

BWIMを応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響検討

Fatigue failure assessment of actual-working load and run location on orthotropic steel deck applied in BWIM

高田 佳彦*, 木代 穰*, 中島 隆**, 薄井 王尚***

Yoshihiko Takada, Minoru Kishiro, Takashi Nakashima, kimihisa Usui

* (財) 阪神高速道路管理技術センター調査研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)

** 阪神高速道路株式会社環境景観室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

*** (株) フジエンジニアリング調査設計部 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

Recent considerable increases in traffic intensity and wheel loads are causing fatigue cracks in orthotropic steel decks in Hanshin Expressway. From results of the periodic inspection, the fatigue cracks are detected by the 142 spans in the 1347 spans of the stock of the orthotropic steel decks as of April, 2007. Under traffic loading, in particular the effect of local wheel loads, longitudinal welds between deck plate and trough are subjected to local transverse bending moments and are susceptible to fatigue cracks. The stress in trough to deck plate welds is strongly influenced by actual-working load and run location. Then, in orthotropic steel decks in Kobe route of Hanshin Expressway, measurement of the load of actual-working traffic and generating stress was performed by Bridge-Weigh-In-Motion. The paper describes fatigue failure assessment based on this measurement results.

Key Words : orthotropic steel deck, BWIM, fatigue failure assessment actual-working traffic load, run location

キーワード : 鋼床版, BWIM, 疲労損傷評価, 実働交通荷重, 走行位置

1. はじめに

土佐堀～湊町での供用開始から 43 年が経過した. 近年, 車両の大型化や橋の高齢化に伴い, 重交通路線を中心に鋼床版などに疲労損傷が発生しており, その原因究明および対策が喫緊の課題となっている.

阪神高速道路は, 利用台数は 1 日約 90 万台にのぼっている. 都市内の主幹線道として物流を支えてきた当道路は, 活荷重の繰返し作用による損傷の発生が増加してきており, 特に近年では鋼床版の疲労き裂の発生が問題となっている.

全路線の橋梁数 9,559 径間のうち 14%にあたる 1,347 径間で鋼床版が採用されているが, 平成 19 年 4 月現在ではその 142 径間 (10%) において疲労が原因と考えられる様々なタイプのき裂の発生が確認されている¹⁾.

このうち, デッキプレート (以下, デッキという) と U リブとの溶接部 (以下, 縦溶接部という) を起点に溶接ビードを貫通するき裂は, 進展性が高く, 床組構造への耐荷力の影響が懸念される. また, デッキに進展し貫通した場合, 交通荷重の支持機能の低下や舗装の損傷を誘発する恐れがある. これらのき裂は, 点検結果から輪荷重の通過する近傍に集中している. その原因として, 輪荷重による部材の局所的な曲げ変形に伴う応力が主要因であると考えられる²⁾が, この応力の発生は荷重の大きさとその載荷位置の大きく依存する. 鋼床版は輪荷重を直接支持し, 載荷に

伴う影響面は隣接する縦リブとその周辺と小さく, 走行位置の影響を大きく受ける. 大型車の輪の載荷毎に疲労の原因となる応力変動が生じ, その繰返し数も必然的に多くなる. 既設橋の疲労評価を行う上で, 軸数と軸重の把握が不可欠である.

活荷重の大きさについては, これまで料金所に設置された軸重計を活用して活荷重特性に関する分析が実施されており³⁾, 疲労環境評価も行われている⁴⁾. 料金所は, 収受ブースに応じたレーン構成で交通流を誘導するため, 実際の車線ごとの走行状態と異なっている. 高架橋の実働荷重による疲労検討は, 実態の交通流で生じる交通荷重を直接測ることで, 精度の高い結果が得られる.

そこで, 鋼床版橋の荷重面からの疲労評価を目的に, BWIMを応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響を検討した. 計測橋梁は, 兵庫県南部地震により再構築された阪神高速道路神戸線に位置する単純 I 桁で, 供用後早期にき裂損傷が発見されている. 活荷重計測は, Bridge-Weigh-In-Motion (以下, BWIMという) を用いた. BWIMは, 様々な手法が提案されているが⁵⁾⁶⁾, 小塩らが開発した支点反力法を用い⁷⁾ 各荷重を測定し軸数, 軸重の分析を行った. 次に, 車輪の通行位置と鋼床版の応力の相関を目的に, 走行車両に対し, レーザー変位計により車輪通過位置を計測し, その結果と発生応力との同期を取って分析を行った. 応力測定は一般車両通行時にも行い, 測定結果から応力範囲と頻度を分析した. 本文では,

それらの計測結果から活荷重（輪荷重）の大きさと発生応力の関係や同一活荷重下での通過位置と発生応力の関係の検討を行った。特に、タイヤ通過位置については、タイヤ通過位置分布から鋼床版の疲労損傷に与える影響について検討を行った。

2. 鋼床版応力調査・活荷重調査

2.1 調査対象橋梁

調査対象橋梁は図－1に示すように、Uリブで構成されている単純鋼床版板桁橋（上下線各2車線、支間長34.250m、6主桁、非常駐車帯拡幅部あり）である。兵庫県南部地震で再構築され、平成8年8月に供用を開始している。この鋼床版橋は、デッキとUリブとの溶接は、被覆アーク溶接で行われ、溶接のど厚が5mm程度と相対的に小さい。平成14年12月に縦溶接部にビード貫通が発見され、平成17年度に現場溶接により応急補修が行われた。その後、定期的に点検が行われており、現在き裂は確認されていない。

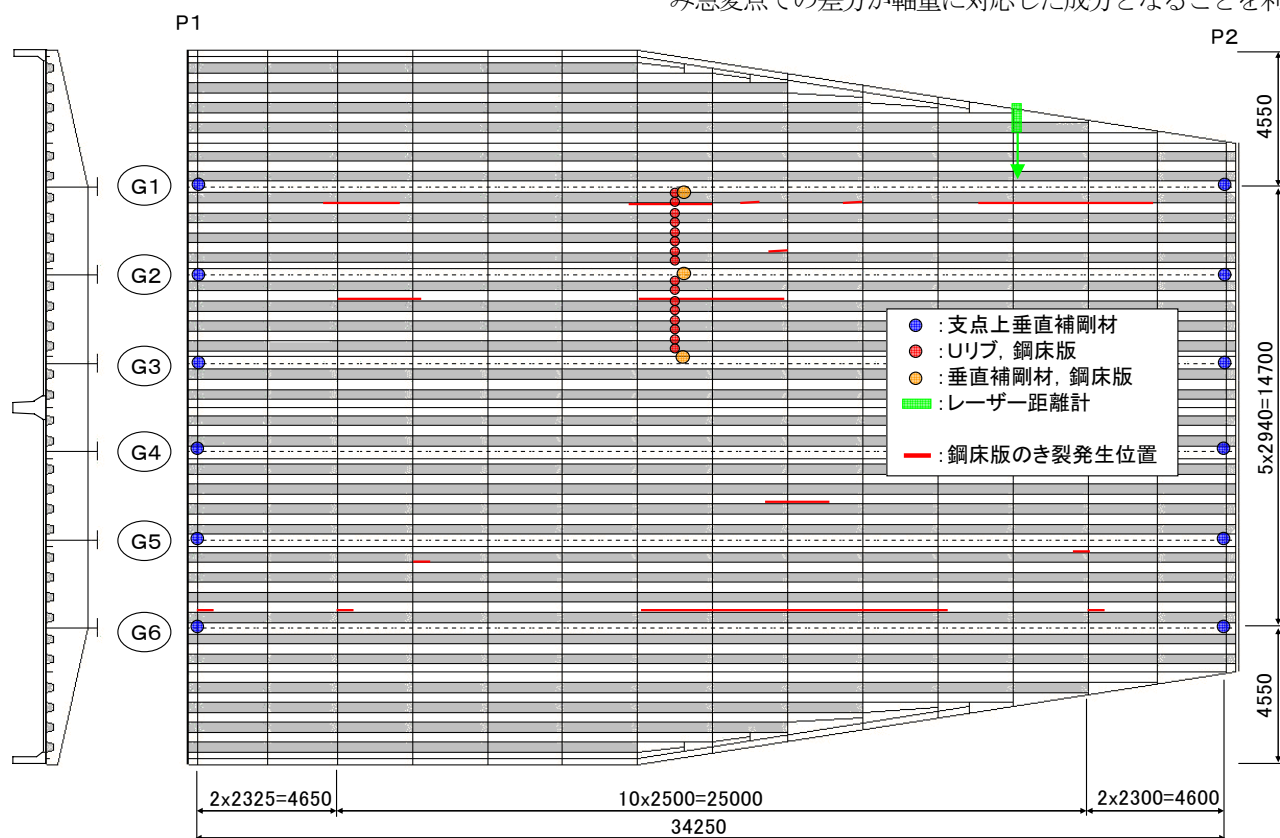
2.2 調査概要

鋼床版の発生応力の測定は、支間中央付近における縦溶接部、デッキと垂直補剛材を対象とした。また、活荷重は、BWIMの代表的な手法である支点反力法⁷⁾による測定を行った。計測点の配置およびひずみゲージ貼付位置は、図－1(a)および(b)に示したとおり、縦溶接部近傍にひずみゲージ（ゲージ長3mm）を溶接止端部から5mmの位置がゲージ長の中心となる位置に貼付している。車軸の通過位置は、非常駐車帯の路肩に設置したレーザー距離計により計測した。

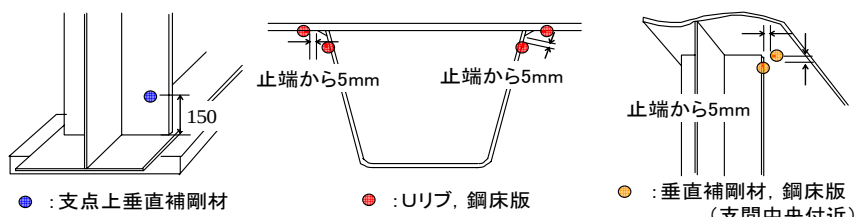
測定は、走行車線を車線規制を行った状態で、245kNに重量調整した試験車による載荷試験、試験車走行試験を行った。また、交通開放化での一般車両の走行状態での72時間連続測定（3日間連続測定）を実施した。

3. 活荷重の分析方法

支点反力法は、図－2に示すように車軸の通過によって支点反力影響線に現れるひずみ応答波形に着目して、ひずみ急変点での差分が軸重に対応した成分となることを利



(a) 測点配置およびデッキとUリブ溶接線のビード貫通発生位置図



(b) ひずみゲージ貼付位置図

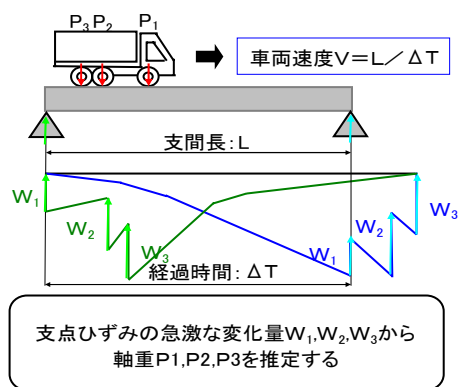


(c) き裂発生状況

図－1 調査対象橋梁および測点配置図

用して活荷重を求める方法である。支点部のひずみ測定のみで通過車両の車種別交通量、通過速度、軸重、総重量等を算出することが可能である⁷⁾。支点反力影響線の算出は、図－1 (b)に示す主桁支点部の垂直補剛材下端位置での応力を用いた。

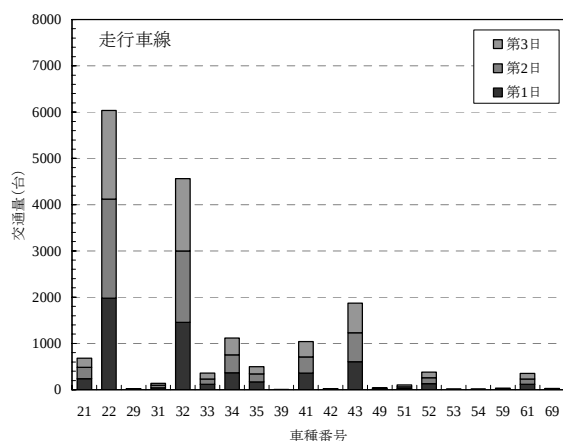
活荷重評価においては、代表的な車種ごとの車両荷重や軸重の大きさと頻度の把握が不可欠なことから、BWIMにより次の方法で走行車両の車種を判別した。まず、車両進入側と退出側の両測点での支点ひずみの急変点の発生時刻の差と支間長から走行車両の速度を求め、その速度と退出側測点の車軸の通過時刻の差から軸間距離を求める。また、このようにして算出した1台の車両の軸数、軸間距離、軸配置パターンを解析して、走行車両の車種を推定し分析を行った。分類対象とした車種は、表－1に示す2軸から6軸の車種区分番号で分類される14車種である。



図－2 支点反力法の分析概念図

表－1 支点反力法の車種分類

軸数	車種 (車種区分番号)	
2軸	小型貨物、中型貨物 (21～22)	(31)
3軸	ダンプ、貨物トラック、ローリー、貨物トラック、トレーラー (31～35)	(34)
4軸	セミトレーラー、セミトレーラー、貨物トラック (41～43)	(53)
5軸	セミトレーラー、フルトレーラー (51～53)	
6軸	セミトレーラー (61)	



図－3 車種別交通量

4. 調査結果

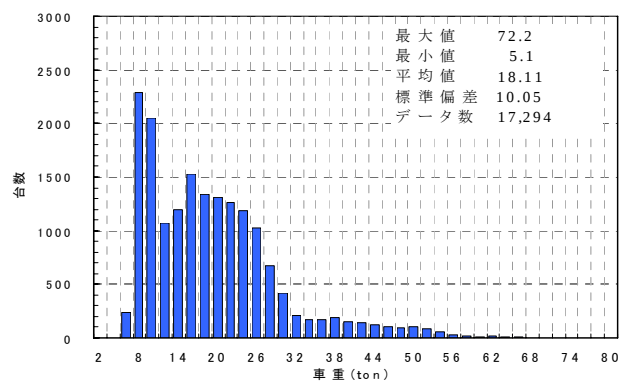
4.1 車種別交通台数

図－3に、車種毎の台数を整理した結果を示す。BWIMによる検出交通台数は、全車種3日間の合計で、走行車線は17,294台、追越車線は11,922台であり、これらの台数は乗用車を除いている。各測定日の差はほとんどなく、車種別で見ると中型貨物、3軸貨物トラック、4軸貨物トラックなどの台数が多い傾向が認められた。

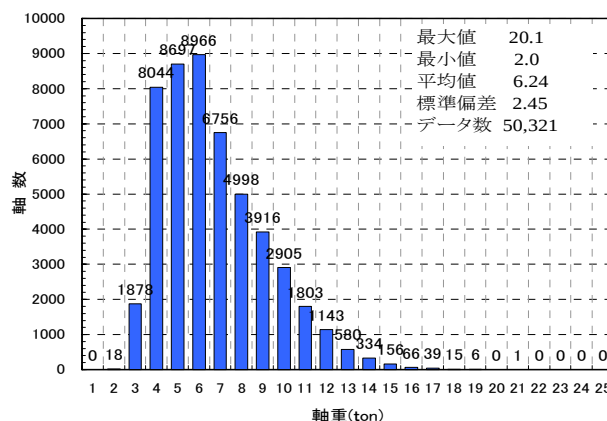
4.2 車両重量・軸重分布

走行車線における車両重量および軸重の頻度分析を図－4に示す。(a)車両重量分布では、8tfと16tfにピークが見られ、平均は18tfとそれより高い。(b)軸重分布では、ピークの軸重と平均値はほぼ一致し6tfである。また、法定軸重10tfを超える軸数が全体の8%存在している。また、車両の平均軸数は、2.9軸である。

車種別に処理した車両重量、軸重の分析結果を表－2に示す。車両重量の最大値は、小型・中型車種は23.7tf、トラック類は40.4tf、トレーラー類は72.2tfで、いずれも走行車線である。軸重の最大値も、小型・中型車種は17.8tf、トラック類は17.3tf、トレーラー類は20.1tfで、同様の結果である。走行車線は、全車線に対し、トラックで61%、トレーラーで62%の台数を負担している。なお、車種ごとの平均軸数は、トラック類は3.2軸、トレーラー類は4.3軸、



(a)車両重量分布



(b)軸重分布

図－4 走行車線における車両重量および軸重分布

大型車平均では3.5軸である。

車線による荷重環境の差が大きいことから、疲労照査においてはその影響を考慮する必要があり、車線単位で直接計測が可能なBWIMは効果的な手法と言える。

表－2 車種別の車両重量・軸重

		車両重量			軸重		
		小中型車類	トラック類	トレーラ類	小中型車類	トラック類	トレーラ類
走行車線	最大値 (ton)	23.7	40.4	72.2	17.8	17.3	20.1
	最小値 (ton)	5.1	9.1	11.3	2.0	2.4	2.6
	平均値 (ton)	9.6	20.5	33.9	4.8	6.3	7.9
	標準偏差	3.0	4.9	12.2	2.0	2.1	2.7
	データ数	6,720台	8,030台	2,409台	13,438軸	25,956軸	10,346軸
	データ数の割合	58%	60%	63%	58%	61%	62%
追越車線	最大値 (ton)	21.9	33.8	57.9	16.4	14.8	17.7
	最小値 (ton)	5.1	8.3	9.5	2.0	2.1	2.1
	平均値 (ton)	8.5	17.2	24.7	4.3	5.4	5.7
	標準偏差	2.6	4.6	8.2	1.7	1.8	2.0
	データ数	4,933台	5,311台	1,427台	9,866軸	16,831軸	6,212軸
	データ数の割合	42%	40%	37%	42%	39%	38%

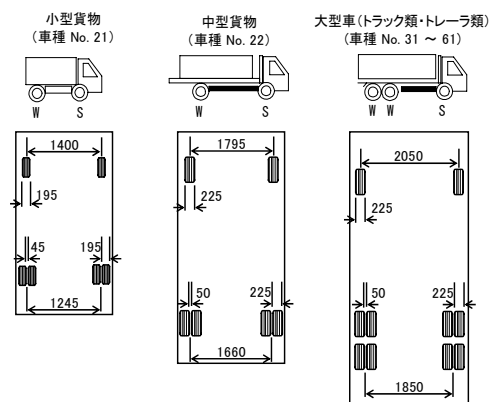
4.3 車両走行位置

BWIMによる荷重計測に加え、レーザー距離計により、車両走行位置を計測した。レーザー距離計には測定距離範囲が50mまで可能で、分解能1mmの赤外線レーザー距離計（応答速度1msec）を使用した。路肩に設置し、通過車両の左タイヤ位置までの距離を測定し、活荷重の走行時刻と同時刻のレーザー距離計の出力波形を読み取り、左タイヤ

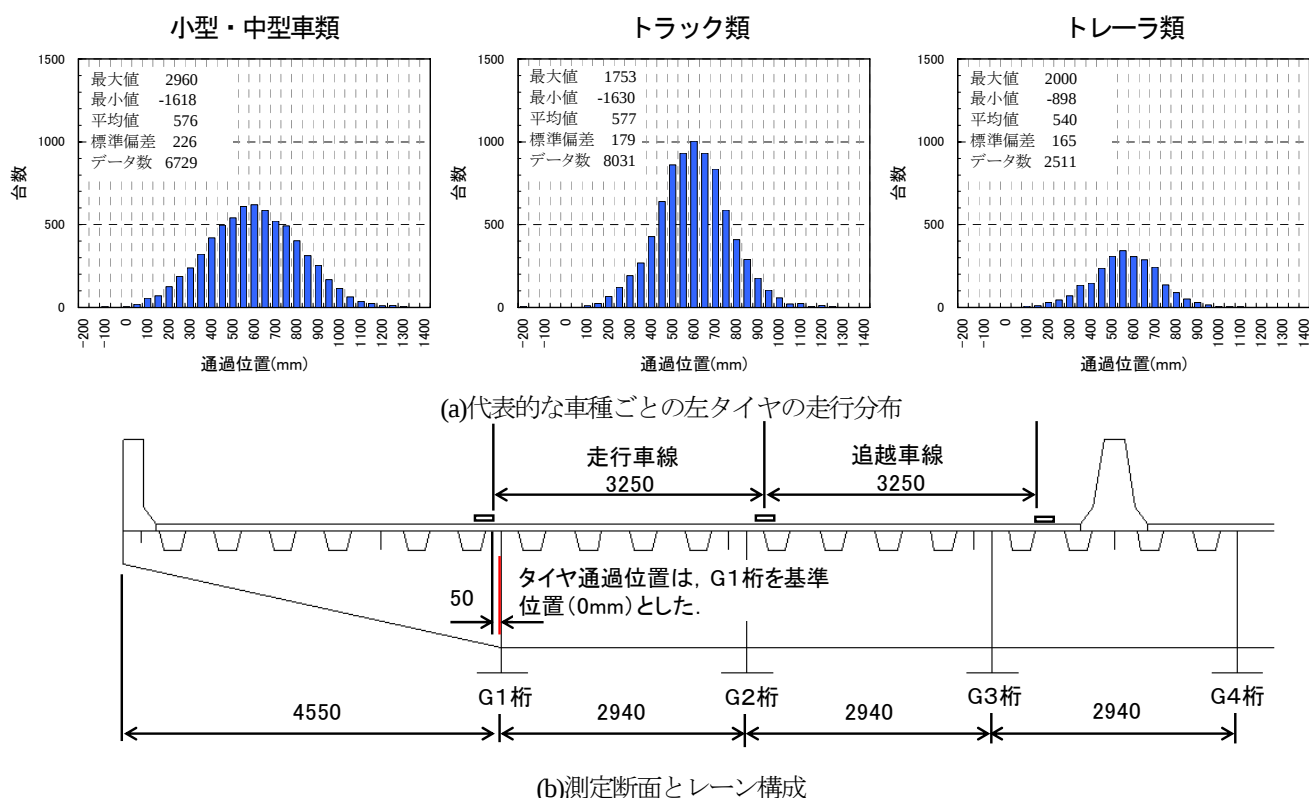
の走行位置を求めた。右タイヤの走行位置は、走行車両の輪距（トレッド）などを推定する必要があり、自動車諸元表⁸⁾により図－5を例に車両構造を判別し車両種別を分類して分析を行った。

車種別の車両走行位置の頻度分布を図－6に示す。ここで、G1桁位置を0mmとし、前軸シングルタイヤの場合はタイヤ中心位置、後軸ダブルタイヤの場合はダブルタイヤ間の中心位置の通過位置を示している。

車種別の車両走行位置は、小型・中型車類が中心位置 $\mu=576$ mm、標準偏差 $\sigma=226$ 、トラック類が $\mu=577$ mm、 $\sigma=179$ 、トレーラ類が $\mu=540$ mm、 $\sigma=165$ である。トレーラ類は車幅が広いので、大型車に比べて標準偏差が小さく、タイヤ中心位置が30mm程度左側（路肩側）にシフトしている。



図－5 通過位置算出に供する代表的な車両構造の例



図－6 車種別の車両走行位置（走行車線左タイヤ位置）

既往の研究によれば⁹⁾高速道路を走行している場合、大型車両で $\sigma=300\sim400$ mm、全車種の車両では $\sigma=400\sim500$ mm程度の通過位置分布の幅を示していることから、得られた測定結果はそれらより小さい。この要因として、路肩が1.75mに対して、計測箇所は1.15mと小さいことが要因と考えられる。

また、正規分布の検定を目的に、正規確率紙へプロットしたものを図-7に示す。コルモゴロフスミルノフ検定により車種別の車両走行位置の正規性の検定を行ったところ、いずれの分布においても1%の有意確率で棄却されないことから、正規分布として取扱ってよいと判断した。

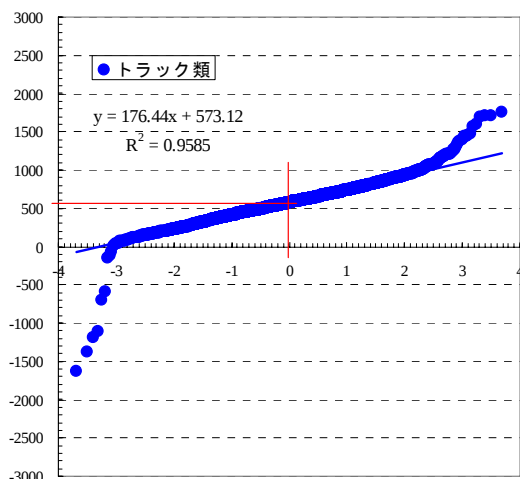


図-7 正規確率紙へのプロット（トラック類）

5. 実橋での車輪走行位置と応力分析

5.1 応力波形

図-8に示した試験車両が調査対象橋梁上を走行した際の、縦溶接線付近の発生応力の応力波形を測定した。測定断面は、図-9図(a)に示すとおりで、試験車は、対象とする測点の応力が最も大きくなる横断方向の位置を選定して、橋軸方向を低速で走行させた。図-9(b)は、測定結果のうちU10リブの縦溶接部近傍に設置したひずみゲージの発生応力が最大となる走行ケースの応力波形、および、その走行時のU7リブ近傍の測定結果である。測定時は冬季で気温は4.7～6.6℃であった。

図-9(b)には、赤色はデッキ側止端（De-1～De-4）、青色はUリブ側止端（Ri-1～4）のそれぞれの応力波形を示している。U7左側の測点はデッキ側、Uリブ側とも引張応力が大きくなっている。その他の測点では、デッキには引張応力が発生するがUリブは圧縮応力が卓越する。

これらの応力波形は、前軸、後前軸、および、後後軸のそれぞれに車軸の通過時に、急峻な下向き凸波形（圧縮応力）が発生し、この応力は、Uリブ側の応力変動が大きい。一方、軸通過の前後で比較的緩やかに増減する上下向き凸波形（引張応力または圧縮応力）の波形が発生している。前者の応力発生メカニズムを、車軸の直上載荷による鉛直応力起因する軸対応成分、後者を車両の走行で主桁ウェブ

を支点したデッキプレート広範囲に変形することに起因する板曲げ成分と考えられる。軸対応成分は車軸の通過ごとに明確に発生するのにに対し、板曲げ対応成分は、特にデッキ側測点では、後軸は2軸が合成されたような形の波形になっており、後軸の軸間距離（1320 mm）が短いと、車軸ごとの反応は現われない。

この2つの成分は応力の発生機構が異なることから、応力振幅の読み取りにおいて両者の影響を、図-9(c)に示す手法により分離した。同図の応力波形は、U10リブ右側の応力波形の経過時間10～20秒を拡大して示したものである。軸対応成分は、Uリブ側測点において応力のピーク波形が現れる前後の波形の応力を結んだ直線と、そのピーク値の差を読み取った。また、板曲げ成分は、比較的緩やかに増減する上下向き凸波形の前後の応力を結んだ直線と波形のピーク値の差を読み取った。その結果、軸対応成分は、後前軸で14N/mm²、後後軸16N/mm²の応力が発生している。U7右側での軸対応成分は、それぞれ18N/mm²、14N/mm²、14N/mm²、U10右側では20N/mm²、14N/mm²、16N/mm²で、試験車両の軸重はそれぞれ6.52tf、9.28tf および8.80tfであることから、必ずしも軸重の大きさに比例した振幅とはなっておらず、シングルタイヤの前軸の方がダブルタイヤの後2軸より大きくなっている。

板曲げ対応成分は、図-9(c)のU10右側において、14N/mm²程度と、軸対応成分とほぼ同じ大きさとなっている。また、図-9(b)のデッキ側測点において、デッキの板曲げに起因して発生しており引張応力の繰返し、縦溶接部の溶接ルート部を起点とする疲労き裂の進展に影響を与えていると考えられる。高温時の舗装剛性が低下する場合や、重量違反車が走行する場合は、この応力がさらに高くなると予想される。この発生応力は、主桁の構造や配置の影響を受け、小型試験体による載荷試験では再現が難しいと考えられる。

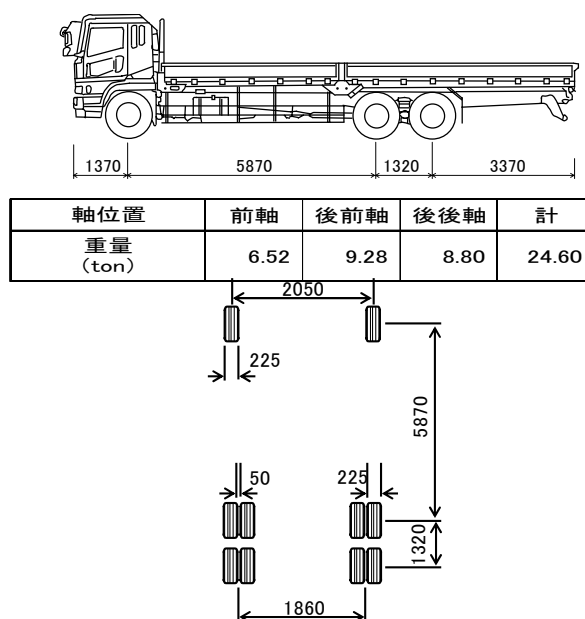
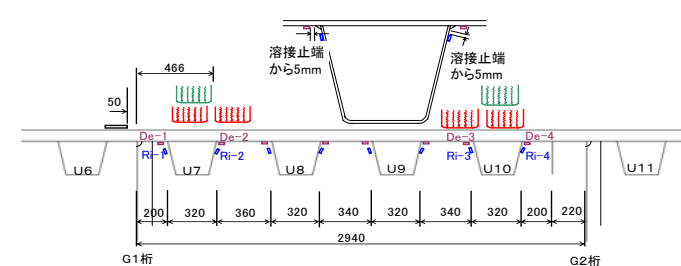
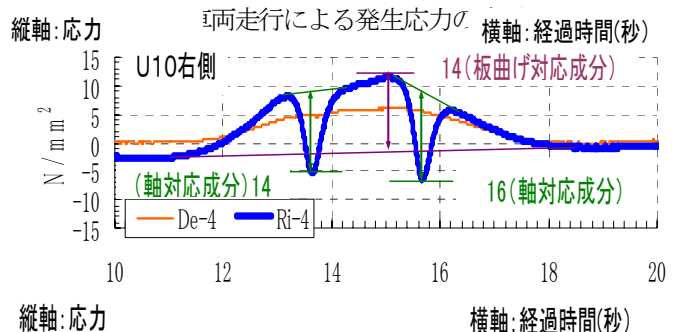
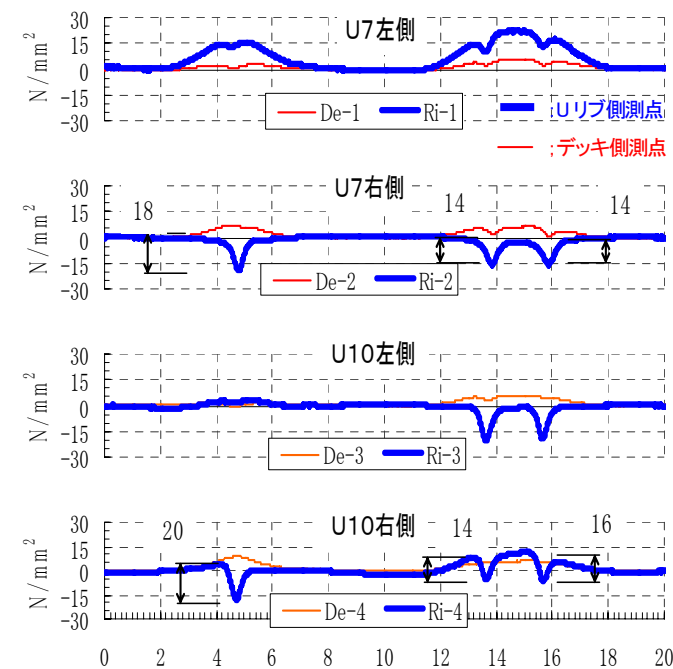


図-8 試験車両の諸元



(a)測定断面およびゲージ位置



(c)板曲げ対応成分と軸対応成分の分離方法

図-9 車両走行時の応答波形の代表例

5.2 通過位置と発生応力

横断方向の通過位置に対する応力性状の把握を目的に、橋軸直角方向に50mm程度ずつずらしながら、試験車を低速走行させた。その際、レーザー距離計等を利用して前軸、後軸毎に詳細に走行位置の確認を行ない、発生応力と対応させた。

その結果として、図-10にタイヤ位置と応力範囲の関係を示す。なお、タイヤ位置は、前輪のシングルタイヤの場合はタイヤ幅の中心、後輪のダブルタイヤの場合はダブルタイヤの中央位置で定義した。

図-10の(a)と(b)とを比較すると、前節と同様に、シ

ングルタイヤの前軸の方がダブルタイヤの後2軸より振幅は大きくなっている。一方、比較的緩やかに変化する板曲げ対応成分は、軸重の比程度までは対応していないが、軸重の大きい後2軸の方が大きい振幅を示している。これは、図-10の(c)と(d)との比較でも同様の傾向である。また、ダブルタイヤの場合は、2本のタイヤ間の間隙があるため、横軸を通過位置で整理すると最大ピークはタイヤ間隙中央より少しずれた位置となる。このように、ダブルタイヤの場合の軸対応成分による応力範囲の大きさは、通過位置の違い以外にも隣接するタイヤによるUリブの変形の影響を受けると考えられる。

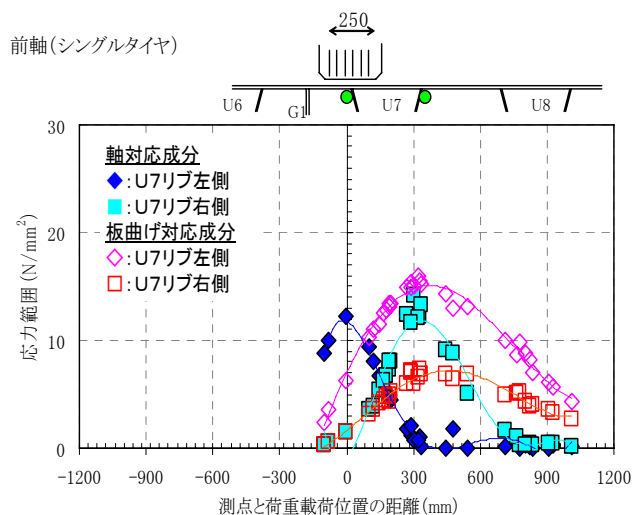
また、通過位置と発生応力の関係では、軸対応成分は通過位置が150mm程度ずれると応力は1/2程度まで小さくなり、板曲げ対応成分は300mm程度ずれると、軸対応成分と同様に応力範囲は1/2程度まで小さくなる。前述したように、鋼床版の疲労き裂に影響のある大型車（トラック類、トレーラー類）の通過位置の標準偏差 σ は160~180mm程度であることから、タイヤの最頻度位置から $\pm 1\sigma$ ずれると発生応力が大幅に低下しており、通過位置が大きな影響を及ぼすことがわかる。

図-10(a)および(b)において、U7リブの左右の応力範囲を比較すると、前輪・後前輪とも、軸対応成分はほぼ等しいが、板曲げ成分は主桁に近い左側が右側の倍程度である。これは、主桁を連続桁の中間支点とするような、面外方向の板曲げが発生し、G1桁近傍に位置するU7リブ左側の応力が高くなったと考えられ、主桁とUリブとの位置関係も応力範囲に影響を及ぼしている。一方、図-10(c)および(d)のU10リブの左右では応力がほとんどかわらず、主桁からある一定以上の離隔があると、主桁の影響は受けないことがわかる。

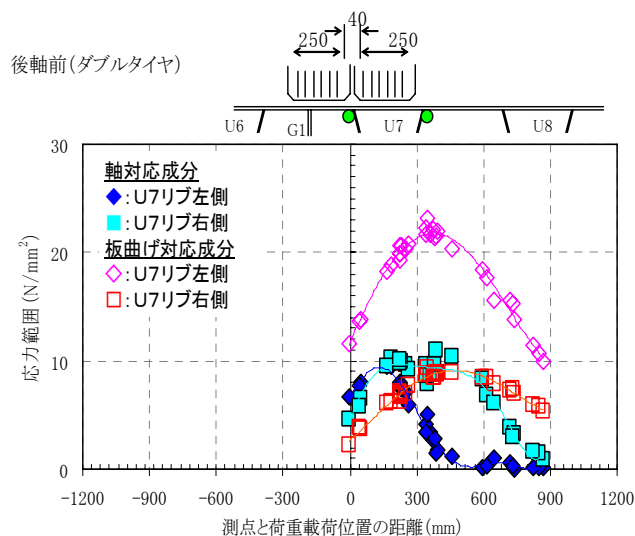
次に、1台の車両が通過する際の最大応力と最小応力の差（以下、全振幅という）を読み取り、タイヤ通過位置で整理した結果を図-11に示す。例えば、図-9のU10リブ右側の応答波形では、1台の車両が通過する際の最小応力は前軸が通過する際に発生し、最大応力は後2軸のタンデム軸中心が通過する際に発生しており、これらの差が車両通過時の全振幅となる。そのため、車軸により発生応力値が異なるため、ここでは後2軸のタンデム軸中心が通過する際のタイヤ通過位置に対する応力を整理した。応力と軸重の対応では、鋼床版Uリブの発生応力の大きさについては車両総重量ではなく、軸重に対応して発生している。また、タンデム軸中心が通過する際に生じる振幅についても、タンデム軸重和（試験車両の場合18.1tf）によって生じているのではなく、軸重に対応した振幅となっている。

図-11には、測点ごとの応力に対する近似曲線を示しており、全振幅の場合、600mm程度ずれると応力は1/2程度まで小さくなることがわかる。また、全振幅の大きさは1台の車両の最大軸重によってほぼ示されることが考えられる。

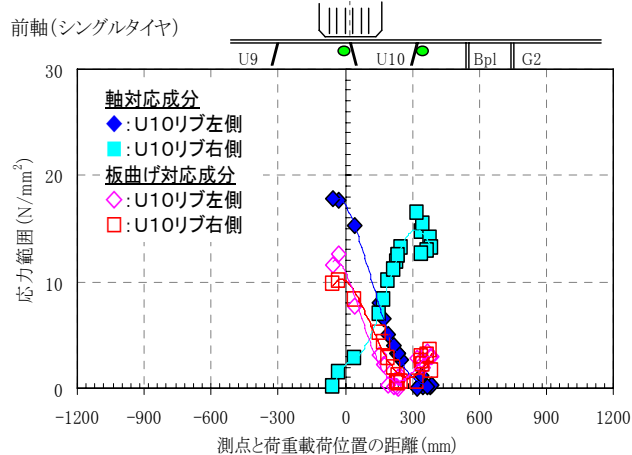
上記で述べたように、車両走行による発生応力は、軸重



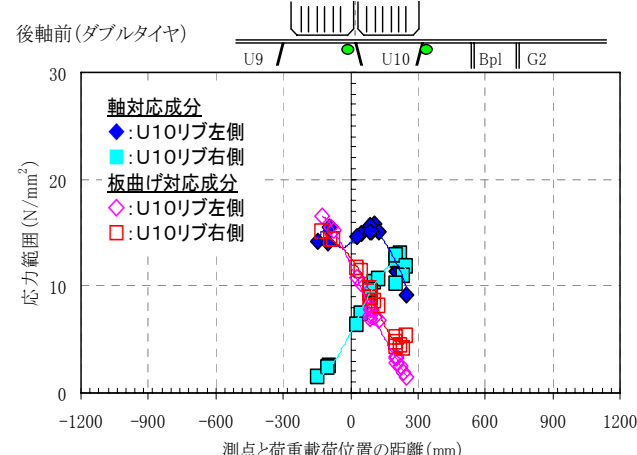
(a) U 7 リブの前輪走行時の応力範囲



(b) U 7 リブの後前輪走行時の応力範囲

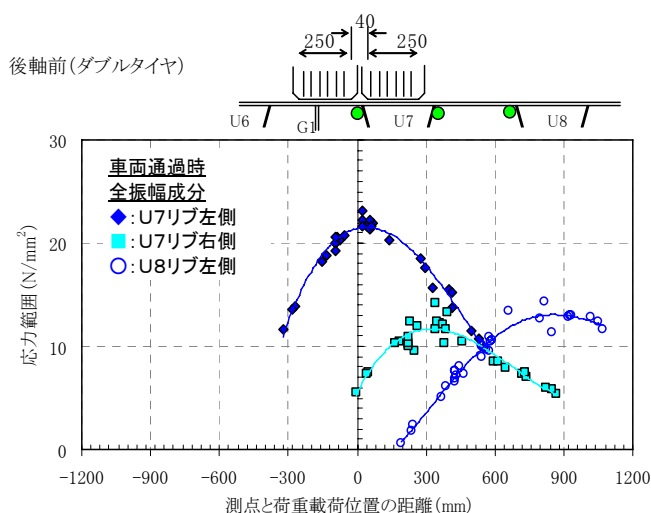


(c) U 1 0 リブの前輪走行時の応力範囲

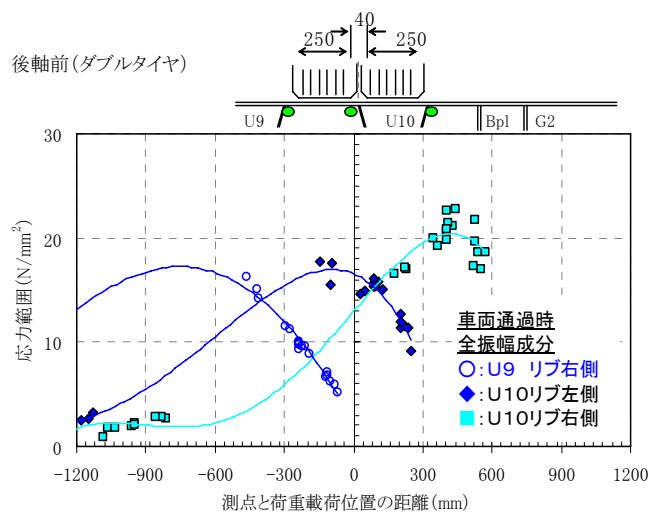


(d) U 1 0 リブの後前輪走行時の応力範囲

図ー 1 0 タイヤ通過位置と軸対応成分および板曲げ成分の応力範囲の関係



(a) U 7, U 8 リブの後前輪走行時の全振幅の応力範囲



(b) U 9, 1 0 リブの後前輪走行時の全振幅の応力範囲

図ー 1 1 タイヤ通過位置と全振幅の応力範囲の関係

の大きさ以外に通過位置の影響を受けることから、活荷重測定により頻度分析を実施しても、通過位置のパラメータの影響が大きく、車両の通過と応力との相関を把握しないと、発生している応力や疲労き裂の発生要因の評価が困難になることが予想される。

6. 走行位置と疲労寿命に関する検討

6.1 応力頻度計測による疲労寿命

一般車両走行状態において、72 時間連続の応力測定を行った。図ー 1 2に、レインフロー法による応力頻度分析

結果を示す。測点は、走行車線の左タイヤおよび右タイヤのそれぞれの最頻通過位置の近傍に位置する、U7リブ右側、および、U10リブ左側とした。測点は、縦溶接部のデッキ側止端とUリブ側止端とした。応力範囲とその頻度は、いずれもデッキ側よりUリブ側の方が大きいことから、以下ではUリブ側の特に溶接切断タイプのき裂に着目して分析を行う。

マイナー則による疲労寿命の算出において、デッキとUリブ溶接部は、応力が局所的な板曲げが支配的であり、疲労設計指針¹⁰⁾で規定している継手の強度等級は直応力によるものであり、直接用いることは困難と考えられる。そこで、既往の疲労試験の結果¹¹⁾¹²⁾を参照し、溶接のど断面の応力範囲を用いて算出を試みた。ど断面に作用する応力は曲げ応力が支配的であるが、その応力は直接計測することはできない。そこで、図-13より、ど厚部の応力度(σ_c)は、デッキから20mm離れた計測点の応力度(σ_b)を用いて、式(1)により推定した。

$$\sigma_c = \alpha \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^2 \cdot \sigma_b \quad (1)$$

ここに、 t : Uリブ厚(mm), a : のど厚(mm)

α : デッキから20mm離れた位置(計測点)に作用する曲げモーメント(M_b)とどのど厚部に作用する曲げモーメント(M_a)の比(M_a/M_b)、 α は、文献11)における実大モデルの静的載荷試験結果を引用し、 $\alpha=1.09$ を用いた

また、デッキとUリブ溶接部をモデル化した疲労試験の結果、疲労強度はどのど厚の応力度が支配的であり、その応力範囲で整理すると疲労設計指針¹⁰⁾のF等級(基本応力範囲65MPa)程度の強度等級であったことから¹¹⁾、本検討ではUリブ側止端の測点についてF等級で疲労寿命の計算を行った。

図-14にUリブ測点での疲労寿命、および、応力範囲を示す。同図の応力範囲(σ_{cL1})は、上限値に近い30N/mm²以上の発生応力に対する1%上限値を示す。左タイヤ通過直下位置近傍のU7左右、U8左では、疲労寿命が50年~80年程度となっている。計測時期が冬季で気温が5℃程度と低く舗装の剛性が高いことを考えると、寿命は低いと言える。右タイヤに対するU9右、U10左右では、疲労寿命がさらに短く20年~50年程度となっている。特に、過去にき裂が発生し補修溶接が施されているU7右、U10左、U12左はどのど厚が8mmと他の溶接線より厚いにもかかわらず、応力範囲は高く、疲労寿命はそれぞれ77年、19年、76年と相対的に短く、疲労環境が厳しいといえる。

また、図-14の断面図に走行車線、追越車線それぞれにタイヤの再頻度位置と、過去のき裂発生箇所を示している。き裂の発生は、タイヤの再頻度位置に最も近い縦溶接部に集中していることが明らかである。

本調査では活荷重と発生応力を同時に測定しながら両者の相関を把握している。そのため、活荷重(例えば通過

車両の最大軸重)と発生応力(例えば全振幅)の相関を検討することも可能である。

通過車両1台毎に発生応力(全振幅)を算出し、その最大軸重と発生応力の相関を図化したものを図-15(a)に示す。また、図-15の(b)および(c)は、タイヤの最頻度位置(U7リブ直上近傍)のデータに絞って検討した場合の、最頻度位置近くの縦溶接線と離れた場合との最大軸重と発生応力の相関を図化したものを示している。最大軸重と発生応力(全振幅)は、タイヤ通過位置直下については相関が高く($R^2=0.68$)、タイヤ通過位置から離れると相関が低く($R^2=0.28$)になっている。

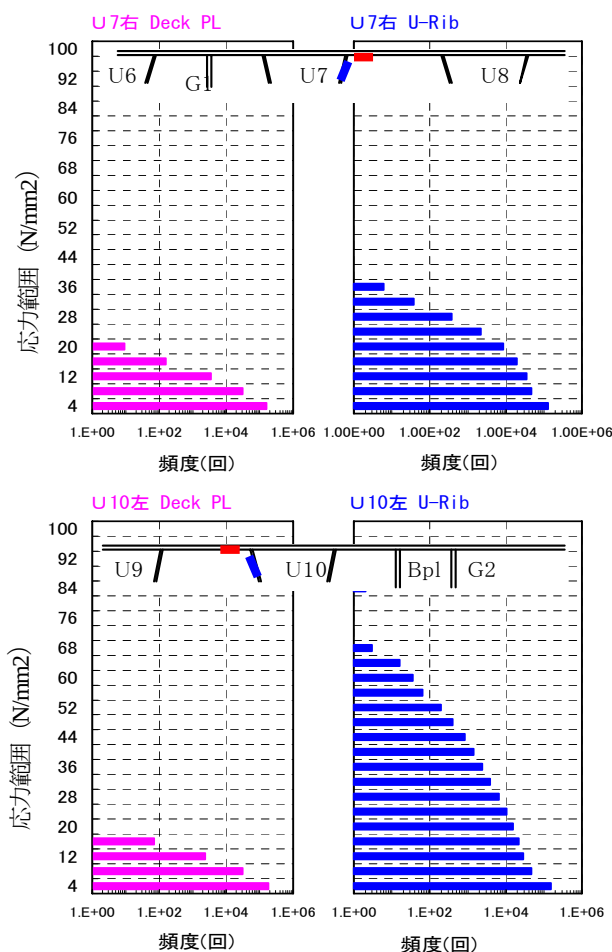


図-12 応力頻度分析結果の一例

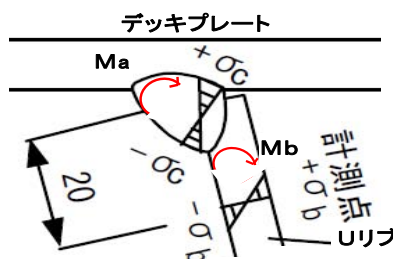
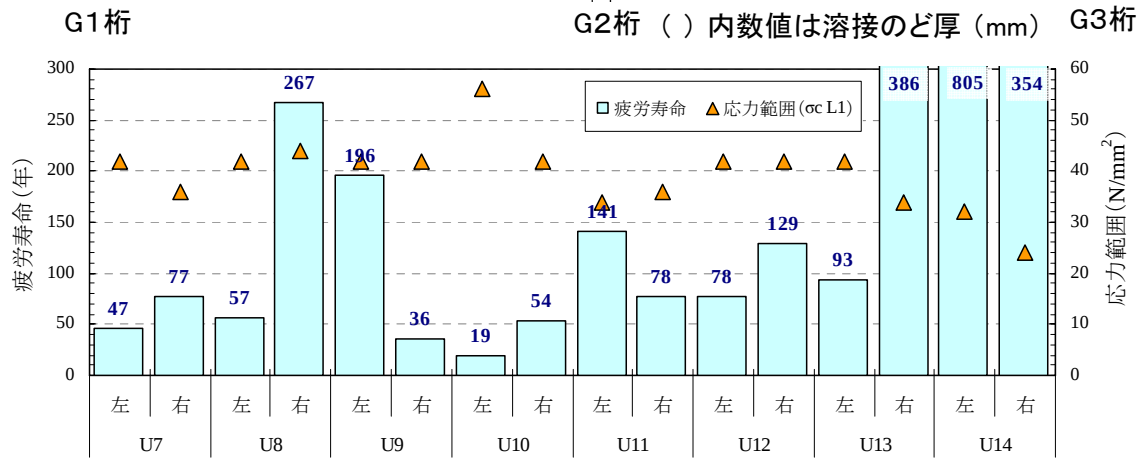
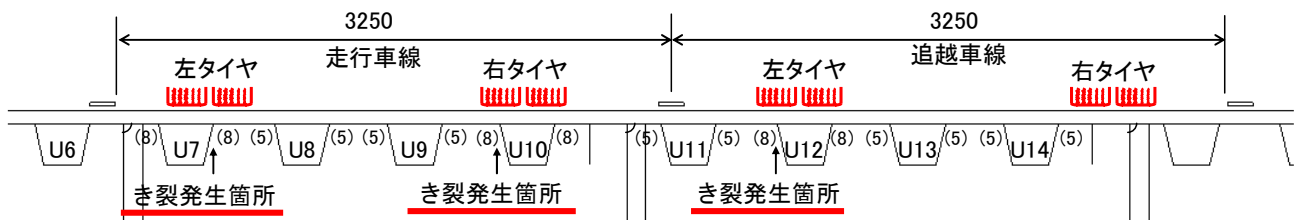
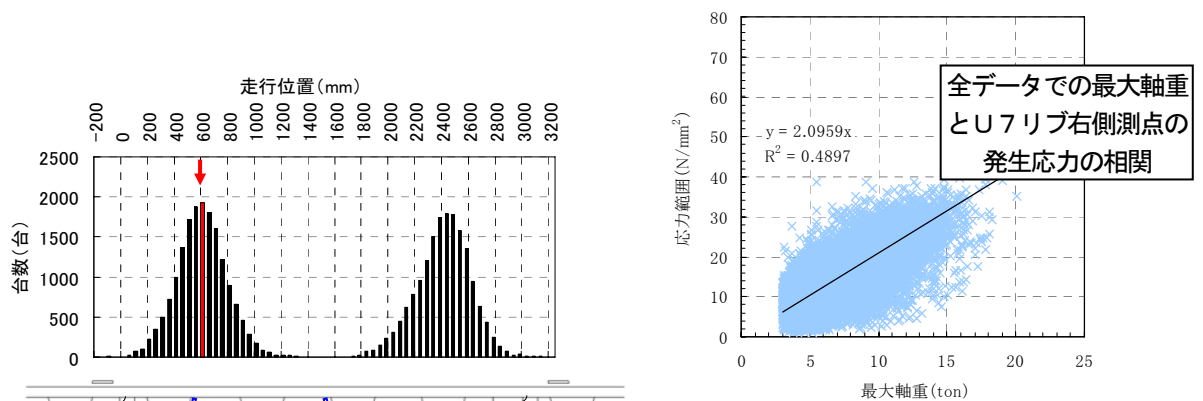


図-13 デッキとUリブ溶接部の曲げ応力の概念

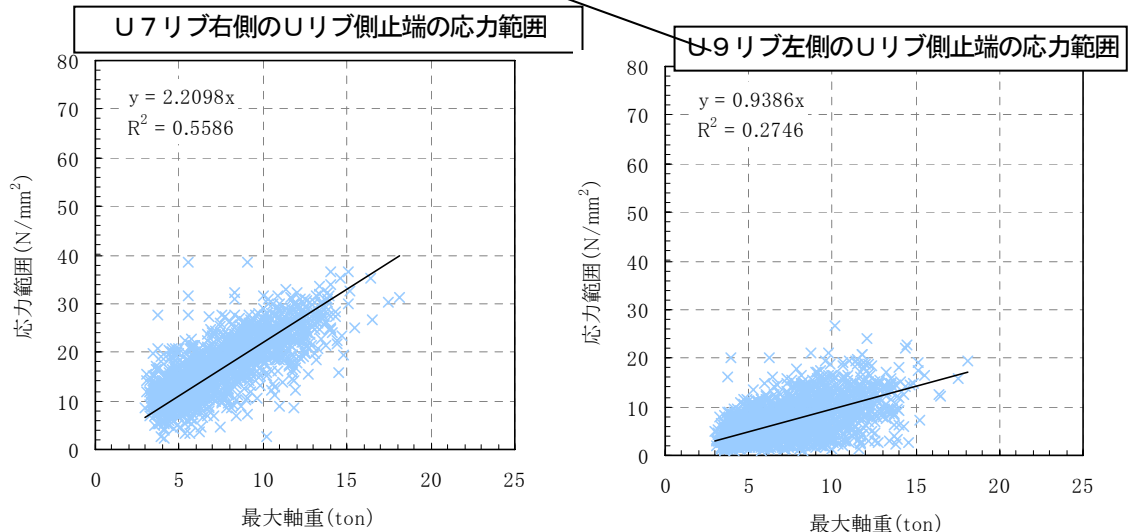


※ σ_c L1:30N/mm²以上の応力の発生回数に対する1%上端値

図-1 4 デッキとUリブの溶接部の疲労寿命および応力範囲の計算結果



(a) 最大軸重とUリブ止端側の応力範囲の相関



(b) 軸重とU7リブ右側のUリブ側止端の応力範囲

(c) 軸重とU9リブ左側のUリブ側止端の応力範囲

図-1 5 軸重と発生応力の相関関係

6.2 等価軸重の算出

通過位置に関する検討を行う上で、タイヤ通過位置に対する軸重分布の差異を調べた。図-16は、図-6(b)の走行車線において、左タイヤの通過位置別の軸重分布である。軸重10tf以上の車両は主200～800mm（最頻通過位置600mm）の位置を走行しており、800mmより追越車線側は4～8tfの小中型車両が走行している。

次に、大型車の軸重計測データから等価軸重 W_{eq} を求めた。等価軸重 W_{eq} は、図-6(a)に示した車両の軸重頻度分布に基づき、3乗平均式の式(2)を用いて算出した。

$$W_{eq} = \sqrt[m]{\sum W_i^m \cdot n_i / \sum n_i} \quad (2)$$

ここに、 W_{eq} ：等価軸重（tf）、 W_i ：計測軸重（tf）、 n_i ： W_i （tf）の軸数、 m ：疲労設計曲線の勾配で $m=3$

タイヤ通過位置頻度分布図と通過位置別の等価軸重を重ね描きしたものを図-17に示す。走行車線の大型車の等価軸重は8.3tf、タイヤ通過位置200～800mmに限定した場合の等価軸重は8.3～8.9tf（平均値8.7tf）を示しており、タイヤ通過位置によって大きな差異はない。また、800mmより追越車線側では7.0～8.0tf（平均値7.4tf）でやや小さく、この付近の通過位置では小中型車両が数多く走行していると考えられる。

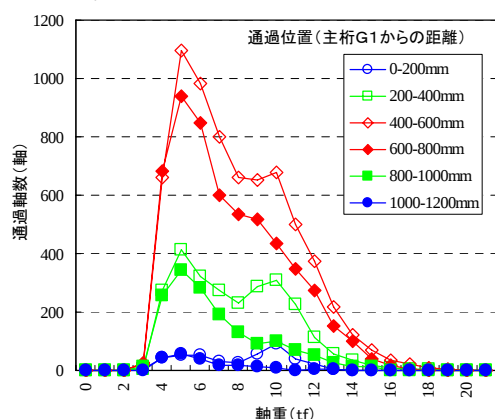


図-16 走行車線の左タイヤの通過位置別軸重分布

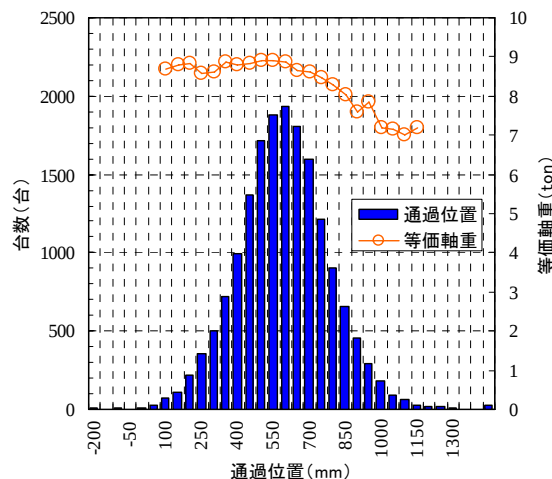


図-17 タイヤ通過位置と等価軸重

6.3 通過位置に対する発生応力の関数化と疲労寿命

図-11に示したタイヤ通過位置と全振幅成分応力の関係から、逆解析により応力影響線関数を求めた。計算はMoses¹³⁾が実施した手法を基に実施した。まず、応力の影響線 $f(x)$ を式(3)の関数で表すことができると仮定した。なお、計算の簡素化より4次以上の項は省略する。

$$f(x) = a_1 x X^3 + a_2 x X^2 + a_3 x X + a_4 \quad (3)$$

ここに、 a_1, a_2, a_3 ：係数、 X ：タイヤ通過位置

各測点について最小自乗法により係数を計算した結果を表-3に、タイヤ通過位置と応力との関係の図化を図-18に示す。

次に影響関数を用いて、疲労寿命を算出した。まず、この影響関数は、試験車両の後前軸（9.28tf）が走行した際の応力振幅であり、前述したように等価軸重は8.3tfであることから、軸重比0.89（=8.3/9.28）を応力影響線関数に掛けてタイヤ通過位置毎の発生応力振幅を算出する。また、走行車線を走行した車両の総軸数を通過台数で除し、大型車平均軸数を求めると約3.5軸/台となることから、各タイヤ通過位置の台数を3.5倍して応力頻度を算出する。疲労寿命は、図-14の結果と同様、のど厚応力の応力範囲と強度等級Fを用いて計算した。

図-19には、上記の計算結果である③応力影響線関数による方法、および、①き裂発見時に実施された応力頻度分析を用いた疲労寿命¹⁴⁾を示す。併せて、図-14の②応力頻度分析結果を再掲している。

①の方法の疲労寿命が最も短い。これは測定箇所のU8左右における溶接部のど厚が5mmと小さく、加えて、測定時期が秋季で平均気温が15℃程度と高く、舗装の剛性が下がっていることが要因と考えられる。U8左における疲労寿命10年は、本橋において供用以降6年程度で縦溶接に溶接ビード貫通が発見されたことと、ほぼ一致している。応力頻度計測による疲労寿命は、計測シーズンに起因する舗装剛性の影響を強く受ける。

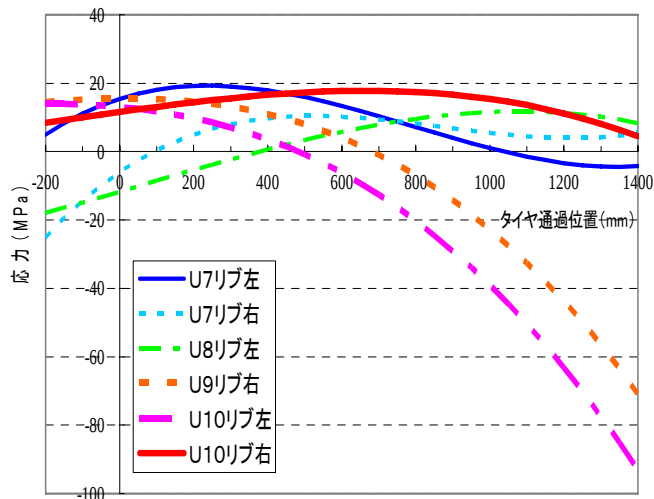
③応力影響線関数による方法は、疲労寿命が50年以下と厳しい環境のU7左、U9、および、U10左右の各側線において、②に対してほぼ等しい疲労寿命となっている。応力影響線関数は、舗装の剛性、主桁構造が大きく異なるとそれぞれ算出する必要があるが、このストックが充実してくると、交通データが既知であると、実橋での応力頻度測定を行わずに疲労寿命を算出することが可能になり、今後の維持管理の効率化が図れると考えられる。

7. まとめ

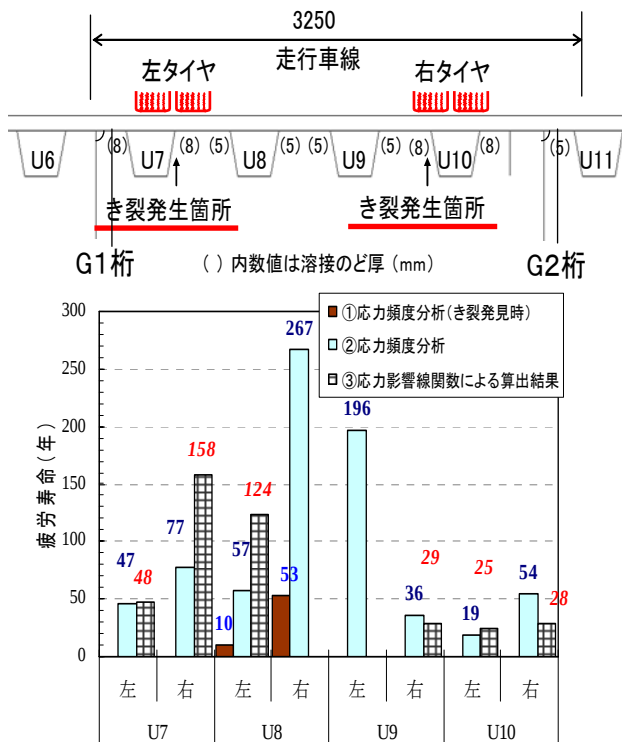
鋼床版橋の荷重面からの疲労評価を目的に、BWIMを応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響を検討した。以下に、本検討により得られた知見を示す。

表－3 タイヤ通過位置の応力影響線関数

測点位置	a1 (xX ³)	a2 (xX ²)	a3 (xX ¹)	a4
U7リブ左	3.94E-08	-7.00E-05	5.37E-03	2.14E+01
U7リブ右	4.29E-08	-8.66E-05	4.26E-02	5.51E+00
U8リブ左	-1.13E-08	-5.02E-06	3.49E-02	-6.00E+00
U9リブ右	-1.09E-08	-4.49E-05	-4.69E-02	1.71E+00
U10リブ左	-1.52E-08	-3.80E-05	-1.22E-02	1.64E+01
U10リブ右	-8.74E-09	-9.11E-06	1.42E-02	1.61E+01



図－18 タイヤ通過位置の応力影響線関数



図－19 疲労寿命の比較

(1)BWIM による計測結果から、軸重分布ではピークの軸重と平均値とはほぼ一致し 6tf であり、法定軸重 10tf を超える軸数が全体の 8%存在している。車種別では、車両重量の最大値は、小型・中型車類は 23.7tf、トラック類は 40.4tf、トレーラ類は 72.2tf であった。また、軸重の最大値は、小型・中型車類は 17.8tf、トラック類は 17.3tf、トレーラ類は 20.1tf であった。走行車線は、全車線に対し、トラックで 61%。トレーラで 62%の台数を負担している。車種ごとの平均軸数は、トラック類は 3.2 軸、トレーラ類は 4.3 軸、大型車平均では 3.5 軸である。車線による荷重環境の差が大きいことから、疲労照査においては車線単位で直接計測が可能な BWIM は効果的な手法と言える。

(2)車両走行位置の分布形状は正規分布として取扱ってよい。車両走行位置は、左側レーンマーク端からトラック類が $\mu=627$ mm, $\sigma=179$, トレーラ類は車幅が広いので、トラックに比べて標準偏差が小さく、タイヤ中心位置が 30 mm程度左側にシフトしている。

(3)タイヤ通過位置と発生応力との実測結果から得られた近似曲線では、軸対応成分は応力のピークに対して通過位置が 150mm 程度ずれると応力は 1/2 程度まで小さくなり、板曲げ対応成分は 300mm 程度ずれると、軸対応成分と同様に応力は 1/2 程度まで小さくなる。全振幅の場合、600mm 程度ずれると応力は 1/2 程度まで低下している。軸対応成分の応力振幅は軸重の大きさに比例しておらず、シングルタイヤの前軸の方は、ダブルタイヤの後軸より大きい場合がある。一方、板曲げ対応成分は、後軸の方が大きく軸重にほぼ対応した応力振幅を示している。

(4)板曲げ対応成分は、軸対応成分とほぼ同じ大きさとなっている場合があり、この引張応力の繰返し、縦溶接部の溶接ルート部を起点とする疲労き裂の進展に影響を与えていると考えられる。この応力範囲の大きさは、主桁の構造や配置の影響を受け、小型試験体による载荷試験では再現が難しいと考えられる。

(5)応力頻度分析により疲労寿命を計算すると、右タイヤ通過直下位置近傍の縦溶接線では、20 年～50 年程度と計測時期が冬季であることを考慮すると、寿命は低く疲労に厳しい実態となっている。

(6)等価軸重を算出すると、走行車線の大型車の等価軸重は 8.3tf で、タイヤ通過位置 200～800mm に限定した場合の等価軸重は 8.7tf を示しており、タイヤ通過位置によって大きな差異はなかった。

(6)応力影響線関数により計算した疲労寿命は、タイヤの最頻度位置に近傍の縦溶接部Uリブ側止端の測点において、応力頻度解析の結果と良好に一致している。応力影響線関数は、舗装の剛性、主桁構造が大きく異なるとそれぞれ算出する必要があるが、合理的な手法と期待される。

謝辞

本検討は、BWIMの都市高速への適用に関する研究会（委員長：名古屋大学大学院山田健太郎教授）において審議されたものである。委員の方々には、貴重なご意見を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)堀江佳平，高田佳彦：阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取組み，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.55-69 土木学会，2007.8.
- 2)三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No. 780／I-70，pp. 57-69，2005. 1.
- 3)例えば，阪神高速道路公団：設計荷重（HDL）委員会報告書第2編活荷重分科会報告 阪神高速道路における活荷重実態調査と荷重評価のための解析，1984.3.
- 4)時田英夫，永井政伸，三木千壽：交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価，土木学会論文集 Vol. 2005，No. 794
- 5)三木千壽，村越潤，米田利博，吉村洋司：走行車両の重量測定，橋梁と基礎，1987. 4，pp. 41-44
- 6)松井繁之，Ahmed EL-HAKIM：RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究，構造工学論文集，Vol.35A，pp.407-418，1989.
- 7)小塩達也，山田健太郎，若尾政克，因田智博：支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析，構造工学論文集，Vol.49，pp.743-753，2003
- 8)自動車諸元表 2007 年版，社団法人自動車技術会，2007
- 9)宇佐 武則，梶川 康男，沖野 真，西澤 辰男；阪神高速道路松原線における交通荷重列の実態調査，土木学会第 42 回年次学術講演概要集，Vol.42，pp.80-81，1987.9
- 10)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針同解説，1993 年，技報堂出版
- 11)牛尾正之，植田利夫，村田省三：トラフリブとデッキプレートとの接合部の疲労強度特性，関西道路研究会会報，1-12，1985. 11
- 12)川上順子，伊藤進一郎，川畑 敬，松下裕明：鋼床版デッキプレートとトラフリブ溶接部の疲労試験，土木学会第60回年次学術講演会 I-397，pp. 791-792，2005. 9
- 13)Moses,F.: Instrumentation for Weighing Trucks-In-Motion for Highway Bridge Loads, FHWA/OH-83-001
- 14)財)阪神高速道路公団管理技術センター，平成 15 年度神戸管理部管内特殊橋梁点検及び追跡点検業務報告書，2004. 3

(2008 年 9 月 18 日 受付)