

トラフリブ鋼床版のデッキプレート貫通き裂に対する寿命の 累積疲労損傷比を用いた評価

Fatigue life estimation employing cumulative fatigue damage ratio for orthotropic steel deck against crack through deck plate thickness initiated from weld root with trough rib

西尾大*, 誉田登**, 上條崇***, 前田隆雄****

Masaru Nishio, Noboru Konda, Takashi Kamijo and Takao Maeda

*工修 住友金属工業株式会社 厚板技術部 (〒104-6111 東京都中央区晴海1-8-11)

**工博 住友金属工業株式会社 厚板・条鋼研究開発部 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町1-8)

***工修 株式会社横河住金ブリッジ 設計センター (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町1-4-12)

****住友金属工業株式会社 厚板技術部 (〒541-0041 大阪府中央区北浜4-5-33)

Many studies concerning fatigue damages on orthotropic steel deck with trough rib have been reported, however fatigue assessment for the crack which initiates at weld root at deck plate with trough rib and propagates through deck plate thickness has been hardly established. Thus, so far, mostly relative comparisons between fatigue lives estimated from stress range reduction caused by taken measures were reported, not many quantitative fatigue life calculations have been reported.

This paper, assuming that fatigue strength grade at the root equal to that at non-load-carrying cruciform weld joint's toe, derives cumulative fatigue damage ratio from its mean S-N diagrams and stress range spectrums measured on actual bridges, estimates their fatigue lives. It also estimates fatigue lives in the cases those deck plates thickness altered referring experimental study about that effect.

Key Words: orthotropic steel deck, cumulative fatigue damage ratio, crack through deck plate thickness, steels with improved fatigue resistance
キーワード: 鋼床版, 累積疲労損傷比, デッキプレート貫通き裂, 耐疲労鋼

1. はじめに

重交通路線におけるトラフリブ鋼床版で、デッキプレートとトラフリブとの隅肉溶接ルート部から発生しデッキプレートを貫通する方向に進展する疲労き裂が発見されることがあるが、補修しなければ路面の陥没を招き重大な事故の原因となりかねない深刻な疲労損傷とされる。この疲労き裂の発生はデッキプレートの板厚を増しても防止できない可能性がある¹⁾。この疲労損傷に対する疲労余寿命を定量評価することは、道路交通の安全性の向上に寄与するもの²⁾と考える。

既往の研究には、鋼床版の疲労寿命を定量的に示した文献は少ない^{2,3,4)}。特に、デッキプレート貫通き裂を対象とした疲労寿命推定は実施されていないのが現状と考えられる。また、デッキプレート増厚やSFRC舗装による疲労強度向上策について書かれた論文では、デッキプレート・トラフリブ溶接部の近傍など、着目する位置の応力範囲の低減量に対策有無で比較し、相対的に寿命がどの程度になるかの検

討に留まっているものが多い^{5,6,7,8)}。

本検討では、デッキプレートとトラフリブとの隅肉溶接ルート部(以降、着目部と称す)の疲労強度等級を荷重非伝達十字溶接継手のそれと同等と仮定し、累積疲労損傷概念を導入し、実測された応力範囲頻度分布を用いて、疲労寿命を定量的に推定することを試みた。

2. 検討方法

既に述べたとおり、鋼床版の疲労寿命を定量評価した論文は少ない現状において、寿命推定についていくつかの仮定を導入することはやむを得ないと考える。

ここでは、着目部の疲労強度等級を仮定し、当該疲労設計線図と、実橋で測定された応力範囲頻度分布とから、累積疲労損傷比を導出するにあたり、いくつかの仮定を設ける。

各種の疲労設計指針^{2,9,3)}においては、継手強度等級分類で示された継手にモデル化できる場合に疲労強度等級を

用いて公称応力で照査することが出来ることされており、本検討の着目部は荷重非伝達十字溶接継手・非仕上げ(のすみ肉)溶接継手(E等級)が相当すると考えられるが、この場合のルート破壊はすみ肉のど断面に対して言及されるのみで³⁾、着目部が該当する主材断面に対しては適用できない。

鋼構造物の疲労設計指針・同解説^{2,3)}では継手等級分類に示されていない継手などにはホットスポット応力で照査することができることとされているが、溶接ルート部や母材からの疲労き裂など、溶接止端以外を起点とする疲労損傷に対してこの疲労照査を適用する場合には、別途、十分な検討が必要とされる³⁾ほか、溶接止端近傍の表面から発生するき裂を対象としており、また、溶接の形状によるローカルな応力の乱れを含まないことから、溶接内部にあるルートから発生する亀裂に適用することは出来ない¹⁰⁾とされる。

鋼構造物の疲労設計指針・同解説(改定案)³⁾では、溶接ルート部を起点とする疲労き裂を照査する手段として、未溶着部を初期き裂とした、直応力による疲労き裂進展(モードI; き裂開口モード)解析を行うことが提案されている。しかし、応力拡大係数の変動が急峻な中を進展する疲労き裂の進展速度の算出は煩雑であるほか、応力範囲に分布を持つ変動荷重の場合、それらの荷重順序により進展速度が変化し疲労寿命が大きく異なる¹¹⁾。このため、実測された応力範囲頻度分布などを用いる場合で、少なくとも荷重順序の情報を伴わない場合は、寿命評価を行うことは困難である。

新たな評価としては、Effective Notch Stressによる評価^{10,12)}が試みられているが、溶接ルート部への適用はまだ研究段階と考えられる。

着目部であるルート部の応力範囲頻度分布を直接測定することは困難であるため、過去の例でも、特に縦リブ支間部の多くはトラフリップ外側の止端部近傍デッキプレート下面に橋軸直角方向に貼付したゲージ、あるいは特に横リブ交差部の多くはトラフリップ内側のデッキプレート下面に橋軸直角方向に貼付したゲージを用いて測定されたひずみから算出した応力を論ずる場合が多い。実際に測定された応力範囲頻度分布に基づき疲労損傷比を求めるには、現実的にはこのような近傍の測定結果を用いざるを得ない。

国総研ら¹³⁾は鋼床版試験体に対する静的多点荷重試験を対象としたFEM解析を行い、デッキプレートやトラフリップの板厚に関係なく、溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみと溶接ルート部の橋軸直角方向応力との間に高い相関性があり、溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみを用いて疲労強度評価が行える可能性があるとしている。

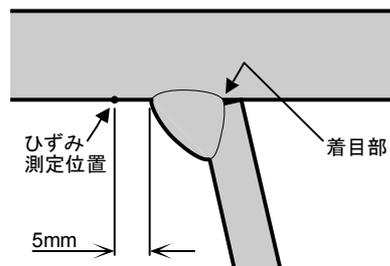


図1 ひずみ測定位置と着目部

表1 着目部の応力が卓越する場合

位置	横リブ交差部	縦リブ支間部
荷重	シングルタイヤがトラフリップ内側	ダブルタイヤが着目部を跨ぐ位置
説明	横リブによる縦リブ拘束のためデッキプレートのため縦リブが追従できず変形が集中する ¹⁴⁾ 。	車両の進行に伴い正負曲げが交番し応力範囲が最大となる ¹⁵⁾ 。
図		

表2 幅員構成から推定される一般的な大型車の走行位置と応力範囲頻度分布測定位置¹⁶⁾

M2橋	O12橋	H7橋

また、井口ら^{7,17)}は着目部の応力性状を示す参照ひずみの位置について解析的に検討しており、溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみとの相関性が十分にあるとしている。

上記二者では溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみ範囲(μ)と着目部の橋軸直角方向応力範囲(N/mm^2)の高い線形性が具体的に示されている。本報告では実用的かつ現実的な方法による簡易的な一試算として、データの比較的な豊富な止端部近傍5mm位置の主材のひずみ範囲にヤング係数を乗じて算出した応力範囲を着目部の評価応力範囲として取り扱うこととする(図1)。

2-1. 着目部の応力状態

タイヤ荷重のFEM解析から、縦リブ支間部の着目部を跨ぐダブルタイヤ荷重より、横リブ交差部のリブ内シングルタイヤ荷重のほうが着目部の橋軸直角方向の応力範囲は高い応力を示し¹⁴⁾、デッキ貫通き裂を生じやすい¹⁰⁾などとされる(表1)。

既往の応力実測結果から、本検討に必要な応力範囲頻

度分布を抽出した。

国総研ら¹⁶⁾は、M2、O12およびH7橋(表2)の縦リブ支間部のデッキプレート(12mm)とトラフリブ(6, 8mm)の溶接部止端から5mmの位置で測定された橋軸直角方向の応力範囲頻度分布を示している。

M2橋は大型車交通量が3,798台/車線/12hrの重交通路線で実際にデッキ貫通き裂が発生しており、その発生位置の延長線上で応力範囲頻度分布が測定されている。O12橋は同2,118でデッキ貫通き裂は発見されていないが、ビード貫通き裂が発生している。H7橋は同1,520で損傷は発見されていない。いずれも推定される載荷位置は必ずしも表1で示すような着目部の応力が卓越する位置とは限らない。

2-2. 寿命推定に用いる疲労強度等級とS-N線図

各種の疲労設計指針^{2,3)}で示される疲労設計曲線は実験結果の分布に対し「平均 - 2 × 標準偏差」(非超過確率97.7%の疲労強度)を算出したもので、例えば 2×10^6 回基本疲労強度で大小関係を論じることができる。

鋼道路橋の疲労設計指針⁵⁾では、デッキプレートとトラフリブとの溶接部の疲労耐久性を確保する方法として、この溶接継手ののど厚を確保するとともに、トラフリブ板厚の75%以上の溶込み量を確保するように規定しており、構造詳細による疲労設計法を採用している。一方、Eurocode¹⁸⁾では、この溶接部ののど厚がトラフリブの板厚よりも大きい場合には、溶接継手の疲労強度等級をDetail category 71(2×10^6 回基本疲労強度が 71 N/mm^2)とし、継手部に働く応力範囲をトラフリブからデッキプレートに伝達される曲げモーメントに基づき算出することとしており、応力度に基づく疲労照査法を採用している(表3)。Detail category 71を鋼道路橋の疲労設計指針⁹⁾の継手の疲労強度等級に当てはめると、E等級(2×10^6 回基本疲労強度が 80 N/mm^2)とF等級(同65)のほぼ中間の強度等級となる。

AASHTO¹⁹⁾ではデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接ではないが、トラフリブおよび横桁との交差部の溶接部についてDetail category Eを与え、継手に働く応力範囲をデッキプレートの軸応力の範囲として、応力度に基づく疲労照査法を採用している(表4)。このDetail category Eは 2×10^6 回基本疲労強度が約 57 N/mm^2 である。

一宮ら²⁰⁾はデッキプレートとトラフリブの溶接継手試験体に4点曲げ載荷し、着目部に繰り返し応力を作用させる疲労試験を行っておよそ 2×10^6 回基本疲労強度を得ている。この一宮らの実験結果を平均曲線²¹⁾に対して比較すると、E等級に相当することがわかる(図2)。

表3 Eurocode¹⁸⁾の着目部の疲労強度等級

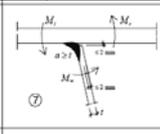
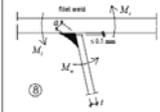
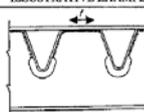
Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
71		3) Weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib 7) Partial penetration weld with a ≥ 1	7) Assessment based on direct stress range from bending in the plate
50		3) Fillet weld or partial penetration welds out of the range of detail 7)	8) Assessment based on direct stress range from bending in the plate

表4 AASHTO¹⁹⁾の着目部の疲労強度等級

ILLUSTRATIVE EXAMPLE	DETAIL	DESCRIPTION OF CONDITION	DETAIL CATEGORY
	Deck plate at the connection to floorbeam web	(12) f = axial stress range in the deck plate at the deck/floorbeam weld	E

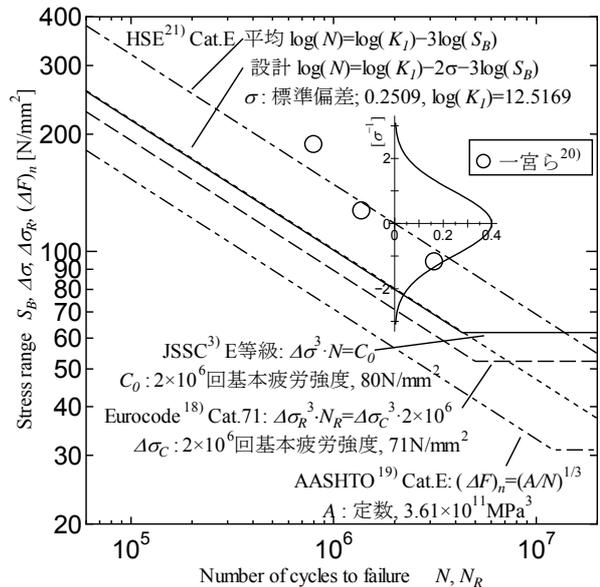
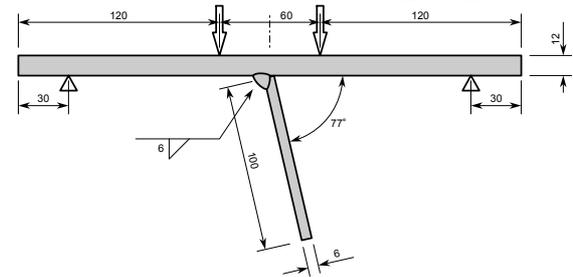


図2 一宮ら²⁰⁾の着目部の溶接継手試験と各S-N線図

以上の通り、AASHTOが一段厳しい疲労強度等級を与えているものの、ここでは、Eurocodeと着目部の溶接継手試験体の結果を重視し、着目部の疲労強度等級を各種の疲労設計指針^{2,3)}が示すE等級と仮定することとした。

着目部の疲労強度を推定するにあたり、残留応力の影響が無視できない。実際の規模の溶接構造物の疲労強度評価を、残留応力の小さい小型の試験片で適切に行うために、

最大応力を材料の降伏点と同程度とすることで想定している応力に相当するS-N線図を得る^{22,23,24)}(図3)ことが提案されている³⁾。

ここでは、E等級に属する継手形式のうち、データ数が豊富な、荷重非伝達型十字溶接継手のS-N線図を用いることとするが、そのなかから、鋼構造物の疲労設計指針・同解説に掲載されているもの^{2,3)}ではなく、溶接残留応力を考慮しているものの平均線²⁵⁾を採用することとした(図4)。

なお、着目部と荷重非伝達型十字溶接継手は、疲労き裂起点はそれぞれ前者がルート、後者が止端と異なるにも関わらず、測定応力は同様に主材の止端部から5mmの位置に貼付したゲージの測定値から算出された値を採用することになるが、同じE等級に該当する溶接継手の疲労寿命評価であることから、筆者らは適用できるものと考えた。

3. 疲労寿命の推定結果

3-1. デッキプレート板厚の影響

玉越ら²⁶⁾は、トラフリブ(U-320×240×6~8 mm)鋼床版への幅200mmダブルタイヤ150kNの着目部を跨いだ载荷や、同シングルタイヤ75kNのトラフリブ中央への载荷をFEM解析し、デッキプレート板厚が及ぼす影響を検討しており(表5)、トラフリブ板厚の影響が小さく、デッキプレート貫通き裂に対する疲労耐久性には橋軸直角方向ひずみ振幅が支配的な影響を持つ可能性が高いとしている。

これを用いて、既知の測定応力範囲に、デッキプレートの板厚変化に応じたひずみ振幅の比を乗じることにより、デッキプレート板厚を変更した後の応力範囲を推定することが出来る(図5)。

なお、ひずみ振幅の変化傾向は、ひずみを測定する位置が横リブ交差部か縦リブ支間部であるかタイヤ载荷位置がトラフリブ中央か着目部跨ぎかにより異なるが、デッキプレート板厚を12mmから14~19mmとした場合のひずみ振幅の比は全体で0.347~0.832の範囲であり、既述した、ここで使用する応力頻度分布の測定位置である縦リブ支間部に限定すれば、デッキプレート板厚を12mmから16mmとした場合のひずみ振幅の比は0.526~0.552の範囲に留まる。また同分布でのタイヤ载荷位置は推定に過ぎず詳細な検討は難しい。

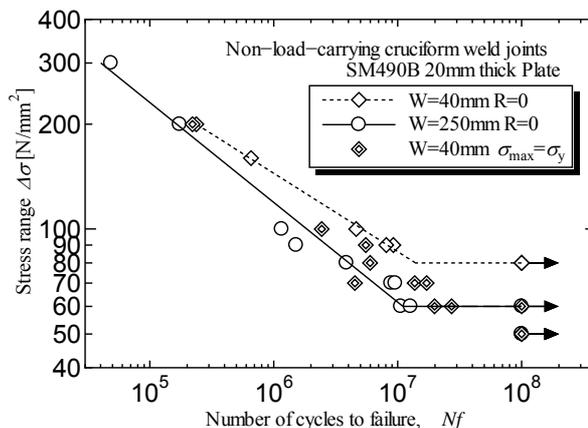


図3 疲労設計で想定するS-N線図の取得方法²⁴⁾

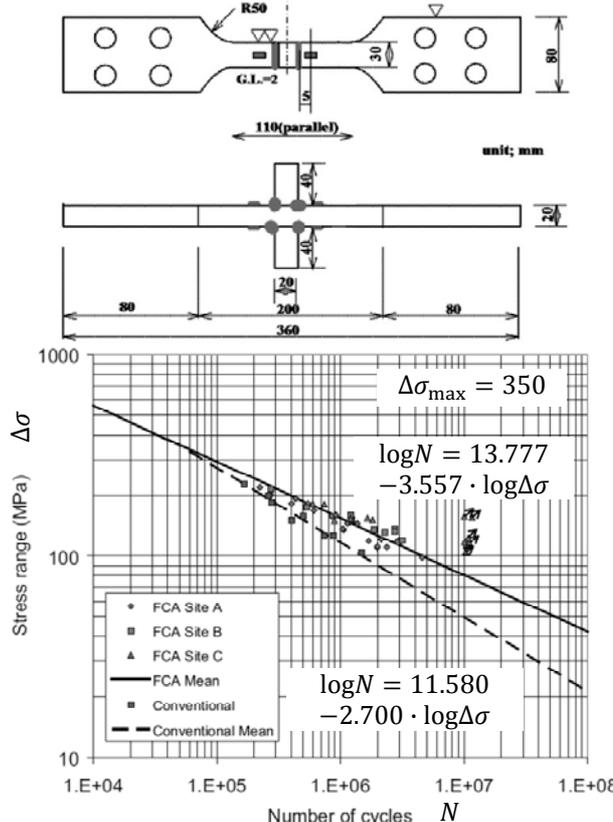


図4 荷重非伝達十字溶接継手とS-N線図²⁵⁾

3-2. 耐疲労鋼の適用による効果

Kondaら²⁵⁾は化学成分と金属組織を制御して疲労き裂の発生と進展を抑制する耐疲労鋼を開発し、その設計用S-N線図も提案しており、その平均線を図4に示すが、N軸と成す角度が小さいことが大きな特徴となっている。

デッキプレート板厚の効果に加えて、耐疲労鋼に置き換えた場合の効果も試算する。

3-3. 疲労寿命

上記した、実橋の応力範囲頻度分布と荷重非伝達型十字

表5 デッキプレート増厚によるひずみ振幅の変化²⁶⁾

測定位置	载荷位置	橋軸直角方向ひずみ振幅 μ			
		12mmに対する比			
		デッキプレート板厚 mm			
横リブ 交差部	トラフリブ	730.9	607.8	506.3	388.8
	中央	1	0.832	0.693	0.532
縦リブ 支間部	着目部	742.8	617.8	516.2	399.1
	跨ぎ	1	<u>0.832</u>	0.695	0.537
横リブ 交差部	トラフリブ	749.4	550.5	413.8	279.2
	中央	1	0.735	<u>0.552</u>	0.373
縦リブ 支間部	着目部	1447.6	1032.8	761.3	501.8
	跨ぎ	1	0.713	<u>0.526</u>	<u>0.347</u>

溶接継手のS-N線図から、鋼構造物の疲労設計指針・同解説(改訂案)³⁾に従い、修正Miner則により累積疲労損傷比を算出し、疲労き裂のデッキプレート貫通寿命を試算した(図6、図7)。

図6に示す通り、横軸をひずみ振幅比、縦軸を貫通寿命とした両対数グラフ上での傾きはS-N線図の傾きに対応している。

デッキプレートの12から16mmへの増厚により縦リブ支間部の橋軸直角方向ひずみ振幅がほぼ半減することで、貫通寿命は5.0~5.7倍に延伸する。これは、井口ら⁷⁾が実際にデッキ貫通き裂が生じた橋に対して示した延伸倍率3.18倍以上という予測と矛盾しない。なお、この延伸倍率は応力範囲頻度分布に依らず一定である。

重交通路線M2橋では16mmに増厚しても20年以内に貫通するが、これは増厚せずに耐疲労鋼に置き換えた場合の寿命と同程度である。

O12橋では16mmに増厚すると貫通寿命は500年を超えるが、増厚せず耐疲労鋼を適用すると寿命延伸倍率は10倍に達し、貫通寿命は1,000年を超える。

4. まとめ

デッキプレート貫通き裂の簡便な寿命評価方法を提案した。具体的には、疲労強度等級をE等級と仮定し、そのS-N線図に荷重非伝達型十字溶接継手のS-N線図のうち残留応力の影響を考慮したものを適用し、これと、実橋で測定された応力範囲頻度分布から、貫通寿命を見積もり、併せてデッキプレート板厚の影響、耐疲労鋼をデッキプレートに適用した場合の効果についても試算し以下の結果を得た。

デッキプレート増厚、即ちひずみ振幅の比に対し、寿命延伸倍率は一定で、M2橋などの重交通路線では、元の板厚でも寿命が短いため、増厚による延伸効果が小さい。

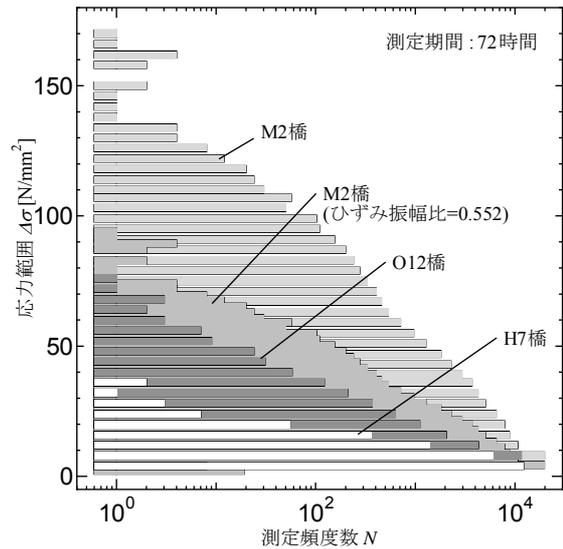


図5 応力範囲頻度分布

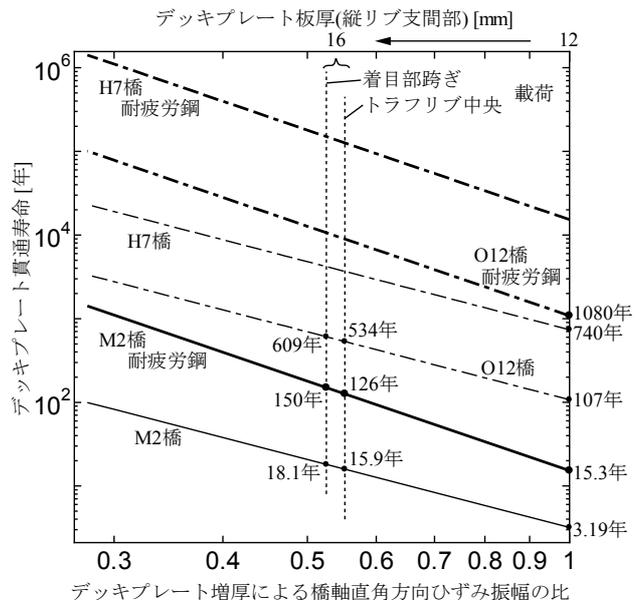


図6 寿命延伸効果

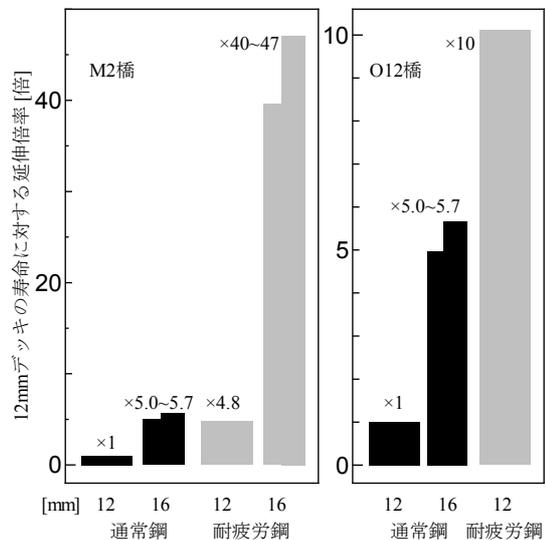


図7 寿命延伸倍率

耐疲労鋼は、応力範囲頻度分布が低応力寄りであるほど、またデッキプレートを増厚することでひずみ振幅が小さくなるほど、通常鋼との寿命延伸倍率の差は拡大し、より長寿命となる。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会 鋼床版の疲労改訂小委員会: 鋼床版の疲労[2010年改訂版], 2010.
- 2) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.
- 3) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説(改訂版), 2010.
- 4) 長谷川和正, 近藤明雅, 山田健太郎, 石崎浩: 箱桁橋 鋼床版の疲労照査, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.929-938, 1989.
- 5) 川畑篤敬, 井口進, 内田大介, 平山繁幸, 宮下敏, 松下裕明: デッキ貫通き裂の疲労寿命に対するデッキプレート増厚の効果, 土木学会第65回年次学術講演会, I-086, pp.171-172, 2010.
- 6) 三木千壽, 鈴木啓悟, 加納隆史, 佐々木栄一, 石田稔, 高森博之: 鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング, 土木学会論文集A, Vol.62, No.4, pp.950-963, 2006.
- 7) 井口進, 貝沼重信, 城大樹, 尾上聡史, 内田大介, 川畑篤敬: 鋼床版のデッキとUリブ溶接部の疲労寿命評価方に関する検討, 土木学会論文集A1, Vol.67, No.3, pp.464-476, 2011.
- 8) 渡邊英, 内藤雅喜, 山田健之: 矢作川大橋におけるデッキプレート進展き裂に対する検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.19, pp.337-344, 2011.
- 9) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 10) 菅沼久忠, 三木千壽: 鋼床版のデッキプレートとトラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対するEFFECTIVE NOTCH STRESSによる評価, 土木学会論文集A, Vol.63 No.1, pp.35-42, 2007.
- 11) 日本材料学会: 疲労設計便覧, 1995.
- 12) 森猛, 明見正雄: 十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性, 土木学会論文集A, Vol.65 No.1, pp.188-195, 2009.
- 13) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 土木研究所, 日本橋梁建設協会: 損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究, 国土技術政策総合研究所資料 No.608, 2010.
- 14) 三木千壽, 菅沼久忠, 富沢雅之, 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, No.780/I-70, pp.57-69, 2005.
- 15) 貝沼重信, 尾上聡史, 三浦健一, 井口進, 川畑篤敬, 内田大介: 鋼床版のデッキプレートとUリブの溶接ルート部の疲労き裂に対する試験システムの構築, 土木学会論文集A, Vol.64 No.2, pp.297-302, 2008.
- 16) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 日本橋梁建設協会: 鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究 -実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討-, 国土技術政策総合研究所資料 No.471, 2008.
- 17) 井口進, 内田大介, 川畑篤敬: 鋼床版のデッキとUリブ溶接部の局部応力の評価位置に関する解析的検討, 土木学会第65回年次学術講演会, I-085, pp.169-170, 2010.
- 18) CEN: EN 1993-1-9:2004, Eurocode 3 : Design of steel structures Part 1.9 : Fatigue, 2004.
- 19) AASHTO: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications SI Units Third Edition. 2004.
- 20) 一宮充, 春日井俊博, 清川昇悟, 安藤隆一, 菅田登, 有持和茂: 鋼床版の疲労損傷評価方法と鋼材による疲労寿命の改善, 溶接構造シンポジウム講演論文集, 2009.
- 21) Health and Safety Executive: Offshore Installations Guidance on Design, Construction and Certification, Fourth edition. 1990.
- 22) A. Ohta, N. Suzuki and Y. Maeda: SHIFT OF S-N CURVES WITH STRESS RATIO, Welding in the World, Vol.47, No 1/2, 2003.
- 23) 太田昭彦, 松岡一祥, 鈴木直之, 前田芳夫: $\sigma_{max} = \sigma_y$ 試験による荷重非伝達すみ肉継手の疲労強度, 溶接学会全国大会講演概要 第52集, 1993.
- 24) 物質・材料研究機構. 疲労データシートNo.91 溶接構造用圧延鋼SM490B荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート -残留応力の効果-, 2003.
- 25) Noboru Konda, Akinori Inami, Kazushige Arimochi, Yukichi Takaoka, Takumi Yoshida and Inge Lotsberg: A Proposed Design S-N Curve for Steels with Improved Fatigue Resistance (FCA steels). Rio de Janeiro, Brazil : 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, pp.1233-1242, 2010.
- 26) 玉越隆史, 大久保雅憲, 石尾真理, 池田秀継, 小沼恵太朗: 鋼床版の板厚構成と疲労耐久性の関係に関する研究 -トラフリブとデッキプレートの板厚とデッキプレート貫通型疲労き裂の関係-, 国土技術政策総合研究所資料 No.558, 2009.