

U形鋼リブを有する鋼床版ブラケットの静的挙動に関する実験的研究

ELASTIC BEHAVIOR OF BRACKETS IN ORTHOTROPIC STEEL DECK WITH U-SHAPED RIBS

小糸 秀幸*、笠井 啓二**、伊藤 満***

Hideyuki KOITO, Keiji KASAI and Mitsuru ITO

*工修 鋼建設技術研究所 (〒540 大阪市中央区大手前1丁目2番15号 日刊工業新聞・住友生命大手前ビル)

**工修 富士車輛鋼 (〒524 滋賀県守山市千代町1)

***工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525 滋賀県草津市野路町1916)

The elastic behavior of brackets in orthotropic steel deck with U-shaped ribs are experimentally investigated. Five specimens containing two brackets with effective width of the deck plate, simply supported beams with two different ratios of the bending moment to the shear force are tested under the static single load. The test results are compared with analytical results based on both the beam theory taking account of Vierendeel action and the finite element method. The bending and shearing behavior of the web section containing the U-shaped ribs of such brackets are evaluated.

Key Words : bracket, elastic behavior, U-shaped ribs

1. はじめに

鋼床版橋では橋梁の長大化とともに剛性の高いU形鋼リブが使用されるようになり、1980年には日本鋼構造協会から鋼床版用U形鋼のJSS規格¹⁾が作成され今後益々多用される傾向にある。

鋼床版構造の中で横リブとU形鋼リブとが交差する部分は、横リブ腹板にU形鋼リブを通すための大きな切欠(スリット)が設けられている。そのためこの部分は、横リブの腹板断面積が大幅に減少するとともに、デッキプレートを含めて薄い鋼板が密に交差する極めて複雑な構造であるため構造上の弱点となる。例えば、スリット周辺には孔あき腹板特有のフィーレンディール作用による付加モーメントが作用し、スリットのコーナー部には通常のほりには見られない複雑な応力が作用する。現状では鋼床版横リブ断面の設計上の補強対策として、横リブ腹板を増厚する方法、横リブと縦リブの交差部において縦リブ断面にダイヤフラムを設ける方法、交差部において縦リブ底面を横リブ腹板と溶接する方法などが経験的に行われているようである。また、横リブ腹板に垂直スティフナーを設ける場合も、U形鋼リブとU形鋼リブの間に設けるのか、U形鋼リブ直下に設けるのかということも明らかにされていないのが実情である。

鋼床版横リブの静的強度に関する研究では、1960年代後半から1970年代にかけて、K.Kunert²⁾、K.Kunert、

P.Wagner³⁾、大村、上野谷、金谷⁴⁾らのものがあるが、いずれも開断面縦リブ(平鋼)を横リブ腹板に通す部分のスリットに関するものであり、スリットは比較的小さいものである。また、成瀬⁵⁾は閉断面U形鋼リブを用いた鋼床版横リブ腹板のスカラップ周辺に生じる応力集中に関して、スカラップ形状を疲労・座屈強度の両面から十分検討する必要があることなどを指摘している。尾下⁶⁾はU形鋼リブを用いた鋼床版横リブの応力度分布に関して、以前からあった開断面リブスリットに対する照査方法を適用、一般化し、新たな横リブの設計方法を提案している。J.Falke⁷⁾はU形鋼リブを用いた鋼床版横リブについて、腹板の切欠によって減少した横リブ断面の有効剛度の近似計算法及び実験による横リブの崩壊挙動についての検討を行っている。また、横リブ腹板を孔あきばりとしてとらえ、横リブ腹板の極限強度について検討したもの⁸⁾などがある。鋼床版横リブの疲労強度に関する研究では、横リブとU形鋼リブの交差部の疲労強度に関する研究^{9, 10, 11)}、鋼床版の疲労損傷事例の報告^{12, 13)}などがある。

このように、鋼床版横リブの静的強度や疲労強度の特性は少しずつ解明されつつある。しかしながら、これらの研究は主桁と主桁間の鋼床版横リブを対象にしたものが多く、鋼床版張出部横リブ(ブラケット)を対象にしたものは少ないようである。

鋼床版ブラケットは構造上は張出しばりに近く、設計

表-1 標準断面寸法

Specimens		H1(mm)	H2(mm)	b/tf	Section ①			Section ②		
					M/V (m)	D/tw	D/ho	M/V (m)	D/tw	D/ho
Deck type	A-1	420	210	21.7	1.0	63.5	3.18	0.7	55.0	2.75
	A-2	240	120	21.7	1.0	48.4	1.82	0.7	42.0	1.58
Beam type	B-1	420	210	21.7	1.0	63.5	3.18	0.7	55.0	2.75
	C-1	420	210	21.7	0.5	59.2	2.96	0.2	44.7	2.23
-	C-2	240	120	21.7	0.5	45.1	1.69	0.2	34.0	1.28

ここに、b=下フランジ幅、tf=下フランジ厚、D=テストパネルの腹板高さ、ho=U形鋼リブとその底面下のスリットを含めた高さ、tw=テストパネルの腹板厚、M/V=支点からテストパネル断面までの距離。

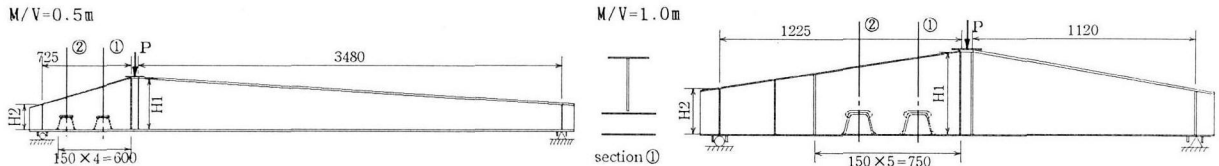


図-1 標準断面寸法(Beam-type)

上は片持ちばりとして計算される。このブラケット部分には、主桁間の鋼床版横リブを単純ばりとしてとらえた場合に比べて曲げモーメントが全く逆の方向に作用する。その上、断面の中立軸の位置はデッキプレート近傍にあるためブラケット腹板の圧縮領域は大幅に増加し、主桁間の横リブ腹板に比べてより厳しい状況下におかれる。

最近では、鋼床版張出部のスパンが5mを超えるものも建造されており、あらためて鋼床版張出部横リブの力学的挙動を明確にすることは重要であると思われる。本研究は、鋼床版ブラケットの合理的設計のための基礎資料を得ることを目的に、U形鋼リブを用いた鋼床版ブラケットの静的耐荷力実験及びFEM解析を行い、ブラケット断面のスリット周辺の静的弾性挙動を中心に考察を加えたものである。

2. 静的載荷実験

供試体は、鋼床版をデッキプレートの有効幅の位置で切断した鋼床版タイプ(Deck-type, 写真-1)と、これと等価な弾性中立軸を有するはりタイプ(Beam-type, 図-1)の2種類を、断面①(図-1)における曲げモーメント(M)とせん断力(V)の比M/V及び腹板高さHを変化させた合計5体を製作した。供試体の標準断面寸法を図-1、表-1に示す。鋼材はすべてSS400材を使用した。供試体の断面寸法は、我が国で架設されている鋼床版橋^{1), 14)}の中から、(1)全国平均値に近い横リブ腹板高さを有する供試体(A-1, B-1, C-1)、(2)横リブ腹板高さが全国平均値の約1/2となる供試体(A-2, C-2)とし、U形鋼リブはJSS規格¹⁾の中から呼び名300×220のものを選んだ。なお、載荷ジャッキの容量(100ton)を考慮して、断面寸法は1/2に縮尺してある。

Deck-typeの供試体はデッキプレートの有効幅の位置で切断した鋼床版を考えているため、切断する前の鋼床

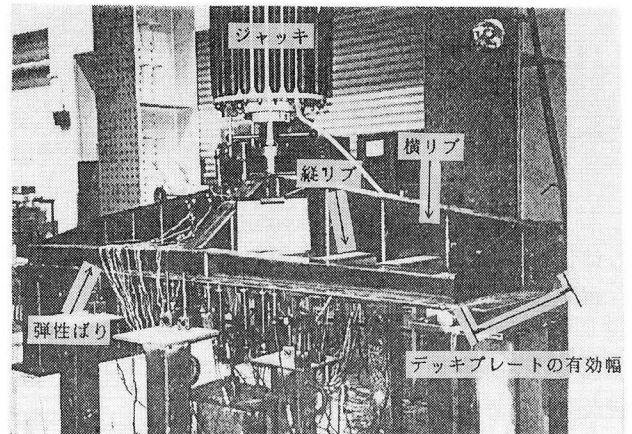


写真-1 載荷状況(Deck-type)

版と等価な剛性となるように切断位置に弾性ばり⁴⁾を用いた。また、Beam-typeの供試体はDeck-typeの供試体に近い応力状態が得られるように、フランジ断面積を調整することによって弾性中立軸がDeck-typeの供試体とほぼ同じ位置になるように選んだ。ブラケット断面のテーパは、従来から架設されている鋼床版橋ブラケットの寸法値を参考に1/2とした。実験は1点載荷とし、デッキプレート側が引張応力状態となるように通常の鋼床版をひっくり返した状態(図-1)で載荷を行い、載荷点位置が片持ちばりの固定端の状態に近くなるようにした。写真-1に供試体(Deck-type)の載荷状況を示す。

供試体を使用した鋼材の厚さは、下フランジに6mm、腹板に6mm(A-1, B-1, C-1)と4.5mm(A-2, C-2)、デッキプレートに6mm(A-1, A-2)と16mm(B-1, C-1, C-2)、U形鋼リブに3.2mmのものをを用いた。これらの鋼材の3本の引張試験片の材料引張試験による機械的性質の平均値を表-2に示す。

表-2 鋼材の引張試験結果

Thickness (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	極限強度 σ_u (MPa)	ポアソン比 ν	ヤング係数 $E (\times 10^3)$ (MPa)	せん断係数 $G (\times 10^3)$ (MPa)
3.2	419	526	0.232	201	81.9
4.5	298	410	0.234	212	85.8
6.0	316	446	0.266	214	84.5
16.0	263	452	0.270	207	81.4

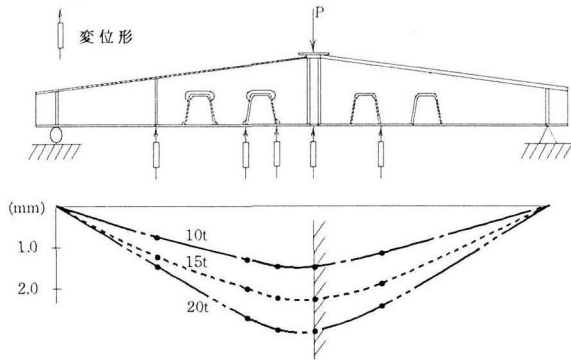


図-2 たわみ形 (A-1)

3. 実験結果及び考察

(1) たわみ曲線

図-2は、 $M/V=1.0m$ のDeck-type供試体A-1の腹板直下に設置した変位計の読みを各荷重段階において描いたたわみ曲線である。鋼床版ブラケットは設計上は片持ちばりとして計算されるが、本実験においてたわみ曲線は荷点直下ではほぼ左右対称になっており、ブラケットの片持ちばりとしての固定条件をほぼ満たしているのではないと思われる。

図-3は、各供試体の荷点直下に設置したダイヤルゲージの読みを横軸に、荷重を縦軸にとった荷重-たわみ曲線に、それぞれ弾性限荷重(P_y)、腹板座屈荷重(P_{wcr})、フランジ座屈荷重(P_{fcr})、崩壊荷重(P_u)を明記したものである。 P_y (▽印)は、荷重-たわみ曲線の弾性域(直線)からはずれる荷重として決定した。また、 P_{wcr} (▲印)は、スリット近傍の腹板断面の両面に貼付したひずみゲージの読みから、両面のひずみの差が急激に変化する荷重として、 P_{fcr} (▽印)は、下フランジ断面の両面に貼付したひずみゲージの読みから、その値が急激に変化する荷重としてそれぞれ決定した。

すべての供試体において、フランジ座屈荷重と崩壊荷重が同じであった。このことから、本実験の範囲内ではこの種の横リブの耐荷力は下フランジの局部座屈により決定されるものと思われる。これに比べて過去に行われた主桁間の鋼床版の耐荷力実験¹⁵⁾では、下フランジや腹板の変形後もデッキプレートや補剛材の膜作用などにより鋼床版全体の強度は上昇し、耐荷力は明確に得られておらず今回のブラケット部とは対照的である。また、同じ断面

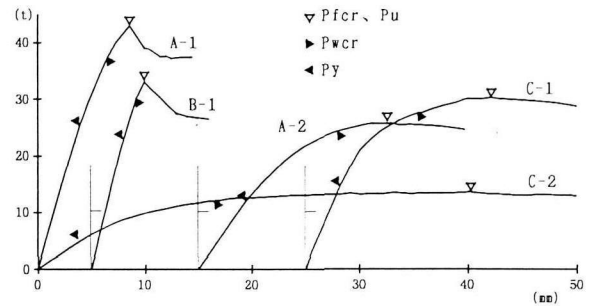


図-3 荷重-たわみ曲線

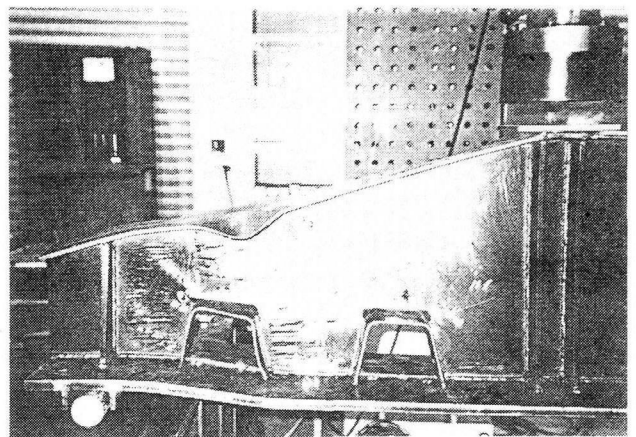


写真-2 供試体の崩壊形 (C-1)

寸法を有するDeck-type供試体A-1とBeam-type供試体B-1のたわみ曲線を比較すると、崩壊荷重こそ異なるがほぼ相似形を示している。このことから、供試体製作及び実験の容易性を考慮したBeam-type供試体は、応力・変形状を把握する場合は有効であると思われる。崩壊荷重が異なるのは、Deck-type供試体がデッキプレート、補剛材、弾性ばりなどの格子作用によって荷重が分配されるためであると思われる。

写真-2に供試体C-1の崩壊形を示す。 $M/V=1.0m$ の供試体(A-1,A-2,B-1)は、荷点側のU形鋼リブ断面において、また $M/V=0.5m$ の供試体(C-1,C-2)は、支点側のU形鋼リブ断面においてそれぞれ崩壊した。 $M/V=1.0m$ の供試体では、曲げモーメントの大きい荷点側のU形鋼リブ断面での崩壊から曲げ優先の崩壊形、 $M/V=0.5m$ の供試体では、曲げモーメントが小さくせん断の影響の大きい支点側のU形鋼リブ断面での崩壊が

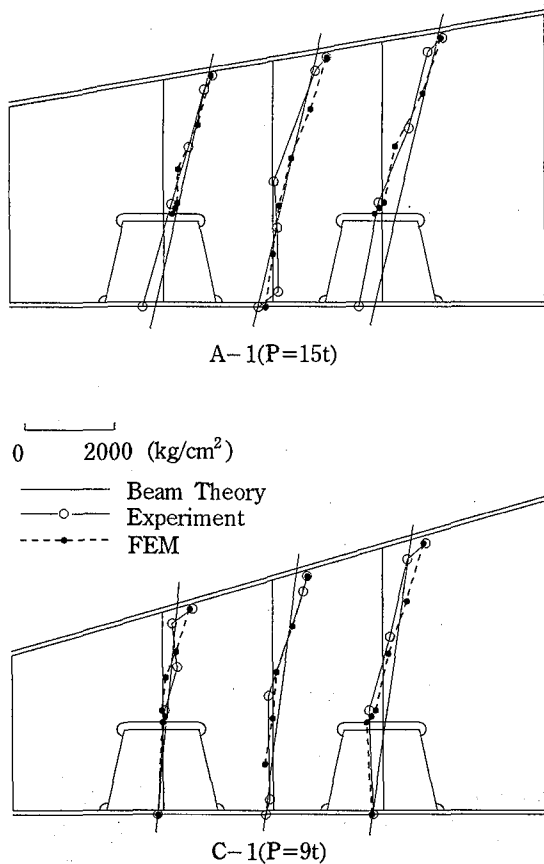


図-4 曲げ応力分布 (A-1, C-1)

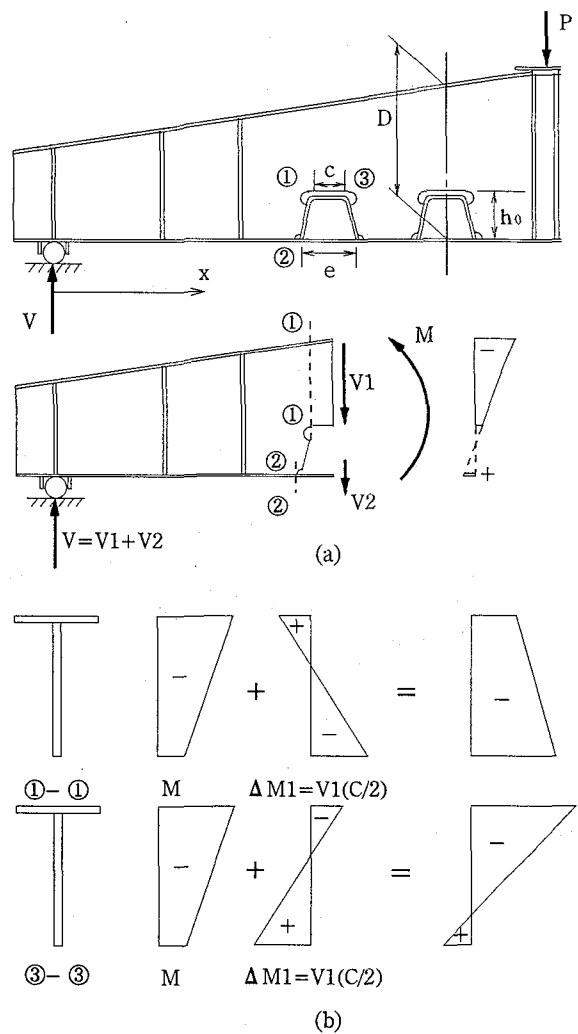


図-5 フィーレンディール作用

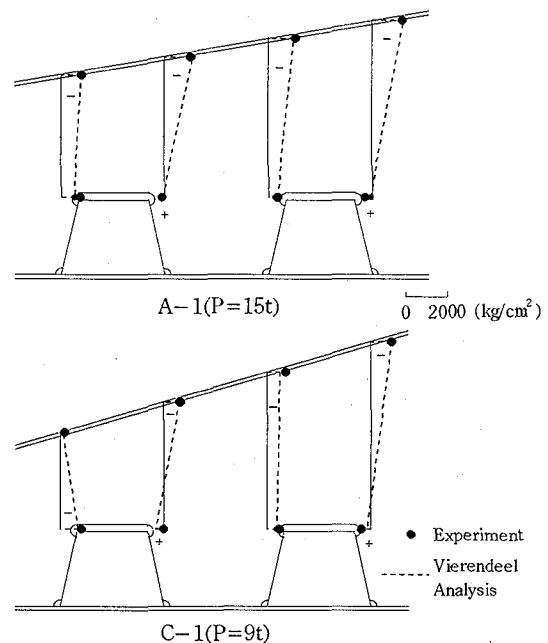


図-6 フィーレンディール作用による曲げ応力

らせん断優先の崩壊形を示していた。

また、すべての供試体において、U形鋼リブ直下の腹板に座屈変形が生じており、ブラケット断面を補強する際に垂直スティフナーを設ける場合には、この部分に設ける方が有効であると思われる。

(2) 曲げ応力

図-4はM/V比の異なる供試体A-1、C-1の腹板断面の曲げ応力分布で、実験値(○印)、はり理論値(実線)及びFEM解析値(●印)¹⁶⁾を示したものである。実験値とはり理論値を比較してみると、ほぼ一致しており他の供試体でも同様の結果となった。ここでのはり理論は、無孔ばりを対象にしている。したがって、曲げ応力分布ではM/V比やD/h₀比には関係がなく、U形鋼リブスリットを考慮しない通常のはり理論によって評価できるものと思われる。また、同じ断面寸法を有するDeck-type供試体A-1とBeam-type供試体B-1とを比較してみると、ほぼ同じ分布形を示していた。

(3) フィーレンディール作用

本研究で対象としているU形鋼リブを有する鋼床版横リブには、横リブ腹板にU形鋼リブを通すためのスリットが設けられており、このスリット周辺のデッキプレート、腹板及び下フランジによりラーメン構造が形成される。これにせん断力が作用することによって生じるフィーレンディール作用による付加モーメントなど、二

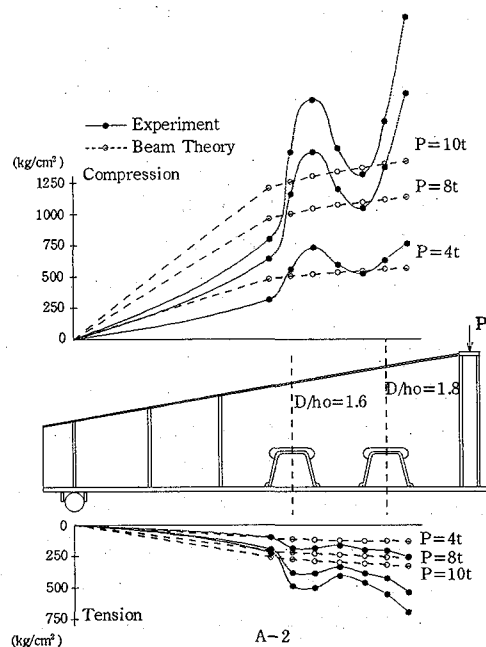
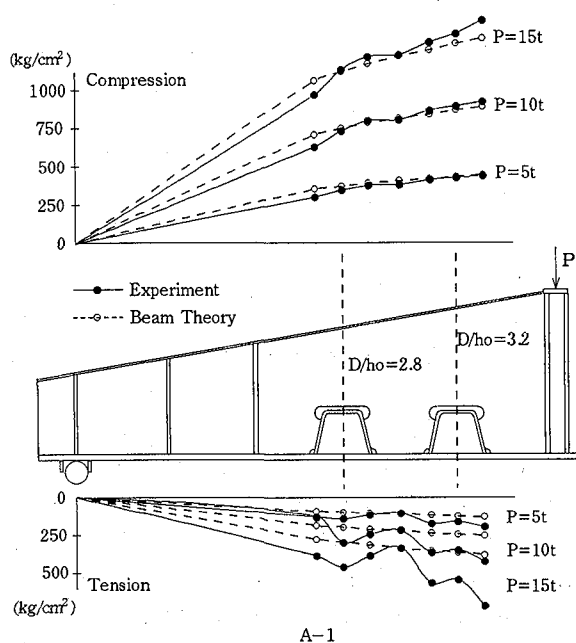


図-7 デッキプレート及び下フランジの応力の乱れ

次的な応力が作用するものと一般的に考えられている。

このフィーレンディール作用を検討するために、図-5のような仮定をする。まず、曲げモーメント $M=V \cdot x$ およびせん断力 $V=V_1+V_2$ が U 形鋼リブスリット中心断面に作用するものとする〔図-5(a)〕。ここで、 x は支点からの距離、 V_1 、 V_2 はそれぞれ U 形鋼リブスリット以下の腹板と下フランジからなる T 形断面と、デッキプレート断面とに作用するせん断力である。 V_1 、 V_2 は次のように計算される。

$$V_1 = V \left(\frac{I_1}{I_1 + I_2} \right) \left(1 - \frac{h_0}{D} \right), \quad V_2 = V \left(\frac{I_2}{I_1 + I_2} \right) \left(1 - \frac{h_0}{D} \right) \quad (1)$$

ここで、 I_1 、 I_2 はそれぞれ T 形断面、デッキプレート断面の断面二次モーメント、 h_0 は U 形鋼リブとその底面下のスリットを含めた高さ、 D はその断面での h_0 を含めた腹板高さである。図-5(b) に、せん断力によって断面①-①および断面③-③に生じる付加モーメント $\Delta M_1 = V_1 (C/2)$ を示す。ここに、 C は U 形鋼リブの下部幅である。

図-6 にフィーレンディール作用を考慮した、供試体 A-1、C-1 の U 形鋼リブスリットコーナー部断面の曲げ応力を示す。実験値 (●印) と理論値 (点線) とを比較するとよく一致しており、他の供試体でも同様であった。したがって、せん断力の大きさと D/h_0 を考慮することによってフィーレンディール作用による二次的応力を推測することができる。

また、図-7 には $M/V=1.0\text{m}$ の供試体 (A-1, A-2) のデッキプレート及び下フランジの曲げ応力を示している。

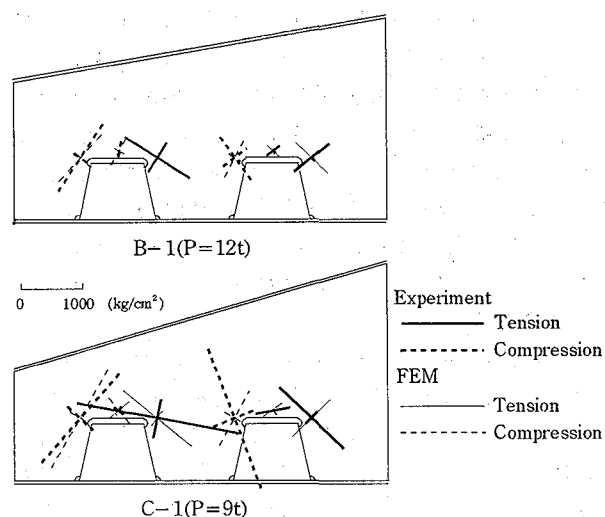


図-8 主応力分布

実線 (—●—) は実験値を、破線 (—○—) は U 形鋼リブ及びスリットを考慮しない通常のはり理論を示している。デッキプレート側では、 D/h_0 値の大小に関係なく応力の乱れ (実験値と理論値との差) はほぼ同じ程度である。Deck-type 供試体 A-1 と Beam-type 供試体 B-1 とを比べると、Deck-type の方が Beam-type に比べてデッキプレート側の応力の乱れは小さくなっていた。これは、Deck-type (A-1) は有効幅分のデッキプレートを有するためデッキプレートの膜作用が働いたものと思われる。また、図-7 において下フランジ側では、 D/h_0 値が大きい供試体 (A-1) では応力の乱れがほとんど見られないのに対して、 D/h_0 値が小さい供試体 (A-2) では応力の乱れが大きく、フィーレンディール作用の影響

響が大きいものと思われる。M/V=0.5mの供試体(C-1, C-2)では、デッキプレート側ではD/h_o値の大小に関係なく応力の乱れは大きく、せん断の影響を強く受ける支点側だけではなく、載荷点側においても圧縮と引張が交互に生じるほど応力の乱れが大きかった。また、下フランジ側では、D/h_o値が約3.0以上であると応力の乱れは極めて小さいが、D/h_o値が約2.0以下であると圧縮側であるにもかかわらず引張側の応力が生じるほど応力の乱れが大きかった。

このようなことから、D/h_oが小さく、せん断の影響が大きいほどフィーレンディール作用の影響が大きいために、応力の乱れが大きくなるものと思われる。

(4) 主応力

M/V比の異なるBeam-type供試体(B-1, C-1)の、降伏応力(P_y)の約60%荷重時におけるU形鋼リブスリット周辺の主応力の大きさと方向を図-8に示す。主桁間の鋼床版横リブのように断面が等断面の場合には、U形鋼リブのコーナー付近の応力集中はどの断面位置においてもほぼ同じくらいの値あるいは載荷点側で大きな値を示す^{8), 15)}ことに対して、このような断面のU形鋼リブのコーナー付近の応力集中は載荷点から遠い側の断面の方が大きい値を示している。これは横リブ断面が変断面であるために、U形鋼リブ底面下の断面二次モーメントが急減し、大きなせん断応力が作用するために生じるものと思われる。また、せん断の影響が大きいM/V=0.5mの供試体C-1の方が大きい値を示しており、局所的な応力集中に対してシャースパンM/V比の大きさに注意する必要があると思われる。

(5) せん断応力

図-9に供試体C-1の腹板のせん断応力分布を示す。図中実線は、U形鋼リブの間の腹板断面には通常のはり理論から得られた計算値を、U形鋼リブ直下の腹板断面にはその腹板と下フランジから成るT形断面に対するはり理論から得られた計算値をそれぞれ示す。実験値(○印)と理論値(実線)とを比較してみると、U形鋼リブ直下の腹板断面では実験値が理論値内にあり、はり理論により安全側に評価できるものと思われる。しかし、U形鋼リブ間の腹板断面では特にデッキプレート側で実験値が理論値よりも大きく、供試体C-1では、約2倍近くも大きくなっている。これは、このような鋼床版構造ではU形鋼リブ間の比較的断面欠損の大きい腹板断面に大きな水平せん断力が作用するためであると思われる。

(6) 水平せん断応力

デッキプレートと腹板との間の水平せん断応力を予測するために、U形鋼リブの中心断面の間に曲げモーメントM₁、M₂とせん断力V=V₁+V₂=V₃+V₄が図-10(a)のように作用するものと仮定する。ここで、せん断力VはU形鋼リブ直下のT形断面およびデッキプレート断面の断面二次モーメントの比によって分配され

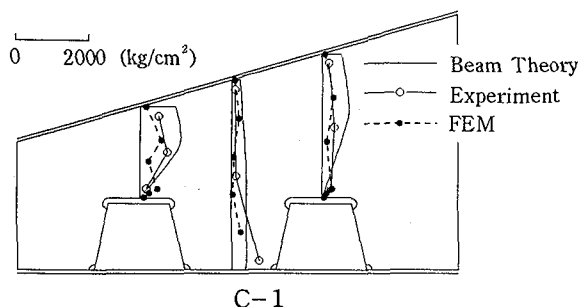


図-9 せん断応力分布

るものとする。抵抗曲げモーメントのアームZ₁、Z₂は、I_N/G_Dとなる。ここで、I_Nは中立軸に関する断面二次モーメント、G_Dは中立軸に関するデッキプレートの断面一次モーメントである。このとき、軸力M₁/Z₁、M₂/Z₂がデッキプレートの中心に作用すると仮定すると、図-10(b)のような水平せん断力が次式によって得られる。

$$T = \frac{2e(V_1 + V_3)}{2Z_2 - t_u} - \frac{2M_1(Z_1 - Z_2)}{Z_1(2Z_2 - t_u)} \quad (2)$$

したがって、水平せん断応力τ*はτ* = T/(e·w)で与えられる。ここで、t_uはデッキプレート厚、eはU形鋼リブの上部幅、wは横リブ腹板厚である。

実験値τとτ*との比較を図-10(c)に示す。実験値を縦軸に、理論値を横軸にとり、腹板の降伏せん断応力τ_y = σ_y/√3でそれぞれ無次元化している。M/V=1.0mの供試体(A-1, A-2, B-1)及びM/V=0.5mの供試体C-1については、実験値と理論値の良い一致をみることができた。しかし、M/V=0.5mの供試体C-2は、実験値と理論値の間になんかの差がある。これは、供試体C-2がM/V比が小さく、腹板高も小さいためにせん断の影響を強く受け、このような断面には非常に大きな水平せん断力が生じたためと思われる。

4. FEMによる応力集中の緩和

FEM解析には汎用非線形構造解析プログラムMARC¹⁶⁾を使用し、解析モデルは実験供試体の標準断面寸法(表-1)と同一寸法とした。ここではBeam-type供試体B-1の腹板高さを4段階(H=240, 330, 420, 510mm)に変化させ、断面のテーパー(1/2)が一定の場合のU形鋼リブスリット周辺の応力集中の大きさを比較し、どの程度の腹板高さで応力集中が緩和されるかを検討した。図-11にM/V=1.0mに対する解析モデルの腹板高さを横軸、応力集中の大きさを腹板の降伏応力で無次元化したものを縦軸にとったものを示す。ここでの荷重は、それぞれの解析モデルの降伏荷重(P_y)の約60%時のものとした。図を見ると腹板高さが400mm前後(D/h_o≒2.2)で

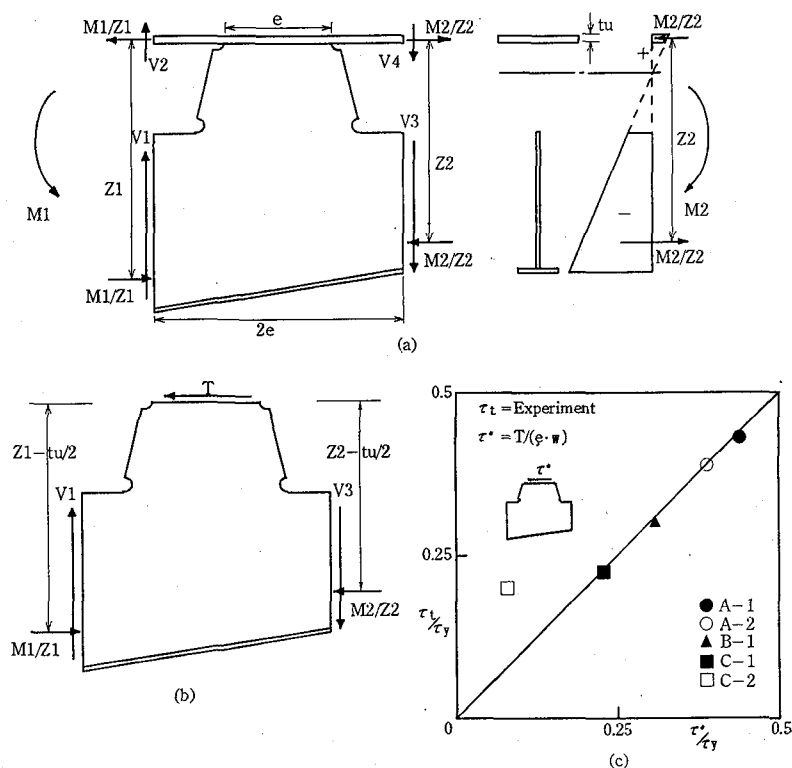


図 - 10 水平せん断応力

応力集中の大きさが大きく変化しており、この辺りが応力集中が緩和される腹板高さであると思われる。これは、腹板高さの全国平均値 (420mm) に近い値となっている。

5. まとめ

本研究では、U形鋼リブを有する鋼床版ブラケットの静的耐荷力実験を行い、主にブラケットの弾性挙動について実験結果、はり理論、FEM解析による比較検討を行い、考察を加えた。以下に、本研究により得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 鋼床版ブラケットと主桁間の鋼床版横リブとの違いについて

①耐荷力特性について

主桁間の鋼床版横リブの耐荷力は、腹板や下フランジの変形後もデッキプレートの膜作用などにより全体としての強度は上昇するが、鋼床版ブラケットの耐荷力は、圧縮応力を受ける下フランジの局部座屈によって決定される。

②スリット近傍の応力集中について

主桁間の鋼床版横リブのスリット近傍の応力集中は、どの断面位置においても同じ位の大きさとなるが、鋼床版ブラケットの場合は、断面二次モーメントが減少していくブラケットの自由端に向かう程、応力集中は大きくなる。

(2) 鋼床版ブラケットの曲げ応力分布は、U形鋼リブを考慮しない通常のはり理論によりほぼ評価できる。

(3) フィーレンディール作用の影響は、せん断力 V 及び

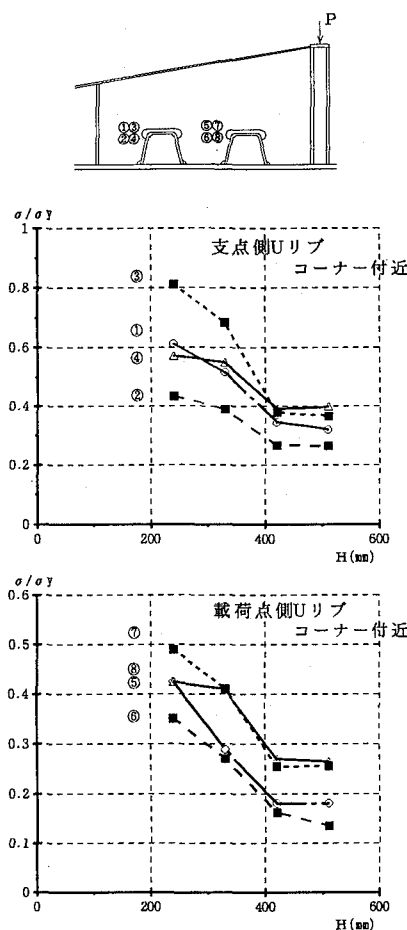


図 - 11 応力集中の緩和

(3) フィーレンディール作用の影響は、せん断力 V 及び h_o/D の大きさに関係し、U形鋼リブスリットコーナー部分を通る断面において、式 (1) より計算される付加モーメントを考慮した曲げ応力は実験値と良く一致する。

(4) U形鋼リブ直下の T 形断面のせん断応力分布は、はり理論を用いて安全側に評価でき、U形鋼リブ間の腹板とデッキプレートとの間の水平せん断応力は、せん断の影響を強く受ける供試体 C-2 を除き、式 (2) より評価することができる。

(5) U形鋼リブ底面下のスカーラップ周辺の応力集中を緩和するためには、横リブ腹板高さを 400mm 以上 ($D/h_o > 2.2$) に選ぶことが望ましい。

(6) 実験供試体および FEM 解析モデルの崩壊形より、鋼床版ブラケット断面の補強のために垂直スティフナーを設ける場合には、U形鋼リブ直下の腹板に設ける方が有効である。

(7) Deck-type 供試体と比較して、供試体製作および実験の容易性を考慮した Beam-type 供試体は、耐荷力は異なるが応力性状を把握する場合は有効である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会標準化委員会 Uリブ規格作成小委員会：鋼床版用 U形鋼の JSS 規格、橋梁と基礎 Vol.14, No.7, pp.16~24, 1980 年 7 月
- 2) Kunert, K. : Einige Überlitterung von Stahlbrücken am Beispiel der Mainbrücke Hochheim, Bauingenieur, 42, S.313~326, 1967 年 9 月
- 3) Kunert, K. und Wagner, P. : Querrippen orthotroper Platten mit an den Durchdringungspunkten der Längsrippen geschlitzten stegen, Bauingenieur, 43, S.244~249, 1968 年 7 月
- 4) 大村裕 上野谷実 金谷和久：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 Vol.10, No.8, pp.21~26, 1976 年 8 月

5) 成瀬輝男：ゴールデンホーン橋の構造特性、土木学会論文報告集 第 241 号, pp.25~38, 1975 年 9 月

6) 尾下里治：特殊な形状を有する部材の応力度計算法、横河橋梁技法 No.13, pp.18~32, 1983 年 11 月

7) Falke, J. : Theoretische und experimentall Untersuchungen zu Querfragen orthotroper Platten und deren näherungsweise Berechnung, Bauingenieur, 59, S.131~136, 1984 年

8) M.Ito K.Fujiwara K.Okazaki : Ultimate Strength of Beams with U-Shaped Holes in Top of Web, Journal of Structural Engineering Vol.117, No.7, pp.1929~1945, 1991 年 7 月

9) 藤原稔 村越潤 田中良樹：鋼床版横リブのスリット周辺部の疲労強度、構造工学論文集 Vol.37A, pp.1151~1163, 1991 年 3 月

10) 三木千寿 館石和雄 高木千太郎：鋼床版縦リブ、横リブ支持部の応力実測とその分布、構造工学論文集 Vol.37A, pp.1163~1168, 1991 年 3 月

11) 鈴木巖 加賀山泰一 尾下里治 岩崎雅紀 堀川浩甫：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, pp.1169~1179, 1991 年 3 月

12) 土木学会鋼構造委員会 鋼床版の小疲労委員会：鋼床版の疲労、土木学会論文集 第 410 号, I-12, pp.25~36, 1989 年 10 月

13) 中井博：都市高速道路橋の疲労損傷事例、橋梁と基礎 Vol.24, No.2, pp.23~31, 1990 年 2 月

14) 渡辺昇 大島久：鋼床版設計実例の全国調査と鋼床版の経済設計、橋梁と基礎 Vol.10, No.9, pp.6~10, 1976 年 9 月

15) 阪神高速道路公団 立命館大学理工学部土木工学科：鋼床版の耐荷力に関する実験的研究、1981 年 3 月

16) 日本マーク株式会社：MARC プログラムユーザーズマニュアル Vol.A~Vol.D, 1994 年 1 月

(1996 年 9 月 6 日受付)