

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

The stress property analysis and evaluation of load carrying capacity
of hollow slab bridge with missing thickness of upper floor plate

飯土井剛[†], 唐木正史*, 平野至史*, 窪田光作**
Tsuayoshi Iidoi, Masashi Karaki, Michihito Hirano, Kosaku Kubota

[†]株式会社復建技術コンサルタント (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)

*株式会社復建技術コンサルタント (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)

**国土交通省関東地方整備局関東技術事務所 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西 6-12-1)

In recent years, a hollow floor slab bridge with a thin floor plate thickness on the upper part of the void tube has caused a collapse of the road surface. But at present, the evaluation method of the load carrying capacity of hollow slab bridge with missing thickness of upper floor plate has not been established. In this paper, By FEM analysis, we clarified the stress characteristics and load carrying mechanism accompanying changes in the thickness of the upper floor plate and the diameter of the void tube. We proposed a model that behaves as a cantilever beam with support of the upper floor plate. With that model we proposed, it is possible to evaluate the load carrying capacity of the upper floor plate of the hollow floor slab bridge conveniently and safety side.

*Key Words: bridge repair, hollow floor slab bridge, lack of upper cover
thickness of void tube format, load bearing capacity*

キーワード：橋梁補修, 中空床版橋, ボイド管上部床版厚不足, 耐荷力

1. はじめに

平成27年8月に山陽自動車道の佐山橋(上り)(構造形式:RC中空床版橋)において路面陥没が発見(写真-1)される等,近年,中空床版橋内部に配置された鋼製

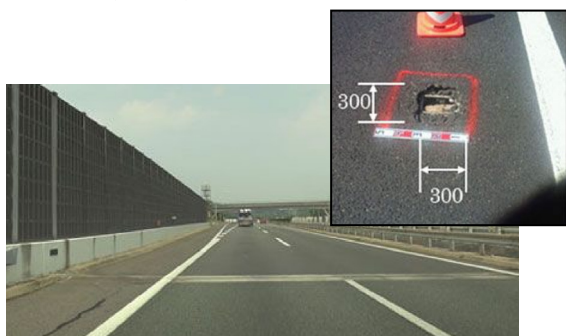


写真-1 佐山橋損傷状況写真¹⁾
(出典: H27.8.14NEXCO 西日本ニュースリリース)

円筒型枠(以下,「ボイド管」という.)の浮き上がりに伴って,ボイド管上部の床版(以下,「上床版」という.)の厚さが道路橋示方書の規定値(15cm)を下回ることに起因する路面陥没事故が度々発生している。(図-1)

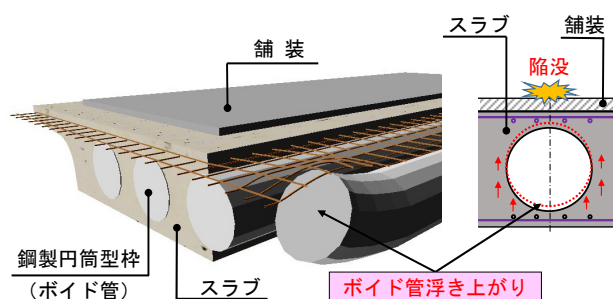


図-1 中空床版橋におけるボイド管の浮き上がりイメージ図

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: iidoi@sendai.fgc.co.jp

これまで、中空床版橋等におけるRC床版の状態を確認するための非破壊調査が実施されており、2016年度に国土交通省関東地方整備局が行った車載式電磁波レーダーによるRC中空床版橋(40橋)の非破壊調査結果では、関東地方整備局が管理するRC中空床版橋のうち、上床版厚が10cm未満の橋梁数が全体の18%、道路橋示方書に規定される上床版厚15cmを下回る橋梁数は全体の55%にのぼった。また、関東地方整備局が独自に行ったPC中空床版橋(77橋)に対する車載式電磁波レーダーを用いたスクリーニング的な調査(1橋あたり代表1車線1度の走行で上床版厚の不足が見られた橋梁のみ、車道全幅のレーダ調査を実施)結果でも、上床版厚が10cm未満の橋梁数が全体の12%、道路橋示方書に規定される上床版厚15cmを下回る橋梁数は全体の26%にのぼった。

このまま放置した場合に、さらなる路面陥没が発生し、道路利用者に大きな影響を与えるおそれがあるが、その一方で、上床版厚が10cm未満の中空床版橋であっても舗装面にひびわれ等の変状がみられないものもあり、車載式電磁波レーダーによる非破壊調査の計測誤差も考慮すると、道路管理者としては、このような状態の橋に対し、通行規制をかけ、舗装や橋面防水層を剥がし橋梁を傷つけてまで上床版の状態を詳細調査すべきなのか、現時点ですぐに補修・補強を行う必要があるのか、判断に悩むところである。また、限られた予算と人員の中で、適切に詳細調査や補修・補強を行うためにも、上床版厚が道路橋示方書に規定される15cmを下回る(以下、「上床版厚が不足する」という。)中空床版橋について、その耐荷力を把握しておく必要性は高い。しかし、現時点では、上床版厚が不足する中空床版橋についての耐荷力の照査方法が明確とはなっていない。

このような背景から、本稿では、上床版厚が不足する中空床版橋について、詳細調査や補修・補強の必要性を判断するための一つの目安を得ることを目的として、FEM解析により上床版厚やボイド管径の変化に伴う中空床版橋の応力性状と耐荷機構の変化等を把握し、その解析結果等をもとに、中空床版橋の上床版の耐荷力を簡便かつ安全側に照査できる方法を検討するものである。

2. 電磁波レーダーによる非破壊調査結果からみた上床版の変状の特徴

2.1 車載式電磁波レーダーによる非破壊調査の概要

中空床版橋の上床版厚の非破壊調査は写真-2に示す車載式レーダー装置を用いて実施した。探査範囲はRC中空床版橋の車道全幅、PC中空床版橋は1橋あたり代表1車線(走行車線)中央の幅1.5m部分を対象に1度走行するスクリーニング的な調査を実施し、上床版厚10cm未満の場合は、RC中空床版橋と同様に車道全幅にて探査を行った。

今回使用したマルチステップ方式3Dレーダーは、舗



写真-2 車載式レーダー装置

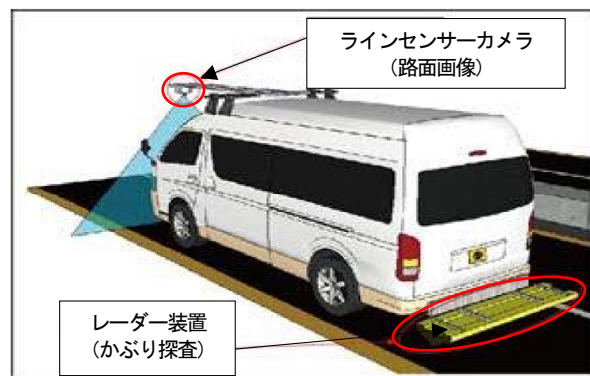


図-2 ライセンサーカメラによる路面画像の例

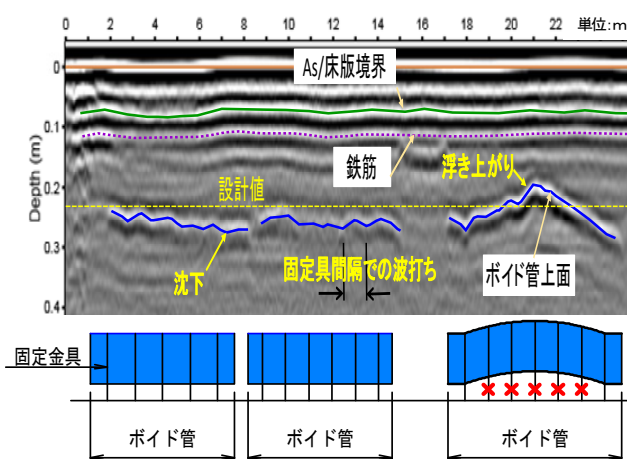


図-3 ボイド管位置での代表的なレーダー縦断画像

装下の上床版上面から深さ20cm程度以内のボイド管上面の位置を検出することが可能である。また、同時に車両前方上部に設置したラインセンサーカメラにて、路面の状況を同時に撮影することで舗装のひびわれを把握することが可能となっている。(図-2)

2.2 車載式電磁波レーダーによる非破壊調査結果

今回の調査結果では、RC中空床版橋の上床版厚10cm未満の発生率は橋梁数で18%、PC中空床版橋で12%であった。なお、RC中空床版橋は2001年以降に関東地方整備局管理の直轄国道では建設されていないが、PC中空床版橋は現在でも建設されている。図-3にボイド管位置での代表的なレーダー縦断画像を示す。

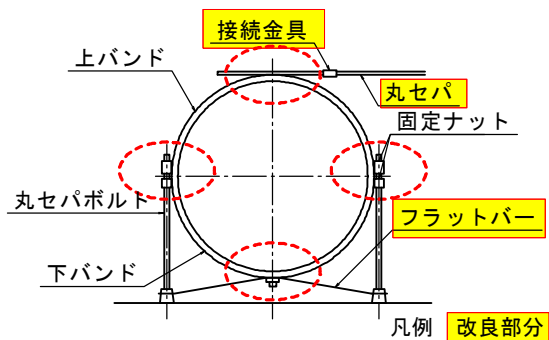


図-4 改良タイプの多点固定式金具

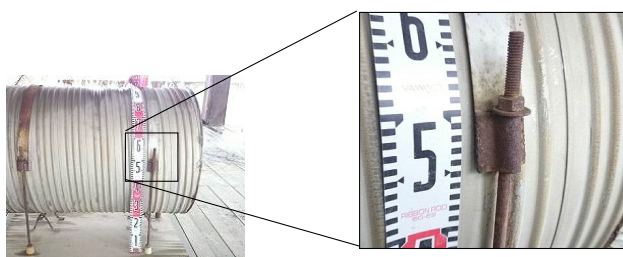


写真-3 旧タイプの固定金具(固定ナットのみ)

今回の調査の結果、上床版厚の設計値 15cm に対し 2~3cm 程度のボイド管の浮き上がりや沈下、浮き上がり防止用固定具（以下、「固定具」という。）の設置間隔でのボイド管上面の波打ちが多く見られた。

ボイド管の浮き上がりは、コンクリート打設時の浮力や固定具の破損が主な原因と考えられる。現在使用されている固定具は図-4 に示す多点固定式であるが、旧タイプは写真-3 に示す固定ナットでの 1 点固定式であり、ナットが外れやすい構造であると考えられる。

図-5 に今回の調査結果から整理した供用開始年度別の上床版厚 10cm 未満の中空床版橋の割合を示すが、固定具は 2002 年頃に改良されており、今回の調査ではその改良後に建設された橋梁で上床版厚 10cm 未満に該当する橋梁は見られていない。

2.3 主な変状の例

今回の調査結果では、浮き上りの特徴として局所的な浮き上がり（例：A 橋）と全体的な浮き上がり（例：B 橋）の 2 種類が見られており、その状況を図-6 および図-7 に示す。A 橋で確認された局所的な浮き上がりは、ボイド管長 6~7m の端部または中間部で確認された。B 橋ではボイド管長全体に浮き上がりが確認された。なお、浮き上がりを確認した箇所の路面でひびわれが見られた橋梁は少なく（RC 中空床版橋：0%、PC 中空床版橋：30%）、例えば上床版厚が 3cm の箇所でも路面のひびわれが見られない橋梁があった。

2.4 ハンディー式電磁波レーダーによる詳細調査結果

車載式電磁波レーダーの探査で確認された全ての上床

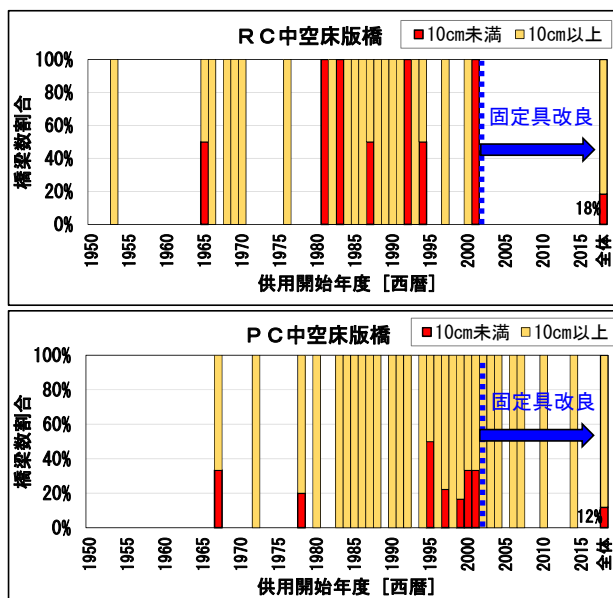


図-5 上床版厚 10cm 未満の中空床版橋の割合

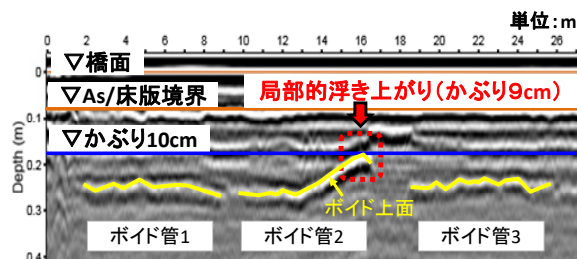


図-6 主な変状の例 (A 橋：局所的な浮き上がり)

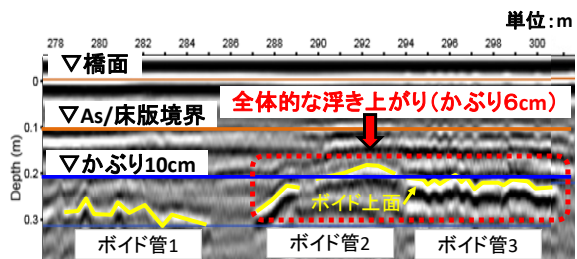


図-7 主な変状の例 (B 橋：全体的な浮き上がり)

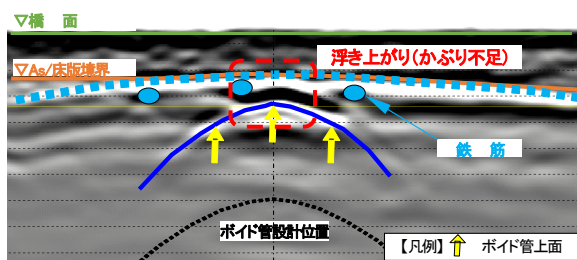


図-8 ハンディー式電磁波レーダーによる調査結果

版厚 10cm 未満の RC 中空床版橋において、舗装の状況を直接目視と打音検査で確認しつつ精度の高いハンディー式電磁波レーダーで上床版厚を計測する詳細調査を実施した。この結果、一部の橋梁では舗装のひびわれ、打音検査での異常音が確認された。

また、ボイド管の浮き上がりにより鉄筋が押し上げられ、床版上面より露出している可能性がある箇所があることがわかった。(図-8)

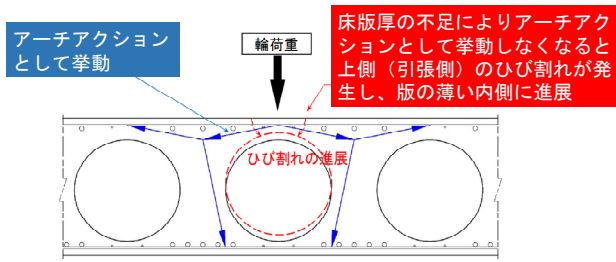


図-9 床版の耐荷機構と想定されるひびわれの発生

なお、レーダーの計測精度は、今回の車載式とハンディ一式の上床版厚計測データを比較した結果からは、最大で2cmの差であった。

2.5 電磁波レーダーによる非破壊調査結果からみた上床版の変状の特徴

今回の電磁波レーダーによる非破壊調査結果から得られた中空床版橋上床版の変状の特徴として、主に以下のことが挙げられる。

- (1) 関東地方整備局が管理するRC中空床版橋のうち、上床版厚が10cm未満の橋梁数が全体の18%、道路橋示方書に規定される上床版厚15cmを下回る橋梁数は全体の55%にのぼった。
- (2) ボイド管の浮き上がりにより、上床版厚が道路橋示方書に規定される厚さに満たない中空床版橋の多くは、固定具の改良（2002年頃）以前に施工されていた橋梁であった。
- (3) 浮き上がりの特徴は局所的なものと全体的なものに大別された。
- (4) 上床版厚が不足している箇所（例：最も薄い事例では上床版厚が3cm）でも、路面にひびわれが発生していない橋梁が多かった。

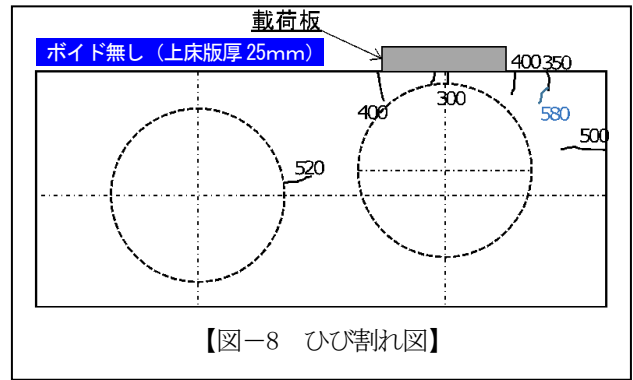
3. ボイド管径と上床版厚の変化に伴う応力性状と耐荷機構の変化等の検討

前章で述べた変状の発生状況に鑑み、本章では、上床版厚が不足する中空床版橋に対して、上床版厚やボイド管径の変化に伴う中空床版橋の応力性状と耐荷機構の変化等について、2次元FEM解析を用いて検討を行った。なお、解析結果は、発生応力の状態を解りやすくするため、便宜的に許容応力度と対比する形で表現した。

3.1 主な既往の知見

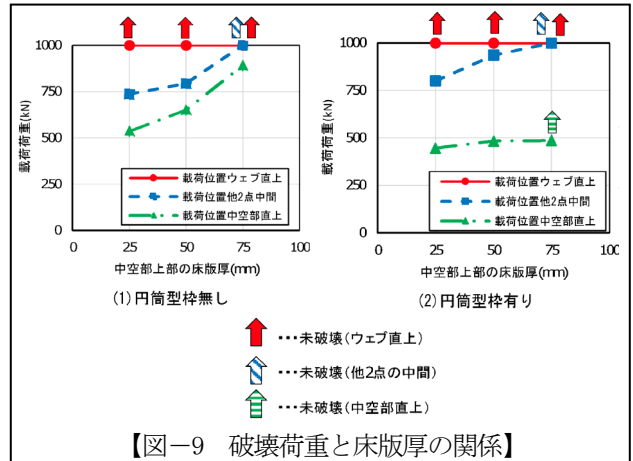
参考文献 4)5)6)によると、中空床版橋の上床版は、他の形式の床版の荷重伝達機構とは異なり、ボイド管の真上に作用する荷重に対してはアーチ作用によって力が左右に伝達されるアーチアクションとして挙動するとされている(図-9)。

参考文献 7)によると、規定どおりの上床版厚を有する



【図-8 ひび割れ図】

図-10 参考文献2)の図-8に示された実験結果(抜粋)



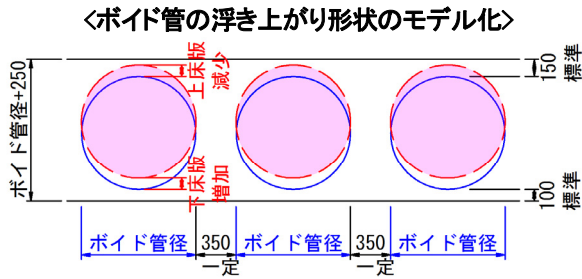
【図-9 破壊荷重と床版厚の関係】

図-11 参考文献2)の図-9に示された実験結果(抜粋)

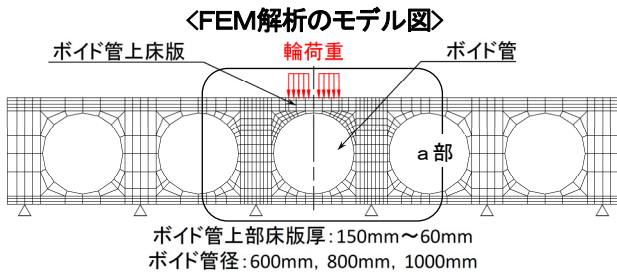
中空床版橋では、ボイド管周囲と上床版に作用する引張応力は、ボイド管頂部(上床版下面)の測点が最も大きく、次いで上床版上面に設置した載荷板の両横の測点が大きかった。但し、参考文献7)では上床版厚の不足やボイド管径が変化する場合については確認されていない。

参考文献2)では、供試体(RC中空床版橋の1/2縮小モデル(供試体寸法:桁高475mm×幅1150mm×奥行き500mm,ボイド管(直径350mm)を2本設置,上床版厚75mm,50mm,25mm,ボイド管有り・無し,を組み合わせた計18ケース(いずれも配筋有り))を用いて、載荷位置を(a)供試体中央(ウェブ直上),(b)ボイド管直上,(c)その中間,の3点とした静的載荷試験を行っている。この静的載荷試験の結果では、図-10に示すとおり、上床版のひびわれは、ボイド管頂部(上床版下面)、次に載荷板の両横(上床版上面)の順に発生する傾向であり、参考文献7)のひびわれ発生順序と類似する結果であったとされている。また、図-11に示すとおり、ボイド管無しの場合については、いずれの載荷位置においても、ボイド管上の上床版厚が薄いほど供試体の破壊荷重が低い結果となっており、特にボイド管直上に載荷した場合はこの傾向が顕著であった、とされている。

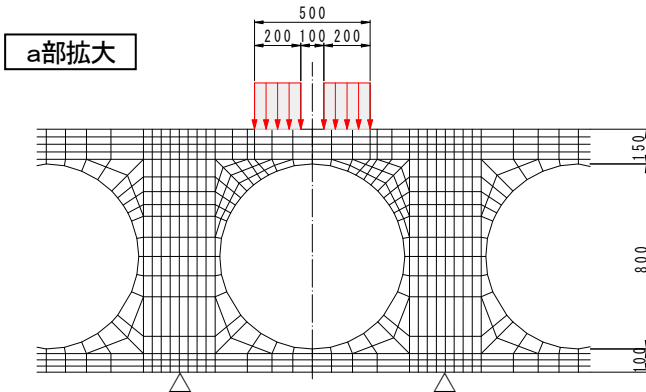
参考文献3)では、安全側の設計法として、ボイド管中心上の上床版厚の最も薄い部位が乖離した、片持ち梁による手法が提案されている。



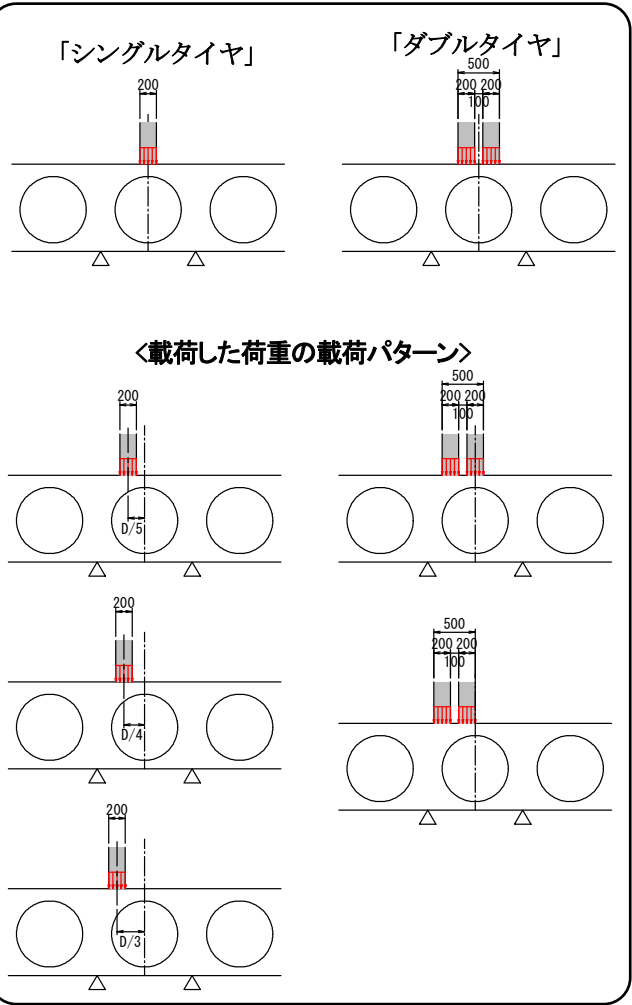
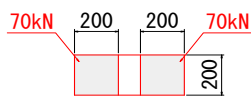
- ・全てのボイド管が浮き上がりにより上側に移動していると仮定
- ・上床版厚減少分は下床版厚が増加するものとし、上下床版厚の合計を一定(250mm)としてモデルを作成 [桁高=250mm+ボイド管径]
- ・ウェブ厚を一定とし、ボイド管径+350mmの間隔でボイド管を配置



＜輪荷重載荷モデル＞



＜輪荷重載荷面積形状＞



＜検討条件＞

- ・コンクリート強度：24 N/mm²
弾性係数：E_c=2.5×10⁴ N/mm²
ポアソン比：γ_c=0.2
- ・許容曲げ圧縮応力度
1/3σ_{ck} = 8.0 N/mm²
- ・許容引張応力度
-0.23σ_{ck}^{2/3} = -1.9 N/mm²
- ・材料モデル：線形

図-12 FEM解析モデルと検討条件

3.2 2次元 FEM 解析を用いたボイド管径と上床版厚の変化に伴う応力性状と耐荷機構の変化等の検討

(1) FEM解析条件

上床版の断面を図-12のようにモデル化した2次元FEM解析により検討した。FEM解析では、コンクリート強度は24N/mm²(弾性係数 E_c=2.5×10⁴N/mm²、ポアソン比 γ_c=0.2)とし、一般的な中空床版橋の支承付近で見られるように全ウェブの下端に支持点を設置した線形材料としてモデル化した。なお、安全側の解析結果となるように、またコンクリート部材の応力状態を把握する

ことを目的として、今回の解析では鉄筋や鋼製ボイド管(型枠)の剛性や中空床版橋の自重は考慮していない。

上床版厚は、150mmから60mmまで変化させ、ボイド管径はφ600, 800, 1000mmの3種類で検討を行った。

作用荷重は衝撃を考慮したT荷重(100kN×1.4(衝撃)=140kN)とし、ダブルタイヤ、及びシングルタイヤの、各々ボイド管中心載荷と偏心載荷のパターンを想定した。なお、解析モデルの奥行き(橋軸)方向には分布幅は考慮していない。

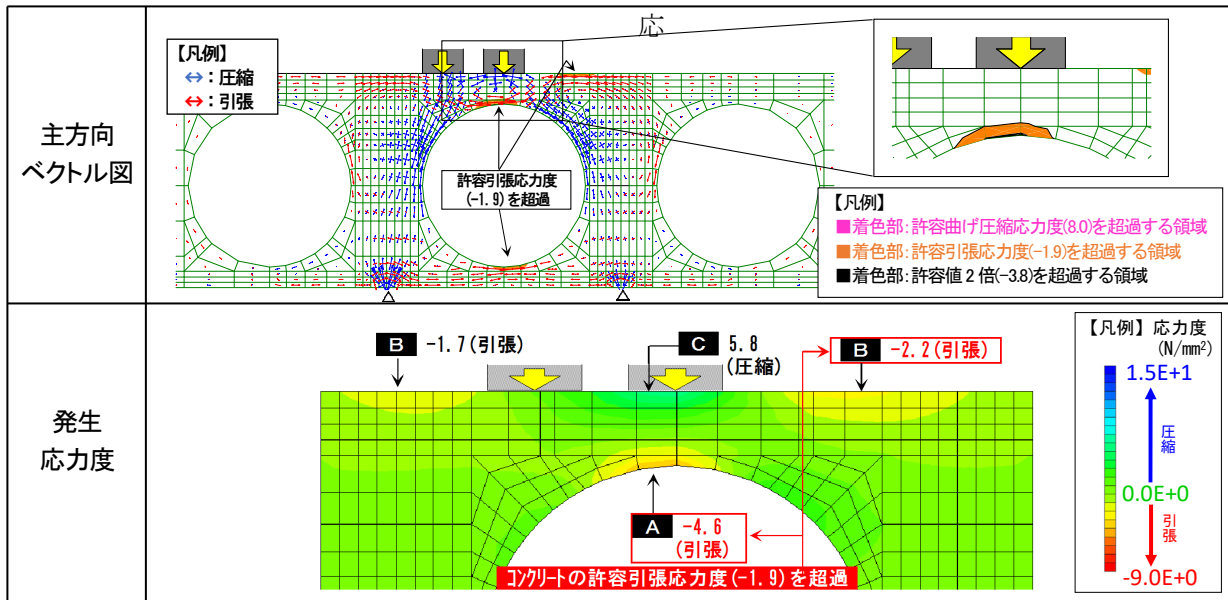


図-13 上床版厚 150mm (ボイド管径φ800) の解析結果

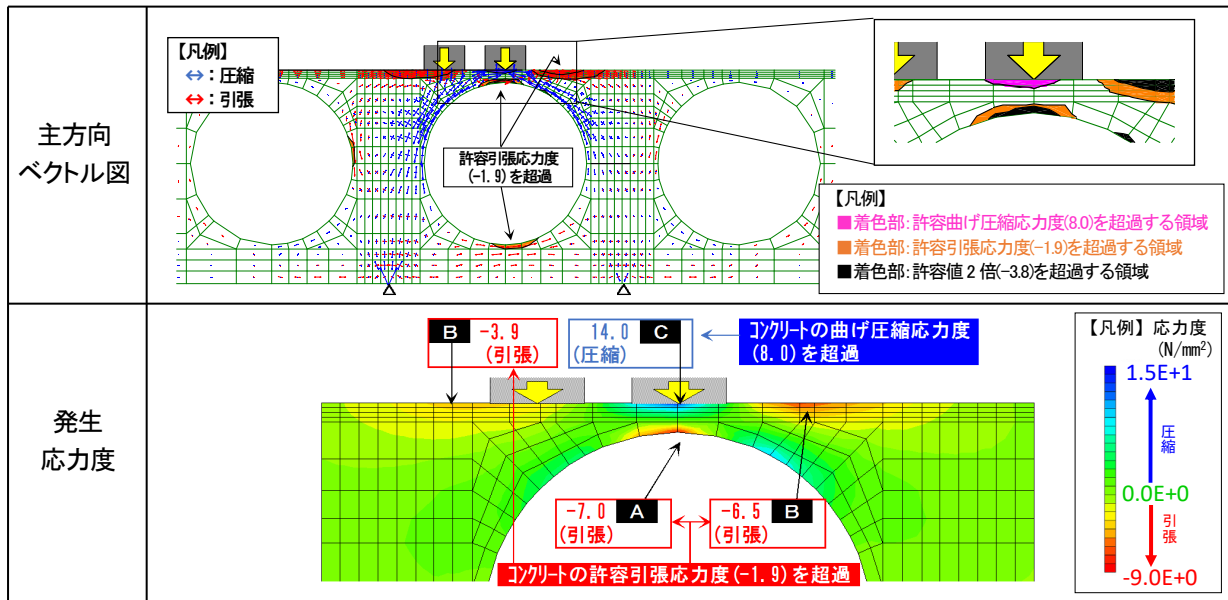


図-14 上床版厚 60mm (ボイド管径φ800) の解析結果

(2) 解析結果-1: 上床版厚の減少による応力性状と耐荷機構の変化

図-13, 14 に応力が最も厳しかったダブルタイヤ右輪偏心載荷時の上床版厚 150mm, 60mm(共に, ボイド管径φ800mm)の結果を示す。

ボイド管中心上の上床版下面側(図-13, 14 中のAの部位)と, ボイド管中心から離れた上床版上面側(図-13, 14 中のBの部位)においてコンクリートの許容引張応力度(-1.9N/mm²)を上回る引張応力度が発生し, 上床版厚が厚いケースに比べ, 上床版厚が薄いケースで応力度が増加する。

ボイド管中心上の上床版上面側(図-13, 14 中のCの部位)は圧縮状態となっており, 上床版厚が減少することで圧縮応力度も増加し, 上床版厚 60mm のケースでは, コンクリートの許容曲げ圧縮応力度(8.0N/mm²)を上回る

力が発生する。

以上のようなことから, 上床版厚が薄くなった状態(特に, 浮き上がったボイド管が上床版の鉄筋に干渉し, 鉄筋の下面にかぶりが無い状態では, コンクリートと鉄筋との付着が少なく鉄筋の引張抵抗が期待しにくい)ため, 無筋コンクリートに近い状態(表-1)では, ボイド管中心上の上床版部位(図-13, 14 中のA・Cの部位)では, 下面側の引張応力度と上面側の圧縮応力度が許容値を超過し, この部位でひび割れが貫通し上床版が離間することで別々の挙動になる可能性が高いと考えられる。

この部位が離間した場合は, アーチアクションとしての挙動が期待できず, 参考文献3)に示されるように, ボイド管中心から離れた上床版上側(図-13, 14 中のB部位)が支点となる片持梁として挙動するものと思われる。

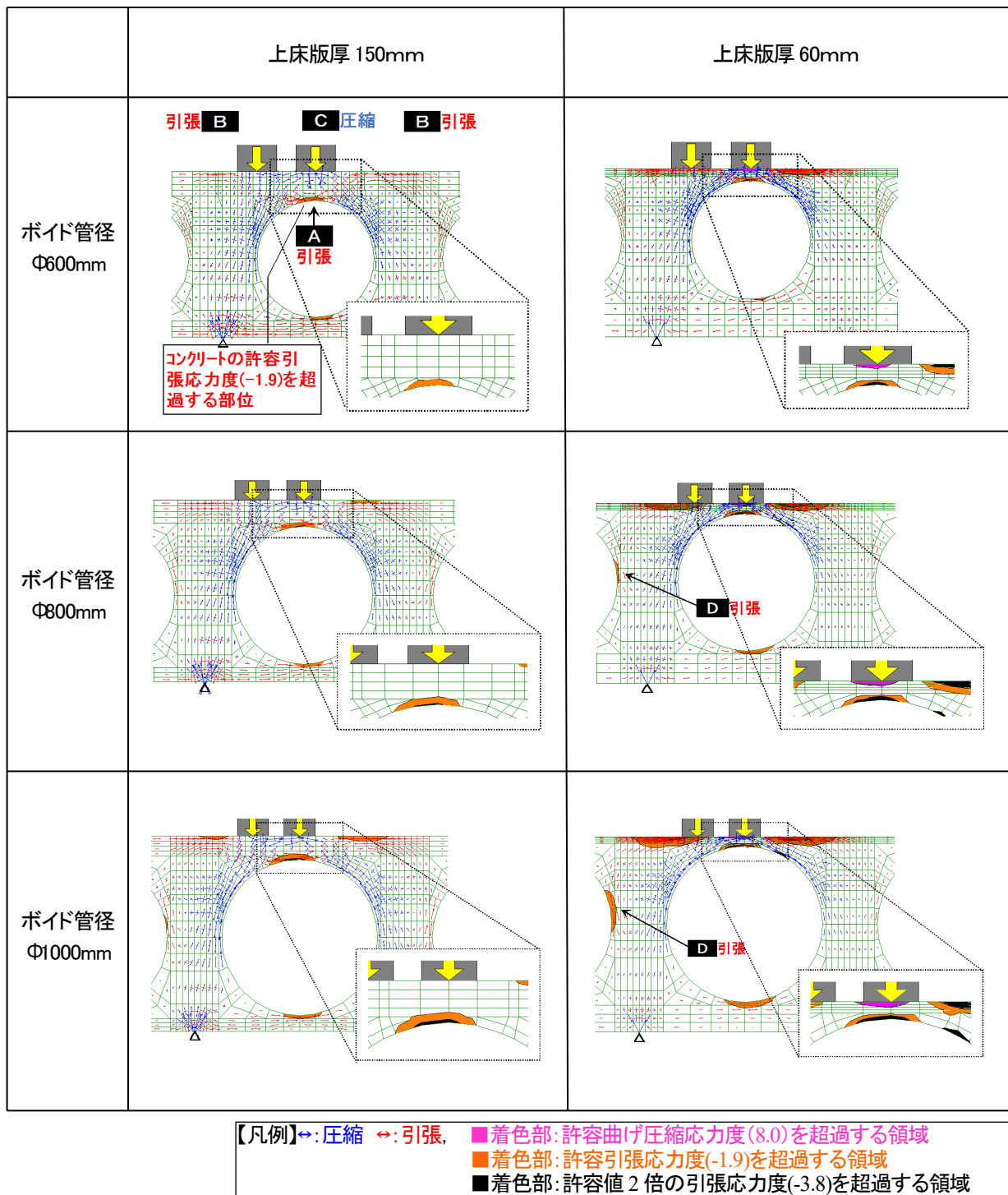


図-15 ボイド管径と上床版厚の違いによる主応力方向ベクトル図

(3) 解析結果-2 : ボイド管径と上床版厚の変化による
 応力状態と耐荷機構の変化

図-15 に応力が最も厳しかったダブルタイヤ右輪偏心載荷時のボイド管径φ600, 800, 1000mm の, 上床版厚150mm と60mm の主応力方向ベクトル図を示す。

図-15 からは, いずれのケースでも, ボイド管まわりにアーチアクションにより圧縮領域が形成されているものの, ボイド管の上側と下側には引張領域(一部は許容値を超える領域)が見られる。

同じ上床版厚でも, ボイド管径が大きくなるほど引張

域が広がり, コンクリートの許容引張応力度(-1.9N/mm²)を上回る引張領域も多くなっている。

上床版厚が150mm から60mm に減少することで, さらに前述の傾向が顕著になるとともに, ボイド管径800mm, 1000mm では, 新たに隣接するボイド管側面(図-15 中のDの部位)に許容引張応力度(-1.9N/mm²)を上回る引張領域が発生している。

なお, 上記の解析結果には全ウェブ下端に支点を設けた影響も含まれる可能性はあるが, 今回の支点条件は一般的な中空床版橋の支承付近で見られる状況である。

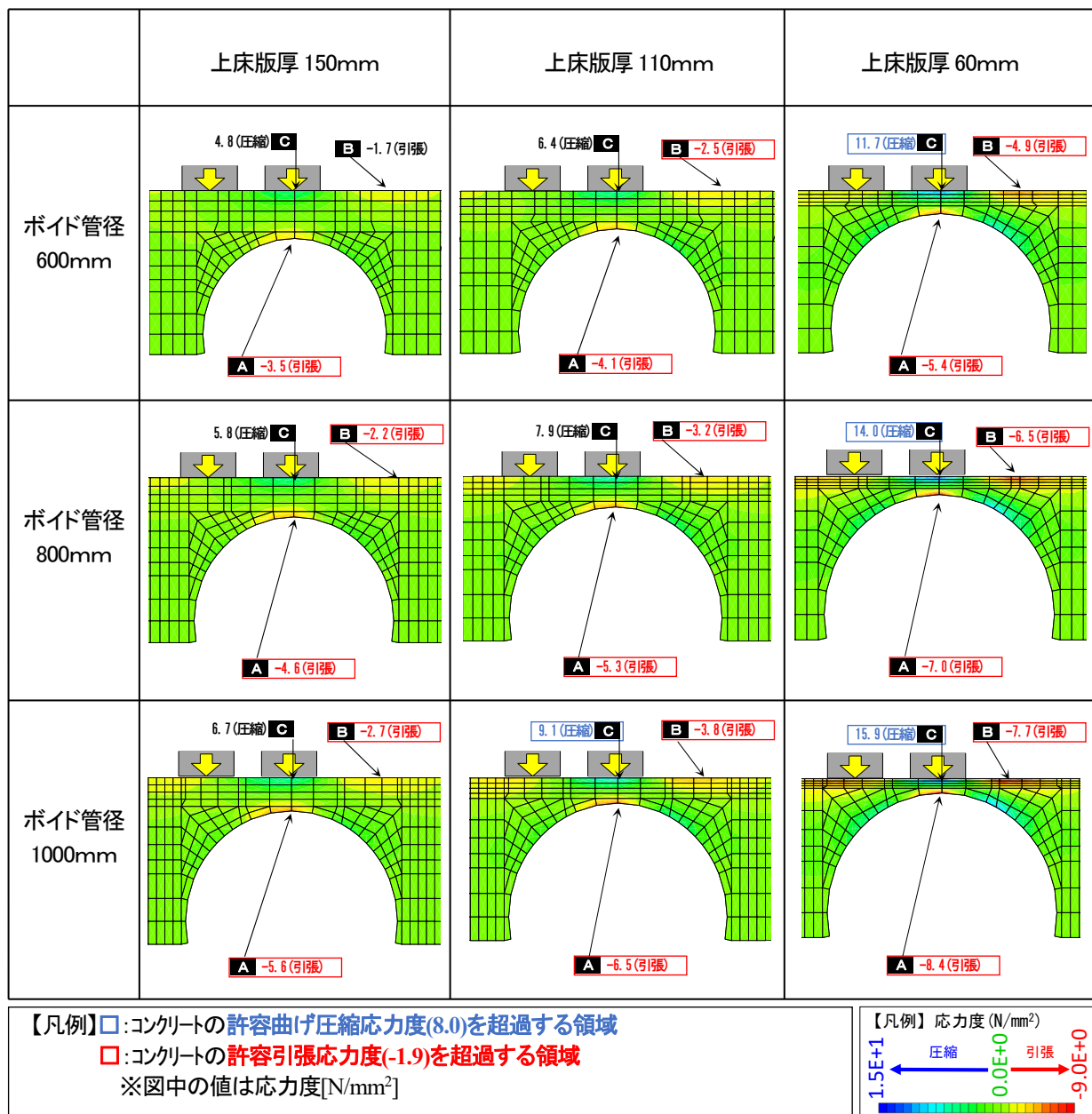


図-16 ボイド管径と上床版厚の違いによる発生応力度

また、上床版上面側(図-15, 16 中のCの部位)には、いずれのボイド径でもコンクリートの許容曲げ圧縮応力度(8.0N/mm²)を上回る圧縮領域が発生している。

上床版厚が60mmの場合では、ボイド管中心上の上床版の上面側・下面側(図-15, 16 中のA・Cの部位)で、発生応力度が許容値を超過し、この部位で上床版が離間する可能性が高いと考えられる。このことは、ボイド径が大きくなるほど、その傾向が顕著になっている。

図-16には、応力が最も厳しかったダブルタイヤ右輪偏心載荷時の各ボイド管径と上床版厚の違い(150mm, 110mm, 60mm)による発生応力度の結果を示す。

ボイド管中心上の上床版下面側(図-16 中のAの部位)とボイド管中心から離れた上床版上面側(図-16 中のBの部位)では、上床版厚が150mmから60mmに減少することで、上床版下面側(図-16 中のAの部位)の引張応

度は約1.5倍、上床版上面側(図-16 中のBの部位)では約2.9倍に増加し、ほぼ全てのケースでコンクリートの許容引張応力度(-1.9N/mm²)を上回り、ボイド管の径が大きくなるほど応力度も大きくなる。但し、ボイド管径の違いによる応力の増加割合に顕著な差はみられなかった。

ボイド管中心上の上床版上面側(図-16 中のCの部位)では、いずれのケースにおいても圧縮状態となっており、上床版厚が150mmから60mmに減少することで、圧縮応力度が約2.4倍に増加し、上床版厚60mmのケースでは、いずれのボイド管径でもコンクリートの許容曲げ圧縮応力度(8.0N/mm²)を上回り、ボイド管の径が大きくなるほど大きくなる。但し、ボイド管径の違いによる応力の増加割合に顕著な差はみられなかった。

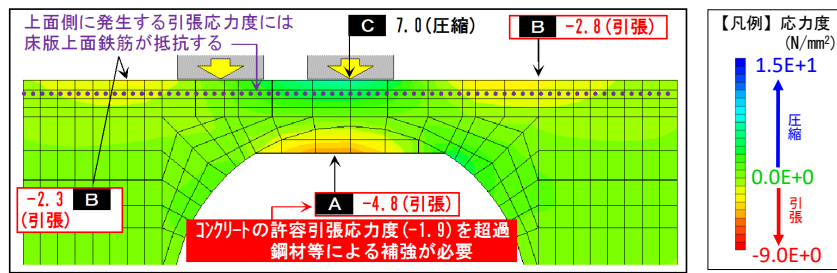


図-17 補修断面解析結果 (ボイド管径φ800mm, 上床版厚100mmを160mmに補修)

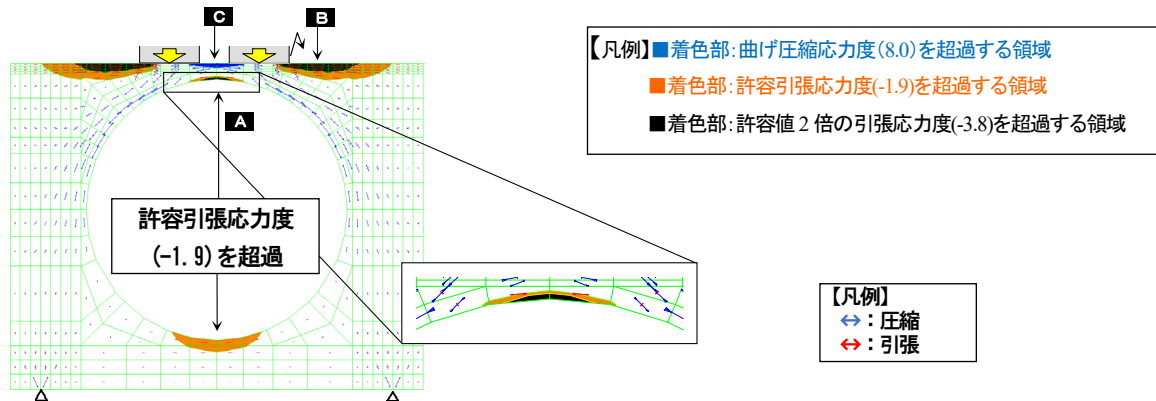


図-18 FEM解析結果(ベクトル図)

(4) 解析結果-3: 補修後を想定した応力状態

ここでは、局部的にボイド管上部の上床版厚が不足する箇所を補修するために、ボイド管上部を一部カットして上床版を水平に増厚した断面形状をモデル化し、その応力状態がどのようになるかFEM解析を行った結果を示す。

補修材料は、既設コンクリートと同じ物性値とし、ボイド管上部を水平に補修した状態で、補強鉄筋は配置しないものとしてモデル化した。

なお、既設と補修材料の境界における打ち継ぎ界面の接合条件は設定していない。

図-17は、ボイド管中心上の最小床版厚が100mmあったものをボイド管上部をカットして道路橋示方書のRC床版の最小厚160mmに増厚した補修後の状態である。

このケースでは、Aの部位に許容引張応力度を越える応力が作用していることから、補修後のボイド管上の上床版に、鋼材等による補強が必要になるとと思われる(Cの部分の圧縮応力度は許容値以内に収まっている)。

3.3 ボイド管径と上床版厚の変化に伴う応力性状と耐荷機構の変化等に関する考察

主な既往の知見及び本章での2次元FEM解析結果から、以下のようなことが考えられた。

- (1) ボイド管中心付近の上床版下面側とボイド管中心から離れた上床版上面側には許容引張応力度を越える高い引張応力度が発生し、ボイド管中心付近の上床版上面側には許容圧縮応力度を越える高い圧縮応力度が発生した。これらの応力度は、上床版厚が厚いケースに比べ、上

床版厚が薄いケースで応力度が増加した。また、同じ上床版厚でもボイド管径が大きくなるほど応力度は大きくなりその領域は広がっていた。

このことは、(a) 参考文献7)で示された中空床版橋のボイド管周囲と上床版に作用する引張応力が、ボイド管頂部(上床版下面)の測点で最も大きく、次いで上床版上面に設置した載荷板の両横の測点で大きかったということ、(b) 参考文献2)で示された静的載荷試験結果での上床版のひびわれ発生位置とその状況(図-10)が、参考文献7)のひびわれ発生順序と類似し、ひびわれがボイド管頂部(上床版下面)、次に載荷板の両横(上床版上面)の順に発生する傾向であり、(c) 図-11に示すとおりボイド管無し供試体については、ボイド管上の上床版厚が薄いほど供試体の破壊荷重が低い結果となったこと、と同様の傾向であると思われる。

(2) ボイド管上の上床版厚が薄くなると、ボイド管中心上の上床版部位(図-15, 16中のA・Cの部位)では、下面側の引張応力度と上面側の圧縮応力度が許容値を超過し、この部位でひび割れが貫通し床版が離間することで別々の挙動になる可能性が高いと考えられ、この傾向は、上床版厚が薄くなるほど、ボイド管径が大きくなるほど、顕著であった。

このことは、参考文献2)の静的載荷試験結果(図-10)でボイド管頂部の上床版の上・下面にひびわれが発生していること、参考文献3)でボイド管中心から離れた上床版上面側(図-18中のBの部位)が支点となる片持梁として挙動することが示されていること、と同様の傾向であると思われる。

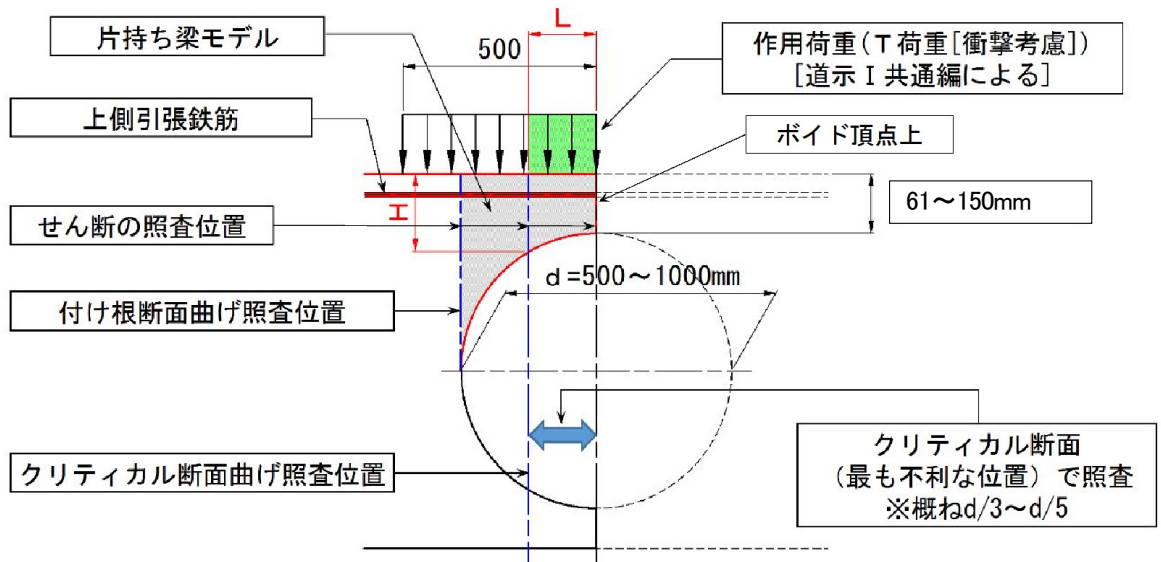


図-19 耐荷力照査モデル

表-1 上床版耐荷力の試算条件

ボイド径	ボイド径500mm~1000mmを想定(100mmピッチ)		
床版厚	現行道示に規定される150mmを最大とし、純かぶり35mm+鉄筋径D13が配置可能な上床版厚として61mmを最小		
コンクリート強度	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>【例】 鉄筋かぶり 35mm 橋軸直角方向鉄筋 D1:D13 橋軸方向鉄筋 D2:D13 限界床版厚=35+13+13=61mm</p> </div>	
鉄筋	鉄筋径		D13(一般的な配筋間隔として300mm)
	材質		SD295
	純かぶり		最小かぶりとして、35mm
許容応力度	$\sigma_{sa}=140\text{N/mm}^2$ (道示Ⅲ3.3鉄筋の許容応力度床版として)		
作用荷重	道路橋示方書 I 共通編2.2.2活荷重(平成24年3月日本道路協会)を参考とし、T荷重の一軸あたりの作用力として100kNに衝撃係数は $i=0.4$ を想定する。 $P=100\text{kN} \times (1+0.4)=140\text{kN}$		

4. 上床版厚が不足する中空床版橋の耐荷力照査方法の検討

本章では、主な既往の知見及び前章での検討結果を踏まえ、上床版厚が不足する中空床版橋に対し、詳細調査や補修・補強の必要性を判断するための一つの目安を得ることを目的として、上床版の耐荷力を簡便かつ安全側に照査できる方法について検討を行った。なお、検討に当たっては、国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESER)から技術的助言を得て行った。

4.1 ボイド管上部の上床版の耐荷機構

主な既往の知見及び前章でのFEM解析の結果から、上床版厚が不足する状態(特に、浮き上がったボイド管が床版鉄筋に干渉し無筋コンクリートのような状態)で

は、アーチアクションを期待することは危険側になる可能性があり、輪荷重による載荷幅や断面の耐荷機構からは、アーチ機構の形成や十分な厚さのある版の場合の押し抜きせん断破壊を前提とすることは実態と乖離する可能性があると思われた。

さらに、ボイド管中心上の上床版部位(図-15、16中のA・Cの部位)で上床版が離開する可能性が高いことから、参考文献3)に示されるように、ボイド管中心から離れた上床版上面側(図-15、16中のBの部位)が支点となる片持梁として挙動するものと思われた。

そこで、上床版の耐荷力を簡便かつ安全側に照査する方法として、参考文献3)で示されたように、ボイド管中心上の上床版部位(図-15、16中のA・Cの部位)が離開し、ボイド管中心から離れた上床版の上面側に支点がある片持梁のような挙動を想定して耐荷力を照査するものとした。(図-19)

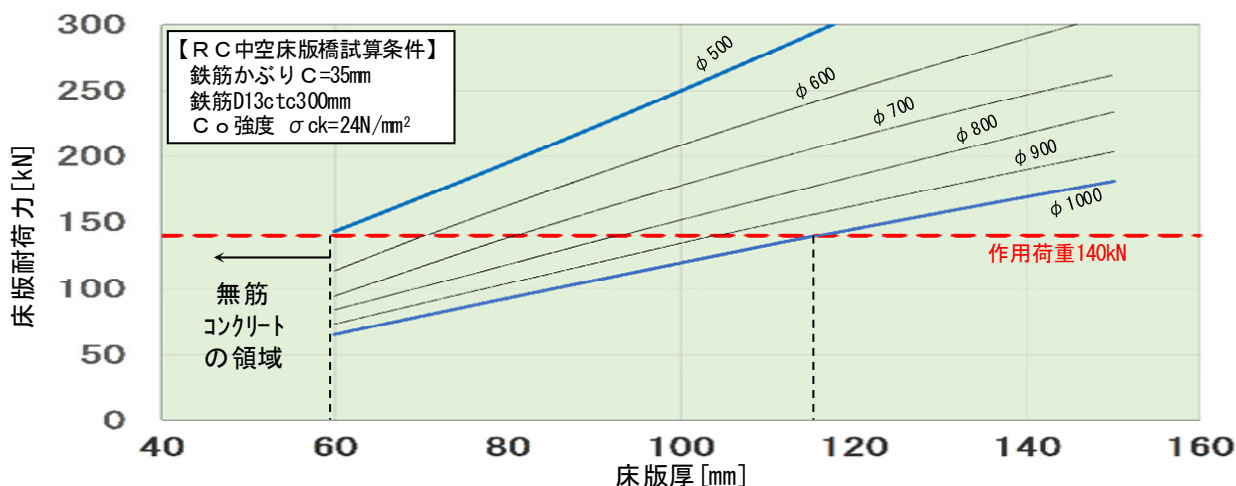


図-20 曲げモーメントに対する試算例(鉄筋降伏応力度)

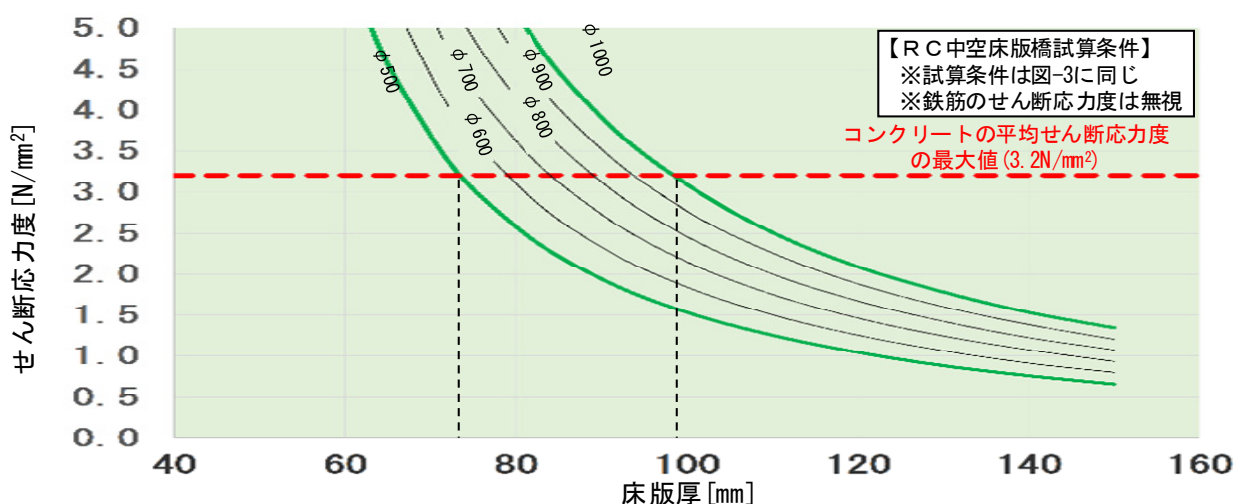


図-21 せん断力に対する試算例(平均せん断応力度の最大値(限界値))
※ボイド管中心上の上床版最小厚部における試算結果

4.2 上床版耐力の照査方法

図-19に示すモデルを設定し、片持梁に作用する引張曲げモーメント(上面側)とせん断力について上床版の耐力を照査することとした。なお、曲げモーメントに対しては、上面側引張鉄筋の弾性限界(降伏応力度)から耐力を照査するものとし、照査位置は、トライアル計算により応力状態が最も厳しいクリティカル位置を求め、その際に、梁の高さ H /張出長さ $L > 1.0$ となる場合はコーベルとして照査した。

せん断力に対しては、コンクリートがせん断破壊する限界点(平均せん断応力度の最大値)で耐力を照査するものとし、照査位置は片持梁付根、曲げモーメントに対するクリティカル位置、ボイド管中心上の上床版最小厚部とした。ただし、連続中空床版橋の負曲げ領域内でボイド管の浮き上がりが確認された場合は、主桁の構造耐力も減少している可能性があるため、別途、主桁としての耐力の検討も必要と考えられる。

4.3 上床版耐力の試算結果

上床版耐力の試算はRC中空床版橋のボイド管径φ500~1000mmについて行い、試算条件は安全側に見積り、表-1 枠内に記載のとおりとした。なお、ボイド管が浮き上がって上面側の引張鉄筋と干渉し、ボイド管側の鉄筋かぶりがない(無筋コンクリートに近い)状態(この場合の上床版厚は61mm未満)については、もともと耐力が期待できないものとした。

今回の試算において耐力が確保できる上床版厚は、片持梁の引張曲げモーメント(上面側)に対する鉄筋降伏応力度による照査結果(図-20)では、ボイド管径1000mm(500mm)で115mm(61mm)以上、せん断力に対するコンクリートの平均せん断応力度の最大値(限界値)による照査結果(図-21)では、ボイド管径1000mm(500mm)で100mm(75mm)以上が必要となった。

5. まとめ

本稿では、中空床版橋に対し電磁波レーダーによる非破壊調査により中空床版橋の上床版の変状の特徴を把握した。さらに、上床版厚が不足する中空床版橋について、詳細調査や補修・補強の必要性を判断するための一つの目安を得ることを目的として、FEM解析により上床版厚やボイド管径の変化に伴う中空床版橋の応力性状と耐荷機構の変化等を把握し、その解析結果等をもとに、中空床版橋の上床版の耐荷力を簡便かつ安全側に照査できる方法を立案した。

以上のことから得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 今回の電磁波レーダーによる非破壊調査の結果からは、

- a) 関東地方整備局が管理するRC中空床版橋のうち、上床版厚が不足する橋梁の割合は、上床版厚10cm未満の橋梁数が全体の18%、道路橋示方書に規定される上床版厚15cmを下回る橋梁数は全体の55%にのぼった。
- b) ボイド管の浮き上がりにより、上床版厚が不足する中空床版橋の多くは、固定具の改良(2002年頃)以前に施工されていた橋梁であった。
- c) 上床版厚が不足している箇所(例:最も薄い事例では上床版厚が3cm)でも、路面にひびわれが発生していない橋梁が多かった。

(2) ボイド管中心付近の上床版の下面側とボイド管中心から離れた上床版の上面側に引張応力度が発生し、ボイド管中心付近の上床版上面側では圧縮応力度が発生する。

これらの応力度は、上床版厚の減少に伴い増加する。また、同じ上床版厚でもボイド管径が大きくなるほど応力度は大きくなりその領域は広がっていた。

(3) ボイド管上の上床版厚が薄くなると、ボイド管中心上の上床版部位(図-15, 16中のA・Cの部位)では、下面側の引張応力度と上面側の圧縮応力度が許容値を超過し、この部位でひび割れが貫通し床版が離間することで別々の挙動になる可能性が高いと考えられた。この傾向は、上床版厚が薄くなるほど、ボイド管径が大きくなるほど、顕著であった。

(4) ボイド管まわりにアーチアクションにより圧縮領域が形成されているものの、従来基準で適正な状態(上床版厚15cm)でも、ボイド管の上側と下側には引張領域(一部は許容値を超える領域)が見られた。

このことから、そもそも、その定量的評価に課題(耐荷力・耐久性の両面で具体的な許容限度やその根拠を明らかにする必要性)があると思われた。

(5) 中空床版橋の上床版の耐荷力を簡便かつ安全側に照査できる方法として、ボイド管中心上の上床版が離間しボイド管中心から離れた上床版の上面側が支点となる片持梁として挙動するモデルを立案し、その試算結果を示した。

なお、詳細調査や補修・補強の必要性については、本

稿で示した照査方法・試算結果も参考に、レーダー探査結果の精度や、各橋梁の構造・交通状況・損傷状況等を勘案し、道路管理者が個別の橋毎に総合的に検討の上で判断する必要がある。すでに上床版にひびわれが生じている場合には、その部位や性状によっては影響が生じている恐れがあるため、すみやかに上床版のひびわれ等の状態をよく調査して検討に反映することが必要である。

また、本稿で立案した耐荷力照査方法はあくまで詳細調査や補修・補強の必要性を判断するための一つの目安を得ることを目的とした概略的な照査方法であることに十分留意して頂く必要があり、厳密な検討を行うのであれば、調査・検討に時間・費用を要するものの、実橋での実証実験、供試体による静的試験や繰返し载荷試験等による実証実験や3次元FEM解析による検証を重ねて幅員や支間などの異なる橋梁を包括できる耐荷力式を設定し評価する必要がある。

謝辞

本稿は、国土交通省関東地方整備局関東技術事務所発注「H28中空床版橋調査業務」で得た業務委託成果及びその補完検討結果の一部である。なお、耐荷力照査方法の検討にあたり、技術的助言を頂いた国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESER)の皆様に、この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) L.A.CLARK: 新しい英国基準BS5400によるコンクリート橋の設計, (株)国民科学社, pp.297, 1984.
- 4) Emil Mörsch: Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton, pp.23, 1958.
- 5) 横道英雄: 土木学会監修 コンクリート橋, (株)技報堂, pp.197, 1962.
- 6) 西山啓伸: 土木学会編 新体系土木工学 43 橋梁上部構造(Ⅲ), 技報堂出版(株), pp.101, 1980.
- 7) 武田昭彦: 岩本澄孝: 試験所報告 コンクリート工昭和32年度～昭和38年度 名神高速道路編, 日本道路公団高速道路試験所, pp.3-114-3-123, 1964.3.

(2018年9月21日受付)

(2019年2月1日受理)