

合理化鋼床版におけるUリブ・横桁交差部の構造に関する実験的研究

Structural Details' Experimental Study Regarding a Simplified Orthotropic Steel Deck's Trapezoidal Ribs and Floor Beam Intersections

勝俣 盛*, 小笠原 照夫**, 町田 文孝**, 溝江 慶久***

Mori KATSUMATA, Teruo OGASAWARA, Fumitaka MACHIDA and Yoshihisa MIZOE

- * 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室, 主任 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)
 ** 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室, 主幹 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)
 *** 工修 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)

For the last several years, we have studied the local stress characteristics for the joint situated between the trapezoidal ribs and floor beams in simplified orthotropic steel decks. It was determined by the full-scale test specimen's static loading test results that when loading occurs where the trapezoidal rib's web intersects the diaphragm, that significant local stress is generated at the toe of the rib-side boxing weld in the rib weld plate joint. In an effort to effectively decrease local stress, we designed various new types of structures for the intersecting section and compared their results with those of the static loading tests. The experimental study aimed to improve the intersection point by welding the rib's bottom flanges to the floor beam's webs resulted in the large local stress being decreased by approximately 1/4 when compared to the traditional structure.

Key words : simplified orthotropic steel deck, out-of-plane deformation, local stress

1. まえがき

既往の研究報告^{1)~9)}から、鋼床版は閉断面縦リブ(以下、Uリブと称する)と横リブまたは横桁が交差する部位に設けられるスリット周りが疲労上弱点になりやすいとされている。

本研究で対象としている合理化構造は、デッキプレート¹⁰⁾の厚板化とUリブの大型化を図り、Uリブ断面の剛性を向上させることによって、横リブを廃止するとともにUリブ支間を従来構造の約2倍に拡大した構造である。そのため、従来構造と比較してこの部位に発生する局部応力の橋軸直角方向影響線が長く、橋軸直角方向の載荷位置や密閉ダイヤフラムの有無が交差部の変形挙動に大きく影響をおよぼすことが判明した^{4)~7)}。中でもUリブの現場継手部に設置される密閉ダイヤフラム位置に荷重を偏載した場合は、この部位に大きな局部応力が発生する。さらに、従来構造と比較してUリブ間隔が広い¹¹⁾ため、輪荷重がUリブの片側腹板上のみを走行する確率が高く、Uリブ腹板上でかつ密閉ダイヤフラム位置に輪荷重が載荷される頻度も高くなることが予想される。特に、スリット上縁のまわし溶接Uリブ側止端部は、応力集中の程度が著しく、疲労強度の観点から構造上の弱点となることが懸念される。

この応力集中は、Uリブが密閉ダイヤフラムによって断面形状を保持した状態で回転変形し、この回転が横桁ウェ

ブで拘束されるため、Uリブ側止端を起点にしてUリブ腹板が面外曲げ挙動を示すことに起因する。そこで、この応力集中を抑制するために各種ディテールを考案し、FEM解析によってその効果を比較検討した⁷⁾。

この検討から、有効なディテールはスリット上縁を上方に移動する構造、もしくはUリブの底面を拘束する構造であると考えられた。そこで本研究では、これらを実物大の大型試験体に適用し、静的載荷試験によって実構造での応力低減効果を実験的に比較検討した。本文は、この実験結果について報告するものである。

ただし、実橋では舗装とデッキプレートの合成効果や荷重の分散効果により、交差部に発生する局部応力が低減することが明らかにされている^{8)~10)}が、今回の実験では改良構造の比較検討が目的であるため、舗装の効果は考えないことにした。

2. 実構造への適用

2.1 試験体の概要

試験体を図-1に示す。試験体は、主桁間隔(G1~G2)を4,500mm、横桁間隔(C1~C4)を3@5,000mm、デッキプレートの板厚を19mm、Uリブは450×330×8-40Rを採用し900mmピッチで配置している。図中のDia.はUリブの現場継手部に設けられる密閉ダイヤフラムを、D1~

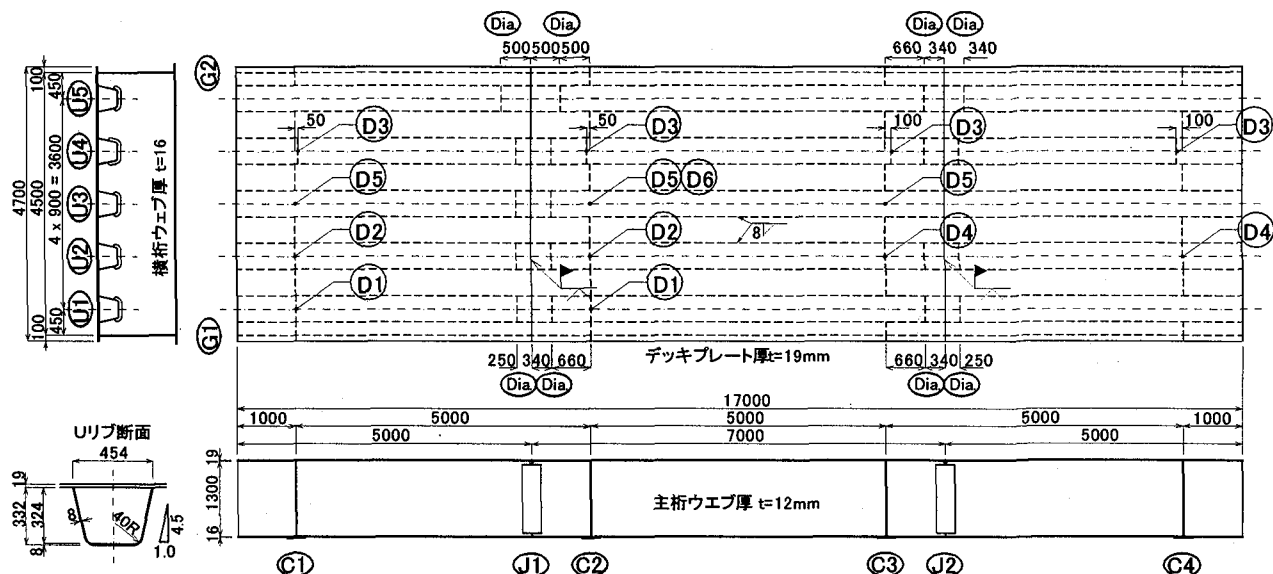


図-1 試験体

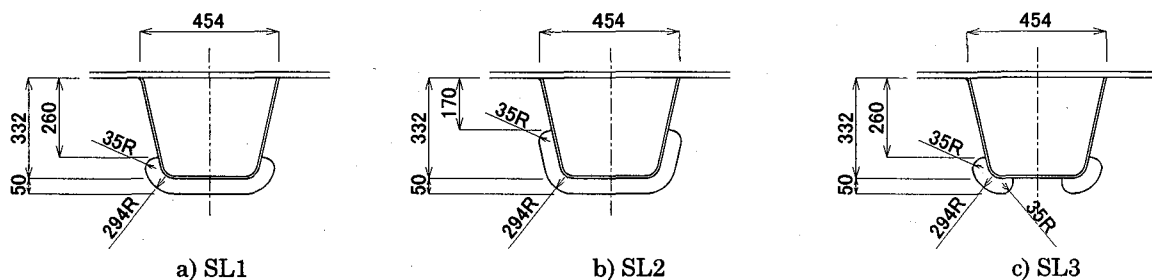


図-2 スリット形状

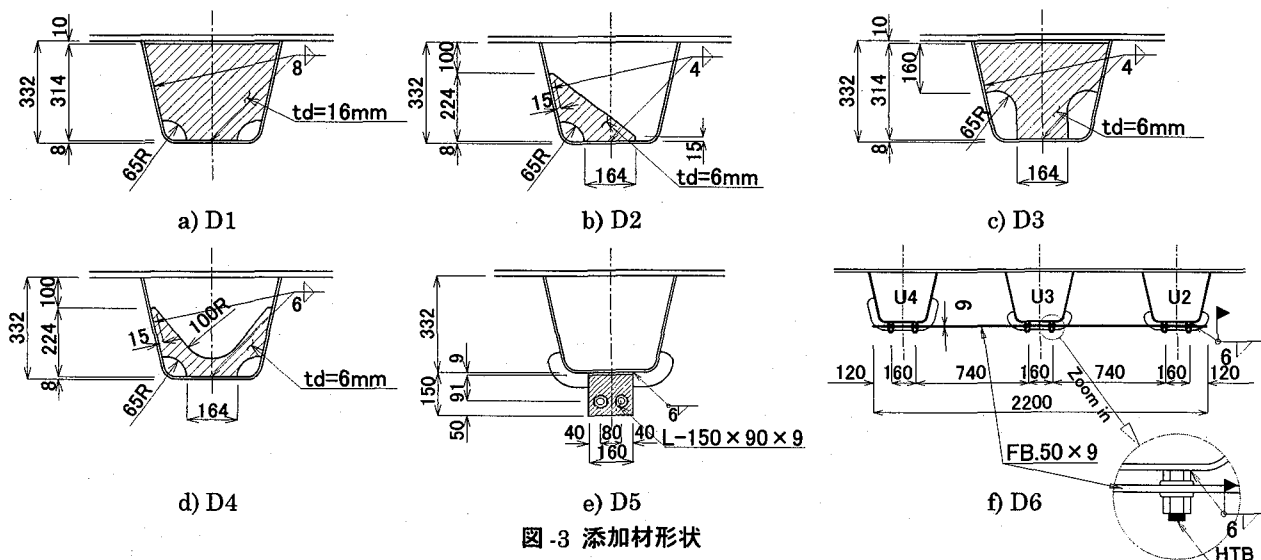


図-3 添加材形状

D6は図-3に示した添加材の設置位置をそれぞれ表す。

スリット形状を図-2に示す。SL1は、本州四国連絡橋公団基準¹⁾に準拠した構造で、スリットの曲率をこれよりも大きくし、開孔部を拡大した構造である。SL2は、Uリブ腹板の局部変形の範囲を広げる目的で、スリット上縁を上方に移動した構造である。SL3は、Uリブ底面と横桁ウェブを接合し、底面の側方移動を拘束する構造である。なお、Uリブ底面と横桁ウェブを接合すると、製作時に高度な精

度管理が要求され、省力化に繋がらないことが懸念されたが、合理化構造は従来構造よりもUリブ本数が少なく、横桁間隔を広げ交差箇所を大幅に低減していることから、本構造を採用しても製作工数の増加に繋がらないを確認した。

交差部の添加材形状を図-3に示す。D1～D4はUリブの内側から、D5とD6は外側から底面を拘束する構造である。D1は横桁作用力を伝達するため、取付け部の溶接構造がリブ十字継手となり、疲労強度の低下という問題が生じ

る。そこで、D2はこの横桁作用力を伝達させない目的で、片側のみから底面を拘束する構造とした。D3は、SL2による効果と底面の拘束を組み合わせた構造である。ただし、横桁作用力を伝達させないために、横桁位置から50mm離して設置した。D4は柔な構造とすることで、横桁作用力の低減を図った。D5は、外側から底面を拘束しSL3と同等の効果を期待する構造である。なお、本構造はUリブと横桁の製作誤差による不具合の解消を考慮しており、ここではUリブと山形鋼を溶接した後にHTBにて横桁と接合した。D6は、U2～U4リブの底面にそれぞれ2本のHTBを横桁から100mm離れた位置に溶接し、50×9×2200の平鋼でUリブ底面を連結することによって、Uリブ底面の橋軸直角方向への移動量を低減する構造である。

なお、支点は主桁と横桁が交差する直下とし、試験室内のテストフロアに鋼棒で硬締した治具上にゴム沓を介し、HTBで固定している。

2.2 静的载荷試験

(1) 試験概要

載荷荷重は98kN、載荷面は現行の道路橋示方書¹²⁾のT荷重に準じて橋軸直角方向に500mm、橋軸方向に200mmとした。

載荷方法は、デッキプレート上面に、敷き砂（約5mm厚）、ゴム板（厚さ10mm）、鋼板（200×25×500mm）、ジャーナルジャッキ、ロードセルを順次設置し、このジャッキのストロークを調整し、剛な梁で反力を取ることとした（写真-1）。この敷き砂は溶接ひずみによるデッキプレートの不陸の影響を取り除く目的で実施した。

なお、載荷強度はロードセルを介してデータロガーからリアルタイムで値を読み取り管理した。また、載荷前後でひずみを計測し、残留ひずみがないことを毎回確認した。

(2) 計測位置

計測部位は、交差部のまわし溶接Uリブ側止端部、横桁側止端部およびスリットの曲率変化部とした。これらの部位に3軸のロゼットゲージ（ゲージ長：1mm）を貼付し、データロガーにて載荷によるひずみ増分を計測した。なお、ゲージ貼付位置は、いずれも溶接ビード止端から5mm、こば面から5mmとした。また、横桁側止端部とスリットの

曲率変化部は、横桁ウェブの曲げ変形にともなう応力を調査するため、板の表裏面の同位置にゲージを貼付している。これらの測定値から、この局部応力を膜応力成分 σ_M と曲げ応力成分 σ_B に分解して整理することとした。

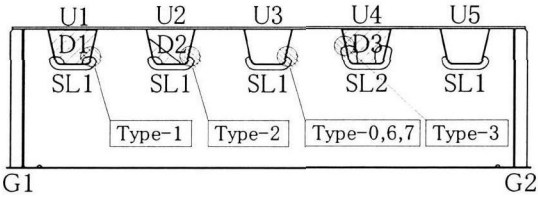
(3) 載荷ケース

載荷位置は、Uリブ腹板上を橋軸方向に移動載荷させるケースと、横桁から66cmの位置（密閉ダイヤフラム位置）を橋軸直角方向に移動載荷させるケースとした。

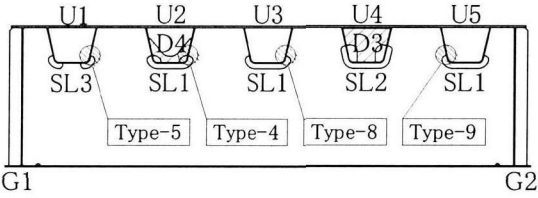
橋軸方向の場合は横桁位置を起点に密閉ダイヤフラム上とUリブ支間の1/2、1/4、1/10 および 1/20 に載荷し、橋軸直角方向の場合は横桁から66cmの位置（密閉ダイヤフ

表-1 着目部位と改良構造

名 称	着目部位			改良構造	
	U-Rib.	横 桁	Dia.	スリット	添加材
Type-0	U3	C2	有	SL1	無
Type-1	U1				D1
Type-2	U2			D2	
Type-3	U4			D3	
Type-4	U2	C3		SL1	D4
Type-5	U1			SL3	無
Type-6	U3	C2		SL1	D5
Type-7		C3			無
Type-8	C3		有		
Type-9		U5			



a) C2 横桁



b) C3 横桁

図-4 交差部の断面

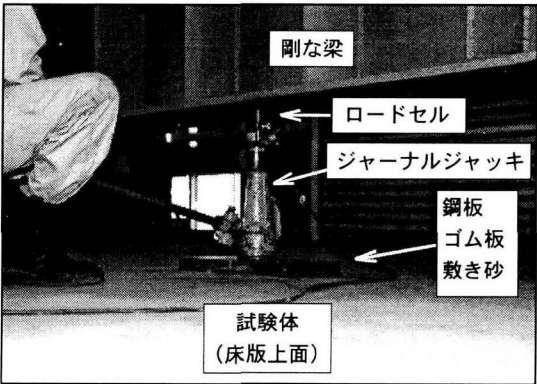


写真-1 載荷状況

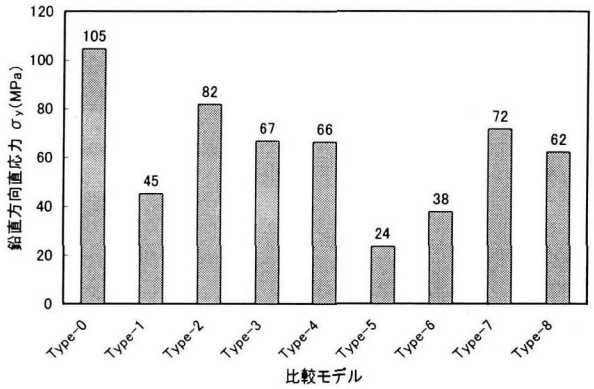
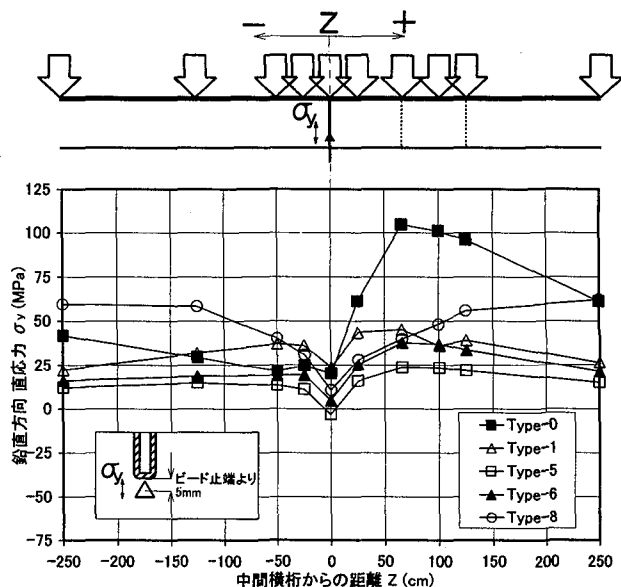
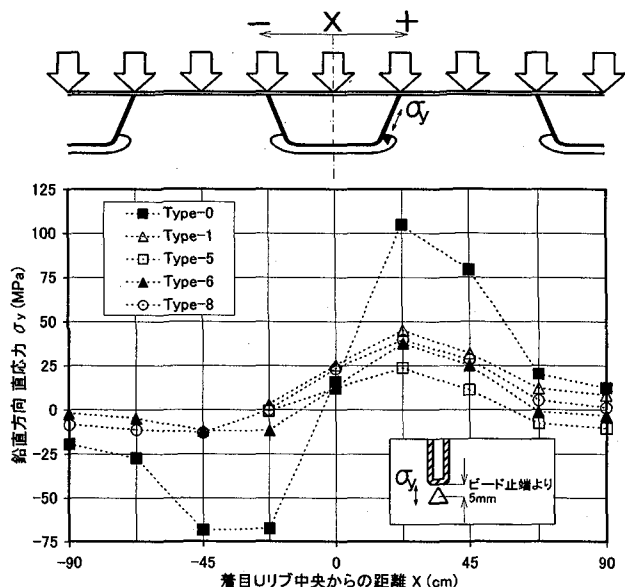


図-5 Uリブ側止端部の σ_y の最大値



a) 橋軸方向 (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)



b) 橋軸直角方向 (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)

図-6 Uリブ側止端部 σ_y の影響線

ラム位置)でUリブ中央、腹板上およびUリブ間中央に載荷した。

(4) 試験結果

ここでは、表-1に示した改良構造Type-0～8について、応力を比較する。それぞれの交差部の断面を図-4に示す。

Uリブ腹板上を橋軸方向に移動載荷させた際のUリブ側止端部の鉛直方向直応力 σ_y の最大値を図-5に示す。

その結果、基準となるType-0の σ_y が105MPaであるのに対し、改良構造では24～82MPaに低減し、それぞれの効果が認められた。

Type-1は、文献7)と同様に σ_y を約1/2に低減できることが確認できた。しかし、横桁作用力を伝達するリブ十字継手となり問題が残る。

Type-2は、左右対称構造でないため、載荷位置によってその効果が異なる。D2を設置しない側に載荷した場合は約8割に低減するが、設置した側に載荷した場合には約6割になった。

Type-3は、SL2とD3を併用した構造で、リブ十字継手構造となることを避けるため、D3をC2横桁から50mm離している。相乗効果を期待したが、ダイヤフラムを横桁位置から離すとその効果はほとんどなくなることがわかった。

Type-4は、柔なダイヤフラムとすることで横桁作用力を低減する構造であり、その効果はType-3と同程度であった。したがって、Uリブ底面の拘束効果は、ダイヤフラムの剛性に大きく関係することがわかった。

Type-5は、最も効果的で発生応力を約1/4に低減できることが判明した。先述したように、合理化構造は従来構造と異なり、Uリブや横桁が密に配置されないの、本構造を採用しても製作工数増には繋がらない。

Type-6は、Type-5の次に効果的であった。Type-5よりも製作性がやや劣る構造であるが、補修工法としても適用

できる。ここでは、Type-0を計測した後に設置したため、上向き溶接でUリブ下面に連結用の山形鋼を現場溶接した。本来は、製作時に横桁取付け前に下向き溶接でUリブに設置し、HTB接合することを想定している。

Type-7は、発生応力を約7割に低減できた。今回の実験では、着目Uリブと隣接するUリブ計3本を連結したが、さらに多くのUリブを連結することで、効果は大きくなると考えられる。

Type-8より、密閉ダイヤフラムを省略することによって、 σ_y を約6割に低減できることが判明した。したがって、合理化構造では、このダイヤフラムの有無によって、この部位の疲労強度が大きく異なると考えられる。

以上より、 σ_y の応力低減効果は以下の順になった。

Type-5 > Type-6 > Type-1 > Type-8

> Type-4 > Type-3 > Type-7 > Type-2

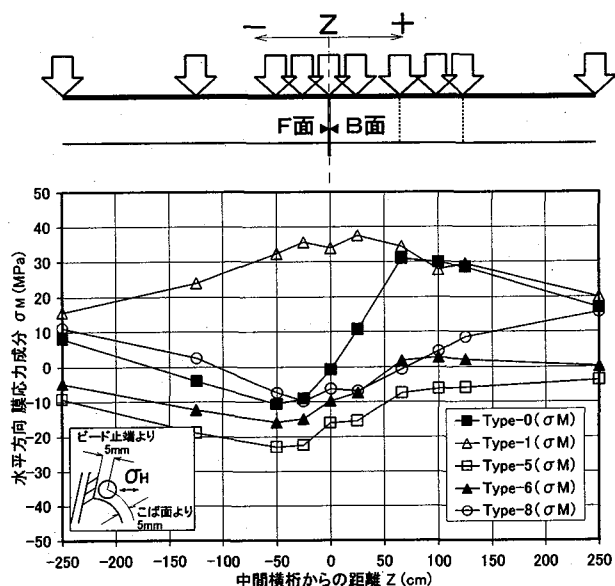
そこで、効果が認められたType-1,5,6と密閉ダイヤフラムがないType-8について、Type-0と詳細に比較検討したので次に記す。

3. 考察

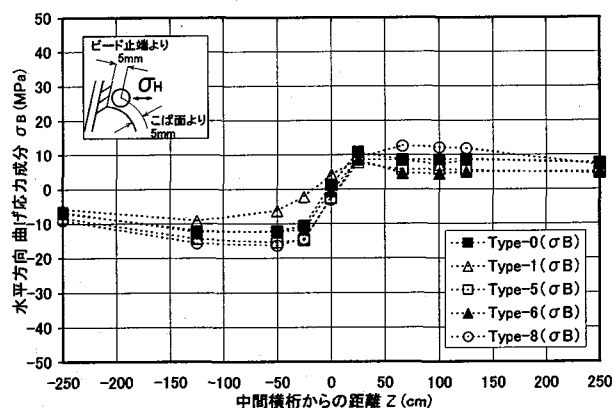
3.1 Uリブ側止端部

交差部のまわし溶接止端から5mmの位置に貼付した鉛直方向直応力 σ_y の結果を図-6に示す。

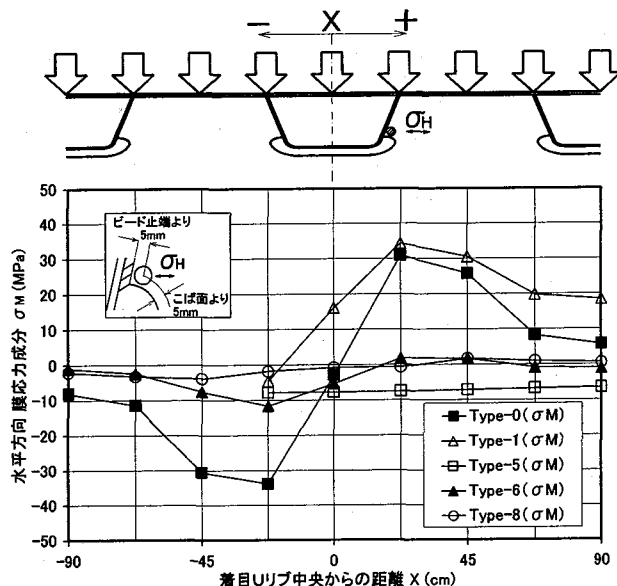
Type-0とType-8を比較すると、Type-0は密閉ダイヤフラムが設置された側に載荷すると大きな応力が発生するが、密閉ダイヤフラムがない側に載荷すると逆に応力が小さくなる。また、密閉ダイヤフラム位置のUリブ腹板上に載荷した時に大きな応力が発生する。これは、密閉ダイヤフラムが設置された側(中間横桁からの距離: $Z>0$)に載荷すると、Uリブが断面形状を保持したまま回転変形し、この回



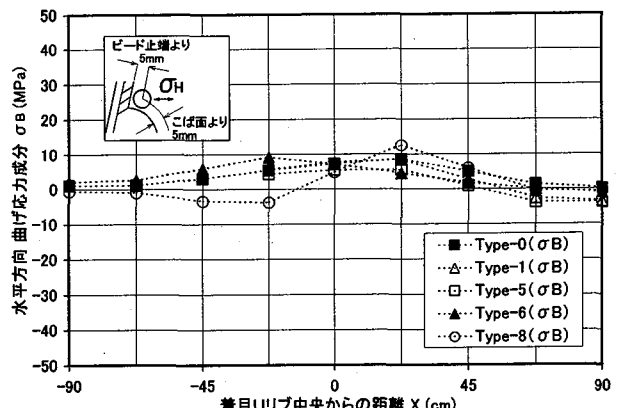
a) 橋軸方向の膜応力成分 σ_M (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)



c) 橋軸方向の曲げ応力成分 σ_B (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)



b) 橋軸直角方向の膜応力成分 σ_M (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)



d) 橋軸直角方向の曲げ応力成分 σ_B (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)

図-7 横桁側止端部 σ_H の影響線

転が横桁ウェブで拘束されるためである。しかし、密閉ダイヤフラムがない側 ($Z<0$) に载荷すると、Uリブが回転しないで断面変形するとともに、横桁の反対側にある密閉ダイヤフラムによって変形が拘束されるため、発生応力が小さくなると考えられる。

一方、Type-8はUリブ支間中央に载荷したとき、応力値が最大となるがType-2の6割程度に止まっている。これは、FEM解析の結果と一致しており、実構造においてもUリブの局部的な面外曲げ変形が小さいことが確認できた。

Uリブ底面をUリブ外側から拘束するType-5、Type-6は、横桁ウェブとの接合部からUリブ底面に圧縮力が作用し、引張力が相殺されるため、内側から拘束するType-1よりも発生応力が小さくなると考えられる。また、Type-5とType-6を比較すると、Type-5の方が応力の低減効果大きい。これは横桁のウェブ厚が16mmであるのに対して、Type-6は山形鋼の板厚が9mmと薄いことや、拘束する位置が板厚分橋軸方向に偏心しているためと考えられる。

以上より、Uリブ底面を拘束することにより、Uリブ側止端部の発生応力を大幅に改善できることがわかった。

3.2 横桁側止端部

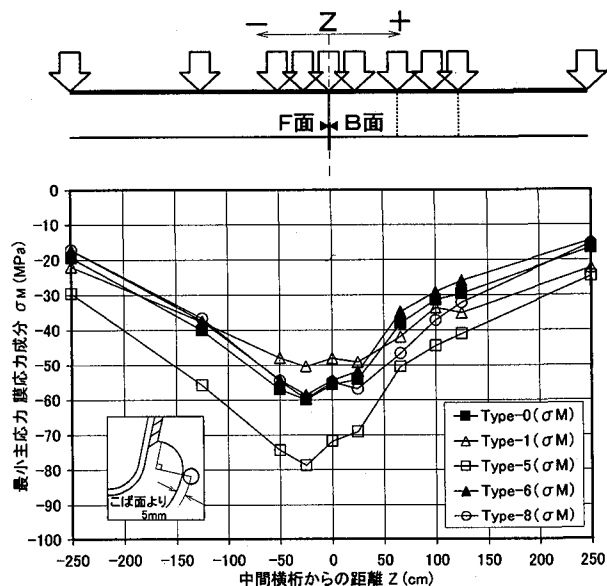
横桁側止端部の表裏面に貼付したゲージで計測した水平方向応力 σ_H を膜応力成分 σ_M と曲げ応力成分 σ_B に分解した結果を図-7に示す。これより、橋軸方向、橋軸直角方向とも膜応力成分が支配的であることがわかった。ここで、橋軸方向の曲げ応力成分は、変位誘起によるもので構造の相違にほとんど影響しないことがわかった。

Type-0とType-8の膜応力成分は、図-6に示したUリブ止端部の局部応力とほぼ同様の影響線形状をしていることから、Uリブの回転変形を拘束するための反力であると考えられる。

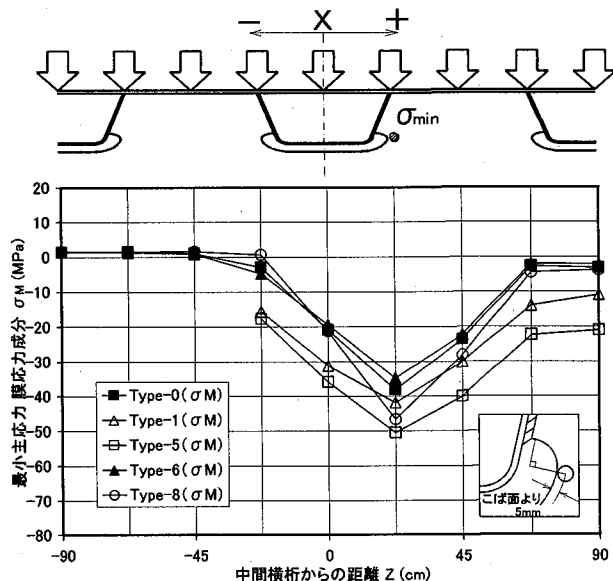
一方、Type-1の橋軸方向の影響線形状に着目すると、横桁位置を境にほぼ対称であり、Uリブの回転変形を拘束するための反力は、ほとんど発生していないと考えられる。したがって、Uリブ内にダイヤフラムを設置することによって、横桁側止端部には比較的大きな横桁作用力が生じることがわかる。

また、Type-5、Type-6のようにUリブ底面を外側から拘束すると、発生応力は圧縮応力になることがわかる。

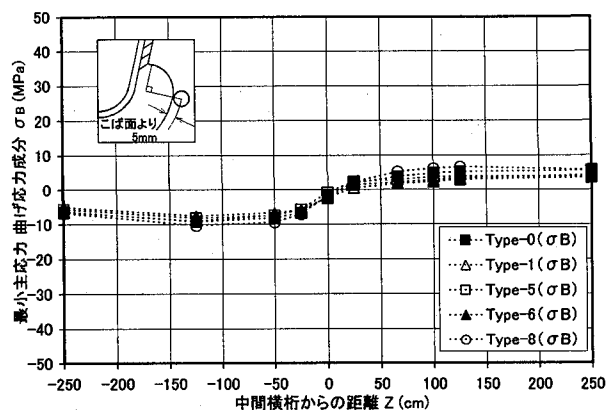
以上より、Uリブ底面をUリブ外側から拘束することに



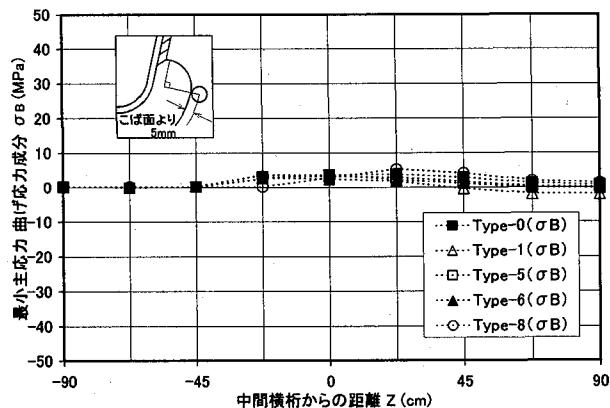
a) 橋軸方向の膜応力成分 σ_M (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)



b) 橋軸直角方向の膜応力成分 σ_M (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)

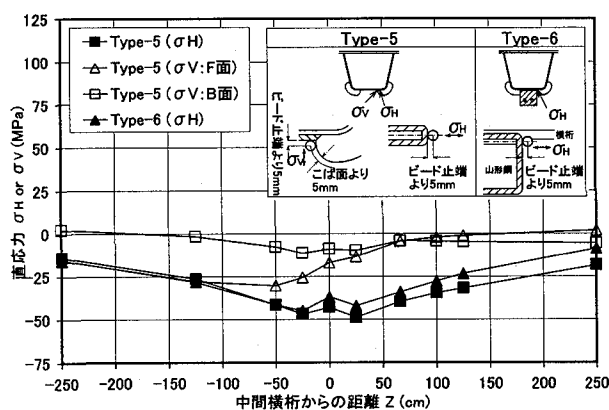


c) 橋軸方向の曲げ応力成分 σ_B (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)

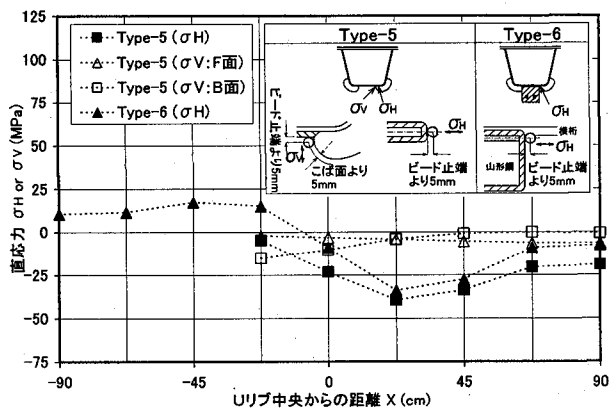


d) 橋軸直角方向の曲げ応力成分 σ_B (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)

図-8 スリット曲率変化部 $\sigma_{\min}$ の影響線



a) 橋軸方向 (载荷位置: $X=22.5\text{cm}$)



b) 橋軸直角方向 (载荷位置: $Z=66\text{cm}$)

図-9 その他部位の影響線

より、横桁側止端部の発生応力を大幅に改善できることがわかった。

3.3 スリット曲率変化部

スリット曲率変化部の表裏面に貼付した実測値 $\sigma_{\min}$ を

膜応力成分 σ_M と曲げ応力成分 σ_B に分解した結果を図-8 に示す。なお、表裏面の主応力の方向は、ほぼスリット接線方向で一致しており、成分の分解には影響しない。

横桁側止端部と同様に、膜応力成分が支配的であることがわかった。

影響線形状は全てのタイプでほぼ同じであり、また発生応力は全て圧縮である。したがって、スリット曲率変化部には、今回考察した改善構造による影響はあまりないものと考えられる。ただし、今回の実験では、Type-5が全体に大きな応力であった。

3.4 その他部位

ここでは、Type-5、Type-6の横桁とUリブ底面接合部のUリブ側止端とType-5の横桁側止端の表裏面(図中、表をF面、裏をB面で表記)の結果を図-9に示す。

Uリブ側止端の水平方向応力 σ_H に着目し、Type-5とType-6を比較すると、橋軸方向に载荷した際の応力変動は、ほぼ一致している。また、橋軸直角方向の影響線形状とはほぼ同じであるが、山形鋼をUリブ底面に全周溶接したType-6は、Uリブ底面の曲げ剛性が補強されたため、面で荷重が伝達され、Type-5よりも発生応力は小さい。また、発生応力は全て圧縮応力である。

次に、横桁側止端の鉛直方向応力 σ_V は、負の領域($Z < 0$)に载荷した場合には表裏面の差分から曲げ応力が卓越しているが、正の領域($Z > 0$)に载荷した場合には発生応力自体が極めて小さくなる。これを膜応力成分と曲げ応力成分に分解すると、同等であった。また、橋軸直角方向の影響線から、 $X=22.5\text{cm}$ のときに表裏面の応力増分勾配が反転している。したがって、Uリブの断面変形を拘束した効果が現れていると考えられる。

3.5 スリット部の鋼床版内の位置と発生応力の関係

スリット部の鋼床版内の位置の違いが着目部の発生応力に与える影響を調査する目的で、表-1に示したType-9について、他のディテール同様に影響線载荷を実施した。

Type-9は、Type-0と同一のディテールで鋼床版内の位置を主桁に隣接させたものである。各着目部の最大発生応力をType-0の結果とともに表-2に示す。この時の载荷位置と着目位置の関係は、Type-0とType-9で同じであった。

これより、载荷位置と着目位置の関係が同じであっても、発生応力はスリット部の鋼床版内の位置の違いによって異なり、主桁に隣接する方が大きくなることがわかった。したがって、Type-1,5の応力低減効果は、実際にはもっと大きいと考えられる。

表-2 スリット位置の相違による発生応力

	Uリブ側止端部 σ_y (MPa)	横桁側止端部 σ_H (MPa)		スリット曲率変化部 σ_{min} (MPa)	
		F面	B面	F面	B面
Type-0	105	40	22	-67	-53
Type-9	166	42	29	-85	-74

4. まとめ

合理化鋼床版のUリブと横桁が交差する部位の構造を数種類考案し、実験的に検討した。本研究によって得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) Uリブ止端部の局部応力を抑制するためには、交差部においてUリブ底面を拘束する構造が効果的である。特にUリブ底面と横桁ウェブを連結する方法が有効であり、局部応力を約1/4に低減することができる。
- (2) 横桁側止端部の局部応力は膜応力成分が支配的である。これは、先述のUリブの変形挙動から、Uリブ底面の橋軸直角方向への移動が止端部で拘束され、横桁側止端部にその反力が発生したためと考えられる。したがって、Uリブ底面の橋軸直角方向への移動を止めることによって、大幅に低減できる。
- (3) 以上より、合理化鋼床版のUリブと横桁が交差する部位は、横桁ウェブとUリブ底板を接合することが望ましいと考える。しかし、Uリブの内側からUリブ底面を拘束したType-1を採用する場合、この部位がリブ十字継手となり、疲労強度の低下が懸念されるため、外側から拘束したType-5, 6の採用が望ましい。

謝 辞

本研究を取りまとめるにあたり、日本道路公団・合理化鋼床版の検討会の委員の方々には、数々の有益なご助言とご指導をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 館石和雄, 竹之内博行, 三木千壽: 鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp109-119, 1995.1.
- 2) 三木千壽, 館石和雄, 奥川淳志, 藤井裕司: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp127-137, 1995.7.
- 3) 大橋治一, 藤井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越 潤: 鋼床版の現場継手部近傍の局部応力と変形挙動, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp65-76, 1997.1.
- 4) 大橋治一, 梁取直樹: 鋼床版実物大試験体の载荷試験結果, 本四技報, Vol.23, No.89, 1999.1.
- 5) 川瀬篤志, 溝江慶久, 町田文孝, 小笠原照夫, 勝俣 盛, 吉家賢吾: 合理化鋼床版構造のUリブ・横桁交差部の局部応力(その2), 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第I部, I-A201, 1998.9.
- 6) 小笠原照夫, 勝俣 盛, 町田文孝, 川瀬篤志, 溝江慶久: 鋼床版構造の合理化に関する検討・実験, 構造工学論文集, No.45A, pp1229-1240, 1999.3.
- 7) 勝俣 盛, 小笠原照夫, 町田文孝, 川瀬篤志, 溝江慶久: 合理化鋼床版構造のUリブ・横桁交差部の局部応力特性について, 構造工学論文集, No.45A, pp1240-1252, 1999.3.

- 8) 名古屋高速道路公社:鋼床版の合理化と耐久性向上に関する調査研究報告書,平成7年10月
- 9) 永田 考,岩崎雅紀:鋼床版構造の合理化に関する研究,横河ブリッジ技報,No.28,1999年1月
- 10) 小笠原照夫,吉家賢吾:鋼床版舗装の合成効果に関する実験,土木学会第54回年次学術講演会講演概要集共通セッション,CS-154,1999.9.
- 11) 本州四国連絡橋公団:鋼床版設計要領・同解説,1989.4.
- 12) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説,Ⅱ鋼橋編,平成8年12月.

(1999年9月17日受付)