

鋼床版横げた切欠き部の応力性状に関する 載荷模型実験

Model Loading Tests of Transverse Rib Plate Scallops of Steel-Plate Deck Bridges

黒田 英文* 小野 裕二* 本名 一夫**

Hidefumi KURODA, Yuji ONO and Kazuo HONNA

近年、わが国において長大橋における床構造に、鋼床版構造（デッキプレート縦リブと横リブで補剛した格子構造）の採用が増加しつつある。鋼床版構造のうち、縦リブには構造的に優れている閉断面リブ（Uリブ）を用いることが多い。

Uリブを用いる場合、製作の必要上縦リブの支点となる横リブの腹板に切欠きを設ける。しかし、このことが横リブで腹板に応力集中を生じさせることが知られている。

そこで、本研究は切欠き形状の異なる4タイプの供試体により、切欠き形状に対する応力集中及び横桁Uリブ溶接部の疲労による影響を調べるため、原寸大模型により疲労試験を行った。

その結果、切欠き形状に応じて、生じる応力集中が異なることおよび横げたUリブ溶接部の疲労による変化が生じなかったことの結論を得た。

《鋼床版；疲労試験；応力集中；切欠き》

Steel-plate decks are commonly used in long-span bridges, and U-shaped Ribs are generally used as longitudinal stiffeners of the steel-plate deck because of their structural advantages.

When an opening (scallop) is made on the web plate of the Transverse Rib where the U-shaped Rib is connected, stress concentrates around the opening.

We performed 4 fatigue tests of full size deck models with 4-different types of scallops, to observe the stress concentration and fatigue of the welding of both Ribs.

It was found that the concentrated stress varied with the shape of the scallops, and no fatigue has observed at the welding.

Keywords: steel-plate deck, fatigue test, concentrated stress, scallops.

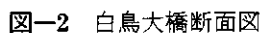
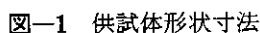
まえがき

道路橋鋼床版の縦リブと横リブが交差する部分では、溶接施工上の理由からスカラップが設けられる。縦リブとして一般的に用いられるUリブ周辺ではスカラップが大きくなり、この周辺の横リブ腹板には大きな二次応力

が発生する。また、Uリブと横リブでは輪荷重を直接受けるため、繰返し荷重による疲労が重要な問題となってくるが、特にUリブ、横リブの溶接部についてその問題が注目される。このような観点から、スカラップ形状の違いによる応力集中およびUリブ・横リブ溶接部の疲労

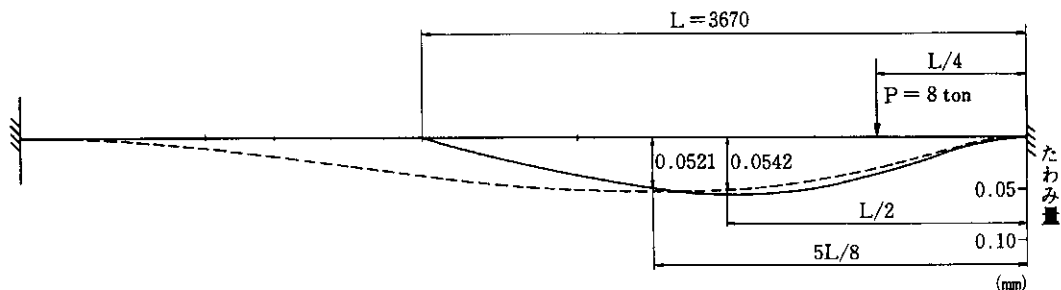
*構造研究室員 **同室長

本研究では実験の容易性から、鋼床版のうち横リブ部の部分モデルを採用することとした(図-1)。このような部分モデルで、連続した鋼床版の挙動が把握できるかと



いうことについて、渡辺らは有限要素法解析によって全体モデルと部分モデルの差異を調べている(文献-5)。その結果、部分モデルで鋼床版の横リブ腹板性能を推定することは十分可能である旨報告されているので、本研究においても部分モデルを採用することとした。部分モデ

ルの設定について、白鳥大橋補剛げた断面のうち図-2のA部に着目し、ここで実橋のたわみと実験モデルのたわみ(図-3参照)がほぼ整合するように、支点条件、ウェブ高、支間を調整して、図-1のように供試体の形状を決定した。



(注) 点線は実橋のたわみ、実線は実験モデルのたわみを示す。

図-3 実橋および実験モデルのたわみ

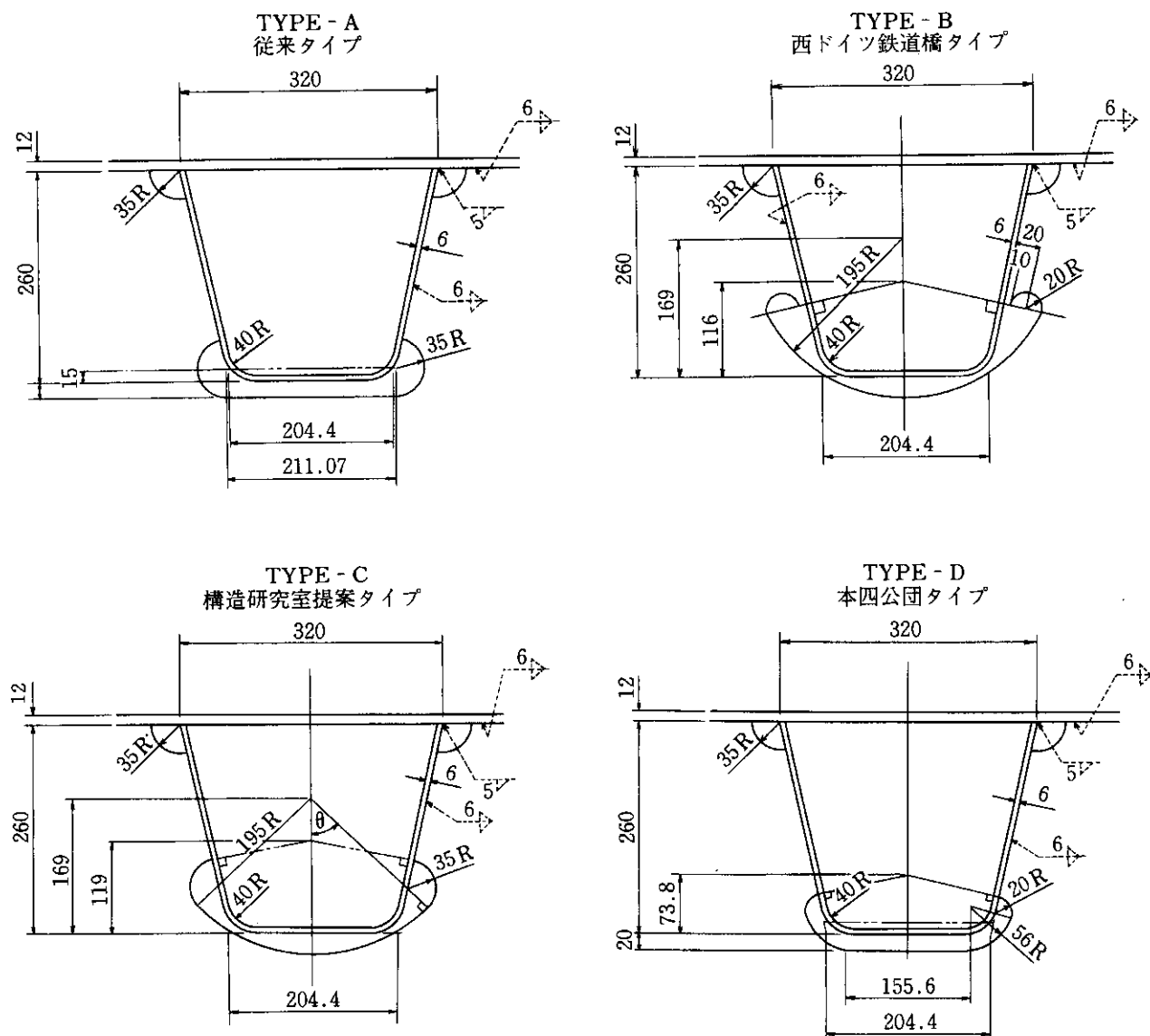


図-4 スカラップ形状の寸法

(2) スカラップ形状

A, B, C, Dと4タイプのスカラップ形状について応力集中を調べることとし、各タイプ1体、計4体の供試体を製作した(図-4)。各タイプについて以下に説明する。

Aタイプ：わが国で通常多く用いられている形状である。

Bタイプ：西ドイツの鉄道橋に用いられているスカラップをベースにした形状で、切欠き部の応力集中の緩和のみならず、まわし溶接の不具合性を解消して耐疲労性の向引上をも期待した形状である(文献-5)。

Cタイプ：構造研究室でBタイプをベースにして考案した形状である。

Dタイプ：本州四国連絡橋公団以後、本四公団と略す基準に示されている形状である。

2. 実験目的

- (1) 横リブスカラップ近傍の応力集中状態を、静的載荷試験および疲労試験により調べる。
- (2) 破壊試験により、最終耐荷力および破壊形態をみる。
- (3) 横リブ・Uリブの溶接部および横リブ・デッキプレートとの溶接部の疲労クラックの有無を調べる。

3. 試験方法

試験は、溶接欠陥調査～静的載荷試験～疲労試験～疲

労クラック調査の順で行った(表-1)。荷重振幅は、道路橋示方書 T-20の輪荷重を考慮して8tとした。また、供試体の「がたつき」を防ぐ目的から下限荷重を2tとしたので、上限荷重は10tとなる。上限荷重10t 載荷時に供試体が弾性域にあることは、疲労試験に入る前に確認した。荷重載荷には150t 構造特用油圧サーボ式疲労試験機を使用し、一定振幅の片振れ正弦波荷重を載荷させた。載荷周波数は3 Hz とした。なお、荷重載荷の支圧板の大きさについても道路橋示方書で規定された T-20荷重(幅200mm×長さ500mm の矩形)と同等とし、載荷部に一様に分布荷重がかかるよう、鋼製載荷板の下にゴムパットを敷いた。

2点載荷の趣旨について：実橋で横リブ上に輪荷重が載ることは一瞬であり、輪荷重は横リブ直上をはずれていることの方が多い。横リブ上に輪荷重が載った状態で



写真-1 実験全景

表-1 試験手順およびその内容

試験手順	試験手順	支承条件		載荷位置	載荷方式	載荷ケース 図-5	載荷重 (ton)
		左端	右端				
ケース①	X線探傷, 磁気探傷						
ケース②	静的載荷試験 ①	ローラー	固定	$l/2$	1点載荷	㊶	8
ケース③	静的載荷試験 ②	ローラー	固定	$l/2$	2点載荷($l=400\text{mm}$)	㊸	8
ケース④	静的載荷試験 ③	ローラー	固定	$l/2$	2点載荷($l=600\text{mm}$)	㊹	8
ケース⑤	静的載荷試験 ④	ヒンジ	ヒンジ	$l/2$	1点載荷	㊶	8
ケース⑥	静的載荷試験 ⑤	ローラー	固定	$l/4$	1点載荷	㊷	8
ケース⑦	静的載荷試験 ⑥	ローラー	固定	$l/4$	2点載荷($l=400\text{mm}$)	㊸	8 (10)
ケース⑧	静的載荷試験 ⑦	ローラー	固定	$l/4$	2点載荷($l=600\text{mm}$)	㊹	8 (10)
ケース⑨	疲労試験	ローラー	固定	$l/4$	2点載荷($l=400\text{mm}$)	㊸	2-10
ケース⑩	X線探傷, 磁気探傷						

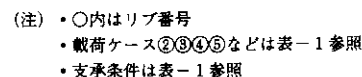
固定とは右支点を完全に固定し水平移動, 上下移動, 変形とも完全に拘束した構造である。

ケース②～⑨の載荷位置は図-5 参照。

鋼床版の疲労強度について照査する場合、200万回程度の繰返しに対して疲労クラックが発生しないこととしているので、本実験では疲労試験開始前と疲労200万回終了後に溶接部の検査を行った。これにより、疲労により発生したクラックと供試体製作時から存在した欠陥とが区

疲労試験終了後、載荷位置と支点条件をそのままにして破壊試験を行った。破壊試験時の荷重測定は50tまで5t刻みに、50t以降は2t刻みに増加させていった。

主応力の方向を確認するため、ひずみゲージには三軸ゲージを採用した。貼付枚数は、計測システムの上限から99枚とした。三軸ひずみゲージの貼付位置を図-6に示す。貼付位置は切欠き部の応力集中部、Uリブ、横リブの溶接部近傍とした。ゲージの貼付位置は、切欠き形状や横リブ・Uリブの溶接長が異なるため、各タイプ少しずつ異なっている。載荷条件、支点条件からみて、ひずみの大きく発生する右側4個のUリブスクラップ周辺に集中的にゲージを取りつけた。



5

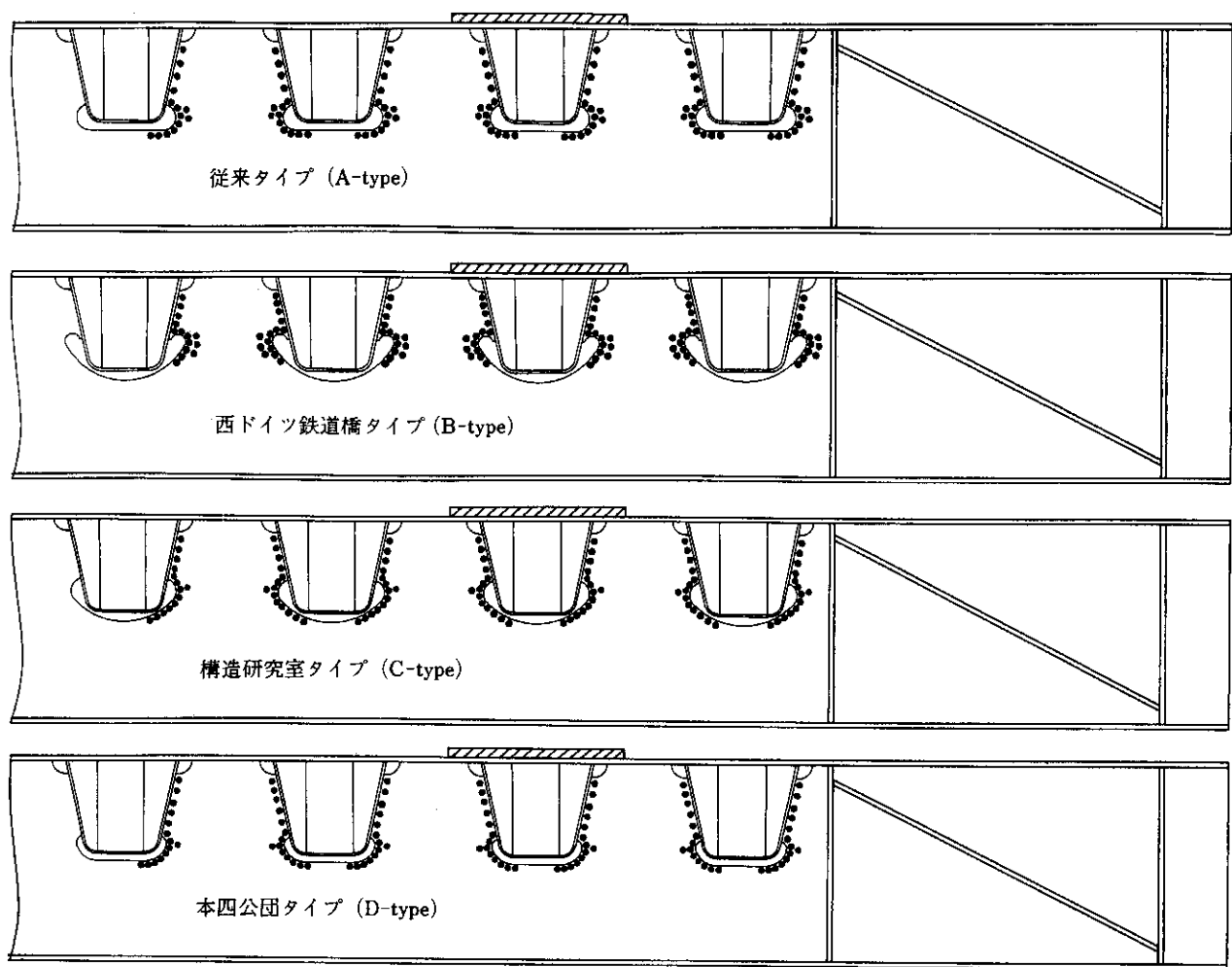
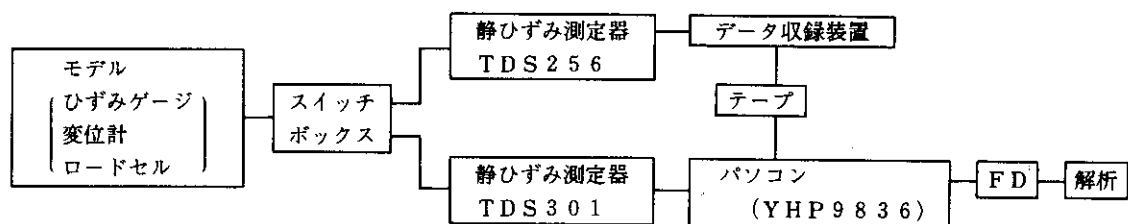


図-6 三軸ひずみゲージの貼付位置



計測システムの概要については、上図のとおりである。

5. 試験結果

5.1 静的載荷試験

静的載荷試験は、表-1 に示すケース2～8の7ケースで行っているが、本項ではこの種の載荷試験として最も一般的に行われている両端ヒンジ・中央1点載荷（表-1 静的載荷試験⑤）方式での試験結果について述べる（図-7）。

全般的にみると、各々のUリブの主応力な切欠き部に沿って流れている。主応力の分布状況は、Uリブ4個と

も変わらない。これは、けたのせん断力が荷重載荷位置～支承間で一定であることによる（図-8）。また、各Uリブの荷重側（図-9 左側）では、圧縮のUリブの反対側（同右側）では引張りの主応力が働いている。それはせん断変形により、切欠き部の荷重側には圧縮のその反対側には引張りの内力が働くことで説明できる。

各タイプの応力集中部近辺をみると、主応力の作用方向はA、B、C、Dタイプとも切欠き形状に沿ったものとなっている。しかし、Aタイプは切欠き半径が小さいために角度の変化の仕方が急になっている。主応力の大きさについては、各タイプの応力集中部に貼った5枚のゲ-

両端ヒンジ
#LIBTYPE=A
#LOAD =8.02 (ton)

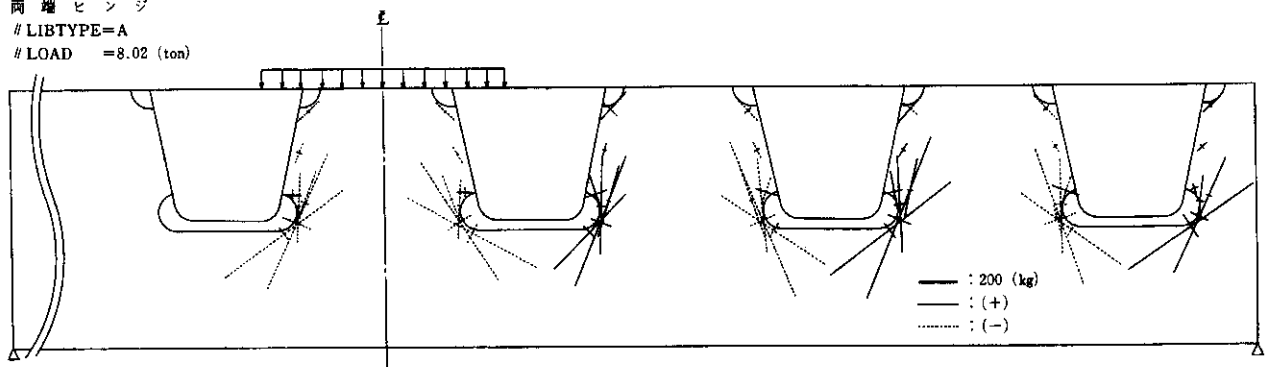


図-7(1) 主応力分布図 (Aタイプ)

両端ヒンジ
#LIBTYPE=B
#LOAD =8.05 (ton)

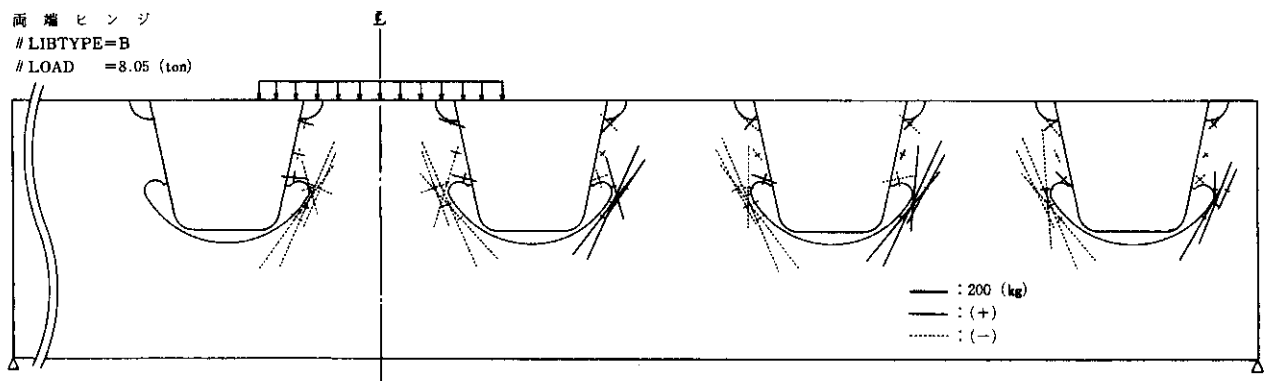


図-7(2) 主応力分布図 (Bタイプ)

両端ヒンジ
#LIBTYPE=C
#LOAD =8.03 (ton)

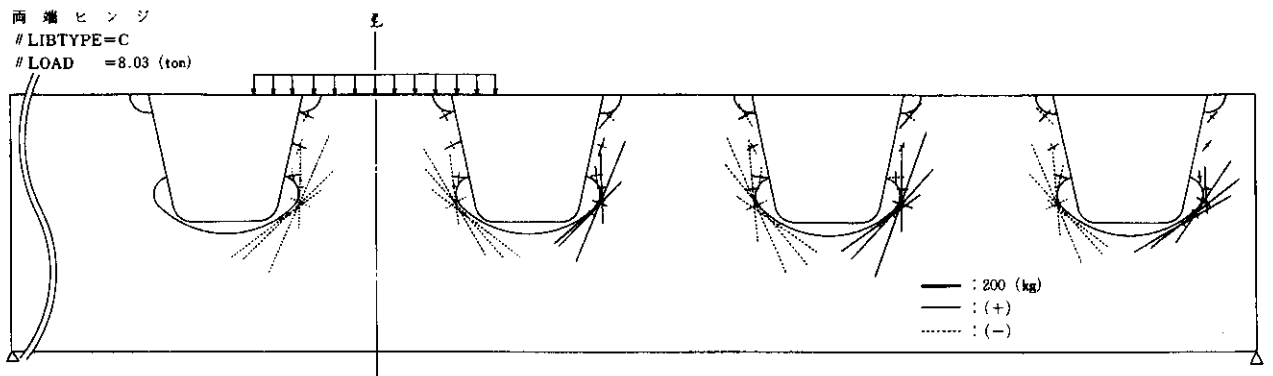


図-7(3) 主応力分布図 (Cタイプ)

両端ヒンジ
#LIBTYPE=D
#LOAD =7.93 (ton)

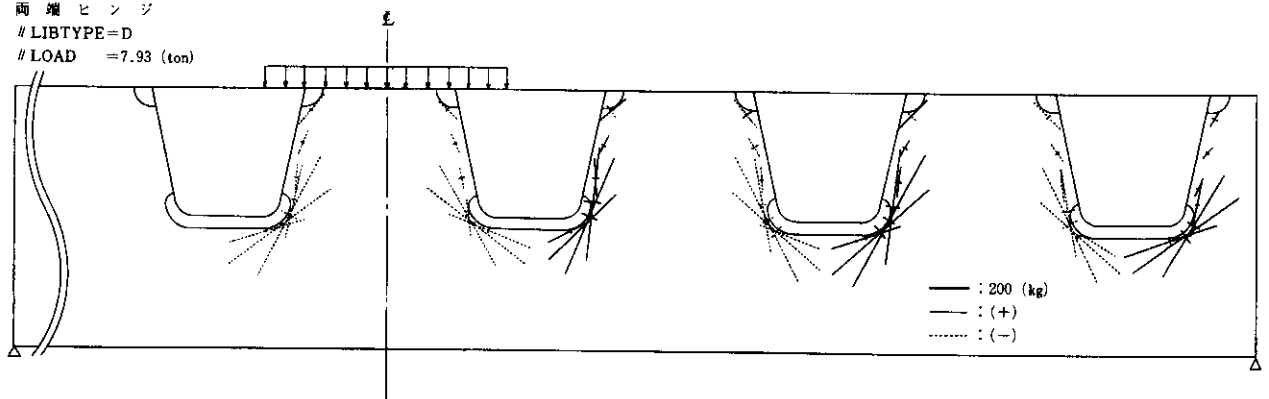


図-7(4) 主応力分布図 (Dタイプ)

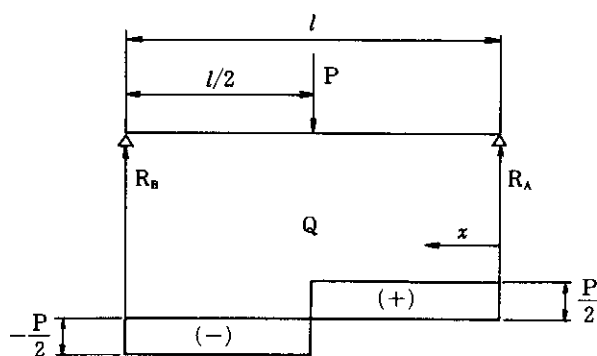


図-8 せん断力図

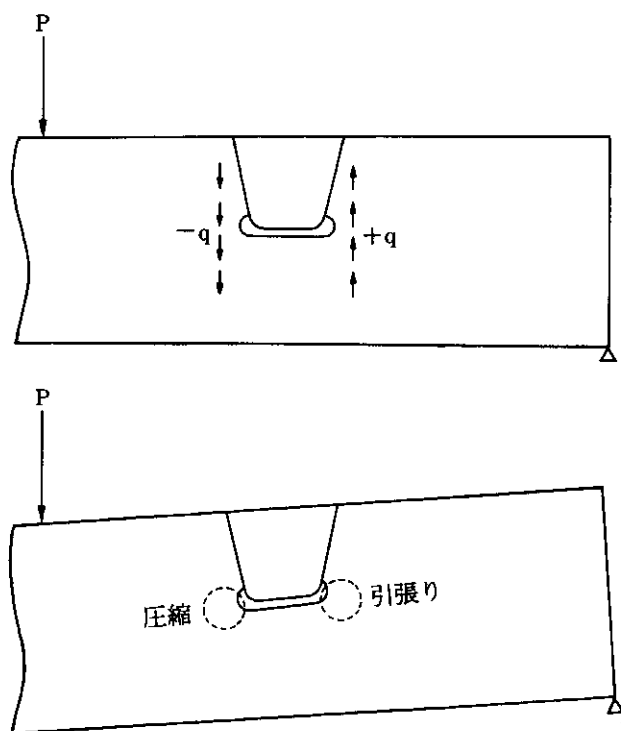


図-9 せん断変形

ジのうち、Aタイプでは2カ所の最大・最小の主応力値が 883.2 kg/cm^2 、 -844.2 kg/cm^2 と特に大きく、Cタイプは4カ所の主応力値がほぼ同じく $\pm 780 \text{ kg/cm}^2$ 程度になっている。Aタイプでは応力集中の程度が比較的大きく、Cタイプでは緩和されているといえる。B、Dタイプはそれらの中間であるが、Cタイプにかなり近い。

最大、最小主応力の絶対値の最大値を比較すると(表-2)、全ケースにおいてAタイプが最も大きい。逆に主応力が小さな値となるのは、中央 $l/2$ 点載荷時(静的載荷試験①～④)にはBおよびDタイプが、特にBタイプは引張り(最大主応力)で、Dタイプは圧縮(最小主応力)で小さな値となった。また、実橋の車両走行位置になる支間 $1/4$ 点に載荷したとき、1点載荷(静的載荷試験⑤)

ではB、C、Dタイプに有意差はみられない。2点載荷(静的載荷試験⑥～⑦)では引張り(最大主応力)で、Cタイプが小さい値となり、圧縮(最小主応力)ではB、C、D間にさほどの差はみられない。

5.2 疲労試験

図-10は、各タイプの疲労試験開始前と疲労200万回終了後の主応力分布を示したものである。図-11は各タイプの最大主応力(+、引張り)の最大値、最小主応力(-、圧縮)の最小値(絶対値の最大)の推移を示したものである。

5.2.1 応力の分布

構造および載荷条件を実橋と同じくするため、支承条件を右側固定、左側可動とし、載荷位置は車両走行軌跡に合わせて右側から2個目のUリブの位置とした。載荷方式は、荷重がUリブを介してから横げたへ伝えられるよう2点載荷(図-5)とした。

試験の結果、全タイプに共通した特徴として次のことがいえる。

(i) 右側から2つ目のUリブ、横リブ溶接部の応力は、それ以外の溶接部と比べて非常に大きい値となっている。

(ii) 載荷位置が右側支点到近いため、受けるせん断力の高い最も右側のスカラップ周辺では平均 $\pm 1000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の大きな応力が発生し、載荷位置から左側のスカラップでは、 $\pm 500 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の応力にとどまった。スカラップ周辺の応力集中は、けたのせん断力の大きさに関係が高いことが渡辺らによって指摘されているが(文献-1)、今回の実験においてそれが明瞭に現われている。右側から1番目のスカラップ周辺の片側が圧縮応力、反対側が引張応力となっているのは、前項、静的試験における場合と同様である。

5.2.2 載荷回数の増加に伴う応力度の推移

すべてのタイプにおいて最大主応力の発生箇所は、繰返し回数1000回から200万回まで変わらなかったもので、図示したものは各タイプのある特定のゲージの推移を意味する。繰返し回数の増加に伴って発生応力値は多少の変動はあるが、おおむね終始一定している。すなわち、繰返し載荷による鋼材へ変状は特別みられないといえる。この中で各タイプが特に高い応力値を示し、Cタイプが最も主応力値が小さい。しかし、Aタイプにしても応力値 920 kg/cm^2 前後であるから、疲労に対して十分安全な応力段階にある。疲労きれつについても全タイプ発生しなかった。

破壊試験結果をみると(表-3)、最終耐荷力はBタイプが最も小さく、Dタイプが最も大きかった。破壊形態は各タイプともウェブの座屈によるもので切欠き部および

表-2 最大・最小主応力の絶対値の最大値の比較表

試験内容	支 承 条 件		載荷位置 (図-5) (参 照)	載 荷 方 式	載 荷 重 (ton)	主 応 力 値 (kg/cm ²)								
						A タ イ プ		B タ イ プ		C タ イ プ		D タ イ プ		
	左 端	右 端				σ_{1max}	σ_{2min}	σ_{1max}	σ_{1min}	σ_{1max}	σ_{2min}	σ_{1max}	σ_{2min}	
静的載荷試験②	ローラー	固 定	$\ell/2$	1 点 載 荷	8	958.4	-889.5	710.6	-691.2	843.3	-720.0	665.4	-755.6	
				2点載荷($\ell=400mm$)	8	901.3	-963.0	659.4	-900.1	777.8	-823.3	740.7	-739.9	
				2点載荷($\ell=600mm$)	8	932.9	-943.2	635.1	-887.3	822.7	-896.3	729.0	-769.9	
				1 点 載 荷	8	883.2	-844.2	720.3	-735.5	779.5	-778.9	746.3	-698.5	
⑤	ローラー	固 定	$\ell/2$	1 点 載 荷	8	869.6	-912.1	665.1	-714.9	635.3	-767.1	658.1	-751.4	
2点載荷($\ell=400mm$)				10	1,060.3	-1,071.1	803.9	-929.0	686.8	-939.5	811.9	-941.8		
2点載荷($\ell=600mm$)				10	1,053.0	-1,059.2	738.9	-1,031.8	697.8	-948.8	770.7	-941.7		
回 数														
疲 勞 試 験①	ローラー	固 定	$\ell/4$	2 点 載 荷 ($\ell=400mm$)	2 ~ 10	1,000	926.7	-1,163.1	765.7	-959.5	705.3	-976.8	816.2	-973.5
						2,000	938.2	-1,184.0	729.4	-1,091.2	714.3	-956.5	813.4	-991.1
						5,000	939.4	-1,202.0	771.7	-1,047.7	712.6	-909.5	801.8	-995.7
						1万	936.2	-1,227.0	762.4	-1,050.0	702.0	-972.6	804.6	-987.0
						2万	933.4	-1,203.6	788.5	-1,023.2	718.1	-963.5	800.2	-996.2
						5万	935.8	-1,208.6	791.9	-1,053.7	726.1	-972.5	811.5	-989.7
						10万	967.2	-1,233.0	786.9	-1,077.5	734.0	-979.0	781.3	-1,019.4
						20万	925.3	-1,200.0	781.3	-1,045.5	739.2	-961.3	790.6	-994.6
						50万	911.2	-1,234.0	764.0	-1,086.4	722.0	-967.9	776.9	-1,103.8
						100万	929.4	-1,213.8	761.0	-1,087.0	725.0	-968.9	786.8	-981.1
						150万	876.0	-1,244.8	766.7	-1,099.7	715.7	-973.1	726.3	-1,025.6
						200万	934.3	-1,218.4	758.8	-1,071.9	700.8	-958.7	760.7	-1,001.8

注 1 σ_{1max} は最大主応力(引張り)の最大絶対値

注 2 σ_{2max} は最小主応力(圧縮)の最大絶対値

注 3 疲労試験での主応力は繰り返し荷重をかけた後、静的に10ton載荷したときの最大・最小主応力の絶対値の最大値である。

注 4 最大値  最小値  である。

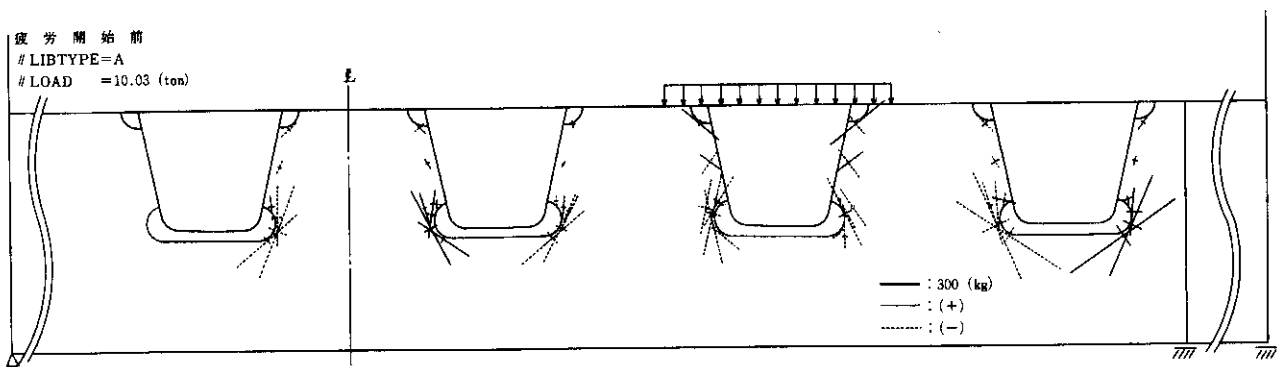


図-10 (1) 主応力分布図 (Aタイプ疲労開始前)

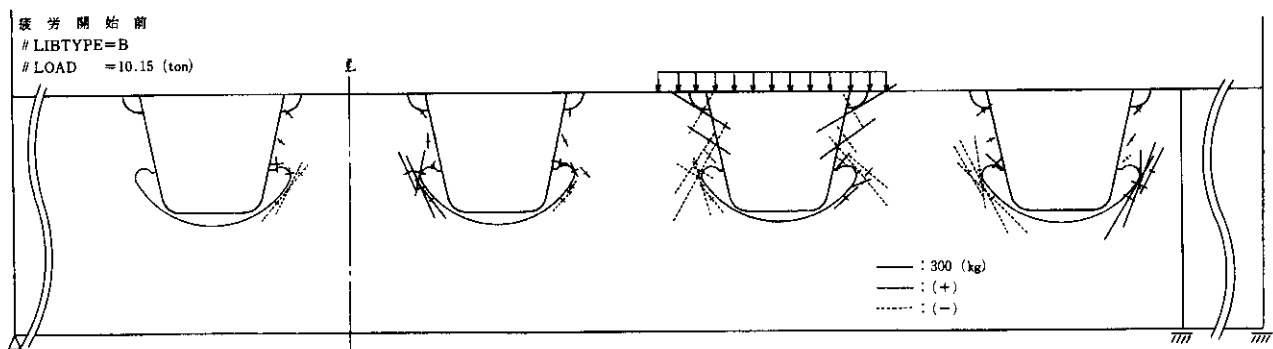


図-10 (2) 主応力分布図 (Bタイプ疲労開始前)

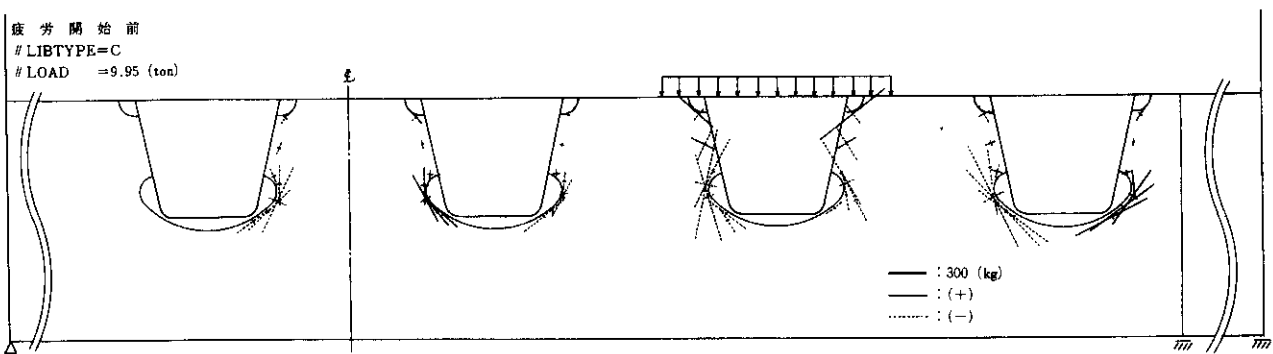


図-10 (3) 主応力分布図 (Cタイプ疲労開始前)

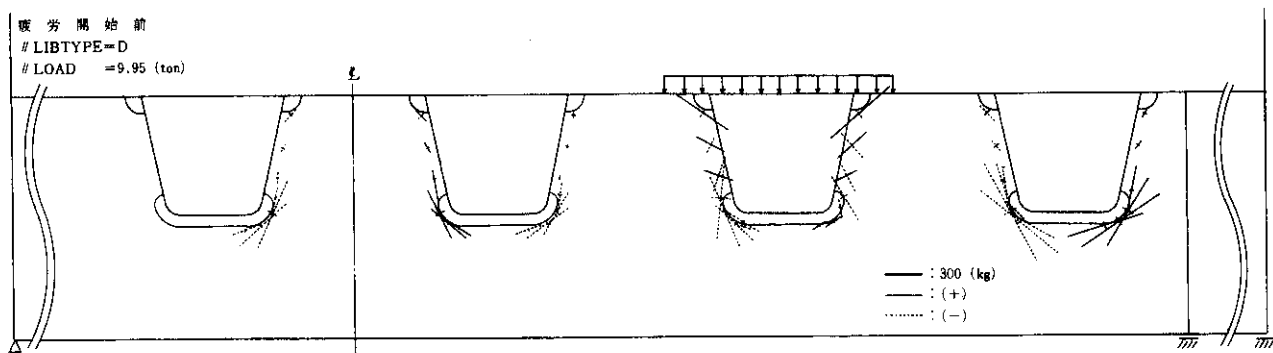


図-10 (4) 主応力分布図 (Dタイプ疲労開始前)

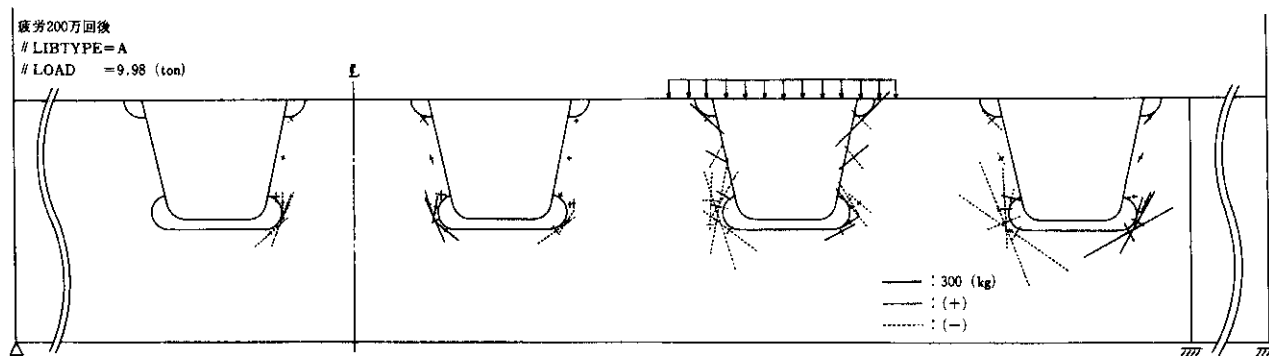


図-10 (5) 主応力分布図 (Aタイプ疲労200万回後)

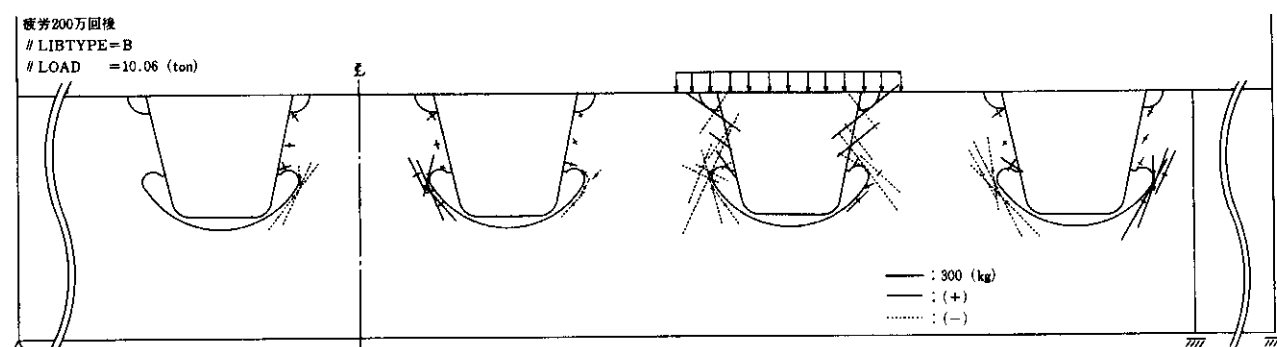


図-10 (6) 主応力分布図 (Bタイプ疲労200万回後)

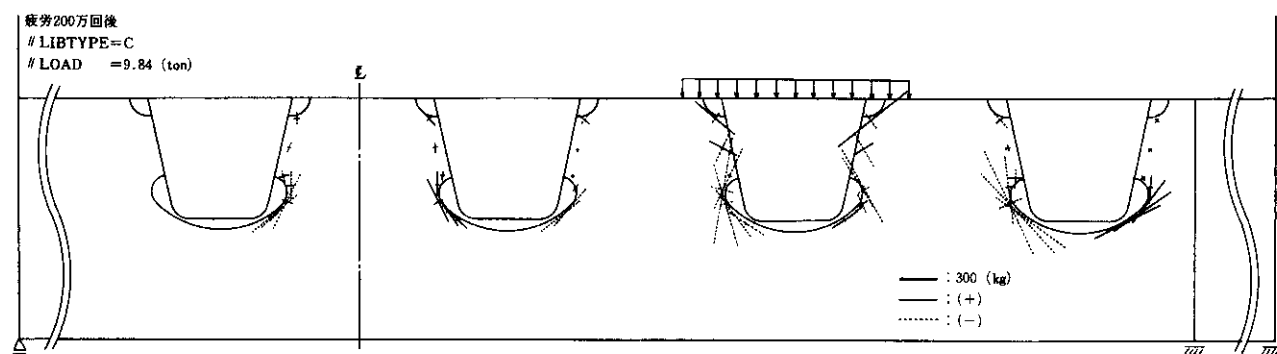


図-10 (7) 主応力分布図 (Cタイプ疲労200万回後)

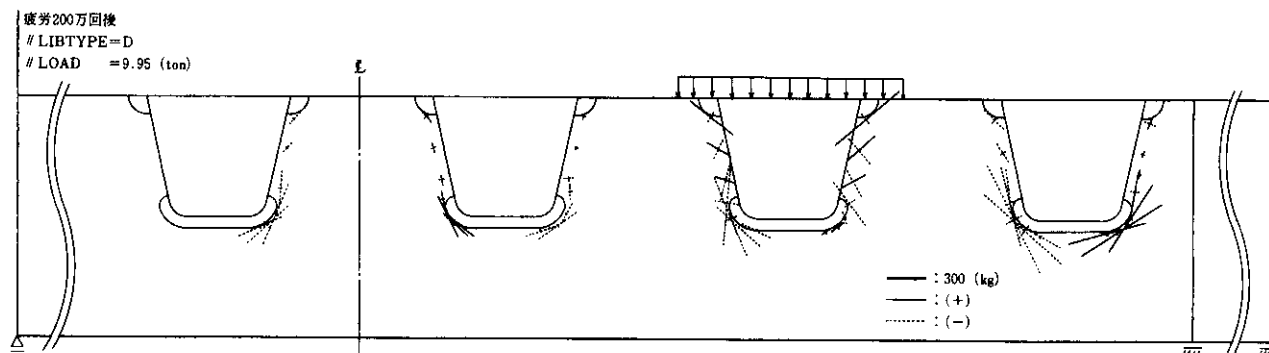


図-10 (8) 主応力分布図 (Dタイプ疲労200万回後)

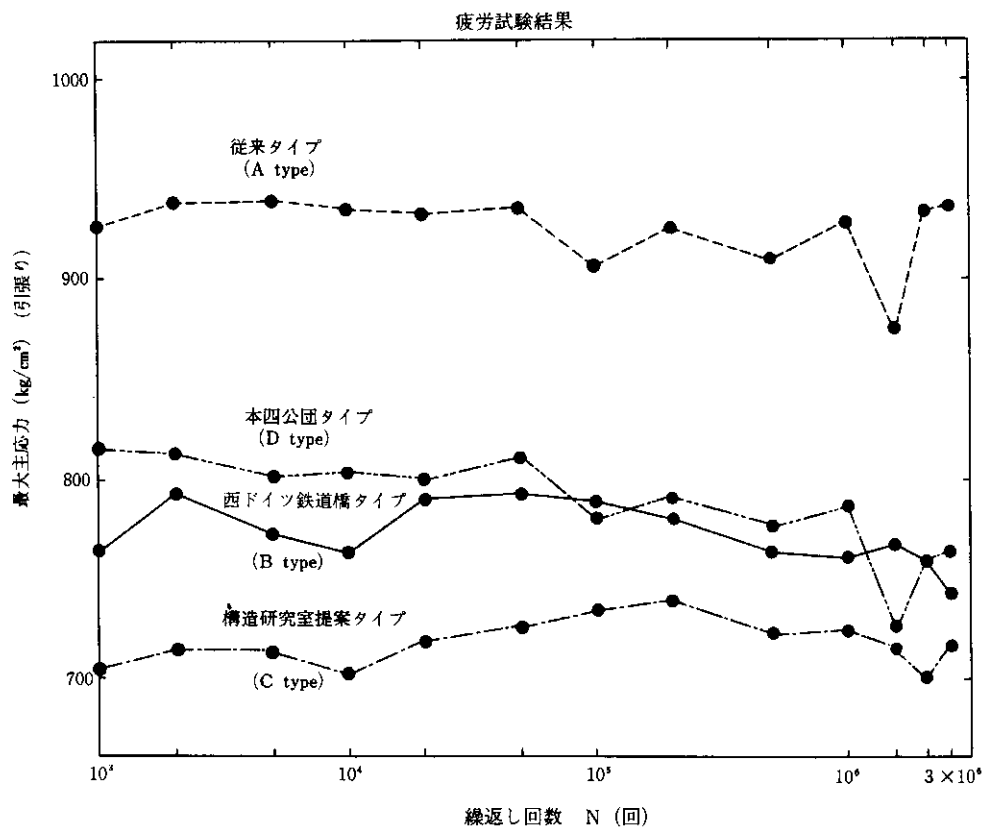


図-11(1) 主応力の経時変化 (最大主応力)

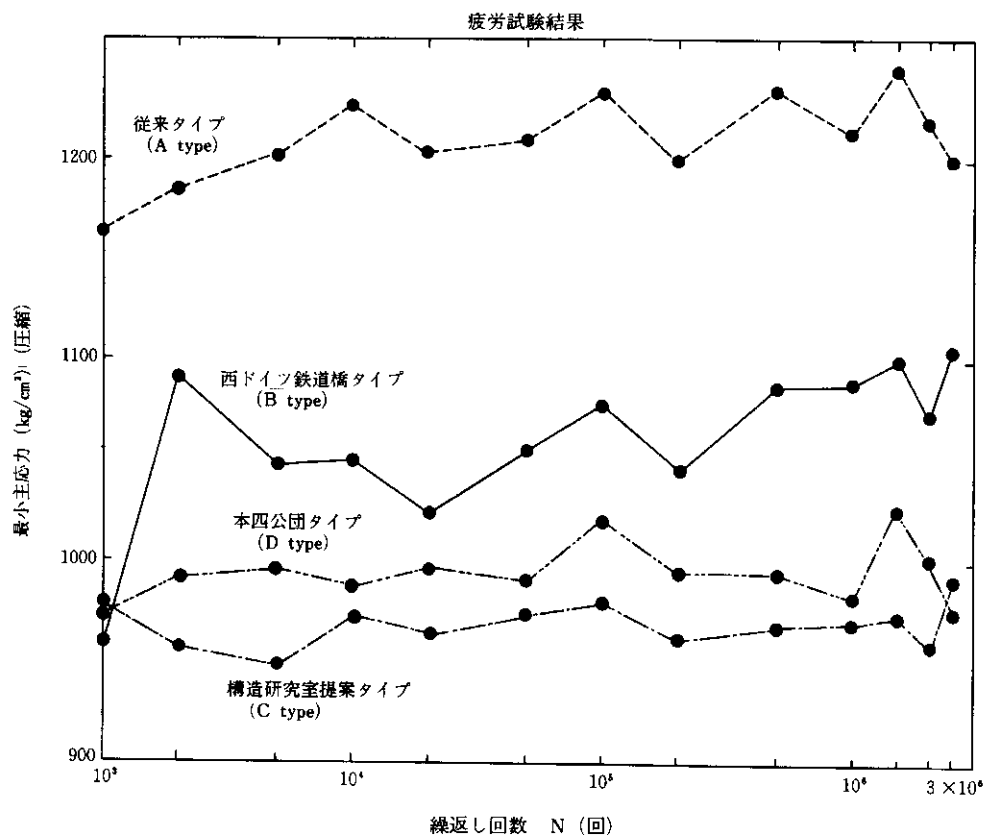


図-11(2) 主応力の経時変化 (最小主応力)

表—3 破壊試験結果

切 欠 形 状	破壊荷重(t)	破 壊 形 態
A タ イ プ	80	ウェブの座屈
B タ イ プ	68	〃
C タ イ プ	76	〃
D タ イ プ	74	〃

溶接部には破壊直前まで変化はなかった。したがって破壊形態から考えると、Bタイプの最終耐荷力が最も小さかったのはスカラップが大きいこと、すなわち、横リブの断面欠損が最も大きいことであろうといえ、Bタイプでも破壊荷重は68tもの大荷重であり、現実にはこのような荷重がかかることはまず考えられない。この点に関しても、すべてのタイプが十分な耐力を保有していることがわかった。

溶接部の検査として、X線探傷と磁気探傷を疲労試験前後に行い、両者は比較した。その結果、疲労200万回終了後において、疲労試験開始前に存在した欠陥に変化はなく、さらに疲労によって新たなクラックの発生はなかった。

6. ま と め

スカラップ形状の異なる4タイプの鋼床版模型に対する載荷試験の結果、以下に示す結論を得た。

(1) 疲労試験開始前に、疲労試験と同様な支承条件、荷重載荷位置、荷重載荷方法で載荷荷重10tを載荷し、静的載荷試験を行った。その結果、どのタイプにおいてもスカラップ周辺に発生する応力値は許容応力値以下であり、問題はない。この時点でのスカラップ周辺圧縮応力値は従来タイプが最も大きく、 1070kg/cm^2 であった。他の3つのタイプは $930\sim 950\text{kg/cm}^2$ 程度であり、三者間で有意差はない。

(2) 続いて行った荷重振幅8tの疲労試験(200万回)の結果では、載荷繰返し回数2,000回以降各タイプの主応力値の差が顕著になった。今回提案のスカラップ形状(Cタイプ)は、通常のスカラップ(Aタイプ)、西ドイツ鉄道橋のスカラップ(Bタイプ)、本四公団基準スカラップ(Dタイプ)に比べて、応力集中が最も緩和され、疲労に対する安全性が特に高いものであった。

(3) 供試体4タイプとも溶接部に疲労き裂は発生せず、溶接部の疲労強度に問題はなかった。

(4) 疲労試験の終了後に行った各タイプについての破壊試験では、破壊荷重が68～80tもあり、実際の輪荷重の約7～10倍もの耐力があった。しかも破壊形態は4タイプとも横リブのウェブの座屈によるものであり、この直前までスカラップ形状は保持されていた。

以上(1)～(4)を総合した結論として、次のことがいえる。すなわち、今回対象とした4つのタイプの鋼床版横リブのスカラップ形状は、いずれも輪荷重に対して十分な耐荷力を有するものである。その中で今回提案した新しいスカラップ形状は、特に応力性状に優れたものであった。

あ と が き

本実験は、特に横リブスカラップ周辺に発生する応力集中と、Uリブ、横リブ溶接部の応力度に着目して疲労試験を行った。そのため、今回の実験の特徴として、溶接部およびスカラップ近傍にできるだけ密に三軸ゲージを取りつけたので、かなり精度よく応力分布を確認することができた。もう1つの特徴として、実験模型の支点条件と載荷方式で実橋に近いものとなるようにしたことである。これによって、実橋で生じるであろう厳しい載荷状態が実験に反映されたものと考えられる。

本研究に際して、北海道大学渡辺 昇教授からの御指導と室蘭開発建設部室蘭道路事務所の関係各位からの御協力に対し、厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所；鋼床版トラフ形縦リブ溶接継手の疲労試験(I) 継手形式の選定，土木研究所資料第2149号，昭和59年11月。
- 2) 国広昌史，追田治行，公江茂樹，仁瓶寛太；閉断面縦リブを有する鋼床版の疲労試験，川崎重工業技報第92号，1986年4月。
- 3) 和田三夫，北原俊男，渡辺 昇；鋼床版横リブ腹板の応力性状について，第17回日本道路会議論文集1987年10月。
- 4) 藤原 稔，西川和廣，滝沢 晃，小田訓男；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年10月。
- 5) 北原俊男，檜垣孝二，和田三夫，渡辺 昇；鋼床版の横リブ設計法の研究(その1)，住友重機技報第36巻 第106号，1988年4月。
- 6) Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Lindner, Technische Universität Berlin; Kreuzungsbauwerk Mitte in Fulda Erte Eisenbahnbrücke mit Trapez-Längssteifen, STAHLBAU, ISSN 0038-9145 54. Jahrgang Januar 1985 Hett.