が必ずしも溶接構造にかぎるものではなく 1947 年から 1952 年までの間に 2000~15000 t の船 15 隻が大きな構造上の欠陥によつて二つに折れたり、沈没したりした。このうちの 4 隻はリベット構造で、残りの 11 隻は戦時の悪条件下に溶接されたものであつた。

米国の北部の最低気温 -42°C まで下る地区に 1950 年に架設された、支間 200 ft のリベット構造のトラス道路橋に、2 年間の使用ののち 1952 年に重大な欠陥が発生した。なかでも危険なものは下弦材を構成している 2 本の溝形鋼のうちの 1 本がタイプレートを取りつけたパンチ穴を通つて部材に直角に切断した。

以上あげた事故はいずれも低温と密接な関係を持っているほか、使用鋼材の質、設計、製作法にも重大な関係がある。ただし Three River Bridge では鋼材も溶接施工にも欠点はなかつたが、床組に相等剛にクランプされたコンクリート床版のたえざる膨脹によるものと判定された³⁾。コンクリート床版がたえず膨脹するということは筆者には理解できないが、ともかくそのように報

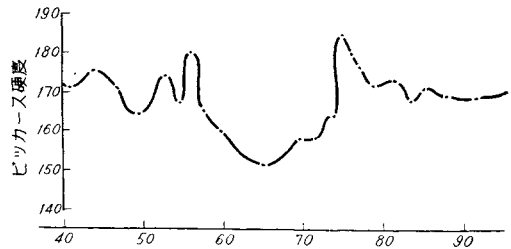
告されている。

このような事故にもかかわらずスエーデン、スイス、ドイツ、アメリカを含む寒冷地に多数の溶接橋がかけられ、りつぱにその役目を果たしていることは、適切な注意を払えば、はなはだしい低温になる地区でも十分安全な溶接橋が架設できるものであり、逆にリベット構造でも鋼材、設計および施工が適当でなければ、必ずしも安全ではないことを示している。

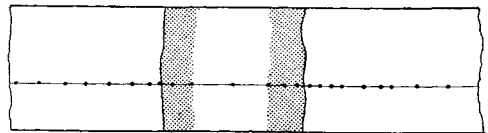
ヨーロッパで起きた初期の溶接橋の事故の後、溶接による局部的残留応力の問題が強く議論された末、残留応力がぜい性破壊に重要な要素であることを証明するため多くの実験が行われたが、それらの試みで結論的証拠を見出すことができなかった。広範囲にわたる残留応力、すなわち反応力は一たん発生したぜい性き裂の伝播に役立つことは事実であるが、比較的広範囲の残留応力は溶接に関係なく、圧延鋼材の中にも含まれているものである(圧延後の不均等な冷却による)。溶接の場合適当な施工順序を選べば、溶接のための残留応力はむしろ局部的に分布する。このような部材に破壊しない限度内の外部応力がかかると溶接による残留応力の重大性は実際的には消失する。

2) 溶接による鋼材の変質 鋼を溶接すると溶接の近傍は図-2 に示すように中心部の溶着金属に接して融合部、その外側には変質部ができる。変質部の一部は焼入れ効果を受けて硬化する。硬化は軟鋼ではわずかであるが高張力鋼や高炭素鋼では余計に硬化する。このように変質した母材部分がぜい性破壊を起しやすいく。

図-2 高張力鋼溶接部の圧延面における硬度分布



試片の一端よりの巨距 mm
試片はでき上り 130x80x12
の V 形突合せ溶接



硬化に最も決定的な化学成分は炭素であるが、Mn や Si その他の成分も炭素ほど敏感ではないが影響がある。炭素以外の要素をも考慮に入れて最高硬度を論ずる場合には等価炭素量を考える。高張力鋼の硬化を論ずる場合は通常等価炭素量を考えなければならない。高張力鋼等の溶接による材質の変化は通常オーストリア曲げ試験⁴⁾

* 横河橋梁製作所 取締役

3) An Interpretation of Research and Experience in Structural Welding, By La Motte Grover. The Welding Journal, March 1956.

4) "Aufschweissbiegeversuch" ÖNORM M 3052 (1950)

による曲りと、き裂の状態と判定する。この試験は母材の硬化性と切欠感度のみならず使用溶接棒の性質や溶接後試験までに経過した時間と試験温度にも関係し、低水素溶接棒を使用すれば硬化は比較的少ない。予熱やユニオンメルト法も硬化を防ぐのに効果的である。

3) 切欠ぜい性 常温で単純引張りの場合は十分延性を示すような鋼材も切欠をつけ、低温で衝撃的な外力を加えるなど塑性変形を抑制した状態ではもろく破壊するものである。この現象を低温ぜい性 (low temperature brittleness), あるいは切欠ぜい性 (notch brittleness) といい、材料の切欠の存在に対する 敏感性を切欠感度 (notch sensitivity) という。鋼材の低温における切欠ぜい性におよぼす要素は、(1) 温度、(2) 切欠の鋭さ、(3) 荷重速度、(4) 材質である。

切欠感度の判定法としては種々の方法が行われているが、最も一般的なものは図-3に示すようにV形の切欠をつけた試験片のシャルピー衝撃値である。この試験を温度を変えて行くと図-4のような温度-吸収エネルギー

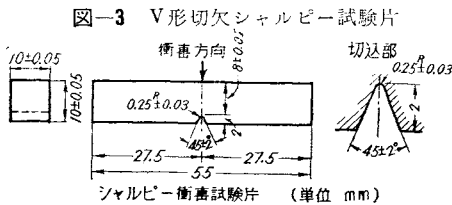
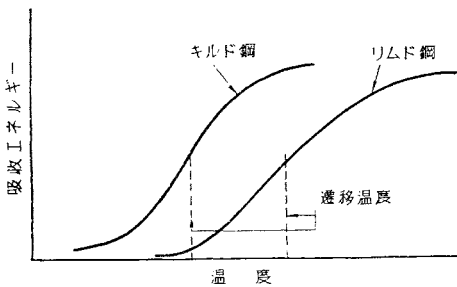


図-4 V形切欠シャルピー衝撃試験曲線



一曲線が得られる。図で明らかなようにある温度領域において試験温度の低下とともに吸収エネルギーが急速に減少し、この温度より高温では破断面が延性で、低温ではぜい性破壊をする。破壊様式が延性からぜい性に遷移する領域は一定の幅を持つが、遷移域を代表する温度を遷移温度 (transition temperature) と呼ぶ。遷移温度にはぜい性破壊の開始に関係のある延性遷移温度 (ductility transition temperature) とそれよりも高温で破壊の伝播に関係ある破面遷移温度 (fracture transition temperature) の2種類あることが特別の試験方法によって判明している。

通常衝撃試験における吸収エネルギーの最大値と最小値との平均値に対する温度を遷移温度とするが、造船方

面では吸収エネルギーが 15 ft-lb (2.6 kg-m/cm²) になる温度を 15 ft-lb 遷移温度と呼ぶ。橋の方では 0°C における衝撃値を切欠ぜい性の尺度として用いることが多い。

切欠が存在するとその低部に高い応力が集中し、かつその部分における変形能が阻止されるためもろく破壊する。この現象が切欠ぜい性であつて、板厚が大きくなるほど平面内の応力のほかに厚き方向の応力も大きくなり、従つて3軸応力がいちじるしくなるわけで、厚板ほど切欠ぜい性の問題が重要になる。従つて板が厚くなると材料の規格を厳格にする必要がある。

切欠の鋭さや深さは遷移温度に大きな影響があるから構造物の設計においては、なるべく主応力方向の変形が自由に発生しうような構造にするのがよい。例えば縦ゲタと床ゲタや、床ゲタと主ゲタの交わる部分等は特に留意しなければならない。

加工面についていえば、フルサイズパンチとセン断は材料のぜい性を高めるが、軟鋼のガス切断による影響は比較的少なく、良好な自動ガス切断では軟鋼の場合ほとんど影響しない。パンチあるいはせん断した材でも切断後 620°C に後熱すると相等に改善される。930°C の後熱は特に良好で、セン断、ガス切断ともにいちじるしく切欠ぜい性を改善し、従つて遷移温度も低下する。

遷移温度は鋼材の質によつていちじるしく変化する。鋼中の元素で遷移温度に最も重要な影響を与えるものは C と Mn である。C が少なく Mn が多く従つて Mn/C の値が大きいかほど脱酸がよく行われているわけで、遷移温度が低く従つて安全である。SS 41 規格には Mn/C の規定はないが、溶接構造用圧延鋼材 SM 41 W では Mn/C が 2.5 以上であることを要求している。

さらに低温ぜい性にすぐれているのはセミキルド鋼あるいはキルド鋼である。特にアルミでキルしたキルド鋼は十分な脱酸のほか組織が細粒化しているので一層良好である。

(II) 日本の溶接橋用鋼材

1) 道路橋用 現在審議中の“アーク溶接鋼道路橋示方書”ではその使用鋼材について大体次のように規定している。

板厚 25 mm 以下 SS 41 標準

ただし 122 mm 以上は SM 41 または SM 41 W がよい。

板厚の制限 最大 45 mm

気温がいちじるしく低下する地方では特別に考慮する。

リベット構造の示方書と変つている点は、板厚が大きい場合は SS 41 の代りに SM 41 または SM 41 W を使用することを規定した点である。その理由は (V) で述べるとおりである。

2) 鉄道橋用 同じく審議中の“アーク溶接鋼鉄道橋

設計示方書案”では次のように規定している。

板厚 12 mm 以下	SM 41
12 mm をこえ 25 mm 以下	SM 41 W
25 mm をこえるもの	SM 41 W

ただし Si の含有量が 0.5~0.30% のこと。

最大板厚 40 mm

Si が 0.15~0.30% になるためにはキルド鋼であることが必要である。

(III) 国際溶接会議 (1954 年) 起草の溶接用鋼材の分類基準^{*)}

この分類基準は必ずしも溶接橋用とはかぎらないが、簡単にその要点を述べる。

1) 種類 4 種

A 種: あまり重要でない構造物用

B 種: 標準応力を受ける普通の構造物用……………一般用

C 種: 改良鋼種, 切欠じん性にすぐれる……………対ぜい性破壊用

D 種: 高性能鋼, 切欠じん性にすぐれる……………特に対ぜい性破壊用

予熱あるいは後熱は残留する拘束を減じ, より高級な用途に使える。

2) 最低条件

(1) 特別の注意をしないで溶接しうる最大板厚:

表-1

鋼種	引張強さ (kg/cm ²)	制限板厚 (mm)	適要
37	37~44	—	ただし応力の種類, 母材の化学成分による硬化性, 使用温度, 構造物の形状によつてこの制限板厚が変る。
42	42~50	40~60	
50	50~60	30~50	
52	52~60	30~40	
56	56~65	30~40	

(2) 化学成分:

表-2

成分	A 種	B 種*	C 種*	D 種*
C _{max} %	0.25	0.20	0.20	0.20
Mn %	—	1.5	1.5	1.5
Si %	—	0.6	0.6	0.6
S %	0.05	0.05	0.05	0.05
P %	0.06	0.06	0.06	0.06

注* C≤0.15% ならば, Mn≤1.8% を許容する。

56~65 鋼種には Si および Mn の含有量を増してもよい。A 種の C 含有量の制限は目標値である。含有量は溶鋼分析値。

(3) 品質試験: すべての鋼種にラミネーションがないこと。B, C, D 種にはいちじるしい偏析がないこと。

A, B 種ではぜい性破壊試験は不要。C, D 種では 3 コの V ノッチシャルピー (試験片は圧延方向に取る) 衝撃値の平均値が, C 種では 3.5 kg-m/cm² (0°C), D 種では

5) 溶接学会誌 第 24 巻 10 号 昭和 30 年 10 月

3.5 kgm/cm² (20°C) 以上のこと。

3) 溶接したまたはビードを置いた試験片に対する品質試験 A 種は不要, C, D 種は必要に応じて行う。D 種は必要。

熱影響部最高硬度試験は C, D 種と ST 50, 52, 56 に適用する。試験片は 350×150×最大厚の長手方向中央部表面に使用最小径棒でビードを置き, ビードを横断して切断後測定する。15~25°C において 10 kg ビッカース硬度 350 以下たること。

4) 溶接におけるき裂防止法 (ラパツ教授)

(1) 設計: 最も重要なことで応力の集中を防ぐ。拘束がはなはだしいと多軸応力が発生して割れる。スロットをつける等の方法で変形を容易にする。

(2) 硬化の減少: 材料が厚いほど冷却速度が大となり硬化する。雨, 雪, 低温も冷却速度を早める。冷却速度を緩和するには予熱が最良で, 予熱温度は ST 50, ST 52 級 100~200°C, ST 60 級 200~350°C が適当である。予熱は構造物の一部または全部, 場合により溶接部付近を局部的に加熱してもよい。

(3) 溶接技術: 高温き裂は溶着金属のみに起るもので使用溶接棒が不適当のためである。低温き裂は溶着金属または母材の熱影響部に起る。S の含有量過多によるもので, き裂防止には太径棒や大電流がよい。き裂はルートパスに起りやすいから小さなビードは不可, 多層溶接では溶接中の熱を失わぬうちに連続的に溶接する。仮付溶接は過短または過小は不可で, 長さ 20~30 mm とすること, 低水素系溶接棒を使用するのがよい。

(4) 溶接姿勢の影響: 原則として溶着金属の量が増加すれば割れにくい。従つて最も安全な姿勢は立向上進溶接で, 危険の少ないのは下向と水平溶接であり, 危険な姿勢は上向で傾いた溶接である。

(IV) AWS の改訂溶接道路および鉄道橋標準示方書の鋼材

AWS の溶接橋示方書委員会がその改訂版に最近の研究と経験とを織りこもつてしている。ぜい性破壊の対策として従来の ASTM-A 7 のほかに ASTM-A 373-54 T (溶接構造用) を指定している。A 373 のほかに A 131-53 T (船舶構造用) がある。A 373 は板厚が増すと A 131 よりおとり, 1" 以上でも細粒ではない。A 7 では普通 1 1/2" 以上でキルド鋼とするが, A 373 と A 131 とは 1" 以上すべてキルド鋼である。

表-3 ASTM-A 373-54 T と A 131-53 T の機械的性質

規格	引張強さ (lb/in ²)	降伏点 (lb/in ² min)	伸び (8"min%)	伸び (2"min%)
A 373	58 000~75 000	32 000	21	24
A 131	58 000~71 000	32 000	21	24

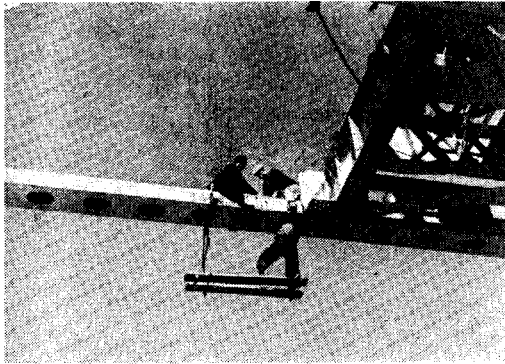
表-4 鋼板の化学成分 C, Mn, Si

成分	規格	厚さ 1/2" まで		超 1/2"~1" まで		超 1"~2" まで		超 2"~4" まで	
		溶 鋼	チェック	溶 鋼	チェック	溶 鋼	チェック	溶 鋼	チェック
C _{max} %	A 373	0.26	0.30	0.25	0.29	0.26	0.30	0.27	0.31
	A 131	0.23	0.27	0.25	0.29	0.25	0.29	0.25	0.29
Mn %	A 373	—	—	0.50~0.90	0.46~0.94	0.50~0.90	0.46~0.94	0.50~0.90	0.46~0.94
	A 131	—	—	0.60~0.90	0.56~0.94	0.60~0.90	0.56~0.94	0.60~0.90	0.56~0.94
Si %	A 373	—	—	—	—	0.15~0.30	0.13~0.33	0.15~0.30	0.13~0.30
	A 131	—	—	—	—	—	—	—	—

表-5 化学成分 P, S, Cu

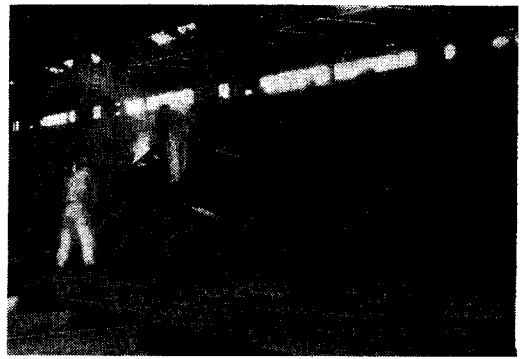
名 称	成分名	溶 鋼	チェック
A 373	P _{max} %	0.04	0.05
A 131	S _{max} %	0.05	0.063
合 鋼 鋼	Cu min %	0.20	0.18

注: A 131 では厚さ 1" をこすものは細粒子法による。



東海道線木曾川橋梁下弦材組立作業中

三径間連続溶接下路構桁: 活荷重 KS-18
 支 間: 3 @ 63.35=190.05 m
 総 支 間: 572.49 m
 主 桁 間 隔: 4.7 m
 桁 重 量: 1419.776 t



東京都新川橋鋼床板 (E-H 法により溶接中)

床 板 厚: 10 m/m
 横 リ ブ 支 間: 3.924 m
 " 間 隔: 1.215 m
 " 断 面: Web. pl 259×9 Fig. pl 80×16
 縦 リ ブ 断 面: Balb. pl 180×9.5
 総 床 板 重 量: 69 594 kg
 単 位 面 積 当 り 重 量: 173 kg/m²

書 評

本間 仁 著 次元解析, 最小 2 乗法と実験式 コロナ社 刊
 春日屋伸昌

本書は応用数学講座の第 5 巻として刊行されたものであるが、第 1 部次元解析は本間氏が、第 2 部最小 2 乗法と実験式は春日屋氏がそれぞれ分担執筆されている。

第 1 部次元解析はページ数としては本書の約 20% を占めるだけであり、次元と単位、次元解析、模型実験の 3 章よりなっている。すなわち次元解析について必要な一般事項をひととおり述べたのち、流体力学、熱力学、弾性力学、電磁気学などについての応用を述べ、第 3 章に次元解析の一つの大切な応用となつてい

る模型実験の理論について述べている。次元解析については邦書も少ないし、次元解析の概念をつかむには適当な参考書であろうと思う。

第 2 部最小 2 乗法と実験式においては最小 2 乗法に対しては総論、直接測定、間接測定、条件測定、系統的計算法の 5 章が与えられ、実験式に対しては非周期実験式、周期実験式と全区間近似実験式の 2 章が与えられている。最小 2 乗法については戦前割合多く邦書が刊行されていた。したがって最小 2 乗法の本といえば一つのきまつた形ができていた

くらいである。著者は統計学の成果と結びつけて、多少の新味を出そうと試みておられる。最小 2 乗法の教科書として適当であろうと思う。実験式に対する 2 章も、実験者に対し有益なものであろうが、一般向きではない。

なお第 1 部第 2 部を通じ各章ごとに演習問題があり、その解答が巻末にあるが、これは読者にとって親切なやり方である。

著者: 本間 仁 (正員 工博 東大教授), 春日屋伸昌 (正員 中央大学助教授), A 5 判, p.327, 箱入昭和 32 年 1 月 10 日 初版発行, 定価 520 円