

# 鋼床版の現場継手部近傍の局部応力と変形挙動

大橋治一<sup>1</sup>・藤井裕司<sup>2</sup>・三木千壽<sup>3</sup>・小野秀一<sup>4</sup>・村越潤<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 本州四国連絡橋公団 設計部設計第二課 (〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5)  
<sup>2</sup>正会員 工修 財団法人道路保全技術センター 橋梁技術部 (〒103 東京都中央区日本橋久松町9-9)  
<sup>3</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
<sup>4</sup>正会員 工修 社団法人建設機械化研究所 研究第二部 (〒417 静岡県富士市大沢3154)  
<sup>5</sup>正会員 工修 建設省土木研究所 橋梁研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

鋼床版の各細部構造の疲労に関係する局部応力や変形挙動に対するスカラップ等の構造ディテールやアスファルト舗装の効果を検討するために、実橋でのタイヤ載荷による応力測定を行うとともに、FEMにより解析した。その結果、疲労で問題となる縦リブ継手、縦リブ・横リブ交差部スカラップおよびスリット近傍ならびに現場継手部のスカラップ近傍の応力は、アスファルト舗装の影響を受け、その度合いは温度に大きく依存することがわかった。また、スカラップ近傍の局部応力・変形は、走行位置により複雑な挙動を示し、この挙動はFEM解析により説明できる。さらに、この解析によりデッキを厚板化した場合には局部応力や変形は、著しく低減され、対疲労および舗装の耐久性に効果的であることがわかった。

**Key Words :** orthotropic steel deck, asphalt pavement, local stress, fatigue, thick deck plate

## 1. はじめに

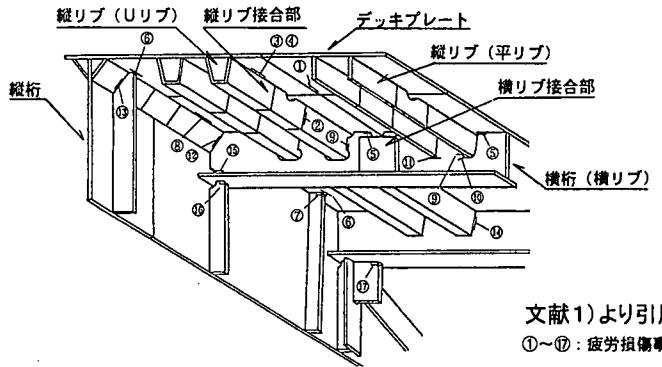
わが国では1959年に城ヶ島大橋で初めて鋼床版が採用されて以来、着実にストックは増え、初期に建設された鋼床版は供用後30年を迎える時期に達している。鋼床版は死荷重を軽減できることから、長大スパン橋梁の床版として用いられることが多い。しかし、近年の著しい交通量の増大と大型車の増加が、極めて厳しい状況を生んでおり、鋼床版の疲労損傷が報告されるようになってきている<sup>1)</sup>。図-1はこれまでに国内外で報告されている疲労損傷事例を示したものである。これらの損傷は、荷重や繰り返し回数の実状が設計で考慮された状態を越えたことによるもの、製作法の理由から設計値より疲労強度が低いことに起因するもの、疲労に留意せずに取り付けた付加物から生じたもの、そして設計では考慮されない二次応力や局部応力に起因して生じたものに分類される。そこで製作性を考慮した疲労パフォーマンスの高い構造ディテールが提案されており、付加物を取り付ける場合には疲労を考慮した取り付け位置や構造ディテールを決定することなどを行なわれている<sup>2)</sup>。しかし、一般に設計では考慮されない二次部材や局部応力に対しては、具体的な疲労設計法がないのが実状である。

鋼床版は、主桁の一部として使用されることが多く、薄板を溶接やボルトなどにより集成し、さらに溶接線の交差部には一般にスカラップが設けられるなど、その構造ディテールは複雑であるため、鋼床版の損傷時の補修、取替えは困難であることが予想される。また、

構造ディテールの複雑さから自動車が通過した際に生じる各部材の応力挙動、部材交差部の局部応力や変形挙動も複雑となり、設計で想定しているモードとは必ずしも一致しない場合が考えられる。したがって鋼床版の疲労損傷を防止するためには、各部材の応力や部材交差部の局部応力を十分に把握することが重要であると考えられる。

通常、鋼床版のデッキプレート上面には、鋼床版の保護の目的からアスファルト舗装が施される。舗装には、鋼床版の応力に及ぼす効果として荷重分散や合成作用があることは知られており、実橋での応力測定<sup>3), 4), 5), 6), 7)</sup>が行われている。しかしそれらの応力は、温度や載荷速度の依存性により影響を受けること等から、その定量的な把握には至っていない。このため、舗装を鋼床版の断面設計に考慮することは行われていない<sup>8), 9)</sup>が、鋼床版の計画的・予防的な維持管理を実施するためには、その疲労寿命の予測に舗装の影響を考慮することが重要であると考えられる。

また、鋼床版の疲労上から弱点部となる構造として、縦リブの現場継手部がある。鋼床版を現場で接合する方法は、溶接による接合とボルトによる接合とがある。デッキプレートの接合は舗装への影響を避けるために溶接接合とする場合が多い。縦リブや横リブの接合を高力ボルトによる摩擦接合（以下、HTB継手）とする場合、デッキプレートの溶接を行うのに必要な貫通孔（以下、スカラップ）を縦リブや横リブ接合部に設ける必要がある。このようなスカラップ部が疲労上の弱点となることは三木ら<sup>10)</sup>により指摘され、町田ら<sup>11)</sup>によ



文献1)より引用  
①～⑯: 疲労損傷事例のある箇所

図-1 鋼床版の疲労損傷事例

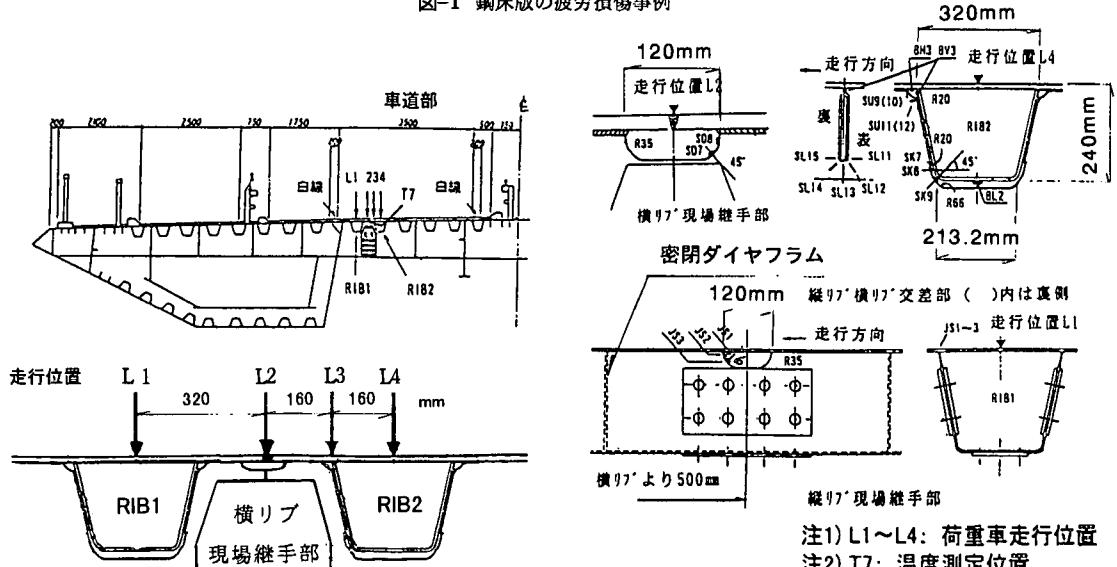


図-2 鋼床版の構造および測定位置

りスカラップの寸法や溶接方法と疲労強度との関係が明らかにされている。しかし、実際の縦リブや横リブの現場継手部を忠実にモデル化した試験体による検討は、あまり行われていない。

以上のようなことから、鋼床版の各細部構造の疲労に対する局部応力や変形挙動を検討するために、まず実橋において温度の異なる条件下で、載荷位置を変えた応力測定を実施した。つぎに、モデル試験体を用いて載荷位置をパラメータとした縦リブ継手部スカラップ近傍の局部応力の測定を行ない、これらの局部の応力・変形挙動を3次元弾性FEM解析により検証した。また、鋼床版の局部の応力低減に効果的と考えられるデッキプレート厚を増厚した場合についても検討した。

表-1 鋼床版の構造諸元

部材	寸法 (mm)
デッキプレート板厚	12
縦リブ断面	320 × 240 × 6-R40
縦リブ間隔	320
縦リブ支間	2000
横リブ断面	800～893 × 9(ウェブ) 230 × 12(下フランジ)
横リブ支間	9280

## 2. 実橋での応力測定

### (1) 測定方法

試験の対象とした橋梁は、中央支間長490m、側支間長150m、橋長790mの3径間連続鋼斜張橋(本州四国

表-2 試験項目と試験時の温度

試験項目				温度区分	デッキ下面 温度(°C)	橋面温度 (°C)	天候
荷重車載荷試験	夏季 (9月)	2軸トラック 静的載荷 走行載荷	昼間 13:00~ 16:00	3	25.4~29.4 23.4~23.2	23.9~26.4 22.6~27.3	cloudy fine
		3軸ダンプ 走行載荷		4	35.7~43.5	26.5~31.9	cloudy
		2軸トラック 静的載荷 走行載荷	夜間 2:00~5:00	2	21.4~21.5 19.4~19.5	20.7~21.2 19.5~19.9	rainy cloudy
	冬季 (2月)	2軸トラック 静的載荷 走行載荷	昼間 13:00~ 16:00	1	8.3~10.8 9.7~11.6	5.0~9.7 5.5~9.9	cloudy fine
		2軸トラック 静的載荷 走行載荷	夜間 2:00~5:00	0	2.2~2.4 -1.3~-0.1	2.7~3.3 -0.9~-0.1	cloudy fine
供用中の24時間 頻度計測	夏季 (9月)	走行載荷		2~4	19.4~43.9	19.0~37.4	fine

表-3 実橋での応力測定結果

部位	条件 速度	輪重49kN(5tf)載荷時の応力度または走行時応力範囲(MPa)												
		トラック静的載荷				トラック走行載荷				ダンプ走行載荷				
		0km/h		10km/h		50km/h		10km/h		50km/h				
	位置	3	0	3	0	3	0	3	0	4	4			
縦リブ 下面	a	AL2	L4	30 -11	L4	22 -8	37 15	L4	25 12	36 15	L4	22 10	L4 18	42 22
		BL2												
	b	AL1	L1	25 -10	L1	16 -6	32 12	L1	16 9	28 15	L1	15 8	L1 17	35 21
		BL1												
スカラップ	b	BH3	L3	-34	L2	5	21		9 15	19 26		9 L3	47 45	55 51
	a	BV3	L4	11	L3	8	27	L3	67	-	L3	15 64	L4 -	45 -
	b	SD7	L3	-92	L3	-71	-		-	-		-	-	-
		SD8		-66		-64	-		66	-		63	-	-
スリット	b	SK7	L3	-36	L3	-31	53	L3	37	52	L3	36 32	L3 60	82 69
		SK8		-32		-28			34	45				
		SK9	L1	13	L1	11	-	L4	12	-	L4	13	-	-
スカラップ	b	SU9	L3	13	L4	-16	L4	17	L4	25	L4	24 8	L3 38	44 36
		SU11	L3	-6	L1	-2	L3	15	L3	9	L4	-	L1	-
	c	JS1	-	-	L1	-6	L1	15	L1	8	L1	6	L1	24
		JS2				-57		92		46	100	L1	40	157

注1): a 縦リブ支間中央に載荷, b 横リブ上に載荷, c 縦リブ継手上に載荷

注2): L1~L4 横断方向の走行(載荷)位置

注3): AL1, AL2はそれぞれRIB1, RIB2の支間中央での縦リブ下面の応力

注4): BL1, BL2はそれぞれRIB1, RIB2の横リブ上での縦リブ下面の応力

連絡橋生口橋)であり、中央支間の主桁には鋼床版二箱桁が採用されている。現在の供用形態では、車道部は両箱桁の間の横リブと縦リブで支持された鋼床版部であり、応力測定はこの車道部分を利用して行った。

図-2に鋼床版の構造および応力測定位置図、表-1に構造諸元を示す。

現場継手は、デッキプレートは現場溶接であるが、横リブと縦リブはHTB継手である。そのため、デッキプレートの全断面溶込み溶接用の裏当て材の取り付けお

および放射線フィルム装填用のスペースとして、縦リブ・横リブのウェブには長さ 120mm のスカラップが設けられている。縦リブは U 型の 6mm 板厚のトラリブで、デッキプレートとの溶接は脚長 5mm のすみ内溶接で施工されている。

着目部位は主桁ウェブに近接する縦リブ RIB1, RIB2 および横リブ接合部であり、応力測定は縦リブ下面、横リブ・縦リブ交差部のスカラップおよびスリット近傍および HTB 継手部のスカラップ近傍とした。HTB 継手部のスカラップ部では、こば面にひずみゲージ (SD7, SD8, JS2, JS3) を貼付している。ひずみゲージはゲージ長 2mm のものを使用した。また、荷重車の走行位置は L1～L4 の 4 測線上である。

車道部には、基層に厚さ 35mm のゲースアスファルト、表層に厚さ 30mm の改質アスファルトが施工されている。試験時の舗装のわだち掘れ量は、RIB1, RIB2 付近で 3~4mm 程度であった。

さらに、供用下において応力および輪重の 24 時間頻度計測を行った。走行車両の輪重の計測は、橋の取り付け部の土工部にマット式軸重計を設置して行った。走行車両通過時の応力は、輪重の頻度計測と同じ時間帯に応力頻度測定器（レインフローモード）を用いて計測した。応力計測時には、橋上での気温およびデッキプレート下面 (T7) の温度を測定した。

表-2は試験項目と試験時の気温等の気象条件を示す。2 軸トラックによる載荷試験は、夏季（9月上旬）、冬季（2月上旬）の昼間（13~16 時）と夜間（2~5 時）に実施した。また、タンデム軸載荷による影響を調べるために、3 軸ダンプを用いた載荷試験を夏季の昼間に実施した。

計測場所は、主桁作用によるケーブルの軸力の影響の少ない中央径間の中央付近を選定した。輪重は、2 軸 トラックでは 49kN(5tonf), 3 軸ダンプではタンデムの合計値を 98kN(10tonf) に設定した。2 軸 トラックの後輪の接地面積は、長さ 34cm、幅 19cm × 2(ダブルタイヤ) で、タイヤ間隔は 11cm であった。

## (2) 測定結果

表-3 に主な測定結果を示す。ここで、静的載荷試験においては最大応力、走行載荷試験では輪重 49kN(5tonf) 載荷時における最大応力範囲を示す。また、応力測定の温度との対応については、試験中のデッキプレート下面 (T7) の最高温度は 43.5 ℃、最低温度は -1.3 ℃ であったため、このデッキプレート下面での温度を 0 ℃, 10 ℃, 20 ℃, 30 ℃, 40 ℃ 近辺の 5 段階に区分して整理した。

以下に、トラック走行載荷試験時における実橋各部の応力測定結果について述べる。

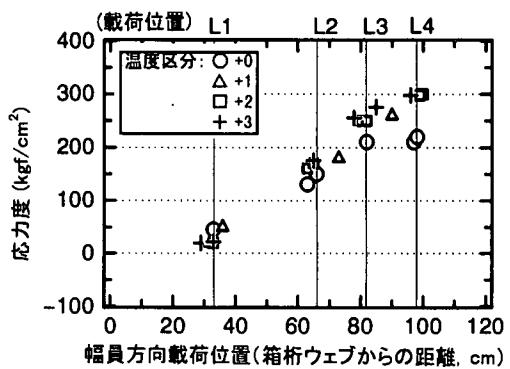


図-3 載荷位置による縦リブ下面応力 (BL2: 縦リブ支間中央に静的載荷)

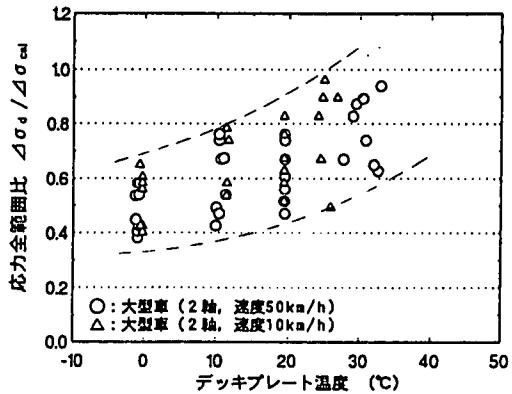


図-4 縦リブ下面応力の温度依存性

### a) 縦リブ下面

図-3は、静的載荷時の縦リブ下面の応力 (BL2) について、幅員方向の載荷位置および温度との関係で示したものである。縦リブ上に載荷された場合には、温度が低いほど応力は小さい。しかし、隣接する縦リブ上に載荷された場合には著しく応力は低減するが、温度の低い方が発生応力は高い傾向がみられた。

図-4は、走行時の応力と有限帶板法 (FSM) による計算応力の比率を温度との関係で示したものである。走行位置のばらつき等により実測応力は大きくばらつくが、その上限値は温度が 25 ℃を超えると舗装を考慮しない計算応力とほぼ同等である。また、25 ℃以下になると明らかに応力の低下がみられ、温度が低いほど応力は低下する。

### b) 縦リブ・横リブ交差部のスカラップおよびスリットのこば面

輪重 49kN(5tonf) 載荷時の縦リブ・横リブ交差部のスカラップのこば面 (SU9, SU11) での応力は、スカラップの直上 (L3) に載荷したときに最大値を示すが、その応力は 98~196MPa(100~200kgf/cm²) 程度と小さな

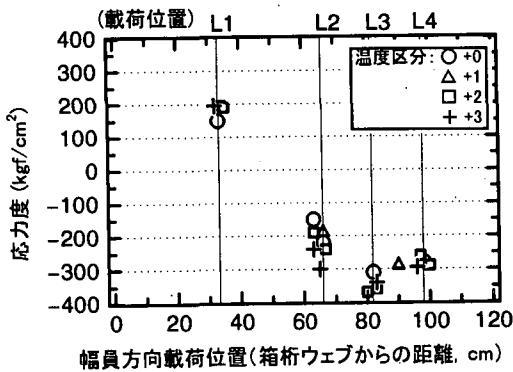


図-5 縦リブ・横リブ交差部のスリット近傍(SK7)の応力

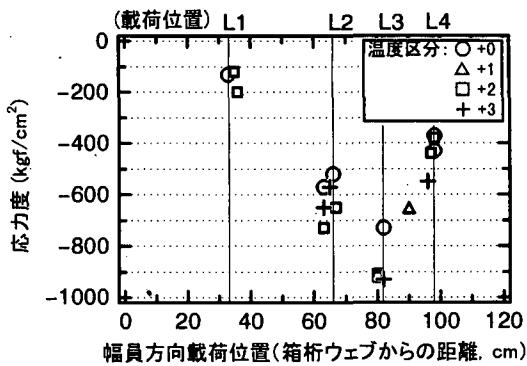


図-7 横リブ現部継手部のスカラップこば面の実測応力

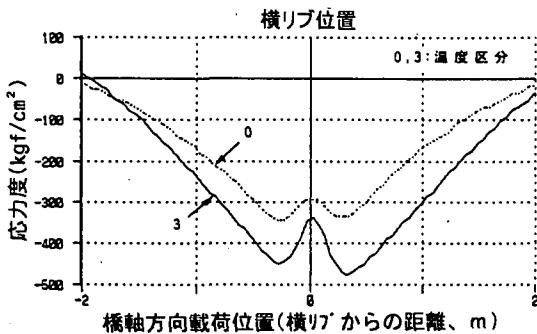


図-6 横リブスリット近傍の走行時応力波形

値である(表-3参照)。温度の影響は、前述の縦リブ下面での測定結果のように顕著な傾向はみられないが、温度が低いほど応力は小さい。

図-5は、縦リブ下面のスリット部(SK7)の応力度について、載荷位置および温度との関係を示す。この場合にも、輪重が直上(L3)に載荷されたときに最大となり、温度が低いほど応力は小さい。

また、スリット部に最大応力の発生する載荷位置は、図-6の応力波形からわかるように、輪重が横リブ直上ではなく、横リブの前後30cm程度離れた位置である。横リブ直上に載荷された場合には応力分散により応力が低減されている。

### c) 横リブ現場継手部のスカラップこば面

図-7は、横リブ現場継手部のスカラップこば面の応力(SD8)について、載荷位置と温度との関係で示したものである。スカラップの直上に載荷された場合には温度の影響が表れている。SD8での最大応力の発生する載荷位置は、スカラップ中心に載荷(L2)された場合より少し外れたL3上に載荷されたときの方が大きく、

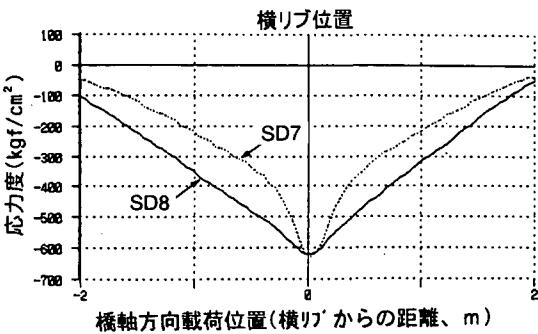


図-8 横リブ現場継手部のスカラップこば面の走行時応力波形(横リブスカラップ上走行)

温度区分0の場合を除き88MPa(900kgf/cm²)を超える高い応力が発生している。

図-8は、L3線上を走行時のスカラップ近傍での応力波形を示す。SD8での応力は横リブからの距離に比例して小さくなるが、SD7での応力は輪重が横リブ上に載荷される範囲である±20cmの区間でシャープな応力波形を示し、直上載荷の影響が強く表れている。

### d) 縦リブ現場継手部のスカラップこば面

図-9は、縦リブ現場継手部のスカラップこば面(JS2)での走行載荷時の応力範囲を、走行位置と温度との関係で表したものである。スカラップ直上をタイヤが通過しなければ応力はほとんど生じていないが、直上通過時には夏季に96MPa(980kgf/cm²)と測定箇所のなかで最も高い応力が発生している。一方、冬季には39MPa(400kgf/cm²)と応力の低減がみられ、舗装のスティフィネスの温度依存性の効果が表れているものと考えられる。

### e) 供用下での実測応力

図-10に供用下における応力頻度測定結果を示す。こ

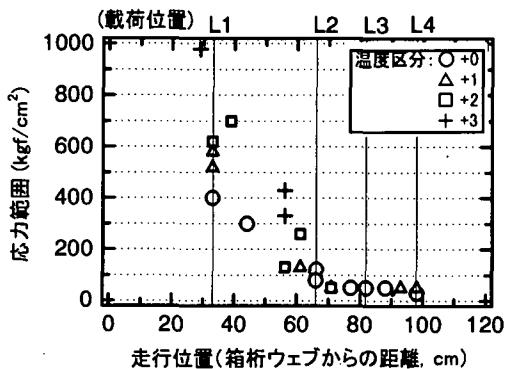


図-9 縦リブ現場継手部のスカラップこば面 (JS2) の応力範囲

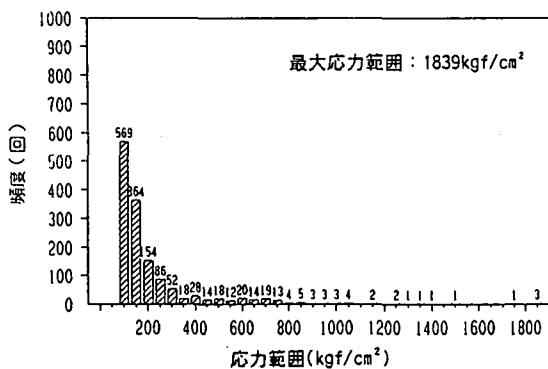


図-10 応力頻度測定結果 (JS2)

こでは縦リブ継手部スカラップの JS2 の応力頻度分布を示す。供用下で計測された最大応力範囲は、縦リブ下面では 39 MPa(403 kgf/cm<sup>2</sup>) であるのに対して、縦リブ現場継手部のスカラップ部では 180 MPa(1,839 kgf/cm<sup>2</sup>) と、載荷試験での測定結果を超える高い応力が測定された。応力頻度計測と同時に計測した輪重頻度分布によれば、通行車両の輪重は 49 kN(5tonf) 以下であったことを考慮すると、縦リブ現場継手部のスカラップ部には、載荷状態によっては、非常に高い応力が発生することを示している。

### 3. 試験体を用いた縦リブ現場継手部スカラップ近傍の局部応力測定および FEM 解析

#### (1) 測定方法

縦リブ・横リブの現場継手部スカラップ近傍の局部応力は、走行位置とスカラップの位置関係によって影響を受けることが実測結果からいえる。そこで、走行位置を明確にし、局部応力を正確に把握するために、縦リブの現場継手部をモデルとした試験体を用いてタイ

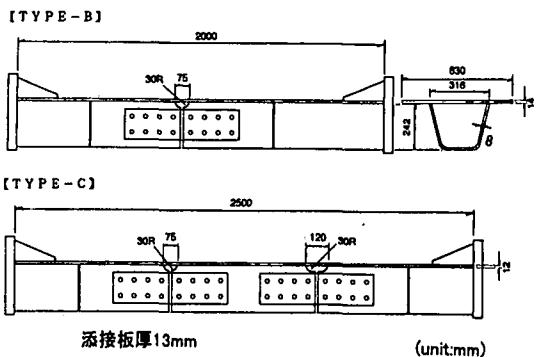


図-11 試験体の構造図

ヤによる直接載荷を行った。試験体としては図-11に示すように、デッキプレートと縦リブ 1 本からなっており、スカラップの大きさ、デッキの板厚を変えている (TYPE-B, TYPE-C)。スカラップの大きさとしては、実橋と同じ長さの 120mm のものと、施工上から現状で最小と考えられる 75mm の長さのものを対象とした。縦リブ板厚は 8mm であるが、デッキ板厚は 12mm と 14mm の 2 種類で、舗装は施工されていない。

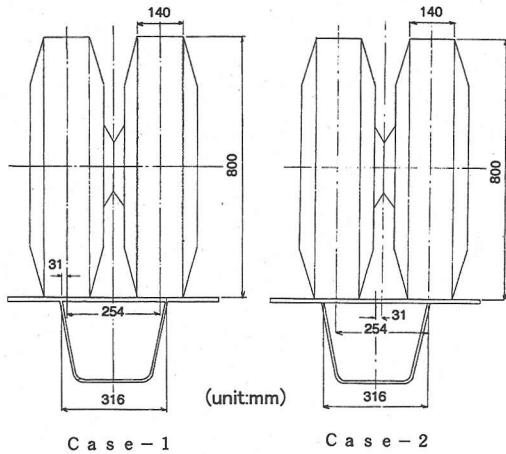
静的載荷には 39kN(4tonf) トラックを用い、後軸軸重が 29, 49, 69kN(3, 5, 7tonf) となるように積荷を調整した。横断方向の車輪の載荷位置としては、図-12 に示すように試験体に振れが生じない程度に 2 ケースを行った。Case-1 はダブルタイヤの中心と試験体の中心とを一致させた場合、Case-2 は外側タイヤの中心と縦リブ上端を一致させた場合である。

また、タイヤ載荷の他に幅 50cm、長さ 20cm、厚さ 2cm の鋼製載荷板 (以下、鋼載荷板) を用いた測定も実施し、スカラップ近傍の応力をタイヤ載荷時のものと比較した。

#### (2) 測定結果

##### a) スカラップ長 75mm の場合

タイヤの接地状態の測定は、面圧 0.2 MPa(2kgf/cm<sup>2</sup>) 以上になると赤色に変色し、色の濃淡で圧力の強弱を判断できる感圧紙を用いて行った。この測定は、ダブルタイヤの中心と試験体の中心とを一致させて載荷した。図-13に軸重 29, 49, 69kN(3,5,7tonf) 時のタイヤ一輪あたりの感圧紙の変色状況を示す。これによるとタイヤ中央付近では色が濃く、またタイヤの溝が見える。軸重が小さいときはタイヤの接地面形状は円形で接地圧は中央部が高く、軸重が大きくなるにつれ形状は四角形状となり、エッジ部の接地圧が高くなっている。



Case - 1

Case - 2

図-12 タイヤの載荷位置

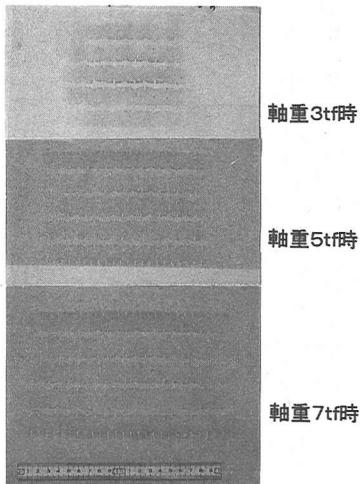


図-13 タイヤの接地状況

ることがわかる。

図-14に輪重と測定した接地面積の関係を示す。接地面積はダブルタイヤの内外輪で若干の差はあるが、ほぼ輪重に比例して増加している。

図-15は、試験体TYPE-Cの75mmのスカラップに着目して、タイヤを軸方向に移動させたときのスカラップ部に発生する最大主応力が最大となった時の主応力図とその載荷位置を示す。最大主応力の発生する載荷位置は継手中央から100mm離れた位置であり、これはタイヤの接地面の前面位置が継手中央のときである。また、この時の最大主応力は引張であった。

デッキプレート板厚が14mmの試験体での応力は、12mmの場合に比べて約60%に低減されている。

図-16、図-17は、試験体の横断方向に載荷位置を変えた2ケースそれぞれにおいて、載荷位置を軸方向位

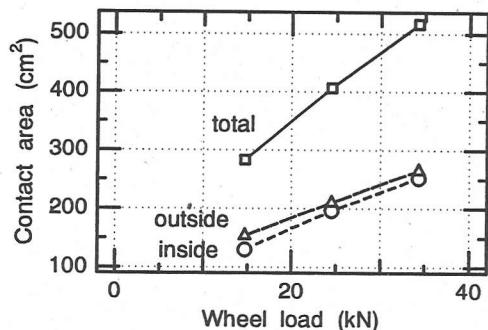


図-14 輪重とタイヤの接地面積

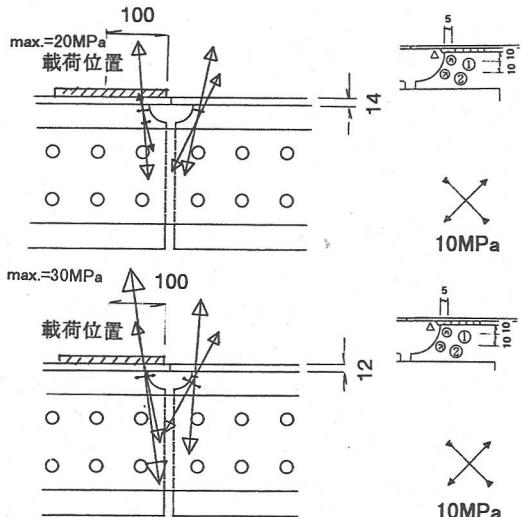


図-15 スカラップ長 75mm の場合のスカラップ近傍の主応力図

置に移動させた時のスカラップ部の最大主応力の変化を示したものである。タイヤ中心と試験体中心を一致させた載荷ケースでは引張応力が生じており、応力のピークが2つ表れている。また、縦リブの溶接ビードの近傍①と離れた位置②では、①の方が高い応力となっている。最大応力を示す位置は、①では継手中央からみて測定位置と載荷位置が同じ側にあるとき最大となり、②では測定位置と反対側に載荷したときに最大となっている。

外側タイヤ中心と縦リブウェブを一致させた載荷ケースでは、①では圧縮応力が生じており、スカラップ中心に載荷中心があるとき最大値を示す(図-15)。図-16、図-17では、図-12に示した場合と比して、横断方向の載荷位置がわずか31mmのずれによって応力の正負の傾向が全く異なる結果となっている。

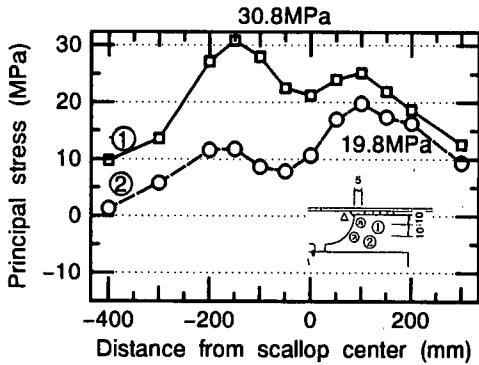


図-16 タイヤ中心と試験体中心を一致させた場合(case-1)の主応力変化

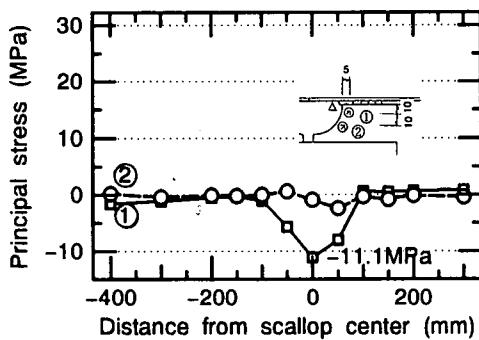


図-17 外側タイヤ中心と縦リブウェブを一致させた場合(case-2)の主応力変化

### b) スカラップ長 120mm の場合

図-18、図-19は、デッキプレート板厚12mmの場合の120mmスカラップ部の最大主応力である。図-18は、タイヤの中心と試験体の中心を一致させた場合で、図-19は外側タイヤの中心と縦リブ上端を一致させた場合の測定結果である。横断方向の載荷位置の違いによる応力の正負の傾向は75mmのスカラップの場合と同様である。

①の位置で最大応力の値は、スカラップ長120mmと75mmの場合でほとんど差はみられないが、軸方向に載荷位置を変えた場合の応力変動幅は、スカラップ長75mmの方が120mmの場合より80%と小さく、スカラップを小さくすることが疲労上から有利であることがわかった。

### c) 載荷方法の影響

図-20は鋼載荷板を用いた場合のスカラップ近傍での応力測定結果である。タイヤ載荷では図-18、図-19で示したように引張応力であったのに対し、鋼載荷板を用いた場合にはスカラップ近傍には圧縮応力が作用し

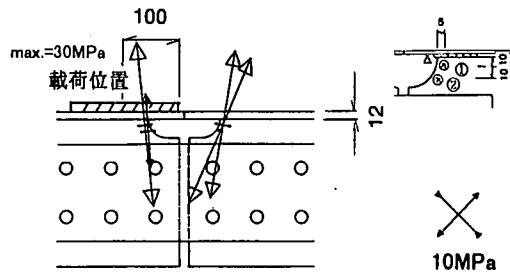


図-18 120mmスカラップ近傍の主応力図(タイヤ中心と試験体中心を一致:case-1)

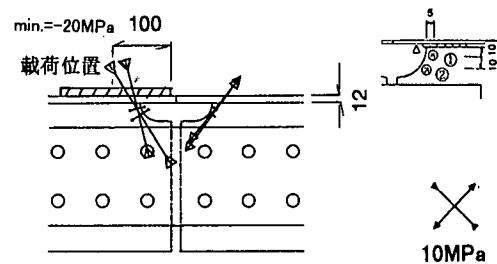


図-19 120mmスカラップ近傍の主応力図(外側タイヤ中心と縦リブウェブを一致:case-2)

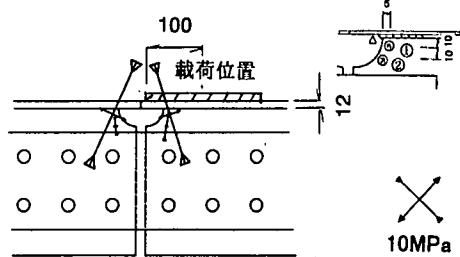


図-20 鋼載荷板を用いた場合のスカラップ近傍の主応力

ている。また、主応力の方向にも違いが見られることがある。載荷による軸方向変位の拘束度が異なることが原因であると考えられる。このことは、鋼床版の載荷試験や疲労試験を行う際、実状と同様な応力状態を再現できるように、載荷板や載荷位置について配慮する必要性があることを示唆している。

### (3) FEM 解析

試験体のタイヤによる載荷試験および実橋での計測結果を検証するために、TYPE-Bの試験体をモデル化し3次元弾性FEM解析を行った。モデルのデッキ板厚は12mmとし、スカラップは長さ75mmである。試験体の端部には板厚50mmの端板を取り付け、載荷時に

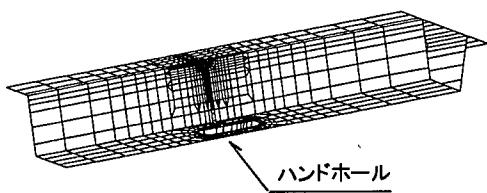


図-21 FEM 解析モデル

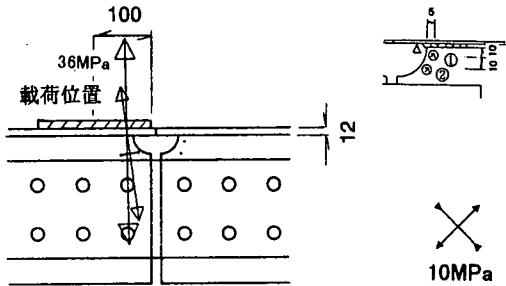


図-23 補装無しの場合のスカラップ近傍の主応力図

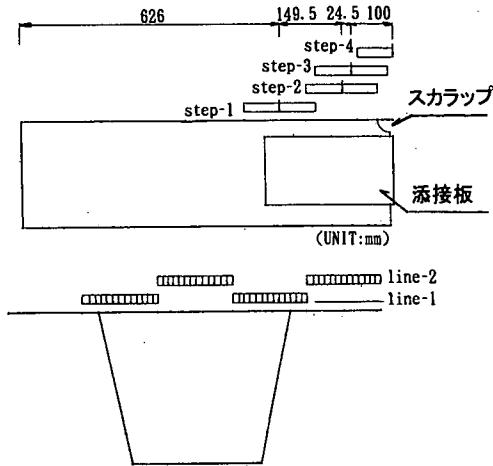


図-22 荷重の載荷方法

は端板で鉛直方向に支持されている。したがって解析上の境界条件としては、端面のデッキとリブの形状を保持させ、両端で単純支持の条件とした。

#### a) 解析モデル

解析モデルを図-21に示す。要素は、鋼板は4節点シェル要素(5自由度/節点)、舗装は8節点ソリッド要素(3自由度/節点)であり、解析プログラムはNASTRANである。全節点数は1644点(舗装を考慮した場合は2413点)で、スカラップ近傍の最小要素サイズは2.5mmである。またスカラップ部の要素は、試験体のひずみゲージ位置が要素中心となるように作成した。添接板部の要素は、縦リブと添接板の合計板厚としてモデル化し、継手部縦リブ下面には幅100mm、長さ250mmのハンドホールを設けた。

荷重は25kN(2.5tonf)とし、載荷面積は試験体でのタイヤの接地面積の測定結果( $436\text{cm}^2$ )を用いて、載荷面で等分布載荷とした。荷重の載荷ラインは、図-22に示すように、軸方向の4ケース(step-1~4)、直角方向に2ケース(line-1,2)である。line-1は図-12で示したCase-1に相当するが、line-2はCase-2よりも外側の

載荷位置となっている。

舗装のスティフネス $E_a$ は、多田ら<sup>13)</sup>の調査結果をもとに、夏季の条件に対して200MPa、冬季の条件に対して1000MPa、ポアソン比は0.4と仮定した。舗装とデッキプレートは同一節点とし、それらの境界では相対的な変位は生じないものとした。

#### b) 補装無しの場合の解析結果

図-23は、継手中央から100mmの位置を載荷した最大主応力となった位置で、直角方向には縦リブ内に載荷された場合の主応力図を示す。

図-24は、直角方向にはline-1の載荷で、橋軸方向の載荷位置をstep-1~4を変えた場合のスカラップ部の主応力の変化を示す。スカラップ中央より離れた位置に載荷したときに最大値を示し、その値は36MPa程度となっている。これらの傾向は図-16に示した測定結果と非常に良く一致している。

図-25は、直角方向にはline-2の載荷で、橋軸方向の載荷位置をstep-1~4を変えた場合のスカラップ部の主応力の変化を示す。応力はスカラップの中央部を載荷した時に圧縮側で最大値となり、その値は-101MPaとなっている。

このように横断方向の載荷位置の違いによって応力の発生挙動が異なるのは、図-26に示すように縦リブの面外変形によるものと考えられる。縦リブウェブのほぼ直上に対称に載荷された場合(図-22のline-1)には、ウェブが外側に膨らむ変形モードとなり、この載荷位置は試験体載荷におけるCase-1(図-12)に対応している。また、偏載荷された場合(図-22のline-2)では片側のウェブは、外側に開く変形モードとなっている。すなわち、スカラップ部には軸方向には単純梁としての曲げモーメントにより圧縮応力が作用するが、横断方向の局部載荷によってウェブは面外に変形し、その結果、引張応力となる状態が生じているものと考えられる。

#### c) 補装有りの場合の解析結果

図-27、図-28には舗装有りの場合のスカラップ部の応力を示すが、舗装による応力緩和がみられる。スカ

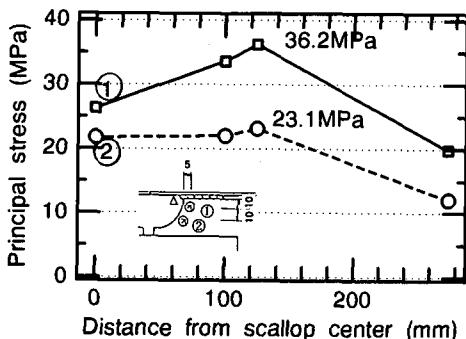


図-24 タイヤの対称載荷による局部応力

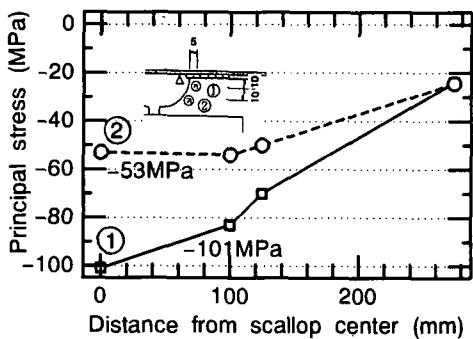
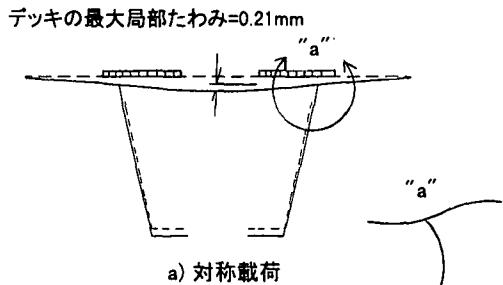


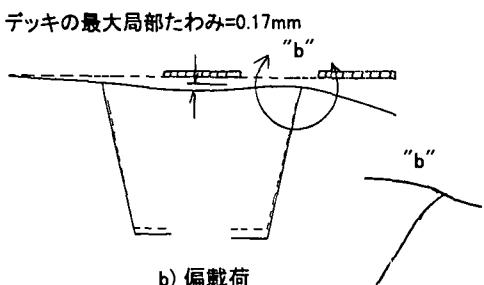
図-25 タイヤの偏載荷による局部応力

ラップ部の応力は舗装の無い場合に比べて、スティフネスが低い場合(高温時)には20%、スティフネスが高い場合(低温時)には50%程度に低減されている。

いづれの解析結果も、実橋での計測結果に比べて舗装による低減の効果が過大に評価されているが、これは解析におけるスティフネスの設定上の問題や舗装と鋼床版を、その境界で同一の変位が生じると仮定していることが考えられる。また、実際の通行車両のタイヤ載荷による鋼床版の応力は、タイヤの接地面形状や接地圧分布に依存することも考えられる。宇佐美ら<sup>14)</sup>の研究によると、一般の大型専用のタイヤでは、ある輪荷重以下で接地面は円形で接地圧は中央部が高く、それ以上の荷重では接地面は矩形でタイヤのエッジ部で接地圧が最大となるとしている。本研究においてもタイヤの接地面形状について測定したところ、積荷が少ないときは円形であり、積荷が多くなると矩形となることが確認されている。このような接地面形状が舗装を介すことにより、鋼床版にどのように伝達されるかは不明であるが、本解析においてもこれらの条件の違いが影響しているものと考えられる。



a) 対称載荷



b) 偏載荷

図-26 デッキおよび縦リブウェブの面外変形

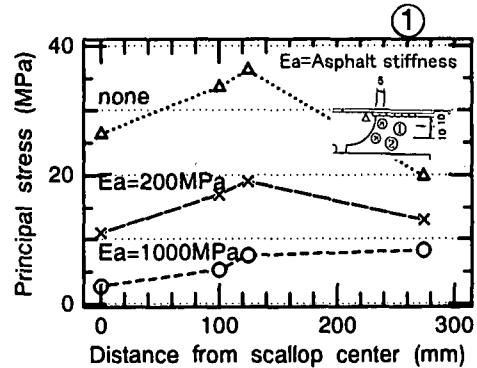


図-27 舗装による局部応力の低減効果(1)

#### d) デッキ板厚を増厚した場合の解析結果

デッキ厚が12mmの場合には、図-26に示したように載荷位置によりデッキと縦リブウェブには面外変形が生じ、これにより接合部近傍のスカラップには高い応力が発生する。舗装のスティフネスが高い場合には、この応力は低減されるが、スティフネスの温度依存性を考えた場合、舗装による応力低減効果に期待するより確実な方法としてデッキの板厚を厚くすることが考えられる。そこで板厚を18mmと24mmとした場合のスカラップ近傍の局部応力解析を行った。それぞれ場合のスカラップ①位置での応力解析結果を図-29に示す。

スカラップの①位置での応力は、デッキ板厚が12mmの場合の最大応力36.2MPaに対して、18mmの場合

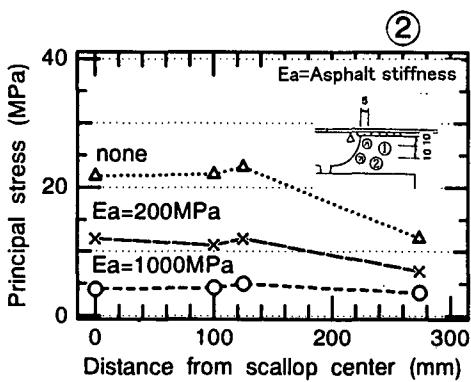


図-28 補装による局部応力の低減効果(2)

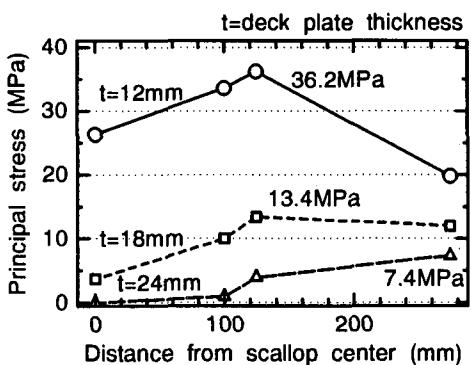


図-29 デッキプレート厚を増厚した場合の局部応力の低減効果

は 13.4 MPa で 63% の低減、24mm の場合は 7.4 MPa で 80% の低減となった。また、スカラップ r 部のエッジでの応力も、デッキ板厚が 12mm の場合の 151 MPa に対し、18mm の場合は 84 MPa、24mm の場合は 61 MPa と大きく低減され、デッキ板厚を厚くすることによるスカラップ近傍応力低減の効果が大きいことが言える。なおデッキの局部変形量の最大値は、それぞれ 0.07 mm, 0.03 mm と図-26 に示す値と比べて小さく、デッキプレート厚の増厚が舗装の割れに対しても効果的であると考えられる。

#### 4. まとめ

鋼床版の各細部構造の応力におよぼすアスファルト舗装の影響を温度と関連づけるために、実橋における応力測定、試験体を用いた載荷試験および FEM 解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

#### (1) アスファルト舗装と温度の影響

①縦リブ下面の応力は、夏季の高温時には舗装の影響はほとんどみられず、舗装が無いものとして解析した結果に近い。冬季の低温時には舗装の効果が顕著であり、解析結果の約 70% であった。

②横リブ・縦リブ現場継手部のスカラップ近傍の応力は、スカラップ直上に載荷されたときに大きな値を示し、最大値は夏季に 98 MPa(1,000 kgf/cm<sup>2</sup>) を超えた。

③縦リブ・横リブ交差部のスリット近傍の応力は、横リブ直上に載荷されたときより、前後に載荷されたときの方が高い。この箇所においても、低温時の応力低減が大きい。

#### (2) 縦リブ現場継手部のスカラップ近傍の局部応力・変形挙動

①スカラップ近傍の局部応力は、載荷位置の微妙な違いにより、応力が大きく変化する。特に横断方向の載荷位置の微妙な違いにより、応力が正負に交番する。

スカラップのエッジ部では 98 MPa(1,000 kgf/cm<sup>2</sup>) を超える高い応力であることから、疲労上の検討を要する。

②荷重の載荷方法として、剛な載荷板を用いた方法では、スカラップ近傍の主応力は圧縮となるが、輪荷重載荷で縦リブ内に載荷した場合は引張となる。また、主応力の方向にも差異がみられる。

③スカラップ近傍の応力・変形挙動は FEM 解析により説明できる。縦リブと輪荷重位置の関係において、輪荷重を縦リブの内側に載荷した場合には縦リブウェブは面外に膨れる変形モードが表れる。しかし、わずかな位置の差により変形挙動は変わる。これらのことは実橋においても同様な現象として生じているものと考えられる。

④舗装をモデル化した解析によると、舗装によりスカラップ近傍の応力低減がみられる。

⑤デッキ厚を従来から用いられている 12mm を 18mm と厚くすることにより、スカラップ近傍の局部応力は 63% の低減となり、疲労上の問題が大きく改善できる。また、デッキの局部的な変形量もほぼ無視しうるほど小さくなり、舗装割れに対する耐久性の向上が期待できると考えられる。

**謝辞：** 本研究のうち、実橋による鋼床版の応力測定は建設省土木研究所に委託して実施されたものであり、関係の方々に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労、鋼構造シリーズ4、1990年9月。
- 2) C.Miki,Y.Fujii,H.Takenouchi,S.Ono : Fatigue strength of splice joints in the longitudinal stiffeners of bridge deck, IIW XIII-1551-94.

- 3) 小林文男, 森清, 坂井涉, 岩崎雅紀: 鋼床版縦リブの疲労設計に用いる実応力比の実橋測定, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第1部, 1994年9月.
- 4) 小野秀一, 大橋治一, 三木千壽: 実タイヤ載荷による鋼床版縦手部の応力測定, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部, 1995年9月.
- 5) 永田考, 岡田康一, 岡本真悟, 山田健太郎: 鋼床版局部応力に及ぼすアスファルト舗装の影響, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部, 1995年9月.
- 6) 西川武宏, 岡田康一, 岩崎雅紀, 山田健太郎: 鋼床版の応力及びたわみの温度依存性に関する実橋測定結果, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部, 1995年9月.
- 7) 藤井裕司, 西川和廣, 田中良樹: 鋼床版の舗装が疲労に及ぼす影響, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第1部, 1994年9月.
- 8) 本州四国連絡橋公団: 鋼床版設計要領・同解説, 1989年4月.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1994年2月.
- 10) 三木千壽, 館石和雄, 石原謙治, 梶本勝也: 溶接構造部材のスカラップディテールの疲労強度, 土木学会論文集, No.483/I-26, pp79-86, 1994.1.
- 11) 町田文孝, 三木千壽, 吉岡昭彦, 越後滋, 多田賢, 吉家賢吾: 鋼床版縦リブのスカラップの疲労強度について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部, 1995年9月.
- 12) 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, pp127-138, 1995.7.
- 13) 多田宏行編著: 鋼床版舗装の設計と施工, 鹿島出版会, 1990年3月.
- 14) 宇佐美裕次, 姫野賢治, 中村俊行: 自動車のタイヤ接地圧分布特性の測定に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部, 1995年9月.
- 15) 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.

(1996.3.25 受付)

## LOCAL STRESS AND DEFORMATION AT FIELD JOINTS OF ORTHOTROPIC STEEL DECK

Harukazu OHASHI, Yuji FUJII, Chitoshi MIKI, Shuichi ONO and Jun MURAKOSHI

This research is aiming at studying local stress and deformation and effect of asphalt pavement on fatigue behavior of structural details such as scallop of orthotropic steel deck. It consists of stress measurement on a actual bridge with orthotropic steel deck and finite element analysis for investigating local stress and deformation at the vicinity of scallops. The results show that the asphalt pavement affected stress at longitudinal rib, scallop and slit at transverse beam where longitudinal ribs cross, and scallop at field bolted joints of transverse and longitudinal ribs. The local stress and deformation were well explained by finite element analysis. The use of thicken deck plate which result high fatigue performance.