

開断面縦リブを使用した鋼床版横リブの疲労損傷防止検討

Study of Prevention of Fatigue Damages in Floor Rib
Using Open Section Type Longitudinal Rib on Orthotropic Steel Deck Bridges

岩崎 雅紀* 寺尾 圭史** 深沢 誠***

By Masanori IWASAKI, Keiji TERAO and Makoto FUKAZAWA

ABSTRACT

Orthotropic steel deck bridges are increasing because of them light weight in longer span bridges. But fatigue damages due to increasing of through traffic load are often reported on the slit with the connections between open section type longitudinal rib and floor rib in recent years.

To study the prevention method of fatigue damages, both F.E.M. analysis and large scale model fatigue testing were carried out. To prevent the fatigue damages, the best is the none of slit. If it can not applied for any reason, both none of scallop and narrower width of upper slit are conformable.

Key Words : Floor Rib, Fatigue, Fabrication, Orthotropic Steel Deck

1. はじめに

鋼床版は、コンクリート床版に比べて軽量であるため、長大橋を中心に数多く採用されてきている。しかし、鋼床版は、(1)細部構造によっては高い二次応力が発生することがある、(2)輪荷重を直接支えるために舗装および鋼部材の疲労に対する配慮が必要であるなどの課題を抱えている。このため、実用化初期から多くの研究^{1)~3)}が進められており、道路橋示方書における疲労規定⁴⁾、また、本州四国連絡橋公団の鋼床版設計要領⁵⁾(以下、本四要領という)、阪神高速道路公団の設計基準⁶⁾(以下、阪神基準という)などが策定されている。さらに、最近では疲労損傷防止の観点から、U形鋼⁷⁾を縦リブとして用いた鋼床版の横リブウェブに設けられるスリット部の疲労挙動に関する研究^{8)~10)}が進められている。これらによれば、輪荷重直下に位置するスリット部には横リブウェブの面外曲げ¹¹⁾に伴って、一方、輪荷重直下に位置しないスリット部には横リブのせん断変形^{12)~14)}に伴って応力集中が発生し、疲労損傷が発生する可能性が高いことが指摘されている。

現状では、実橋において発見されている疲労損傷の大部分は、バルブプレート¹⁵⁾を使用した鋼床版であ

* : (株)横河ブリッジ 研究所 研究課長補佐(千葉市新港88番地)

** : 工修 (株)横河ブリッジ 研究所 研究課主任(千葉市新港88番地)

*** : 工博 (株)横河ブリッジ 研究所 研究課長 (千葉市新港88番地)

る¹²⁾。しかし、損傷発生数は少なく、発生位置と輪荷重位置の相関関係は明らかではない。

ところで、鋼床版の構造は、縦リブの形状別に大別できる。すなわち、最近実績が増加しているU形鋼を縦リブとして用いた鋼床版と開断面の縦リブ(バルブプレートが用いられることが多い。以下、開断面縦リブという)を用いたそれに分けられる。U形鋼が用いられるのは、軽量化が図れ、また、溶接量が低減できることから溶接変形も少なくなるためであるが、開断面であるために現場接合が複雑である、3次元曲げ加工が難しいことから曲線橋への適用が難しいという欠点もある。このような場合、開断面縦リブが一般的に使用される。

本研究では、開断面縦リブを用いた鋼床版横リブのスリット部の内、箇所数が多い輪荷重直下に位置しないスリット部を対象にF. E. M.解析と疲労試験を実施し、疲労損傷防止の観点からウェブ高さおよびスリット形状について検討した。

2. 横リブ設計手法

鋼床版横リブの設計手法としては、本四要領と阪神基準があげられる。

都市内高速道路の標準的な鋼床版2箱桁橋¹³⁾の桁間部(追越車線直下)の横リブについて行った計算結果を一覧にして表-1に示す。計算は有限帯板法により横リブ上にT-20後輪を満載(7輪)して行った。

ところで、U形鋼や開断面縦リブを用いた鋼床版横リブのスリット部にはせん断変形に伴う高い二次応力度が発生することが報告されている^{13), 14), 15)}。表-1には参考文献8)に示した簡易計算手法と同じ手法で求めたスリット自由縁隅角部の二次応力度 σ_s も示した。スリット自由縁において2049 (kg/cm²)であり、断面欠損を考慮したせん断応力度 τ_v の約6倍の応力集中が生じることになる。ただし、実際の車両走行を考慮した場合4輪が載荷され、 $\sigma_s=703$ (kg/cm²)である。図-1には解析において用いた諸記号を示す。

3. 標準的スリット形状を有する横リブの解析と疲労試験

3. 1 F. E. M.解析

(1) 解析手法

開断面縦リブと横リブとの交差部詳細は、横リブ間隔と横リブ支間に応じて縦リブ間隔とウェブ高さが若干変更

表-1 横リブ設計結果比較

設計法	本四要領	阪神基準	参考文献8)
計算区分	$H_n=700-(200+35)=465$		
最大曲げモーメント	$M_{\max}=13.408 \text{ (ton}\cdot\text{m)}$		
曲げ応力度	$\sigma_U=144 \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \sigma_L=458 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$		
最大せん断力	$Q=13.75 \text{ (ton)}$		
平均せん断応力度	$\tau_m=Q/(H_g \cdot t_w)=218 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$		
断面欠損を考慮したせん断応力度	$\tau_v=\tau_m \cdot H_g/H_n=328 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$		
ウェブ上端部	$\tau_H=\alpha/(\beta-2R) \cdot \tau_m=296 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$		
スリット自由縁隅角部の最大応力度 σ_s	$\sigma_s=2049$ 満載時 $\sigma_s=703$ 走行位置考慮		

計算対象
鋼床版諸元
横リブ支間: 9,000 (mm), 横リブ間隔: 1,500 (mm)
横リブ断面: L-Fig-200x12, Web-700x9 (SS400)
縦リブ間隔: 300 (mm), 縦リブ断面: Bulb-Pl-200x9 (SS400)
切欠き半径: 35 (mm)

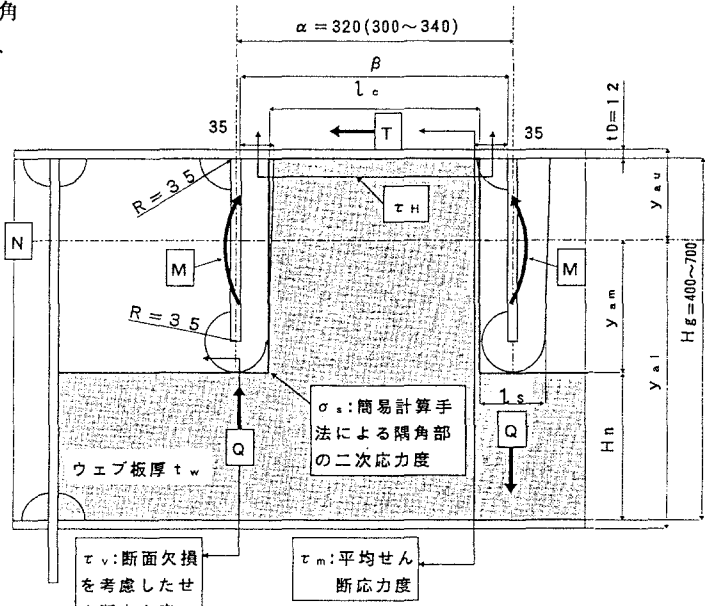


図-1 スリット部の記号 (単位: mm)

される他、ほとんどの場合図-1中に示したような寸法が採用される。

そこで、図-2に示すような片側に縦リブ4本を有する横リブ単純梁モデルについて、汎用有限要素解析プログラムCOSMOS/Mによりシェル要素を用いた立体F.E.M.解析を実施し、参考文献8)の簡易計算手法を開断面縦リブに応用することが可能かどうか検討した。モデル化に際し、縦リブは全て平板とした。これは、一般的にはバルブプレートが多いが、いずれも面外剛度がほとんどないため、ここで対象とした横リブ系モデルでは影響がないと判断したためである。載荷荷重は、 $H_g=500$ (mm)における横リブの平均せん断応力 τ_m を前記の実構造と合わせるために20 (ton)とした。また、解析モデルと同じ寸法の供試体の静的載荷試験と疲労試験も行った。

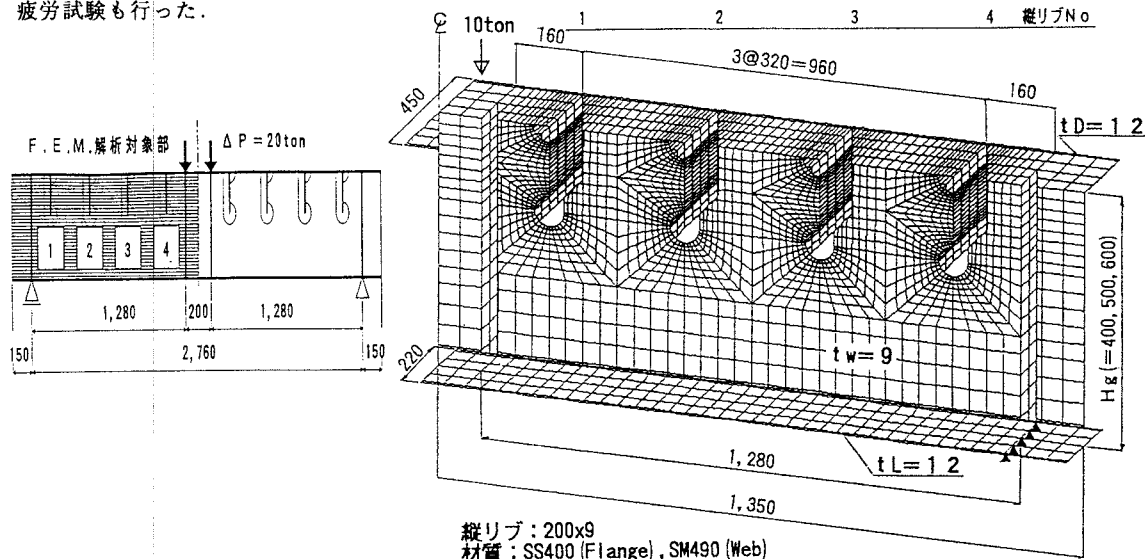


図-2 F.E.M.解析モデル(載荷試験モデルの片側半分に相当,単位:mm)

(2) スリット下端自由縁のF.E.M.解析結果

ウェブ高さによらず、また、縦リブ位置によらずいずれのスリット自由縁にも高い応力集中が生じていた。図-3 (1)は、ウェブ高さ $H_g=500$ (mm)について各縦リブ位置のスリット下端自由縁に接する要素の主応力分布を示す(以下、同様)。縦リブ位置によって発生応力度にはほとんど差がないことから、横リブのせん断変形に伴う応力集中であると判断される。

図中には、供試体を用いて静的載荷試験結果も併せて示した。主応力度は、F.E.M.解析結果に比べて約80%と若干小さい。これは、ゲージ寸法(12mmφ)、貼付位置(スリット自由縁から8mm)とF.E.M.解析における要素寸法(9mm×9mm)の差によると考えられる。なお、参考文献9)では、スリット自由縁のへりにおいて、初期載荷時に高い残留ひずみが生じることが示されているが、本試験では残留ひずみはほとんど生じなかった。測定位置の違い、載荷荷重の差によると考えられる。

スリット自由縁上端の縦リブとの溶接位置($\theta=0^\circ$)では、F.E.M.解析結果、載荷試験結果共に主応力度は小さい。

図-3 (2)は、縦リブに対するスリットの向きの違いについて比較するため、支点と載荷位置を逆にしたケースについて解析を行った結果である。応力の符号が逆転しているのみである。この結果からもせん断変形によるものであることが確認できる。

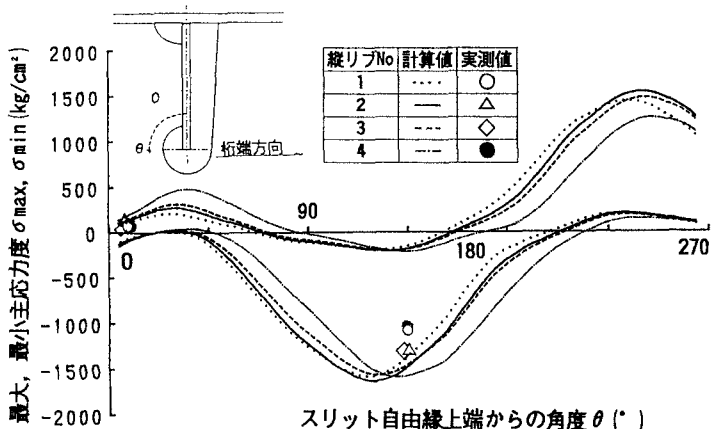
図-4は、縦リブNo2についてスリット自由縁の主応力度に及ぼすウェブ高さの影響を表わす。ウェブ高さの増加に伴って主応力度は低下するが、断面欠損を考慮したせん断応力度 τ_v に比べて約3~5倍以上の応力集中である。なお、図中には、簡易計算手法に基づく計算結果(σ_s)も併せて示した。解析結果に比べて若干高めであり、簡易計算手法に基づいて算出すれば、設計上安全側の数値が求められることがわかる。

(3) スリット上縁の解析結果

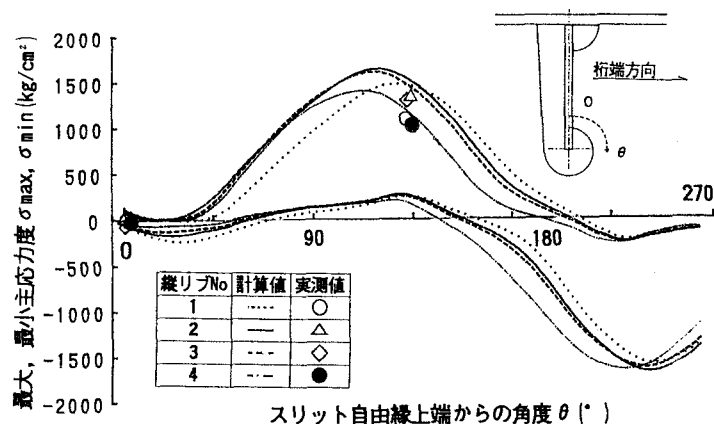
スリット下端自由縁の他、スリット上縁のデッキプレートとの接合部(以下、スリット上縁という)にも高い応力集中が見られた。図-5(1)は、ウェブ高さ $H_g=500$ (mm)についてデッキプレート表裏の縦リブ方向応力度およびウェブ上縁の主応力度を示したものである。スリット間でデッキプレートには高い面外曲げ応力が作用しており応力の交番も生じている。公称曲げ応力度の増加に伴って応力度が増加する傾向を示しているものの、公称曲げ応力度の約8倍(縦リブNo1)から約2倍(縦リブNo4)となっており、増加傾向は一致しない。せん断変形による応力に、曲げに伴う圧縮応力が付加されるためである。

スリット下端自由縁の応力度に比べると、スリット上縁の応力度は20%~25%程度高い。日本鋼構造協会の疲労設計指針(案)¹³⁾に基づいて各部の疲労強度を比較した場合、スリット下端自由縁が円孔を有する母材(C等級)に分類されるのに対し、デッキプレートと縦リブとの溶接部(以下、縦リブ側端部という)は荷重伝達型前面すみ肉溶接継手(E等級)、デッキプレートとウェブとの溶接部(以下、ウェブ側端部という)は面外ガセット継手(F等級)に分類され、疲労強度が低いのでスリット下端自由縁よりも損傷が発生しやすいと言える。

図-5(2)は、ウェブ高さ $H_g=500$ (mm)について先の図-3(2)と同様、スリットの向きを逆にして解析を行った結果である。応力の符号がスリットの向きによって替り、スリットが桁端側に向く場合、疲労強度が低いウェブ側端部が引張となる。



スリット自由縁上端からの角度 θ (°)
(1) スリットが支点方向に向く場合



スリット自由縁上端からの角度 θ (°)
(2) スリットが支間中央に向く場合

図-3 スリット自由縁の最大、最小主応力分布 ($H_g=500$)

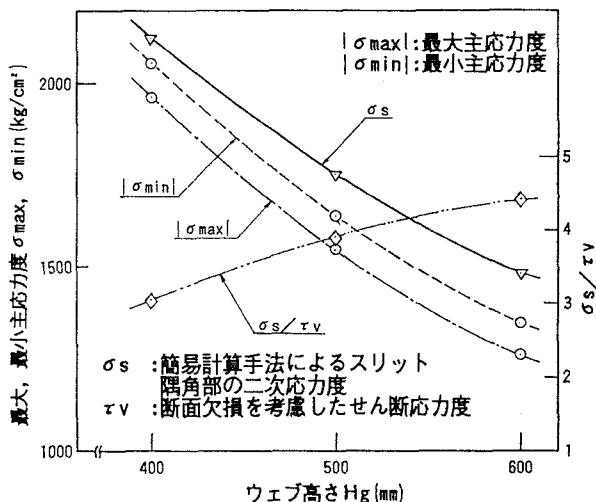
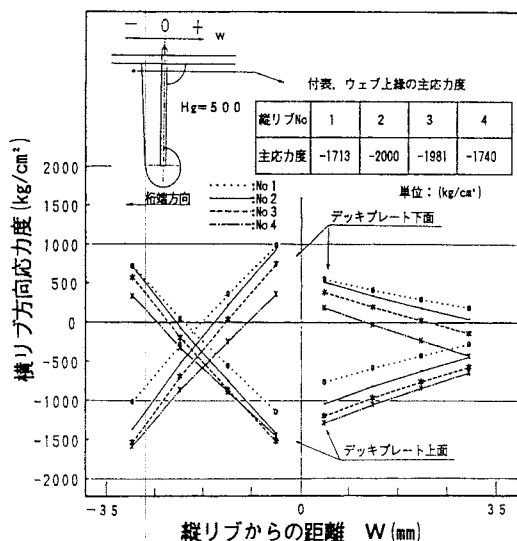


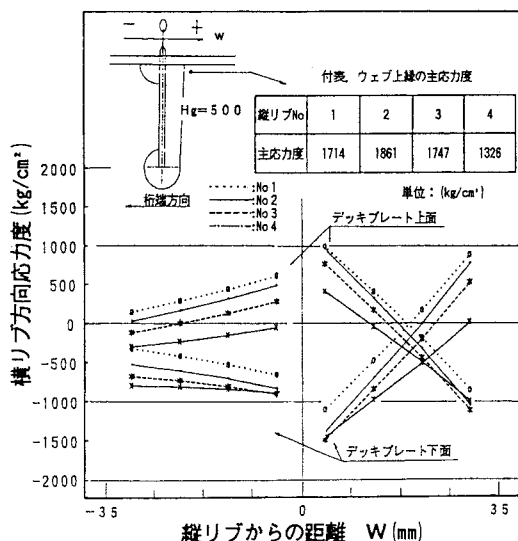
図-4 スリット自由縁の最大、最小主応力に及ぼすウェブ高さの影響

3. 2 疲労試験

疲労試験は、表-2に示すようにウェブ高さ $H_g=400$ (mm)についてはF. E. M. 解析の荷重荷重である20 (ton), $H_g=500, 600$ (mm)はその1.5倍, 30 (ton)の荷重範囲で行った。なお、疲労試験に先立って行った静



(1) スリットが支点方向に向く場合



(2) スリットが支間中央に向く場合

図-5 スリット上縁の応力分布

的載荷試験によりこの最大荷重までウェブが降伏しないことを確認した。

疲労試験結果を表-3に示す。最も速く成長した亀裂が表面長で約100(mm)を超えた時点で疲労試験を終了した。全ての縦リブ位置のウェブ上縁(W1~W3)またはウェブ側端部(W4)に疲労亀裂が発生した。解析結果から、縦リブ位置によらず高い応力集中が見られたことおよび溶接残留応力の存在を考えれば、亀裂発生に対する作用応力の符号による有意差はないと判断される。また、疲労亀裂(W1~W4)は、その発生状況から図-6に示す4種類の部位に分けられるが、いずれもデッキプレート内へ進展していた。放置すれば、デッキプレートを貫通すると考えられる。縦リブ側端部(W5~W6)にも11箇所亀裂が発生した。図-5からウェブ側端部と同程度の応力が生じていることがわかるが、縦リブのすみ肉溶接のビード継ぎをスリット内で行ったため、疲労強度が低かったために発生したものと考えられる。

Hg=500(mm)の場合のみ、スリット上縁の他にスリット自由縁(B)にも3箇所亀裂が発生し、進展した。いずれもその進展速度が速かったので、66.5×10⁴回で疲労試験を終了した。スリット自由縁の疲労亀裂は、最大主応力が最大値となる位置近傍発生し、主応力度の直角方向である自由縁の法線方向に進展した。亀裂を放置すれば、伝播し続けるものと推定される。

表-2 疲労試験条件

供試体区分 / Hg(mm)	最小荷重 (ton)	最大荷重 (ton)	荷重範囲 (ton)
B-4/ 400	2	2 2	2 0
B-5/ 500		3 2	3 0
B-6/ 600			

応力の正負の影響について調べるため、スリットの向きを供試体左右で同一とした。

表-3 疲労試験結果一覧

供試体 区分 Hg (mm)	荷重範囲P 繰返し数 N	特記	亀裂タイプ*								
			支間中央**				支点方向**				
			1	2	3	4	4'	3'	2'	1'	
B-4 Hg=400	20ton 2, 000, 000	回し 溶接 あり	W4	W4	W4	W1	W1	W3	W1	W3	
			W5					W5	W5		
B-5 Hg=500	30ton 665, 000		W3	W3	W2	W2	W3	W4	W3	W4	
			B	B	B					W5	
B-6 Hg=600	30ton 3, 000, 000		W3	W3	W3	W3	W1	W4	W3	W4	
			W5	W5	W5		W5	W5	W5	W5	
			W6					W6			

* : 亀裂タイプW1~W6, Bは図-6参照。

** : スリットの向きおよび縦リブ番号を表す。

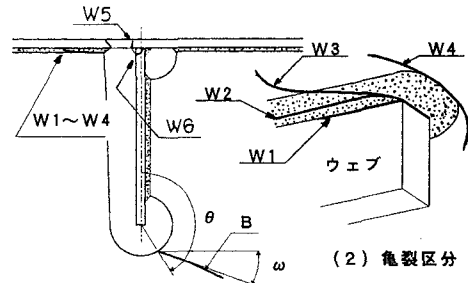
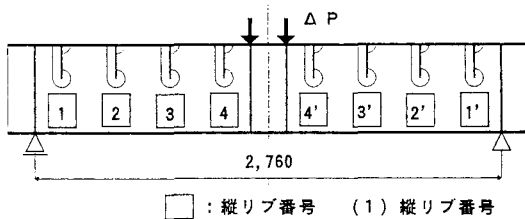


図-6 亀裂発生位置の区分

4. 改良構造の検討

4. 1 改良構造案

以上のF. E. M.解析結果および疲労試験結果より、横リブのスリット部にはせん断変形に伴う高い応力集中が存在し、疲労損傷発生の可能性が高いことが、また、標準的なスリット形状の場合、簡易計算手法によれば、設計上安全側の数値を求められることが明らかとなった。

このような応力集中を低減し、疲労損傷を予防するためには、ウェブ高さを高くしてせん断応力度を低減することが最も望ましいが、横リブの鋼重は鋼床版全重量の約12%を占めるので、この増加は不経済である。

そこで、スリット形状の変更のみで上記の二次応力度の低減が可能か検討した。検討に際しては、鋼床版の製作方法の簡素化も考慮した。

スリット近傍のみの改良による応力低減方法としては、(1)スリットを無くす、(2)スリット形状を改良する、(3)まわし溶接を無くす^{*)}などの対策が考えられる。ここで、鋼床版橋やその他橋梁における縦リブと横リブ交差部の形状としては、前記の標準的な形状の他、図-7に示すものがあげられる。

(a)は鉄道橋の鋼床版^{*)}において用いられている構造であり、疲労を考慮して、横リブ位置近傍のみ縦リブに丸みを付けると共に、縦リブ断面に対して2 (mm) 大きい切欠き (ルートギャップ1 (mm) 以下) を横リブウェブにもうけ、全周をすみ肉溶

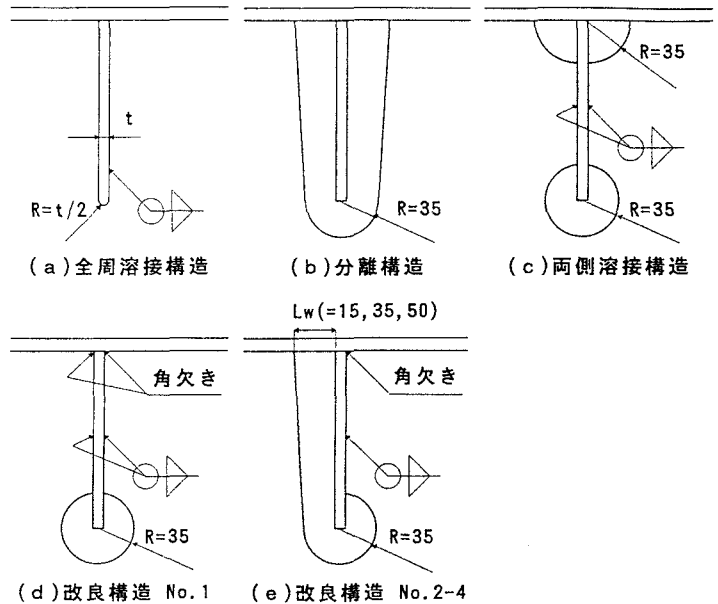


図-7 改良構造案

接する構造である。この場合、非常に高い製作精度が要求される。

(b)は、箱桁橋の引張フランジに一般的に用いられている構造であるが、鋼床版の場合、縦リブに作用するせん断力を横リブに伝達する必要があることから適用できない。(c)はかつて鋼床版に多用されていた構造であるが、縦リブ両側のすみ肉溶接に拘束割れが発生しやすいことから現在、特別な場合を除いて用いられていない。鉄道の箱桁橋のダイヤフラムでは、現在も同様の構造が標準的に用いられている。拘束割れは、広いルートギャップが生じた場合に、両側に短尺のすみ肉溶接を行うために発生するものであり、(1)ルートギャップの精度を向上する、(2)縦リブ上縁のスカールップを無くし、溶接長を長くするなどすれば、実用化可能である。縦リブがバルブプレートの場合、製作(はめ込み)が面倒となるので、そのような場合は、縦リブを平鋼とする必要がある。例えば、Bulb-PL-200x10の場合、PL-220x12に変更することが必要となる。

ところで、近年、工場製作の自動化が進められつつある。鋼床版の場合、(1)縦リブとデッキプレートで

構成されるパネルを先行して自動溶接し、その後、横リブを溶接する工法¹⁾や(2)縦リブ、横リブおよびデッキプレートを組立て後、全てを自動溶接する工法が採用される傾向にあり、このような製作方法に適したスリット形状とすることも必要である。(d)および(e)は、この点を考慮した構造である。

現標準構造では、横リブウェブとデッキプレート、横リブウェブと縦リブの溶接はスカーラップ部によって分断されているが、スカーラップを無くしてこれらを連続して溶接することが可能なようにした。さらに、(e)については、スリット上端の幅(Lw, 以下、スリット幅という)が応力集中に及ぼす影響を把握するため、スリット幅を変更したケース(Lw=15, 35, 50)についても解析を行った。(e)におけるスリット幅Lw=15(mm)は、すみ肉まわし溶接を施すための幾何学的な最小値である。

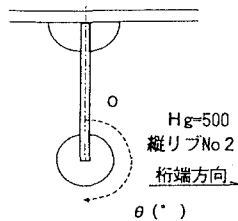
表-4 解析ケース一覧

改良構造案	解析ケース
(c)	Case-C
(d)	Case-D
(e) (Lw=15)	Case-E1
(e) (Lw=35)	Case-E2
(e) (Lw=50)	Case-E3

すなわち、表-4に示す上記の5ケースについて先と同様の解析モデルによりF.E.M.解析を実施した。

4.2 FEM解析結果

図-8にCase-C, Case-Dのウェブ高さHg=500(mm)、縦リブNo2についてのスリット自由縁の最大、最小主応力分布を、図-9にCase-Cの上端のスカーラップ内におけるデッキプレートの横リブ方向応力の分布を示す。標準構造に比べて、スリット自由縁では約50%に、スカーラップ内のデッキプレート部(Case-C)では約40%以下に低下している。スリットが塞がり、ウェブが連続化すること



により、せん断変形量が低下するためであると考えられる。

縦リブ上端部のスカーラップを無くすと、スカーラップ内における応力集中が無くなり、また、スリット自由縁の応力増加に繋がらない。

図-10および図-11はCase-E1, E2, E3の解析結果である。

スリット自由縁の応力は、スカーラップを無くしても変化しない。また、スリット幅を狭くすると、スリット自由縁における応力度は約20%以上低下することがわかる。

ウェブ側端部の応力もスカーラップを無くしても変化しない。また、スリット幅が狭くなるに従って面外曲げ応力度が低下している。スリット幅の減少に伴って局部面外曲げ変形量が低下するためであると考えられる。

一方、縦リブ側端部の応力に関しては、スカーラップを無くすことにより約10%(Case-E2/標準構造)増加するが、スリット幅を低減することにより約10%(Case-E1/Case-E2)改善されるので、標準構造と変わらない。

したがって、スリット部における高い応力集中を緩和して疲労強度を改善するためには、高い製作精度を確保する必要があるが、Case-Dのようにウェブを連続化することが望ましい。

これが難しい場合は、Case-E1のように上端部スカーラップを無くし、スリット幅を狭くすることが適し

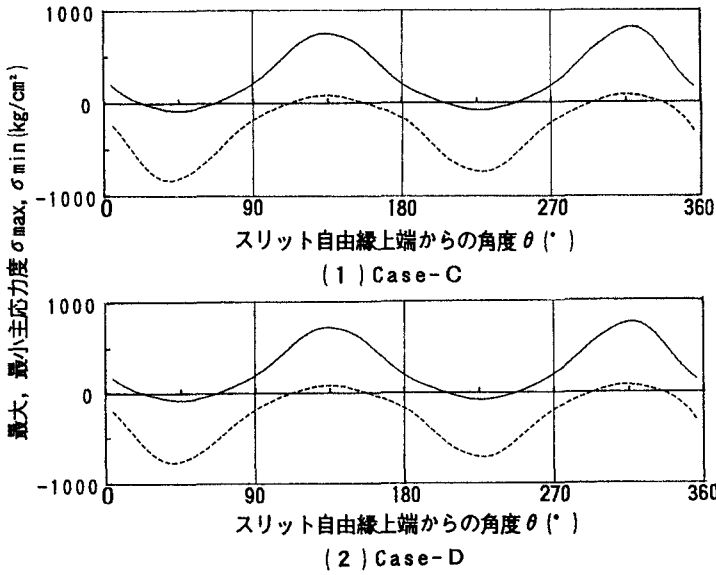


図-8 両側溶接構造のスリット自由縁の主応力分布

ていると考えられる。ただし、まわし溶接が非常に難しいので省略するのがよいが、その影響については別途検討が必要である¹¹⁾。

5. まとめ

以上、開断面縦リブを使用した鋼床版の横リブのうち、輪荷重直下に位置しない縦リブとの交差部に着目し、FEM解析および載荷試験結果を行った。結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 開断面縦リブを用いた鋼床版の横リブに設けられるスリット自由縁には、断面欠損を考慮したせん断応力度の約3～5倍以上高い二次応力度が、せん断変形に伴って発生する。また、これは、スリットの向きによらない。
- (2) 標準的なスリット形状の場合、スリット自由縁の二次応力度は簡易な計算手法によって、設計上安全側の応力度を求めることができる。
- (3) スリット上縁のデッキプレートとの取合い部には、スリット自由縁よりも約20%～25%程度高い応力集中が生じる。特に、デッキプレートには、高い面外曲げ応力が発生し、スリット間において応力の交番も生じる。
- (4) 疲労亀裂は、スリット上端では縦リブの位置およびスリットの向きによらず発生し、進展する。一方、スリット自由縁においては、最大主応力度が最大となる位置に発生し、スリット自由縁の法線方向に進展する。

- (5) このような高い二次応力度を低減し、疲労強度を改善する方法として、スリット形状の改良についてF. E. M. 解析による検討を行った結果、高い製作精度を確保する必要があるもののスカールップを無くし、スリット両側共に溶接を行う構造が応力低下に最も効果的であることが明らかとなった。
- (6) 標準構造の改良としては、スリット上端のスカールップを無くし、スリット上縁の幅を低減することが望ましい。なお、スリット上縁の幅を低減すると、すみ肉まわし溶接の施工が難しいので、別途検討を行って、まわし溶接は行わない方が望ましい。

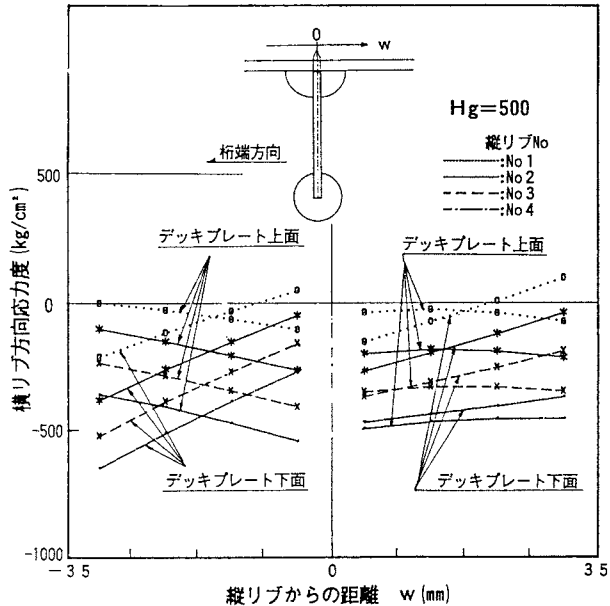


図-9 上端部スカールップ内におけるデッキプレートの応力分布

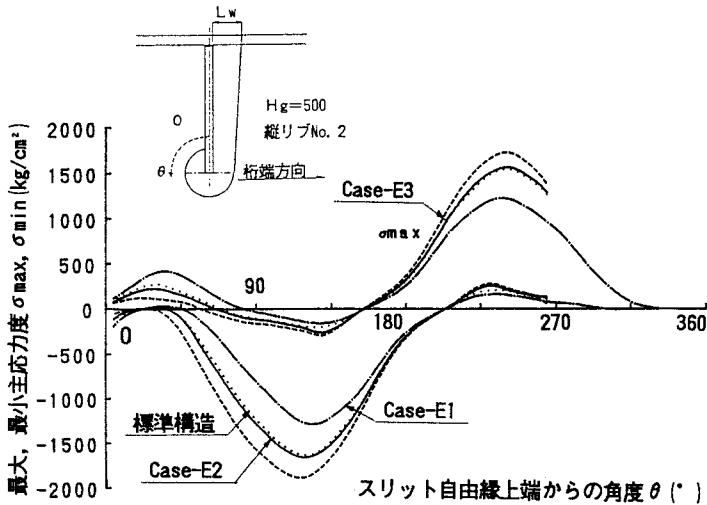
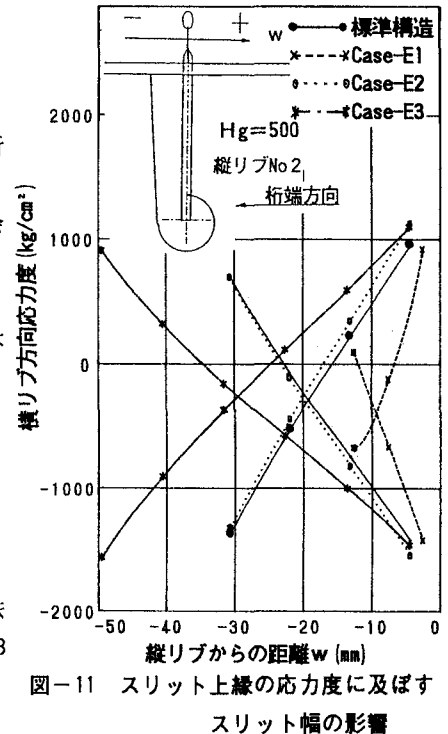


図-10 スリット自由縁の主応力度に及ぼすスリット幅の影響

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：直交異方性鋼床版設計便覧，土木研究所資料，第399号，1968. 7.
- 2) 鋼構造委員会進歩調査小委員会 橋床構造の進歩調査分科会：鋼床版の発展と現状，土木学会誌，Vol. 67. 9, pp. 34～40, 1982. 9
- 3) 鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集，No410/ I -12, pp. 25～36, 1989. 10
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980. 2.
- 5) 本州四国連絡橋公団：鋼床版設計要領，1989. 4.
- 6) 阪神高速道路公団：設計基準 第2部 構造物設計基準(橋梁編)，1990. 6.
- 7) 日本鋼構造協会：JSS II08-1983 鋼床版用U型钢，1983
- 8) 鈴木・加賀山・尾下・岩崎・堀川：鋼床版横リブの設計手法と疲労試験，構造工学論文集，Vol. 37A, pp1169～1179, 1991. 3
- 9) 藤原・村越・田中：鋼床版横リブスリット周辺の疲労強度，図-11 スリット上縁の応力度に及ぼすスリット幅の影響，構造工学論文集，Vol. 37A, pp1151～1162, 1991. 3
- 10) 三木・館石・高木：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析，構造工学論文集，Vol. 37A, pp1163～1168, 1991. 3
- 11) JIS G 3912 (1977)：熱間圧延形鋼の形状，寸法，重量及びその許容差，1977
- 12) 岩崎・名取・深沢・寺田：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策，横河橋梁技報，No. 18, pp. 36～52, 1989. 1
- 13) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1989. 10
- 14) 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，pp21～26, 1976. 8
- 15) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)，JSSCレポート，No. 1, 1989. 11
- 16) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説“鋼鉄道橋 第9章 床組”9.6”鋼床版の構造”，pp166～167, 1983. 4
- 17) (株)横河ブリッジ：会社案内，大阪支店，大阪工場，1990. 12
- 18) 成宮：橋梁製作における溶接の自動化システムの実用化，溶接技術，Vol. 36, No. 12, pp85～97, 1988. 12
- 19) 名取，深沢，寺田，寺尾：面外曲げを受けるすみ肉回し溶接部の疲労強度，横河橋梁技報，No. 19, pp37～45, 1990. 1



(平成4年1月10日受付)