

# 2-3 材料と溶接部の試験法\*



小野 守章\*\*

Test Method of Materials and Weled Joints\*

by ONO Moriaki\*\*

**キーワード** 厚鋼板, 薄鋼板, 引張試験, 疲労試験, 衝撃試験, 脆性破壊試験, 溶接割れ試験

## 1. はじめに

本稿は、厚鋼板、薄鋼板およびそれらの溶接構造物の各種試験法について概説する。

## 2. 厚鋼板および溶接構造物の試験法

### 2.1 概要

厚鋼板を使用して製作される鋼構造物は多岐に渡っており、その安全性・信頼性を確保するために材料・溶接部には様々な試験が適用される。その一例として図1に溶接部に適用される試験法を分類して示すが、主に溶接施工の健全性を評価する非破壊試験と、溶接部が最終的に帰するところの規格要求性能を満足していることを確認するための破壊試験に分類される。本項では後者の破壊試験方法の内、一般的に実施される数項目に関して概説することとする。

### 2.2 引張試験

引張試験は、材料および溶接部の引張応力に対する弾性挙動、塑性挙動、破断強度を測定、さらに継手引張試験においては加えてその破断位置を把握する目的で行われる試験であり、一般的な評価指標としては、降伏点、引張強さ、伸び（一様伸び、破断伸び）、絞り値等があり、それぞれの測定値が、準拠する規格で要求されるところの材料特性を満足しているかどうかを評価する試験である。

引張試験は大きく分けて、母材部の引張試験、全溶着金属部の引張試験（JIS Z 3111）、継手引張試験（JIS Z 3121）、の3種に分類される。試験片採取方法の概略を図

2に示す。母材部の引張試験は、供試ままの母材部より丸棒もしくは矩形の引張試験片を、全溶着金属部の引張試験は所定の施工方法によって溶接施工された溶接部より、一般的にはその平行部が純粋な溶着金属からなる丸棒引張試験片を、継手引張試験片は一般的には溶接線方向に直行した方向、且つ、平行部内に溶着金属と熱影響部、規格によっては母材部を含む矩形の引張試験片を採

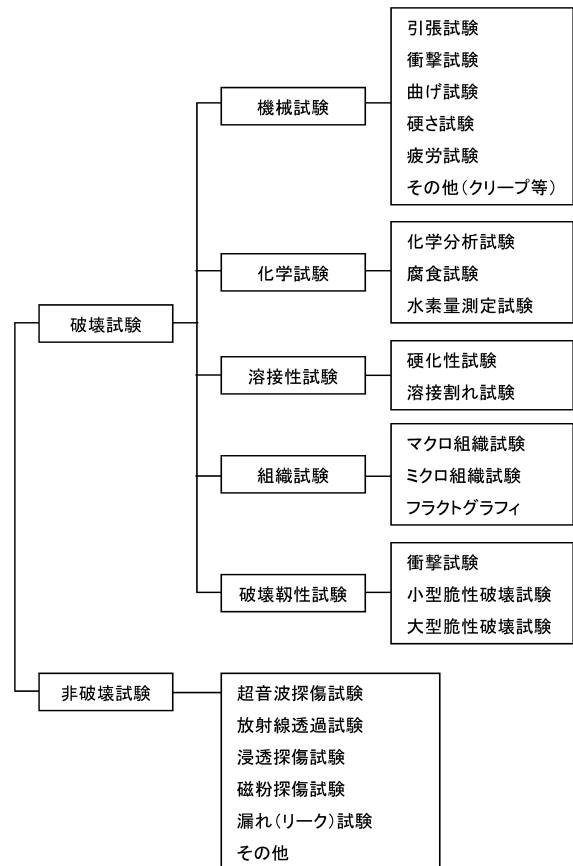


図1 厚鋼板溶接部の試験方法

\*原稿受付 平成20年9月28日  
\*\*正 員 JFEスチール株式会社 Member, JFE Steel Corporation

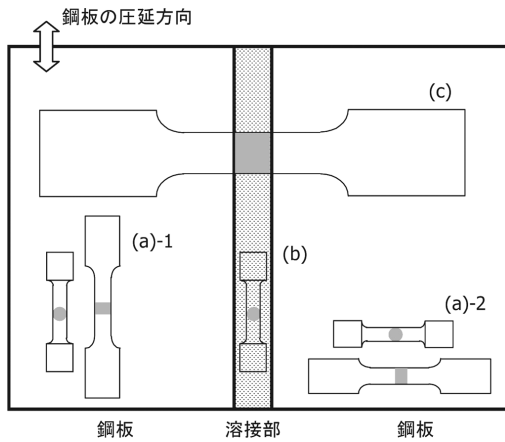
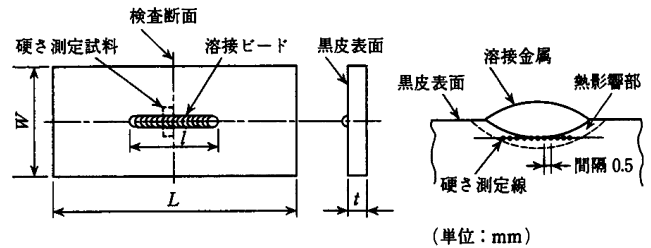


図2 引張試験片の採取要領例  
(a)-1 母材部引張 (圧延方向), (a)-2 母材部引張 (圧延直角方向), (b) 全溶着金属部引張, (c) 継手引張



項目	L	W	t	備考
1号試験片	約 200	約 75	125	室温溶接用
2号試験片	約 200	約 150	125	予熱溶接用

図3 最高硬さ試験方法 (JIS Z 3101)

取し、試験に供する。引張試験は油圧式のアムスラー型万能試験機やサーボモータ式のインストロン型試験機等が使用され、昨今ではデジタルデータ処理機能を搭載した試験機が主流となりつつある。

また、引張試験の各種測定結果には、試験片の形状および寸法、試験温度や引張歪速度、溶着金属部引張試験および継手引張試験では溶接施工条件（溶接入熱、予後熱処理条件、パス間温度など）が大きく影響することから、案件毎に準拠する規格詳細を遵守する必要がある。

2.3 衝撃試験

衝撃試験は材料および溶接部の延靱性を評価するための高速破壊試験であり、一般的にはシャルピー試験を指す場合が多い。

シャルピー試験片は、JISではJIS Z 2242に規定されている試験片の内、2mm深さのVノッチ形状の試験片が一般的に使用される。試験片の採取は母材部、溶接金属部、溶接熱影響部 (HAZ) の各評価対象に対して、それぞれの位置に切欠を設けた試験片を採取する。さらに、規格毎に材料の厚さおよび溶接施工方法によって試験片中央部の位置や切欠位置などが個別に規定されていることが多いため、案件毎に準拠する規格詳細を遵守する必要があることはいうまでもない。特に溶接熱影響部の衝撃試験では、溶融線 (Fusion Line もしくは Bond 部とも言うられる：切欠長さの内、溶接金属と熱影響部が50%づつ)、HAZ-1mm (溶融線から1mm熱影響部側) 等、その切欠位置が厳密に規定されている場合があり、試験片加工時に十分な配慮が必要となる。

シャルピー試験の評価は通常、吸収エネルギー (一般的にJ [ジュール] で表される) によって評価されるが、規格によっては脆性 (延性) 破面率、エネルギー (もしくは破面) 遷移温度、横膨出量なども評価指標として併用されることがある。

2.4 硬化性試験

厚鋼板の溶接構造物において、その硬化性の評価は、後述する溶接低温割れの防止を図る指標としてのみならず、応力腐食割れ感受性や、耐磨耗性の評価指標としても使われることがある。

硬さ試験方法自体にはいくつかの種類があり、代表的なものにビッカース硬さ HV (JIS Z 2244)、ブリネル硬さ HB (JIS Z 2243)、ロックウェル硬さ HR (JIS Z 2245) 等があり、いずれもダイヤモンド錐や鋼球などを試験片表面に一定の荷重条件で押しつけ、その圧痕寸法を測定することにより算出する。いずれの方法を採用するかに関しては準拠する規格によるため、事前に適切な方法を選択し、測定値の整合を取る必要がある。

厚鋼板の溶接による硬化性を調べる試験方法としては、JIS Z 3101に規定される「溶接熱影響部の最高硬さ試験方法」、JIS Z 3115に規定される「溶接熱影響部のテーパ硬さ試験方法」等がある。特に前者は試験片・溶接方法が簡便なため、比較的多用されている。図3に試験方法を示す。

所定の寸法に切断加工した鋼板に対して、被覆アーク溶接棒によりビードオンプレート溶接を行った後、溶接線中央切断面のビード直下、板面に平行に硬さ分布を測定し、その最高硬さを測定する。さらに、必要に応じて試験片を予熱して同様の測定を繰り返し、最高硬さと予熱温度の関係を調査する場合もある。一方のテーパ硬さ試験に関してはJIS規格をご参照いただきたい。

また、上述した硬化性を評価するための硬さ試験とは別に、実溶接継手の横断面に対して連続的に硬さ試験を行いその硬さ分布を調査し、熱影響部の硬化・軟化の度合いを調べたり、溶接金属部・熱影響部・母材部のマッチングを評価する場合もある。

2.5 溶接割れ試験

厚鋼板溶接部の評価の中で最も重要な試験の一つが溶接割れ試験であり、一般的に「溶接性の評価」という場合には、この溶接割れ試験の評価を指す場合が多い。溶接割れは実施工でしばしば発生し、継手、ひいては構造物全体の健全性を損ねる重大な溶接欠陥であり、その分類・発生原因・対策が多岐に渡るために、その評価試験方法も細かく分類されている。代表的な溶接割れ試験方法の種類とその特徴を表1に示す。JIS、WES等といった規格に規格化されているものから、材料研究で使用するような特殊な試験まで、極めて多くの試験方法があるこ

表1 溶接割れ試験方法の種類と特徴

割れの種類	継手の形式		割れ試験法	拘束の種類	割れの位置*	対象材料	規格	備考
低温割れ	突合せ継手	単層溶接	斜めY形溶接割れ試験	自拘束	主としてHAZ	主として高張力鋼	JIS Z 3158	高温割れにも使用
			U形溶接割れ試験	自拘束	WM	主として高張力鋼	JIS Z 3157	
			TRC試験	定荷重外的拘束	HAZ, WM	炭素鋼	—	
			RRC試験	定標点外的拘束	HAZ, WM	炭素鋼	—	
	多層溶接	窓形拘束割れ試験	自拘束	WM	主として高張力鋼	—	実施工条件で溶接	
		H形拘束溶接割れ試験	定標点拘束	HAZ, WM	主として高張力鋼	JIS Z 3159		
		レ形開先多層溶接割れ試験	自拘束	HAZ, WM	炭素鋼, 低合金鋼	WES 1105		
		NRL円周はめ込み割れ試験	自拘束	WM	主として高張力鋼	NRL		
	すみ肉継手	単層溶接	重ね継手(CTS)溶接割れ試験	自拘束	主としてHAZ	炭素鋼, 低合金鋼	JIS Z 3154	高温割れにも使用
		T形すみ肉割れ試験	自拘束	WM	炭素鋼	DIN		
	多層溶接	ヒール割れ試験	自拘束	HAZ	炭素鋼, 低合金鋼	—		
	多層溶接	十字すみ肉割れ試験	自拘束	主としてHAZ	主として高張力鋼	—		
ビード置き	単層溶接	バッテル形ビード下割れ試験	自拘束	HAZ	高張力鋼	—		
		インプラント割れ試験	定荷重外的拘束	HAZ	主として高張力鋼	WES 1104		
ラメラテア	突合せ継手	多層溶接	窓形拘束十字継手試験	自拘束	HAZ, 板厚中央	炭素鋼, 低合金鋼	JIS Z 3159	
	H形拘束十字継手試験	定標点拘束	HAZ, 板厚中央	炭素鋼, 低合金鋼				
すみ肉継手	多層溶接	クランフィールド形割れ試験	収縮角変形	HAZ	炭素鋼, 低合金鋼			
高温割れ	突合せ継手	単層溶接	C形ジグ拘束突合せ割れ試験	定標点拘束	WM(HAZ)	ステンレス鋼, 高張力鋼	JIS Z 3155	フィスコ割れ試験
	フレア継手	単層溶接	丸棒形溶接割れ試験	自拘束	WM	炭素鋼		
	すみ肉継手	単層溶接	T形溶接割れ試験	自拘束	WM	炭素鋼	JIS Z 3153	
			展開式すみ肉溶接割れ試験	強制回転変形	WM	炭素鋼, ステンレス鋼		
	ビード置き	単層溶接	Varestraint試験	縦曲げ強制変位	WM, HAZ	鉄, 非鉄材料	魚骨形割れ試験	
Trans-Varestraint試験	横曲げ強制変位	WM, HAZ	鉄, 非鉄材料					
Houldcroft溶接割れ試験	自拘束	WM	非鉄材料					
分割形円周グループ溶接割れ試験	自拘束	WM	鉄, 非鉄材料					
再熱(SR)割れ	突合せ継手	多層溶接	ひずみ集中形多層溶接試験	収縮角変形	HAZ	高張力鋼, Cr-Mo鋼		
	すみ肉継手	単層溶接	重ね継手溶接試験	自拘束	HAZ	高張力鋼, Cr-Mo鋼		多層盛溶接にも適用

\* HAZ(熱影響部), WM(溶接金属).

とがわかる。

溶接割れで代表的なものは表中にも記載のある高温割れと低温割れである。一般的に高温割れは溶接時の凝固収縮時など、高温域で発生するものを指し、低温割れは溶接終了後、ある程度の時間が経過した後、室温近傍で発生するものを指す場合が多い。紙面の関係で全ての評価試験方法をご紹介することは出来ないが、代表的な試験方法を以下に紹介する。

図4は低温割れの代表的な評価試験であるスリット型の割れ試験方法である。(a)のy形割れ試験(JIS)は主に熱影響部の低温割れを、(b)のU形割れ試験(JIS)は主に溶接金属部の低温割れを評価する方法である。いずれの場合も、試験片の中央部にスリットを設けた開先を有しており、この開先内に溶接を行い、試験片自体の拘束力によって割れを発生させる、いわゆる自拘束形の割れ試験である。これらの割れ試験では材料自体の溶接性のみならず、使用する溶接材料や溶接時の温度・湿度に

よって結果が大きく変わるため、実施にあたっては厳密な管理・記録が必要である。

スリット形の割れ試験は試験片を何水準かの温度に予熱して試験を行い、低温割れが発生しない最低予熱温度(俗にy stopと言われる)を材料毎に求め、実施工時の必要予熱温度を判断するという方法がとられる場合が多い。また、y形割れ試験片の拘束度は一般的な実構造物の拘束度よりも高いことが知られており、同試験法は耐溶接低温割れに対して安全側の評価であると言われている。

図5は高温割れの代表的な評価試験である、C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法(JIS Z 3155)であり、フィスコ割れ試験とも言われる。ルート間隔0~6mmを設けた試験片を拘束ジグに鉛直方向(トルク:118N・m)および水平方向に固定し、開先内を断続的に溶接、発生する高温割れの有無を調べる方法である。

以上、代表的な割れ試験方法を紹介したが、前述したように実際に発生する溶接割れの種類・要因は多岐に渡

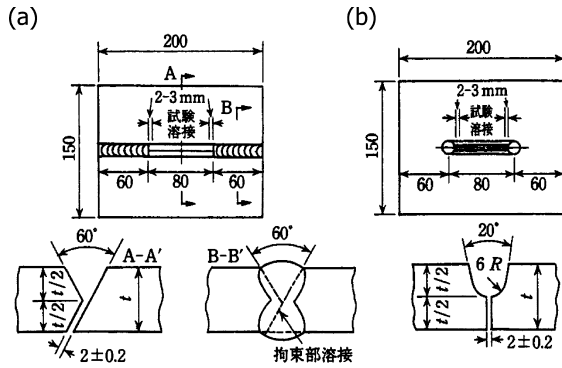


図4 スリット形の低温割れ評価試験片  
(a) y形溶接割れ試験, (b) U形溶接割れ試験  
(JIS Z 3158) (JIS Z 3157)

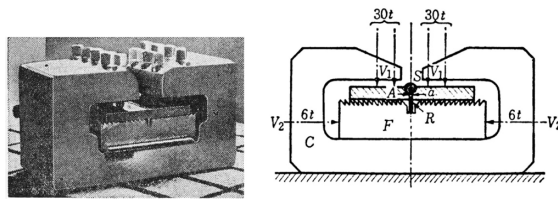
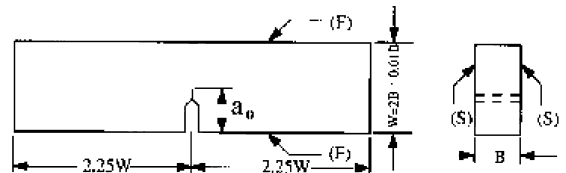
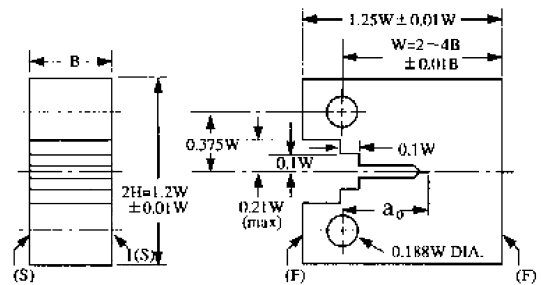
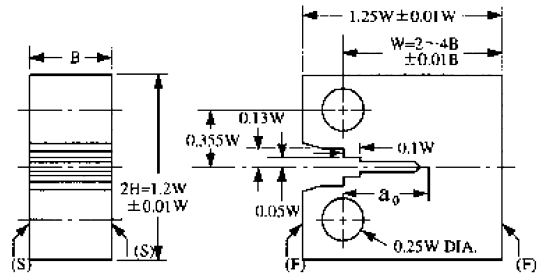


図5 C形ジグ拘束突合せ溶接割れ試験  
(JIS Z 3155)



(a) 3点曲げ試験片



(b) コンパクト試験片

図6 標準破壊靱性試験片 (WES1108, 1109)

るため、その評価にあたっては適切な手法を選択・適用することが重要である。

2.6 小型脆性破壊試験

小型脆性破壊試験は材料および溶接部の使用される温度での脆性（不安定）破壊に対する限界値を評価するための実施される破壊力学に基づいた試験であり、一般的にはCTOD試験が多く用いられている。

小型脆性破壊試験は母材部、溶接部について、それぞれWES1108, WES1109に試験片寸法、試験方法が規定されているが、母材部については通常図6に示す3点曲げ試験片あるいはコンパクト試験片、溶接部については3点曲げ試験片が使用される。試験片は母材部、溶接金属部、溶接熱影響部（ボンド、HAZ）の各評価対象に対して、それぞれの位置に機械切欠に引き続いて導入された疲労予き裂の先端が位置するよう用意される。予き裂の寸法・形状が詳細に規定されていることから、特に溶接熱影響部の試験では、板厚方向の残留応力分布による疲労予き裂長さの不均一を避ける目的で、疲労予き裂導入前に局所的な塑性ひずみを付与する等の処理が必要な場合がある。

CTOD試験の評価は、鋼構造物の使用温度で3本の試験を行い、その最低値が用いられるのが一般的である。また、材料の延性・靱性が高い場合には多くの場合脆性破壊が生じず最高荷重時のCTODのみが測定されるが、これは脆性破壊に対する限界値とはならないため注意が必要である。

2.7 大型脆性破壊試験

大型脆性破壊試験は実際の溶接鋼構造物の要素を模擬した状態での材料の破壊靱性を評価するために実施され

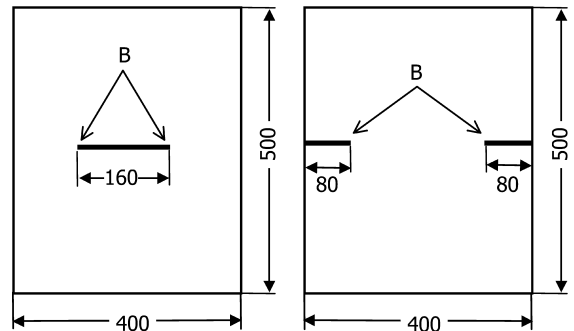
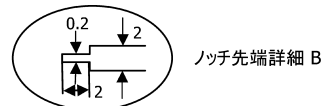


図7 ディープノッチ試験片

る。溶接部の試験では構造物の溶接残留応力の効果も含めた破壊靱性の評価ができることから、造船や海洋構造物用材料の評価結果が数多く報告されている。図7は日本で開発されたディープノッチ試験片であり、通常は機械加工によって導入した切欠全長が試験片幅の40%といった大きなものとしているため、実断面応力が材料の降伏強度以下の状態でも、ある温度以下では脆性破壊を評価できるようになっている。試験片は通常タブに溶接され、大型の引張装置（テストリグ）を用いて試験に供さ

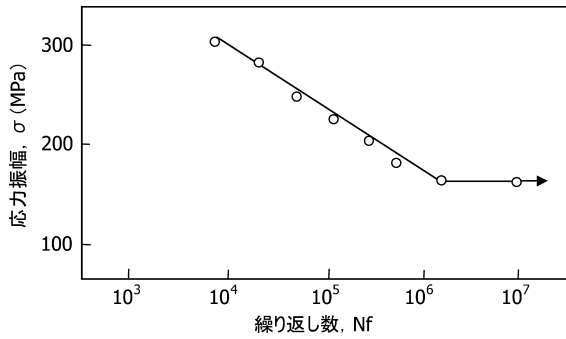


図8 S-N 曲線の例

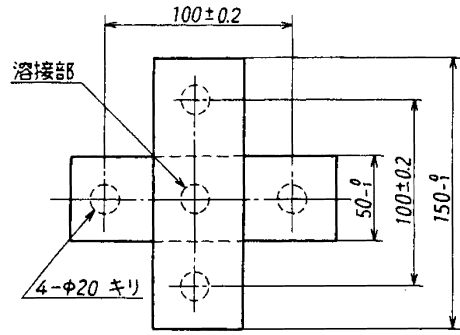
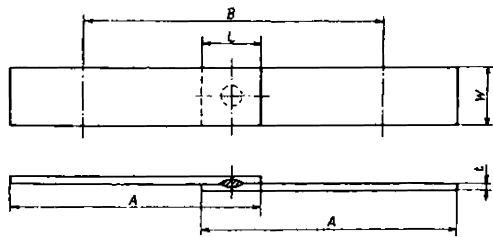
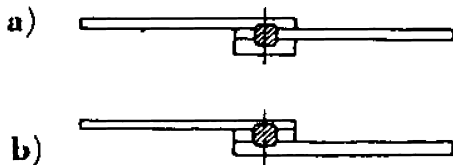
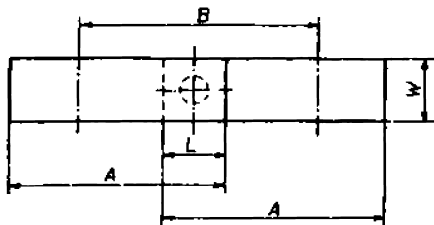


図10 十字引張試験法 (JIS Z3137)



(a) 二枚重ね試験片形状



(b) 三枚重ね以上の試験片形状

図9 引張せん断試験法 (JIS Z3136)

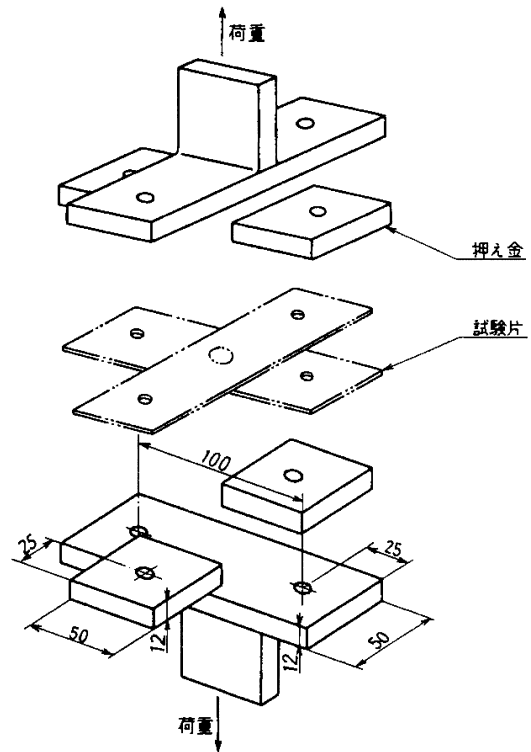


図11 十字引張試験法 (JIS Z 3137)

れる。

溶接継手のディープノッチ試験において、切欠は溶接金属部、溶接熱影響部（ボンド、HAZ）に導入され、脆性破壊発生の限界値が  $Kc$ 、 $\delta c$  といった破壊力学パラメータで評価されるのが一般的である。また、溶接継手の評価においては、この限界値の評価以外にも、発生した脆性き裂がどのような伝播経路をとって最終破断に至るかを確認する目的でもこの試験が行われることがある。

### 2.8 疲労試験

鋼構造物には、溶接・機械加工などの製造時に生じる欠陥や構造的応力集中部の存在に起因し、負荷応力が降伏強度以下であっても疲労き裂の発生や進展現象が生じ、最終的に破断に至る場合がある。そこで、材料の繰返し応力に対する強度（疲労強度）を確認するために疲労試験が行われる。

図8は縦軸に負荷応力振幅 $\sigma$ 、横軸にその応力振幅で試験片の破壊までに繰り返した数 $N$ をプロットしたもので、一般的にS-N曲線と呼ばれている。鉄鋼材料では概ね $10^6 \sim 10^7$ 回の繰返しで限界の疲労強度（疲労限度）が存在し、通常200万回疲労強度等が疲労特性の評価指標として用いられている。

## 3. 薄鋼板および溶接構造物の試験法

### 3.1 概要

薄鋼板を使用して製作される溶接構造物は、自動車、鉄道車両等の輸送機および飲料缶、燃料タンク等の容器他、多くの産業分野において用いられている。薄鋼板の溶接部の評価方法には、溶接継手の静的強度および疲労強度を定量的に評価する方法と溶接部の接合状態を、簡

便な手法により評価する方法がある。以下に、これらの評価方法について概説する。

3.2 引張試験

薄鋼板の溶接は、抵抗スポット溶接法が主に用いられており、スポット溶接継手強度の評価方法がJISで規定されている。抵抗スポット溶接は、薄鋼板を重ねて溶接するため、溶接部（ナゲット）にはせん断負荷がかかる場合とほく離負荷がかかる場合に分類される。それぞれ、引張せん断試験法と十字引張試験法と呼ばれている。それぞれの試験片形状を図9、10に示す。十字引張試験法では、図11に示すように試験片のクランプ治具もJIS Z 3137で規定されている。

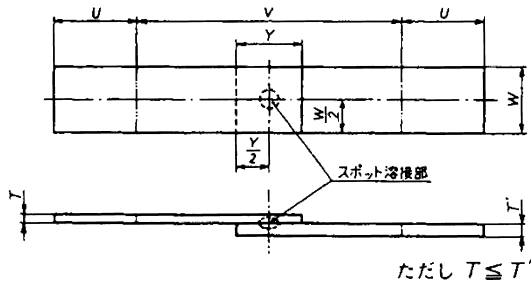


図12 引張せん断疲労試験法 (JIS Z3138)

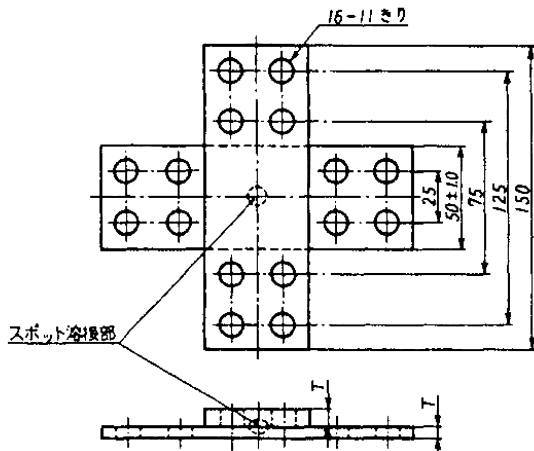


図13 十時引張疲労試験法 (JIS Z3138)

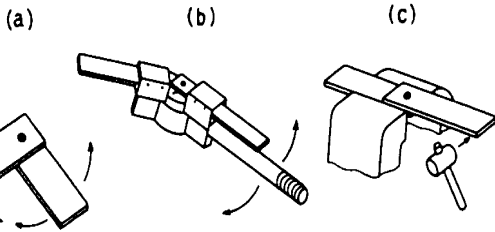


図14 ねじり試験法 (JIS Z 3144)

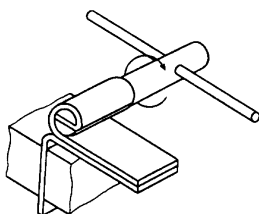


図15 ピール試験法 (JIS Z 3144)

3.3 疲労試験

疲労試験も引張試験と同様に、溶接部（ナゲット）にせん断負荷がかかる場合とほく離負荷がかかる場合に対応した試験法がJISで規定されている。

3.4 溶接部品質評価法

薄鋼板の溶接部は、厚鋼板のそれに比べて、低荷重で破断するため種々の簡便な評価法がJISに規定されている。図14は、ねじり試験法 (JIS Z 3144) である。溶接部（ナゲット）にねじり荷重を負荷して破断させる方法であり、破断面からナゲット径が評価でき、継手品質の良否が判定できる。

図15は、ピール試験法 (JIS Z 3144) である。この試験

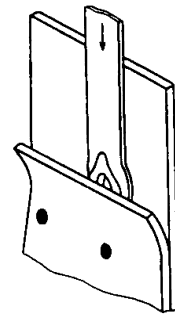


図16 たがね試験法 (JIS Z 3144)

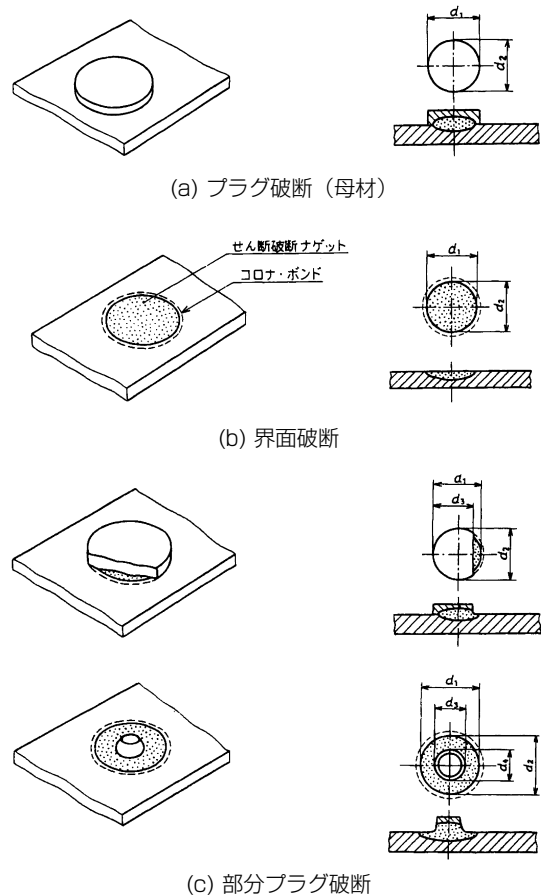


図17 各種試験法におけるナゲットの破断形態と破断径 (JIS Z 3137)

法は、二枚重ねて溶接された溶接部の片側の鋼板を固定して、もう一方の鋼板をローラ治具などを用いてナゲットを引き剥がす方法である。図16は、たがね試験法（JIS Z 3144）である。この試験法は、くさび型の治具を一定量挿入して、破断の有無あるいは破断形態で品質を評価する方法である。

図17は、各種試験法によって破断したナゲットの破断形態と破断径の定義を示す。破断形態には、破断がナゲット内に入らず母材部で破断した場合を「プラグ破断」、破断がナゲット界面部で発生した場合を「界面破断」、ならびに破断の初期段階にナゲット内部に入りその後、母材部に移行した場合を「部分プラグ破断」と定義している。

## 4. おわりに

本稿は、「材料と溶接部の試験法」という標題で、主に鉄鋼材料を対象とした溶接部の試験・検査法について概説した。

本稿で掲載した試験・検査法は、全てJISで規定されており、詳細は「JISハンドブック 溶接。(基本)」を参照して頂きたい。

## 参考文献

JISハンドブック 2008 (40-1) 溶接。(基礎), 日本規格協会.