

て応力の増加が生じたと考えられる。そのため、スリット閉塞手法を用いる場合、疲労き裂の発生件数が少なかったき裂タイプ2の損傷状況が悪化する可能性がある。

また、併用手法についてもスリット閉塞手法と同様に、未補強時の応力範囲より増大している。しかし、そのピーク値はスリット閉塞手法より2割弱低減しており、縦対傾構の効果を確認することができる。

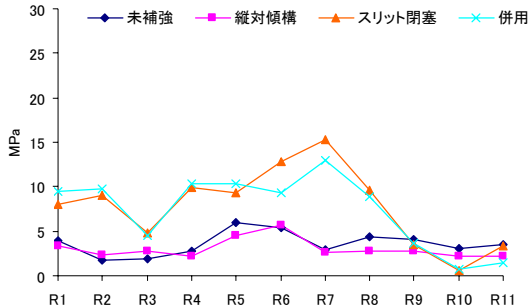


図-18 リブ別直応力範囲（タイプ2）の比較

疲労き裂タイプ3では、図-3に示すようにR4, R5において数多くの損傷が報告されているが、未補強の発生応力は全体的に7 N/mm²と低い。つまり、き裂タイプ3は構造上の問題として、対象橋梁の横リブのスリット部のスカーラップのRが現行の標準であるR=40より小さいR=30となっていることがき裂発生の原因として考えられる。

縦対傾構を追加する手法は、発生応力にあまり影響を及ぼさないことが確認でき、その補強効果は小さいことがわかる。また、スリット閉塞手法では、未補強時よりピーク値が2倍程度応力が増加する傾向にあり、現状の疲労き裂発生状況を悪化させる可能性がある。これは、タイプ2の場合と同様、横リブ全体での荷重分担が影響していると考えられる。併用手法についても、スリット閉塞手法と同様な傾向を示している。

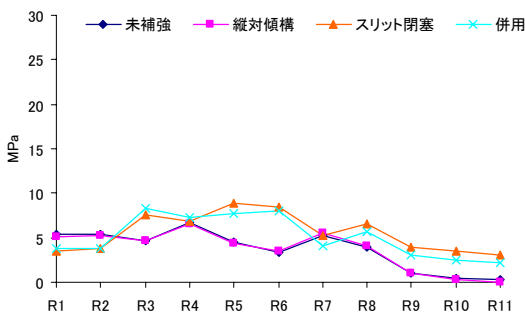


図-19 リブ別直応力範囲（タイプ3）の比較

5. 疲労寿命の評価

5.1 線形累積損傷則³⁾

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累積損傷度を用いたマイナーの線形累積損傷則

を用いる。マイナーの線形累積損傷則とは、実働荷重のような応力振幅が変動する場合の疲労寿命を一定振幅応力下で得られるS-N曲線から疲労寿命を推定する手法である。応力振幅 $\Delta\sigma_i$ での疲労寿命が N_i のときその応力振幅が n 回繰り返された時点での累積損傷度を n_i/N_i で表し、すべての応力振幅に対する累積損傷度の線形和 $D = \sum (n_i/N_i)$ が1となることを疲労寿命とするものである。また、疲労寿命 N_i は疲労設計曲線を表す定数である c_0 を用いて(5.1), (5.2)のように定義される。

$$\Delta\sigma_i^m \cdot N_i = C_0 \quad (5.1)$$

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m \quad (5.2)$$

($\Delta\sigma_f$: 2×10^6 回基本許容応力範囲)

m は疲労設計曲線の傾きを表す指数であり、直応力を受ける継手に対しては $m=3$ が与えられる。また、 2×10^6 回基本許容応力範囲 $\Delta\sigma_f$ (N/mm²)は継手の強度等級に依存する。

5.2 活荷重シミュレーション

作用側の不確定要因として、1日あたりに通過する車両の車量の重量、走行位置、抵抗側の不確定要因として継手強度とし、これらを確率変数とし、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た。なお、シミュレーション回数は10,000回である。表-2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を示す。なお、継手強度は安全側の評価をするため文献のデータから最大の標準偏差0.2865と仮定した³⁾。

表-2 車種別交通データ

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

5.3 応力範囲頻度分布の算定

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、応力範囲の頻度分布を算出する。解析手法にはレインフロー法⁴⁾を用いる。この手法は、ある変動波形の応力と時間の関係を屋根を伝って落ちる雨垂れとみなし、この雨垂れの落下経路から、応力範囲の各成分とそれに対応する繰り返し回数を求める手法である。図-20に算出した応力範囲の頻度分布を示す。

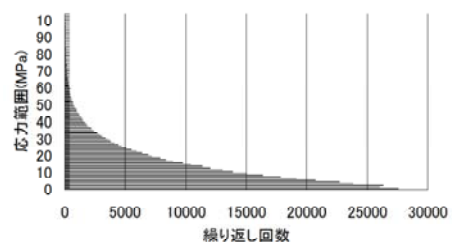


図-20 応力範囲頻度分布

5.4 累積損傷度の確率分布モデルの決定

応力範囲の頻度分布より、1日あたりの累積損傷度を10,000日分算出した。さらに、累積損傷度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⁵⁾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。

5.5 破壊確率の算定

破壊確率の定義として、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。図-21に累積損傷度分布と破壊確率の関係を示す。

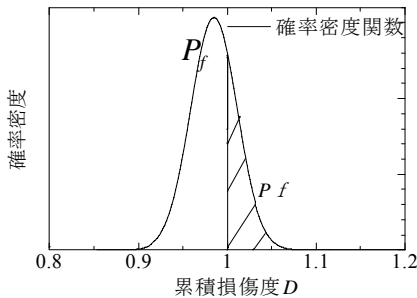


図-21 累積損傷度と破壊確率の関係

破壊確率の算出にあたり、未補強時における疲労き裂が多発している箇所に着目した。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-3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38.3年、38.6年となり、継手強度のバラツキが破壊確率に与える影響は最大1年程度であることがわかった。また、各破壊確率が現状の損傷率に達する年数をみると、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、どちらも約半年後に現状の破壊確率に達することとなる。つまり、作用側よりも継手強度のバラツキのような抵抗側の不確定要因が破壊確率に与える影響が大きいことがわかる。

表-3 破壊確率の結果

着目箇所	R4-type3		R5-type1	
	現状損傷率		現状損傷率	
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

6. 結論および今後の課題

本研究では、疲労き裂発生メカニズムと、その対策

としての補強案の効果を、FEM解析による発生応力評価に基づき検討した。さらに、FEM解析結果に基づき、モンテカルロシミュレーションによる破壊確率を算出し、対象橋梁の供用期間と疲労き裂発生率を比較し、疲労寿命の評価を行った。以下に本研究で得られた主な結論を示す。

- i) 疲労き裂発生メカニズムは直上輪荷重の接地圧とスリット部のせん断変形による応力集中によって説明することができる。
- ii) 疲労き裂タイプ1に対して、縦対傾構追加手法では応力範囲のピーク値が2割程度減少している。スリット閉塞手法は、発生応力が未補強の7~8割程度減少し、その補強手法が有効であることがわかった。
- iii) 疲労き裂タイプ2に対して、縦対傾構追加手法は、全体として応力範囲は減少する傾向にある。一方、スリット閉塞手法および併用手法は、未補強モデルの応力範囲より2~5倍程度増大する傾向となり、損傷状況が悪化する可能性がある。
- iv) 車重や走行位置のような作用側の不確定要因よりも抵抗側の不確定要因である継手強度のバラツキが、破壊確率に大きな影響を与えることがわかった。
- v) 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が、標準偏差の値が小さいことが原因として考えられ、極めて小さい標準偏差に対しては、わずかな年数(日数)が経過するだけでも、破壊確率に大きな変化を与える原因となることが分かった。
- vi) 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より高い値を示した。疲労き裂タイプ3の損傷率の高さは、スカーラップにおける構造上の問題が原因として考えられ、早急な対策を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 三木千壽・菅沼久忠・富澤雅幸・町田文孝：鋼床版箱桁橋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，第780号，p.57-69，2005年1月
- 2) 阪神高速道路公団：神戸一合繊明治工区梅香橋設計計算書
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針・同解説
- 4) 大倉一郎：鋼構造設計学の基礎，2004年5月
- 5) 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

討 議 等

◆討議 [鬼頭 宏明准教授]

L型アングル材の添接による補強を、スリットを閉塞することで解析モデルに再現すると、応力の集中する点が変わってしまうのではないか。

◆回答：疲労き裂タイプ 2 では、スリットを閉塞することで、未補強時より応力が 2~5 倍程度増加する結果となっており、対象き裂の補強だけに着目して検討することは望ましくない。

◆討議 [大内 一教授]

疲労寿命の診断に FEM 解析が必要なのか。

◆回答：疲労寿命の評価には、着目する箇所の発生応力をデータとして扱うため、FEM 解析または実測によって発生応力を評価する必要がある。

◆討議 [大内 一教授]

疲労寿命推定の手法は、ある特定の橋梁に対する手法として受け取ればよいのか。

◆回答：FEM 解析に基づいた疲労寿命の評価手法であるので、対象橋梁以外の橋梁に対して適用する際は、再度 FEM 解析または実測による応力の抽出が必要となるが、同様な構造形式を持つ橋梁に対しては一定の指標になると考えられる。

◆討議 [角掛 久雄助教]

継手強度のバラツキを考慮して、どのような対策が考えられるのか。

◆回答：継手強度のバラツキを考慮すると、疲労寿命が短くなる結果となり、早急な補修・補強対策を施す必要があるが、その手法は本研究において言及していない。しかし、施工段階において、グラインダーを用いた溶接部の仕上げを行うことは疲労寿命の延命に対して有効な手段である。