

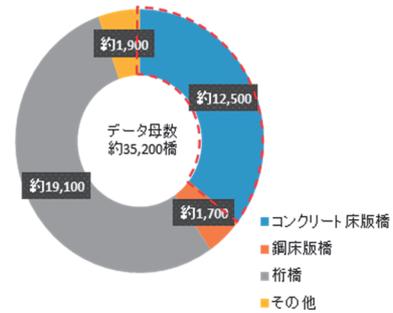
場所打ち中空床版橋の上面コンクリート踏み抜きに関する解析

平野義徳・白戸真大

1. はじめに

コンクリート床版橋は国土交通省が管理する道路橋の中でも約12,500橋整備されてきた形式の一つであり(図-1)、そのうち中空床版橋は約27%を占めている。図-2に場所打ちコンクリート中空床版橋の概要図を示すとおり、コンクリート内部に円筒型枠(以下「ボイド」という。)を埋設することで軽量化できるが、施工中にボイドが浮き上がりやすいという特徴もある¹⁾。一様に浮き上がる場合や、固定部以外の箇所が部分的に浮き上がることもある。ボイド上部のコンクリートが薄いと輪荷重の局所的な载荷に伴うコンクリートの踏み抜きが懸念され、実際に踏み抜きが生じている^{2),3)}。

国土交通省関東地方整備局関東技術事務所と国土交通省国土技術政策総合研究所(以下「国総研」という。)、国立研究開発法人土木研究所(以下「土研」という。)では、全国の技術事務所と国総研・土研の技術懇談会などの連携の枠組みを通じて、踏み抜きに対する保全のあり方について検討を続けてきた。たとえば、関東地方整備局では、管理する鉄筋コンクリート(以下「RC」という。)中空床版橋において上面のコンクリート厚を非破壊検査で調べており、約6割が道路橋示方書に規定される上床版厚を下回る部分があることが疑われる結果であった⁴⁾。また、上床版の断面を平面ひずみ要素でモデル化した弾性FEM解析を行い、コンクリート厚さが薄くなると床版上面のコンクリートに生じる引張応力度が許容応力度を超える可能性を指摘している⁴⁾。この結果から、発生する引張応力度に対する鉄筋が十分に配置されていれば、突発的に極端に大きな輪荷重がボイド浮き上がり部に作用しない限りは問題が生じる可能性が少ないとも考えられるが、踏み抜きの予防保全的な対策方法・対策時期についての知見を得るために、繰り返し载荷による耐久性について、検討す



※ 2m以上の直轄橋梁を対象とした集計(溝橋を含む)

図-1 構造物形式別橋梁数

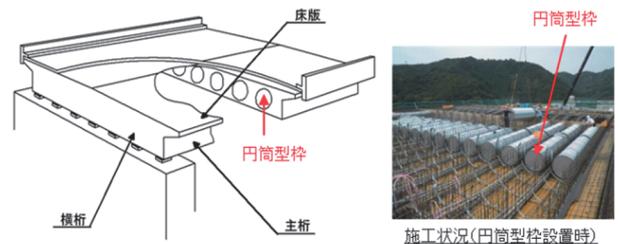


図-2 中空床版橋概要図

べきであると考えられた。

そこで本研究において、輪荷重を繰り返し受けるコンクリート床版橋のボイド上部のコンクリートの損傷過程について、数値解析を用いて検討した結果を報告する。

2. 中空床版橋の設計からみる課題の把握

中空床版橋の設計理論は、たとえば文献⁷⁾によくまとまっており、図-3に概念図を示す。ボイド上方に载荷される輪荷重に対しては、載荷面と

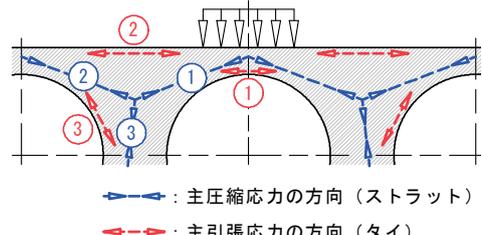


図-3 ストラット・タイ形成イメージ

ウェブの間に生じる圧縮応力域(③)と、それと床版下面との間での圧縮応力域(①、②)からなるアーチに近いストラット・タイの形成を前提としている。また、ボイド周辺のコンクリートに生じ得る局所的な引張応力③に対しては、引張鉄筋としてスターラップを配置することなどされている。現在の設計では、少なくともボイド上のコンクリートの厚さは150mm以上確保するように規定されているが、ボイドが浮き上がることで、ボイド上部のコンクリート厚が薄くなり、圧縮ストラット①が水平に近づくため、アーチ的な耐荷機構が形成されず、梁としての耐荷機構に近づいていく。このような応力分布は、前述の2次元弾性FEMの結果からも見て取れる⁴⁾。また、他機関では、実験的な検討も行われており、文献⁵⁾では中空床版橋の1/2縮小モデルを用いて静的載荷試験を行い、ボイド上部のコンクリート厚さが薄く載荷位置がボイド直上に近いほど、破壊荷重が低くなるという結果が得られている。

耐久性においては、通常のRC床版と比べたとき、相対的には、中空床版橋のような耐荷メカニズムでは、コンクリートの圧縮領域が十分確保されているときには疲労の懸念は減る。なぜなら通常のRC床版のような版部材であれば、移動する輪荷重による繰返しのせん断・引張力によるコンクリートの疲労も懸念されるが、繰返しの圧縮力に対する材料の耐久性が及ぼす要因が強くなるからである。また、ボイドの位置と輪荷重の載荷位置が常に一致するとも限らないことも、RC床版とは異なり、耐久性には有利に働くと想定できる。

一方、ボイドの位置と輪荷重の載荷位置の関係性、ボイド上のコンクリートの厚さなどについて、どのような条件で疲労耐久性を特に懸念する必要があるのかが分かれば、予防的な対応を検討するときに参考になると考えられる。

3. 三次元FEM解析による応力分布や累積損傷の拡がりの推定

3.1 対象橋梁と解析モデル

3次元モデルを作成するにあたって、対象橋梁は、標準的と考えられる範囲である支間長18m、断面高さ h_0 は1000mm、ボイド径 D は700mm、ボイド間隔 d は900mmとした。ボイド上のコンクリートの厚さは、図-4(a)および(b)に示す断面-

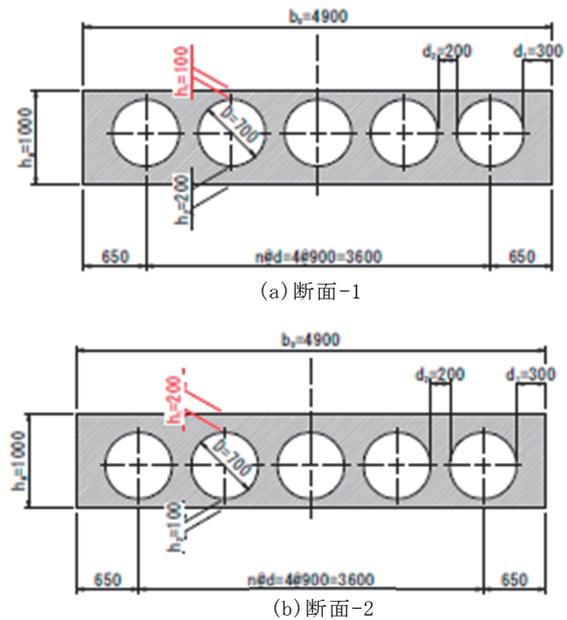


図-4 検討対象の断面形状

1および断面-2のとおり、標準的な150mmに比べると小さい $h_1=100\text{mm}$ と大きい $h_1=200\text{mm}$ とした。初めての検討であり、結果には極端な違いが出る方がよいと考えたものである。

モデル化では、簡便化のため、図-4に示すように、張出床版は省略し、支間全長にわたり等断面構造とした1/4モデルを構築する。境界条件については図-5に示した通りである。コンクリートはソリッド要素でモデル化した。また、輪荷重直下のコンクリートが厳しい応力状態となることを期待して、鉄筋はモデル化しない。また、輪荷重による発生応力の影響が顕著にできるように、ボイド型枠の剛性やコンクリート自重は考慮しない。

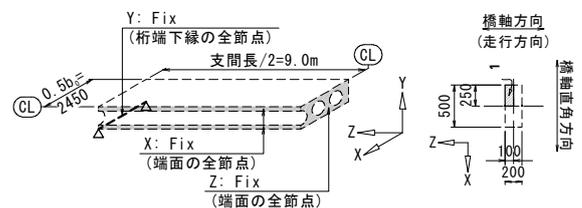


図-5 解析モデルの概要

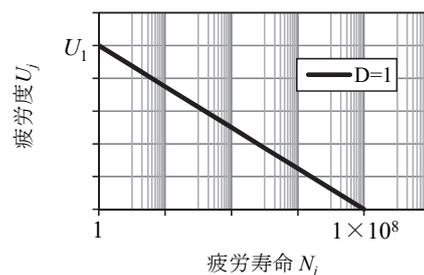


図-6 仮定した破壊構成則(S-N曲線図)

ただしこのモデル化の結果として、断面下側の引張り応力に対する挙動は実際とは大きく異なってくる。これが計算結果に与える影響は今後検討を要する点である。

コンクリートの構成式は、ヤング率 $E=2.50 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $1/6$ の弾性を仮定し、応力変動の繰返しに応じて累積損傷度を評価し、これがある破壊基準に達するとその部分のコンクリートは剛性を失うものとした（以下「被害則」という。）。本研究では、過去に国総研が RC 床版の疲労について数値解析を用いて研究したとき⁶⁾と同様、8乗則に従う被害則を用いた。同要素が受けるひずみエネルギー(以下「疲労度 U 」という。)に対して図-6のような線形被害則を仮定し、損傷の拡がり方を見ることについては数値解析結果を活用できると考えた。図-6の y 切片の破壊基準 $U1$ は静的な破壊強度であり、圧縮破壊強度 ($U1c$) の場合 $1.1520 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$ 、引張破壊強度 ($U1t$) の場合 $7.2962 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$ である。疲労寿命に達した要素は、弾性係数 E およびせん断弾性係数 G を $1/10$ に低減させた。材料のモデルの詳細は国総研資料 844 号を参照していただきたい⁶⁾。

疲労破壊は、 $U1c$ や $U1t$ に遠い繰返し応力を受けると疲労寿命になかなか達せず逆に、 $U1c$ や $U1t$ に近い繰返し応力を受けると疲労寿命に達しやすい。また、静的な破壊強度について、圧縮に関する $U1c$ に比べて引張力に関する $U1t$ は極端に小さいため、引張力が生じる箇所では、寿命に達しやすい。ポイドが浮き上がり、ポイド周辺に十分な幅の圧縮ストラットが形成されなくなると、引張力により疲労寿命に達する領域が増えることになる。

荷重として $\Sigma P=100\text{kN}$ を載荷面積 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ に分布させ、支間中央のポイドコンクリート上部の節点に繰返し与えた。応力の大きな領域が局所的であることから、定点繰返し載荷とした。載荷方法や荷重種別が異なるため一概に比較はできないが、鉄筋コンクリート床版の輪荷重載荷試験では 1×10^5 のオーダー回数まで繰返し載荷することが多く、これを参考に本計算ではそれよりも多い 1×10^9 のオーダー回数まで載荷した。

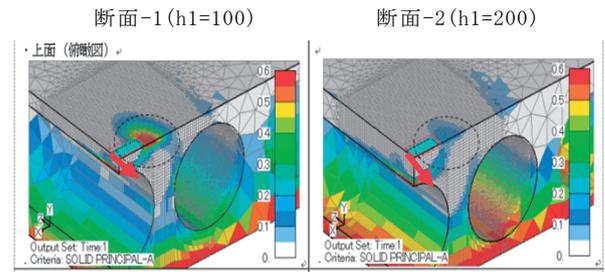


図-7 初期荷重載荷時の最大主応力分布

3.2 応力分布

図-7に初期の載荷をしたときの最大主応力（引張）分布を示す。赤が 0.6 N/mm^2 程度の大きな引張応力発生部分であり、青くなるほど発生する引張応力度が小さい箇所を示し、白い無着色部分は引張応力が発生していない圧縮領域である。いずれのケースもポイド上部コンクリートの応力の拡がり方は局所的である。RC床版とは異なり、ポイド位置に輪荷重が来たときにコンクリートに局所的に負荷が生じることが分かる。また、断面内の応力分布を見ると、断面-1の結果からすればポイド上部のコンクリート厚が 100mm 程度あれば、載荷点下に広く圧縮領域（無着色領域）が残っている。このことから、断面-1においても設計の前提として想定している圧縮ストラットによる耐荷機構がコンクリート内部に形成されていると考えられる。

3.3 累積損傷の拡がり

図-8に、ポイド上部のコンクリートに着目し、剛性低下した要素の増加状況を示す。断面-1および断面-2ともにポイド上面（図中[A]で示す引張領域）が最初に剛性が低下する。その後、かぶり厚の小さいケース（断面-1）では、床版橋上面の輪荷重近傍の要素で剛性低下が生じ、続いて載荷領域直下の圧縮領域（図中[C]）のコンクリート要素と床板橋上面の引張領域（図中[B]）で剛性低下が生じ、[B][C]ともその範囲が拡大していく様子が見られる。

したがって、[B][C]の領域が拡大していく傾向からすれば、かぶり厚が小さくなるほど、繰返し影響を受けやすくなる傾向があることが推定される。一方で、今回計算した範囲では、 $Nm=1 \times 10^9$ のオーダー回数まで繰返し載荷した状態においても圧縮ストラット部で疲労寿命に達した要素はなかった。3.2でまとめた応力分布でもみら

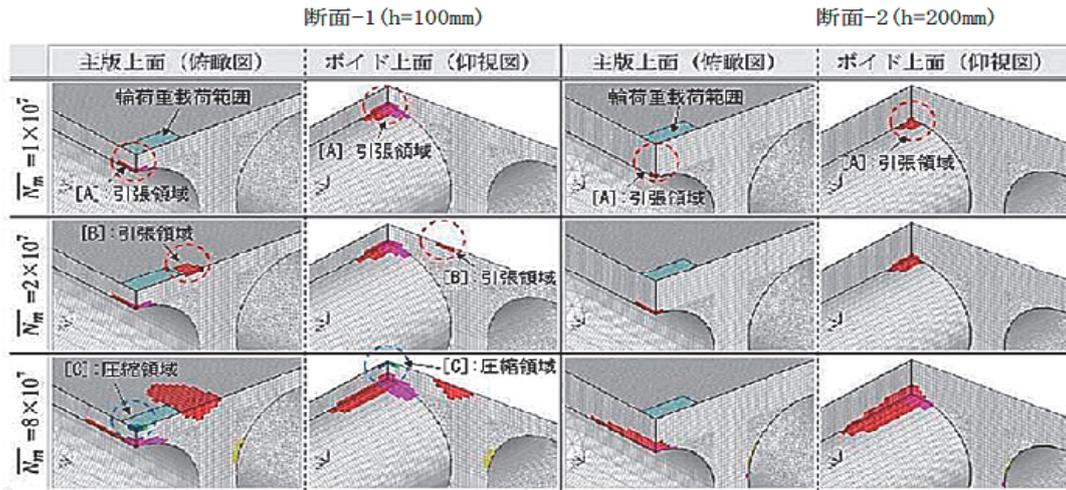


図-8 累積損傷の拡がり

れたとおり、圧縮領域は十分残っており、局所的に圧縮応力が大きくなることから、繰り返し回数が増えても破壊に達する領域の広がりが一定の範囲に留まった計算結果となるのは合理的と考えられる。

本計算で直接寿命を推定できるものではないが、設計で確保すべきとされている厚さである150mmを50mm下回っても、疲労耐久性に直ちに顕著な問題が生じることはなさそうである。たとえば舗装の打ち替えのタイミングで、変状等を確認し、必要に応じてコンクリートに発生する引張り応力を低減する措置を取るなどで、長寿命化のための対策が可能であることを示唆する結果と考えられる。

4. おわりに

既往の研究⁴⁾や本研究の数値解析結果からは、ボイド上部のコンクリート厚が設計基準で求める厚さである150mmから50mm以上浮き上がっていない場合には、一斉に対策を取るということではなく、舗装の打ち替え時に対策を行うことや、コンクリートの状態を非破壊検査で確かめることも併用しながら、計画的に対策を行うことで対応できる可能性が見いだせた。

一方で、踏み抜き事故は、頻度は多くないとしても今後も生じる余地は残る。これまでの対応事例や具体的な方法に関する技術情報は極端に少なく、事故が生じたときに初めて、現場にて試行錯誤的に修繕方法を決定することにならざるを得ない。そこで、現在、国総研では、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会や土研と共同

研究を行い、踏み抜き事故が発生した場合の緊急的な修繕のための手順や仕様の標準案について研究しているところである。これについても機会を変えて土木技術資料等で報告したい。

参考文献

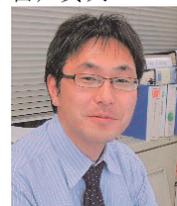
- 1) 社団法人日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧、1998.1
- 2) 西日本高速道路株式会社：ニュースリリース 橋梁路面の一部損傷による車線規制及び緊急補修工事について～山陽自動車道 上り線 佐山橋(さやまばし)～、2015
- 3) 日経コンストラクション、2004.7
- 4) 飯土井 剛、唐木正史、平野至史、窪田光作：上床版厚が不足する中空床版橋の応力性状及び耐荷力照査方法等の検討、土木学会、構造工学論文集、Vol.65A、2019.3
- 5) 松下拓樹、安里俊則、福田雅人、徳光 卓：中空床版橋の円筒型枠直上部の床版厚が床版の耐荷性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.2、pp.343、2017
- 6) コンクリート系床版の疲労耐久性の解析的評価手法の開発、国総研資料第844号、2015.3
- 7) 横道英雄：土木学会監修 コンクリート橋、(株)技報堂、pp.197、1962

平野義徳



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室 交流研究員、現 オリエンタル白石(株) HIRANO Yoshinori

白戸真大



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長、博士(工学) Dr.SHIRATO Masahiro