

第 I 部門

バルブリブを有する鋼床版箱桁橋の疲労寿命評価に関する研究

大阪市立大学大学院
阪神高速道路株式会社
大阪市立大学大学院

学生員 ○豊田雄介
正会員 高田佳彦
正会員 松村政秀

大阪市立大学工学研究科
阪神高速道路株式会社

正会員 山口隆司
正会員 米谷作記子

1. はじめに

近年、過大な活荷重による応力の局所的な繰返し作用により、鋼床版に疲労き裂が多発している。大型車交通量の多い路線や、供用後の経過年数が多い路線を中心に、今後、この種の疲労損傷の増加が懸念される。そのため、部材の寿命や補強手法による補強効果を明確にした上で、ライフサイクルコストを考慮した合理的な鋼床版の維持管理システムを構築し、維持修繕費の軽減を図ることが重要である。本研究では、疲労き裂の発生が認められた実際の橋梁を対象とし、その対象橋梁に内在する作用側および抵抗側の不確定要因を考慮した疲労寿命を確率・統計論に基づき算出し、評価することを目的とする。

2. 対象橋梁の概要

2.1. 対象橋梁の構造

対象橋梁は、阪神高速道路 3 号神戸線にある 3 径間連続鋼床版 1 箱桁橋梁であり、1968 年に供用されている。

構造の特徴として、縦リブにバルブプレートが用いられている。また、対象橋梁の建設時、疲労等に配慮する構造ディテールと疲労強度の計算手法が確立されていなかったため、現在の標準図とは異なる構造ディテールが用いられている。例えば、横リブのスリット部におけるスカーラップの R が現行の R=40 より小さい R=30 であること、同規模の鋼床版箱桁に比べ、桁幅が 4,500mm と広く偏平な構造であること、板厚は下フランジが 9mm、ウェブが 12mm と薄く、中間支点付近のデッキプレートが 12mm と増厚されていないことが特徴である。その結果、現在の構造と比較して主桁系の曲げ剛性が低く、板曲げによる応力集中が発生しやすく、構造ディテールに起因する疲労き裂が誘発されている。

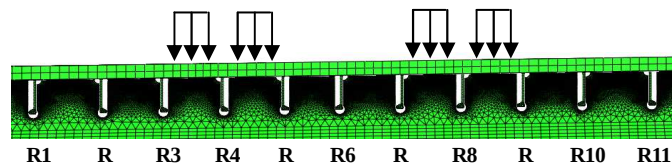
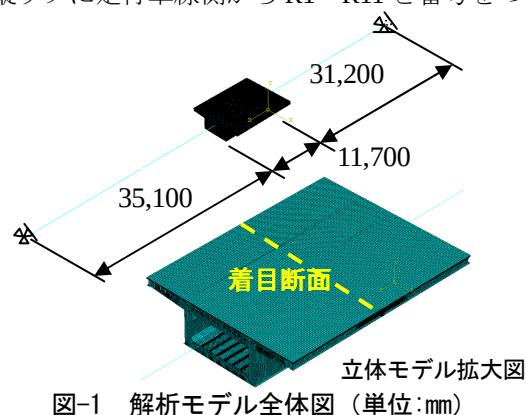
2.2. 対象橋梁に発生する疲労き裂事例

対象橋梁に多く発生している主な疲労き裂はタイプ 1 ～ 3 に分類できる。疲労き裂タイプ 1 は、スリット上縁のまわし溶接部の横リブウェブ側溶接止端部から発生し、デッキプレート方向に向かって溶接ビードを斜めに横断するように進展する。疲労き裂タイプ 2 は、スカーラップのまわし溶接部の溶接ビード上に発生する。他のタイプの疲労き裂に比べ、損傷事例は少ない。疲労き裂タイプ 3 は、スリット自由縁のまわし溶接部の横リブウェブ側溶接止端部から横リブウェブにかけて進展している。

3. FEM 解析

3.1. FEM 解析モデル

図-1 に示すように、対象橋梁の中央径間を抽出し、着目断面を中心に 6 パネル分を立体モデルとしてシェル要素およびソリッド要素、その他の区間は梁要素を用いて解析モデルを構築した。荷重条件は 198kN トラックの車両を想定し、その載荷位置は橋軸方向は後軸前輪が着目断面の直上、橋軸直角方向は、車両の走行頻度を参考に、6 ケースを設定した。なお、図-2 に示すように箱型断面内の縦リブに走行車線側から R1～R11 と番号をつけた。



3.2. 着目要素

実際に疲労き裂が発生した箇所において、疲労き裂タイプ 1～3 のそれぞれに対応する要素に着目する。図-3 に示すように、タイプ 1 に対応するスリット上縁の溶接止端部の要素を着目要素 1、タイプ 2 に対応するまわし溶接上端部の要素を着目要素 2、タイプ 3 に対応するまわし溶接下端部の要素を着目要素 3 とする。各要素において着目する発生応力は、疲労き裂発生 の 要 因 と な る 方 向 の 直 応 力、つまり着目要素 1 では鉛直方向の直応力、着目要素 2, 3 に対しては水平方向の直応力とする。

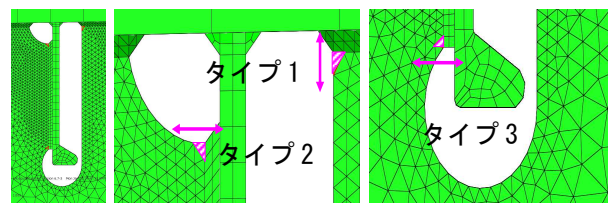


図-3 発生応力の着目要素

キーワード バルブリブ 疲労き裂 疲労寿命 活荷重シミュレーション 累積損傷度 破壊確率

連絡先 〒558-8585 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 橋梁工学研究分野 TEL&FAX 06-6605-2765

4. 疲労寿命の評価

4.1. 疲労寿命評価の概要

疲労寿命の評価の手法については、疲労き裂のタイプごとにマイナーの線形累積損傷則に基づく累積損傷度を用いる。1日あたりに通過する車両の重量と走行位置を作用側の不確定要因とし、継手強度を抵抗側の不確定要因として、これらを確率変数として扱い、1日あたりの活荷重列を活荷重シミュレーションにより発生させ、累積損傷度を算出する。図-4に累積損傷度算定のフローを示す。なお、シミュレーション回数は10,000回である。表-1に車種別の日交通量、車重と通過位置に関する統計データ²⁾を示す。継手強度のバラツキは、安全側の評価とするため、文献1)のデータから最大の標準偏差0.2865と仮定した。

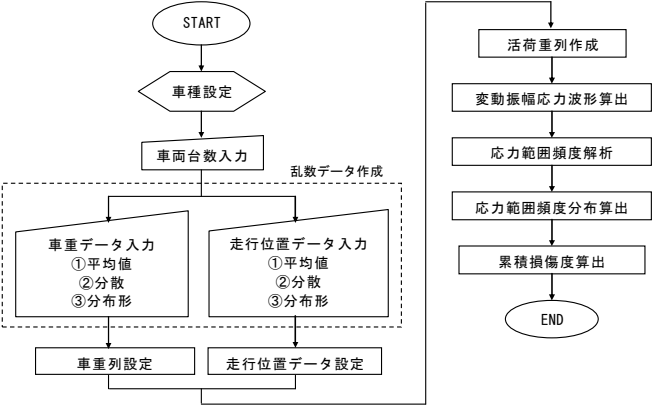


図-4 累積損傷度算定のフロー

表-1 車種別交通データ²⁾

車種	日交通量	車重(ton)			タイヤの通過位置(mm)		
		平均値	標準偏差	分布形	平均値	標準偏差	分布形
中型車	5,256	6.7	2.2	LN	577	179	N
大型車2軸	1,007	12.8	3.5	LN	577	179	N
大型車タンデム軸	4,230	18.6	5.4	N	577	179	N
大型車トレーラー	2,165	30.9	11.2	N	540	165	N

(N: 正規分布, LN: 対数正規分布)

4.2. 累積損傷度の確率分布モデルの決定

活荷重列によって発生した変動振幅応力波形から応力範囲頻度解析を行い、応力範囲頻度分布を算出する。解析手法にはレインフロー法を用いる。さらに応力範囲頻度分布から1日あたりの累積損傷度を算定し、10,000個の累積損傷度のデータから、その確率分布モデルを決定するために、アンダーソン・ダーリング検定³⁾を行った。その結果、有意水準1%において、その確率分布モデルとして対数正規分布が採用された。

4.3. 破壊確率の算出

破壊確率は、累積損傷度の確率密度関数が1以上となる範囲を破壊確率と定義する。破壊確率の算出は、車輪の通過位置付近の疲労き裂が多発している箇所に着目し、タイプ1ではR5、タイプ3ではR4の疲労き裂に対して破壊確率を算出した。表-2に結果を示す。

5%破壊確率における経過年数は、R4-type3に関しては、継手強度のバラツキを考慮すると43.3年、継手強度のバラツキを無視すると44.4年である。R5-type1に関しては

それぞれ38.3年、38.6年となり、いずれも対象橋梁の供用年数に近く、現時点でき裂の発生が認められることからシミュレーション結果は妥当であると考えられる。また、本シミュレーションでは継手強度のバラツキが破壊確率に与える影響は最大で1年程度であった。

次に、対象橋梁の現状の損傷率を、着目する縦リブの継手数と損傷箇所数より求めると、R4-type3で58.8%、R5-type1で26.6%であった。各継手の破壊確率が現状損傷率に達する年数を見ると、R4-type3に関しては、継手強度のバラツキの考慮の有無によらず、どちらも5%破壊確率の時点から、約半年後に現状の破壊確率に達することとなる。これは経過日数の累積損傷度の平均値に対して標準偏差が小さいことが原因として考えられる。

また現状損傷率年数から、 2.0×10^6 基本許容応力範囲を推定すると、R4-type3ではH等級の40N/mm²より低く、R5-type1ではE等級の80N/mm²より高い値となった。

表-2 破壊確率の算出結果

着目箇所	R4-type3		R5-type1	
現状損傷率	58.8%		26.6%	
推定強度等級	H等級		E等級	
継手強度のバラツキ	有	無	有	無
42.2年経過時 P_f (%)	0%	0%	100%	100%
5% P_f (%)時年数	43.3年	44.4年	38.3年 (13,979日)	38.6年
現状損傷率年数	43.6年	44.8年	38.3年 (13,996日)	38.7年
推定 $\Delta\sigma_f$ (N/mm ²)	39.6	39.2	82.6	82.2

5. 結論

本研究では、FEM解析による発生応力に基づき、活荷重シミュレーションによる疲労に対する破壊確率を算出し、疲労寿命の評価を行った。本研究で得られた主な結論を示す。

- i) 疲労き裂に対する破壊確率を試算すると、5%破壊確率は、対象橋梁の供用期間における損傷率に近く、シミュレーションは妥当であると考えられる。
- ii) 継手強度のバラツキが破壊確率に与える影響は最大で1年程度であることがわかった。
- iii) 5%破壊確率時の経過年数と現状損傷率の経過年数にあまり違いがみられなかった。これは標準偏差が小さいことが原因として考えられる。
- iv) 現状の損傷率から、 2.0×10^6 基本許容応力範囲を推定すると、R4-type3ではH等級の40N/mm²より低く、R5-type1ではE等級の80N/mm²より高い値であった。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4
- 2) 高田佳彦, 木代穰, 中島隆, 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, 2009.3
- 3) 伊藤學, 亀田弘行, 能島暢呂, 阿部雅人:改訂 土木・建築のための確率・統計の基礎, 2007.1