

## 桁端付近の腹板に疲労き裂を有する鋼 I 桁の残存耐荷性能に関する数値解析的研究

大阪工業大学 正会員 ○林 健治

## 1. はじめに

鋼 I 桁橋の疲労損傷の多くは、桁端部のソールプレートと下フランジの溶接部を起点としている<sup>1)</sup>。溶接止端部から疲労き裂が発生した場合、下フランジを貫通して腹板まで達する事例が散見されている。特に、腹板を貫通して脆性破壊により破断した事例が海外で報告されており、鋼 I 桁橋の安全性を確保する観点から、疲労き裂の進展性に着目した実験的な研究や有限要素法などの数値解析を用いた研究が実施され、破壊力学の手法を用いて、き裂が進展しても脆性破壊に至る可能性が低いという結果が報告されている<sup>2)</sup>。き裂が進展しても、脆性破壊に至らない場合、維持管理の観点から、緊急の対策は必要ないものと判断されるが、耐久性ではなく、耐荷性能の面から、問題となることも考えられる。そこで、本研究では、鋼 I 桁橋の支承部付近に発生した疲労き裂がその進展に伴い残存耐荷性能にどのような影響を与えるかを有限要素法に基づく弾塑性有限変位解析を通して、数値解析的に検討し、その影響を定量化しようとするものである。

## 2. 解析条件

解析モデルの形状・寸法は、図-1のとおりであり、上下フランジと腹板の板厚は 9mm、垂直補剛材の板厚は 16mm とした<sup>2)</sup>。同図は、併せて、要素分割図を示す。要素寸法はソフトウェアの制約から 40mm とした。橋軸方向を x 軸とし、鉛直上向きを z 軸、直交する面外方向を y 軸とした。境界条件は、支点 A はヒンジ支承、支点 B がローラー支承として取り扱った。荷重は等分布荷重を上フランジ中央の x 軸方向のラインに沿って載荷した。解析事例として、き裂のない無損傷の桁 (Type 0)、垂直補剛材の中心から橋軸 (x 軸) 方向に 130mm の位置 (ソールプレートと下フランジの溶接部) において、下フランジを貫通し、腹板直上に 40mm まで疲労き裂が進展した桁 (Type 1: 便宜上、き裂長さ 40mm)、40mm の位置から x 軸方向に -40mm、z 軸方向に 80mm まで疲労き裂が進展した桁 (Type 2: き裂長さ 120mm)、さらに同位置から x 軸方向に -40mm、z 軸方向に 80mm まで疲労き裂が進展した桁 (Type 3: き裂長さ 200mm) の 4 タイプを取り上げ、弾塑性有限変位解析を実施することにより、き裂長さが残存耐荷性能に及ぼす影響を検討することとした (図-2 参照)。解析には、8 節点アイソパラメトリック・シェル要素を使用し、降伏条件には von Mises の降伏条件式を用いた。また、材料は SM490 材とし、多直線近似した真応力-真ひずみの関係を用いた。なお、初期不整は考慮していない。

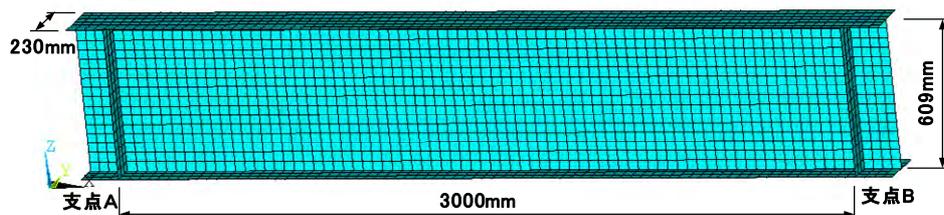


図-1 解析モデルの形状・寸法と要素分割

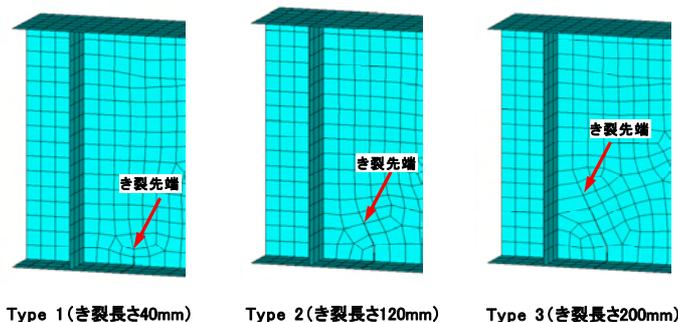


図-2 解析事例 (Type 1: き裂長さ 40mm, Type 2: き裂長さ 120mm, Type 3: き裂長さ 200mm)

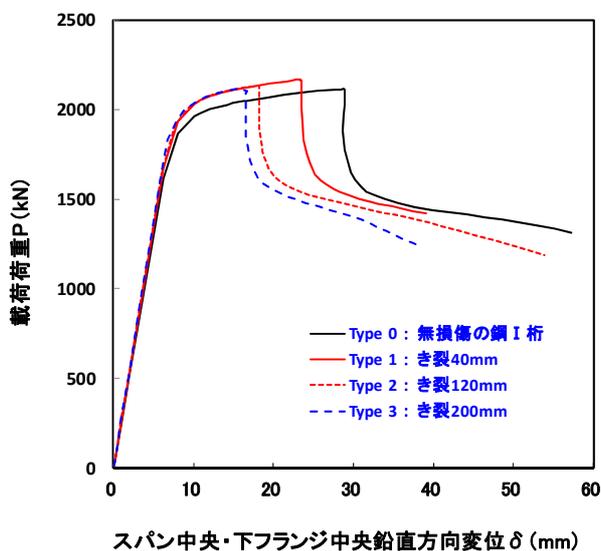
キーワード 疲労き裂, 鋼 I 桁, 残存耐荷性能, 塑性変形能力, 弾塑性有限変位解析

連絡先 〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 TEL06-4300-6847

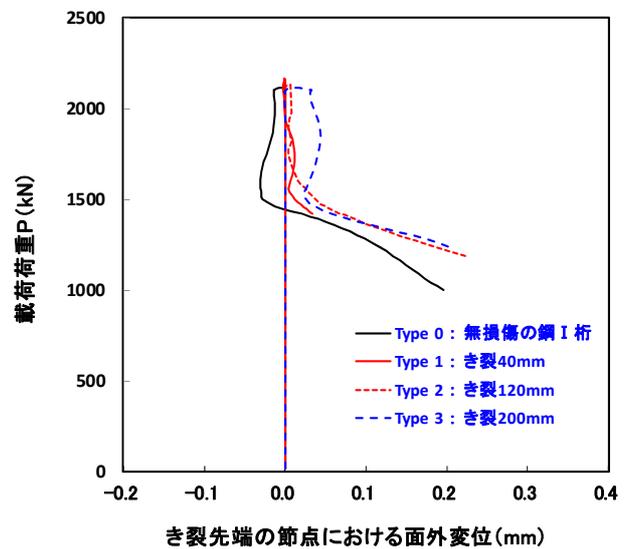
### 3. 解析結果（残存耐荷性能）

疲労損傷を有する鋼 I 桁橋の残存耐荷性能を評価する指標として、最大荷重（あるいは残存耐荷力）、エネルギー吸収能や塑性変形能力（ $\delta / \delta_y$ ）があるが、本研究では、直接、荷重  $P$ －変位  $\delta$  曲線から残存耐荷性能を判断するものとする。特に、き裂の進展により、残存耐荷性能がどのように変化するかに注目した。

鋼 I 桁の載荷荷重  $P$ （荷重は等分布荷重で与えたため、鉛直（ $z$  軸）方向の支点反力の総和を  $P$  とした。）とスパン中央の鉛直方向変位  $\delta$  との関係を図－3に示す。  $P$ － $\delta$  曲線は最大荷重を過ぎると、急激に荷重が低下し、また、変位も若干ではあるが、低下した後、比較的安定な状態を保持する。いわゆる、曲げねじれ座屈（非線形座屈）を生じ、最大荷重点が分岐座屈点となっている。また、無損傷の桁と比較すると、き裂長さの増加とともに、残存耐荷力（最大荷重）は大きな差異が見られないが、塑性変形能力を表す鉛直方向変位  $\delta$  は大きく低下している。つぎに、き裂先端の節点における面外方向変位は、最大荷重以降、僅かではあるが変位を生じている。き裂の増加に伴い、非線形座屈を生じる場合、面外方向に大きな変位が発生するはずであるが、図－4のように非常に小さいので、その可能性はほとんどないと言える。したがって、ソールプレートと下フランジの溶接部から疲労き裂が発生・進展しても、面外方向に大きく変位し、座屈を生ずる可能性は、本研究の範囲内ではないと判断できる。



図－3 鋼 I 桁の荷重  $P$ －鉛直方向変位  $\delta$  曲線



図－4 鋼 I 桁の荷重と面外方向変位との関係

### 4. おわりに

以上の結果を総合的に勘案して、ソールプレートと下フランジの溶接部を起点とした疲労き裂が、下フランジを貫通して、腹板から 40mm（腹板高さの 1/15）、120mm（1/5）、200mm（1/3）進展したとしても、き裂を起点とした座屈は生じない。また、無損傷の桁と同等の残存耐荷力を保有する。但し、塑性変形能力はき裂の増加とともに大きく低下する。何れにしても、この種の疲労き裂が発生しても、脆性破壊の危険性は、き裂発生初期の段階のみ<sup>2)</sup>であり、き裂が進展しても、通常、十分な残存耐荷性能を保有するため、維持管理上、早期の対応は必要ないものと思われる。なお、別途実施された鋼二主 I 桁橋のスパン中央に腹板の中央までき裂が進展した場合の解析でも、脆性破壊の危険性が少ないこと、十分な残存耐荷性能を有することが示されており、鋼 I 桁橋は、十分なリダンダンシーを有する構造である可能性が高いと言える。

### 参考文献

- 1) 西川和廣, 村越潤, 佐々木靖雄: 鋼桁ソールプレート溶接部の疲労に関する検討－模型桁の疲労試験－, 土木技術資料, No.36-3, pp.40-45, 1994.
- 2) 日本鋼構造協会 鋼橋の性能・信頼性向上に関する研究委員会 疲労耐久性向上部会: 疲労損傷を受けた鋼橋の耐久性評価および耐久性向上技, JSSC テクニカルレポート No.84, I-73～I-75, 2009.