

# 床版の進行性破壊を考慮した 鋼連続多主桁橋の冗長性評価

Redundancy evaluation of a continuous steel multi-girder bridge  
considering progressive failure of deck concrete

副島理義\*

Masayoshi SOEJIMA

\*構造強度学研究室（指導教員：斉木功 准教授）

床版が橋梁の冗長性に及ぼす影響は無視できないことが指摘されているが、橋梁全体のモデルにコンクリートの破壊を考慮した数値解析は、計算の困難さからこれまでほとんど行われてこなかった。近年、床版の進行性破壊を組み込んだ橋梁全体モデルによる冗長性評価が可能となり、床版が橋梁の冗長性評価に及ぼす影響が定量的に評価できるようになった。そこで本研究では、床版の進行性破壊を考慮した鋼連続多主桁橋全体のモデルを用いて、損傷位置と損傷の程度が橋梁の余耐力や床版の破壊進展に及ぼす影響を検討した。その結果、損傷の程度が同じとき、中桁に損傷がある場合よりも外桁に損傷がある場合の方が小さな荷重で使用限界に至ることや、損傷位置によって床版の破壊進展が大きく異なることがわかった。

**Key Words:** nonlinear finite element analysis, redundancy, progressive failure, continuous steel multi-girder bridge

## 1. はじめに

多主桁橋を対象に損傷位置や損傷部材が橋梁全体の余耐力にもたらす影響に着目した研究はいくつか例があるものの、床版の進行性破壊を考慮できるモデルを用いて解析を行った事例はない。平野ら<sup>1)</sup>によって床版の進行性破壊を組み込んだ橋梁全体モデルによる冗長性評価が可能となり、床版コンクリートのモデル化が主桁に生じる塑性ひずみやその崩壊メカニズムに大きな影響を及ぼすことがわかった。そこで本研究では、床版の進行性破壊を考慮したモデルを用いて、損傷位置と損傷の程度が橋梁の冗長性や床版の破壊進展に及ぼす影響を評価することを目的とする。

## 2. 解析方法

### (1) 解析モデル

宮城県内で供用されている 4 径間連続 5 主桁橋と同規模の橋梁（橋長 183.24m, 主桁高 2m, 主桁間隔 2.35m）を解析対象とした。本研究では文献<sup>1)</sup>と同様に損傷を第 4 径間の端支点に想定するため、第 4 径間の主桁・横桁・補剛材は平面シェル要素でモデル化した。それ以外の径間の主桁、横桁とすべての径間の対傾構、横構は梁要素でモデル化した。これらはすべて Young 率 200 GPa, Poisson 比 0.3 で、降伏後は硬化係数が Young 率の  $10^{-2}$  倍となるように設定した。

コンクリート床版は圧縮側では 21 MPa で降伏後 17 MPa まで軟化し、引張側では圧縮側の 10 分の 1 の 2.1 MPa で亀裂が生じ荷重を受け持たなくなるような分散ひび割れモデルを用いてソリッド要素でモデル化

した。コンクリートの材料特性を図-1 に示す。鉄筋はロッド要素を用いて床版の要素に節点共有して配置した。アスファルト舗装や壁高欄はコンクリートの質量に加えることで死荷重のみ考慮した。また、床版と主桁間の合成効果は竹田ら<sup>2)</sup>が使用していたスラブアンカーの非線形ばね要素を用いてモデル化し、スラブアンカーの引き抜きを再現した。

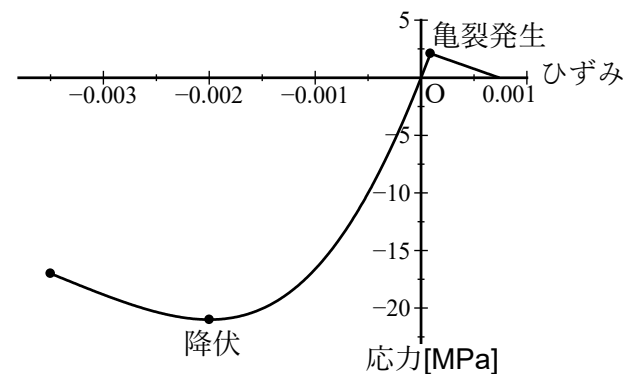


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

### (2) 損傷および荷重

損傷は端支点部の桁の全断面に及ぶ損傷を想定し、ウェブ及び上下フランジ、水平補剛材の全要素を除去した。損傷パターンは G1, G2, G1 と G2, G2 と G3, G1 と G2 と G3 の 5 パターンを想定した。荷重は損傷部に作用するせん断力が最大となるように道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づき図-2 に示すような B 活荷重を載荷した。非線形解析を行うにあたり、死荷重 (D) を加えた後活

荷重 (L) を漸増させて解析を行った。このとき活荷重 (L) の倍率を表す荷重パラメータ  $f$  を定義し解析モデルに作用させる外力を  $D+f\cdot L$  とする。

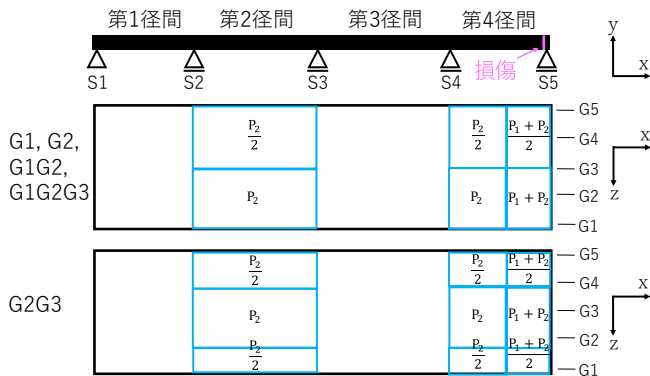


図-2 荷重載荷と損傷位置

### 3. 解析結果

段差に対する走行限界とされている<sup>4)</sup> 段差 100 mm を損傷桁の先端たわみの制限値とし、このときの荷重パラメータを使用限界  $f_s$  とする。表-1 に各損傷パターンの  $f_s$  を示す。G1 損傷の  $f_s$  は G2 損傷の  $f_s$  の約 55% であった。G1G2 損傷と G2G3 損傷の  $f_s$  を比較しても同程度の関係であった。

G1 損傷では、 $f = 1.20$  のときに損傷部上部の床版に引張破壊が発生し、中間支点の方へ進展していった。 $f = 2.60$  のとき G1 桁の端支点上部の床版が圧壊し、 $f = 3.70$  のとき G2 桁上部の床版に圧壊が発生した。G2 桁上部の床版の圧壊は G1 桁の方へ橋軸直角方向へ進展していき、 $f = 5.20$  のとき G1 桁に到達した。図-3 に G1 損傷における  $f = 2.60$  と  $f = 5.20$  のときの床版下側の破壊の状態を示す。図中の色はクラック数を表している。クラック数が 3 のとき、3 つの主方向に引張によるひび割れが生じ剛性がほとんどなくなるため、この状態を引張破壊とみなした。また、クラック数 4 はコンクリート床版が圧壊したことを意味する。外桁に損傷のある G1G2 損傷、G1G2G3 損傷でも同様な破壊進展の様子が観察された。

G2 損傷では、外桁に損傷があるときに見られた損傷桁-隣接桁間を圧壊が進展する様子は見られなかった。これは、G2 損傷における G2 桁の先端たわみが外桁に損傷がある場合の損傷桁の先端たわみほど大きくなるためであると考えられる。対して、G2G3 損傷では、G1-G2 桁間、G3-G4 桁間上部の床版で圧壊が橋軸直角方向へ進展していった。外桁に損傷のないにもかかわらずこうした挙動が見られたのは、損傷桁の数が 2 本になったことで 1 本の場合より損傷桁の先端たわみが大きくなったためであると考えられる。

表-1 各損傷パターンにおける  $f_s$

損傷パターン	$f_s$
G1	3.65
G2	6.63
G1G2	2.35
G2G3	4.28
G1G2G3	1.70

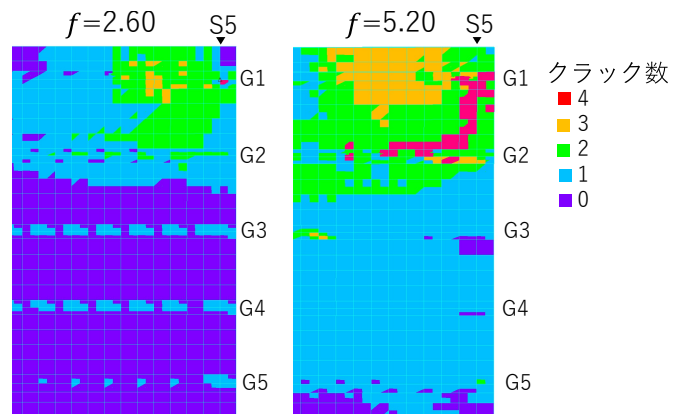


図-3 G1 損傷の床版下側の破壊の状態

### 4. 結論

得られた知見を以下にまとめる。

- 損傷を有する桁の数が同じとき、外桁に損傷がある場合は中桁に損傷がある場合の約 55% の活荷重倍率で使用限界に至った。
- 外桁に損傷がある場合、床版下側の破壊は以下のように進展していく。
  1. 損傷部上部の床版で引張破壊が発生し、中間支点の方向へ進展する
  2. 損傷桁の端支点上部の床版が圧壊する。
  3. 損傷桁に隣接する健全桁上部の床版で圧壊が発生し、損傷桁の方向へ橋軸直角方向へ進展する。
- 損傷桁-健全桁間の圧壊には損傷桁の先端たわみの大きさが影響を与えている。

### 参考文献

- 1) 平野 貴大, 斉木 功: 床版コンクリートの材料非線形性と荷重分配効果を考慮した鋼連続多主桁橋の冗長性評価の試み, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2022.
- 2) 竹田 翼, 斉木 功, 山本 剛大, 岩坪 要: 非合成連続多主桁橋の冗長性評価に及ぼすスラブアンカーの合成効果の影響, 土木学会論文集 A2, Vol.74, No.2, pp.1.579-1.590, 2018.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 共通編, 2017.
- 4) 常田 賢一, 小田 和広, 中平 明憲, 林 健二, 佐藤 光代: 段差走行試験に基づく地震時の道路の性能評価および交通運用, 地震工学論文集, pp.596-604, 2007.

(2023 年 2 月 7 日 提出)