

1. 研究背景および目的 高度成長期に建設された橋梁は全橋梁のうち約 40% を占め、これらの橋梁の老朽化・劣化が進んでいる。平成 25 年の道路法改正を受けて平成 26 年より実施されていた橋梁、トンネル等の近接目視による点検が平成 30 年度で 99.9% が終了した。その結果 4 段階の判定区分のうち早期に措置を講ずべき状態および緊急に措置を講ずべき状態に属する全国の橋梁のうち 78% が修繕未着手である¹⁾。一方人口減少による財政難もあり、構造物の維持管理を効率化の社会的欲求は益々高まっている。そこで本研究では、疲労寿命の予測の効率化を目的として、疲労き裂を有する桁の腹板を想定し、面内純曲げを受ける鋼桁、および面内せん断を受ける鋼桁の疲労き裂進展挙動を解析的に評価する。

2. 解析モデル概要および解析ケース FEM 解析には汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いて、4 辺単純支持板とし、フランジは 3 辺単純支持 1 辺自由板とし、図 1 に示すようにウェブの X 方向の長さを 1583mm、 Y 方向の長さを 1633mm とする。また、フランジは上フランジと下フランジの Z 方向の長さが異なり、上フランジは 430mm、また下フランジは 400mm とする。初期き裂は図 1 に示す位置から真上に 30mm とする。また対象とするモデルは ISG 3106 溶接構造用熱間圧延鋼材 (SM 材) の最小保証引張強さが 400N/mm^2 の鋼材である SM400 の材料特性であるが、本研究では K 値を算出するため、単一の線形弾性材料とし、降伏点を設定せず、ヤング率 E は $200,000\text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 ν は 0.3 としている。ただし、残留応力および初期たわみは考慮しない。

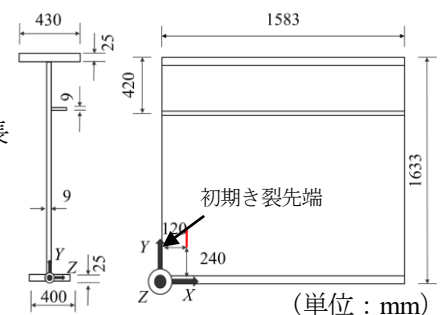
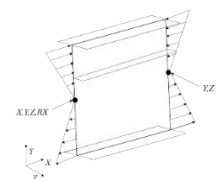
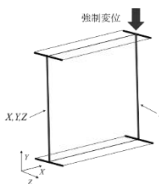


図 1 解析モデル概要

解析手法は図 2 に示すように面内純曲げを受ける桁では境界条件として、 $X=0$ の中立軸に X , Y , Z 軸方向の境界条件 X , Y , $Z=0$, X 軸の回転の境界条件 $RX=0$ を設定し、 $X=1583$ の中立軸に Y , Z 軸方向の境界条件 Y , $Z=0$ を設定する。また $X=0$ の中立軸に $RZ=-0.002\text{rad}$, $X=1583$ の中立軸に $RZ=0.002\text{rad}$ 強制回転角を与える際、運動学的カップリング拘束を中立軸にて I 型に拘束する。一方、面内せん断負荷を受ける桁については境界条件を $X=0$ で I 型断面に X , Y , Z 方向の境界条件 X , Y , $Z=0$ を設定し、 $X=0$ で I 型断面に Z 方向の境界条件 $Z=0$ を設定する。強制変位として $X=1583$ で I 型断面に Y 軸負の方向に与える。強制変位および強制回転角は許容応力度程度になるように設定している。また両ケースにおいて、き裂先端近傍の応力およびひずみを正確にするために、き裂先端部には 4 節点シェル要素を 3 節点シェル要素に退化させた特異性を導入する。



(i) 面内純曲げ負荷



(ii) 面内せん断負荷

図 2 解析手法の概要

3. 応力拡大係数とき裂進展方向 き裂先端の応力状態を知るために破壊力学パラメータ、応力拡大係数 (以下 K 値) を算出する。その際、本研究では第 1 から第 5 番目までの閉曲線積分を定義し、第 1 番目の閉曲線積分の結果から順に $K1$, $K2$, $K3$, $K4$, $K5$ と表す。ここでき裂先端近傍では応力分布が急激に変化し、第 1, 第 2 の閉曲線積分値は精度が粗いことが知られているので、 $K3 \sim K5$ の平均値を用いてき裂進展挙動を評価することとする。き裂進展方向については、比較的良好に使用されている最大接線応力説を用いる。進展速度は定数 C , n と下限界応力拡大係数範

囲 ΔK_{th} を用いて式 (1) で示す. ただし $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ では, 進展速度 $da/dN=0$ であり, 定数と下限界応力拡大係数範囲は表 1 に示す.

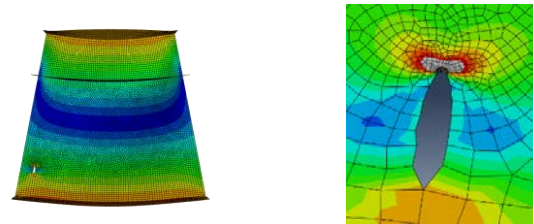
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (1)$$

表 1 疲労き裂進展の材料特性

	C	n	ΔK_{th}
最安全設計曲線	2.0×10^{-12}	2.75	63

4. **解析結果** 図 3 に初期き裂から 10mm ずつき裂を進展させ 50mm 進展したときの桁全体とき裂先端周辺を拡大したミーゼス応力分布図を示す. 曲げ負荷では, き裂は左右に曲がりながらではあるが次第にき裂進展角度は小さくなり真上に進展している. せん断負荷では右方向へ進展している. この結果から, 疲労き裂を有する桁が曲げ負荷が大きくかかる橋梁の中央部であれば真上方向にき裂は進展し, せん断負荷が大きくかかる橋梁の端部であれば, 右方向に進展すると考えられる.

また, き裂進展速度の結果はせん断負荷の場合はき裂長さに関わらず進展速度が 0mm/cycle となり, き裂が進展しにくい結果であった. 曲げ負荷の場合は表 2 に示すようになり, 一日の繰返し荷重が 35 万回であるとする, 80mm き裂が進展するのに要する時間はおよそ 1.5 日となる. 落橋に至る危険性がある, き裂長さ 1m に達するのは 18.75 日程度となる. しかし, 結果からき裂が進展すると, 次第にき裂進展速度が小さくなっていることがわかる. したがって, それ以上の時間がかかると予



(i) 面内純曲げ負荷



(ii) 面内せん断負荷

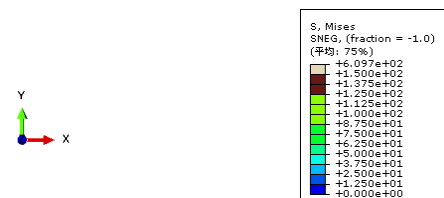


図 3 ミーゼス応力分布図

表 2 面内純曲げ負荷を受ける桁のき裂進展速度

き裂長さ (mm)	30	40	50	60	70	80
き 裂 進 展 速 度 (mm/cycle)	1.156E-04	1.196E-04	1.532E-04	1.905E-04	2.312E-04	2.520E-04
進展にかかる日数	0.74 日	0.24 日	0.19 日	0.15 日	0.12 日	0.11 日

5. **結論** 面内純曲げ負荷を受ける桁に関して, き裂は上に進展し, き裂は 10 日で 80mm 進展することが分かった. また, 面内せん断負荷を受ける桁に関しては右方向に亀裂が進展し, き裂進展はしにくいことが分かった. したがって, 腹板にき裂を有する鋼桁のき裂進展は曲げ負荷に影響を受けやすいと考えられる.

参考文献 1) 国土交通省: 橋梁などの平成 30 年度点検結果を取りまとめ, 道路メンテナンス年報 (一巡目) の公表, 道路局 国道・技術課, 2019.8.9