

5. 鋼床版溶接部の疲労強度

(1) 一定振幅荷重下における疲労強度

1) 溶接継手の疲労強度

部材の疲労強度は、一般に $S-N$ 線図により整理される。 $S-N$ 線図とは縦軸に部材が受ける応力振幅をとり、横軸に疲労亀裂の発生あるいは破壊に至るまでの寿命をとり対数紙上で表現したものである。

これまで関係機関において、鋼構造物に用いられる各種溶接継手部の、主として一定振幅荷重下での疲労強度が検討されている。これらの疲労試験結果をもとに各種溶接継手の疲労強度に関するデータベースも作成されており、疲労強度の統計的性質等も調べられている。これらのデータは、設計で考慮される応力範囲とその繰返し回数に対し、継手の照査を行うための $S-N$ 線（ここでは設計 $S-N$ 線と呼ぶ）を設定する際に利用される。設計 $S-N$ 線は、一般に多数の試験結果の下限値に対応する値に基づいて決められることが多い。

日本では昭和 49 年に、一般の鋼構造物を対象として『日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説(案)』（日本鋼構造協会（JSSC, Vol. 10, No. 101, 1974. 5））が作成された。同指針案は軟鋼を中心に整理

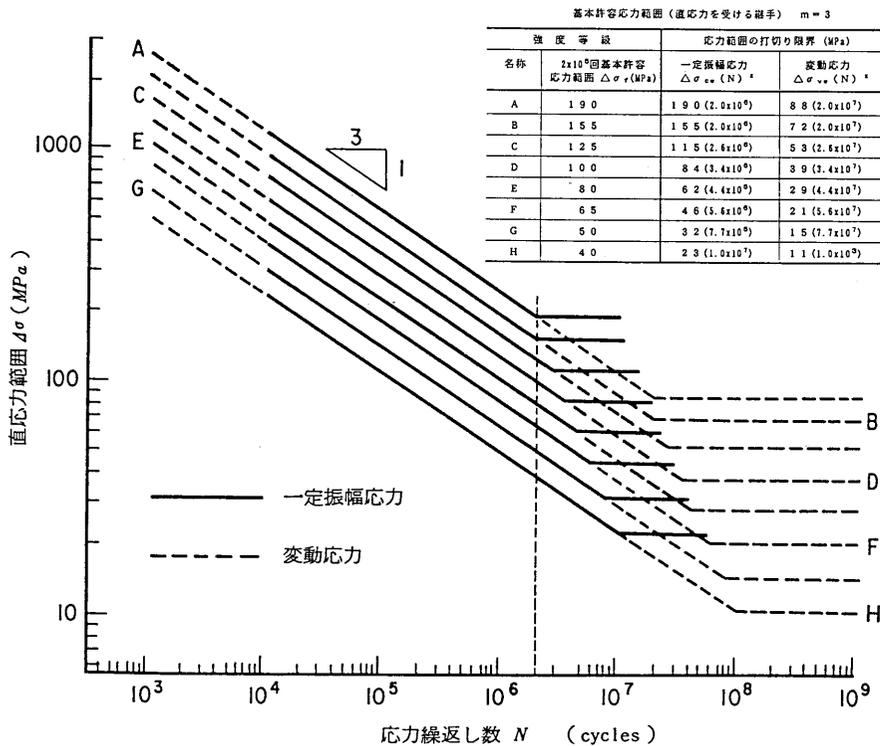


図 5-1 疲労設計曲線（直応力を受ける継手）¹⁾

したものであり、対象とする継手に疲労亀裂が発生しないことを設計の前提条件としている。すなわち疲労破壊を表わす $S-N_f$ 線における 200 万回疲労強度 (95%信頼下限界値) が疲労亀裂の発生に対する $S-N_c$ 線の 100 万回疲労強度と等しく、 $S-N_c$ 線の傾きが 0.18 であると考え、疲労亀裂発生に対する疲労強度を疲労を照査する場合の基本強度として与えていた。その後も数多く疲労試験が行われ、本州四国連絡橋に代表される長大橋を中心とした高張力鋼の採用に伴い高張力鋼の疲労強度についても検討されてきた。また、このような疲労試験データの妥当性を検証し試験データを補足する観点から、疲労亀裂の進展速度と亀裂先端の力学的パラメータ (応力拡大係数範囲等) との関係式を用いて疲労寿命の数値解析も行われ疲労の研究も進歩してきた。こうした状況をふまえ、同指針(案)は平成元年 11 月に改訂され『疲労設計指針(案)』¹⁾が作成された。同指針(案)では、疲労が問題となる溶接継手については発生寿命でなく、進展寿命が支配的であることから、疲労限界状態を亀裂が成長して構造物の強度あるいは機能が損なわれる状態としている。同指針(案)では、図 5-1 に示すように 8 種類

表 5-1 継手の強度等級分類¹⁾

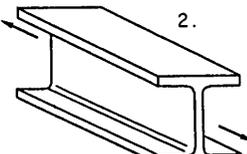
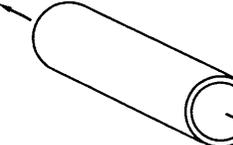
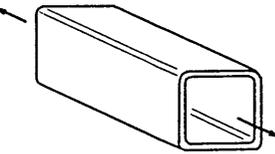
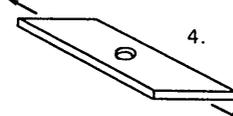
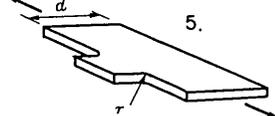
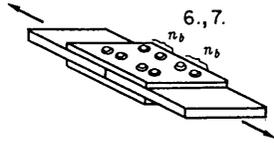
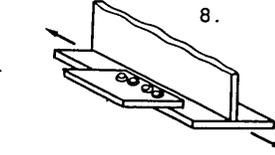
継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備	考
1. 帯板	(1) 表面および端面、機械仕上げ (あかさ 50s 以下)	A (190)		
	(2) 黒皮付き、ガス切断縁(あかさ 100s 以下)	B (155)		
	(3) 黒皮付き、ガス切断縁(著しい条痕は除去)	C (125)		
2. 形鋼	(1) 黒皮付き	B (155)		
	(2) 黒皮付き、ガス切断縁(あかさ 100s 以下)	B (155)		
	(3) 黒皮付き、ガス切断縁(著しい条痕は除去)	C (125)		
3. シームレス管		B (155)		
4. 円孔を有する母材 (純断面応力, 実断面応力)		C (125)		
5. フィレット付きの切り抜きガセットを有する母材	(1) $1/5 \leq r/d$ 切断面のあかさ 50s 以下	B (155)		
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$ 切断面のあかさ 50s 以下	C (125)		
	(3) $1/5 \leq r/d$ 切断面のあかさ 100s 以下	C (125)		
	(4) $1/10 \leq r/d < 1/5$ 切断面のあかさ 100s 以下	D (100)		
6. 高力ボルト摩擦接合継手の母材 (総断面応力)	$1 \leq n_b \leq 4$	B (155)	n_b : 応力方向のボルト本数	※ (4., 6., 7., 8.) 孔を押し抜きせん断で加工した場合には強度等級を 1 ランク下げる。
	$5 \leq n_b \leq 15$	C (125)		
	$16 \leq n_b$	D (100)		
7. 高力ボルト支圧接合継手の母材 ($n_b \leq 4$, 純断面応力)		B (155)		
8. 検算対象方向の応力を伝えない高力ボルト締め孔を有する母材 (純断面応力)		B (155)		

表 5-1 継手の強度等級分類 (つづき)

(b) 横突合わせ溶接継手

継手の種類		強度等級 ($d\sigma_f$)	備 考
1. 余盛り削除した継手		B (155)	<p>※ 完全溶け込み溶接で、溶接部が健全であることを前提とする。 ※ 継手部にテーパが付く場合には、その勾配を1/5以下とする。 ※ 深さ0.5mm以上のアンダーカットは除去する。 ※ (1., 2.) 仕上げはアンダーカットが残らないように行なう。仕上げの方向は応力の方向と平行とする。</p>
2. 止端仕上げした継手		C (125)	
3. 非仕上げ継手	(1) 両面溶接	D (100)	
	(2) 良好な形状の裏波を有する片面溶接	D (100)	
	(3) 裏当て金付き片面溶接	F (65)	
	(4) 裏面の形状を確かめることのできない片面溶接	F (65)	

(c) 縦方向溶接継手

継手の種類		強度等級 ($d\sigma_f$)	備 考
1. 完全溶け込み溶接継手 (溶接部が健全であることを前提とする)	(1) 余盛り削除	B (155)	<p>※ (1.(2), 2., 3.) 棒継ぎにより生じたピード表面の著しい凹凸は除去する。 ※ (2., 3.) 内在する欠陥の幅が1.5mm、高さが4mmを超えないことが確かめられた場合には、強度等級をCとすることができる。</p>
	(2) 非仕上げ	C (125)	
2. 部分溶け込み溶接継手		D (100)	
3. すみ肉溶接継手		D (100)	
4. 裏当て金付き溶接継手		E (80)	
5. 断続する溶接継手		E (80)	
6. スカーラップを含む溶接継手		F (65)	
7. 切り抜きガセットのフィレット部に接する溶接	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$	E (80)	

表5-1 継手の強度等級分類 (つづき)

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備 考	
荷重非伝達型	1. 滑らかな止端を有するすみ肉溶接継手	D (100)		
	2. 止端仕上げたすみ肉溶接継手	D (100)		
	3. 非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)		
	4. 溶接の始終点を含むすみ肉溶接継手	E (80)		
	5. 中空断面部材をすみ肉溶接した継手	$d_o \leq 100\text{mm}$ F (65) $d_o > 100\text{mm}$ G (50)		
荷重伝達型	6. 止端破壊	(1) 滑らかな止端を有する継手	D (100)	
		(2) 止端仕上げた継手	D (100)	
		(3) 非仕上げの継手	E (80)	
		(4) 溶接の始終点を含む継手	E (80)	
	7. ルート破壊 (のど断面での平均せん断応力)	S (80)		
	8. 中空断面部材を中板を介して片側から開先溶接した完全溶け込み溶接継手	F (65)	※ (2, 6(2)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行なう。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。 ※ (3, 4, 5, 6(3), 6(4), 8.) 深さ 0.5mm 以上のアンダーカットは除去する。	
	9. 中空断面部材を中板を介してすみ肉溶接で接合した継手	(1) 止端破壊		H (40)
		(2) ルート破壊 (のど断面での平均せん断応力)		S (80)
	(e) ガセット溶接継手 (付加板を溶接した継手を含む)			
継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備 考	
面外ガセット	1. 付加板をすみ肉溶接した継手 ($l \leq 100\text{mm}$)	(1) 止端仕上げ	E (80)	
		(2) 非仕上げ	F (65)	
	2. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	F (65)		
面内ガセット	3. ガセットをすみ肉溶接した継手	G (50)		
	4. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	(1) $1/3 \leq r/d$		D (100)
		(2) $1/5 \leq r/d < 1/3$		E (80)
		(3) $1/10 \leq r/d < 1/5$		F (65)
	5. ガセットを開先溶接した継手	(1) 止端仕上げ		G (50)
		(2) 非仕上げ		H (40)
6. 重ねガセット継手の母材		H (40)	※ (1(1), 2, 4, 5(1)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行なう。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。 ※ (1(2), 3, 5(2), 6.) 深さ 0.5mm 以上のアンダーカットは除去する。	

表 5-1 継手の強度等級分類 (つづき)

(f) その他の溶接継手			備 考	
継手の種類	強度等級 ($\Delta\sigma_f$)			
1. あて板をすみ肉溶接で取り付けた継手 ($l \leq 300$ mm)	(1) 止端仕上げ	E (80)		$S_h \geq 0.8 t_c$ $S_b \geq 2.5 S_h$
	(2) 非仕上げ	F (65)		
2. カバープレートをしみ肉溶接で取り付けた継手	(1) 溶接部仕上げ	D (100)		
	(2) 非仕上げ	H (40)		
3. スタッドを溶接した継手	(1) 主板断面	E (80)		
	(2) スタッド断面	S (80)		
4. 重ね継手	(1) 主板断面	H (40)		
	(2) 添接板断面	H (40)		
	(3) 前面すみ肉溶接のど断面	S (80)		
	(4) 側面すみ肉溶接のど断面	S (80)		

※ (1.(1), 2.(1)) 仕上げはアンダーカットが残らないように行なう。グラインダーで仕上げる場合には仕上げの方向を応力の方向と平行とする。
 ※ (1.(2), 2.(2)) 深さ 0.5 mm 以上のアンダーカットは除去する。

の設計 S-N 線を定めている。8 種類の等級の設計 S-N 線はそれぞれ対数紙上で平行であり、各等級はほぼ等間隔に設定されている。一定振幅応力下では、疲労強度の低い継手ほど疲労限に至る寿命が長くなることから、これを設計 S-N 線に反映させて疲労限の生じる応力繰返し数を大きくしている。表 5-1 に各種継手の等級分類を示す。各種継手の等級はそれぞれの継手の疲労試験結果の下限(あるいはそれに相当する非超過確率 97.7%の疲労強度)とこれらの設計 S-N 線との対比により定めている。なお同指針(案)では鋼材の静的強度の違いによる継手等級分類は行っていない。これは疲労試験結果において差が見られないことおよび疲労亀裂進展速度が鋼材の静的強度の影響を受けないことを考慮したことよるとしている。

鋼床版に用いられる主な継手について継手の種類と主たる応力の作用方向によって分類すると表 5-2 のようになる。また、表 5-3 に鋼床版に用いられる継手の 200 万回疲労強度を、図 5-2 にそれ

表 5-2 鋼床版に用いられる継手の等級

溶接部	応力方向	継手の等級
縦リブと横リブの溶接部	縦リブ方向	E (非仕上げ)
デッキプレートと縦リブのすみ肉溶接部	縦リブ方向	D
	縦リブ直角方向	E (非仕上げ)
デッキプレートと横リブのすみ肉溶接部	縦リブ方向	E (非仕上げ)
	縦リブ直角方向	D
縦リブの突合せ溶接部	縦リブ方向	E (裏当て金付き)
デッキプレートの突合せ溶接部	溶接線と直角方向	D (非仕上げ)
	溶接線と同方向	C (非仕上げ)

表 5-3 各継手の 2×10^6 回疲労強度 (MPa)¹⁾
(横突合わせ溶接継手)

継手の種類、継手番号	データ数			基本許容応力範囲
	非超過確率 50%	非超過確率 97.7%		
横突合わせ溶接継手				
非仕上げ継手(両面溶接)	886	166	122	100
非仕上げ継手(裏当て金付き)	65	139	88	65
縦方向溶接継手				
完全溶け込み溶接(非仕上げ)	150	235	164	125
すみ肉溶接(桁)	97	164	108	100, 125
十字溶接継手				
荷重非伝達型(非仕上げ)	341	126	82	80

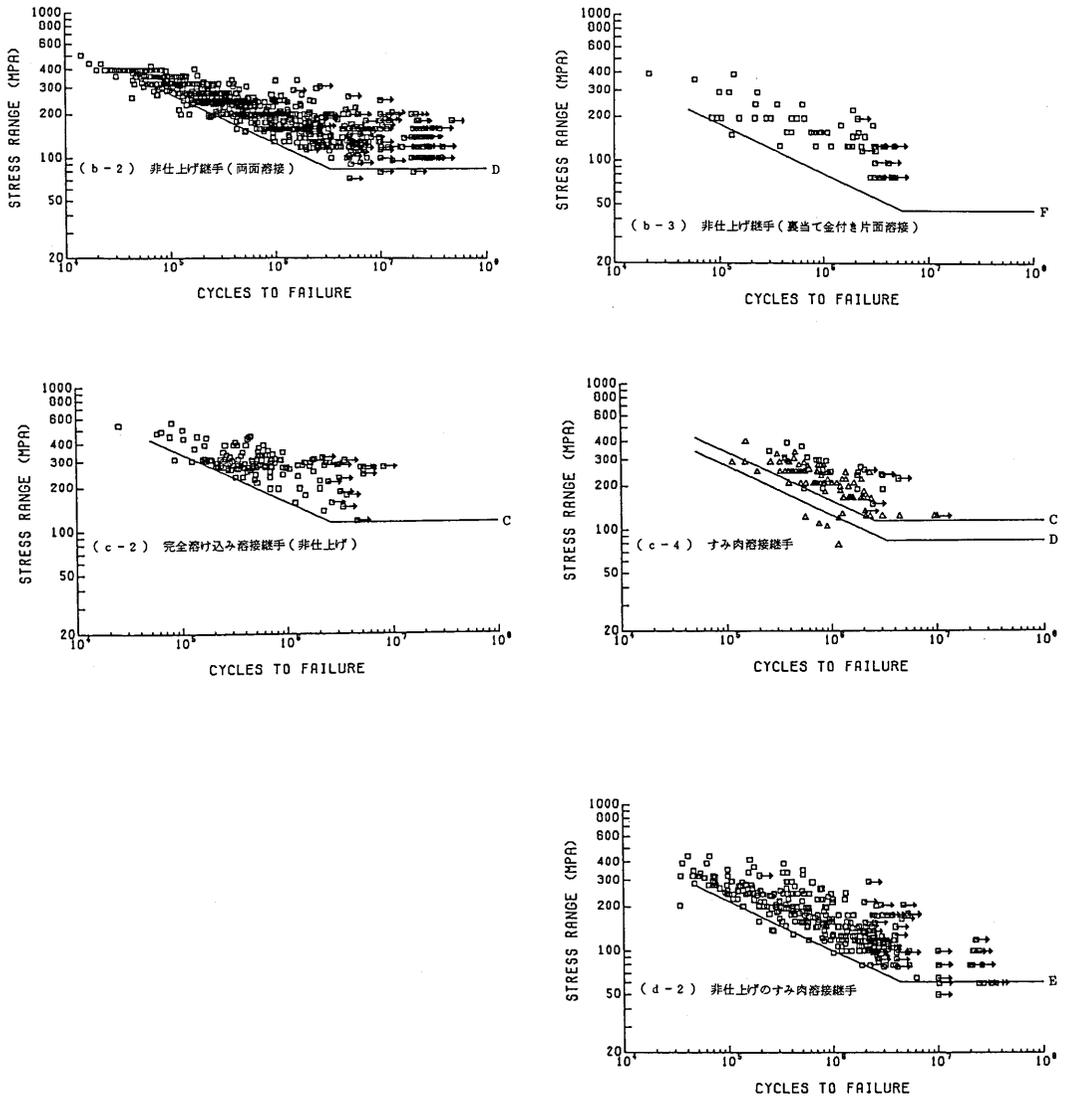


図5-2 鋼床版に用いられる継手の疲労試験結果と設計 S-N 線¹⁾

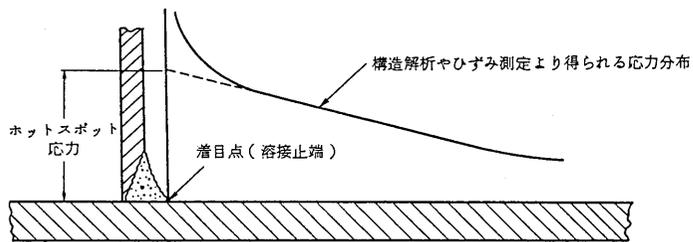


図5-3 ホットスポット応力の定義¹⁾

らの疲労試験結果と設計 S-N 線を示す。裏当て金付きの横突合せ溶接継手については、トラフリブの現場溶接継手として疲労強度^{2)~5)}の検討が行われているが、試験方法によっては裏当て金が付くことにより偏心の影響が生じるので試験結果を整理する際には注意が必要である。

複雑な細部構造の継手については、疲労設計指針(案)¹⁾では公称応力の代わりにホットスポット応力を用いて整理することが示されている。ホットスポット応力は、溶接による局所的な応力集中を含まず、構造的な応力の乱れを考慮した、着目部（溶接止端部）での応力として定義される。具体的には、図 5-3 に示すように着目部への応力の外挿値として求められる。ホットスポット応力を用いた場合の設計 S-N 線を荷重非伝達型の十字継手の等級に相当するものを用いている。これは、ホットスポット応力が接合部の構造による応力の増減の影響を考慮し、溶接ビード形状による応力集中は考慮していないことによる。図 5-4 にホットスポット応力に対する設計 S-N 線を示す。

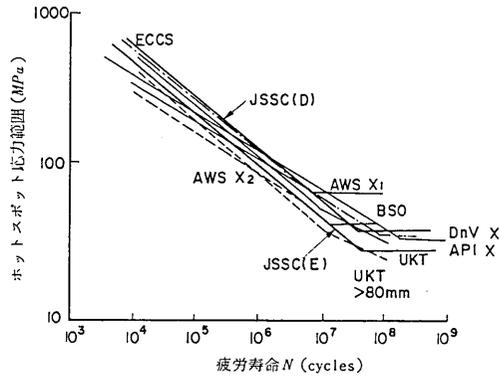


図 5-4 疲労設計曲線（ホットスポット応力）¹⁾

2) 鋼床版の細部構造の疲労強度

疲労を考慮する際に設計時に計算される一次応力が支配的な部材については、作用応力とその繰返し回数が把握できれば、1)で述べた溶接継手の疲労強度をあてはめることにより疲労の照査を行うことも可能である。しかしながら、設計時には考慮されない二次的な応力が支配的な部材については応力状態が複雑なことが多く、作用応力に基づき疲労の照査を行うことは難しくなる。むしろ細部構造の疲労に関しては、疲労損傷が生じないようなディテールの検討が重要と考えられる。近年報告されている疲労損傷のほとんどは、細部構造に発生しており、このような状況を反映して、損傷原因の究明のための細部構造の応力解析および細部構造をモデル化した供試体による疲労試験等が増えてきている。以下に鋼床版の細部構造を対象とした疲労強度の検討例を紹介する。

i) 縦リブとデッキプレートの溶接部

亀井らは、トラフ形式鋼床版の橋軸直方向曲げ応力の特性の検討、およびこれに伴うトラフリブすみ肉溶接止端部の疲労損傷の試算を試みている⁶⁾。

海外の例では、英国の TRRL のレポートにおいて数多く報告されている^{7)~15)}。TRRL のレポート 96 UC では、「鋼床版のように応力勾配をもつ薄板の構造に、引張応力作用下での溶接継手の疲労試験

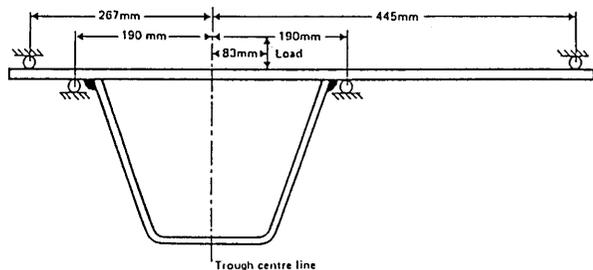


図 5-5 供試体の形状・寸法¹⁴⁾

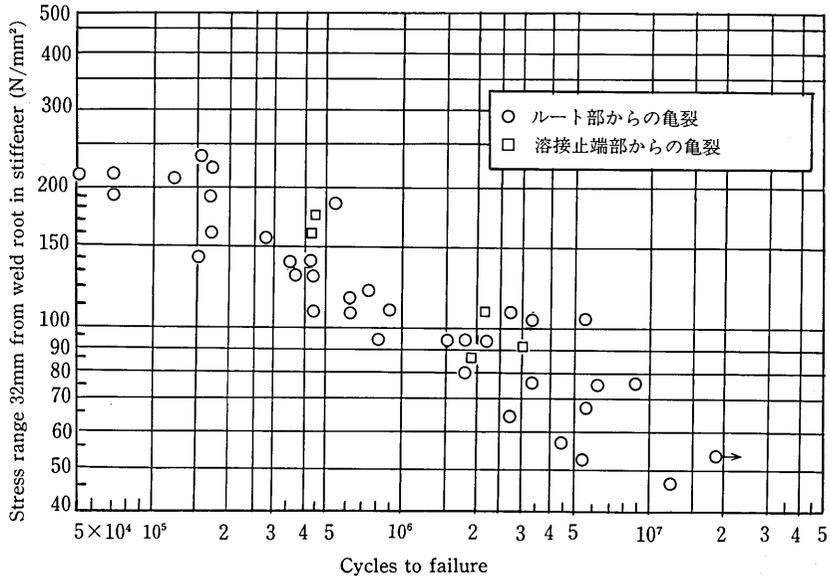


図5-6 疲労試験結果 (縦リブとデッキプレートの溶接部)^{7)~15)}

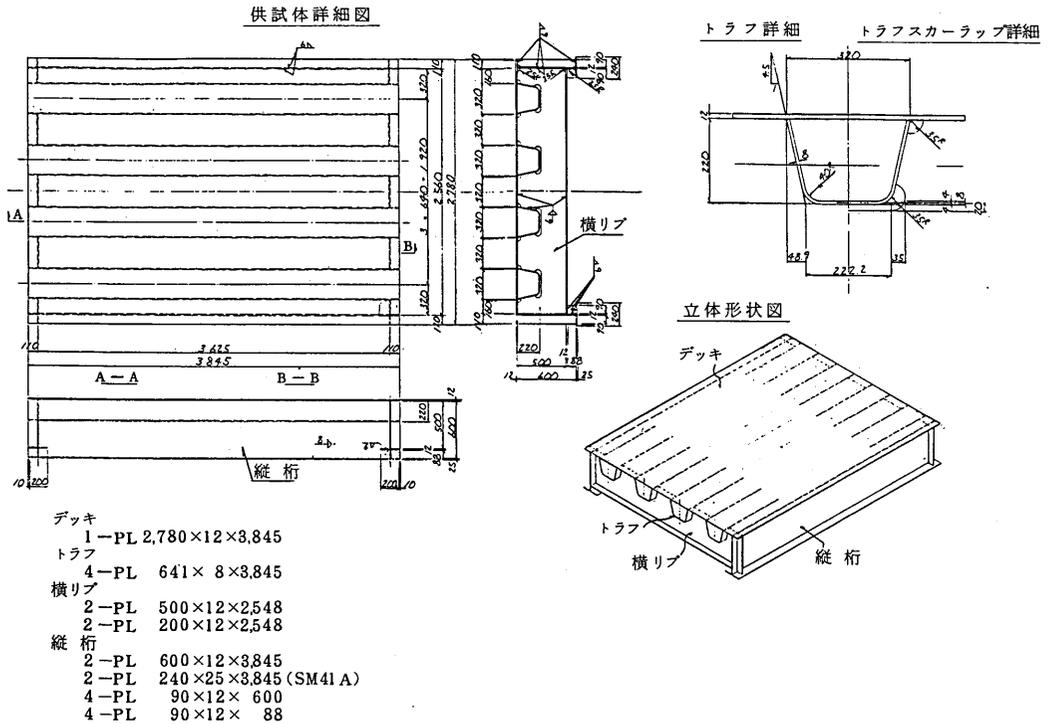


図5-7 鋼床版模型の形状・寸法¹⁶⁾

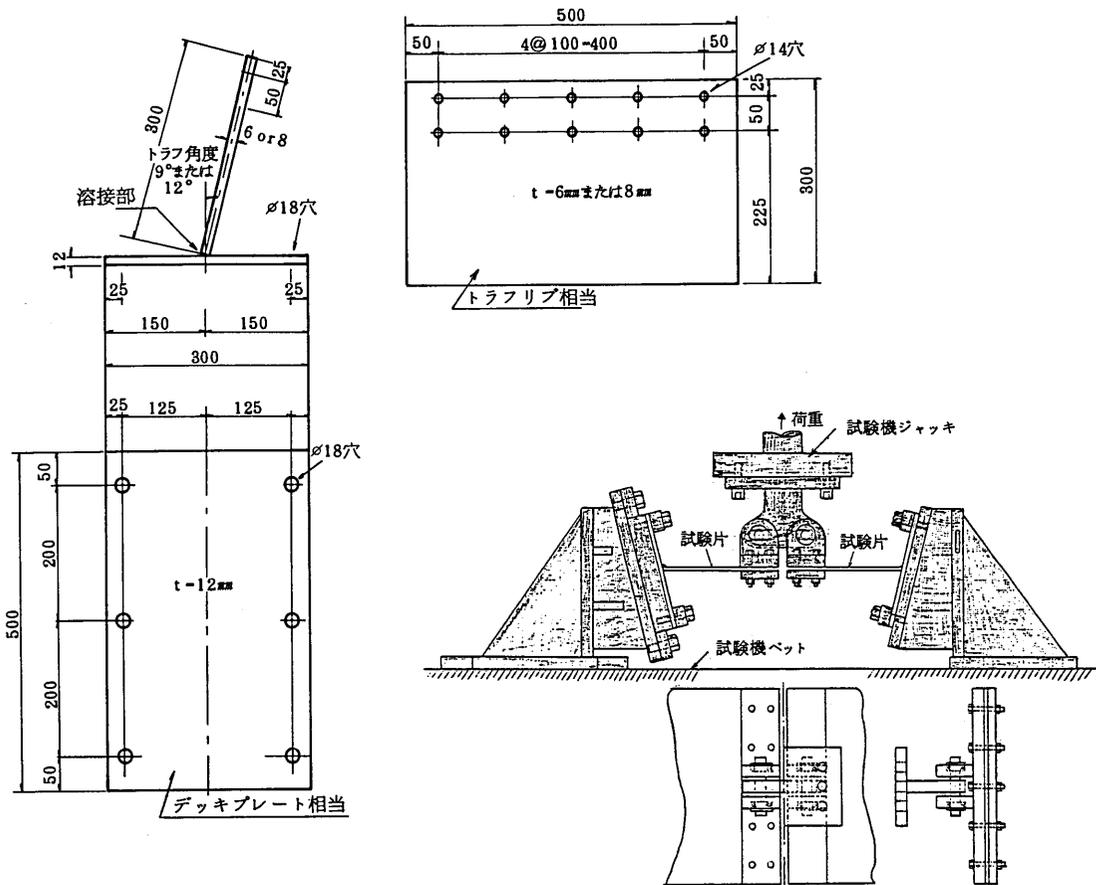


図 5-8 局部試験片と載荷装置¹⁶⁾

結果を用いるのは根拠があるように思えない」として、輪荷重による横断方向の曲げを受ける場合の鋼床版と U リブの疲労挙動について検討を行っている。供試体の一例を図 5-5 に示す。U リブを輪切りにした形状をしており、溶接は片面すみ肉溶接としている。また、デッキプレートの厚さは 11 mm である。疲労試験は、デッキプレートと U リブとの溶接部分に高い曲げ圧縮応力が作用するように荷重を載荷して行っている。大部分の試験体では、疲労亀裂はルート部から発生し、のど厚に沿って進展し溶接部の破断に至っている。図 5-6 は試験結果をまとめたものである。TRRL のレポート 84 UC においては、横桁と縦リブの曲げに対する溶接部の疲労挙動についても、突合せ溶接、片面すみ肉溶接及び両面すみ肉溶接に対して行っており、他の論文との比較を行っている。亀裂は、ルート部か溶接止端部から発生しているが疲労強度上両者で違いはほとんどみられないとしている。

牛尾らはトラフリブとデッキプレートの接合部の溶接法と疲労強度に関する試験を行っている¹⁶⁾。図 5-7 に示す供試体の静的載荷試験と有限帯板法による解析を比較し、解析により応力、変形状態を精度よく把握できることを報告している。疲労試験により、基本輪荷重 (T-20 後輪荷重 8 t) に対応する荷重強度では 200 万回までの繰り返しに対して疲労強度上十分に安全であるが、基本輪荷重の 2 倍程度の荷重が作用すると、ルート部の不溶着を起点として溶接線方向に広がりながらビート表面に

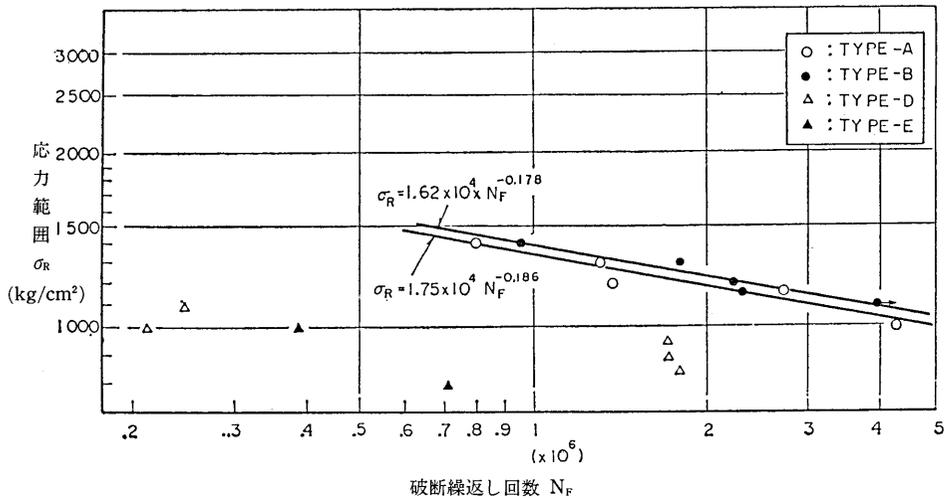


図 5-12 疲労試験結果¹⁷⁾

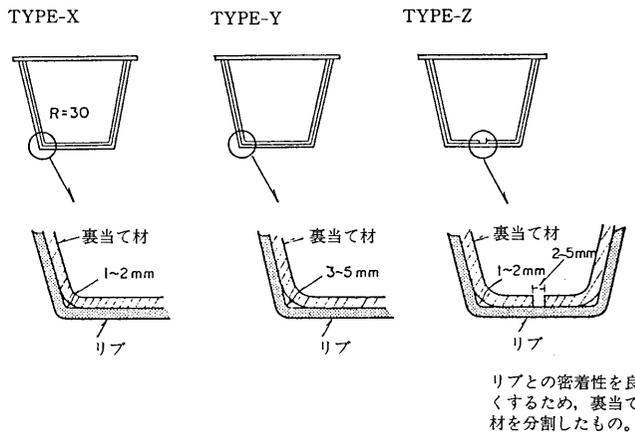


図 5-13 継手の種類¹⁷⁾

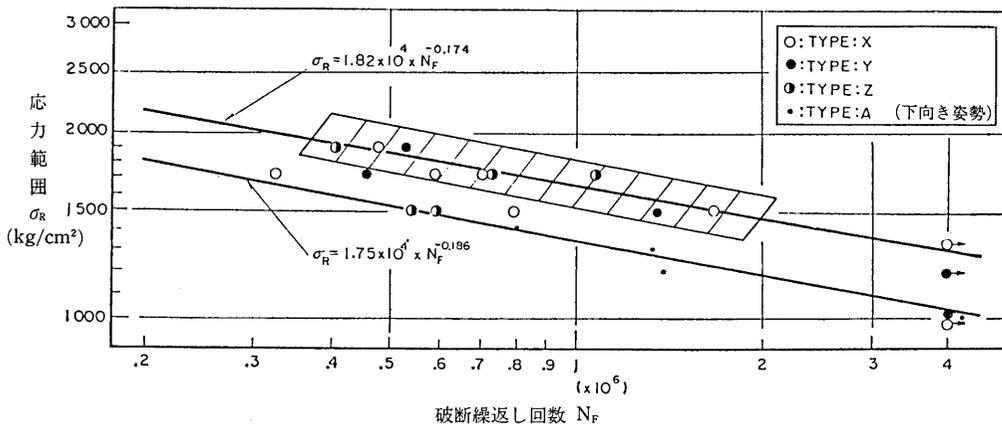


図 5-14 疲労試験結果¹⁷⁾

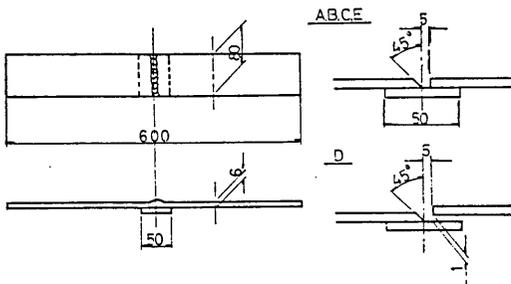
重に対してはのど厚が5 mm以上確保されていれば疲労破壊の懸念がないと報告している。

ii) トラフリブの現場溶接部

トラフリブの現場溶接継手については、継手形式や現場施工条件の影響を調べるために、疲労試験が行われている¹⁷⁾。荷重の載荷方法は、図5-10に示すように両端単純支持で2点載荷としている。まず図5-11に示す4タイプの継手形式について疲労試験を行っている。疲労試験結果を図5-12に示すが、リブと同板厚の鋼板を裏当て材として用いた突き合せ溶接継手 (type A) あるいは厚めのダイアフラムを挿入し裏あて材として用いた突き合せ溶接継手 (type B) が疲労強度上有利であるとの結果が得られている。また、type A の継手について施工が上向きになるように供試体をセットし、図5-13に示すようにトラフリブのR部の裏当て金のすき間に着目して疲労強度の検討を行っている。図5-14に疲労試験結果を示すが、試験の範囲 (1 ~ 5 mm) のすき間は疲労強度を低下させる要因にならないとの結果が得られている。

近藤、山田らは、疲労強度低下要因を有する引張疲労試験を行うと同時に、目違いとルート間隔に着目して実物大トラフリブ曲げ疲労試験を実施している¹⁸⁾¹⁹⁾。図5-15に示す条件で溶接施工した供試体から切り出した引張試験においては、亀裂がルート部から発生することから、内部欠陥は疲労強度にはほとんど影響を及ぼさず、1 mm 程度の目違いを設けて上向き溶接した場合の疲労強度が最も低いとしている (図5-16)。また、図5-17に示す供試体の実物大曲げ疲労試験では、ルート間隔を0 mm とすると不溶着部を生じ、200 万回疲労強度は不溶着部がない場合に比べて45%程度低下するとしている (図5-18)。そして、現行設計基準による疲労強度の照査を行い、許容応力度を満足するには、十分なルート間隔を保つことが必要であり、綿密な施工管理と溶接工の訓練を十分に行って、不溶着部を生じないような溶接を行わなければならないとしている。

菊池らはトラフリブの現場溶接に関する実物大の供試体を用いた疲労試験を行っている²⁰⁾。裏当て



Specimens	Characteristic
A	Specimens cut out from the side of full scale trough rib (Welded in vertical position)
B	Specimens cut out from the bottom of full scale trough rib (Welded in overhead position)
C	Control specimens welded in flat position
D	Specimens with out-of-straitness welded in overhead position. Rusted backing strip is used.
E	Specimens welded in overhead position with stop and re-start weld at the middle

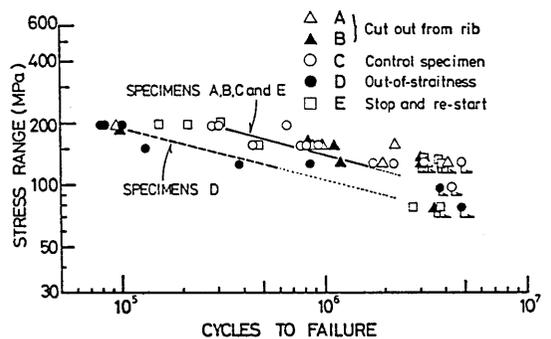


図5-16 疲労試験結果¹⁹⁾

図5-15 供試体の寸法・形状と溶接条件¹⁹⁾

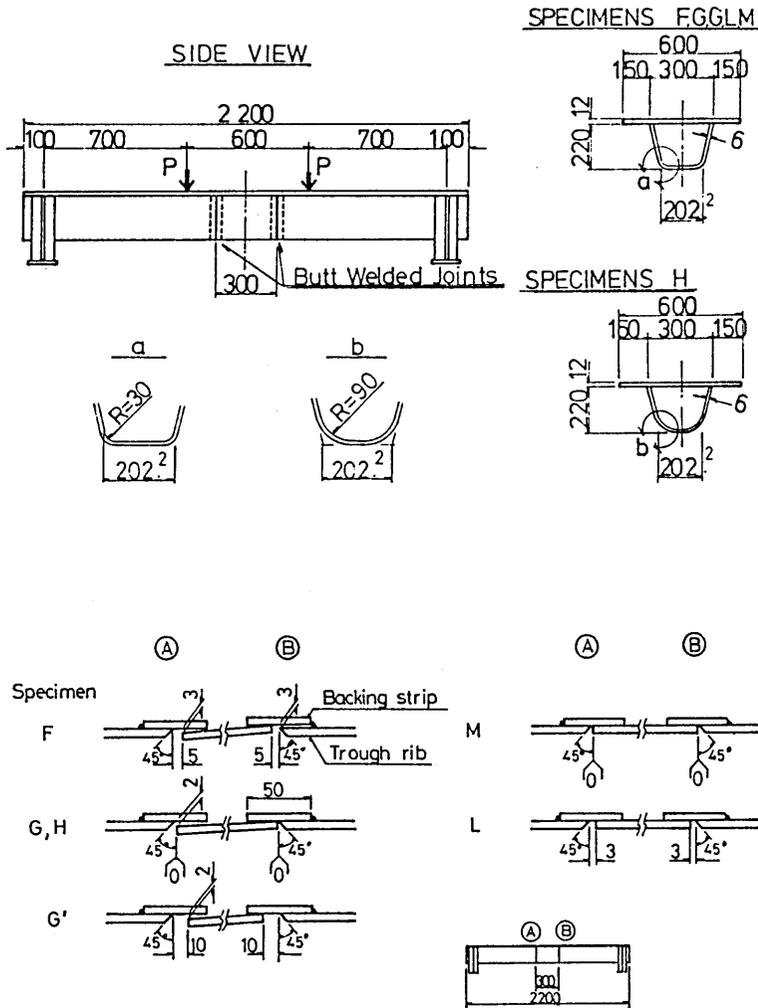


図5-17 供試体の寸法・形状と溶接条件¹⁹⁾

付き溶接（上向き）において、ルートギャップ、目違い疲労強度に与える影響を調査したが、3 mmの目違いは有意差が見られず、ルートギャップも3 mm以上では差がない。しかし、ルートギャップが0 mmの場合は完全な溶け込みが得られず、現行の疲労許容応力度を下回る結果となっている。

iii) 横リブと縦リブの交差部

国広らは、交差部の構造を図5-19に示すように3種類に変えて疲労強度の検討を行っている²¹⁾。Aは一般的なタイプであり、Cはスカラップを一切なくしたものである。Bはこれらの中間的な構造である。図5-20に供試体形状、図5-21に亀裂発生位置、表5-4に試験結果を示す。A、Bタイプは応力レベルが高い位置で亀裂が発生しており、ほぼ同程度の疲労強度である。Cタイプでは亀裂が発生せず、A、Bタイプに比べてかなり疲労強度が高い。また、計算上の応力が高なくても、図5-22に示すような溶接止端部のくびれが大きい位置での応力集中も亀裂発生の一因となる。鋼床版の疲労強度

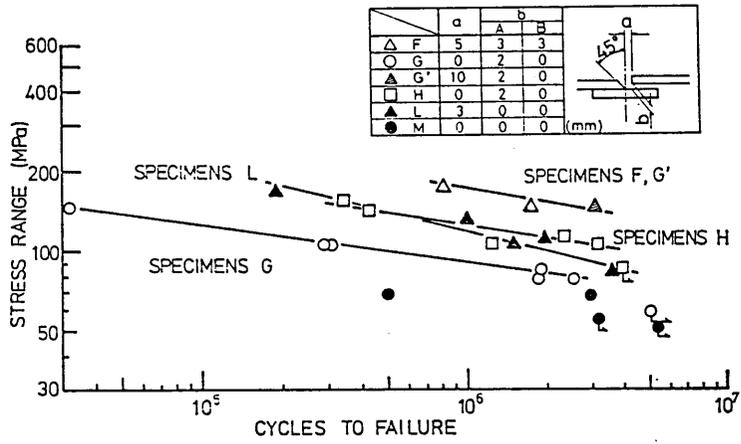


図 5-18 疲労試験結果¹⁹⁾

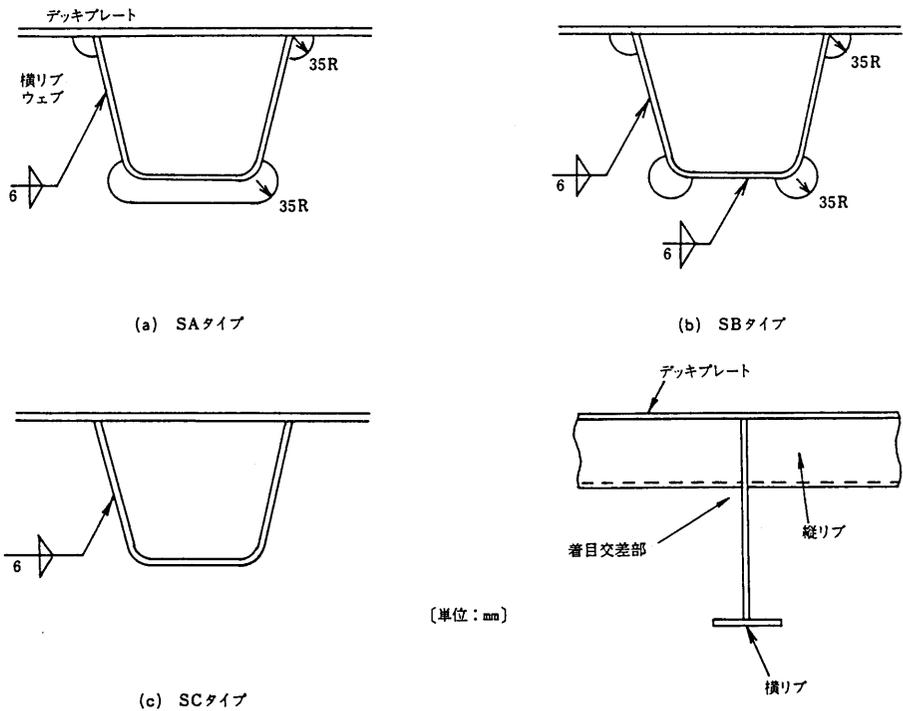
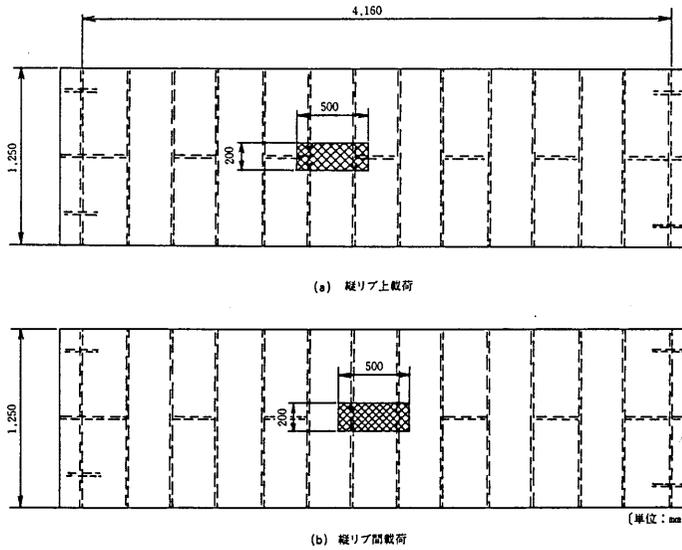


図 5-19 U形縦リブと横リブとの代表的な交差部構造²¹⁾

図 5-20 供試体の寸法・形状²¹⁾表 5-4 疲労試験結果²¹⁾

試験体	荷重条件		亀裂発生位置と亀裂発生繰返数	
	荷重 載荷位置	荷重範囲 ΔP [t]	位置番号	繰返数 N_c [cycle]
SA-1	縦リブ上	13.4	1	4.23×10^5
			2	7.7×10^5
			3	2.1×10^6
SA-2	縦リブ間	13.4	1	1.12×10^6
			2	1.71×10^6
SB-1	縦リブ上	13.4	1	1.1×10^6
			2	2.8×10^6
			3	同上
SB-2	縦リブ間	13.4	1	4.98×10^5
			2	1.3×10^6
			3	同上
SC-1	縦リブ上	13.4	無発生	$> 2.2 \times 10^6$
SC-2	縦リブ間	13.4	無発生	$> 2.49 \times 10^6$
		16.0	無発生	$> 2.01 \times 10^6$

※注 1: SC-2 は, $\Delta P=13.4t$ で 2.49×10^6 回繰返し載荷した後,
 $\Delta P=16.0t$ で 2.01×10^6 回繰返し載荷した。

※注 2: 亀裂の発生位置は図 5-21 参照。

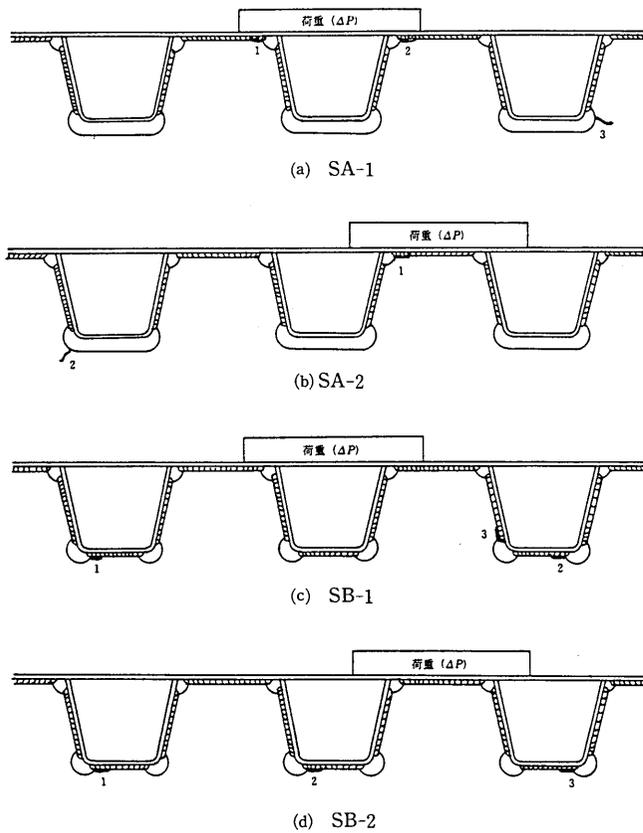


図5-21 疲労クラックの発生位置²¹⁾

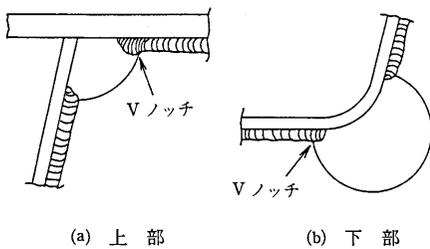


図5-22 回し溶接部のVノッチ²¹⁾

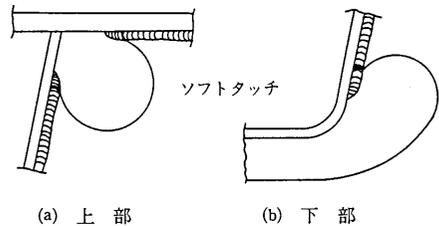


図5-23 回し溶接部の改善要領²¹⁾

は交差部のスカラップ回し溶接部の強度に支配され、疲労強度を高めるには、Cタイプの構造の採用、回し溶接止端部の仕上げとともに、図5-23に示すようなスカラップ形状の改善も考えられるとしている。

北原らも同種の切り欠き形状の検討を行っている²²⁾。図5-24に示す構造モデルの静的載荷試験およびFEMによる弾塑性解析を行い、表5-5の3種の切り欠き形状の応力および横リブウェブ高さの

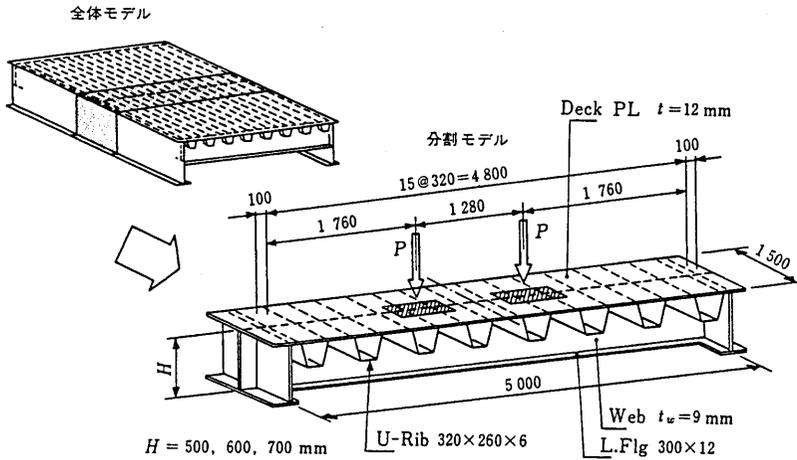


図 5-24 供試体の寸法・形状²²⁾

表 5-5 切欠き形状²²⁾

	切欠き構造図	切欠き詳細
A-type		
B-type		
C-type		

表 5-6 主応力比較²²⁾

		(単位 kgf/cm ²)	
A-type		Pt.1 2045 (100%)	Pt.2 -1968 (100%)
B-type		Pt.1 1480 (72%)	Pt.2 -1442 (73%)
C-type		Pt.1 1440 (70%)	Pt.2 -1389 (71%)

影響を調査している。切り欠き部の主応力は C タイプの改善したもの及び B タイプの本四公団基準の方が、通常の切り欠きに比べて 30% 程度改善されるとしている (表 5-6)。また、横リブウェブの応力伝達機構を明らかにするとともに、切り欠き部の応力の低減には横リブウェブ高さを縦リブ高さの 2 倍以上にすると良いとしている。

鋼床版の縦リブと横リブが交差する部分では、疲労への配慮から縦リブを貫通させる構造とするのが普通である。建設省土木研究所では、横リブと縦リブの交差部を再現した大型試験体を用いて横リブの面内力に着目して疲労試験を実施している²³⁾。図 5-25 に供試体形状を示すが、予め静的载荷試験により大きな応力が発生する位置を求めている。図 5-26 に試験結果を示すが、载荷位置に関係なく応力集中の大きいのはスリット部であり、腹板高さを増加させることにより応力はかなり軽減される。

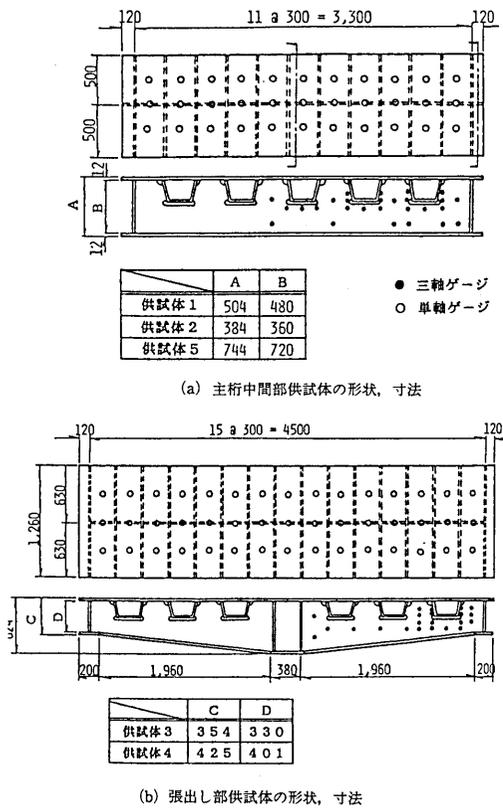


図 5-25 供試体の形状・寸法²³⁾

疲労試験はスリット R 部に最も大きな応力が生じる位置に輪荷重 8 t を想定している。クラック発生位置を図 5-27 に示すが、応力集中の大きなスリット R 部から発生したもの、縦リブとの溶接止端部から発生したもの、デッキプレートと縦リブとの溶接止端から発生した 3 種類が観察されている。

最近、曲線桁にもトラフリブが使用される例がある。この場合、トラフリブを加熱矯正により曲線加工するが、寸法誤差を吸収し、横リブウェブとの良好な密着度を得るために、パッチプレートを用いた変更スカラップを使用することがある。田中は、この変更スカラップについて数値解析を行うと共に部分供試体の疲労試験により、一般型との比較を行っている²⁴⁾。疲労試験では図 5-28 に示すように交差部に働く応力

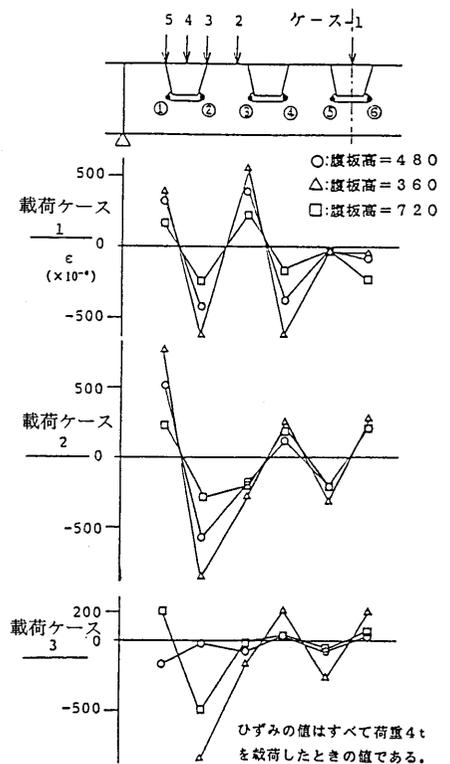


図 5-26 スリット R 部の応力度²³⁾

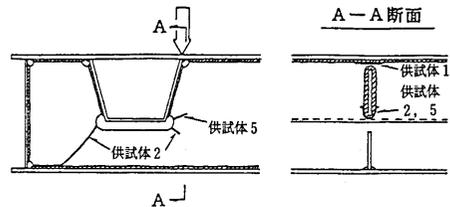


図 5-27 クラック発生図 (供試体 1, 2, 5)²³⁾

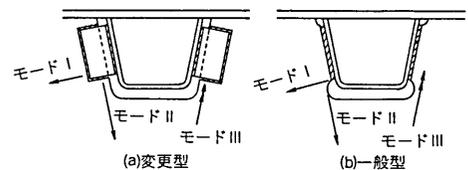
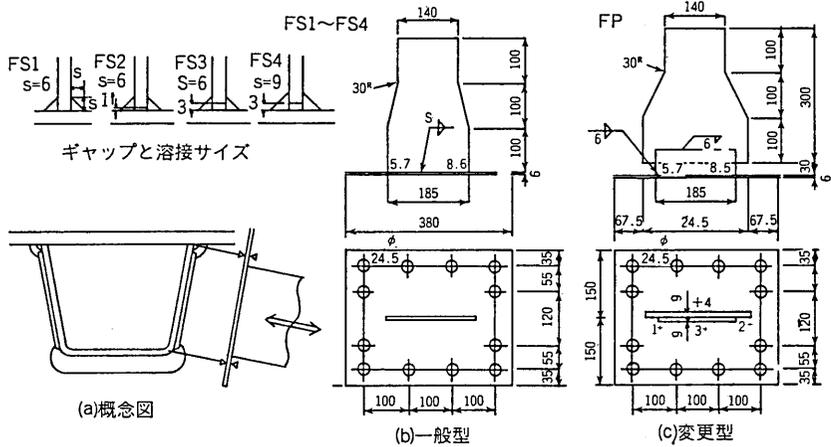
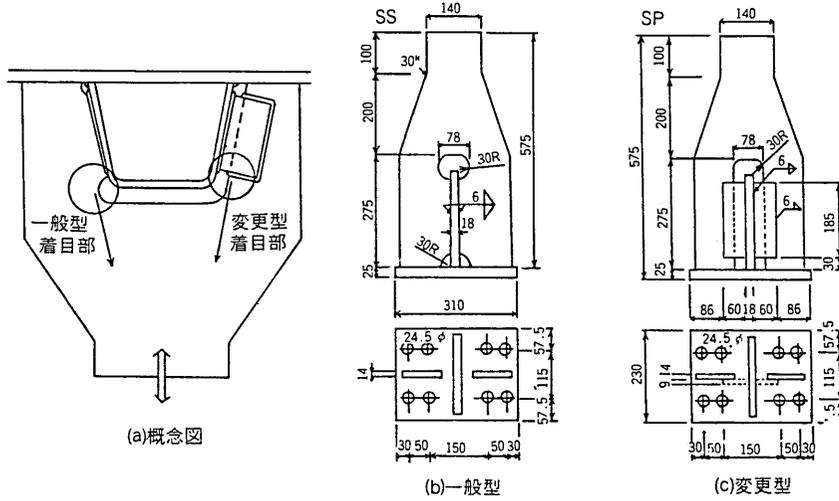


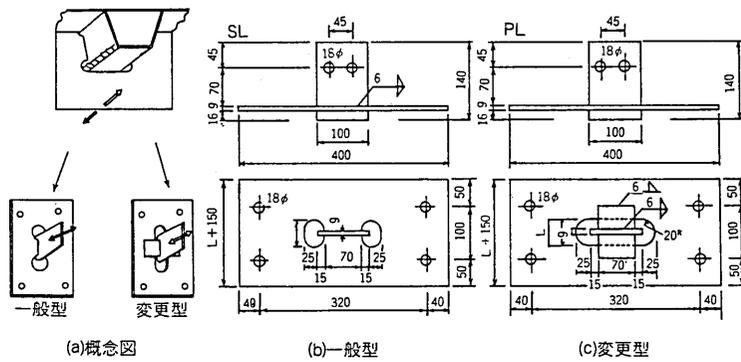
図 5-28 交差部に働く応力成分²⁴⁾



モード I 試験体



モード II 試験体



モード III 試験体

図 5-29 供試体の寸法・形状²⁴⁾

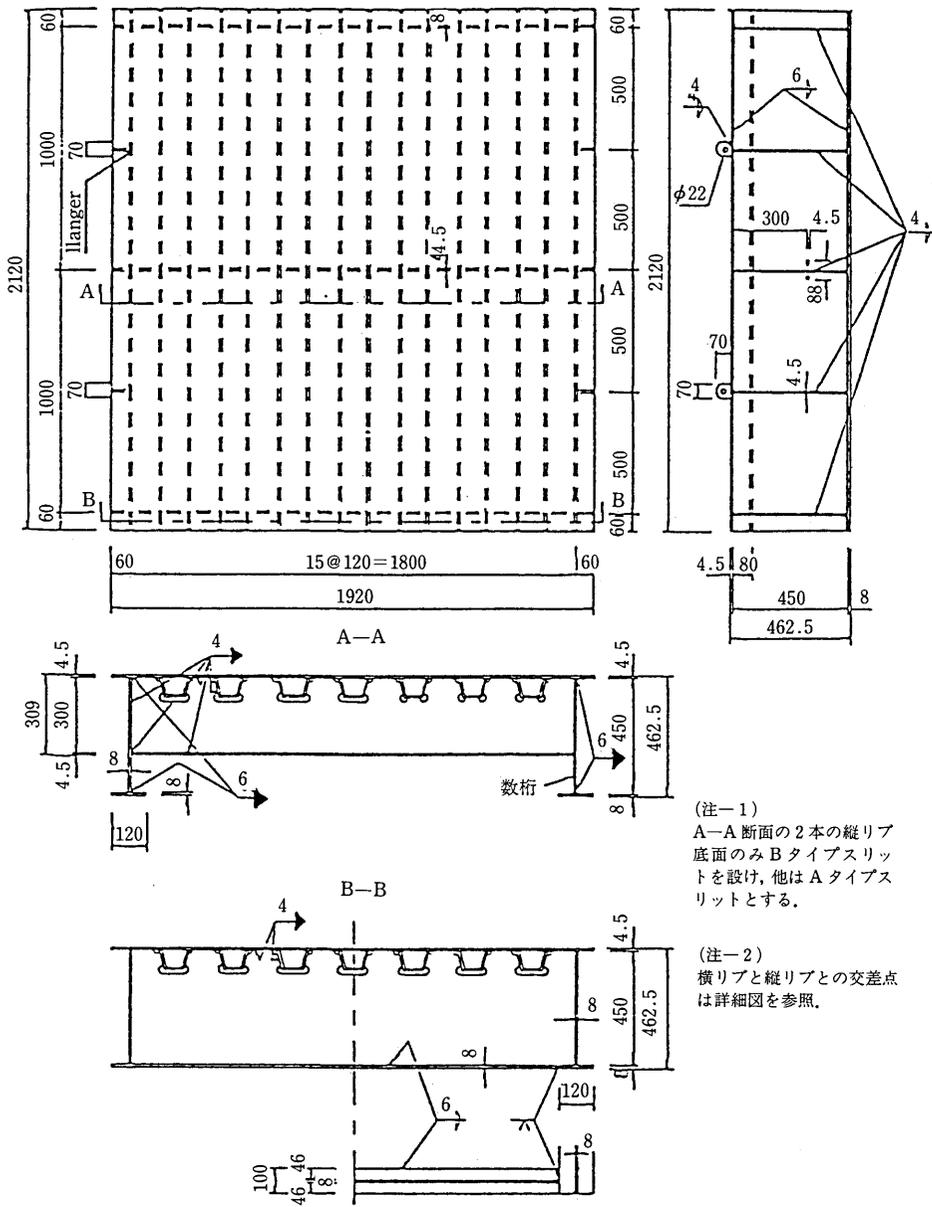
方向ごとにモデル化した供試体を用いている。図 5—29 に供試体形状を示す。試験の結果、変更型スカラップの疲労強度はモード I で一般型と有意差がなく、モード II で一般型の 55～60%、モード III の外力が変位制御で与えられるとすると一般型の 70%程度の疲労強度を有することが確認された。また、200 万回疲労強度と応力解析の結果より、モード I、モード III での発生応力は疲労強度の 1/3 程度、また、モード II で 1/2 程度となり、それぞれ単独で 200 万回疲労強度の許容値をこえないことがわかっている。

横リブと縦リブの交差部におけるスリット形状の違いによる横リブ断面の強度及び変形特性を静的載荷試験で確認した報告もある²⁵⁾。図 5—30 に供試体の寸法・形状、図 5—31 にスリット形状を示す。スリット近傍の応力集中は、B タイプスリットの方が A タイプスリットより少ない。また、縦リブ直下のせん断応力の大きさは、A タイプスリットを有する腹板と B タイプスリットを有する腹板とに大差はなく、B タイプスリットとすることの効果は応力集中やフィーレンデル作用を少なくすることや、座屈に対して有効であるとしている。

なお、開断面リブに関する試験としては、大村ら²⁶⁾、前田ら²⁷⁾の試験がある。大村らは図 5—32 に示す鋼床版模型を用いて、静的荷重を対象として弾塑性域におけるスリット周辺の応力、ひずみ状態及び鋼床版全体挙動を検討している。図 5—33 に代表的な載荷状態でのスリット周辺の応力分布を示すが、スリット自由縁における応力集中は横リブ下フランジ部や他の位置に比べて著しく大きいことを確認している。また、前田らは図 5—34 に示す開断面縦リブを有する鋼床版模型を用いて疲労試験を行い、繰り返し荷重下における鋼床版構造の弾性的な挙動を把握するとともに、供試体各部における疲労亀裂の発生および伝播モードの検討を行っている。

iv) 主桁ウェブ垂直補剛材とデッキプレートの溶接部

鈴木らは、主桁ウェブ補剛材上端部を対象として、局所の FEM 解析、実大供試体の静的載荷試験及び疲労試験を行っている²⁸⁾。図 5—35 に供試体の寸法形状を示す。表 5—7 に静的載荷試験結果(荷重 8 t 載荷幅 500×200 mm)を示すが、標準構造では縦リブ位置に載荷されたときにデッキプレート側止端部に大きな応力が発生している。また、疲労試験(荷重 11.2 t)により、図 5—36 に示すように疲労クラックの発生が報告されている。



(注-1)
A-A断面の2本の縦リブ
底面のみBタイプスリット
を設け、他はAタイプス
リットとする。

(注-2)
横リブと縦リブとの交差点
は詳細図を参照。

鋼床版供試体 No.1

図5-30 供試体の寸法・形状²⁵⁾

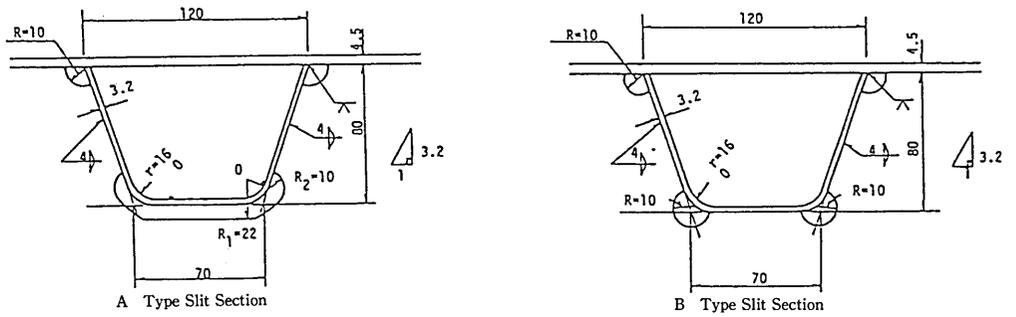


図 5-31 交差部の形状²⁵⁾

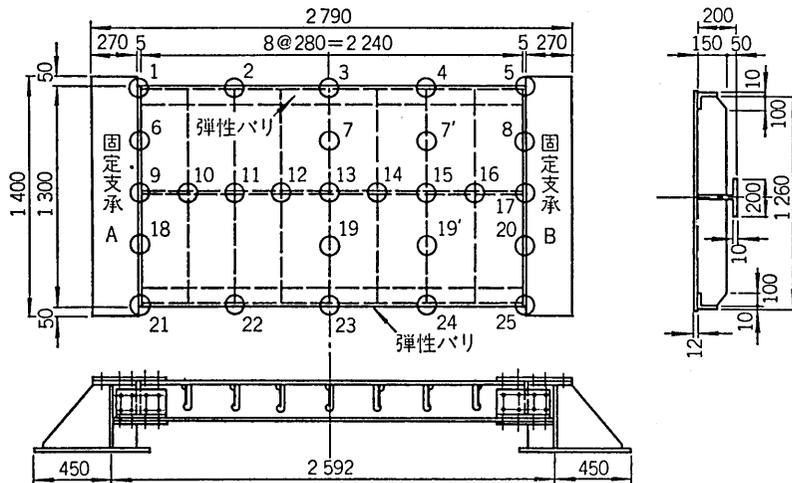


図 5-32 鋼床版模型と変位測点位置²⁶⁾

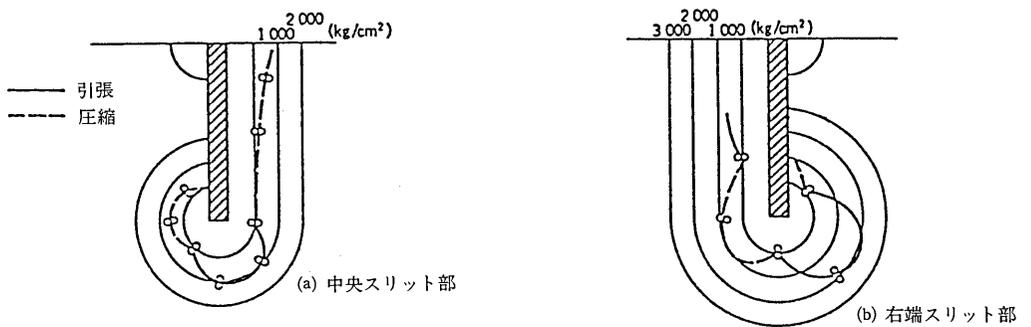


図 5-33 荷重状態 I におけるスリット部の応力分布²⁶⁾



表 5-7 静的載荷試験結果²⁸⁾

補剛材幅 (mm)		120			170		
載荷位置 測定位置		直上載荷 C	偏心載荷 S	縦リブ載荷 δ	直上載荷 C	偏心載荷 S	縦リブ載荷 δ
最大応力	補剛材前面位置 デッキプレート	-673	-1063 -943	-1329	-546	-1416 -1247	-1785
	補剛材角部位置 デッキプレート	-776	-1183 -1169	-876	-645	-990 -916	-926
	補剛材側止端部	-1012	-1182 -350	-564	-811	-1159 -924	-1086
たわみ	補剛材・リブ中央	0.214	0.216	0.172	/	/	/
	縦リブ (主桁側)	0.270	0.368	0.404	0.203	0.299	0.285
	縦リブ (中央側)	0.010	0.157	1.407	0.517	0.165	1.408

単位：応力kg/cm²，たわみmm，偏心載荷の上段は載荷側を表す。
 直上載荷 (C)：補剛材位置の主桁直上載荷
 偏心載荷 (S)：主桁位置を橋軸方向に100mm載荷位置移動
 縦リブ載荷 (δ)：補剛材位置の縦リブ直上載荷

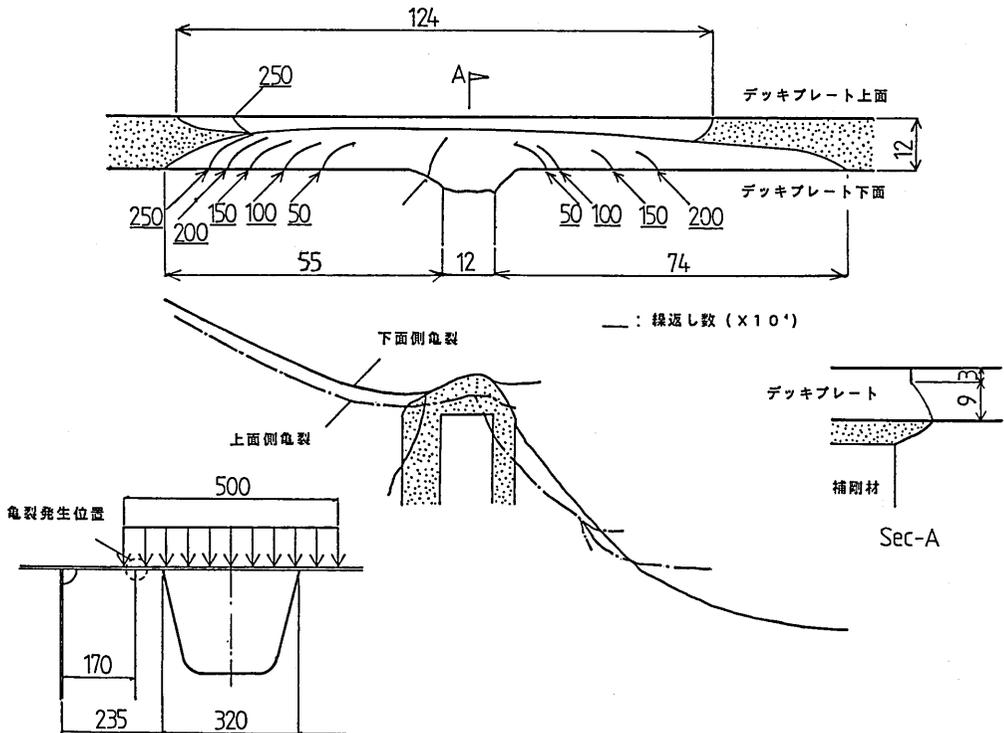


図 5-36 亀裂発生状況の模式図²⁸⁾

(2) 変動荷重下における疲労強度

道路橋には、変動荷重が作用することから、このような変動荷重下における疲労強度に関する検討も行われている。近年、実橋の主要部材に作用する応力範囲の大部分は、溶接継手の疲労強度の疲労限よりも極端に低応力側に偏っていることが、応力計測等から確認されており、変動荷重下における200万回以上の長寿命域における疲労亀裂の進展挙動に関する検討が行われている。最近では疲労試験機のパソコン等による制御も比較的簡単に行うことができるようになり、橋梁上に載荷する荷重列のシミュレーションによって作成した入力波形を基にした疲労試験も行われている。図5-37はシミュレーションによって作成された応力範囲の頻度分布と変動波形の一例を示している。

このような変動応力を受ける継手の疲労試験結果は、一般に応力範囲の頻度分布から得られる等価応力範囲と総繰返し回数によって整理される。等価応力範囲には、亀裂の進展寿命の考え方にに基づき、一般に一定振幅試験結果から得られる $S-N$ 線の傾き m を用いた m 乗平均値の m 乗根が用いられ

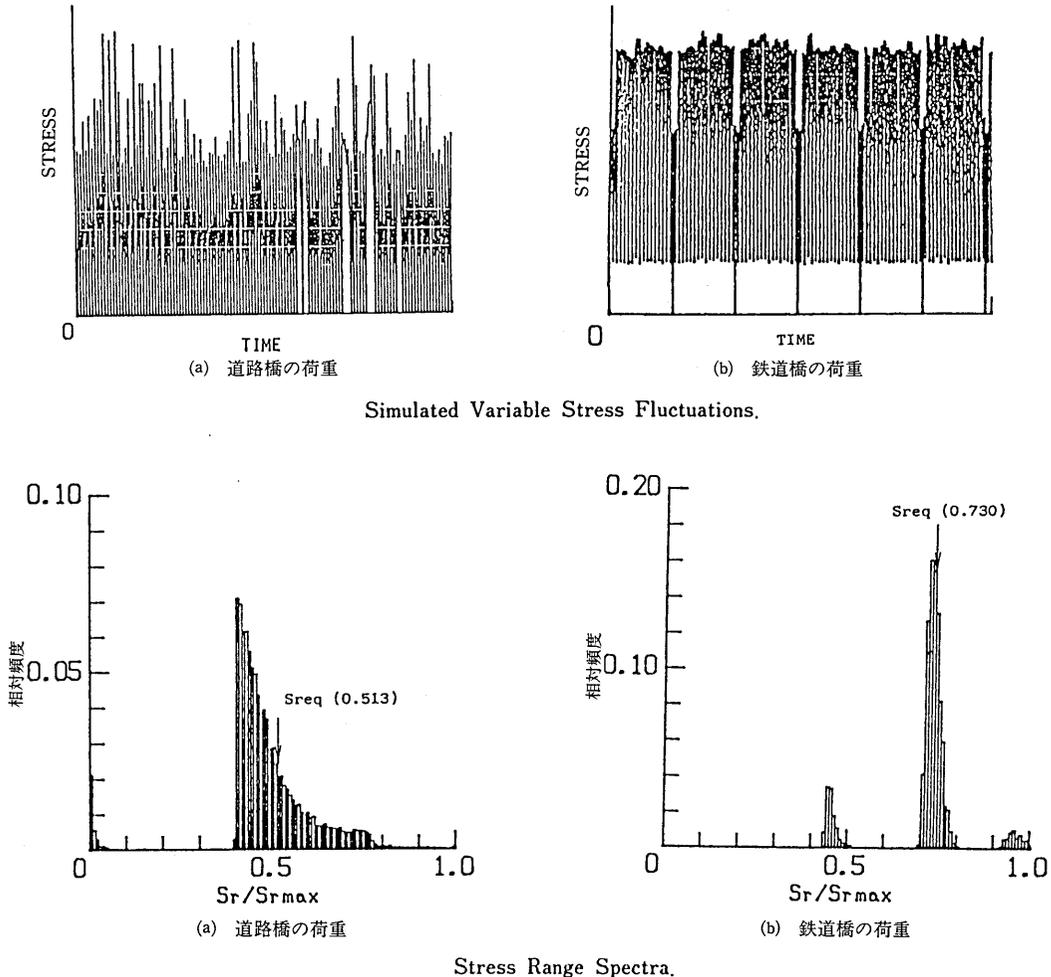


図5-37 変動荷重の例²⁹⁾

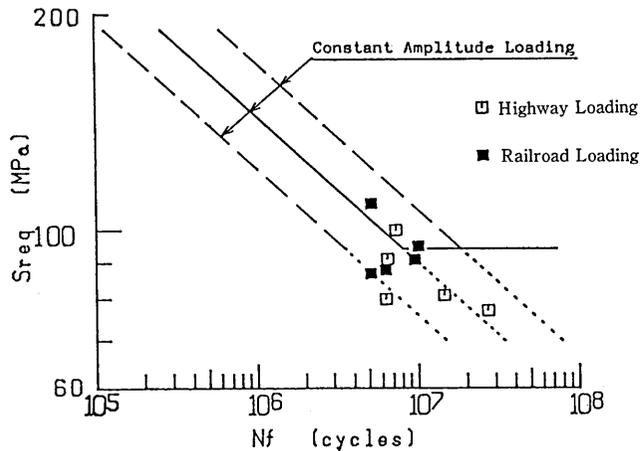


図 5-38 リブ十字継手の疲労試験結果²⁹⁾

る。図 5-38 は、等価応力範囲を用いて整理した変動荷重疲労試験結果である。図中の実線は同じ供試体を用いた一定振幅疲労試験結果から最小二乗法により求めた $S-N$ 線であり、破線は $2 \times$ (標準偏差) はなれた線を示している。一定振幅荷重下における疲労試験結果と比較すると、等価応力範囲が一定振幅試験により得られた疲労限よりも低い応力範囲であっても見かけ上破断する結果となる。また、その時の破断寿命は一定振幅荷重下における $S-N$ 線を疲労限以下まで延長した直線によりほぼ推定できる結果となっている。

変動応力下では疲労亀裂が進展するにしたがって疲労限以下の低応力範囲も疲労亀裂の進展に寄与するようになる。特に部材に作用する応力範囲頻度分布が、一定振幅荷重下における疲労強度の疲労限よりも極端に低応力側に偏った分布の場合、低応力範囲の繰返しも修正マイナー則等を適用する場合に考慮することが必要となってくる。前述の図 5-1 の変動応力に対する設計 $S-N$ 線についてもこれを考慮したものであり、疲労試験結果および疲労亀裂の進展解析結果に基づいて定めている。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：疲労設計指針 (案), JSSC レポート No.14, 1989.11.
- 2) 佐伯・西川・滝沢・新田：鋼床版縦リブ現場溶接継手の施工条件と疲労強度, 土木技術資料 23-8, 1981.8.
- 3) 災害科学研究所：開断面リブを有する鋼床版現場溶接部の疲労強度に関する研究 1982.3.
- 4) 堀川・李・石崎：閉断面縦リブを有する鋼床版現場溶接部の疲労強度に関する研究, 土木学会第 37 回年次学術講演会概要集, 1982.
- 5) DongUK LEE, K. Horikawa: Fatigue strength of one side welded joint with backing strip, 土木学会論文報告集, 1985.10.
- 6) 亀井・山本・鈴木・神野藤・山内：鋼床版 U トラフの局部強度, 三菱重工技報, Vol.24, No.4, 1987.
- 7) G.P. Tilly: Bridge Engineering, TRRL Report 664.

- 8) J.H. Daniels, B.T. Yen, J.W. Fisher: Rio-Niteroi 橋直交異方性鋼床版の自動車荷重による応力, TRRL Report 17.
- 9) TRRL Report: Stress under wheelloading in a steel orthotropic bridge deck with V-stiffener.
- 10) TRRL Report: Stresses under dynamic wheel loading in a surfaced steel orthotropic deck with V-stiffener.
- 11) TRRL Report LR 627: Trial experimental orthotropic panels under traffic loading.
- 12) TRRL Report SR 44 UC: Derivation of stress spectra from measurements on orthotropic bridge decks during normal trafficking.
- 13) TRRL Report SR 84 UC: Fatigue of welded joints loaded in bending.
- 14) TRRL SR 96UC: The fatigue behaviour of trapezoidal stiffener to deck plate welds in orthotropic bridge decks, 1974.
- 15) TRRL LR 629: An investigation into the fatigue of welds in an experimental orthotropic bridge deck panel, Laboratory Report 629, 1974.
- 16) 牛尾・植田・村田: トラフリブとデッキプレートとの接合部の疲労強度特性, 関西道路研究会会報, 1985.
- 17) 佐伯・西川・滝沢: 鋼床版 U リブ現場溶接継手の疲労試験, 土木技術資料 25-3, 1983.3.
- 18) Kondo A. and Yamada K.: Fatigue Strength of Field-Welded Rib Joint of Orthotropic Steel Decks, Fatigue of Steel and Concrete Structures, Proc. of IABSE Colloquium, Lausanne, 1982.
- 19) 近藤・山田・青木・菊地: 鋼床版閉断面縦リブ現場溶接継手の疲労強度, 土木学会論文報告集第 340 号, 1983.12.
- 20) 菊地・宮川・青木・藤枝・篠原: 鋼床版トラフリブの現場溶接部疲労強度保証に関する報告, トピー鉄構技報, No.2, 1984.
- 21) 国広・追田・公江: 閉断面縦リブを有する鋼床版の疲労実験, 川崎重工技報, 92 号, 1986.
- 22) 北原・桧垣・和田・渡辺: 鋼床版の横リブ設計法の研究, 住友重機械技報, Vol.36, No.106, 1988.
- 23) 藤原・西川・滝沢・小田: 鋼床版横リブの疲労強度に関する実験的研究, 第 17 回日本道路会議論文集, 1987.10.
- 24) 田中: 鋼床版の横リブと U リブ交差部の疲労強度の検討, 東京鉄骨技報, No.26, 1988.
- 25) 阪神高速道路公団・立命館大学: 鋼床版の耐荷力に関する実験的研究.
- 26) 大村・上野谷・金谷: 鋼床版横リブスリット周辺の応力分布と耐荷力, 橋梁と基礎, 1976.8.
- 27) Maeda, Y. and Sera, M.: Fatigue Characteristics of Steel Plate Decks for Steel bridges, Fatigue of Steel and Concrete Structures, Proc. of IABSE Colloquium, Lausanne, 1982.
- 28) 鈴木・加賀山・岩崎: 鋼床版における疲労損傷の防止検討, 第 18 回日本道路会議論文集, 1989.
- 29) 三木・村越・豊田・坂野: シミュレーション変動荷重下リブ十字溶接継手の長寿命疲労挙動, 土木学会論文集 第 404 号, 1989.4.