

既設鋼床版の疲労亀裂損傷の要因分析（２）

－実荷重に基づく等価換算軸数と実損傷との分析－

阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課	田畑 晶子
阪神高速道路(株)建設事業本部建設技術課(大阪設計担当)	高田 佳彦
阪神高速道路(株)大阪管理部	堀江 佳平

要 旨

鋼床版は、大型車交通量や車両重量の影響を強く受けるため、実橋の疲労評価では、荷重特性の実態把握が重要となる。本稿では、当社が保有する交通データ等を用いて、着目車線を通じた大型車の累積軸数を法定軸重である 98kN に等価な換算軸数として算定するとともに、既設鋼床版の損傷データとの相関を分析した。その結果、神戸線の再構築桁の等価換算軸数は湾岸線のそれとほぼ等しくなり、猛烈なスピードで疲労ダメージを蓄積していること、また、亀裂タイプ毎の等価換算軸数と損傷データとの明確な正の相関は認められず、鋼床版の疲労評価では、等価換算軸数のみならず溶接のど厚や車両の走行位置等を考慮する必要があることがわかった。

キーワード： 鋼床版，疲労亀裂，等価軸重，98kN 等価換算軸数

はじめに

鋼床版は、溶接による薄板集成構造であるため、全体的に剛性が小さく、構成板要素が複雑に挙動し、応力変動が大きい。

鋼道路橋の疲労設計指針¹⁾（以下、指針という）において、道路橋の疲労照査は主に、応力度による疲労照査、および構造ディテールによる疲労照査、に分けられる。指針における鋼床版の扱いは、作用によって生じる応力に対する舗装剛性や輪荷重走行位置分布など、様々な要因による影響やばらつきが大きく、設計計算で得られる応力範囲に基づく疲労照査は一般に困難とされ、構造ディテールによるものとされている。

しかし、鋼床版は、大型車交通量や車両重量の影響を強く受けることから、実橋の疲労評価では、実態自動車荷重の把握が極めて重要である。

当社では、交通管理を目的に、料金所や本線上の一定の間隔ごとにトラフィックカウンターが設置され、フルタイムで計測が行われており、精度の高い交通量データの取得が可能である。

また、当社では、過去数度にわたり、料金所に設置された軸重計を用いた活荷重実態調査を実施している²⁾³⁾⁴⁾。さらに、近年、本線上の走行車両の荷重特性の把握を目的に、BWIM（Bridge Weigh In Motion）による荷重測定を行っている⁵⁾。

そこで筆者らは、道路ネットワークにおける疲労評価を目的に、保有する交通データ等を活用し、大型車の荷重特性を分析した。また、着目車線を通じた大型車の累積軸数として、法定軸重である 98kN に等価な換算軸数を算定し、疲労環境を評価した。さらに、荷重作用の影響評価を目的に、等価換算軸数と鋼床版の疲労損傷データとの相関を分析した。

1. 検討手順

当社では、交通データ等に関して、以下を保有している。

- ・活荷重特性を把握するための集約料金所での軸重・車両測定データ
- ・軸重違反車両の取り締まりを目的とした全料金所での車両軸重の計測データ
- ・車両の通過経路の交通実態把握を目的とした起終点調査データ

以上に基づき、当社の疲労環境を評価するための等価換算軸数は以下の手順により算定した。

なお、軸重は車両によって異なるが、最終的には累積疲労損傷度と等価な法定軸重 98kN の軸数に換算している。

[検討手順]

各路線・各区間の供用開始以降の交通量の整理。具体には交通流体図より積み上げ。

集約料金所の固定式軸重計、または BWIM による測定記録から軸重頻度分布モデルを作成し、等価軸重を算定。

鋼床版の疲労強度はマイナー則（3 乗）に従い各部の応力は軸重に比例するとして、各路線・各区間の走行車両を 98kN の軸数に換算。

2. 供用開始以降の累積交通量の算出

阪神高速道路の区間交通量は、供用以降のランプ・分合流間に設置しているトラフィックカウンターにより計測され、交通流態図により整理されている。そこで、区間別・月別に読み取り、供用開始後から 2008 年度までの交通量を整理した。

つぎに、区間交通量から疲労照査の対象とする、大型車交通量を抽出するため、その混入率を算定した。その際、参考値として中型車交通量も併せて整理した。5 年に 1 回程度実施している OD 調査⁶⁾では、16 車種別に交通量が調査されている。大型特殊（トレーラなど）、大型貨物、大型バスは大型車に、普通貨物、マイクロバス、小型特種・特殊は中型車に分類した（表-1）。

表-1 車種分類

車種番号	車種	軸種	軸数	軸形状
1	中型車類	中型	2	
2	大型車類	大型2軸	2	
3		大型3軸(1)	3	
4-1		大型3軸(2)	3	
4-2	大型4軸	4		
5-1	トレーラ類	セミトレーラ(1)	3	
5-2			4	
5-3			5	
6-1	トレーラ類	セミトレーラ(2)	4	
6-2			5	
6-3			6	
7	その他トレーラ	4~7	上記トレーラ以外	

なお、小型車は、その軸重のほとんどが 10kN 以下と小さく、疲労にほとんど影響しないような軽量な成分で構成されるため、今回対象としていない。

その結果を、U リブ鋼床版の多い神戸線ならびに湾岸線のデータを図-1(a)神戸線、(b)4 号湾岸線、(c) 5 号湾岸線として示す。いずれも本線（上り）で、走行・追越については全車線の合計で整理している。同図より、(a)神戸線では、名神高速と合流する西宮 IC 以西は高い水準でほぼ一定であり、累積大型車交通量は 1 億台程度、大型車混入率は 15% ~ 20% と高く、疲労に対して過酷な状況になっている。また、(b) 4 号湾岸線では、累積大型車交通量は最大 3,800 万台、大型車混入率は最大 16% 程度と神戸線より低い。神戸線と同様の傾向であるが、供用年数の高い累積交通量の多い区間は、全累計大型車交通量が全累計中型車交通量を上回り、相乗的に疲労に対して厳しい結果となっている。

3. 実態活荷重の調査と等価軸重

湾岸線では、1999 年および 2008 年に、大型車交通量が比較的多い集約料金所を対象とし、活荷重計測を行っている³⁾⁴⁾。

ここで、軸重の分析は、表-1 に示す車種分類（中型・大型・トレーラー）に基づき、車重・軸重特性を整理している。

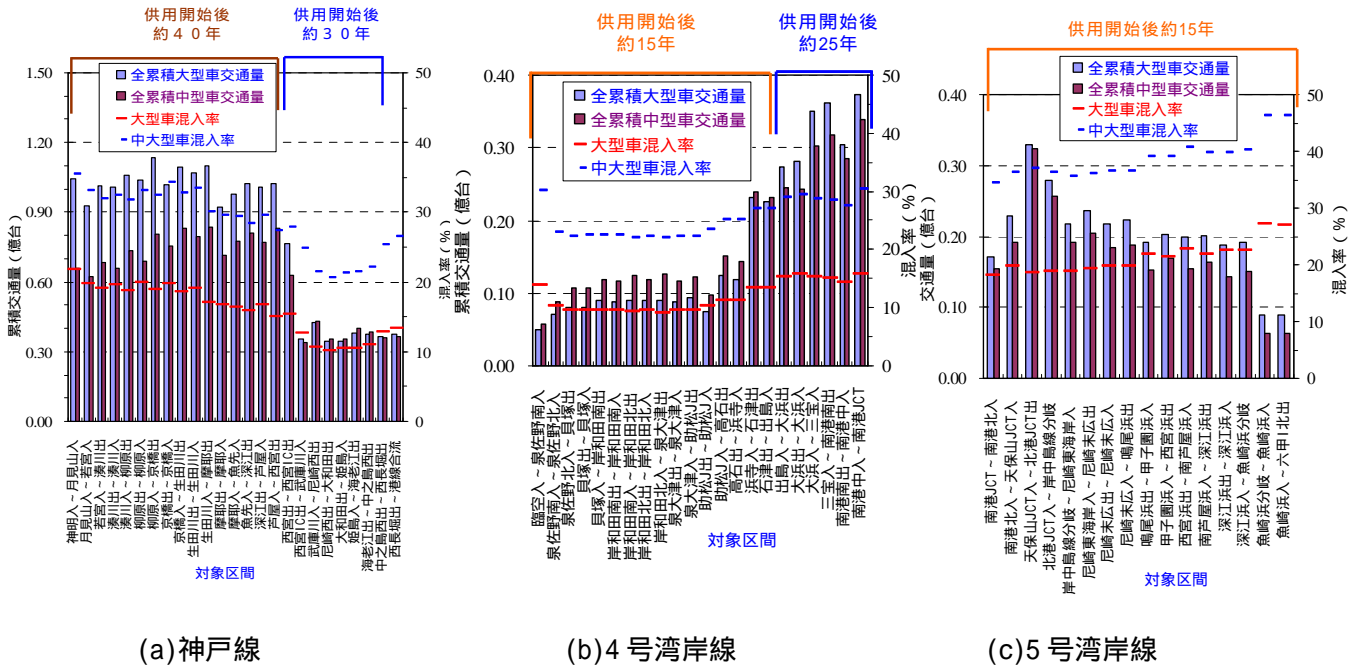


図-1 各路線の区間別交通量・混入率

料金所では、軸重計が舗装内に埋め込まれており、常時車両の軸重を計測している。

1999年以前のいずれの調査も、すべて現地に配置された調査員の目視を主体に、車種判別を行ってきた。しかし近年、ETCの普及に伴う通過車両の高速化や、中型車の増加、中型車の大型化・有蓋化に伴い、大型2軸車との区別が困難となった。そこで、目視に代わる効率的で高精度な調査手法として、2008年の調査では、個人を特定しない統計処理された車種分類等のETC統計データと軸重データとの同期化による分析を行っている⁴⁾。

その結果例として、大型車(タンデム軸)の車重分布を例に図-2に示す。同図の頻度分布より、2カ所でピークが認められる。これは、積載状態の差(空車・積載車)による双峰分布を示し、1999年と比較して概ね同様の傾向である。また、車重の平均値は増加しており、1999年は193kNに対して、2008年には210kNとなっている。さらに、図-3の軸重も2008年が高く、平均軸重も1999年は57.4kNに対して、2008年は62.7kNとなり、9%程度増加している。本稿ではトレンドを反映して2008年の結果を用いて計算する。

さらに、神戸線の活荷重測定は、集約料金所を対象に、1982年、1999年に実施されている²⁾³⁾。

また、2006年には、本線の鋼床版I桁でBWIM(Bridge Weigh In Motion)を用いて軸重の測定が行われている⁵⁾。

本検討では、実態の車線毎の交通流に対して荷重を直接測ることができるBWIMを用いた。

以上を踏まえ、軸重実測データから大型車、中型車毎の等価軸重 W_{eq} を式(1)を用いて算出した。

$$W_{eq} = \sqrt{\frac{\sum W_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}} \quad (1)$$

ここに、 W_{eq} : 等価軸重 (kN)

W_i : 計測軸重 (kN)

n_i : 計測軸重の軸数

m : 疲労設計曲線の勾配で $m=3$

その結果を、表-2に示す。大型車の等価軸重は、路線ごとの差は少ないが、中型車は神戸線が59.2kNと湾岸線より30%程度大きい。平均軸数は、大型車が神戸線3.5軸、湾岸線で3.3軸と殆ど変わらず、中型車は2.0軸であった。

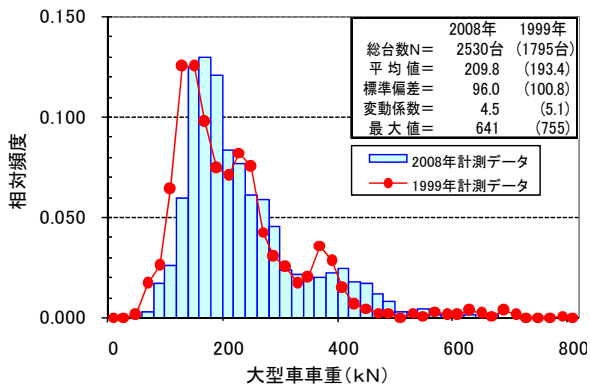


図-2 大型車類（タンデム軸）の車重分布

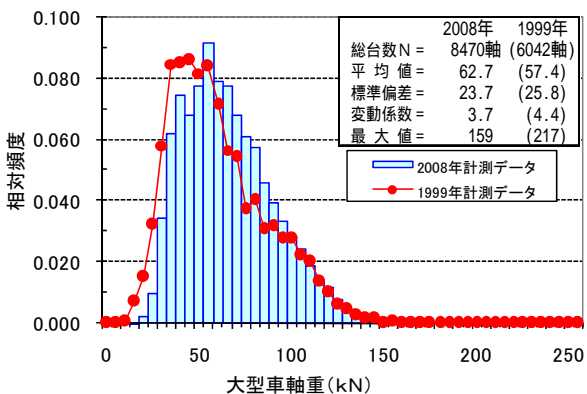


図-3 大型車類（タンデム軸）の軸重分布

表-2 等価軸重(kN)と平均軸数

	大型車		中型車	
	等価軸重(kN)	平均軸数	等価軸重(kN)	平均軸数
神戸線	76.5	3.5	59.2	2.0
湾岸線	75.5	3.3	41.8	2.0

表-3 車線別交通量比率

	走行車線	第2走行車線	追越車線
片側2車線区間	61%	-	39%
片側3車線区間	40%	40%	20%

4. 等価換算軸数

4.1 車線別交通量

阪神高速道路ネットワークにおける等価換算軸数を、鋼床版の車線・径間ごとに算出するため、検討を行った。また、車線別交通量として、走行、追越車線別の交通配分を表-3 に整理した。これは、2車線区間は2006年にBWIMで測定された結果⁵⁾を、3車線区間は既往の文献⁷⁾により求められている。

4.2 大型車を対象にした等価換算軸数

大型車を対象に累積交通量を用いて、式(2)により、法定軸重 98kN に等価な換算軸数に換算した。なお、中型車には軽い軸重が含まれるため、疲労に与える影響が低いとみなし除外した。

$$P_{e_{98}} = n_L \cdot A_L (W_{eqL}/98)^3 \quad (2)$$

ここに、

$P_{e_{98}}$: 大型車の 98kN 等価換算軸数

n_L : 累積大型車交通量 (台)

A_L : 大型車の平均軸数

W_{eqL} : 大型車の等価軸重 (kN)

鋼床版の集中している神戸線および湾岸線の供用開始以降から 2008 年度末までの等価換算軸数を図-4 に表示する。なお、同図では、上下線とも走行車線を示している。

湾岸線の最大の等価換算軸数は、三宝-大浜間の上り走行車線において、3,149 万軸となった。神戸線では、ほとんどの区間で累積換算軸数が 3,000 万軸を超えており、特に西宮 IC 以西は、上下線とも 7,000 万軸を超えた。神戸線の最大の等価換算軸数は、京橋-柳原間の上り走行車線において、8,636 万軸となった。

しかしながら、神戸線においては、鋼床版 U リブが存在する架橋箇所は、兵庫県南部地震の再構築桁であり、その疲労評価には震災後を供用期間として考える必要がある

そこで、同図には、震災復旧において再構築された鋼床版の等価換算軸数を併せて示す。最大軸数は、柳原京橋間の下り走行車線において 3,135 万軸と、湾岸線とほぼ同等となっている。

再構築の鋼床版は、供用後 12 年程度しか経過していないにもかかわらず、等価換算軸数が極めて多く、猛烈なスピードで疲労ダメージを蓄積していることがわかる。

4.3 98kN 以上を対象とした等価換算軸数

実橋の疲労評価では、重量超過車両の存在を評価する必要がある。そこで、法定軸重を超える軸重 98kN 以上を対象に、その等価換算軸数の実態の把握を目的に検討を行った。

大型車の軸重分布より軸重 98kN 以上を抽出し、神戸線、湾岸線それぞれに等価軸重は次式により計算し、また大型車の軸数に占める割合を表-4 に示す。

$$P_{eover98} = n_L \cdot A_L \cdot \alpha (W_{eqL} / 98)^3 \quad (3)$$

ここに、

- $P_{eover98}$: 軸重 98kN 以上を超える車軸の 98kN 等価換算軸数、
- n_L : 累積大型車交通量 (台)
- A_L : 大型車の平均軸数
- α : 大型車の軸数に占める軸重 98kN 以上を超える車軸の割合
- W_{eqL} : 軸重 98kN 以上を超える車軸の等価軸重 (kN)

湾岸線および神戸線の供用以降から 2008 年度末までの 98kN 以上を超える軸重の等価換算軸数を図-5 に示す。同図には、神戸線の再構築された鋼床版の等価換算軸数を併せて示す。

湾岸線の最大の等価換算軸数は、三宝-大浜間の上り走行車線において 1,223 万軸となり、図-4 に対して 36% となった。また、神戸線での最大の等価換算軸数は、京橋柳原間の上り走行車線において 1,227 万軸となり、図-4 に対して 39% となった。大型車の軸数に占める軸重 98kN 以上を超える車軸の割合は 12% 程度であるが、等価換算軸数は 40% 近くに達し、法定軸重を超える車軸は疲労に与える影響が大きいことが分かる。

表-4 軸重 98kN 以上を超える車軸の状況

	等価軸重 (kN)	大型車の軸数に占める割合 (%)
神戸線	115	11.8
湾岸線	113	11.6

5. 等価換算軸数と実損傷との相関分析

5.1 対象とする亀裂

図-6 はこれまでの U リブ鋼床版の点検で発見された亀裂タイプを示し、その詳細調査が完了した 130 径間の分類結果を表-5 に示す。亀裂は全て本線の鋼床版桁に発生している。デッキプレートを通させるデッキ貫通亀裂、U リブとデッキプレートとの溶接部ののど部を貫通させるビード貫通亀裂 (以下、タイプ という)、U リブ突合せ溶接部の亀裂 (以下、タイプ という)、垂直補剛材とデッキ溶接部の亀裂 (以下、タイプ という) を対象にした。また、U リブと横リブ交差部においては、U リブの下側のスリットにおける U リブウェブのまわし溶接部周辺に発生する亀裂 (以下、タイプ -1 という)、および、横リブウェブに発生する亀裂 (以下、タイプ -2 という) に分類した。

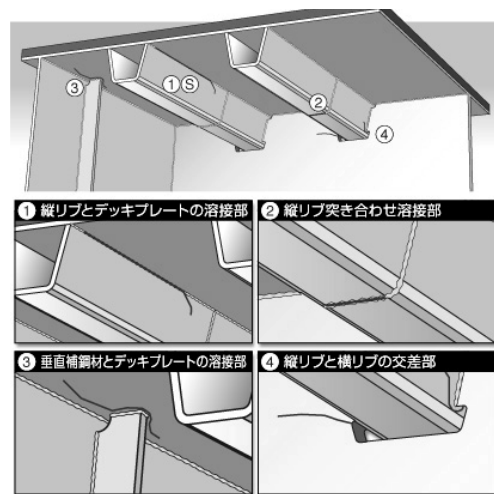


図-6 U リブ鋼床版の主要な亀裂タイプ

表-5 亀裂タイプ毎の径間数と亀裂数

き裂タイプ		径間数	き裂数
S	Uリブとデッキプレート溶接部のデッキ貫通き裂	1	2
①	Uリブとデッキプレート溶接部のビード貫通き裂	26	128
②	Uリブ突合せ溶接部	18	43
③	垂直補剛材とデッキプレート溶接部	38	162
④	Uリブと横リブ交差部	42	294
⑤	その他	5	24
合計		130	653

[径間数]は 1 径間に複数の亀裂がある場合は最も多い亀裂タイプに計上

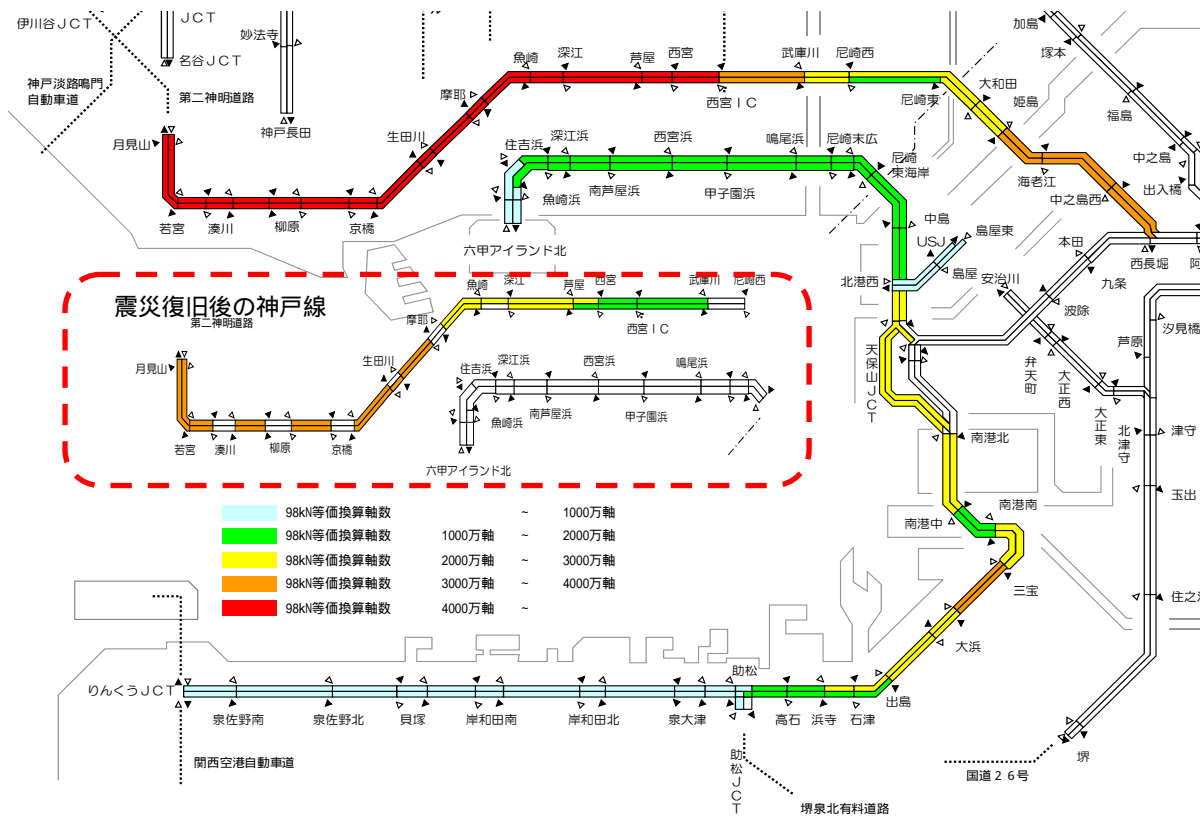


図-4 供用以降の湾岸線および神戸線の 98kN 等価換算軸数（走行車線）

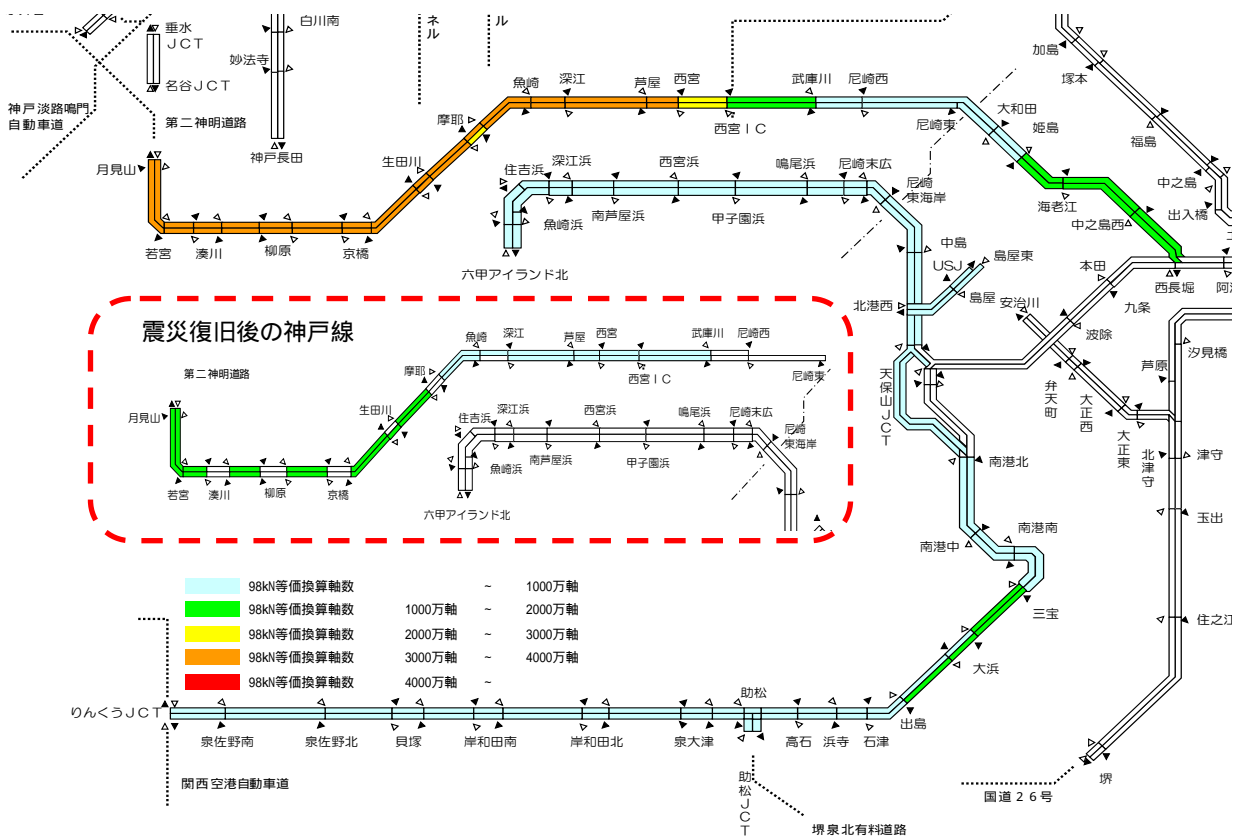


図-5 供用以降の湾岸線および神戸線の軸重 88kN 以上を対象とした車軸の 98kN 等価換算累積軸数（走行車線）

5.2 亀裂と等価換算軸数との相関分析

(1) デッキプレート貫通タイプ

デッキプレートを貫通させるデッキ貫通亀裂は、新浜寺大橋1橋において2箇所発見されている。同橋は、図-4のマップにおける浜寺-石津間に位置しており、1か所目は、2005年7月に、2か所目は2008年9月にそれぞれ発見されている。亀裂の位置はいずれも、大阪行き走行車線右タイヤ位置付近である。

このタイプの損傷は2事例しかないが、参考値として、当該レーンの等価換算軸数は、1か所目に対応した2005年4月時点で1,693万軸、2か所目に対応した2008年4月時点で2,200万軸となっている。

(2) タイプ

タイプのビード貫通亀裂の確認されている車線(レーン)・径間に対して、供用以降亀裂発見時までの等価換算軸数で整理した結果を、図-7に示す。同図では、亀裂数と亀裂の位置するレーンの等価換算軸数、亀裂の存在する径間のレーン数とそのレーンの等価換算軸数のそれぞれの関係を示している。

まず、800万軸以下では亀裂が発生しておらず、その点では荷重作用である等価換算軸数と疲労亀裂との関係は、相関があると言える。しかしながら、等価換算軸数と亀裂数には、必ずしも正の相関が確認されない。

つぎに、800万軸台で亀裂が発生しているが、ここには、デッキプレートとUリブ溶接部の溶接サイズが設計値を満足するものの「のど厚」が小さめで、それが損傷の一因とされた径間⁸⁾を含む。ちなみに、該当橋梁には、上下線併せて亀裂が33箇所と集中して発生している。

さらに、亀裂は1,800万軸台が最も多いが、レーン数は4と多くない。ここにも、特定の径間に亀裂が集中して発生している。この原因には、溶接のど厚や溶け込み量、荷重位置などの影響が考えられ、今後も継続的な調査が必要である。

なお、亀裂が集中する特定の径間を除いた場合の結果を図-8に示す。凹凸は平準化され等価換算軸数と亀裂数の正の相関はない。したがって、このタイプの疲労評価では、等価換算軸数のみならず、溶接のど厚も変数として扱う必要がある。

(3) タイプ

図-9は、同様にタイプの亀裂を整理した結果である。タイプは、400万軸と少ない軸数で亀裂が発生している。このタイプの亀裂の要因は、文献9)では、Uリブ同士の突き合わせ部のルートギャップが小さく、溶け込みが不十分であることと述べている。したがって、このタイプの疲労評価では、溶接の品質が確保できていないと400万軸台で亀裂が発生する恐れがある。

(4) タイプ

タイプの亀裂を整理した結果を、図-10に示す。亀裂は、1,000万軸台と1,200万軸台に集中している。600万軸以上で亀裂が発生している。600万軸台以外は、全て走行車線に位置している。

このタイプの亀裂は、車両の走行位置による影響が大きいと考えられ、等価換算軸数と亀裂数は必ずしも正の相関は確認されない。したがって、このタイプの疲労評価では、等価換算軸数のみならず、車両の走行位置を考慮する必要がある。

(5) タイプ

図-11は、Uリブと横リブ交差部における亀裂を整理した結果である。タイプ-1は、400万軸以上で亀裂が発生し、1,000万軸台と、2,800万軸台～3,000万軸台にピークがある双峰分布となっている。また、2,800万軸を超えるレーン数は相対的に少ないことを考慮すると、換算軸数に対して相関があると言えるが、今後供用年次が経過し換算軸数が増加することにより、亀裂数がどのように移行するか確認する必要がある。タイプ-2は、亀裂数、レーン数とも少なく傾向は掴めないが、このタイプも400万軸以上で亀裂が発生しており、800万軸台と1,000万軸台に発生している。

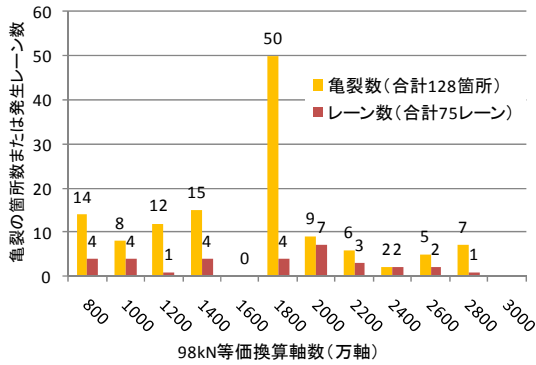


図-7 98kN 等価換算軸数とビード貫通亀裂の相関

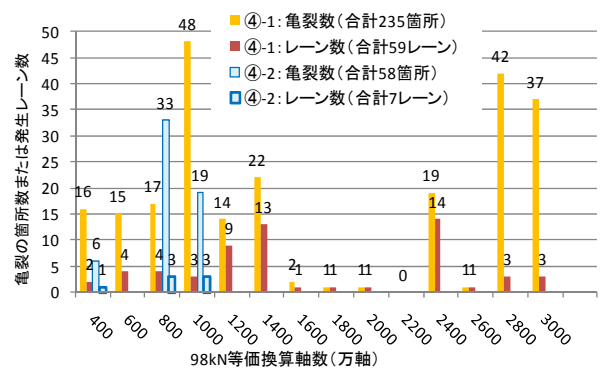


図-11 98kN 等価換算軸数とタイプ の亀裂の相関

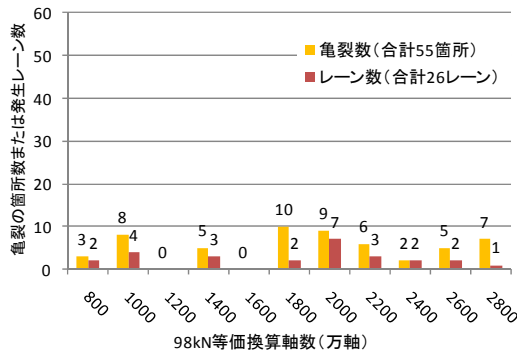


図-8 特定の2径間を排除した場合の
98kN 等価換算軸数とビード貫通亀裂の相関

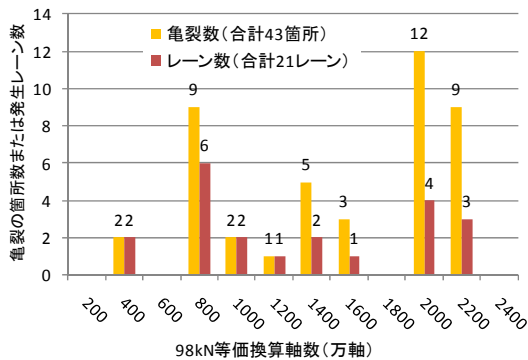


図-9 98kN 等価換算軸数とタイプ の亀裂の相関

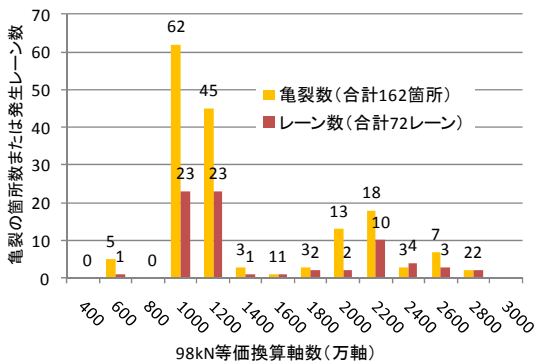


図-10 98kN 等価換算軸数とタイプ の亀裂の相関

6. まとめと今後の課題

鋼床版は、大型車交通量や車両重量の影響を強く受けることから、本稿では、当社が保有する交通データ等を用いて、実橋の荷重特性の実態把握、および着目車線を通じた大型車の累積軸数を法定軸重である 98kN に等価な換算軸数として算定するとともに、既設鋼床版の損傷データとの相関を分析した。本検討の結果を、以下にまとめる。

- 1) 大型車の等価軸重は、湾岸線で 76.5 kN、神戸線で 75.5 kN とほぼ等しく、中型車は神戸線が 59.2kN と湾岸線より 30%程度大きくなった。
- 2) 大型車の 98kN 等価換算軸数は、湾岸線では、最大 3,149 万軸、神戸線では、兵庫県南部地震の再構築桁で最大 3,135 万軸となり、湾岸線とほぼ等しい。すなわち、再構築の鋼床版は、供用後 12 年程度しか経過していないにもかかわらず、等価換算軸数が極めて多く、疲労ダメージを蓄積していることがわかった。
- 3) 法定軸重を超える 98kN 以上の軸重の等価換算軸数は、湾岸線、神戸線とも 最大で 1,220 万軸程度で、大型車全体に占める軸数の割合は 12%程度であるが、等価換算軸数は 40%近くに達し、疲労に与える影響が大きい。
- 4) 亀裂発見時の等価換算軸数と亀裂との分析は、ビード貫通亀裂では 800 万軸以下は亀裂が発生しておらず、その点では荷重作用である等価換算軸数と相関があると言える。同様に、タイプは 400 万軸、タイプは 600 万軸、タイプ

- 1 とタイプ -2 は 400 万軸，をそれぞれ下まわると，亀裂は発生していない。
- 5) すべての亀裂タイプにおいて，等価換算軸数との明確な正の相関は認められなかった。鋼床版の疲労評価では，等価換算軸数のみならず，溶接のど厚や溶け込み量、車両の走行位置などを包括的に評価する指標の構築が必須であり，そのためには，継続的なデータの蓄積が必要である。

参考文献

1) 鋼道路橋の疲労設計指針 (社) 日本道路協会，平成 14 年 3 月
 2) 阪神高速道路公団，(財)阪神高速道路管理技術センター：設計荷重 (HDL) 委員会報告書，阪神高速道路

の設計荷重体系に関する調査研究，昭和 61 年 12 月
 3) 阪神高速道路公団：軸重測定および弾性支承化による影響解析 (第一部) 軸重測定業務，平成 11 年 5 月
 4) 田畑晶子，関上直浩，堀江佳平；活荷重実態調査のための分析手法検討，第 28 回日本道路会議論文集，2010.10
 5) 高田佳彦，木代穰，中島，薄井王尚：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，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 1456-1467，2009.
 6) 阪神高速道路公団：第 21 回阪神高速道路起終点調査報告書 (改訂版) 平成 11 年度
 7) 田畑晶子，長沼敏彦，迫田治行；阪神高速の疲労環境評価のための累積軸数の検討，第 27 回日本道路会議論文集，2008.11
 8) 川上順子，高田佳彦，坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.15,pp371-376,2007.11
 9) 山田健太郎，重交通下における鋼床版の疲労損傷 名古屋周辺の事例，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，vol.10,pp11-18，土木学会，2007.8

THE FACTOR ANALYSIS OF THE ORTHOTROPIC STEEL DECKS CRACKS

Akiko TABATA, Yoshihiko TAKADA and Yoshihei HORIE

Fatigue damage to steel structures has been a serious problem in recent years, requiring immediate inspection and determination of action priority. Fatigue environment for orthotropic steel decks on the Hanshin Expressway has been estimated by using cumulative number of axles equivalent to legal axle load of 98 kN which is determined based on actual live load measurements. In order to obtain sufficiently accurate live load measurements efficiently, statistical data from the electronic toll collection system is adjusted against axle weight data and compared with previous data for verification. In this paper, cumulative number of axles was calculated using the latest axle weight measurement data and traffic volume data for each route, and the results were analyzed against damage data from existing steel decks for fatigue evaluation on actual steel deck bridges. The analysis results on the lanes with cracks through the beads suggested that no cracks were likely to occur when cumulative 98 kN equivalent axle load from the start of service to the detection of cracks was below 10 million axles and that risk of fatigue damage would increase after the cumulative axle load exceeded 18 million axles.

田畑 晶子



阪神高速道路株式会社
 建設事業本部建設技術課
 Akiko Tabata

高田 佳彦



阪神高速道路株式会社
 建設事業本部建設技術課
 Yoshihiko Takada

堀江 佳平



阪神高速道路株式会社
 大阪管理部
 Yoshihei Horie