

Ⅱ編 場所打ち中空床版橋の健全性評価と対策

本編の構成

Ⅱ編は以下の3つに分けて構成している。

- ・Ⅱ-1 中空床版橋の健全性評価
- ・Ⅱ-2 中空床版の踏み抜き対策
- ・Ⅱ-3 中空型枠内の滞水対策

用語の定義

本書（Ⅱ編）にて用いる用語の定義を以下に示す。

1	本研究	この共同研究を指す。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、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）の3者による共同研究である。
2	中空床版橋	1枚の板形状の版によって上部構造の機能を発揮する床版橋の一種で、自重を軽減するために桁内に筒状の型枠を埋設して肉抜きし、空洞化させた構造のものを本研究では取り扱う。
3	中空型枠（円筒型枠、ボイド管）	中空床版橋の内部に埋設する型枠。ほとんどの場合は筒状のボイド管が用いられるため円筒型枠とも呼ばれるが、本研究では主に中空型枠と呼び、中空型枠そのものの形状や状態について触れる場合はボイド管と呼ぶ場合もある。
4	中空型枠上部の床版厚、上床版厚	中空型枠上部のコンクリート部分の厚さを指す。本研究では、ボイド管の頂部の最もコンクリート厚が薄くなる部分の厚さを中空型枠上部の床版厚と呼び、各章において2回目以降は省略して上床版厚と呼ぶ。
5	かぶり	中空床版橋の上下最外縁の鉄筋からのコンクリートかぶりを指す。
6	踏み抜き	中空床版橋の上床版部に活荷重が繰り返し載荷されることで損傷し、輪荷重の載荷等のきっかけで踏み抜いたように穴があく現象を指す。
7	浮き上がり	中空床版橋施工時に、中空型枠が浮き上がった状態でコンクリートが硬化し、上床版厚が不足することを指す。
8	滞水	中空床版橋の中空型枠の排水性が低下した状態で、型枠内に何らかの理由で水が供給され、水が溜まる状態を指す。

Ⅱ-1 目 次

1 章.	概要	Ⅱ-4
1.1	研究の背景と目的	Ⅱ-4
1.2	研究の流れ	Ⅱ-5
2 章.	中空床版橋の概要	Ⅱ-7
2.1	整備状況	Ⅱ-7
2.2	中空床版橋の構造概要	Ⅱ-7
2.2.1	構造概要	Ⅱ-7
2.2.2	設計理論	Ⅱ-8
2.2.3	施工概要（施工手順）	Ⅱ-8
3 章.	中空床版橋に関する技術基準類の変遷	Ⅱ-10
3.1	概要	Ⅱ-10
3.2	中空型枠に関する技術基準類の調査結果	Ⅱ-10
3.3	中空型枠に関する各技術基準の詳細	Ⅱ-12
4 章.	中空床版橋の変状事例の調査	Ⅱ-21
4.1	踏み抜きに着目した変状事例	Ⅱ-21
4.1.1	踏み抜きに関する変状事例①	Ⅱ-21
4.1.2	踏み抜きに関する変状事例②	Ⅱ-22
4.2	中空型枠上部の床版厚計測事例	Ⅱ-26
4.2.1	中空型枠上部の床版厚計測事例	Ⅱ-26
4.2.2	電磁波レーダーの調査結果の分析	Ⅱ-27
4.2.3	中空型枠上部の床版厚計測事例の分析	Ⅱ-29
4.3	中空型枠内の滞水に着目した変状事例	Ⅱ-32
4.3.1	滞水に関する変状事例①	Ⅱ-32
4.3.2	滞水に関する変状事例②	Ⅱ-36
4.3.3	滞水に関する変状事例③	Ⅱ-39
4.4	中空型枠の浮き上がりや滞水の本研究での事例収集に関するまとめ	Ⅱ-42
4.4.1	中空型枠の浮き上がりについて	Ⅱ-42
4.4.2	中空型枠内の滞水について	Ⅱ-42
5 章.	浮き上がりが生じた中空床版橋の耐荷性能に関する既往研究の調査	Ⅱ-45
5.1	概要	Ⅱ-45
5.2	既往の研究における中空床版の耐荷力検討モデルと評価方法	Ⅱ-45
5.2.1	中空型枠の浮き上がりにより踏み抜きに至る過程	Ⅱ-45
5.2.2	既往の研究における耐荷力検討モデルと試算	Ⅱ-46
5.3	既往の研究を踏まえた本研究での検討方針	Ⅱ-48
6 章.	床版厚が耐久性に及ぼす影響に関する数値解析	Ⅱ-49
6.1	踏み抜きに対する数値解析による検証	Ⅱ-49
6.1.1	中空床版橋の耐久性の観点からの検討	Ⅱ-49
6.1.2	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	Ⅱ-50
6.2	解析結果に基づく点検時の着目点及び補修時の留意事項	Ⅱ-71

7 章.	中空型枠の浮き上がりや型枠内部の滞水の影響に関する状態の評価のまとめ	Ⅱ-72
7.1	踏み抜き、浮き上がり	Ⅱ-72
7.2	滞水	Ⅱ-72

Ⅱ-1 中空床版橋の健全性評価

1章. 概要

1.1 研究の背景と目的

コンクリート床版橋に分類される場所打ちコンクリート中空床版橋（以下、中空床版橋）は、中空型枠を用いて、コンクリート床版を空洞化させた橋梁形式であり、1950年代より普及している。現在、中空床版橋特有の損傷事例として、中空型枠上部の踏み抜き、中空型枠内の滞水、中空床版下面の漏水、ひびわれなどの変状発生が報告されている。これらの変状は、施工時の中空型枠の浮き上がりに起因した床版のコンクリート厚さの不足や、鉄筋コンクリート構造としての床版ひびわれが原因となっている可能性がある。構造的な特徴からは、今後も、同様の損傷が生じることが考えられ、内部での滞水や踏み抜きに対する予防的な対応など、合理的な維持管理方法が求められる。そこで、本研究は、中空床版の踏み抜きや中空部での滞水に対する調査、対策方法について調査、検討を行うものである。以下に概要を記す。

中空型枠上部の踏み抜きについて

2015年（平成27年）、高速道路の中空型枠上部の床版の踏み抜き発生を受けて、国土交通省では、直轄道路のうちRC・PC中空床版橋388橋を対象とした床版厚の一斉調査を実施した。388橋のうち30%あまりでコンクリートの床版厚さが標準的な値を下回っている可能性が報告された。一方で、厚さが、強度や疲労耐久性に与える影響については知見がない。

そこで、本研究は、中空床版橋の中空型枠上部のコンクリートの踏み抜きに対する調査や対策に有用な知見を得ることを目的に、中空床版橋に関する技術基準の変遷、関連する変状事例や中空型枠上部の床版厚の計測の事例、中空型枠上部のコンクリート厚さに応じた強度や疲労耐久性に関する数値解析等を行う。

中空型枠内部の滞水や中空床版下面の漏水、ひびわれについて

建設当初から中空型枠には滞水防止のために排水性を有する水抜き孔が設置されている場合もあるが、その設置の方法と水抜きの機能の関係について定まった知見はない。そこで、本研究は、中空型枠に水が浸入してもある程度の排出がなされるような対策の方法について、実験的な検討を行う。

なお、これらの研究は、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、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）の3者で共同研究を実施したものである。

1.2 研究の流れ

本章の構成は、図-1.2.1 及び以下に示す。

「1章 概要」では、本研究の背景及び目的、研究の流れを示す。

「2章 中空床版橋の概要」では、現在の中空床版橋の整備状況や、構造概要・設計理論・施工概要を示す。

「3章 中空床版橋に関する技術基準の変遷」では、中空床版橋の踏み抜きに関わる中空型枠（円筒型枠）の浮き上がり防止や、滞水に関わる水抜き孔などの基準類の変遷を調査し、当該部材に対する要求性能を整理した。

「4章 中空床版橋の変状事例の調査」では、中空型枠上部の踏み抜き事例や中空型枠上部の床版厚計測事例、中空型枠内への滞水事例の収集・整理を行う。その上で、変状の特徴、他の情報との関連性などを分析した。

「5章 浮き上がりが生じた中空床版橋の耐荷性能に関する既往研究の調査」では、浮き上がりが生じた中空床版橋の耐荷性能の評価に関する既往の研究事例を調査し、健全性を評価するための観点から分析した。

「6章 床版厚が耐久性に及ぼす影響に関する数値解析」では、数値解析により、中空型枠上部のコンクリート厚さと初期応力による耐荷性能、及び繰り返し荷重による疲労耐久性の関係を求め整理する。

「7章 中空型枠の浮き上がりや型枠内部の滞水の影響に関する状態の評価のまとめ」では、2～6章を踏まえて中空床版橋における中空型枠の浮き上がりによる踏み抜きや中空型枠内部への滞水の影響に関する状態の評価について、本研究で得られた知見を整理する。

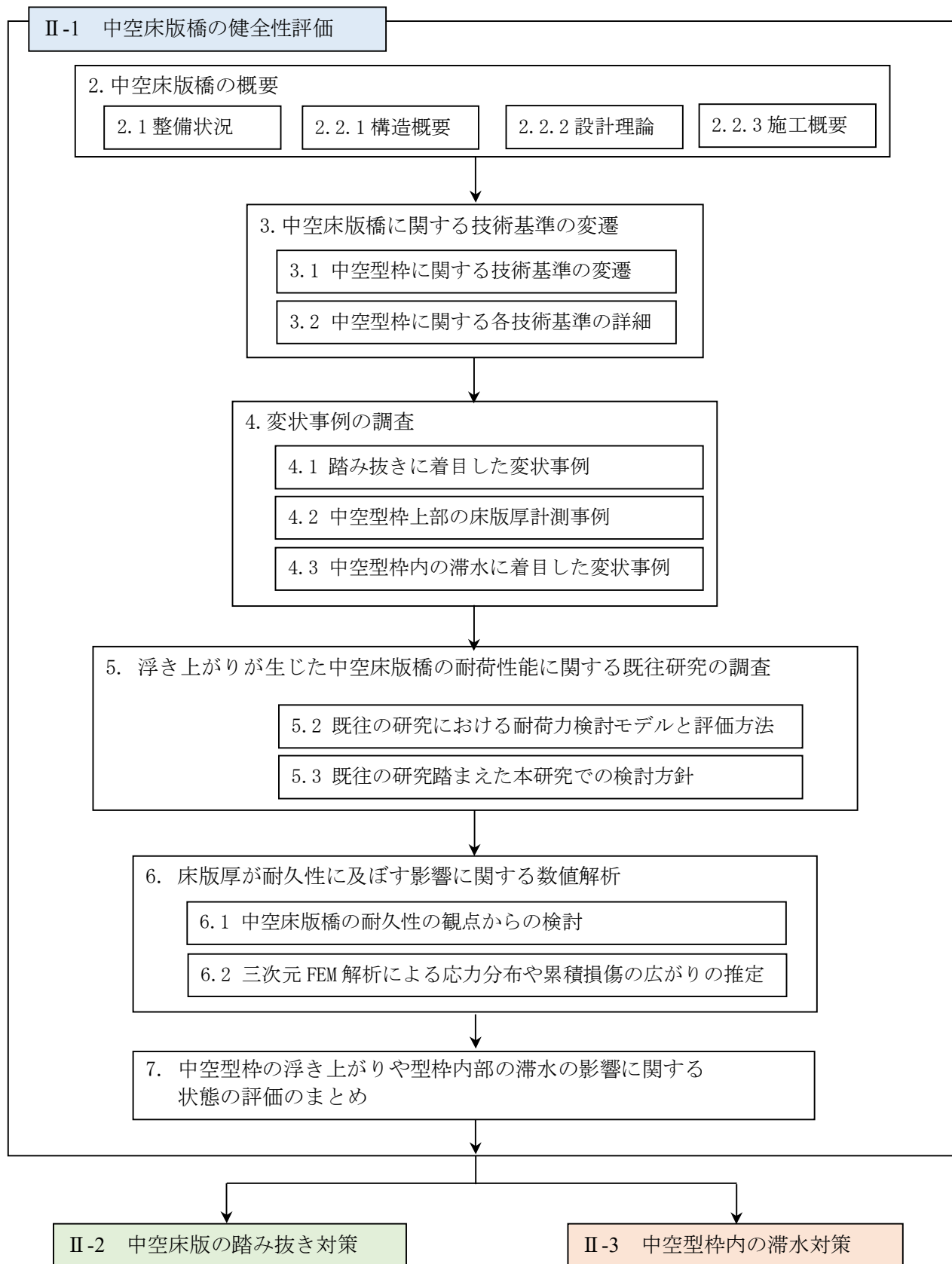


図- 1.2.1 研究フロー

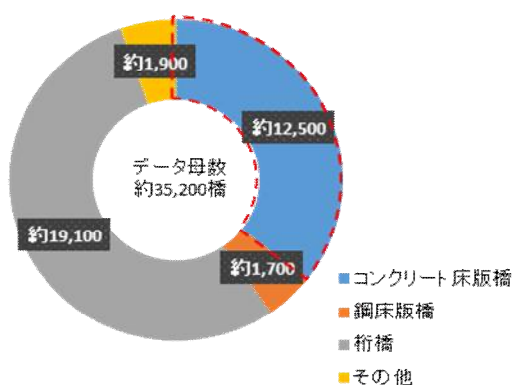
2章. 中空床版橋の概要

2.1 整備状況

コンクリート床版橋は、多数整備されている橋梁形式である。国土交通省が管理している橋梁では約 12,500 橋が整備されている(図- 2.1.1)。そのうち、中空床版橋は約 30%を占めている。

コンクリート床版橋は、1960 年代に最も多く整備されており、約 6 割にあたる 8,000 橋以上が建設後 50 年を超えている(図- 2.1.2)。このうち、中空床版橋は 5,000 橋以上を占めている。

(国土交通省が管理する道路橋の定期点検の 2016 年までの調書から集計)



※ 2m以上の直轄橋梁を対象とした集計

図- 2.1.1 構造物形式別橋梁数

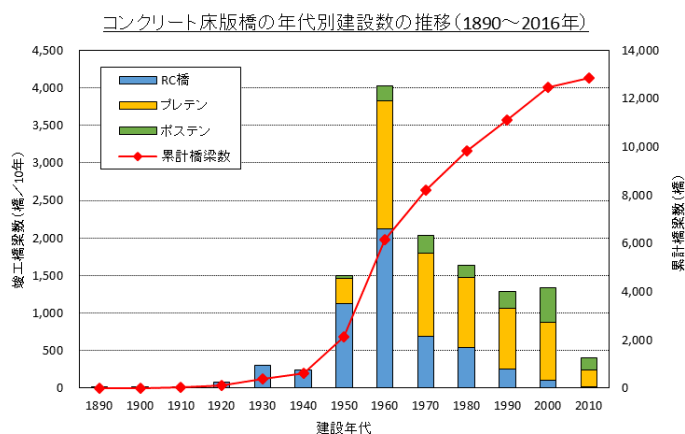


図- 2.1.2 コンクリート床版橋の建設年代推移

2.2 中空床版橋の構造概要

2.2.1 構造概要

本研究で着目する中空床版橋の概要図を図- 2.2.1 に示す。中空床版橋は、版厚を薄くできることから、他の構造に比べ桁高が低いという特徴があり、床版橋で最も一般的に採用される断面形状である。また、円筒の中空型枠により桁の空洞化が図れることにより、自重を低減することができる。

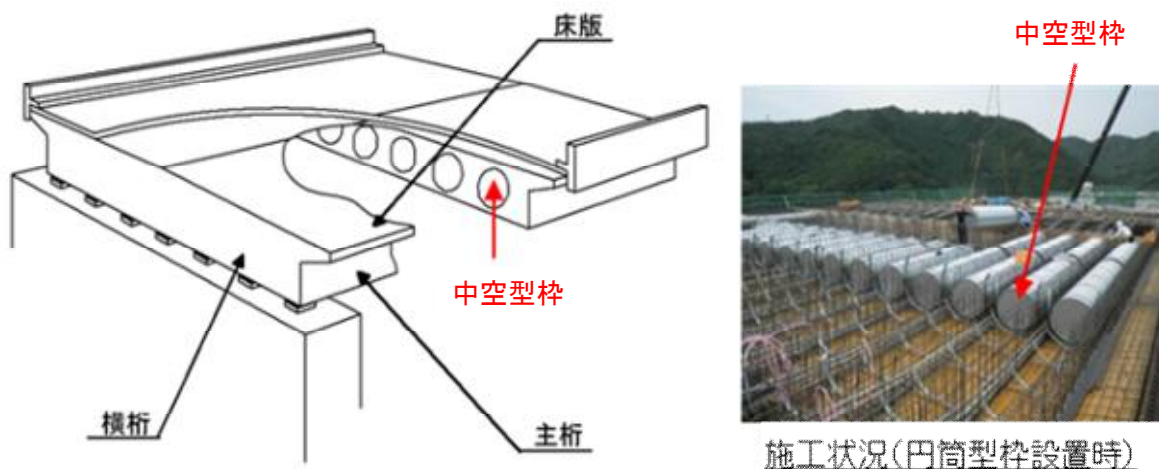


図- 2.2.1 中空床版橋の概要図

2.2.2 設計理論

中空床版橋の設計理論は、例えば文献 2) によくまとまっている。図-2.2.2 に概念図を示す。中空型枠上部に載荷される輪荷重に対する抵抗は、載荷面と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、中空型枠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で抵抗させている。現在の設計では、少なくとも中空型枠上部コンクリートの厚さは 150mm 以上確保するようにされているが、中空型枠が浮き上がることで、中空型枠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、文献 3) における 2 次元弾性 FEM の結果からも見て取れる。また、文献 4) では、中空型枠の浮き上がりを模擬した載荷試験が実施されており、中空型枠上部のコンクリート厚の相違により押し抜きせん断耐力に差異が生じることが確認されている。

一方、中空型枠の位置、中空型枠上のコンクリートの厚さ、輪荷重の載荷位置などと中空型枠上のコンクリートの疲労耐久性との関係性について知見がない。この検討結果は 6 章で別途報告する。

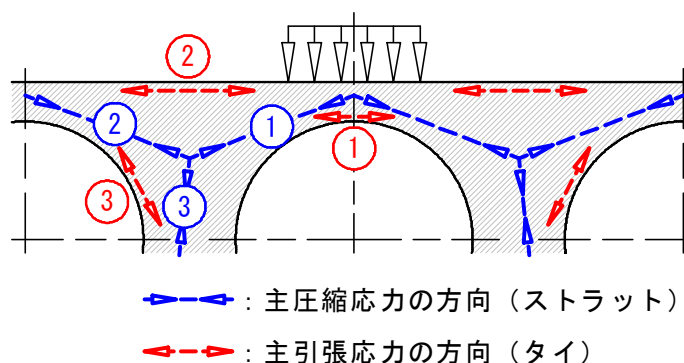


図-2.2.2 中空床版橋の設計概念図

2.2.3 施工概要（施工手順）

中空床版橋は、一般的に枠組式支保工や支柱式支保工などの固定式支保工を用いて、図-2.2.3 に示す施工手順にて施工される。中空床版橋特有の中空型枠の施工は、中空型枠の浮き上がり防止のための上下バンド・フラットバー・固定ナット・ボルト・P コン、中空型枠の橋軸方向・橋軸直角方向への移動防止のための変位防止固定鉄筋を設置し、固定する（図-2.2.4）。1950 年からこの形式の橋の建設が始まり、中空型枠の固定にあたっては施工法の特徴から、中空型枠の浮き上がり、移動及び変形に対する留意が必要であることが知られていたが、標準的な固定方法は存在しなかった。平成 12 年（2000 年）になって初めて、PC 建協は具体的な中空型枠の固定方法、施工管理方法を提案した（図-2.2.4）。提案には、例えば中空型枠の設置時には、固定ナットの締め込み、上下バンドの緩みの有無・配置間隔を検討するとともに、コンクリート打設時には打設速度や 1 層当たりの打ち込み高さ等を管理し、中空型枠の浮き上がり・移動・変形などに配慮して施工することが含まれている。令和 2 年には、これらの内容は、日本道路協会のコンクリート橋施工便覧にも反映されており、現在、多くの橋で少なくともこの提案の内容については対応されていると考えられる。

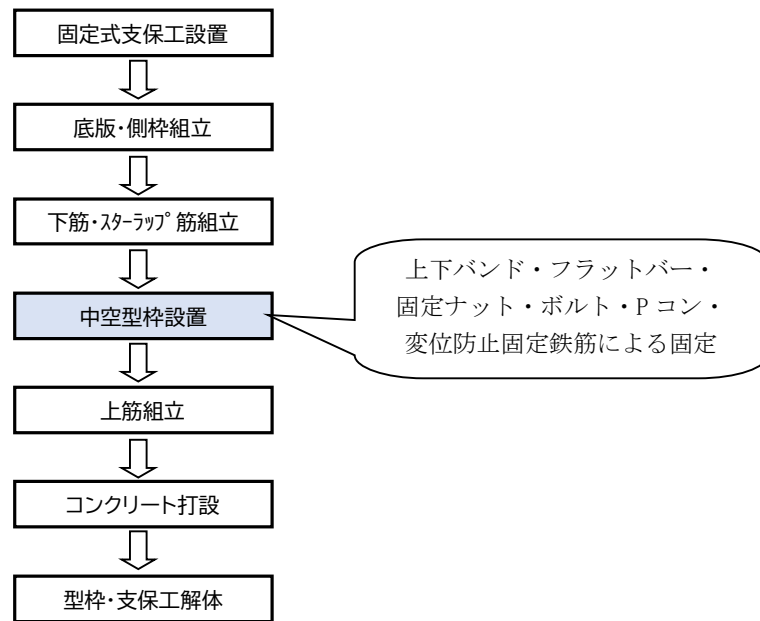


図-2.2.3 中空床版橋の施工手順（RC 構造）

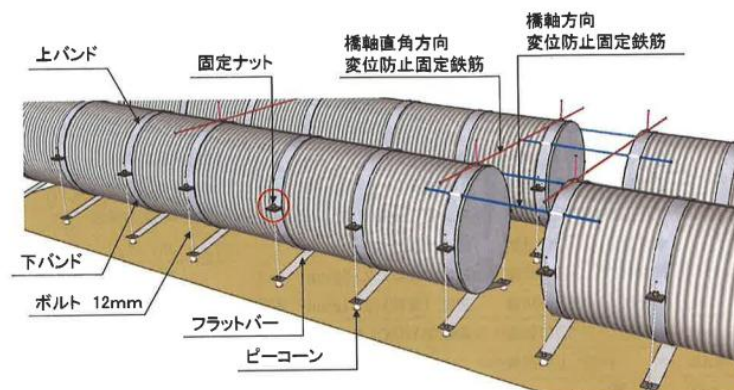


図-2.2.4 中空型枠固定例⁵⁾

【2 章の参考文献】

- 1) 横道英雄：土木学会監修 コンクリート橋，(株)技報堂，pp.197，1962.
- 2) 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，pp634～pp645，2019 年 3 月
- 3) 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，pp343，2017
- 4) 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
- 5) 施工計画書〔場所打ち編〕作成の手引き，（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会，参 45，2017.7

3章. 中空床版橋に関する技術基準類の変遷

3.1 概要

中空型枠の浮き上がりや変形の防止に関連した技術基準類の変遷を整理する。さらに、今後の変状発生を防止するため、技術基準の課題を抽出する。

3.2 中空型枠に関する技術基準類の調査結果

中空型枠に関する技術基準類の変遷調査は、国土交通省土木工事共通仕様書⁷⁾、道路橋示方書⁸⁾、コンクリート道路橋施工便覧⁹⁾、日本道路公団土木工事共通仕様書¹⁰⁾、PC 建協の通達¹¹⁾を対象とした。調査結果を、水抜き孔、浮き上がり・移動、変形に分類し、図- 3.2.3 に整理する。

(1)中空型枠の水抜き孔に関する基準類

- ・平成 10 年（1998 年）コンクリート道路橋施工便覧に、「水抜き孔を必ず設けなければならない」と初めて示されているが、水抜き孔の径や配置細目（配置箇所や個数）に関する詳細は示されていない。
- ・平成 13 年（2001 年）、PC 建協では、協会員へ、中空型枠内部の滞水防止や維持管理性を踏まえた水抜き孔の径（ $\phi 25\text{mm}$ 以上）の標準を通知している。
- ・令和 2 年（2020 年）コンクリート道路橋施工便覧の 12.3.1 型枠材料、(4)薄鉄板製円筒型枠において、初めて水抜き孔の設置詳細図が示されている。（図- 3.2.1）

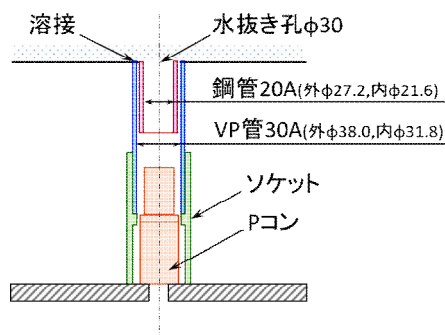


図- 3.2.1 水抜き孔の設置詳細（コンクリート道路橋施工便覧⁹⁾を元に加筆）

(2)中空型枠の浮き上がりや移動に関する基準類

- ・昭和 43 年（1968 年）道路橋示方書や昭和 59 年（1984 年）コンクリート道路橋施工便覧にて、浮き上がりや移動への対応が必要であることが示されているが、具体的な対応方法を示す規定までには至っていない。
- ・平成 8 年（1996 年）以降の国土交通省土木施工管理基準において、浮き上がり防止装置の設置が示されているが、具体的な対応方法は示されていない。
- ・平成 13 年（2001 年）、PC 建協では、協会員へ、浮き上がり防止の具体例を通知している。（図- 3.2.2）
- ・令和 2 年（2020 年）に初めて、コンクリート道路橋施工便覧 12.3.1 型枠材料、(4)薄鉄板製円筒型枠において、中空型枠の浮き上がりや移動防止の具体的な対応方法が示されている。

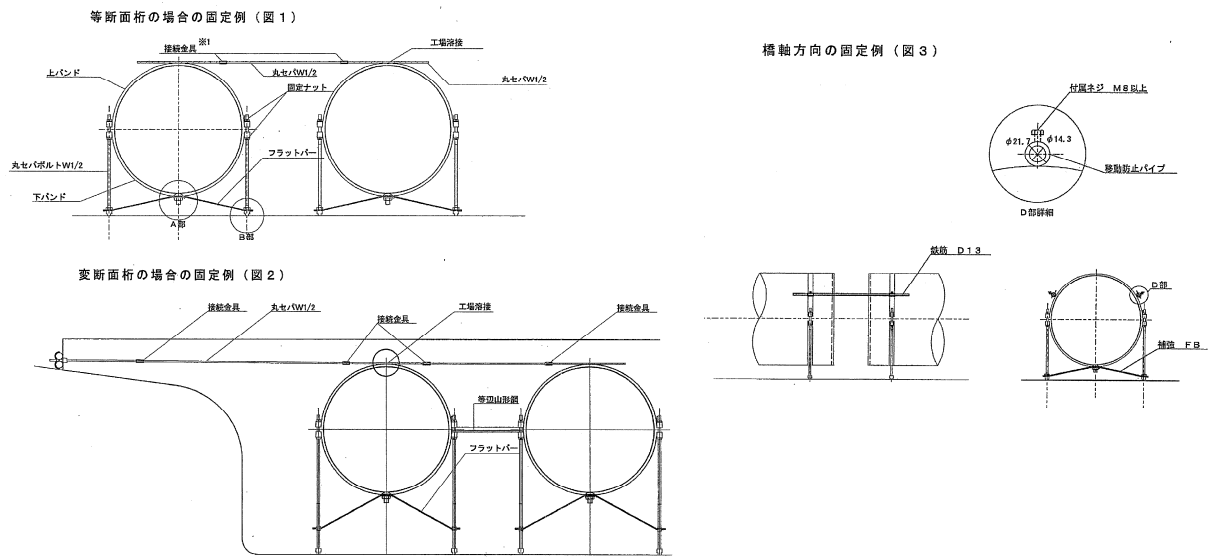


図- 3.2.2 中空型枠の固定方法の具体例

(中空型枠に関する通達事項 No. 12-307 平成 13 年 2 月、(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会¹¹⁾ より抜粋)

(3) 中空型枠の変形に関する基準類

- ・昭和 36 年以降の日本道路公団の土木工事共通仕様書に、中空型枠の変形に対する剛性確認として、床版用円筒型わく試験方法（曲げ載荷試験）が示された。その他の技術基準類には、中空型枠の変形防止に対する具体的な試験方法は示されていない。
- ・昭和 53 年（1978 年）道路橋示方書、昭和 59 年（1984 年）コンクリート道路橋施工便覧に型枠の材質・寸法・型枠形状の確認等が示された。
- ・平成 19 年（2007 年）に、高速道路のコンクリート中空床版橋工事に使用する中空型枠（円筒型枠）に関する不正が発覚した。1 者は強度試験結果を改ざん、1 者は過去の強度試験結果を流用していた。検討委員会を設置し、既設橋の点検や当該型枠に対する載荷試験や打設試験等を行っている。試験で得られた変形が中空型枠に生じても、耐荷性能や耐久性能に大きな影響はないことを確認し、中空床版橋の安全性への長期的な影響はないと結論づけられた⁶⁾。

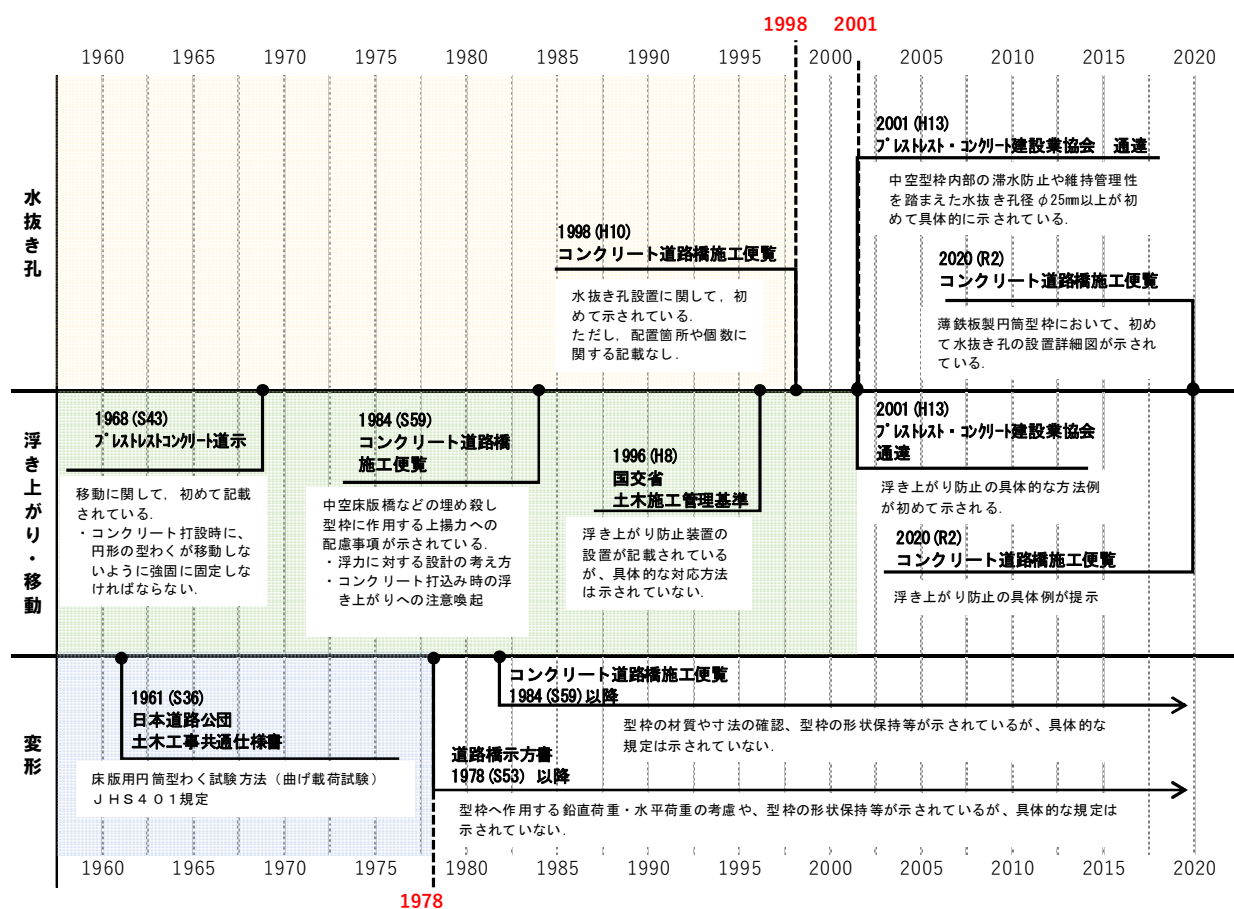


図- 3.2.3 中空型枠の技術基準の変遷

3.3 中空型枠に関する各技術基準の詳細

調査した技術基準の詳細内容を以下に示す。

(1)国土交通省 土木工事共通仕様書⁷⁾に示される中空型枠に関する記載事項

- ・平成7年度(1995年)以降は、以下の記載がある。

「受注者は、円筒型枠の施工については、コンクリート打設時の浮力に対して必要な浮き上がり防止装置を設置しなければならない。」

- ・平成20年度(2008年)以降の特記仕様書には、以下の記載がある。

「受注者は、円筒型枠の強度等が確認できる資料を事前に監督職員に提出しなければならない。」

(2)道路橋示方書⁸⁾等に示される中空型枠に関する記載事項

表- 3.3.1 に整理して示す。発行年月時点で追記や修正がされた内容に下線を付した。

表- 3.3.1 道路橋示方書における中空型枠に関する記載 ⁸⁾より抜粋

発行年月	道路橋示方書 Ⅲ コンクリート橋編
S39(1961). 6	・記載なし ※なお、当時の基準類は、「鉄筋コンクリート道路橋設計示方書」である。
S43(1968). 3	・【解説】コンクリート打設時に、円形の型わくが移動しないように強固に固定しなければならない。 ※プレストレスト・コンクリート道路橋示方書
S53(1978). 1	・型わくおよび支保工は、施工中に作用する荷重で起こり得る最も不利な組合せに対して十分な強度と安全性を有するものでなければならない。 ・型わくおよび支保工は 14. 12. 3（部材寸法）に規定される施工精度を満足するものでなければならない。 ・型わくの設計にあたっては、鉛直方向荷重として、型わく、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機械器具、仮設備などの重量および衝撃などを、水平方向荷重として、まだ硬化しないコンクリートの側圧を、考慮しなければならない。 ・型わくおよび支保工に用いられる材料の許容応力度などは、「労働安全衛生規則」（労働省）などに定められた値とする。ただし、使用する材料の損傷の程度に応じて許容応力度を低減しなければならない。
H2(1990). 2	・型わくおよび支保工は、施工中に作用する荷重により起こり得る最も不利な組合せに対して十分な強度と安全性を有するものでなければならない。 ・型わくおよび支保工は、<u>16. 13. 3（部材寸法）に規定される部材寸法の施工精度を確保できるように、その形状および位置を正確に保たなければならない。</u> ・型わくの設計にあたっては、鉛直方向荷重として、型わく、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機械器具、仮設備などの重量および衝撃などを、水平方向荷重として、フレッシュコンクリートの側圧を、考慮しなければならない。
H6(1994). 2	同 上
H8(1996). 12	同 上
H14(2002). 3	・型わく及び支保工は、コンクリートの打込みから硬化にいたるまでの起こり得る最も不利な組合せの荷重に対して、十分な強度と安全性を有するものでなければならない。 ・<u>型わく及び支保工は、完成した構造物が所定の性能を確保できるように、その形状及び位置を正確に保たなければならない。</u> ・<u>型わく及び支保工は、コンクリートの耐久性及び表面の出来形を損なわないように配慮しなければならない。</u> ・<u>コンクリート打設に伴う型わく及び支保工のたわみの影響について、これをあらかじめ予測し、部材に悪影響をおよぼさないような措置を講じなければならない。</u> ・型わくの設計にあたっては、鉛直方向荷重として、型わく、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機械器具、仮設等の重量及び衝撃等を考慮するものとする。また、水平方向荷重として、フレッシュコンクリートの側圧を考慮しなければならない。 ・<u>型わく及び支保工は、所定の出来形を満足するように施工しなければならない。</u>
H24(2012)	同 上
H29(2017). 11	・型わく及び支保工は、コンクリートの打込みから硬化にいたるまでの起こり得る最も不利な組合せの荷重に対して、十分な強度と安全性を有するものでなければならない。 ・型わく及び支保工は、完成した構造物が所定の性能を確保できるように、その形状及び位置を正確に保たなければならない。 ・型わく及び支保工は、コンクリートの耐久性及び表面の出来形を損なわないように配慮しなければならない。 ・型枠及び支保工の設計及び施工にあたっては、コンクリート打設に伴う型枠及び支保工のたわみの影響について予測し、設計の前提条件の確保並びに完成部材に悪影響を及ぼさないような措置が講じられなければならない。 ・型枠の設計にあたっては、鉛直方向荷重として、型枠、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機械器具、仮設等の重量、衝撃等を考慮するものとする。また、水平方向荷重として、フレッシュコンクリートの側圧を考慮しなければならない。 ・型わく及び支保工は、所定の出来形を満足するように施工しなければならない。 ・<u>型枠及び支保工は、コンクリート打ち込み前に、部材等が所定の出来形を満足するような寸法で堅固に設置されていることを確認する。</u>

(3)コンクリート道路橋施工便覧⁹⁾に示される中空型枠に関する記載事項

表- 3.3.2 に整理して示す。発行年月時点で追記や修正がされた内容に下線を付した。

表- 3.3.2 コンクリート道路橋施工便覧における中空型枠に関する記載⁹⁾より抜粋

発行年月	コンクリート道路橋施工便覧
S59(1984). 2	5. 2. 3 特殊荷重の例示 - 中空床版橋などの埋殺し型枠に作用する上揚力 - 埋殺し型枠の上揚力の計算には、コンクリートの単位体積重量を 2350kg/m^3 として浮力の計算をするのがよい。 また、この浮力に対して、取付けボルトの設計をする場合には、コンクリート打設時の衝撃等を考慮して 40%の荷重の割増しを行って検討するのがよい。 - 型枠の設置にあたっては、各部材のすき間がずれないようにしておく必要がある。 5. 6. 1 組立て(1)型枠の組立て、型枠組立てに際し注意すべき事項 - 円筒埋殺し型枠を使用する場合には、一般に図-5.7 のような方法などによりコンクリート打込みによる浮上りを防止しなければならない。 5. 6. 2 検査 - 型枠の形状、寸法は、構造物の出来上がり寸法が、[道示Ⅰ，Ⅲ]14. 12. 3 の部材寸法の施工精度を満足に組み立てられている必要がある。 12. 3. 1 検査項目、表-12. 2 - 材質、厚さ、形状、位置、寸法、固定保持方法、欠陥の有無（ずれ、穴等）
H10(1998). 1	5. 2. 5 特殊荷重の例示 - 中空床版橋などの埋殺し型枠に作用する揚圧力 - 埋殺し型枠の上揚力の計算には、コンクリートの単位体積重量を 2350kg/m^3 として浮力の計算をするのがよい。 - 型枠の設置にあたっては、各部材のすき間がずれないようにしておく必要がある。 5. 3. 1 型枠材料 (4) 薄鉄板製円筒型枠 <u>薄鉄板製円筒型枠は、中空床版橋などで用いられており、工事位置付近で薄肉鋼板をスパイラル鋼管に成形して製作することが多い。この種の型枠は、コンクリート構造物の内部に閉断面を形成するものであるので、水抜き孔を必ず設けておかなければならない。</u> 5. 6. 1 組立て(1)型枠の組立て、型枠組立てに際し注意すべき事項 - 円筒埋殺し型枠を使用する場合には、一般に図-5.7 のような方法などによりコンクリート打込みによる浮上りを防止することが望ましい。 12. 3. 3 品質の確認/型枠工、型枠材組立て検査 <u>型枠工については、支保工の場合と同様に、型枠部材が指定された材質および寸法のものであることを確認することに加えて、できあがったコンクリート部材が[道示Ⅲ]17. 13. 3 に規定される部材寸法の施工精度を確保できるように、型枠工の形状および位置が正確に保たれていることを確認することが重要である。</u> <u>コンクリート打ち込み前および打ち込み中に作用する荷重に対して、型枠のはらみ、モルタルの漏れ、移動、傾き、沈下、接続部の緩みなどの異常の有無を確認し、必要に応じて直ちに適切な処置をとり、危険を防止する必要がある。</u> - 型枠工の品質の確認の一例：表-12. 11 <u>型枠の材料および締付け材の種類・材質・形状寸法、締付け材の位置・数量、型枠の形状寸法および位置</u>
R2(2020). 9	12. 2. 6 特殊荷重の例示 - 中空床版橋などの埋殺し型枠に作用する揚圧力 - 埋殺し型枠の上揚力の計算には、コンクリートの単位体積重量を 23.5KN/m^3 として浮力の計算をするのがよい。 - 型枠の設置にあたっては、各部材のすき間がずれないようにしておく必要がある。 12. 3. 1 型枠材料(4)薄鉄板製円筒型枠

・薄鉄板製円筒型枠は、中空床版橋などで用いられており、工事位置付近で薄肉鋼板をスパイラル鋼管に成形して製作することが多い。この種の型枠は、コンクリート構造物の内部に閉断面を形成するものであるため、中空部に滞水が生じないように、水抜き孔を設ける必要がある。(図-12.3.2 参照) また、水抜き穴をファイバースコープ等が挿入できる径以上とすると供用後の維持管理に有用である。

12.6.1 組立て (1) 型枠の組立て、2) 型枠組立に際し注意すべき事項

・円筒埋設型枠を使用時に、円筒型枠が浮き上がり、床版厚が不足した事例があるので注意が必要である。図-12.6.1 から図 12.6.3 に円筒型枠の固定方法の例を示すが円筒型枠の施工及び管理にあたっては、次のことに留意する必要がある。

- 円筒型枠の固定には、通常スチールバンドが使用され、型枠支保工に固定されるが、パイプレータの振動等によりナットが緩み、スチールバンドが外れることがあるため、ボルトのねじ山を点検するとともに、二重ナットとして緩みが生じないようにするのがよい。
- スチールバンドと型枠支保工をつないでいるボルトが切れる可能性があるため、コンクリート打ち込み時の浮力に十分抵抗できるように、ボルト径を大きくするか、スチールバンドの間隔を小さくする等の対策が必要である。
- スチールバンドが型枠支保工にではなく、合板やその下の鋼管等に固定されている場合には型枠ごと浮き上がる可能性があるため、コンクリートの打ち込み前に、型枠支保工の下部に固定されているかチェックする必要がある。
- コンクリート打ち込みの際に、スランプの大きいコンクリートを使用したり、1回の打ち込み高を高くしすぎると、型枠にかかる側圧が大きくなるばかりでなく、浮力が急激に作用するため、1回の打ち込み高さをおおきくしないように配慮する必要がある。
- 円筒型枠の天端に検尺棒等を取り付け、所要の床版厚さが確保されているかを確認する必要がある。

・円筒型枠の固定方法や、コンクリート打ち込み時の留意点については、「施工計画作成の手引き[場所打ち編]2017年改訂版 7.6 主桁製作工」(プレストレスト・コンクリート建設業協会)を参考にするとよい。

1) 薄鉄板製円筒型枠

薄鉄板製円筒型枠は、中空床版橋等で用いられており、薄肉鋼板をスパイラル鋼管に成形して製作することが多い。この種の型枠は、コンクリート構造物の内部に閉断面を形成するものであるため、中空部に滞水が生じないように水抜き孔を設ける必要がある(図-12.3.2参照)。また、水抜き穴をファイバース

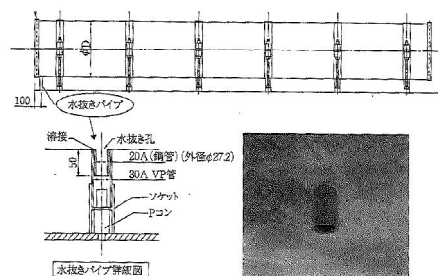


図-12.3.2 水抜きパイプ設置例

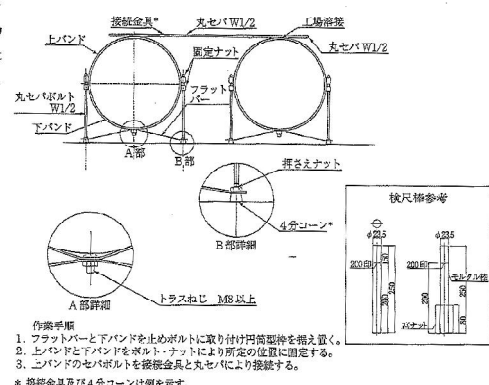


図-12.6.1 等断面桁の場合の固定例

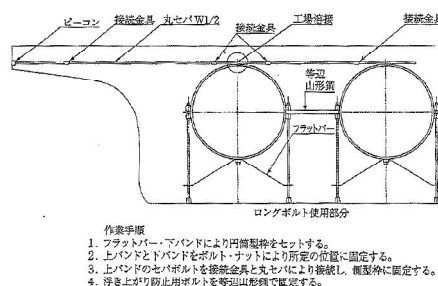


図-12.6.2 変断面桁の場合の固定例

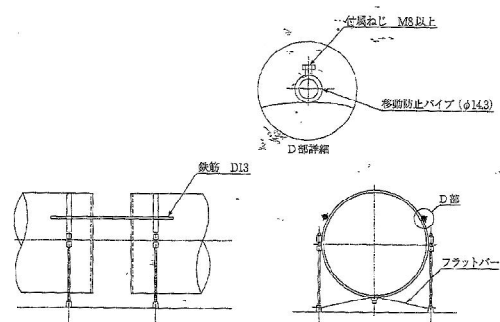


図-12.6.3 橋軸方向の固定例

12.6.2 施工精度

・コンクリートを打ち込む前に型枠及び支保工の施工精度を確認する必要がある。型枠及び支保工法は、[道示Ⅲ]表-解 17.14.1 に示される部材寸法の施工精度を確保できるように組立てられる必要がある。

R2(2020).9	12.6.3 コンクリート打ち込み中の注意 ・<u>コンクリート打ち込み中に、型枠のはらみ、モルタルの漏れ、移動、傾き、沈下、接続部のゆるみ、その他異常の有無を検査する必要がある。</u> ・<u>これまでの型枠及び支保工の倒壊や部分的なはらみ出しの事例では、一般に、コンクリート打ち込みが終了する直前に発生することが多いので、打ち込みから監視体制を敷いておくのが望ましい。</u>
R2(2020).9	3.3.3 検査/型枠工 ・<u>型枠工の検査は、コンクリートの打ち込み前に行う必要がある。コンクリート打ち込み時及び打ち込み後に型枠が適当でないことが明らかになっても対処が難しいためである。</u> ・<u>型枠工については、支保工の場合と同様に、型枠部材が指定された材質及び寸法のものであること、完成した部材が所定の部材寸法の施工精度を確保できるように、型枠工の形状及び位置が正確に保たれていることを確認することが重要である。</u> ・コンクリート打ち込み前および打ち込み中に作用する荷重に対して、型枠のはらみ、モルタルの漏れ、移動、傾き、沈下、接続部の緩みなどの異常の有無を確認し、必要に応じて直ちに適切な処置をとり、危険を防止する必要がある。 ・型枠工の品質の確認の一例：表-3.3.3 型枠の材料および締付け材の種類・材質・形状寸法、締付け材の位置・数量、型枠の形状寸法および位置

(4)日本道路公団（現 NEXCO）土木工事共通仕様書¹⁰⁾に示される中空型枠の記載事項

S36(1961).9 土木工事共通仕様書から基本的な変更なし。

- ・床版用円筒型わく試験方法（曲げ載荷試験）の規定に合格するもので薄鉄板製とし、監督員の承諾を得るものとする。
- ・外径＝公称径。凹凸は 10 mm 以下。
- ・設計図に示された位置に固定。打設にあたって移動、変形、浮上等が起こらないようにする。

試験方法(JHS401)の概要

- ① 供試体: 2m の実物大
- ② 載荷方法: 単純梁として載荷
- ③ 試験荷重と型わくの要求性能
 - ・ $P = 11.3 \cdot D^2 \alpha$ (半断面の浮力相当)
 - ・ P で許容変位量 $\Delta r = 6P$ ($\leq 10\text{mm}$)
 - ・ 1.5P で破壊または有害な変形が生じない

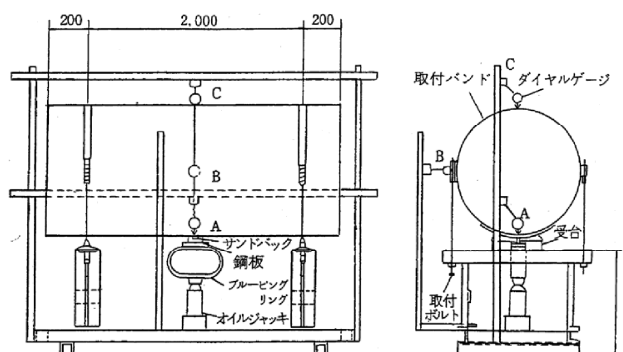


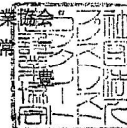
図- 3.3.1 日本道路公団-土木工事共通仕様書における中空型枠に関する記載¹⁰⁾

- (5) (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会の中空型枠に関する通達事項¹¹⁾
2001年に、以下の内容について会員企業に通達している。

PC建協 No.12-307
平成13年2月22日

会員各位

(社) プレストレストコンクリート建設業協会
専務理事 安井 常
施工部会長 太田



中空床版橋 円筒型枠の固定方法(案)、コンクリート打設例について

拝啓、時下ますますご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、中空床版橋に標準的に使用されている円筒型枠が、コンクリート打設時に浮力や側圧により移動した場合には、床版厚等の確保が困難になり、耐久性に重要な影響を与えることとなります。

そこで、今回会員各社の固定方法などをアンケート調査した結果に基づき、標準的な固定方法(案)とコンクリート打設方法例をまとめました。会員各社に於かれましては、下記の事項を考慮の上、中空床版橋を施工されるようお願いいたします。

円筒型枠の固定方法 対策1 (例)

対策1-1 支持金具

施工計画時に支持金具の強度計算を行い、以下を確認する。

- ①支持金具のピッチ(コンクリート打設時の浮力と側圧を考慮する。最大2.0m以下、ボルト径12mm以上)
- ②固定Uバンドの幅および厚さ
- ③固定Uバンドの許容引張応力度は「当該鋼材の降伏強さの値または、引張強さの3/4の値のいずれか小さい値の2/3の値以下とする」(安衛則 第241条)による。
- ④ボルトの許容引張応力度は「5.3 材料および許容応力度」(コンクリート道路橋施工便覧平成10年版)による。
- ⑤円筒型枠固定用鋼製サドル(パテントスペイサー等)は使用しないこと。

円筒型枠固定用金具は上下Uバンドによることを標準とする。

対策1-2 橋軸直角方向の移動制御

等断面桁の場合・・・・・・ 図-1 の固定方法を標準とする。

変断面桁の場合・・・・・・ 図-2 の固定方法を標準とする。

変断面構造(斜材付きπ型ラーメン橋等)により、円筒型枠固定用のボルトが長くなり不安定となる場合は、図-2のように円筒型枠上面を鉄筋等により連結し側枠に固定するとともに、円筒型枠どうしを等辺山形鋼で接続し、コンクリート側圧による移動を防止する。

対策1-3 橋軸方向の移動制御

図-3 の固定方法を標準とする。

耐久性に関わる事項 対策2 (例)

対策2-1 コンクリート打設時の充填確認

円筒型枠の下方にコンクリートが充填されていることを目視確認する。また打ち継ぎ目においては、旧コンクリートの再振動が可能な時間内に打ち継ぎ、旧コンクリートに10cm～20cm程度パイプレータを挿入する。(図-4)

対策2-2 非破壊検査、検尺棒等による床版厚の確認

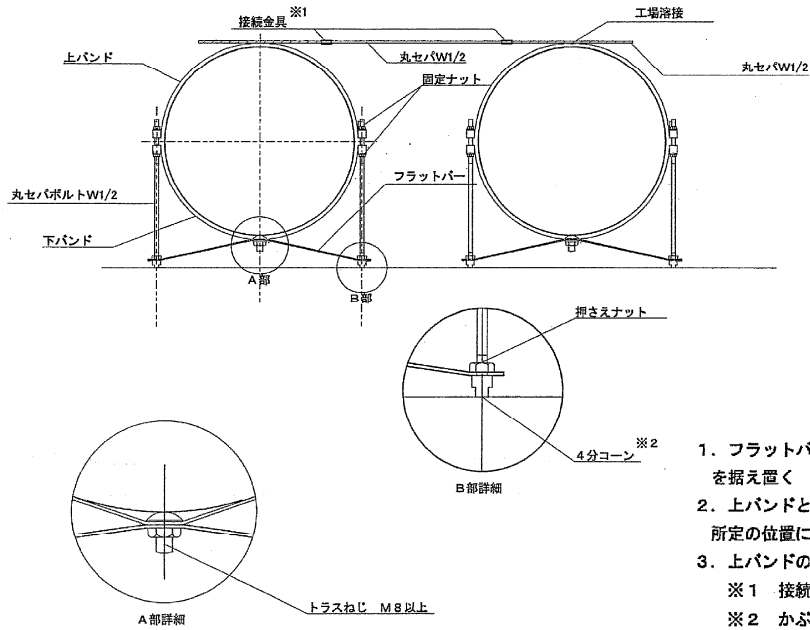
電磁波法等やモルタル製の検尺棒(図-5)により、コンクリート打設後の床版厚を確認する。

対策2-3 水抜き孔の確認および円筒型枠内の確認

水抜き穴が貫通していることと、円筒型枠内に帯水がないことを確認する。

また、水抜き穴は、供用後に維持管理のため、ファイバースコープなどが挿入できる径(φ25mm)以上とする。

等断面桁の場合の固定例（図１）



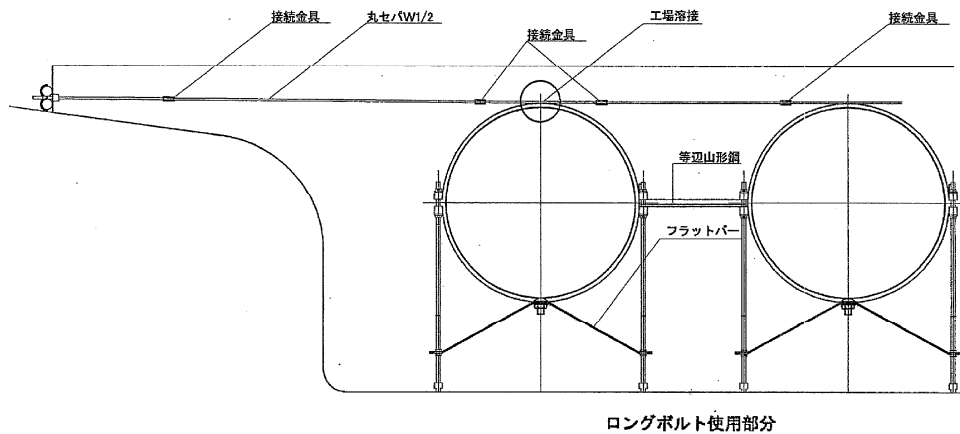
作業手順

1. フラットバーと下バンドを止めボルトに取り付け円筒型枠を据え置く
2. 上バンドと下バンドをボルト・ナットにより所定の位置に固定する。
3. 上バンドのセバボルトを接続金具と丸セバにより接続する。

※1 接続金具例：「ガチット」（岡部製）

※2 かぶり厚確保可能なコーン例：「CTコーン」（スペーサー工業製）

変断面桁の場合の固定例（図２）

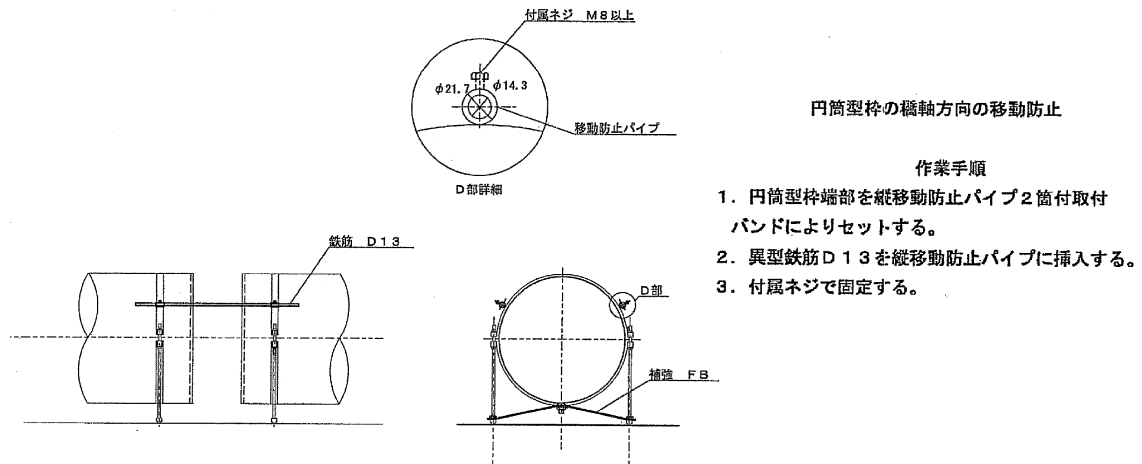


ロングボルト使用部分

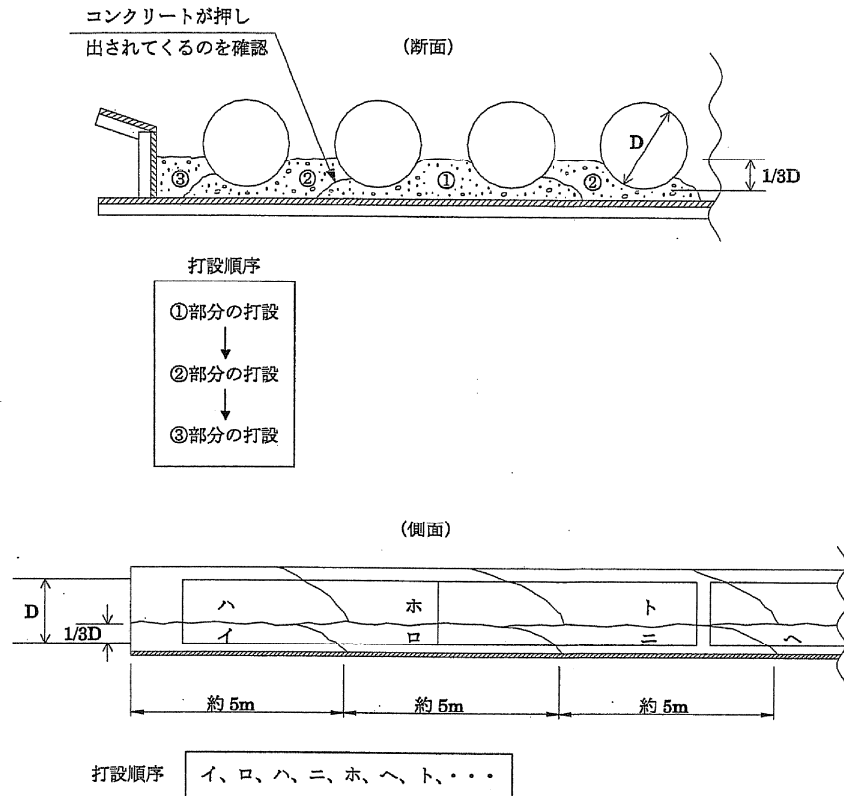
作業手順

1. フラットバー・下バンドにより円筒型枠をセットする。
2. 上バンドと下バンドをボルト・ナットにより所定の位置に固定する。
3. 上バンドのセバボルトを接続金具と丸セバにより接続し、側型枠に固定する。
4. 浮き上がり防止用ボルトを等辺山形鋼で固定する。

橋軸方向の固定例（図3）



コンクリートの打設例（図4）



<打設時の注意事項>

- 1) 中桁から打設を行う。
- 2) 円筒型枠の下を十分締め固める。
- 3) 一層目の打設高は、円筒型枠径(D)の 1/8 程度までとする。
- 4) 円筒型枠の移動が無いことを確認しながら打設する。
- 5) 橋軸方向の打設長は 5m 程度とする。
- 6) 打継ぎ面がコールドジョイントにならないように留意する。

【3章の参考文献】

- 6) 井出 俊也, 安川 義行, 忽那 幸浩: コンクリート打設に伴う中空床版橋の円筒型枠の挙動に関する技術的検討, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, 2008.11
- 7) 土木工事共通仕様書, 国土交通省, 1995~2021
- 8) 道路橋示方書・同解説, 昭和 39 年 6 月, (社) 日本道路協会, 1961
道路橋示方書・同解説, 昭和 53 年 3 月, (社) 日本道路協会, 1978
道路橋示方書・同解説, 平成 2 年 3 月, (社) 日本道路協会, 1990
道路橋示方書・同解説, 平成 6 年 2 月, (社) 日本道路協会, 1994
道路橋示方書・同解説, 平成 8 年 12 月, (社) 日本道路協会, 1996
道路橋示方書・同解説, 平成 24 年 3 月, (社) 日本道路協会, 2012
道路橋示方書・同解説, 平成 29 年 11 月, (社) 日本道路協会, 2017
- 9) コンクリート道路橋施工便覧, 昭和 59 年 2 月, (社) 日本道路協会, 1984
コンクリート道路橋施工便覧, 平成 10 年 1 月, (社) 日本道路協会, 1998
コンクリート道路橋施工便覧, 令和 2 年 9 月, (社) 日本道路協会, 2020
- 10) 土木工事共通仕様書, 昭和 36 年 9 月, 日本道路公団, 1961
- 11) 中空型枠に関する通達事項 No.12-307, 平成 13 年 2 月, (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2001

4章. 中空床版橋の変状事例の調査

本章では、中空型枠の浮き上がりや移動等と関連性を有すると思われる中空型枠上部の踏み抜きや中空型枠内への滞水の事例を整理する。

4.1 では、実際に生じた踏み抜きの事例と変状発生時の調査等を収集した。4.2 では、踏み抜きの原因の一つである中空型枠上部の床版厚不足を非破壊検査にて計測した事例を収集し、本研究にて傾向の分析を行った。4.3 では、床版下面の変状などから中空床版型枠内の滞水が疑われ、内部を調査した事例を収集した。4.4 では、これらの事例の収集と本研究での分析で得た知見を総括した。

4.1 踏み抜きに着目した変状事例

4.1.1 踏み抜きに関する変状事例①

(1)橋梁概要

構造形式：4 径間連続 RC 中空床版橋

竣工年：1987 年（昭和 62 年）

補修年度：2015 年（平成 27 年）

橋 長：4@16.500m = 66.000m



図- 4.1.1 舗装および床版の陥没状況

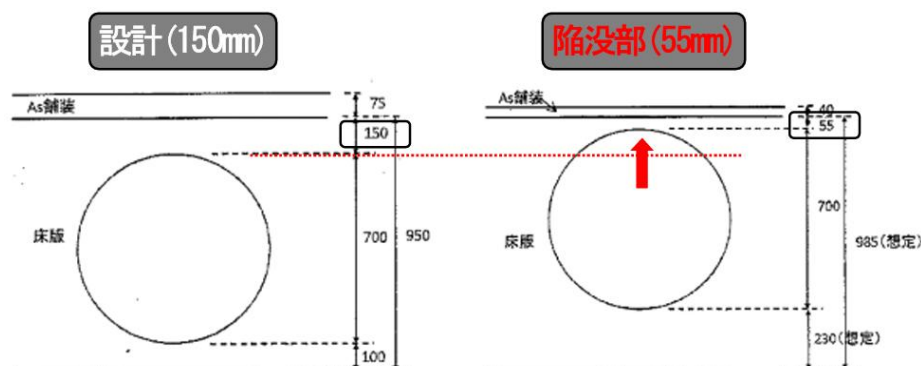


図- 4.1.2 中空型枠の浮き上がりによる床版

(2)変状概要

- ・中空床版橋の路面及び床版の踏み抜きが発生していた（図- 4.1.1）。舗装と床版は $\phi 30$ cm程度損傷し、鉄筋が露出して腐食が生じており、内部冠水が生じていた。

(3)調査方法及び結果

- ・現地計測の結果、設計値 150mm に対し実際の床版厚は 55mm であった（図- 4.1.2）。施工時に中空型枠が浮き上がったことが考えられる。

4.1.2 踏み抜きに関する変状事例②

(1)橋梁概要

構造形式：5 径間連続 RC 中空床版橋

竣工年：1965 年(昭和 40 年)/活荷重：TL-20

橋長：78.980m（支間長：15.600m+15.980m+3@15.600m）

線形条件：縦断勾配、横断勾配不明

本事例は、踏み抜きには至っていないものの、非破壊調査の結果、中空型枠の局所的な浮き上がりにより上床版厚が 30mm の箇所が見られ、鉄筋が床版コンクリートから露出している可能性が確認された事例である。2011 年に舗装のオーバーレイが行われているため、調査時点で舗装のひび割れ等は確認されていないものの、鉄筋露出が疑われる箇所では局所的に舗装のうきが生じていたことや、床版下面側には広域に様々な変状が生じていたことを確認している。

図- 4.1.3 橋梁図（上段：側面図，下段：断面図）

II -22



写真-4.1.1 橋梁外観

(2)変状概要

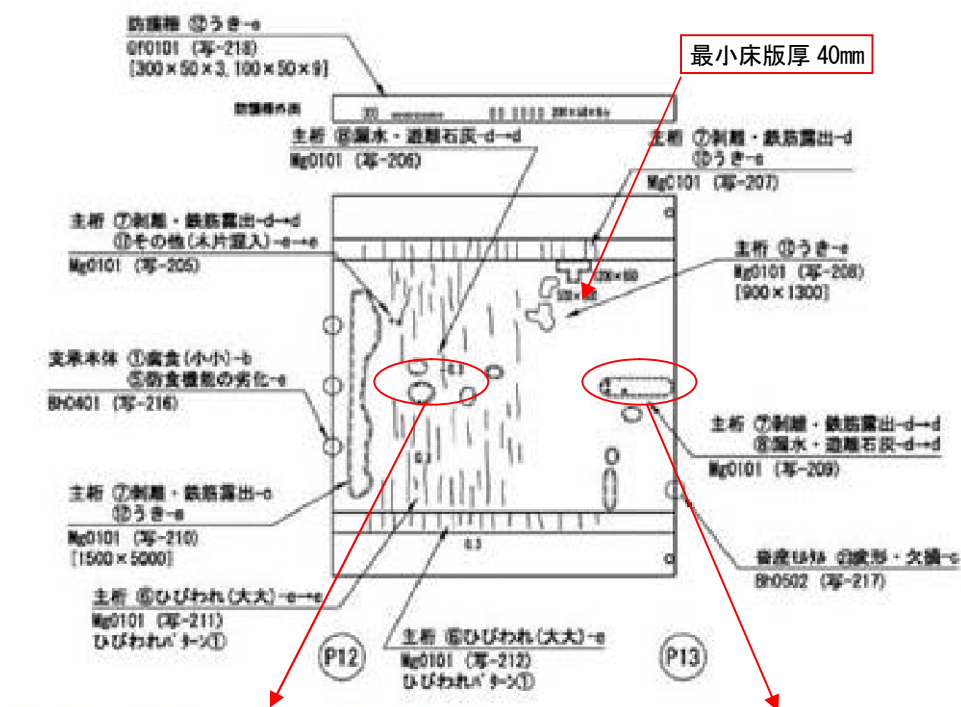


写真-4.1.2 P12-P13 径間 床版下面変状状況（漏水・遊離石灰、ひび割れ）

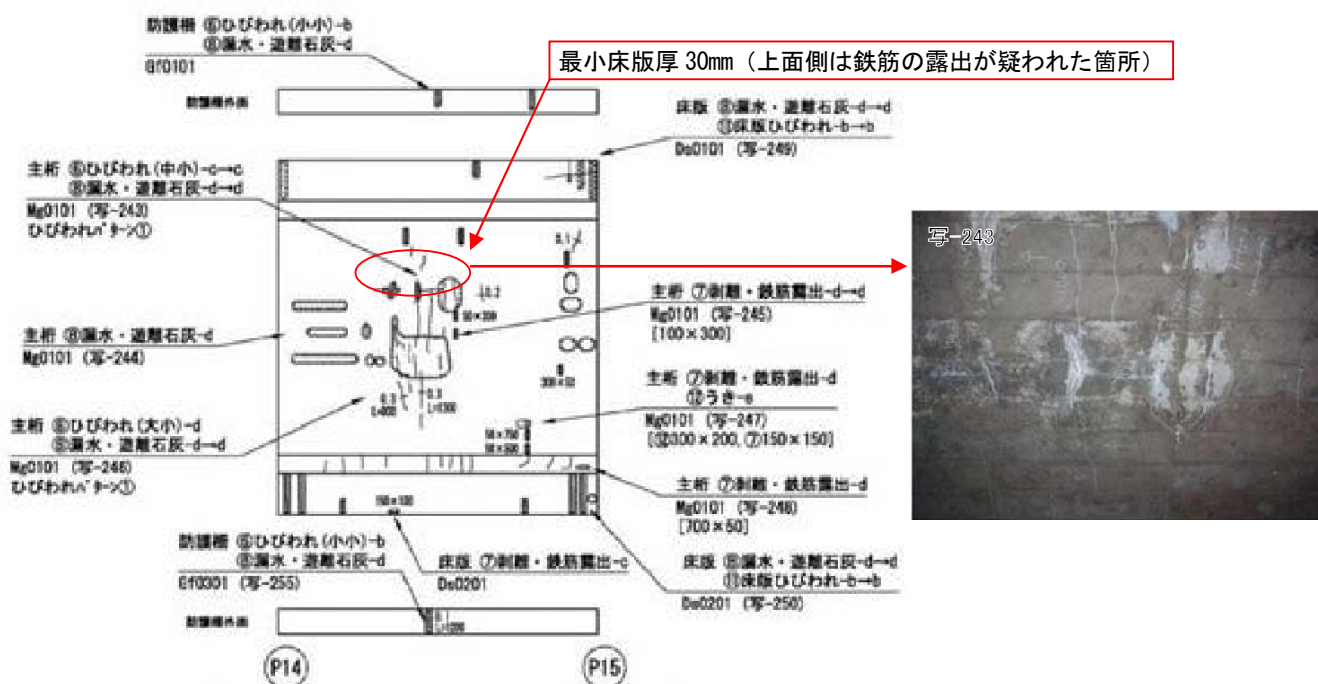


写真- 4.1.3 P14-P15 径間 床版下面変状状況 (漏水・遊離石灰、ひび割れ)

○変状の考察

- ・床版下面に橋軸直角方向に複数のひび割れが確認された (写真- 4.1.2)。また、漏水・遊離石灰は橋軸方向に伸びており、等間隔で表れている箇所もある。
- ・鉄筋の露出が疑われた箇所の直下でも、複数のひび割れ及び漏水・遊離石灰の発生が確認された (写真- 4.1.3)。
- ・漏水・遊離石灰が橋軸方向に伸びていることや、変状の出ている間隔が中空型枠の配置間隔 (900mm) に近いことから、中空型枠の位置と変状が出ている位置には関係性がある可能性がある。
- ・中空型枠の浮き上がりが確認されていることから、水抜き孔が脱落、移動、変形している可能性がある。
- ・床版下面に漏水・遊離石灰が発生していることから、水の浸入による中空型枠の滞水の可能性もある。

(3)調査方法及び結果

路面からの車載型電磁波レーダーによる探査も実施されており、その調査結果の抜粋を図- 4.1.4、図- 4.1.5 に示す。複数の中空型枠の浮き上がりが確認された。P12-P13 径間では最小床版厚 40mm、P14-P15 径間では最小床版厚 30mm であり、床版下面の損傷とおおむね位置が一致するとされている。

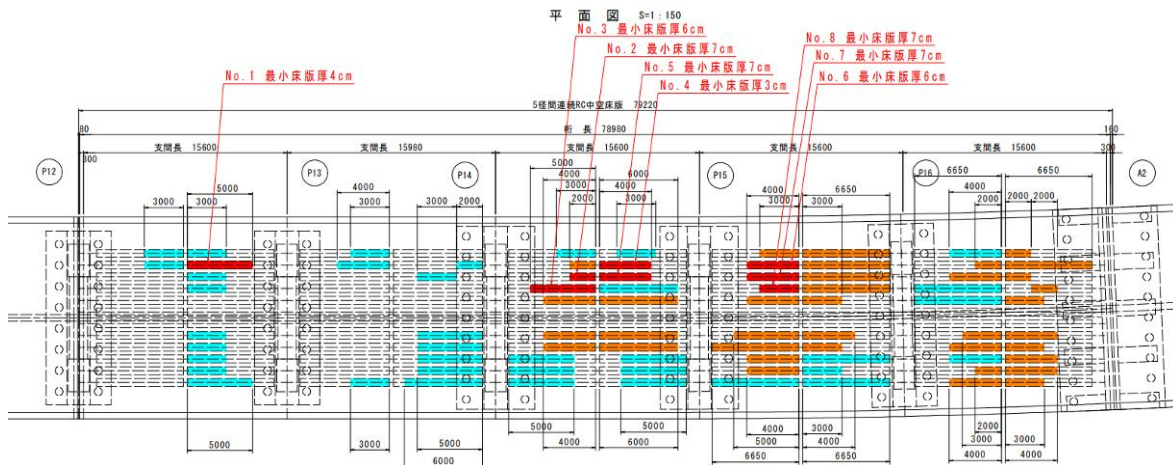
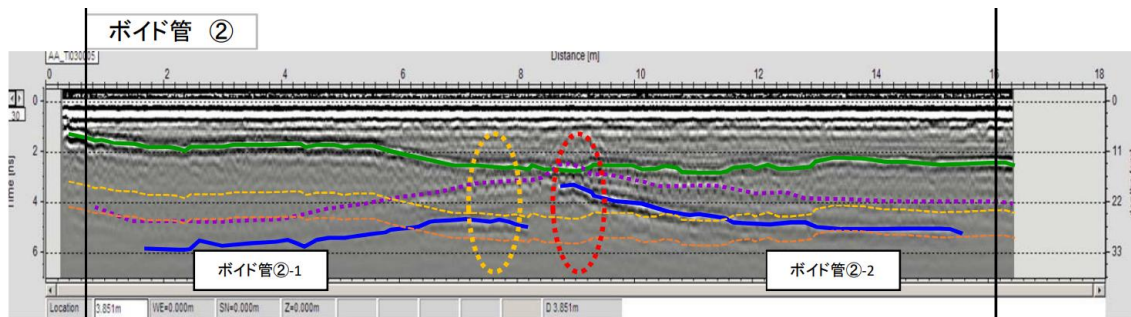
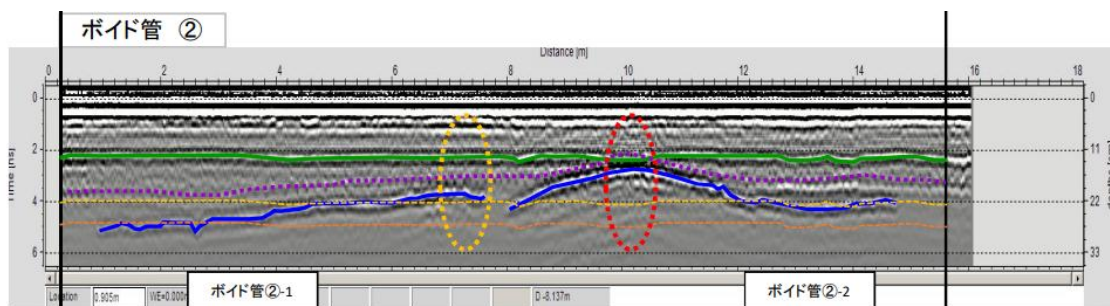


図- 4.1.4 中空型枠の浮き上がり調査一覧図

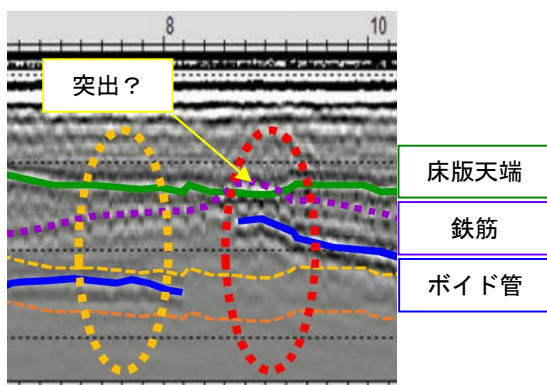
No. 1



No. 4



No. 1



No. 4

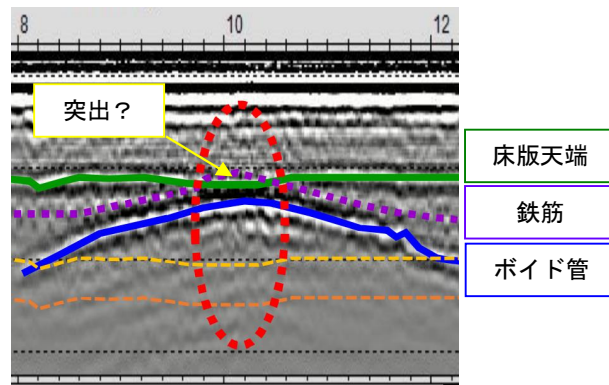


図- 4.1.5 中空型枠の浮き上がり調査（電磁波レーダー）結果（No. 1, No. 4）

4.2 中空型枠上部の床版厚計測事例

4.2.1 中空型枠上部の床版厚計測事例

(1)概要

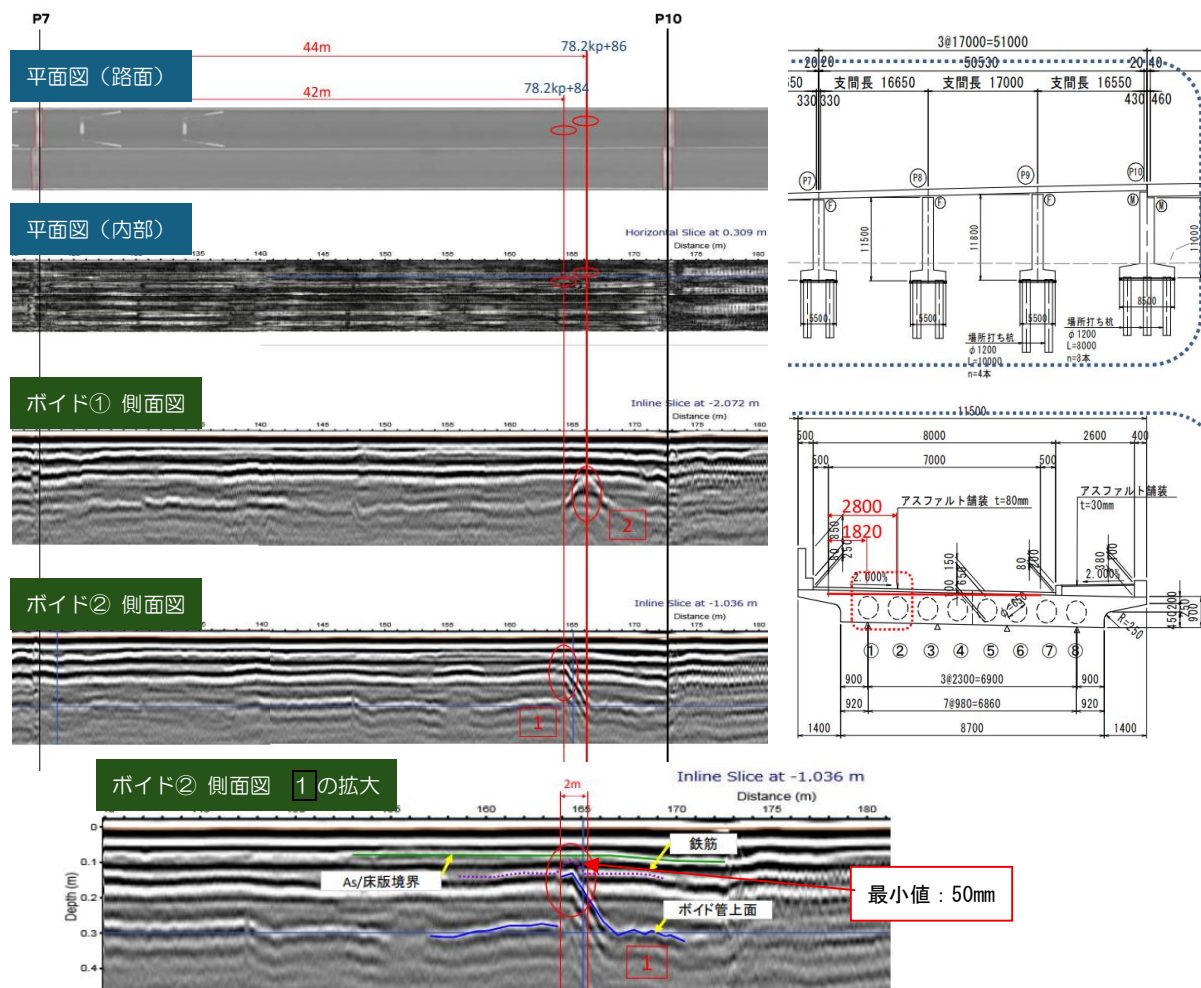
中空床版橋の中空型枠上部の床版厚（上床版厚）の計測事例として、H28 年度（2016 年度）に国土交通省が行った事例では、直轄道路の RC 中空床版橋を対象に、1 次調査として車載型電磁波レーダーを用いた調査が行われた。その結果、上床版厚が薄いと判定されたものについては詳細調査が行われた。本研究では、これらの調査結果を用いて、上床版厚の計測結果と電磁波レーダー調査画像の整理を行った。

本研究では主に 1 次調査の結果を用いる。車載型電磁波レーダーによる調査では、1 つの橋で複数点計測しているが、このうち最も小さい値を示したものを、その橋の上床版厚として扱っている。

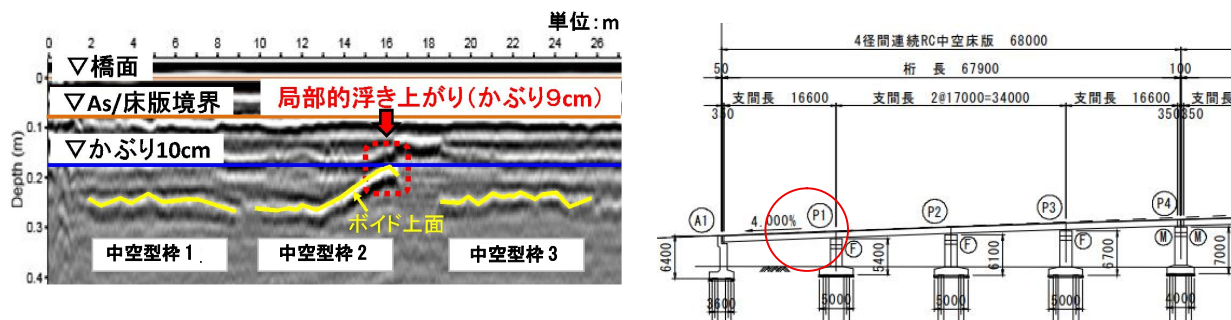
4.2.2 電磁波レーダーの調査結果の分析

車載型電磁波レーダーを用いた調査では、計測結果の平面図と側面図が得られ、床版厚を比較的簡易に計測できる。国土交通省の事例で得られた画像の例を以下に示す。

図-4.2.1(a)では、中空型枠が7m程度で等間隔に検出されていることが側面図から確認でき、その左端が局所的に浮き上がっている様子が見られる。(b)も同様に中空型枠が7m程度の間隔で検出されており、その右端が浮き上がっている様子が見られる。



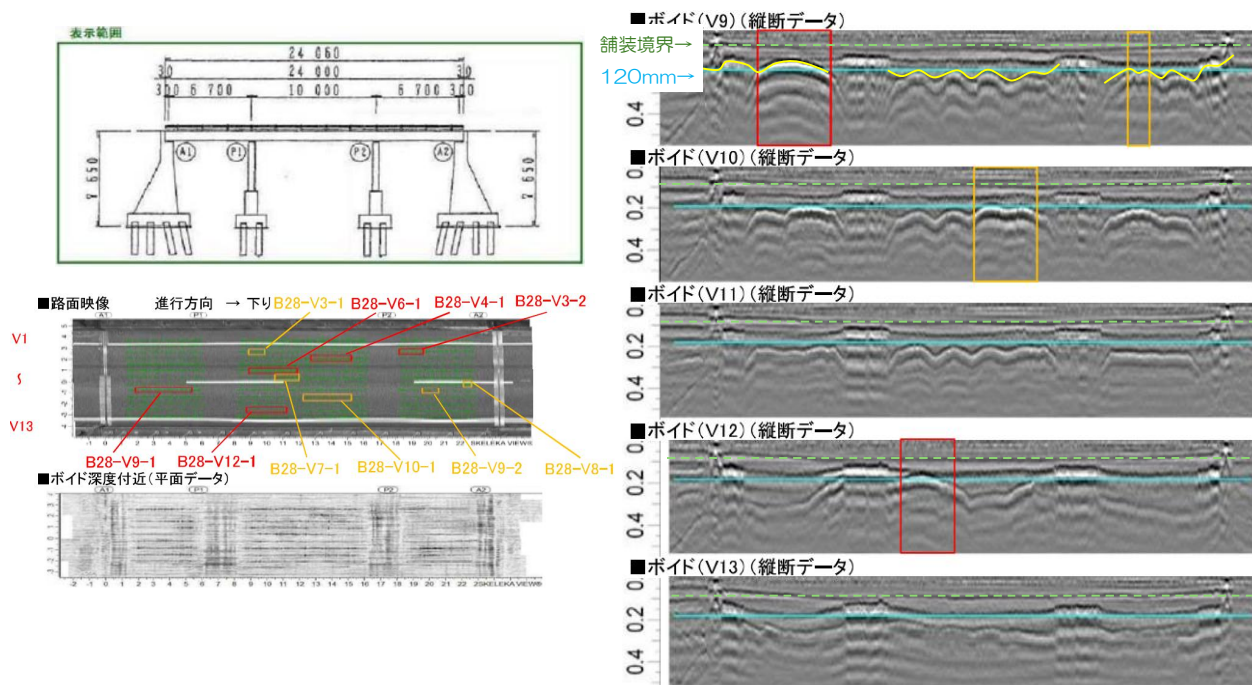
(a)局所的な浮き上がりの例 1



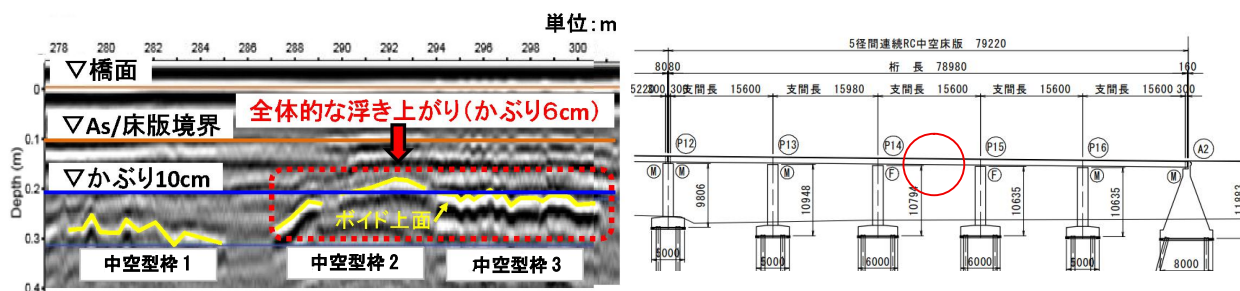
(b)局所的な浮き上がりの例 2

図-4.2.1 車載型電磁波レーダーによる測定結果の例 1：局所的な浮き上がり

また、図- 4.2.2 の(a)では、中空型枠がおおむね等間隔に検出されていることが確認でき、設計床版厚(150mm)よりやや薄い100~120mm 前後の位置に全体的に浮き上がっている様子が見られる。(b)も同様に一部の中空型枠が全体的に床版厚 60~100mm に浮き上がっている様子が見られる。



(a)全体的な浮き上がりの例 1



(b)全体的な浮き上がりの例 2

図- 4.2.2 車載型電磁波レーダーによる測定結果の例 2: 全体的な浮き上がり

以上のように、中空型枠の浮き上がりは、一部が局所的に浮き上がるケースと、一連のボイド管が全体的に浮き上がるケースが同じ橋の中で同時に見られた。局所的に浮き上がるケースでは、コンクリート打設時の衝撃や浮力による型枠の変形などが疑われる。一方、一連のボイド管が全体に浮き上がるケースでは、コンクリート打設後の浮力による全体的な浮き上がりなどが疑われる。この調査事例では、連続高架の同じ径間内でも浮き上がり量や浮き上がり方(全体か一部か)も異なっていた。

4.2.3 中空型枠上部の床版厚計測事例の分析

表- 4.2.1 に示すように、2016 年時点で、直轄道路の RC 中空床版橋については、調査実施橋梁数 388 橋に対して、上床版厚不足が確認された橋梁は 118 橋であり、約 30% で不足が確認された。上床版厚不足とは、電磁波レーダーで計測したその橋梁での最小値が、設計値よりも小さいものの全てを指しており、上床版厚不足と判断した全ての橋が、ただちに修繕が必要なわけではないことに留意する。表- 4.2.1 を図化したものを図- 4.2.3 に示す。地域によって中空床版橋の建設数は異なるものの、床版厚不足が検出された数に大きな差はなかった。

表- 4.2.1 直轄道路の RC 中空床版橋の上床版厚調査結果一覧

地 域	調査数	上床版厚 不足あり	上床版厚 不足なし	不足率 (%)
北海道	13	0	13	0.0
東北	17	2	15	11.8
関東	40	22	18	55.0
北陸	28	7	21	25.0
中部	47	25	22	53.2
近畿	135	21	114	15.6
中国	29	6	23	20.7
四国	50	24	26	48.0
九州	26	9	17	34.6
沖縄	3	2	1	66.7
全国計	388	118	270	30.4

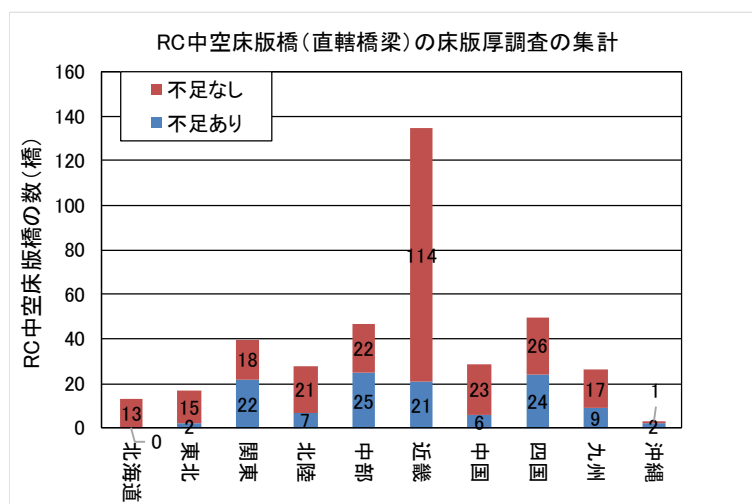


図- 4.2.3 H28 (2016) 年度に調査した直轄道路の RC 中空床版橋の上床版厚不足橋梁

次に、建設年代別の上床版厚不足件数を図- 4.2.4 に示す。上床版厚不足の件数は、1980 年代に建設されたものをピークに下がっており、2010 年代に建設されたものではゼロである。古い橋は既に

補修が行われていたり、撤去されたりしていることも考えられる。一方、新しい橋で上床版厚不足の件数が少ないのは、3.2 の技術基準類の調査結果で示したように、2001 年に PC 建協が発出した型枠固定方法に関する通達が関係していると考えられる。

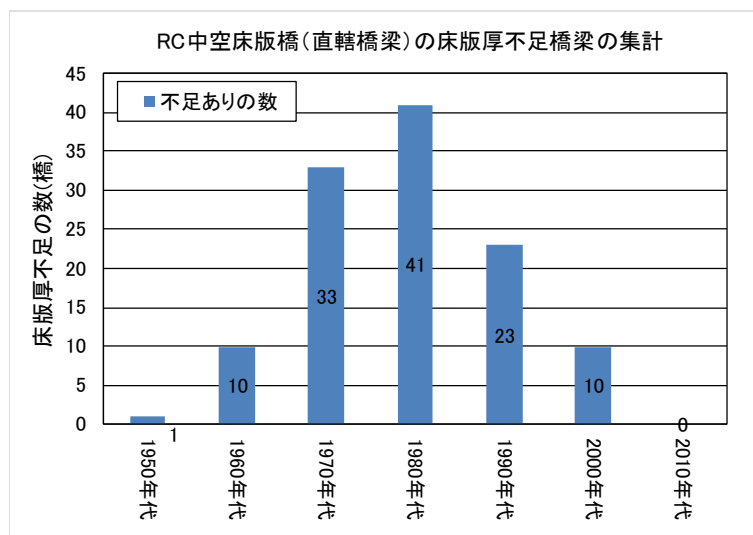


図- 4.2.4 建設年代別の上床版厚不足の数（RC 全数）

図- 4.2.5 は、RC 中空床版橋のうち、上床版厚不足と判断された全橋（118 橋）に対し、設計値と実測値の差分（不足量、あるいは浮き上がり量）を 10mm 単位で分類したヒストグラムである。これを見ると、施工時の型枠浮き上がりの程度に特徴的な量はなく、30mm～120mm 付近が満遍なく分布している。

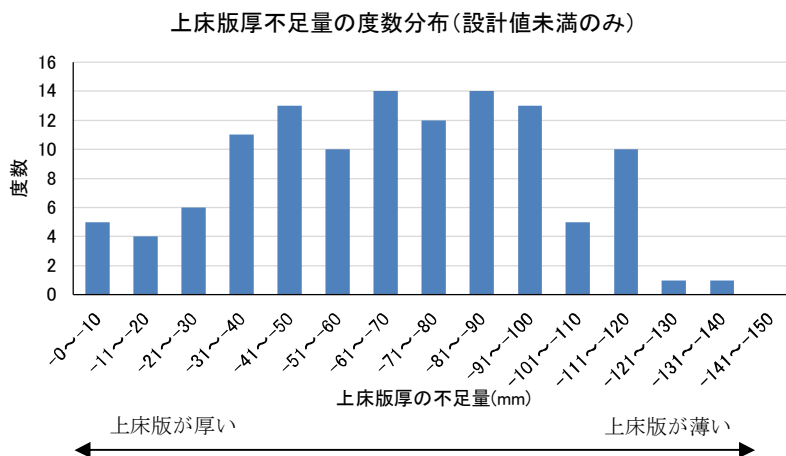


図- 4.2.5 上床版厚の不足量の度数分布（RC 全数）

次に、建設時の施工技術や知見の差が施工精度に及ぼす影響を確認するため、本研究にて全国の直轄 RC 中空床版橋（118 橋）に対し、設計値と実測値の差分（浮き上がり量）を適用基準別に分けたものを図- 4.2.6 に、供用年次で分けたものを図- 4.2.7 に示す。対象となった 118 橋は、最も新しいもので供用年次 2004 年（H14 道示）となっており、多くが 2000 年以前の橋である。

適用基準との関係性はあまり見られず、どの年代でも一定程度の浮き上がりが見られた。供用年次との関係についても傾向は変わらない。上床版厚不足が生じた橋の中では、建設年代による浮き

上がり量に傾向はないことが分かった。

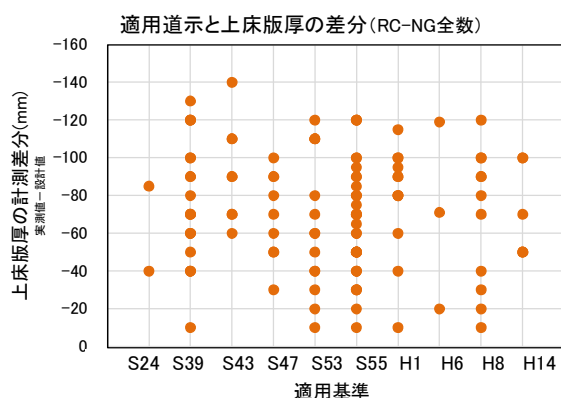


図- 4.2.6 適用基準との関係（RC 全数）

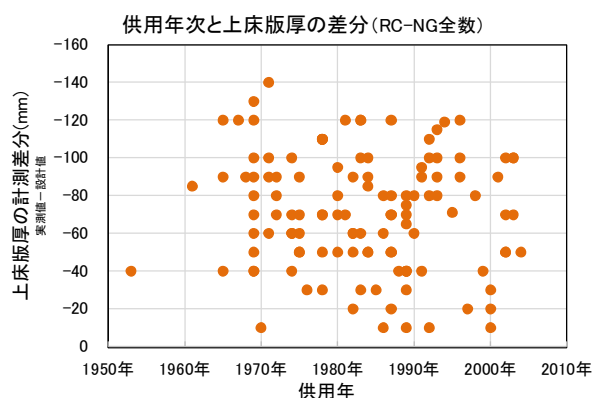


図- 4.2.7 建設年代との関係（RC 全数）

また、支間長や幅員といった橋の形状が、設計値と実測値の差分（浮き上がり量）に及ぼす影響を確認するため、全幅員との関係を図- 4.2.8 に、支間長との関係を図- 4.2.9 に示す。なお、適用基準の差も見るため、適用基準ごとに凡例を分けた。

全幅員については、幅に関わらず浮き上がり量は広く分布しており関係性は低かった。支間長についても、支間の長さに関わらず浮き上がり量は広く分布していた。これは、幅員が広く、支間長が長くなるほど浮き上がりのリスクは高くなると考えられるものの、リスクが高いほど型枠の固定方法や施工方法をより十分に検討すると考えられ、結果的に相関性が低いものと考えられる。適用基準別で見ても、幅員や支間長との相関性はほとんどなかった。

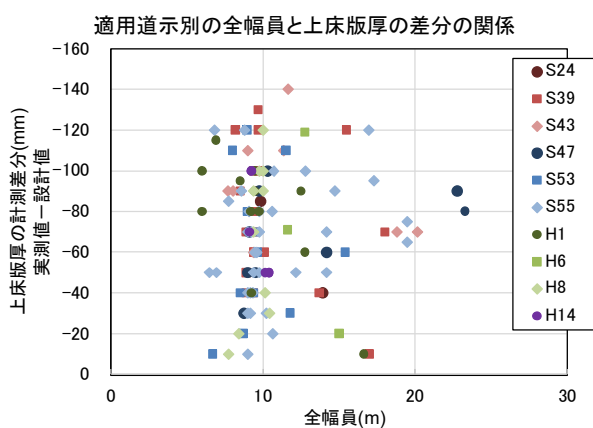


図- 4.2.8 全幅員との関係（RC 全数）基準別

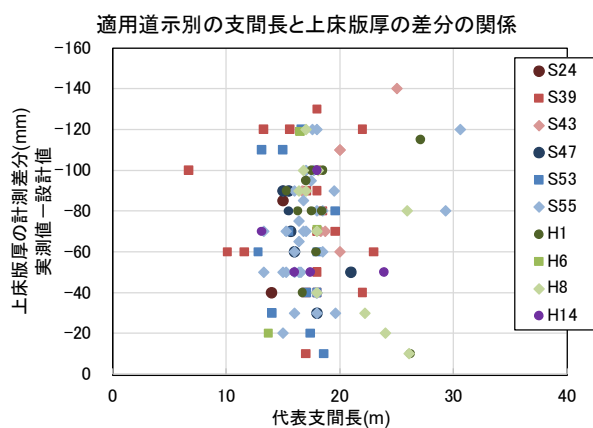


図- 4.2.9 支間長との関係（RC 全数）基準別

従って、今回収集したデータの分析からは、中空型枠の浮き上がり量は、建設年代や橋の構造（支間長や幅員）と強い相関は見られず、特徴的な要因は分らなかった。

4.3 中空型枠内の滞水に着目した変状事例

中空床版橋の内部に水が溜まる状態は、耐久性能の観点からは望ましいことではないが、実態として発生し得るのか、また、浮き上がり、厚さ不足との関係性はあるのか、外観に変状が現れることで、外観から内部での滞水も把握できるのか、という観点で事例を確認した。

4.3.1 滞水に関する変状事例①

(1) 橋梁概要

構造形式：3 径間連続ポストテンション方式 PC 中空床版橋

竣工年：1975 年(昭和 50 年)/活荷重：TL-20

橋 長：48.5m（支間長：10.000m+27.400m+10.000m）

線形条件：縦断勾配 3.0%、横断勾配 2.0%

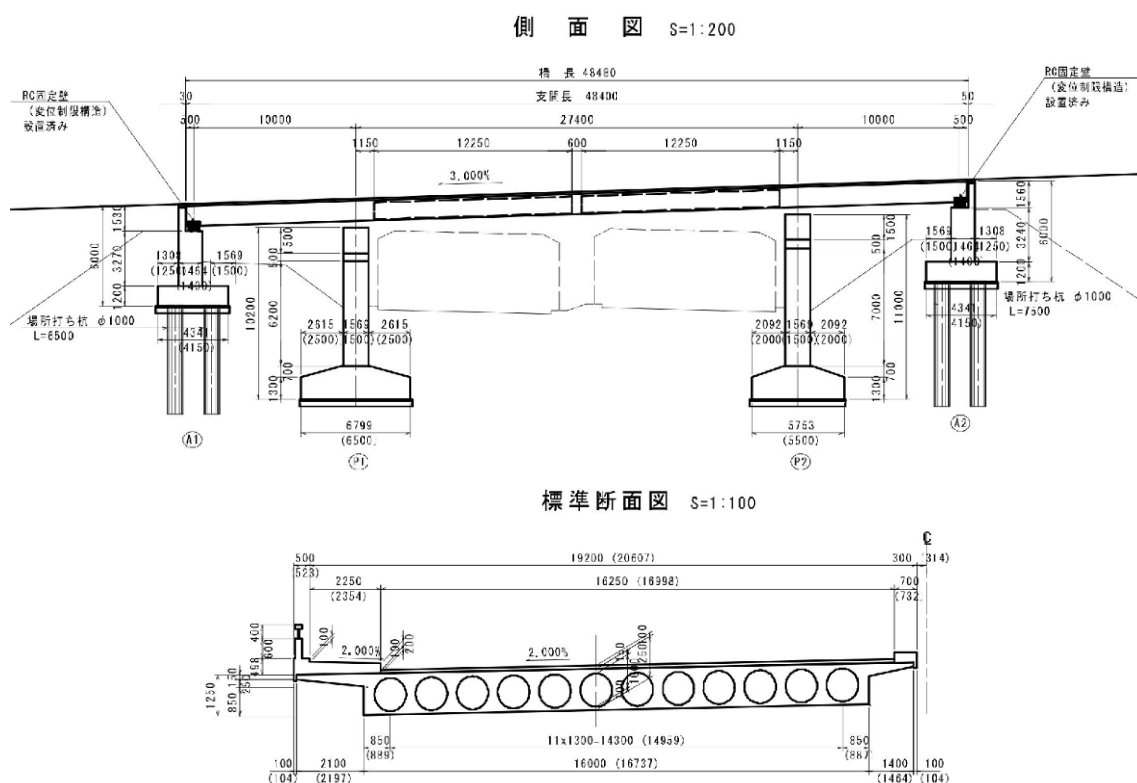


図-4.3.1 橋梁図（上段：側面図，下段：断面図）



写真-4.3.1 橋梁外観

(2)変状概要

当該橋梁の下面変状を写真-4.3.2、中空型枠内の滞水状況を写真-4.3.3に示す。



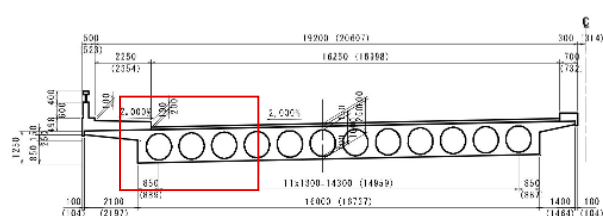
(a)全景（張出床版～床版下面）



(b)床版下面の状況



(c)床版下面の拡大



漏水痕は横断勾配の低い側（路肩側）
で多く見られた

写真-4.3.2 中空型枠の下面の変状

- ・中空型枠の変形により、中空型枠内の排水性が失われたことを確認している。コンクリート打設時の変形などが理由と考えられている。なお、排水量からほぼ満水状態であったと推察されている。また、施工時に水抜き孔が設置されていない箇所を確認している（別途実施された調査結果であり、本研究にて実施したものではない）。
- ・写真-4.3.1, 写真-4.3.2に示すように、中空床版橋の下面に遊離石灰や漏水痕を確認している。
(a)では張出床版下面の地覆境界部付近を中心に遊離石灰のようなものを確認している。(b)では、下床版全体に規則的な間隔で白色化していることが確認され、(c)のように一部を拡大すると遊離石灰や漏水痕と思われる変状を確認している。

(3)調査方法及び結果

下面に漏水痕が多く見られる路肩、かつ、縦断勾配が低い側のボイド管端部付近にて、内視鏡にて内部を観察している。



写真- 4.3.3 中空型枠内の滞水状況

- ・写真- 4.3.3 に示すように、漏水痕が見られた箇所のボイド管内部の様子をファイバーカメラにて撮影したところ、3 箇所中 2 箇所でボイド管が変形しており、変形していた 2 箇所では滞水している様子も確認している。少量であれば結露の影響も疑われるが、多量に滞水していることから内部に水が浸入している可能性があると考えられている。なお、1 箇所では滞水は見られなかったが、ボイド管下面に錆を確認している。
- ・この事例で行われた調査では、歩道部の調整コンクリートと床版コンクリートの境界部の隙間から橋面水が浸透した可能性があるかと推定されている（図- 4.3.2、写真- 4.3.4）。

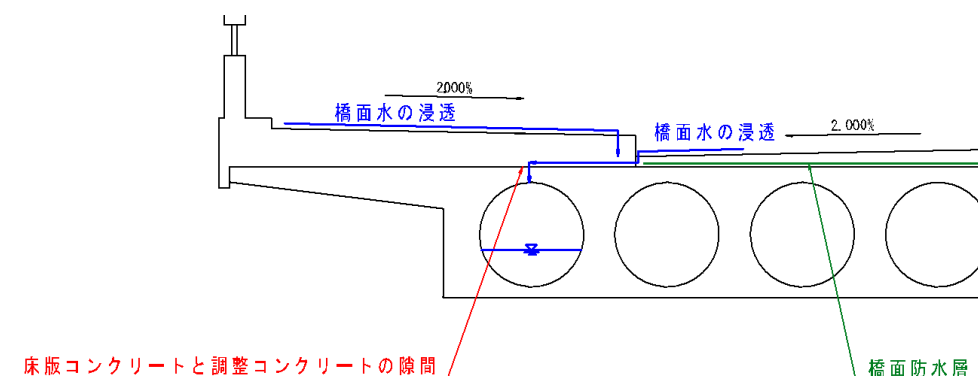


図- 4.3.2 中空型枠への水の浸入経路



写真- 4.3.4 境界部の隙間

(4)考察

- 本橋は、竣工が昭和 50 年（1975 年）に対し、平成 11 年（1999 年）に橋面防水が設置されているが、それ以前に中空型枠へ浸入した水が水抜き孔から排水されずに滞水したと推定した。
- 遊離石灰析出箇所が橋面の横断勾配（拌み）の低い側に集中しており、滞水箇所もその付近にあったことから、橋面からの水分供給が影響している可能性が考えられる。

4.3.2 滞水に関する変状事例②

(1) 橋梁概要

構造形式：3 径間連続ポストテンション方式 PC 中空床版橋

竣工年：1975 年(昭和 50 年) /活荷重：TL-20

橋 長：47.180m (支間長：9.700m+27.780m+9.700m)

線形条件：縦断勾配 0.5%、横断勾配 1～2%

本事例は、東北地域で実施された調査で、型枠内部に滞水が確認されたものである。

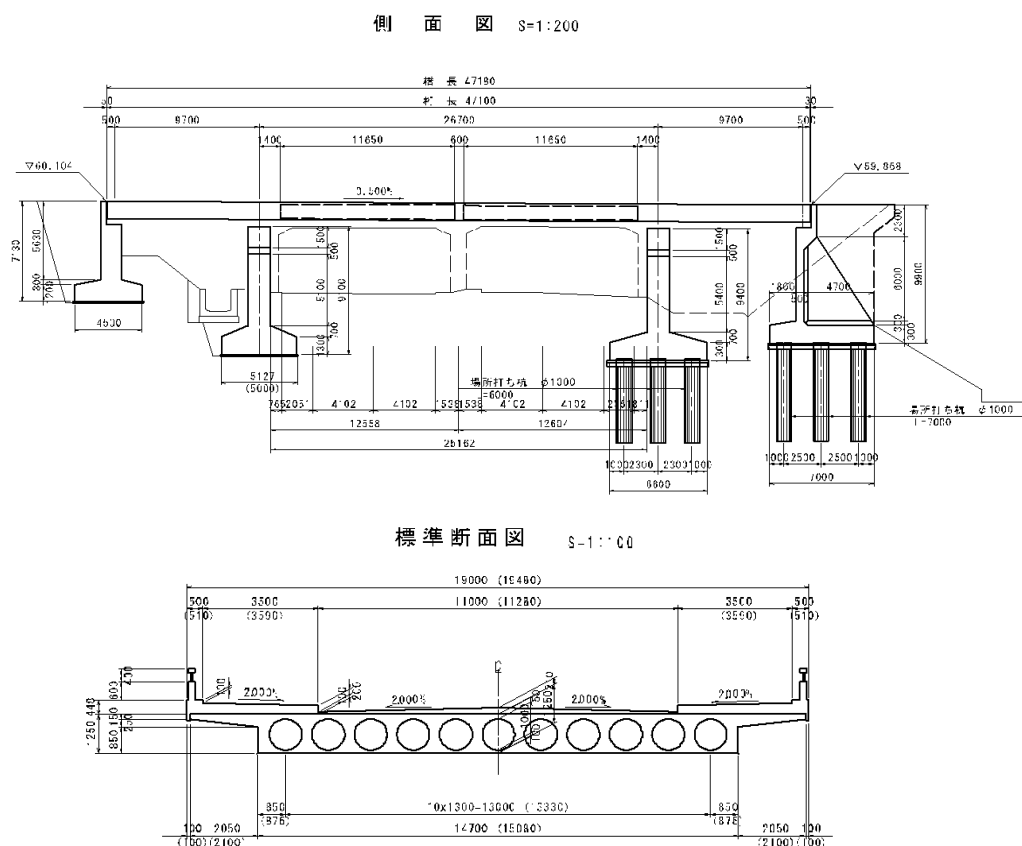


図-4.3.3 橋梁図（上段：側面図，下段：断面図）



写真-4.3.5 橋梁外観

(2)変状概要

当該橋梁の下面変状を写真- 4.3.6、中空型枠内の滞水状況を写真- 4.3.7、写真- 4.3.8 に示す。



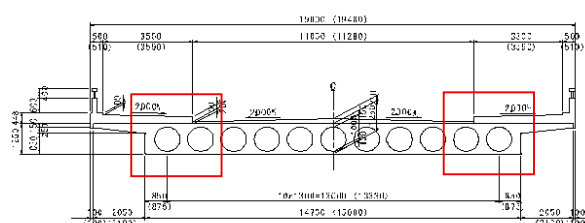
(a)全景（張出床版～床版下面）



(b)床版下面の状況



(c)床版下面の拡大



遊離石灰は横断勾配の低い側（拌み勾配）で多く見られた

写真- 4.3.6 中空型枠の下面の変状

- ・写真- 4.3.6 に示すように、中空床版の下面に遊離石灰、ひび割れ、漏水跡、及び錆汁、並びに塗装のはがれを確認している。(a)では床版下面の一部に塗装の剥がれや汚れ、(b)では床版下面の塗装剥がれ部に遊離石灰が見られ、(c)のように一部拡大すると遊離石灰はひび割れ部から出ており、錆汁のような汚れも確認している。

(3)調査方法及び結果

遊離石灰が見られ、縦断勾配が低い側のボイド管端部付近にて、内視鏡にて内部を観察している。

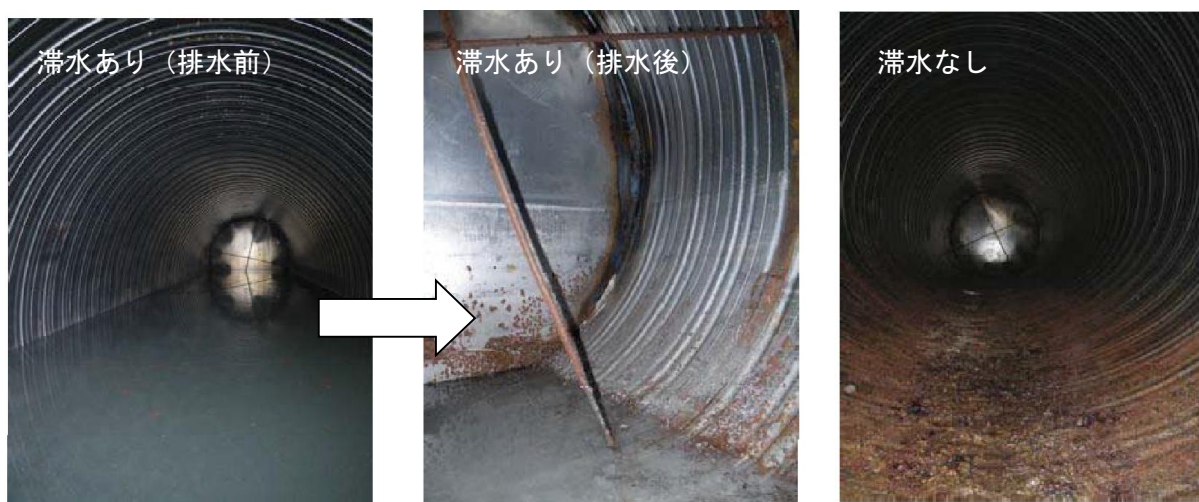


写真- 4.3.7 中空型枠内の滞水状況



写真- 4.3.8 既設水抜き孔の状況

- ・中空型枠内に滞水が確認された。滞水は約 350mm 程度であり、水抜き孔は設置されていたが、水抜き孔からは常時少量ずつの排水が確認されている。
- ・写真- 4.3.7 に示すように、遊離石灰が見られた箇所のボイド管内部の様子をファイバーカメラにて撮影したところ、ボイド管の 4 割程度に水が満たされていたとされている。その後、水抜き孔を清掃して排水したところ、ボイド管の一部に錆を確認している。

(4) 考察

- ・遊離石灰析出箇所が橋面の横断勾配（拌み）の低い側に集中しており、滞水箇所もその付近にあったことから、橋面からの水分供給が影響している可能性が考えられる。

4.3.3 滞水に関する変状事例③

(1) 橋梁概要

構造形式：6 径間連続 RC 中空床版橋

竣工年：2001 年(平成 13 年)/活荷重：B 活荷重

橋 長：99.500m (支間長：6@16.400m)

線形条件：縦断勾配 4.0%、横断勾配 2%

本事例は、国土交通省関東地方整備局で実施された調査で、滞水確認の調査は実施していないものの、変状から滞水が疑われた事例である。

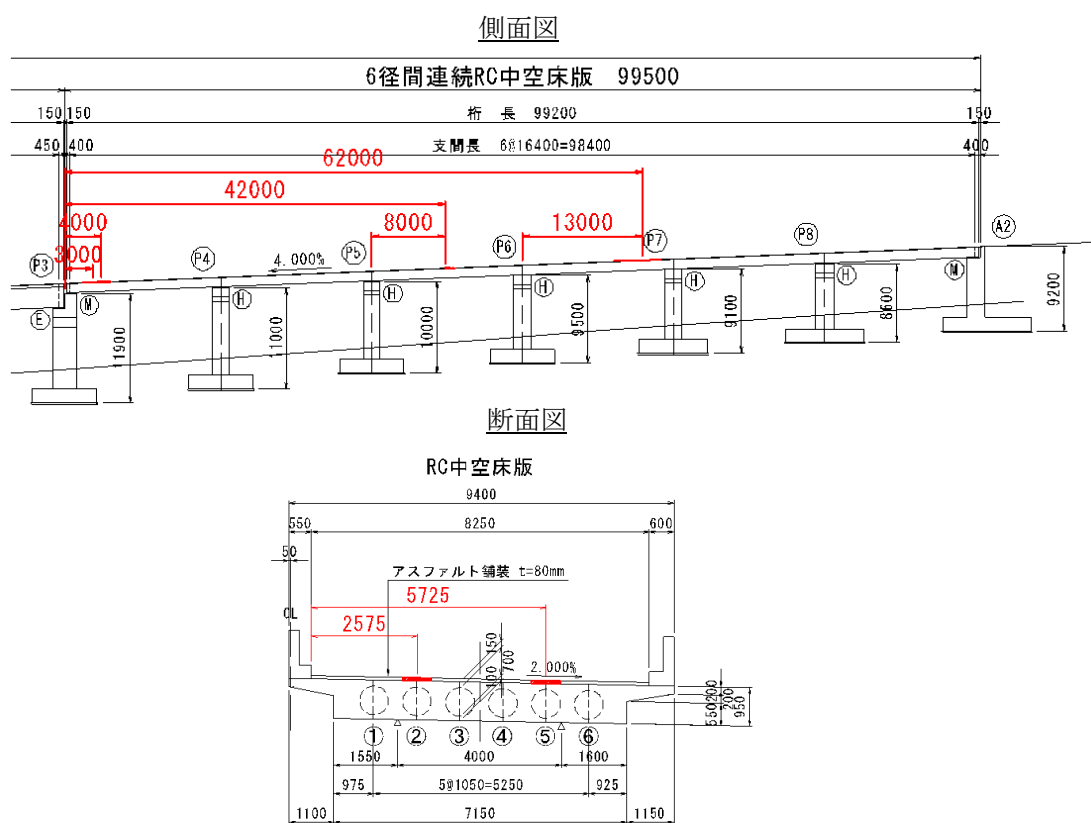


図- 4.3.4 橋梁図（上段：側面図，下段：断面図）



写真- 4.3.9 橋梁外観

(2)変状概要

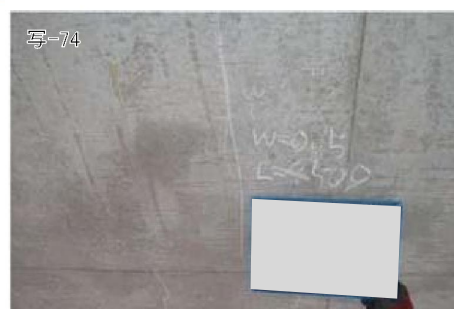
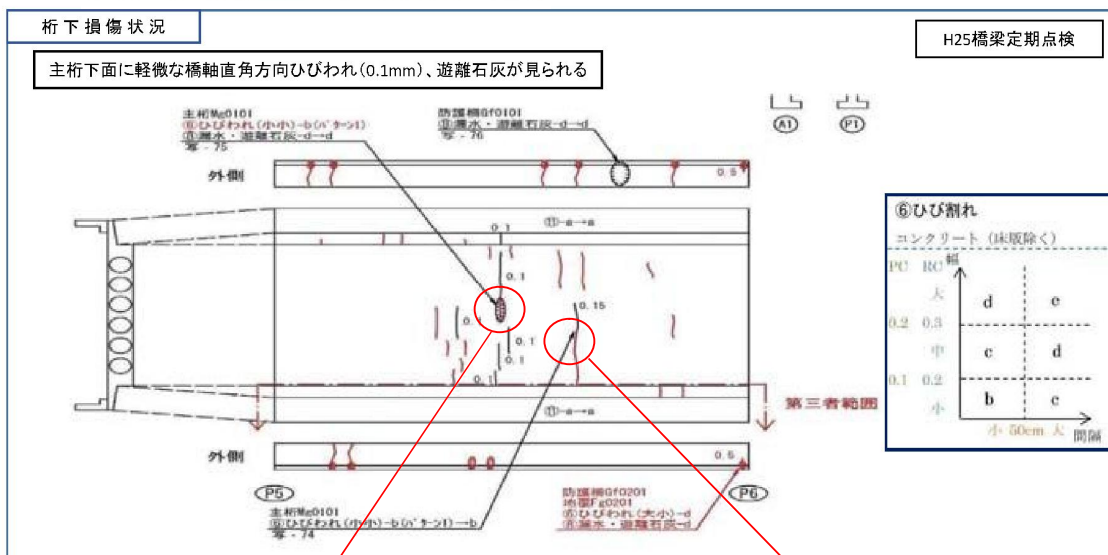
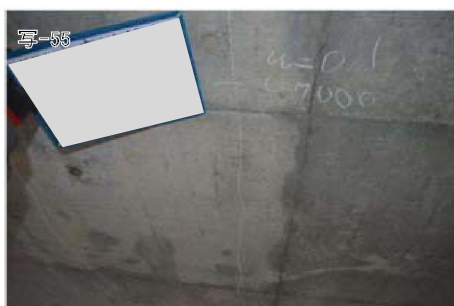
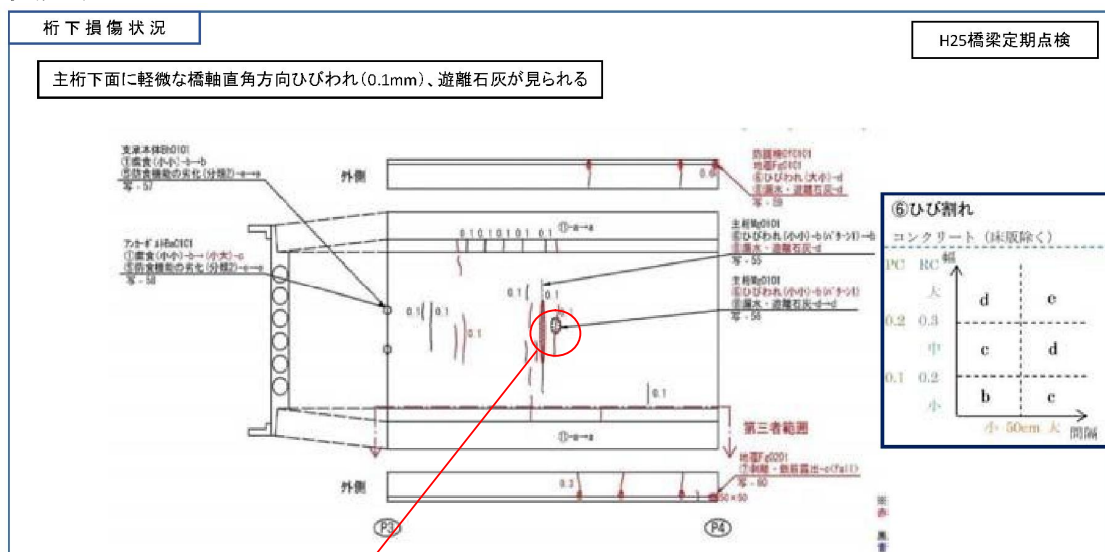


写真- 4.3.10 床版下面変状状況(漏水・遊離石灰、ひび割れ)

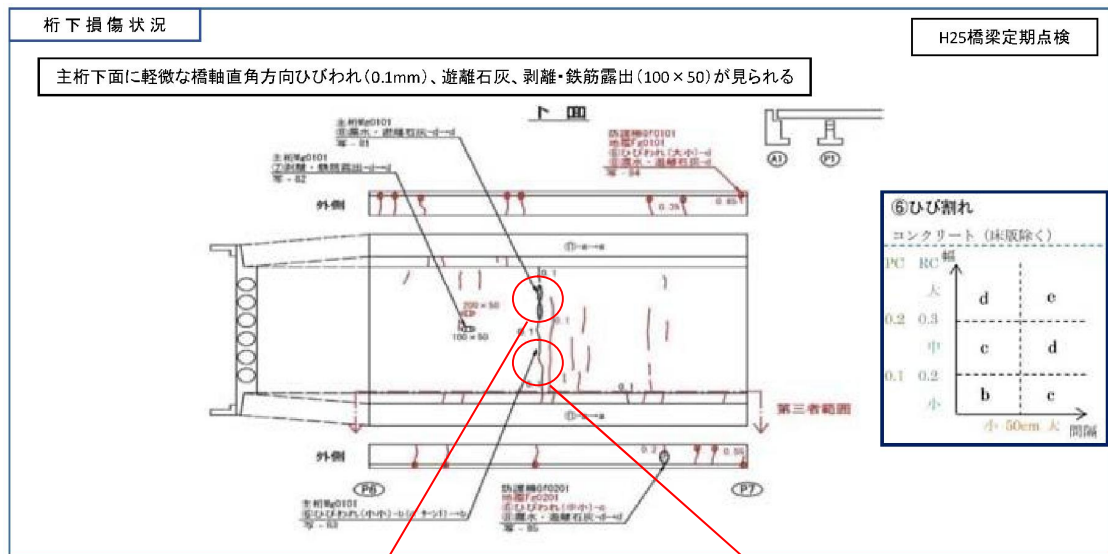


写真- 4.3.11 床版下面変状状況

- 床版下面に橋軸直角方向に複数の軽微なひび割れ（0.1mm）及び漏水・遊離石灰の発生が確認されている。

(3)調査方法及び結果

- この橋は中空型枠の浮き上がりの調査対象でもあり、中空型枠の床版厚を計測した結果、各径間の最小上床版厚は P3～P4：70mm、P5～P6：90mm、P6～P7：60mm であったとされている。（変状位置との一致性は不明）

(4)考察

- 写真- 4.3.10、写真- 4.3.11 は、床版下面に漏水・遊離石灰が発生していることから、水の影響を受けていると思われる。特に、写真- 4.3.10 の左下の写真では、水抜き孔の周辺に水が滲んだような跡が見られており、中空型枠内に少なくとも水分が存在することが疑われる。
- 定期点検の結果を確認すると、全体に軽微なひび割れは見られるものの、水の影響によると考えられる変状が見られない径間も存在している。しかし、浮き上がりの調査で上床版厚の不足が確認された径間はいずれも漏水痕や遊離石灰が見られていることから、全体に変状が軽微であっても、水の影響によると考えられる変状がある場合には、浮き上がりの可能性も疑われる。

4.4 中空型枠の浮き上がりや滞水の本研究での事例収集に関するまとめ

本章では、中空床版橋における中空型枠の浮き上がりや変形の実態を整理し、これに基づき、浮き上がり・変形に関する考えられる要因を考察する。

4.4.1 中空型枠の浮き上がりについて

中空型枠の浮き上がりや上部の踏み抜きについては、直轄の RC 中空床版橋（全国 388 橋）を対象とした非破壊検査による床版調査結果では、全体の 3 割程度で、床版厚が設計値に比べて不足している可能性があることが明らかになった。また、施工年代別に集計した結果、上床版厚不足の検出数は 1980 年代をピークに新しくなるほど減少しており、2010 年代が最も少なかった。新しい橋で上床版厚不足が減少しているのは、平成 13 年（2001 年）に PC 建協が通達した「中空型枠の固定方法」や「施工管理方法」にて改良がなされた効果が表れているものと考えられた。

上床版厚不足が見られた 118 橋に絞ると、不足量にはばらつきが大きく、橋の建設年代や橋の構造（支間長、幅員）との関連は見られなかった。また、事例調査からは、一つの中空型枠上でも不足量は一定でない場合もあり、中空型枠が軸方向に勾配を有するように傾斜しているとき（事例②No.1）や端部では所定の位置にあるものの中間部が上部に移動しているとき（事例②No.4）もあった。

中空型枠の浮き上がりについては、舗装面における外観上で変状が確認されていない場合でも、電磁波レーダー探査により、中空型枠の浮き上がりが確認された事例もあった。なお、中空型枠の断面変形そのものについては、今回の浮き上がりに関する調査では確認できていない。

4.4.2 中空型枠内の滞水について

数少ない事例調査の範囲ではあるが、実際に滞水が起きていた事例では、事例①に示すように水抜き孔がないケースや、事例②のように水抜き孔はあるものの詰まりが生じているケースが見られた。また、事例③のように滞水が生じていると疑われる橋の上床版厚は設計値よりも小さく、浮き上がりが生じているケースもあった。

実務で点検等を行うにあたっては、滞水事例で見られた変状と、滞水の要因となる要素の 2 点について確認するのがよいと思われる。滞水事例で見られた変状に着目して整理すると、

- ・全ての滞水事例（疑いを含む）で、滞水を確認した位置の周辺の下面には漏水痕や遊離石灰などの水の痕跡が見られ、比較的範囲や程度の大きいものが多かった。
- ・特に、事例①、事例②では、橋面の横断勾配の低い側と、下面の漏水痕などの変状の位置が平面的に一致する傾向にあった。これは、橋面の水が横断勾配の低い側に溜まりやすく、防水層の劣化部や、歩車道境界の界面などから床版に水が供給されている可能性が考えられる。
- ・事例②、事例③のように水抜き孔がある場合には、その周辺が濡れていたり、苔や錆が見られたりした。
- ・事例③では、滞水が疑われる箇所を含む径間において、中空型枠の浮き上がりも確認された。
- ・事例①では、中空型枠の変形も確認された。

これらのことから、点検等で水に関わる変状が見られた場合は、その程度や範囲を確認するとともに、橋面との関係性を確認したり、水抜き孔周辺の様子を確認することで、滞水している可

能性の有無をある程度は判断できると思われる。

次に、滞水の要因となる要素について考察する。中空型枠の滞水の発生は、中空型枠への水の浸入、水抜き孔の排水性の低下が必須条件と考えられる。そのため、2つの条件に分類し、滞水事例を踏まえて、発生要因を整理する。

(1)中空型枠への水の浸入

中空型枠への水の浸入は、橋面防水層が未設置、又は防水機能が低下していることが影響している。特に、防水層の未設置、防水機能が低下している状態で、床版コンクリート天端面の平坦性が確保されていない場合、舗装下のコンクリート天端面の凹部へ雨水等が容易に滞留する。その滞留箇所に通行車両の輪荷重が繰り返し作用することにより、舗装面のひび割れやポットホールが発生するとともに、中空型枠上部やその周囲のコンクリートに微細なひび割れが発生する。

それらの変状を放置すると、さらに雨水や凍結防止材などの外的因子が容易にコンクリート面に浸入すると同時に、輪荷重の繰り返し作用等により、中空型枠上部やその周囲に発生したコンクリートのひび割れ・土砂化が進展し、更なる水等の浸入が加速され、ひび割れが中空型枠まで拡大して到達する。これにより、舗装面から中空型枠までの水の浸入経路が形成されて、中空型枠へ水が浸水する可能性が高い。

また、事例では確認されていないが、その他に中空型枠内の暖かい水蒸気を多量に含んだ空気が冷やされた場合（中空型枠内とコンクリートに温度差が生じた場合）に、結露が生じる。この自然現象が繰り返されることで、滞水や鋼製中空型枠に発錆が生じる可能性も否定できない。

(2)水抜き孔の排水性低下

①中空床版橋の施工時、水抜き孔自体がそもそも配置されていない。また、施工不良として、施工時に水抜き孔を設置していたが、中空型枠の浮き上がり・移動及びコンクリートの打設・締固め作業により水抜き孔が脱落・変形・移動し、排水性が低下する可能性がある。

②縦断勾配（排水勾配）を有する中空床版橋であるが、中空型枠下面の膨れ上がる変形^{※1}が生じ、中空型枠内へ浸入した水の排水を阻害している。

※1 変形要因：打設時にバイブレータをかけ過ぎたことで、コンクリートが流動し、型枠下面を押し上げたと推定される（図-4.4.1）。

③水抜き孔の目詰まり等により排水性が低下している。

このことから、点検等で着目すべき点として、防水層の施工時期及び歩車道境界部の施工範囲、並びに水抜き孔の有無が考えられる。床版防水は、「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，昭和62年¹²⁾」が発刊された1987年頃から徐々に適用がなされたものと考えられるが、平成14年の道路橋示方書改定までは必須事項ではなかったことから、既設橋に対しては長期間床版防水がない状態であった可能性も考慮した方がよい。なお、歩車道境界部は蹴上がり部まで施工する必要がある、処理が不十分な場合は水の浸入経路となり得るため、施工範囲についても確認するのがよいと考えられる。また、点検等では水抜き孔の有無や目詰まりがないかを確認することも重要と考えられる。

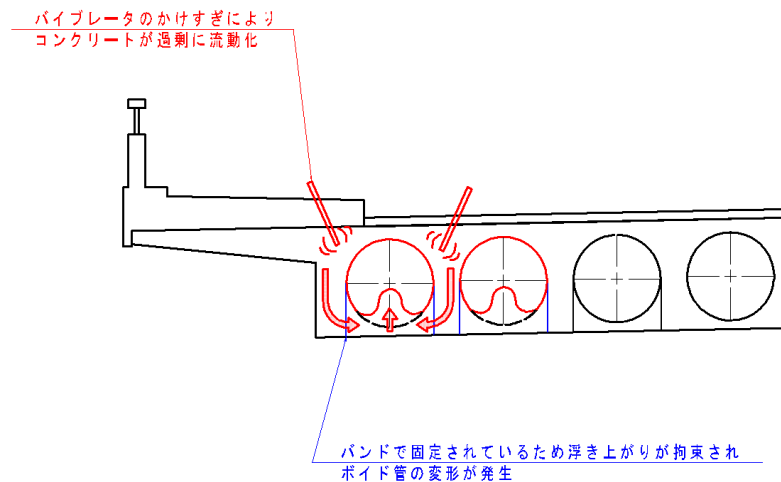


図- 4.4.1 中空型枠の変形イメージ

滞水発生メカニズムのまとめとして、中空型枠の滞水発生と各要因の関係性を示す（図- 4.4.2）。中空型枠内の滞水は「水が浸入すること」と、「水が排水されないこと」の2つの事象が重なることで生じると考えられる。

水の浸入に関しては、中空型枠内での水分の発生、または外部からの水の浸入が挙げられる。一方、水の排出に関しては、水抜き孔が無い、または変形や目詰まりによる排水性の低下が挙げられる。滞水発生までの要因を「(1)水の浸入」と「(2)排水不良」に大別し、これらが重なることで滞水が生じることを整理する。

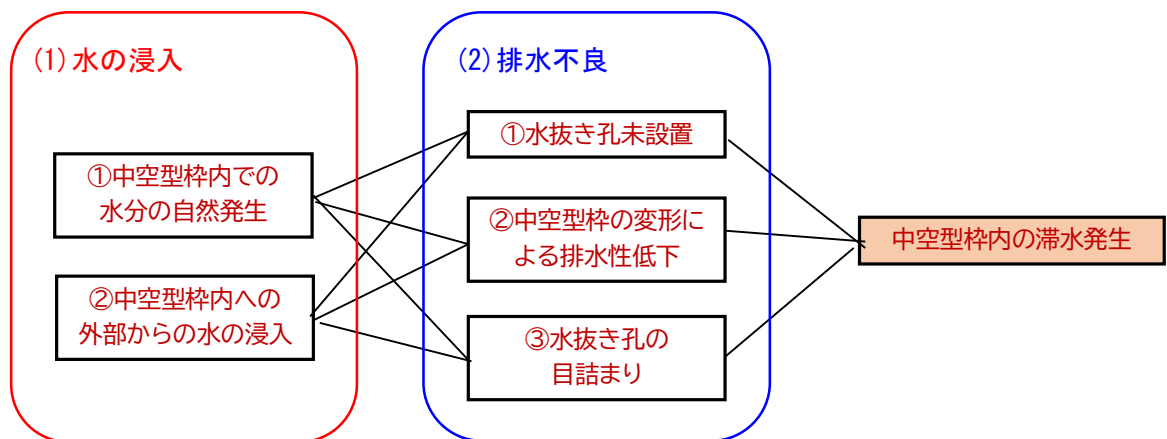


図- 4.4.2 滞水発生と各要因の関係性

【4 章の参考文献】

- 12) (社) 日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，昭和 62 年 1 月

5章. 浮き上がりが生じた中空床版橋の耐荷性能に関する既往研究の調査

5.1 概要

現状では、局所的に上床版厚が不足する既設の RC 中空床版橋の耐荷力の照査方法が明確でない。本章では RC 中空床版橋の耐荷力を照査する方法の既往の研究を調査して分析した。6 章では分析の結果必要と思われた事項について本研究で解析を実施し、中空床版橋の耐荷性能及び耐久性能に関する知見の獲得を試みた。

5.2 既往の研究における中空床版の耐荷力検討モデルと評価方法

5.2.1 中空型枠の浮き上がりにより踏み抜きに至る過程

既往の研究では例えば、飯土井らの文献²⁾にて中空型枠の浮き上がりにより踏み抜きに至る過程を考察している。以下にその概要を示す。

① 浮き上がりの発生

中空型枠の固定不足により、コンクリート打設時に変形したり、型枠が浮力によって浮き上がることで、上床版厚が設計値を下回ると考えられている（図- 5.2.1）。

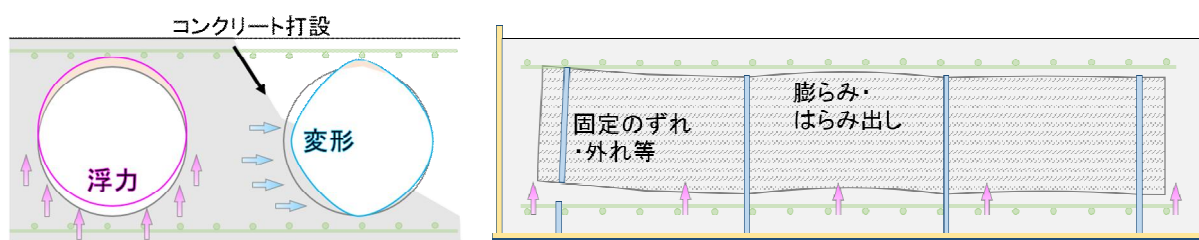


図- 5.2.1 浮き上がりイメージ図

② 耐荷機構の喪失によるひび割れの発生

中空床版橋の上床版は、他の形式の床版の輪荷重等の荷重伝達機構とは異なり、中空型枠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考えられている。上床版厚の不足によりアーチアクションとして挙動しなくなると、中空型枠中心付近の上床版下面や中空型枠中心から離れた上床版上面に引張応力度が発生し、ひび割れが生じ、版の薄い内側に進展すると考えられている（図- 5.2.2）。

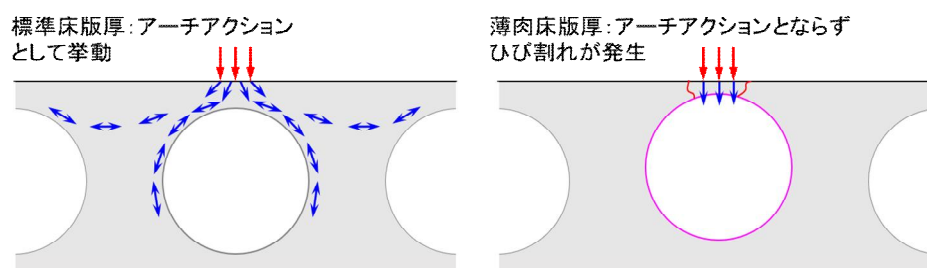


図- 5.2.2 輪荷重に対する床版の耐荷機構と想定されるひび割れ発生²⁾を参考に作成

③ ひび割れの進展と踏み抜きの発生

さらに中空型枠上の上床版厚が薄くなると、中空型枠中心上の上床版部位では、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えた場合、ひび割れが貫通し、路面及び床版の陥没に至ると考えられている。この現象は、上床版厚が薄くなるほど、中空型枠の径が大きくなるほど顕著となると考えられている。

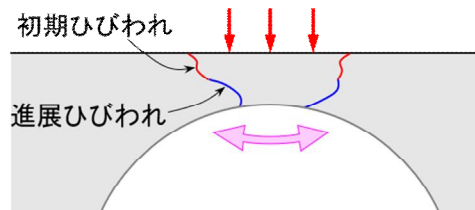


図- 5.2.3 輪荷重に対する床版の耐力機構と想定されるひび割れ発生 ²⁾を参考に作成

5.2.2 既往の研究における耐力力検討モデルと試算

(1) 試算モデル

既往の研究（文献 3）では 5.2.1 に示した過程を前提として、中空床版橋がアーチ効果を失った場合の耐力力のケーススタディを行っている。

上床版厚が減少した部材に対して、片持ち梁として、以下の耐力機構が提案されている。

- 中空型枠側端部を一端固定とした片持ち梁に対する、橋軸直角方向の上側鉄筋を引張鉄筋とした曲げ降伏耐力
- 同様な片持ち梁に対する、コンクリートせん断応力度が最大値となるせん断圧縮破壊耐力

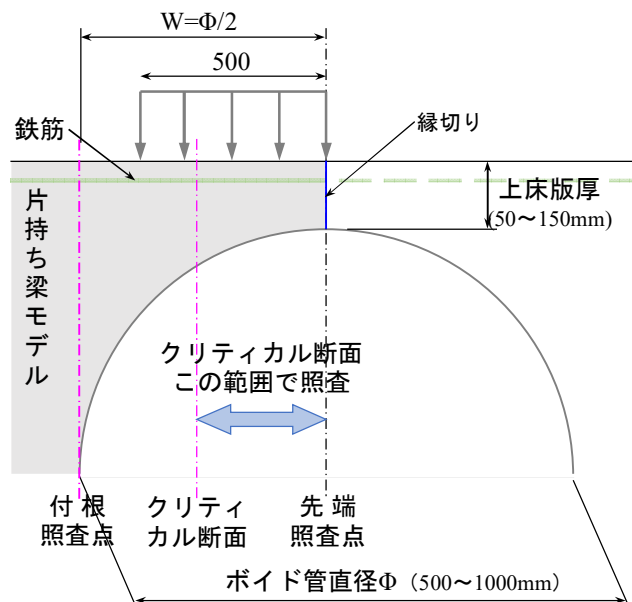


図- 5.2.4 中空型枠上部検討における片持梁モデルの概念 ²⁾を参考に作成

(2) 試算結果

試算に当たっては、RC 中空床版で採用実績が多い構造条件をベースに試算された。このうち 1 ケースについて結果を引用して示す。

【試算条件】

鉄筋許容応力度	$\sigma_{sa}=140\text{N/mm}^2$
鉄筋径	D13 (SD295)
鉄筋ピッチ	@150mm
鉄筋かぶり	50mm
ボイド径	$\phi 1000\text{mm}$
作用荷重	140kN
設計基準強度	24 N/mm ²
平均せん断応力度	3.2 N/mm ²

【片持梁の曲げに対する必要床版厚】

必要床版厚 135mm 必要（クリティカル断面）

【片持梁のせん断に対する必要床版厚】

必要床版厚 65mm（クリティカル断面）
 110mm（先端断面）

※ただし、先端のせん断の照査は、せん断破壊により連続性が絶たれて片持ち梁となった時点で支持点がないため、せん断力は発生しないと考えられる。

5.3 既往の研究を踏まえた本研究での検討方針

RC 中空床版橋は、活荷重に対してアーチアクションにより耐荷機構を発揮すると考えられている。この場合、中空型枠の変形や浮き上がりで床版厚が小さくなると、アーチアクションとしての挙動が小さくなる。アーチアクションが小さくなると、2 点固定梁のような挙動に変化するので、片持ち梁として扱うことで、耐荷力を小さめに評価できると考えられている。

一方で、文献 3) の検討では、耐荷力に主眼が置かれており、耐久性については別途検討が必要であることが言及されている。

版部材として見たときに、せん断、引張による疲労以外にも、圧縮域の繰り返し作用による疲労が懸念される。特に中空型枠の浮き上がり等で上床版厚が薄くなると、輪荷重に対して圧縮域となる上縁側のコンクリートの疲労耐久性が低下する恐れがある。そこで、本研究では、疲労耐久性について検討することとした。

【5 章の参考文献】

- 2) 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， pp634～pp645，2019 年 3 月

6章. 床版厚が耐久性に及ぼす影響に関する数値解析

6.1 踏み抜きに対する数値解析による検証

6.1.1 中空床版橋の耐久性の観点からの検討

5章に示したとおり、中空床版橋の耐荷力に関しては、中空型枠上部の床版厚（上床版厚）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が考えられる²。また、既往の研究³⁾では実験的な検討も行われており、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、上床版厚が薄く載荷位置が中空型枠直上に近いほど、破壊荷重が低くなるという結果が得られている。

耐久性能の観点から見ると、中空床版橋のような耐荷メカニズムでは、繰り返しの圧縮に対する材料の耐久性が関係し、応力振幅中心や変動が小さければ、疲労耐久性には有利に働くと想定される。この点、通常のRC床版のコンクリートが、移動する輪荷重による繰り返しのせん断・引張り応力の繰り返しを受けることとは様相も、疲労耐久性に与える影響も異なる。また、中空型枠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。

それでも、中空型枠の位置と輪荷重の載荷位置の関係性、中空型枠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。そこで、本章では、輪荷重を繰り返し受けるコンクリート中空床版橋の中空型枠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。

6.1.2 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

1) 解析手順

中空床版橋では輪荷重載荷時の応力分布が局所的であることから、本検討では支間中央部の定
点載荷として図- 6.1.1 に示すステップで解析を行う。

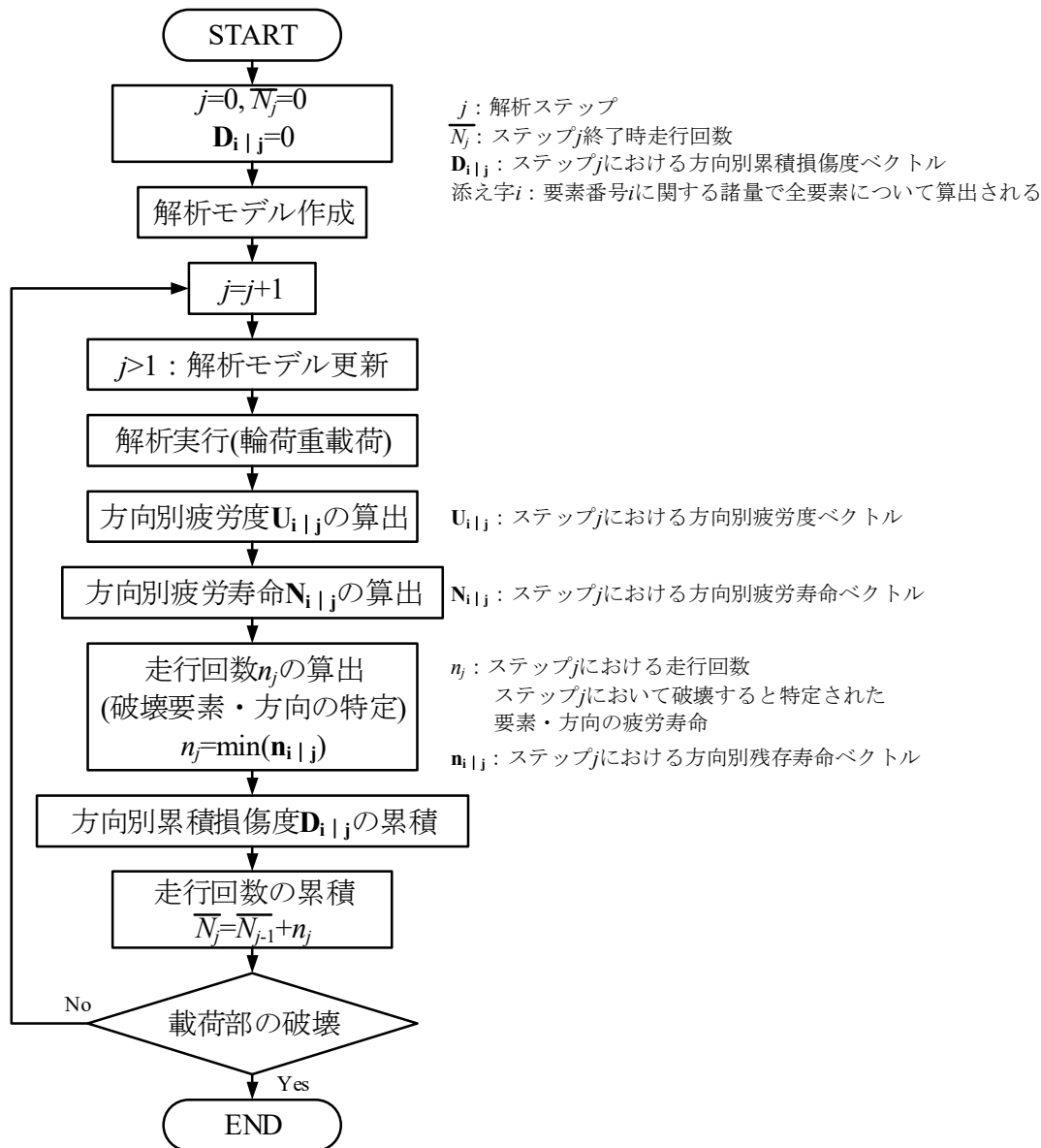


図- 6.1.1 解析フロー図

2) 検討対象の断面形状

三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、中空型枠径 D は 700mm、中空型枠間隔 d は 900mm とした。上床版厚は 図- 6.1.2(a)及び(b)に示す断面-1 及び断面-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。中空型枠の浮き上がりは 4.2.2 に示したとおり、局所的に浮き上がる事例もあるが、本検討では橋軸方向に様に浮き上がった場合を想定した。

モデル化では簡単のため、張出し床版、地覆、高欄及び舗装等は省略し、支間全長にわたり等断面構造で中間隔壁及び端支点横桁等も省略する。

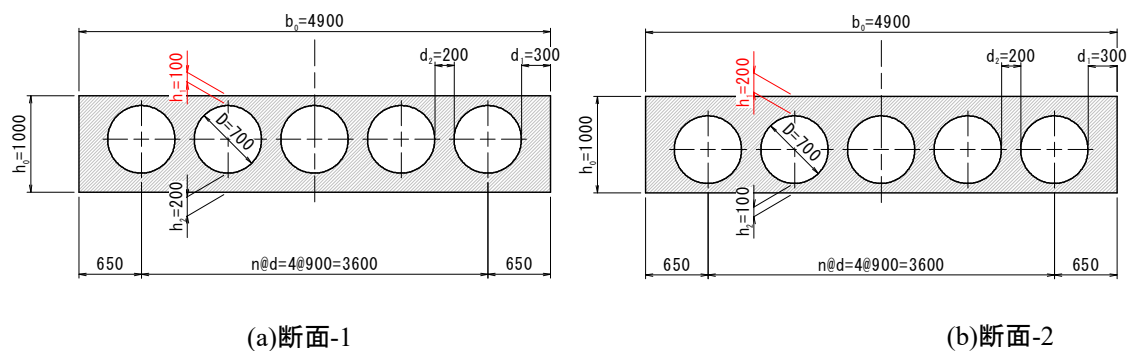


図- 6.1.2 検討対象とする中空床版橋の断面形状

3) 解析モデル

解析には 3 次元弾性有限要素解析モデルを使用し、コンクリート部材のみを対象とした 1/4 モデルとする。疲労による破壊最小単位となる要素の大きさは、図- 6.1.3 及び図- 6.1.4 に示すように、着目部（同図(b)に示す 900×900mm の範囲）を最小 20mm の立方体で分割できる程度に四角形及び三角形で分割し、橋軸方向には最小 20mm 間隔で押し出した 6 面体及び 4 面体ソリッド要素とする。輪荷重直下のコンクリートに厳しい応力状態となることを期待して、鉄筋はあえてモデル化しない。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、中空型枠の剛性やコンクリート自重は考慮しない。ただしこのモデル化の結果として、断面下側の引張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。境界条件については図- 6.1.5 に示すとおりとする。数値解析に用いるコンクリートの物理定数は表- 6.1.1 に示すとおりとする。

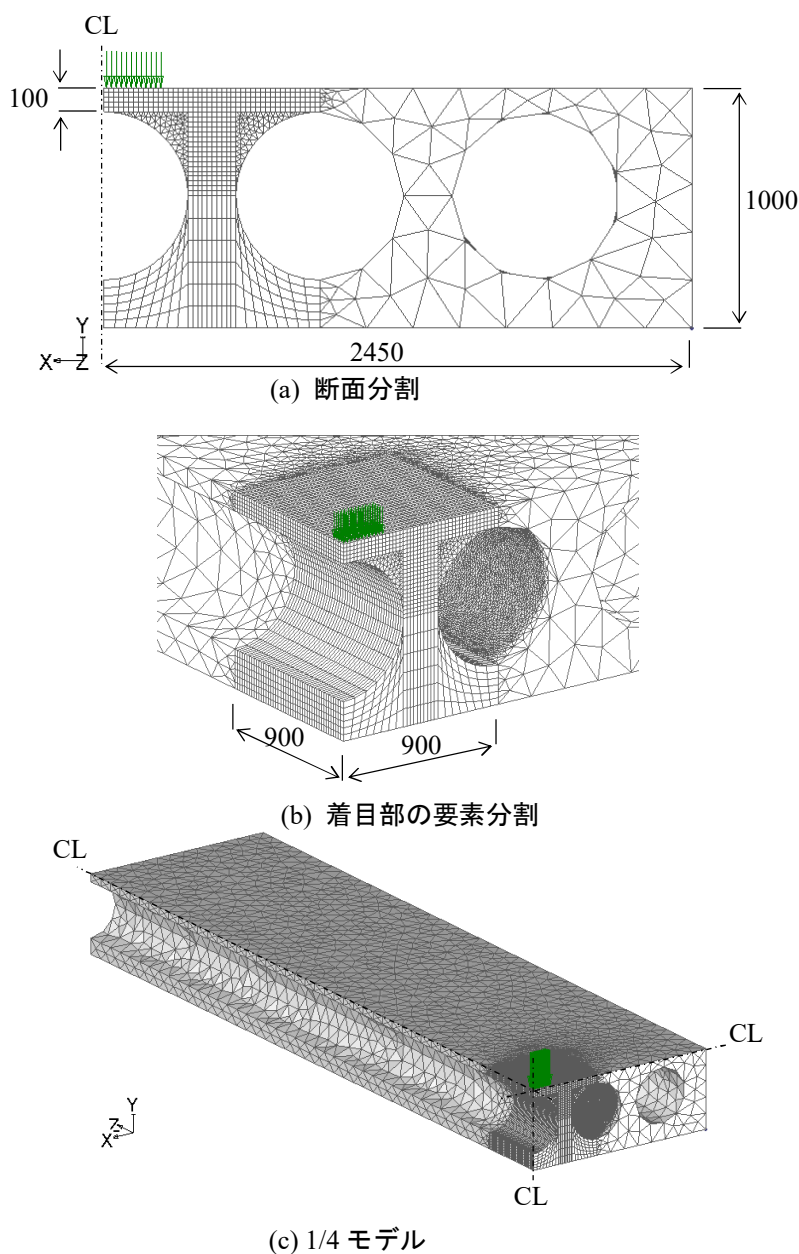
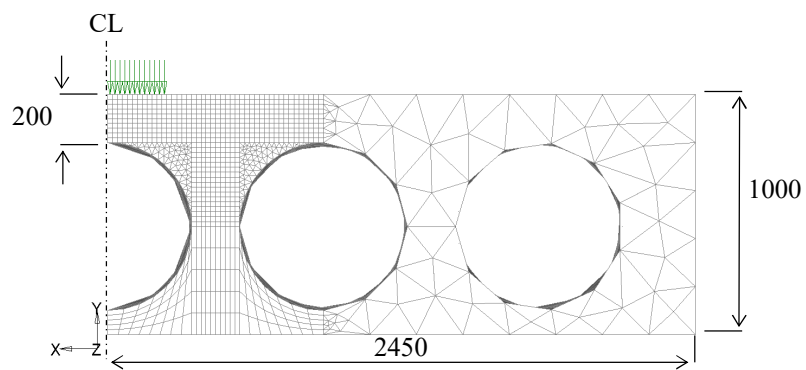
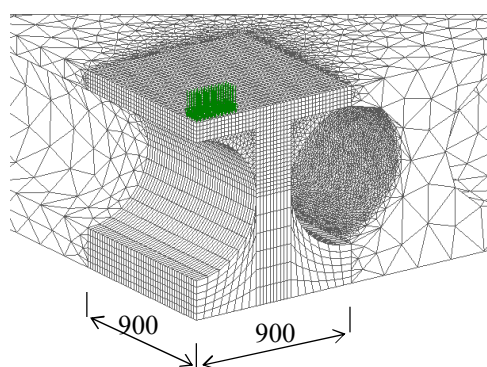


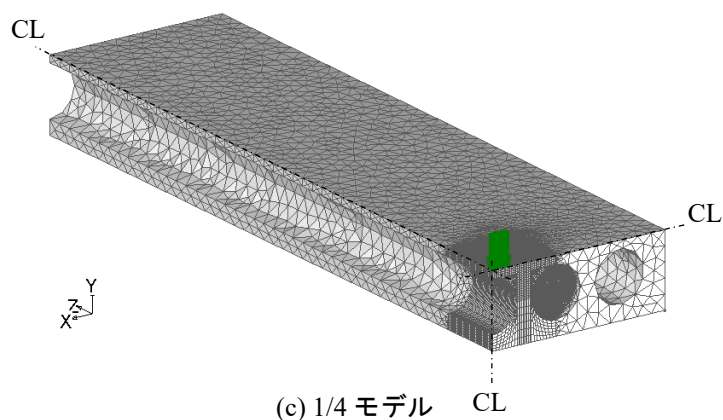
図- 6.1.3 (a) 断面-1 の解析モデル



(a) 断面分割



(b) 着目部の要素分割



(c) 1/4 モデル

図- 6.1.4 (b) 断面-2 の解析モデル

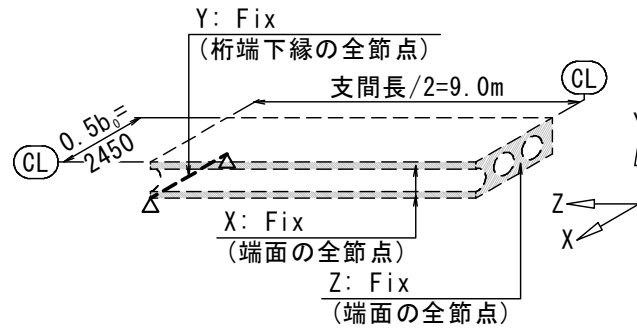


図- 6.1.5 解析モデルの境界条件

表- 6.1.1 数値解析に用いる物理定数および要素種別

使用材料		弾性係数 E [N/mm ²]	ポアソン比 ν	要素種別	備 考
コンクリート	$\sigma_{ck}=24$ N/mm ²	2.50×10^4 (劣化前の値)	1/6	ソリッド要素	

4) コンクリート要素の破壊

①各要素の疲労度の算出

解析ステップ j の要素 i における疲労度（弾性ひずみエネルギー）は、方向性を考慮して次式にて算出する（以下、疲労度と称する）。なお疲労度は、圧縮及び引張応力発生時のそれぞれで求める。

$$\begin{cases} U_{ix|j} = \frac{1}{2} \sigma_{ix|j} \varepsilon_{ix|j} \\ U_{iy|j} = \frac{1}{2} \sigma_{iy|j} \varepsilon_{iy|j} \\ U_{iz|j} = \frac{1}{2} \sigma_{iz|j} \varepsilon_{iz|j} \end{cases} \quad \text{----- (6.1)}$$

ここに、 j : 载荷ステップ

$U_{ix|k}, U_{iy|k}, U_{iz|k}$: ステップ j のとき、要素 i に生じる方向別疲労度[N/mm²]

$\sigma_{ix|k}, \sigma_{iy|k}, \sigma_{iz|k}$: ステップ j のとき、要素 i に生じる方向別応力度[N/mm²]

$\varepsilon_{ix|k}, \varepsilon_{iy|k}, \varepsilon_{iz|k}$: ステップ j のとき、要素 i に生じる方向別ひずみ

②コンクリートの被害則

コンクリート要素の被害則は、疲労度が疲労強度に及ぼす影響が不明なため、国総研資料第 844 号 4.4⁴⁾と同様に、便宜上、8 乗の対数則に従うものと仮定する。解析ステップ j における要素 i の方向別疲労度と疲労寿命の関係は図- 6.1.6 に示す。

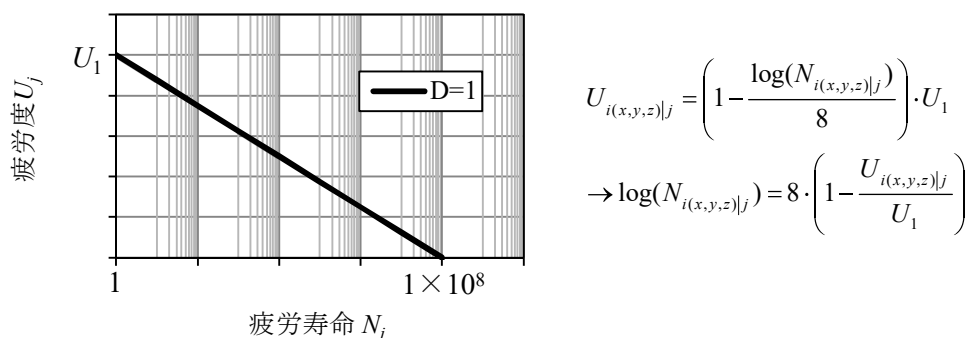


図- 6.1.6 疲労度（弾性ひずみエネルギー量）を指標とした場合の $S-N$ 線

なお、輪荷重载荷 1 回の破壊基準（ y 切片）は、静的な破壊強度とみなせることから、コンクリートの圧縮破壊と引張破壊の場合においてそれぞれ次式で表される。本検討では、圧縮破壊時と引張破壊時のコンクリート応力度を $\sigma_{cc}=\sigma_{ck}=24.0$ N/mm² 及び $\sigma_{ct}=1.91$ N/mm² とする。

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{2} \sigma_{cc} \varepsilon_{cc} = \frac{1}{2E} \sigma_{cc}^2 = \frac{24.0^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 1.1520 \times 10^{-2} & \text{: 圧縮破壊時} \\ U_1 = \frac{1}{2} \sigma_{ct} \varepsilon_{ct} = \frac{1}{2E} \sigma_{ct}^2 = \frac{1.91^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 7.2962 \times 10^{-5} & \text{: 引張破壊時} \end{cases} \quad \text{----- (6.2)}$$

ここに、 U_I : 载荷回数 1 回で破壊すると仮定した場合の相当疲労度[N/mm²]

$\sigma_{cc}, \varepsilon_{cc}$: 圧縮破壊時の応力[N/mm²]、ひずみで、 σ_{ck} 相当とする

$\sigma_{ct}, \varepsilon_{ct}$: 引張破壊時の応力[N/mm²]、ひずみ

$$\sigma_{ct} = 0.23\sigma_{ck}^{2/3} = 1.91 \text{ N/mm}^2$$

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度[N/mm²]

解析ステップ m 終了時の要素 i の方向別累積損傷度は、コンクリートの被害則と方向別疲労度から、圧縮側と引張側においてそれぞれ次式で算出する。要素 i のある方向の累積損傷度が 1 に達したとき、同要素・方向がひびわれたものとみなす。

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{ix|m} = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_{ix|j}} \\ D_{iy|m} = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_{iy|j}} \\ D_{iz|m} = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_{iz|j}} \end{array} \right. \text{----- (6. 3)}$$

ここに、 $D_{ix|m}, D_{iy|m}, D_{iz|m}$: 解析ステップ m 終了時における要素 i の累積損傷度

n_j : 解析ステップ j における载荷回数[回]で、式 (6. 5) で算出される。

$N_{ix|j}, N_{iy|j}, N_{iz|j}$: 要素 i の解析ステップ j における疲労度から算出する疲労寿命[回]で、式 (6. 4) で算出される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \log(N_{ix|j}) = 8 \left(1 - \frac{U_{ix|j}}{U_1} \right) \\ \log(N_{iy|j}) = 8 \left(1 - \frac{U_{iy|j}}{U_1} \right) \\ \log(N_{iz|j}) = 8 \left(1 - \frac{U_{iz|j}}{U_1} \right) \end{array} \right. \text{----- (6. 4)}$$

③ 載荷回数

解析ステップ j における載荷回数 n_j は、コンクリート各要素の方向別疲労寿命に $j-1$ ステップまでの累積損傷度を考慮して算出される残存寿命の内、最も短いものとする。

$$n_j = \min(n_{ix|j}, n_{iy|j}, n_{iz|j}) \text{-----} (6.5)$$

ここに、 $n_{ix|j}, n_{iy|j}, n_{iz|j}$: 解析ステップ j における累積損傷度を考慮した方向別残存寿命[回]
で、式(6.6)により算出される。

$$\begin{cases} n_{ix|j} = (1 - D_{ix|j-1}) \cdot N_{ix|j} \\ n_{iy|j} = (1 - D_{iy|j-1}) \cdot N_{iy|j} \\ n_{iz|j} = (1 - D_{iz|j-1}) \cdot N_{iz|j} \end{cases} \text{-----} (6.6)$$

解析ステップ m 終了時の載荷回数 $\overline{N}_m$ は、ステップごとの載荷回数を累積して次式で表される。

$$\overline{N}_m = \sum_{j=1}^m n_j \text{-----} (6.7)$$

④コンクリート要素の破壊のモデル化

本検討では、コンクリート要素の破壊による剛性低下を、各方向の疲労の蓄積やそれまでの破壊状態に応じて考慮する。コンクリート要素の剛性低下は、弾性係数 E 及びせん断弾性係数 G を $1/10$ に低減することによってモデル化する。

剛性を低下させた要素では、弾性係数 E を低減させた方向のそれまでの累積損傷度が解放されるものとし、同方向の累積損傷度及び疲労度をゼロとする。その後、剛性が低下していない方向についてのみ、輪荷重載荷に対して損傷度を累積し、3 方向（3 回）までそれぞれの方向に対して破壊判定する方法とする。

要素の破壊方向パターンと剛性低下の方法は、表- 6.1.2～表- 6.1.4 に示すとおりとする。

表- 6.1.2 1 方向ひびわれに対する剛性低下パターン

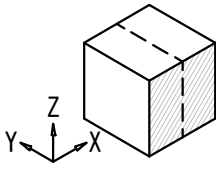
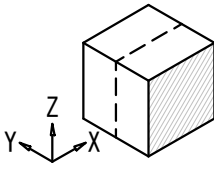
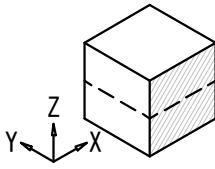
破壊方向	X 方向			Y 方向			Z 方向		
ひびわれ									
弾性係数	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	$E/10$	E	E	E	$E/10$	E	E	E	$E/10$
せん断弾性係数	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$
	$G/10$	G	$G/10$	$G/10$	$G/10$	G	G	$G/10$	$G/10$

表- 6.1.3 2 方向ひびわれに対する剛性低下パターン

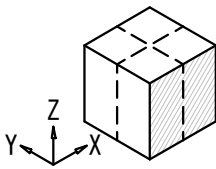
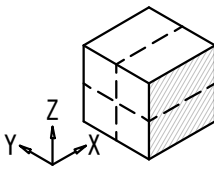
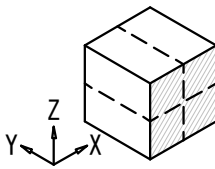
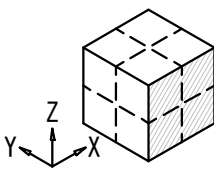
破壊方向	X-Y 方向			Y-Z 方向			Z-X 方向		
ひびわれ									
弾性係数	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	$E/10$	$E/10$	E	E	$E/10$	$E/10$	$E/10$	E	$E/10$
せん断弾性係数	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$
	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$

表- 6.1.4 3 方向ひびわれに対する剛性低下パターン

破壊方向	X-Y 方向		
ひびわれ			
弾性係数	X	Y	Z
	$E/10$	$E/10$	$E/10$
せん断弾性係数	$X-Y$	$Y-Z$	$Z-X$
	$G/10$	$G/10$	$G/10$

⑤ 輪荷重移動載荷時の応力分布

a) 載荷荷重

載荷荷重は、合力 $\Sigma P=100\text{kN}$ の輪荷重（載荷ブロックは $200\times 500\text{mm}$ ）を支間中央部 1 箇所（真中の中空型枠上部）に静的載荷することを想定し、1/4 モデルに対し、図- 6.1.7 に示す位置に $\Sigma P=25\text{kN}$ を載荷する。輪荷重載荷ブロックは $200\times 500\text{mm}$ とする。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り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。

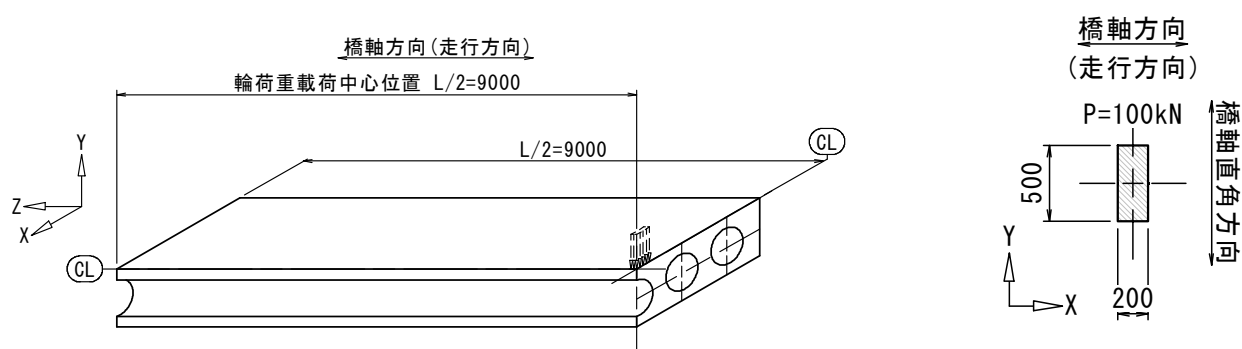


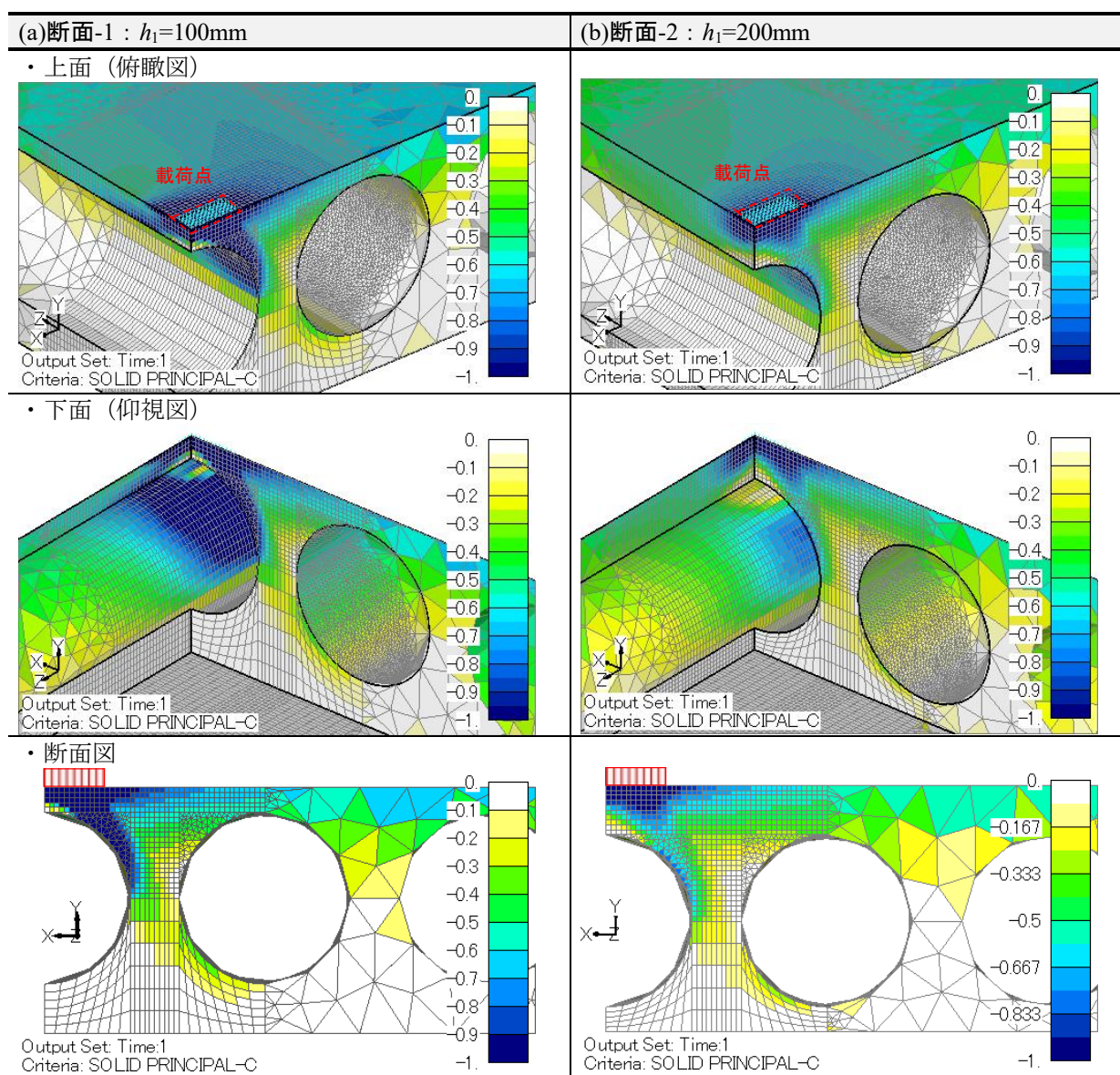
図- 6.1.7 荷重載荷条件

b) 応力分布

b-1) 最小主応力（主圧縮応力度）分布

各検討断面について、初期の荷重（コンクリート要素剛性低下前）における最小主応力分布を表- 6.1.5 に示す。いずれの結果とも、中空型枠上部からウェブの間に渡って圧縮ストラットが形成されていることが分かり、上床版厚が 100mm 程度あれば、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。

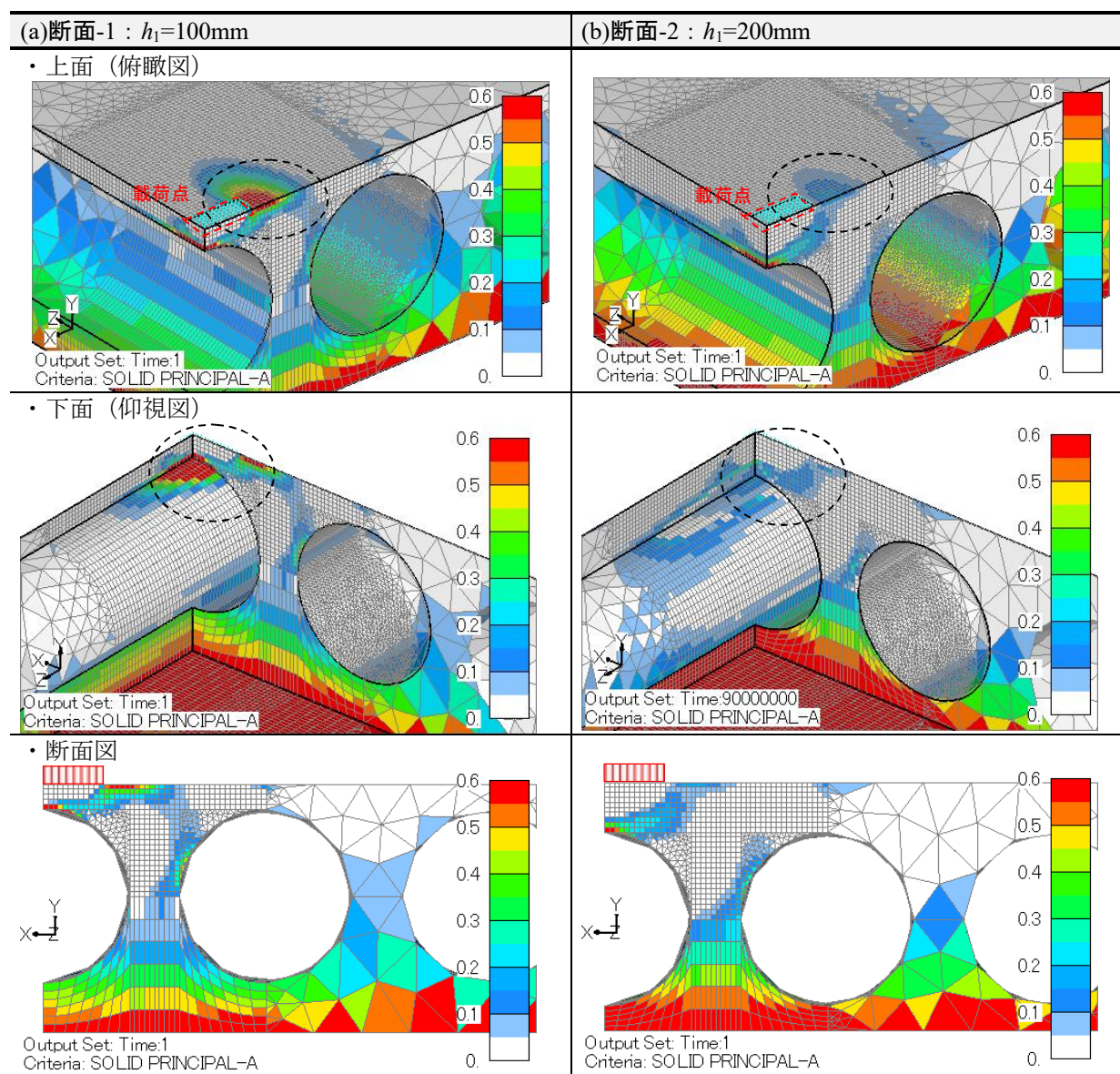
表- 6.1.5 各検討断面での最小主応力分布の比較



b-2) 最大主応力（主引張応力度）分布

各検討断面について、初期の载荷（コンクリート要素剛性低下前）における最大主応力分布を表- 6.1.6 に示す。いずれの結果とも、中空型枠上部での引張応力の拡がり方は局所的であることから、RC 床版とは異なり、中空型枠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。

表- 6.1.6 各検討断面での最大主応力分布の比較

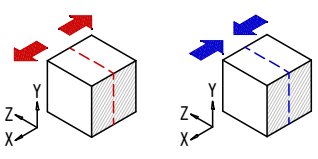
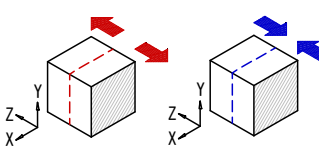
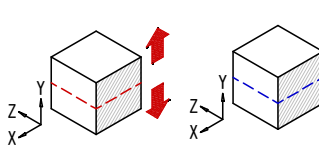
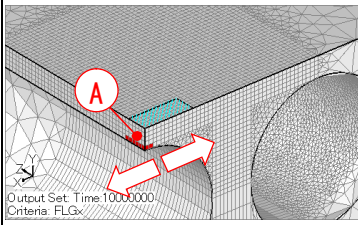
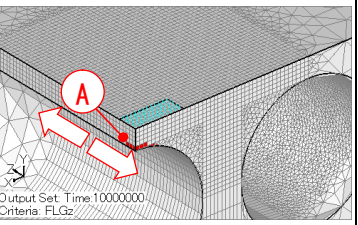
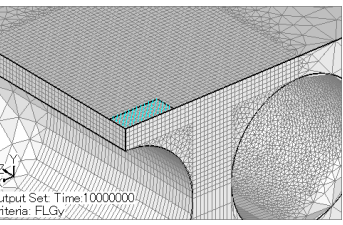
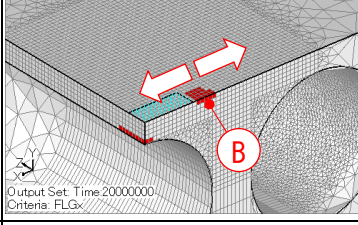
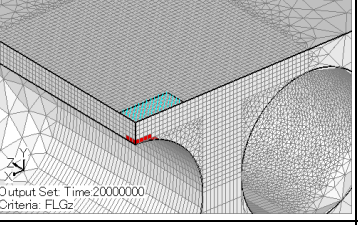
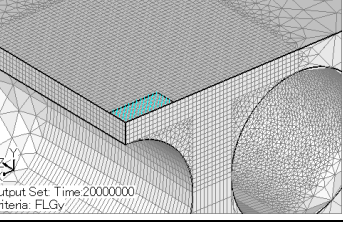
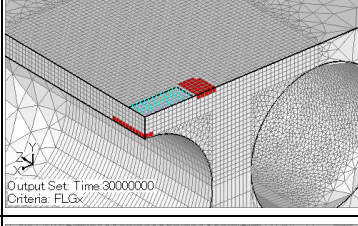
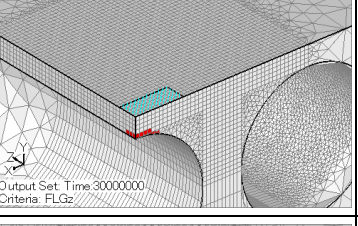
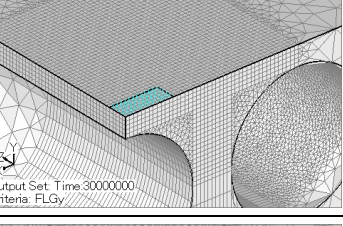
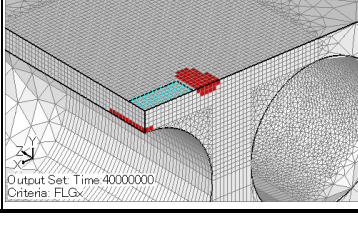
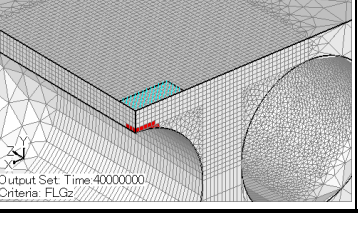
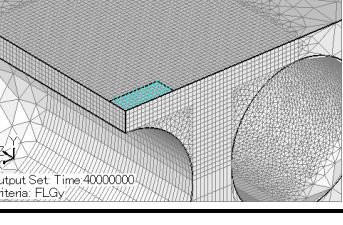


b-3) 累積損傷の拡がり

定点の繰返し载荷によって、式(6.3)に示す各方向の累積損傷度 D が 1 に達し、引張及び圧縮破壊により剛性低下した様子を表- 6.1.7～表- 6.1.14 に示す。表- 6.1.7～表- 6.1.14 では、剛性低下の拡がりを当該载荷回数 $\bar{N}_m$ 別に示しており、赤色は引張破壊、青色は圧縮破壊を示している。

表- 6.1.7 载荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化

(主版上面：俯瞰図) (a)断面-1 (1/2)

(a)断面-1 : $h_1=100\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$\bar{N}_m = 1 \times 10^7$ 回			
$\bar{N}_m = 2 \times 10^7$ 回			
$\bar{N}_m = 3 \times 10^7$ 回			
$\bar{N}_m = 4 \times 10^7$ 回			

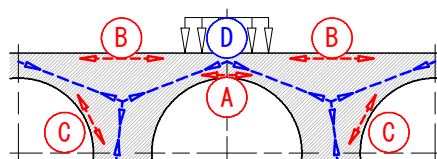
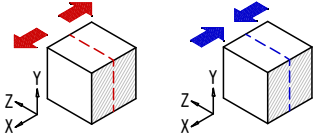
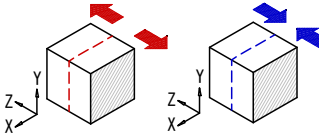
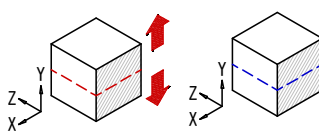
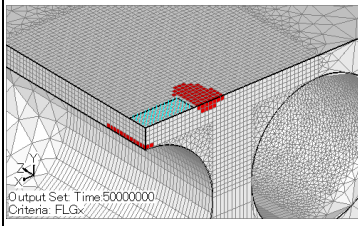
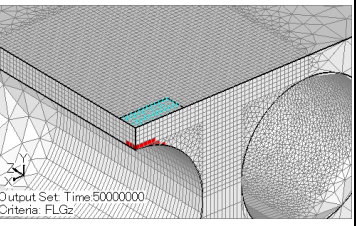
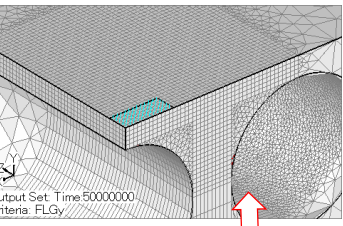
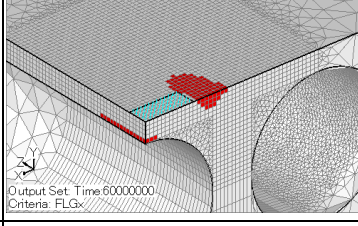
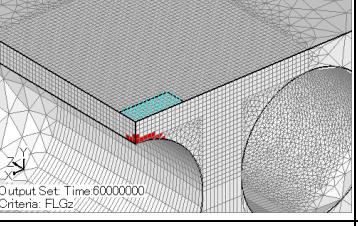
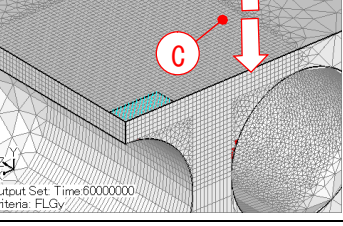
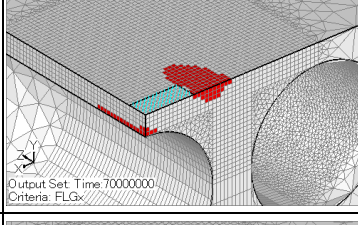
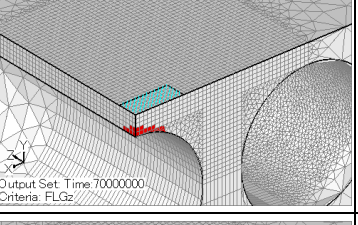
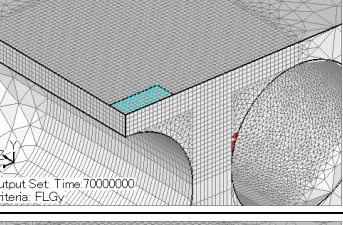
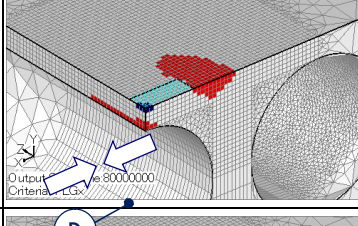
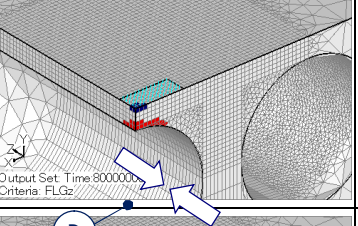
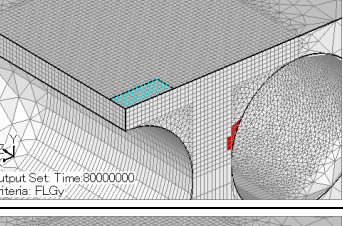
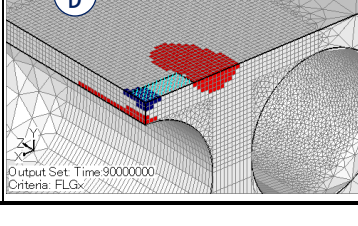
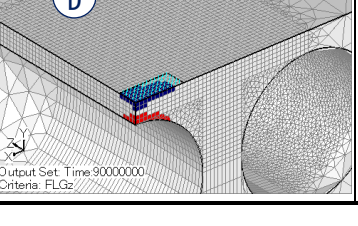
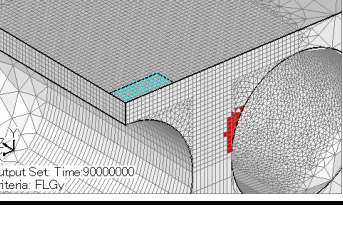


表- 6.1.8 載荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(主版上面：俯瞰図) (a)断面-1 (2/2)

(a)断面-1 : $h_1=100\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 5 \times 10^7$ 回			
$N_m = 6 \times 10^7$ 回			
$N_m = 7 \times 10^7$ 回			
$N_m = 8 \times 10^7$ 回			
$N_m = 9 \times 10^7$ 回			

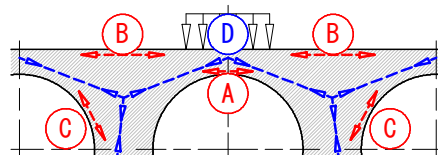
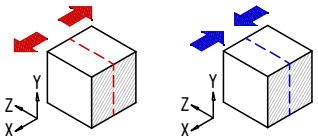
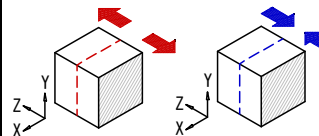
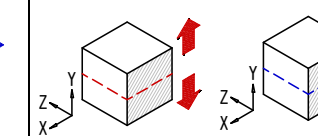
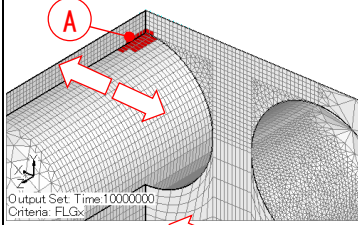
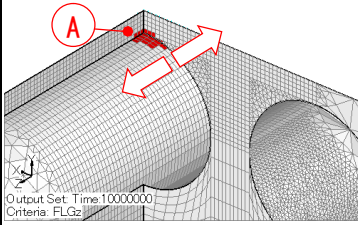
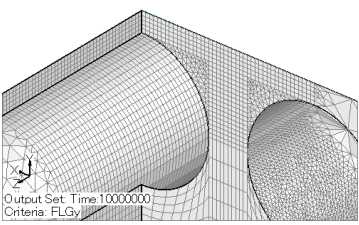
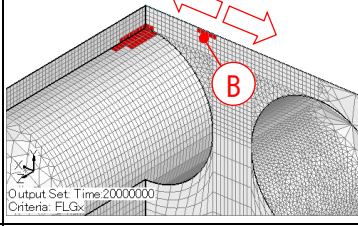
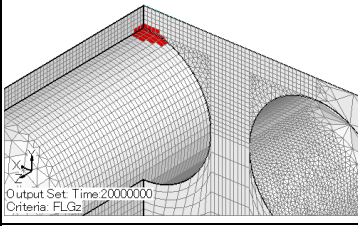
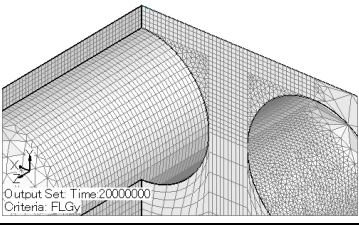
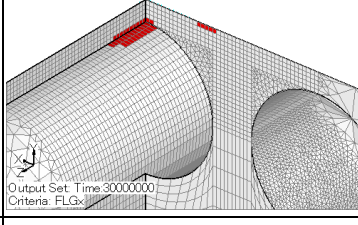
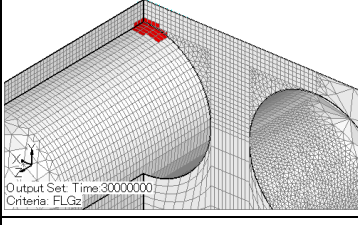
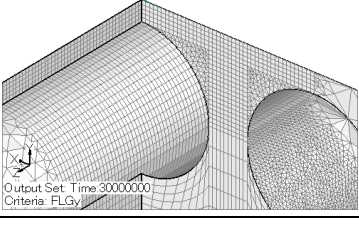
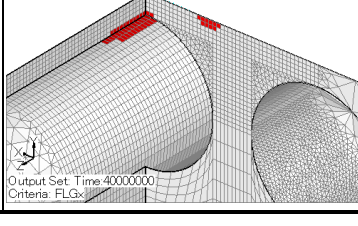
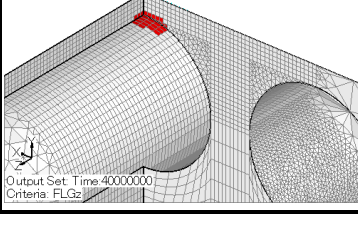
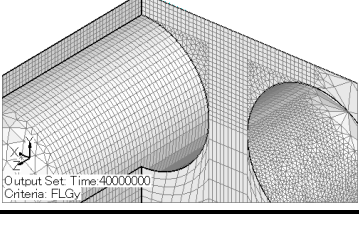


表- 6.1.9 載荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(中空型枠上面：仰視図) (a)断面-1 (1/2)

(a)断面-1 : $h_1=100\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 1 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGy
$N_m = 2 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGy
$N_m = 3 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGy
$N_m = 4 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGy

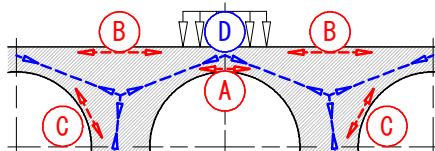
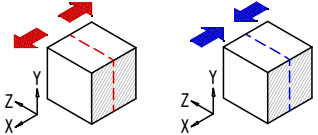
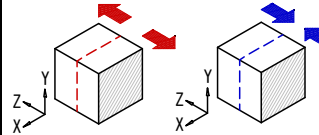
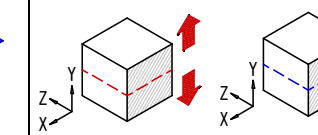
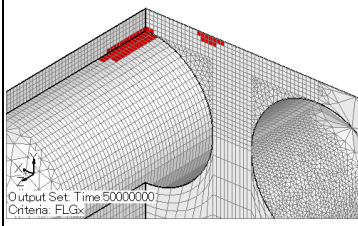
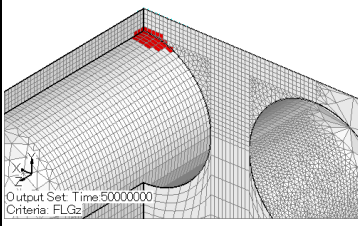
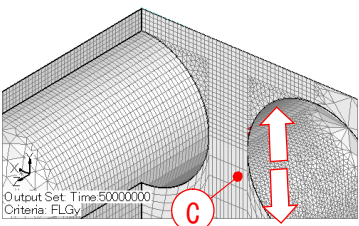
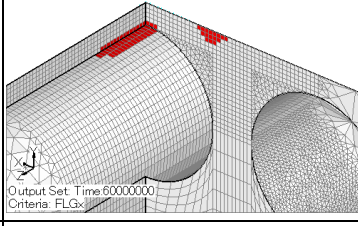
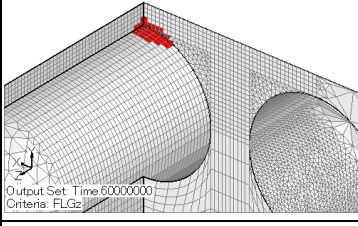
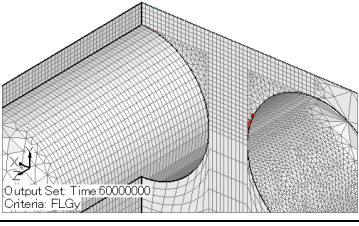
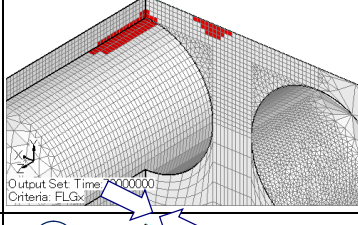
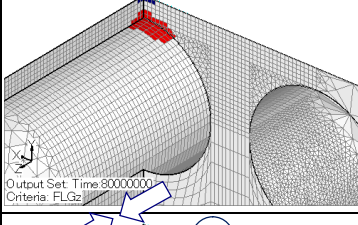
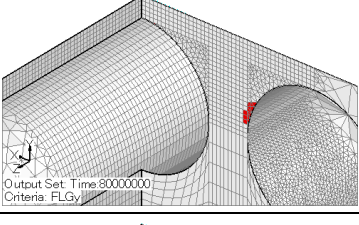
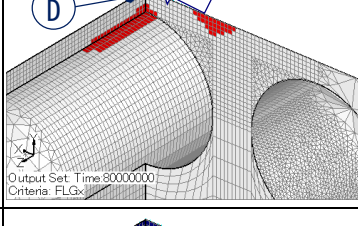
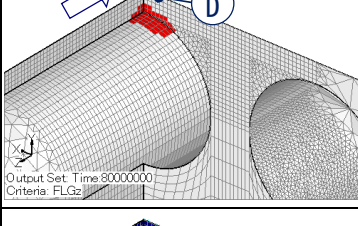
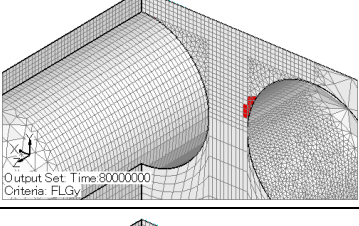
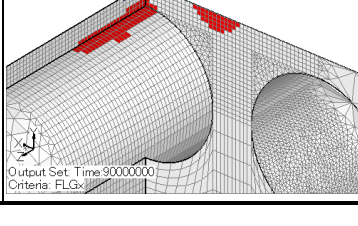
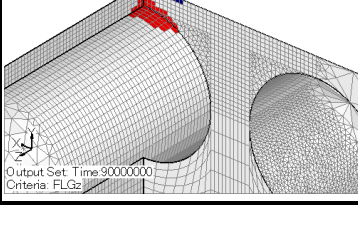
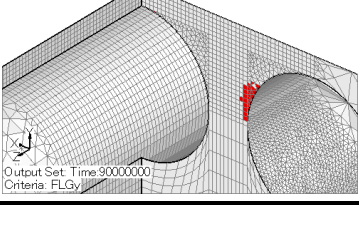


表- 6.1.10 載荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(中空型枠上面：仰視図) (a)断面-1 (2/2)

(a)断面-1 : $h_1=100\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 5 \times 10^7$ 回			
$N_m = 6 \times 10^7$ 回			
$N_m = 7 \times 10^7$ 回			
$N_m = 8 \times 10^7$ 回			
$N_m = 9 \times 10^7$ 回			

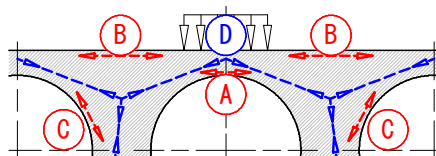
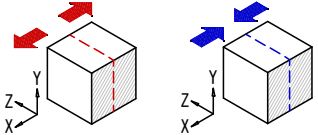
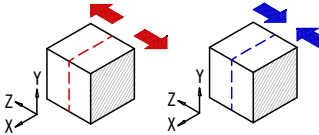
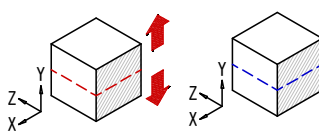
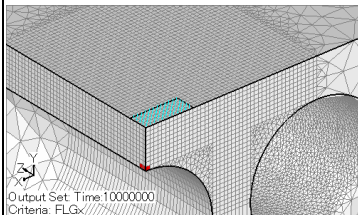
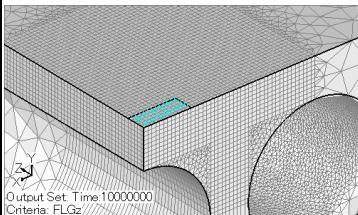
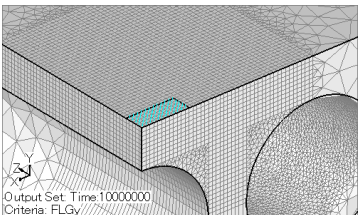
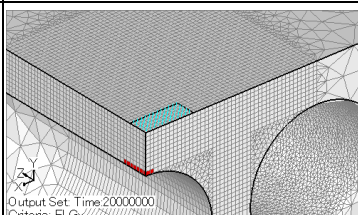
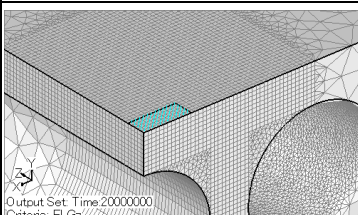
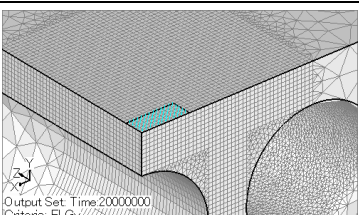
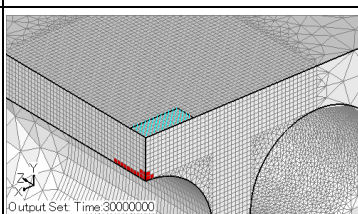
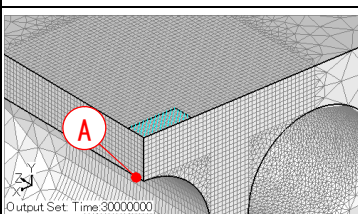
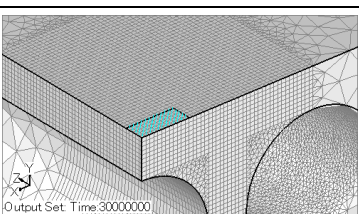
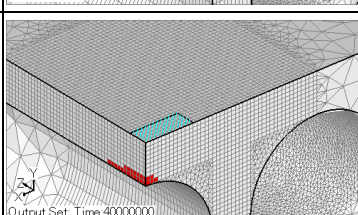
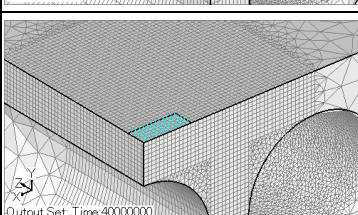
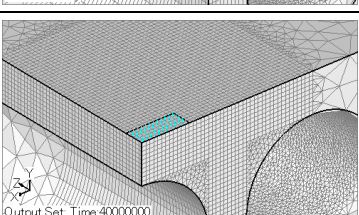


表- 6.1.11 載荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(主版上面：俯瞰図) (b)断面-2 (1/2)

(b)断面-2 : $h_1=200\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 1 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGy
$N_m = 2 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGy
$N_m = 3 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGy
$N_m = 4 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGy

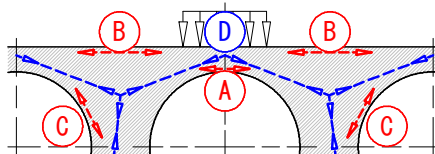
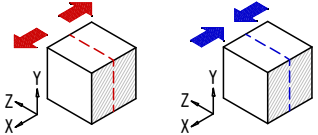
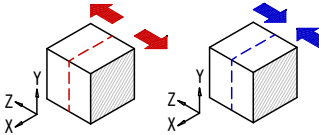
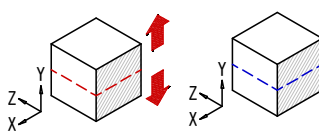
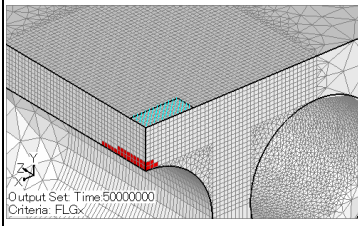
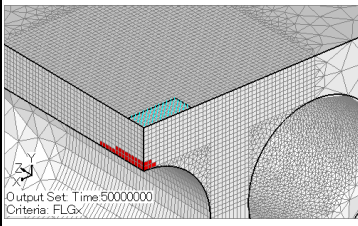
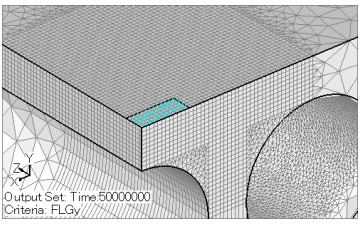
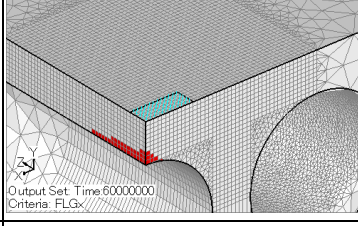
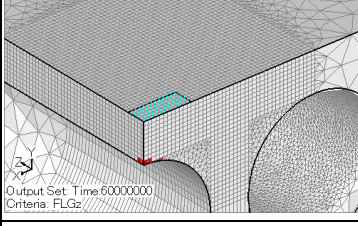
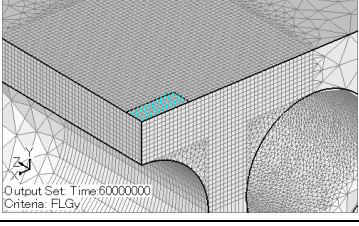
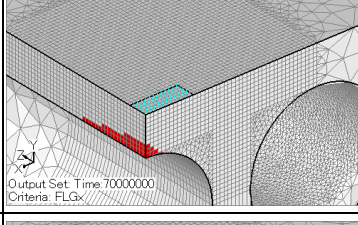
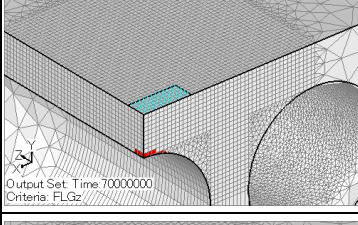
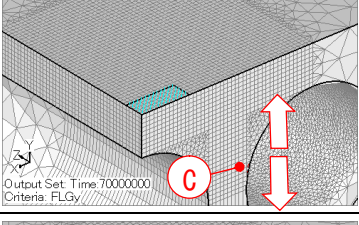
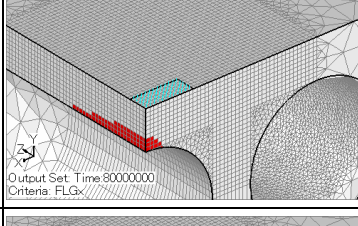
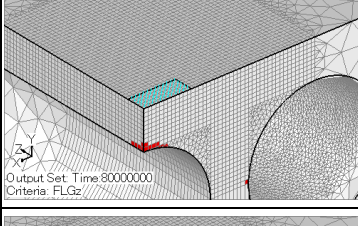
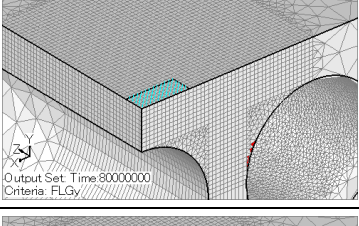
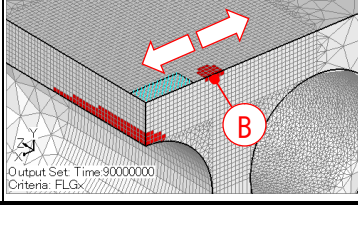
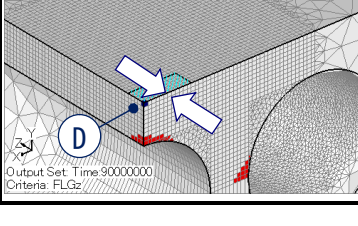
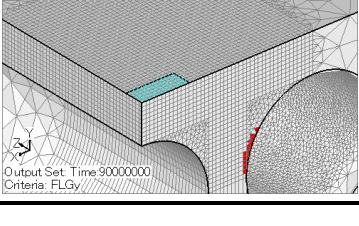


表- 6.1.12 荷重回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(主版上面：俯瞰図) (b)断面-2 (2/2)

(b)断面-2 : $h_1=200\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 5 \times 10^7$ 回			
$N_m = 6 \times 10^7$ 回			
$N_m = 7 \times 10^7$ 回			
$N_m = 8 \times 10^7$ 回			
$N_m = 9 \times 10^7$ 回			

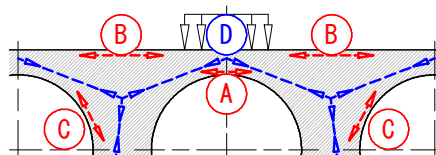
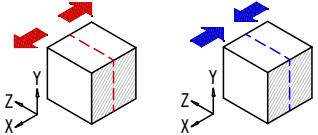
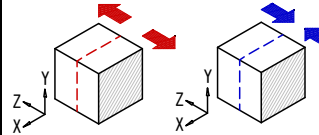
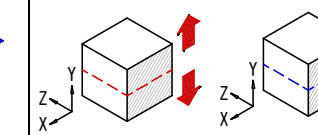
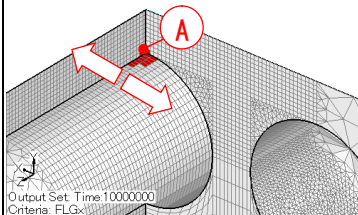
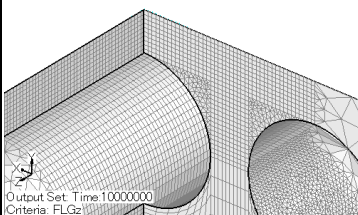
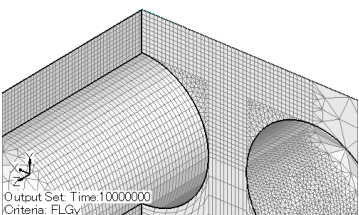
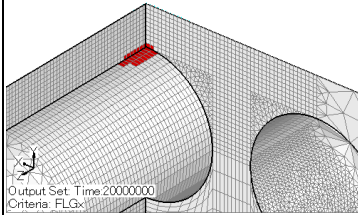
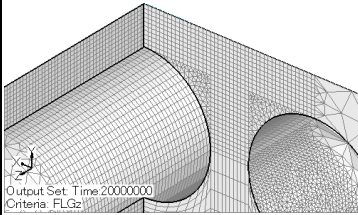
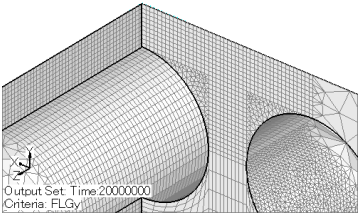
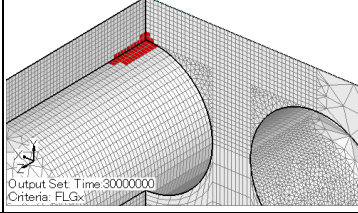
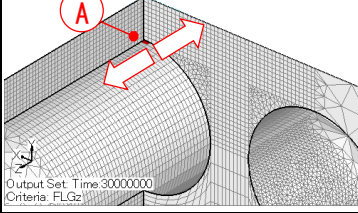
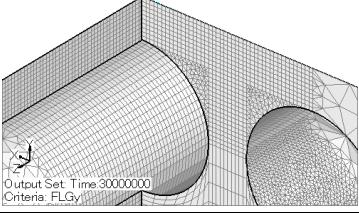
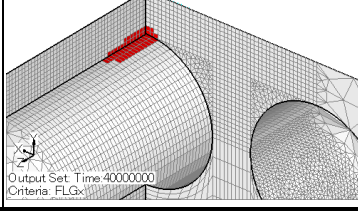
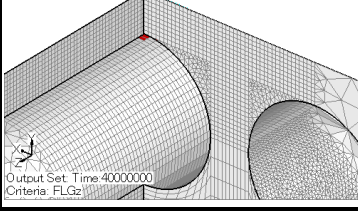
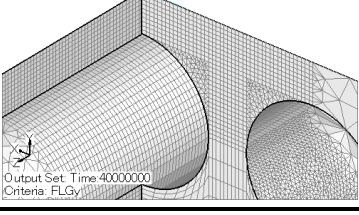


表- 6.1.13 荷重回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
(中空型枠上面：仰視図) (b)断面-2 (1/2)

(b)断面-2 : $h_1=200\text{mm}$			
想定される破壊方向	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊	 ■ : 引張破壊、■ : 圧縮破壊
$N_m = 1 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:10000000 Criteria: FLGy
$N_m = 2 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:20000000 Criteria: FLGy
$N_m = 3 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:30000000 Criteria: FLGy
$N_m = 4 \times 10^7$ 回	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGx	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGz	 Output Set Time:40000000 Criteria: FLGy

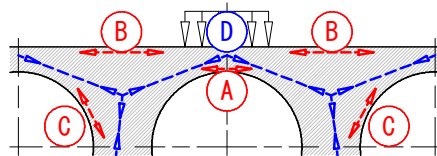
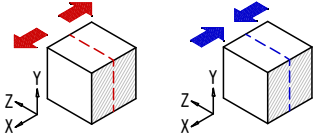
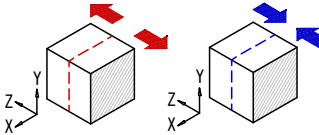
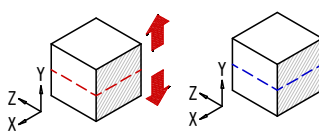
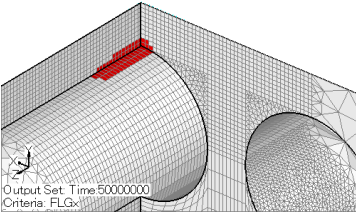
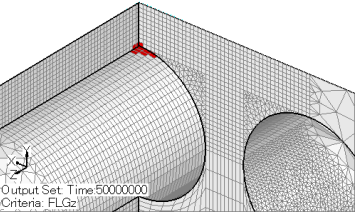
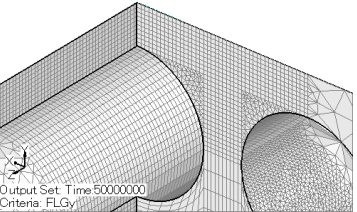
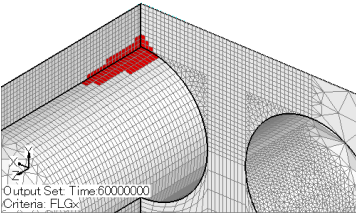
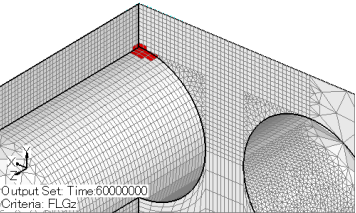
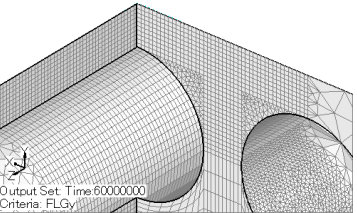
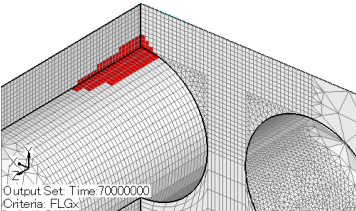
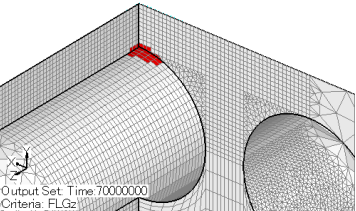
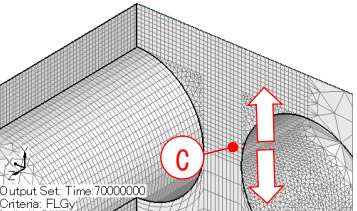
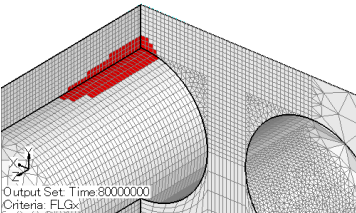
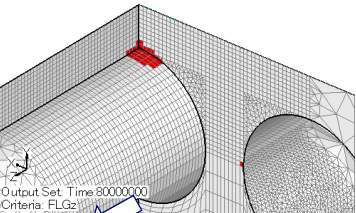
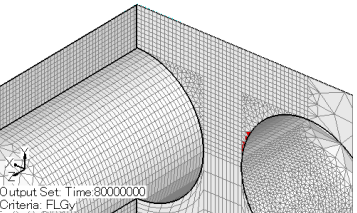
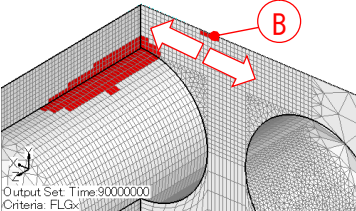
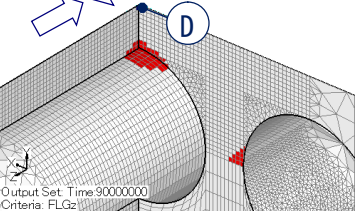
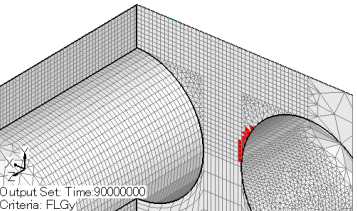


表- 6.1.14 載荷回数の増加に伴うコンクリート要素の剛性低下範囲の変化
 (中空型枠上面：仰視図) (b)断面-2 (2/2)

	(b)断面-2： $h_1=200\text{mm}$		
	橋軸直角方向 (X 軸)	橋軸方向 (Z 軸)	鉛直方向 (Y 軸)
想定される破壊方向	 ■：引張破壊、■：圧縮破壊	 ■：引張破壊、■：圧縮破壊	 ■：引張破壊、■：圧縮破壊
$N_m = 5 \times 10^7$ 回			
$N_m = 6 \times 10^7$ 回			
$N_m = 7 \times 10^7$ 回			
$N_m = 8 \times 10^7$ 回			
$N_m = 9 \times 10^7$ 回			

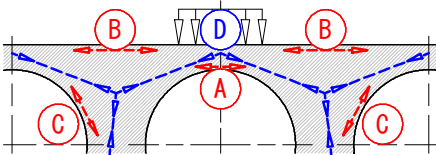


表- 6.1.7～表- 6.1.14 の結果より、(a)断面-1 と(b)断面-2 のそれぞれで破壊に至った箇所とその順序をとりまとめて、両者を比較した結果を表- 6.1.15 及び図- 6.1.8 に示す。(a)断面-1 及び(b)断面-2 ともに中空型枠上面（図- 6.1.8 にて[A]で示す引張領域）が最初に剛性が低下する。その後、かぶり厚の小さいケース（(a)断面-1）では、床版橋上面（図- 6.1.8 にて[B]で示す引張領域）の輪荷重近傍の要素で剛性低下が生じ、続いて載荷領域直下の圧縮領域（図- 6.1.8 中[C]）のコンクリート要素と床版橋上面の引張領域で剛性低下が生じ、[B][C]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]の引張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、繰り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、 $N_m=1 \times 10^9$ のオーダー回数まで繰り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。⑤b) でまとめた応力分布でもみられたとおり、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ある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。

前述のように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、疲労耐久性が著しく低下することはなさそうである。例えば、舗装の打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。

表- 6.1.15 想定される破壊（コンクリート要素の剛性低下）箇所とその順序

順序	【(a)断面-1 : $h_1=100\text{mm}$ 】		【(b)断面-2 : $h_1=200\text{mm}$ 】	
1	【A】 中央中空型枠上面	引張	【A】 中央中空型枠上面	引張
2	【B】 主版上面（載荷ブロック周囲）	引張	【C】 隣接中空型枠側面	引張
3	【C】 隣接中空型枠側面	引張	【B】 主版上面（載荷ブロック周囲）	引張
4	【D】 主版上面（載荷ブロック直下）	圧縮	【D】 主版上面（載荷ブロック直下）	圧縮

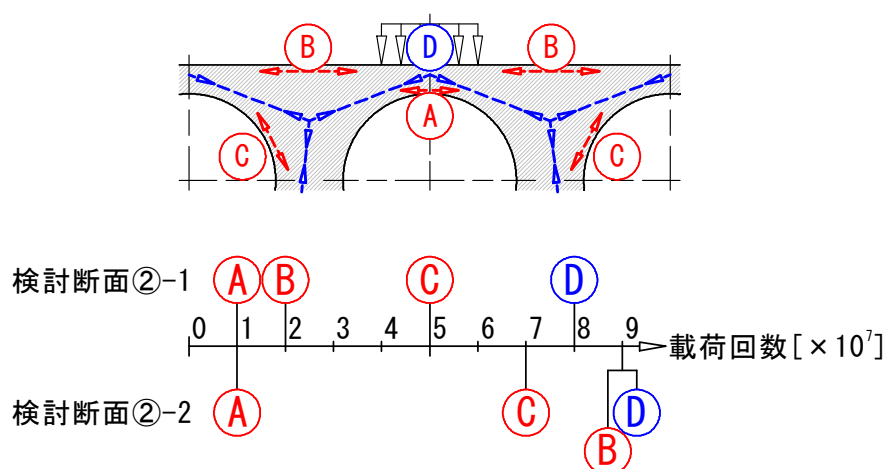


図- 6.1.8 想定される断面内での応力分布と破壊に至る順序

6.2 解析結果に基づく点検時の着目点及び補修時の留意事項

本章での検討から得られた知見は以下のとおりである。

①耐荷力

- ・踏み抜きに関しては、浮き上がりが生じた状態で輪荷重が載荷されたときに、耐荷機構（アーチアクション）を有しているかが重要であると考えられる。表- 6.1.5 に示したように、中空型枠上部の床版厚（上床版厚）が 100mm あれば、初期の載荷荷重に対して圧縮ストラットが形成され、アーチアクション効果が期待できると考えられた。よって中空床版橋の設計で標準的な上床版厚 150mm に対し 50mm 程度下回ったとしても、少なくとも耐荷機構は喪失していないと考えられる。
- ・表- 6.1.6 に示したように、上床版厚が 200mm の場合は、型枠下面側の床版厚が薄くなり、初期の載荷荷重に対して床版下面に引張応力が生じる範囲が広がる傾向であった。ただし、本モデルでは鉄筋を考慮していないため、型枠上部の床版厚が 200mm 程度であれば、実際の挙動としては鉄筋が負担できる程度であると考えられる。

②耐久性

- ・表- 6.1.15 に整理したように、[B][C]の引張領域が拡大していく傾向からは、上床版厚が小さいほど、繰り返し作用に対する影響を受けやすくなると考えられる。ただし、本検討で解析を行った $h_1=100\text{mm}$ のケースでは、中空床版橋の耐荷機構となる圧縮ストラット領域は十分に分布しており、繰り返し載荷に対しても圧縮破壊が生じる箇所は限定的である。
- ・本検討からは、中空床版橋の設計で確保すべきとされている床版厚さである 150mm を 50mm 下回ったとしても、必ずしも疲労耐久性に対して応急的な対策が必要とならない可能性が示された。
- ・中空床版橋では、中空型枠上部に輪荷重が載荷されたときに、コンクリートに局所的に負荷が生じる。既設の中空床版橋では輪荷重が頻繁に載荷される位置を把握することによって、疲労耐久性に対して予防的な保全を検討する際の一助になるものと考えられる。

【6 章の参考文献】

- 2) 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，pp634～pp645，2019 年 3 月
- 3) 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，pp343，2017
- 4) 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章. 中空型枠の浮き上がりや型枠内部の滞水の影響に関する状態の評価のまとめ

本編では、中空床版橋の状態を評価するため、主な損傷である踏み抜きと滞水に着目して整理した。

7.1 踏み抜き、浮き上がり

- ・ 踏み抜きの事例調査では、中空型枠上部の床版厚（上床版厚）が不足している箇所では踏み抜きが生じていた。
- ・ 既往の床版厚調査事例では、電磁波レーダー探査により上床版厚を調査しており、2001 年以前に作られた既存の RC 中空床版橋の約 30% で上床版厚が設計値未満である可能性がある。
- ・ 踏み抜きが発生する主要因は、中空型枠の浮き上がりによる上床版厚不足であると考えられるため、本研究で FEM にて解析した。その結果、上床版厚が薄いほど繰り返し作用の影響が大きくなるものの、上床版厚が少なくとも 100mm 程度確保できていれば疲労耐久性において直ちに影響を及ぼすことはなさそうであることが分かった。
- ・ 上床版厚が薄い場合を研究した既往の事例のとおり、アーチアクションが働かない前提で、片持ち梁と仮定して耐荷力を計算するという方法は、本研究で実施した解析によると、上床版厚 100mm では圧縮ストラットが形成されていたことから、コンクリートの状態が健全であれば安全側の結果を与えると考えられる。
- ・ 一方、100mm を下回る場合の耐荷力や耐久性については、橋の条件によって変わるものと考えられ、個別に検討が必要であると考えられる。特に、既往の研究でパラメータにしていたように、上床版厚、鉄筋のかぶり、ボイド管の径などに加え、実際の重交通量も影響するものと考えられる。
- ・ 適切な方法により上床版厚を調査し、上床版厚が 100mm を下回る場合は、補修・補強の必要性を検討するように計画するのが望ましいと考えられる。なお、どのような方法を用いるにしても、計測誤差も考慮して検討をする必要がある。
- ・ 上床版厚を 100mm 以上確保できている場合でも、例えば舗装打換えで床版を削り、100mm を下回ることも考えられることから、舗装を剥がす際には床版の状態調査を加えるか、舗装打換え計画に合わせて補修・補強を計画するのが望ましいと考えられる。

7.2 滞水

- ・ 滞水が疑われた事例では、床版下面に遊離石灰などの変状が生じている例が多かった。
- ・ 橋面の横断勾配の低い側と、下面の漏水痕などの変状の位置が平面的に一致する傾向にあった。
- ・ 水抜き孔がある場合には、その周辺が濡れていたり、苔や錆が見られたりした。
- ・ 水の供給に関しては、橋面防水の未施工により、歩道部の調整コンクリートと床版コンクリートの境界部の隙間から橋面水が浸透した可能性が考えられる。
- ・ 水の排水に関しては、水抜き孔がない、排水性の低下（中空型枠の変形や水抜き孔の目詰まり）が原因で滞水が生じるものと考えられる。
- ・ 橋面からの水の供給がある場合はそれを止める必要がある。したがって、点検等で着目すべき点として、防水層の施工時期及び歩車道境界部の施工範囲が考えられる。なお、床版防水は、1987 年頃から徐々に適用がなされたものと考えられるが、平成 14 年の道路橋示方書改定までは必須事

項ではなかったことから、既設橋に対しては長期間床版防水がない状態であった可能性も考えられる。

- ・対策として、床版防水等の措置も重要であるが、橋面からの水の供給を完全に塞ぐことは難しいことや、結露等により滞水することもあることから、中空型枠には水抜き孔を設置することが重要であると考えられる。
- ・中空床版橋の維持管理において、排水性の観点からは、点検時に水抜き孔の有無、並びに水抜き孔の目詰まりの有無、また、その他内部の滞水の可能性を確認することが重要であると考えられる。

Ⅱ-2 目 次

1 章.	概要	Ⅱ-75
1.1	研究の背景と目的	Ⅱ-75
1.2	研究の流れ	Ⅱ-76
2 章.	対策事例に関する調査	Ⅱ-77
2.1	対策事例の調査	Ⅱ-77
2.1.1	型枠材として充填材を用いた床版打替え	Ⅱ-77
2.1.2	型枠材として吊り型枠を用いた床版打替え	Ⅱ-81
2.2	事例調査を踏まえた検討課題の抽出	Ⅱ-83
3 章.	設計・施工前の調査の留意点に関する検討	Ⅱ-84
3.1	中空型枠上部の床版厚測定方法	Ⅱ-84
3.2	非破壊計測結果と微破壊計測結果の比較	Ⅱ-84
3.2.1	車載式電磁波レーダーと上面削孔の比較	Ⅱ-84
3.2.2	車載式電磁波レーダーと下面削孔の比較	Ⅱ-85
3.2.3	各計測方法の妥当性について	Ⅱ-89
3.3	調査方法の提案	Ⅱ-89
4 章.	補修施工方法に対する検証検討	Ⅱ-90
4.1	型枠材の要求性能の整理	Ⅱ-90
4.1.1	各種規準書類による型枠材の要求事項	Ⅱ-90
4.1.2	中空床版上部に対する型枠材の性能指標の整理	Ⅱ-92
4.2	型枠材の施工方法に対する実験的検証	Ⅱ-93
4.2.1	中空型枠上部の踏み抜きにおける補修方法の実験的検証（試験）	Ⅱ-93
4.2.2	試験結果	Ⅱ-100
4.3	型枠材の性能指標の確認	Ⅱ-105
4.4	施工方法のまとめと留意事項	Ⅱ-106
4.4.1	対策範囲の設定	Ⅱ-106
4.4.2	実験結果から得られた知見と改善事項	Ⅱ-106

Ⅱ-2 中空床版の踏み抜き対策

1章. 概要

1.1 研究の背景と目的

コンクリート床版橋に分類される場所打ちコンクリート中空床版橋（以下、中空床版橋）は、中空型枠を用いて、コンクリート床版を空洞化させた橋梁形式である。国土交通省が管理する中空床版橋は、1950年代から10年ごとに200～500橋の整備が進められているが、整備開始から50年以上を経過した現在、中空床版橋特有の損傷事例として、中空型枠上部の踏み抜きが数例報告されている。踏み抜きの要因に関わらず、突発的な踏み抜き事故が発生した場合には迅速な対応が必要となるが、これまで発生事例が少なく、対策についての情報が不足しているなど、対応策の立案が滞ることが懸念される。例えば、中空床版橋の場合、軽量化のために中空部を設けている構造であることから、中空部をコンクリートで充填することは現実的ではなく、諸元の決定や材料、施工方法の選定が課題となる。

そこで、本編「Ⅱ-2 中空床版の踏み抜き対策」では、踏み抜き事故が発生した場合の迅速な対応に資するよう、対策範囲や方法の選定、諸元の決定、施工方法や管理方法を提案することを目的としている。主には、事故後の緊急対策の実施を対象にしているが、対策の方法、施工方法や管理方法は、同じ橋の別箇所での発生の予防や、異なる橋での予防的な対策の実施においても基本的には変わらないと考えられ、本編の研究成果は適宜参考にできると考えられる。

1.2 研究の流れ

本章の構成は、図-1.2.1 及び以下に示す。

「1 章 概要」では、本研究の背景及び目的、研究の流れを示す。

「2 章 対策事例に関する調査」では、中空型枠上部の踏み抜きに対して実施された補修事例を収集し、発泡ウレタン等の充填材を用いる方法や吊り型枠を用いる方法について整理するとともに、事例調査を踏まえた検討課題を抽出する。

「3 章 設計・施工前の調査の留意点に関する検討」では、設計や施工をするにあたり行う調査について、一般に行われている電磁波レーダー法とそれ以外の手法を比較した既往の事例を整理・分析し、調査にあたり考慮すべき点や調査方法を提案する。

「4 章 補修施工方法に対する検証検討」では、補修時の型枠の要求性能について、事例調査並びに実験的検証に基づいて、設計・施工方法の標準的な流れを提案する。

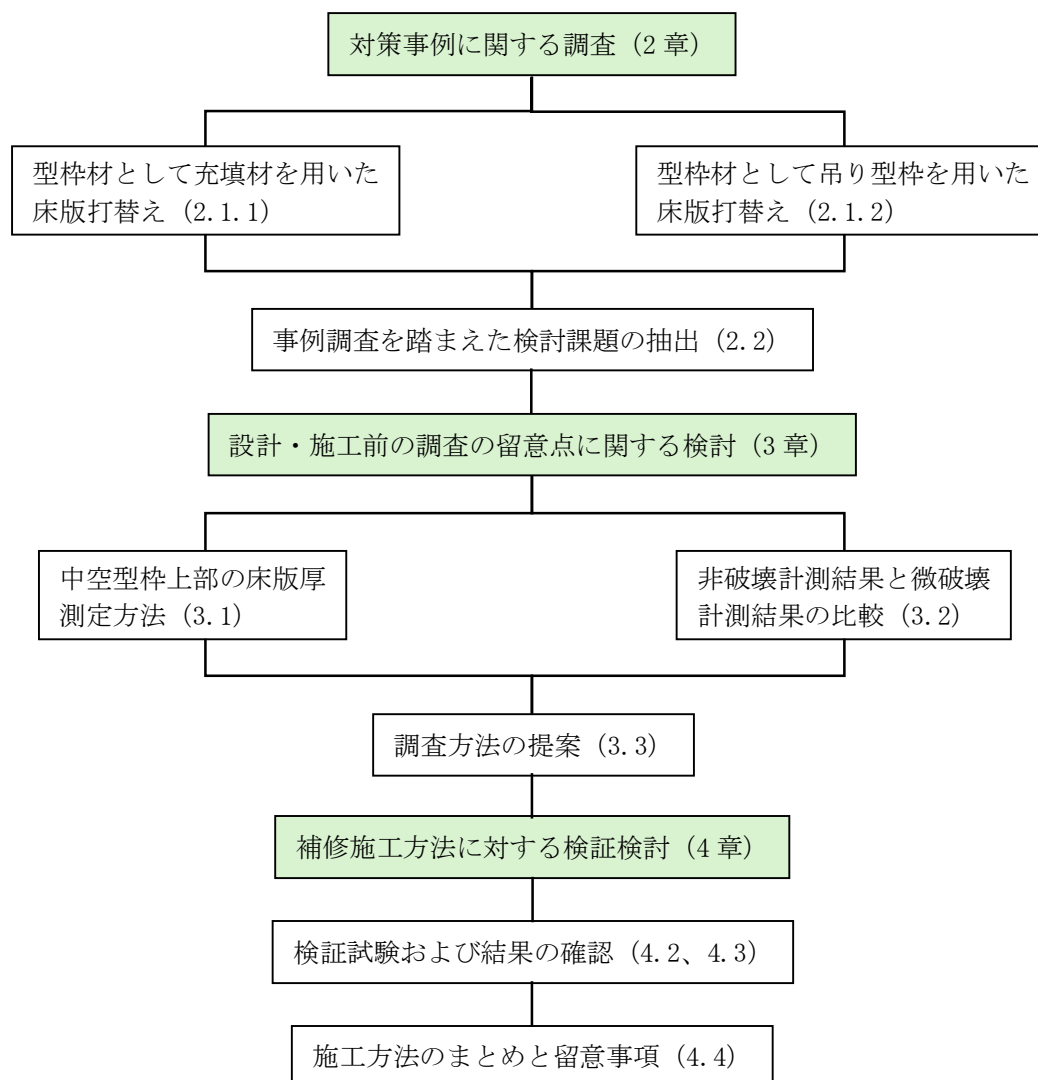


図- 1.2.1 本研究のフロー

2章. 対策事例に関する調査

2.1 対策事例の調査

踏み抜きが生じたとき、早急な交通の回復のために、早急に対策を行う必要が求められる場合も少なくないと考えられる。しかし、対策方法、例えば型枠材の要求性能や型枠施工の方法については、標準的なものがない。そこで、事案ごとに調査検討がなされる必要があるが、それでも可能な限り調査検討に要する時間を減らせるように、対策方法について可能性の高いものを複数抽出しておくことと、方法ごとの材料や手順などについて、定型化できるところは定型化しておくことが有効と考えられる。また、実際に異なる方法をとる場合でも、何等かの標準的な方法、手順があることで、復旧までの日数の目途などの比較、計画検討がしやすい。そこで、本章では、中空床版橋の踏み抜きに対する既往の対策事例を調査し、実態を整理するとともに、標準的な仕様を提案するための課題を抽出する。

道路管理者から入手した情報や、プレストレスト・コンクリート建設業協会の会員企業から入手した情報などを基に整理する。補修方法の基本は床版打替えであり、打ち替える方法として発泡ウレタン材などの充填材を既設中空型枠内に充填して型枠として用いた事例と、既設中空型枠上部に吊り型枠を設置した事例があった。

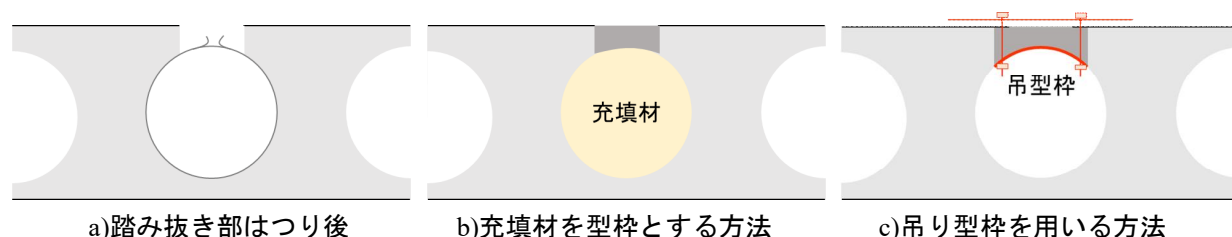


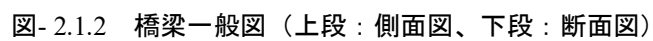
図- 2.1.1 踏み抜き部の打替え方法の例

2.1.1 型枠材として充填材を用いた床版打替え

踏み抜きの対策として本研究で収集した事例の多くは、充填材として発泡ウレタンを用いているが、チューブ型枠と吊り型枠を組み合わせで用いられていた。直轄工事での事例（事例 1）と、プレストレスト・コンクリート建設業協会の会員企業から入手した事例（事例 2 から 5）を示す。

(1) 事例 1（発泡ウレタン）

単純 RC 中空床版橋のおよそ半分の床版を打ち替えた事例である。1 次施工と 2 次施工に分割し、中空型枠範囲の床版を上面から深さ 15cm までコンクリートと型枠の一部をはつり取った後、中空型枠全長に発泡ウレタンの充填が行われた。ウレタン充填後、新設の鉄筋を配置し、コンクリートの打設が行われた。



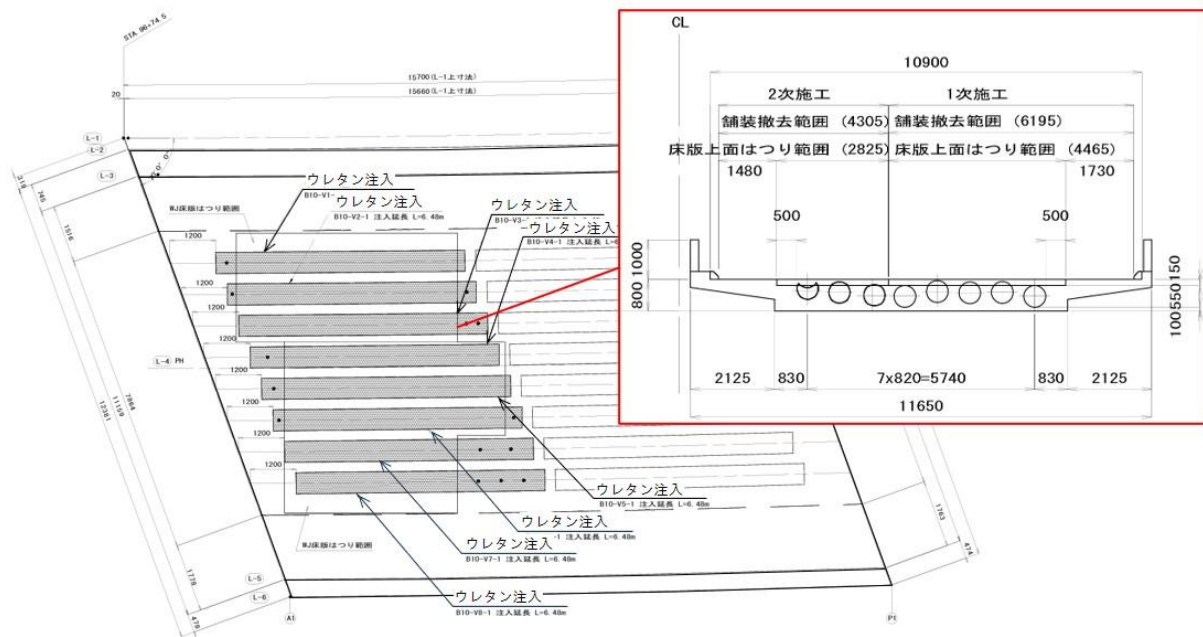


図- 2.1.3 床版補修施工範囲

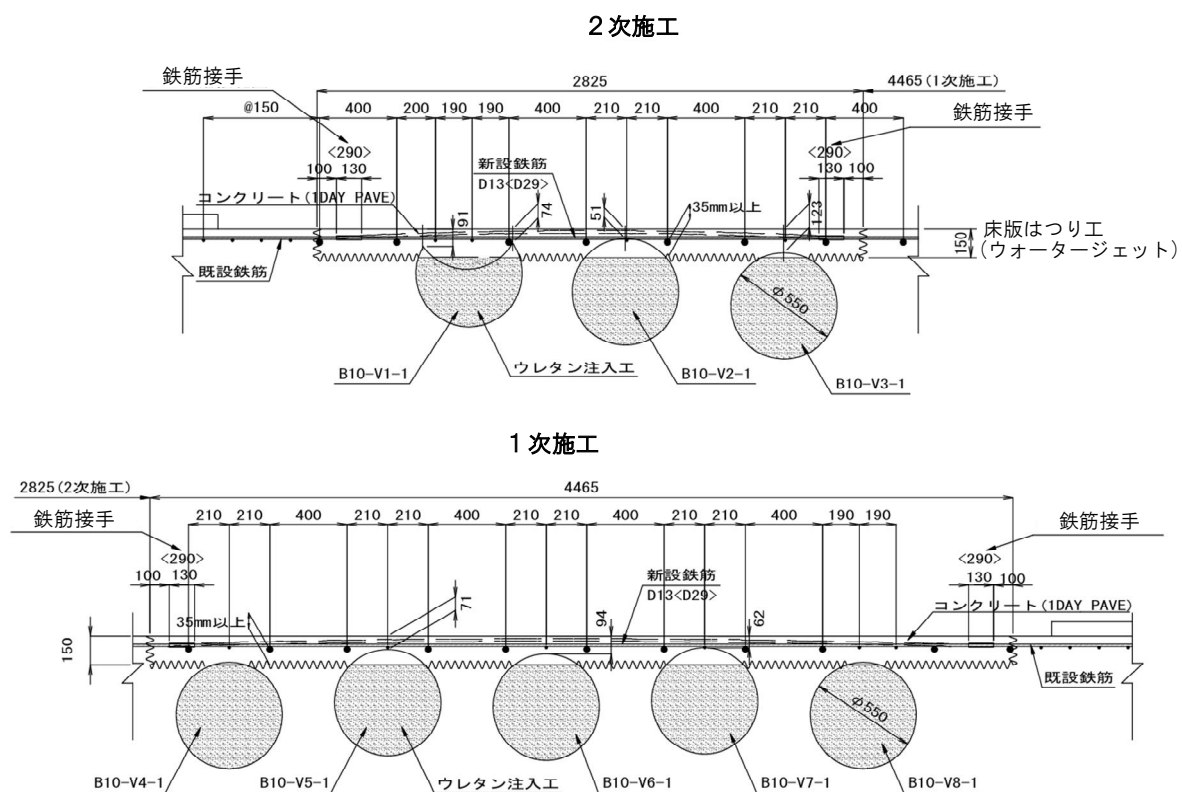


図- 2.1.4 床版はつり、ウレタン注入詳細図（上段：2次施工、下段：1次施工）

(2) 事例 2 (発泡ウレタン)

中空型枠範囲の床版を上面から深さ 15cm までコンクリートと型枠の一部をはつり取った後、床版鉄筋を切断せずに発泡ウレタンの充填が行われた。ウレタン充填後、追加の鉄筋を配置し、コンクリートの打設が行われた。

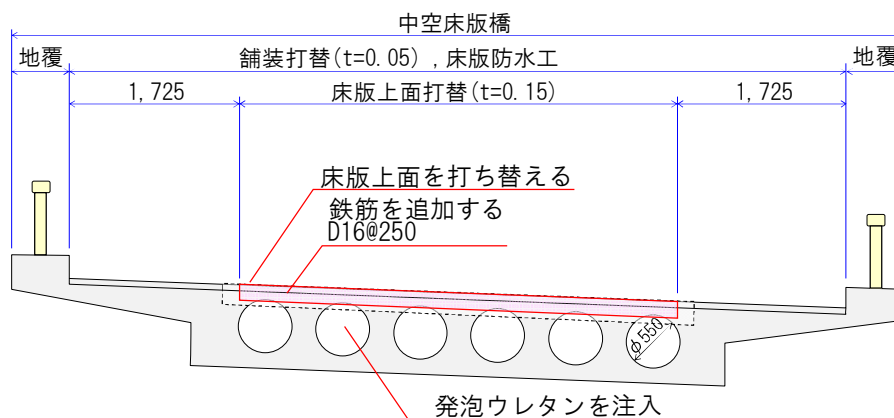


図- 2.1.5 発泡ウレタン充填による補修断面の例

(3) 事例 3 (チューブ型枠)

ウレタン以外の充填材が用いられた事例である。床版上面部の変状部を撤去した上で、鉄筋の隙間からポリプロピレン製のチューブ型枠 (空気式円筒型枠) が挿入された。その後、チューブ内にコンプレッサーにより空気を注入して中空型枠が形成された。

本事例では型枠支持の役割を果たすように、チューブの上部に埋設型枠を設置しているが、既設鋼製中空型枠とチューブ型枠の隙間には、コンクリートの漏れや、打設後の再損傷を防ぐことを目的に、注入材 (シリコンコーキング又はウレタンフォーム) が施工された。チューブ型枠設置後、チューブ型枠頂部に埋設型枠が吊り形式で設置された。この事例では、既設鉄筋にはエポキシ樹脂による塗装が実施された。

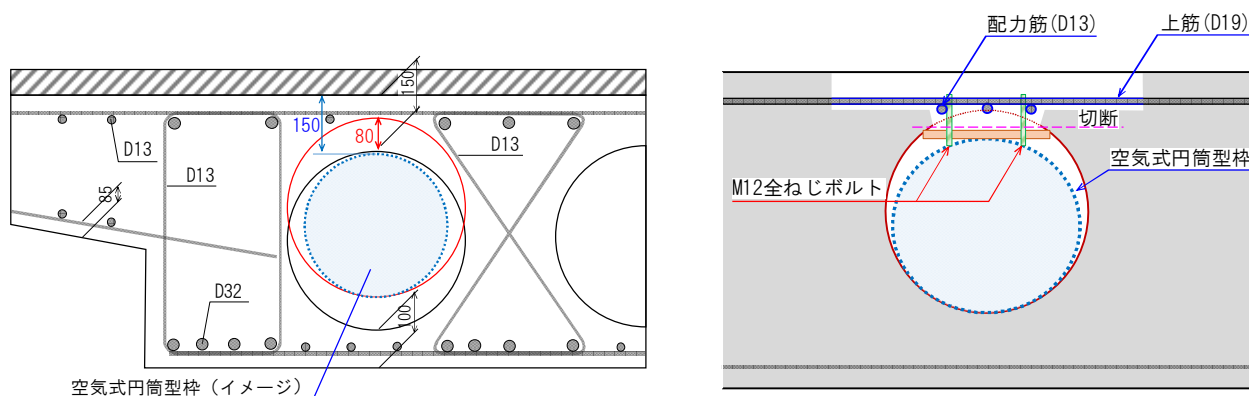


図- 2.1.6 空気式円筒型枠と吊り型枠による補修断面の例

2.1.2 型枠材として吊り型枠を用いた床版打替え

踏み抜きの対策として本研究で収集したその他の事例として、吊り型枠を用いた方法があったため、主な事例を示す。

(1) 事例 4（吊り型枠）

吊り型枠を用いて中空型枠上部を打ち替えた事例である。過去に床版上面にスチールファイバーコンクリート（以下、SFC）による上面増厚が実施されていた。しかし、既設床版と SFC 間の層間剥離や SFC 内でのひびわれ等が確認されたこと、静的載荷試験による全体剛性の低下が確認されたことから、中空型枠上部のコンクリートを含み、床版上面部の打替えが実施された。

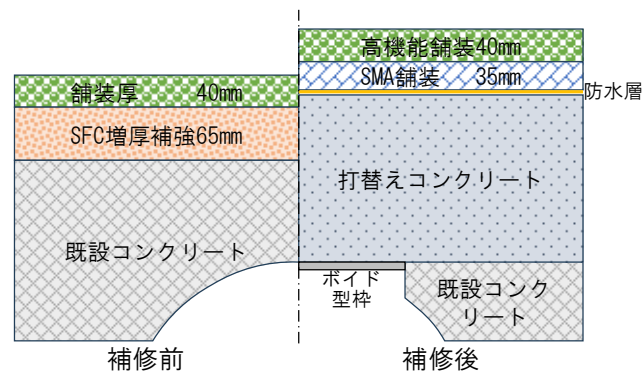


図- 2.1.7 補修断面の構成イメージ図

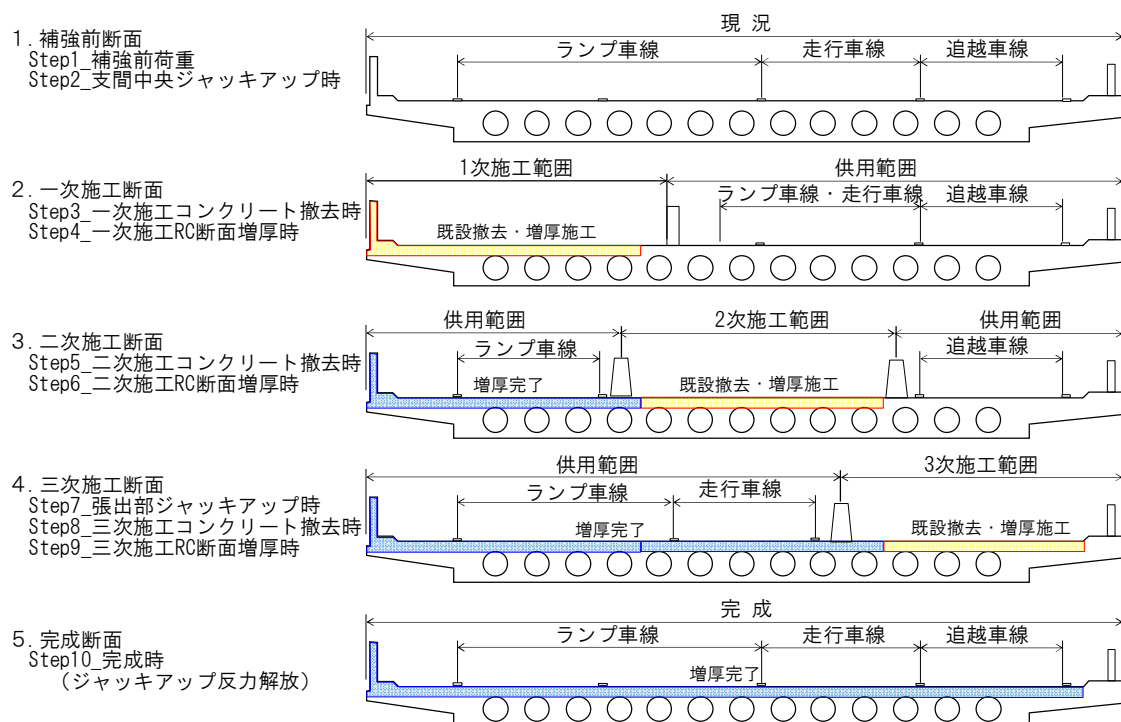


図- 2.1.8 補修時施工ステップの例

(2)事例5（吊り型枠）

本事例は、吊り型枠を用いて緊急対応を行った事例である。損傷部をはつり取り、吊り型枠を設置した後にジェットコンクリートが打設され、当日中に作業が完了した。吊り型枠は、調整や加工が容易な木製型枠が用いられた。



写真- 2.1.1 損傷状況

作業人員： 5名
 使用機械： コンプレッサー、ブレーカー、コンクリートカッター
 作業工程： 16時～ 作業開始
 ↓
 カッター
 ↓
 はつり
 ↓
 型枠設置
 ↓
 鉄筋配置
 ↓
 17時～ ジェットコンクリート打設
 ↓
 養生（3時間）
 ↓
 ～20時 作業完了

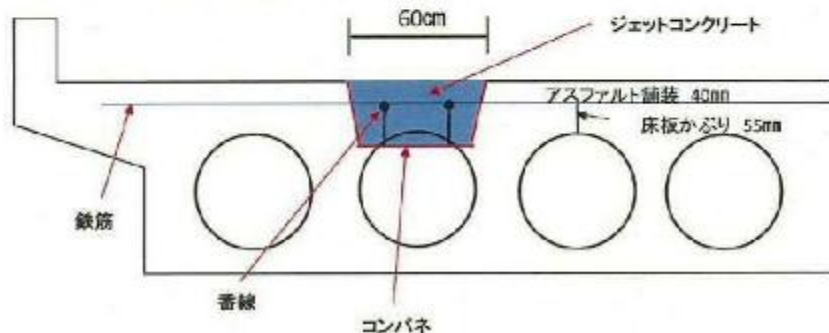


図- 2.1.9 緊急対策フロー

2.2 事例調査を踏まえた検討課題の抽出

ここでは、文献調査には記載がないものの、経済性以外で、実施工で課題となりそうな事項を幅広く挙げることを試みる。

- 中空型枠上部のコンクリートを撤去して打替え補修が実施された事例1～5では、吊り型枠を設置したり、中空型枠内へ発泡ウレタンを充填し、型枠としている。この型枠構造の選定については、既設中空型枠の浮き上がりや変形の状況、鋼製中空型枠本体の腐食状況、部分的もしくは全面的なのかの補修範囲等により、中空型枠上部の型枠構造は異なっているものと考えられる。
- いずれの方法を用いる場合でも、再設置する型枠の剛性の確保が大前提であるが、充填又はコンクリート打設により、既設の円筒型枠が過度に変形しない剛性も確保する必要がある。
- 同一の橋の中でも、多様な浮き上がり性状が見られる可能性を考えると、再設置する型枠形状の自由度の高さは、対策方法の選定の一つの要因になり得ると考えられる。一方で、既存型枠の浮き上がり性状がある程度一定で、かつ広範囲である場合には、抜け落ち箇所以外も一括で実施することになると考えられるので、形状の自由度よりも、形状の標準化とそれに伴う工程の短縮に資する方法が有利になることが考えられる。
- 浮き上がり量が多いときには、補修後の床版厚を確保するために既存型枠の一部を撤去する場合がある。この場合、型枠設置時に床版に配置された既存鉄筋を切断し、型枠設置後に切断した分の鉄筋にさらに継手長を確保したうえでの再設置という工程を経ることの検討も生じる。さらに、補修後の床版厚を確保するため、型枠を建設時の円弧状ではなく、直線的な形状にして床版厚を確保することについても検討が必要となる。
- 既存型枠の撤去のためには、施工性を考慮し、床版上部に配置された既存鉄筋を一部撤去する場合がある。また、補修型枠に吊り型枠を用いる場合は型枠設置と干渉する既存鉄筋を撤去する必要もある。
- 浮き上がりが局所的で、部分的な対応である場合には、形状の自由度が高い型枠構造を用いることで、場所によっては、鉄筋の切断が不要になることで、工程上有利になることもあり得る。
- 浮き上がり性状がある程度一定で、かつ広範囲である場合には、抜け落ち箇所以外も一括で実施することになると考えられるが、作業工程を標準化できるので、形状が標準化される型枠構造を用いて鉄筋の切断・再設置を行う方が有利になることもあり得る。

そこで、本研究では、文献調査で採用が確認できた発泡ウレタン型枠と吊り型枠を例に、中空床版橋における中空型枠上部を含む上面打替えにあたっての、中空型枠上部の型枠に対する「型枠材の要求性能」と「型枠材の施工方法」を検討課題として抽出する。

3章. 設計・施工前の調査の留意点に関する検討

3.1 中空型枠上部の床版厚測定方法

中空型枠上部の床版厚の測定は、様々な方法が取りえる。基本的には、手配に係る時間、費用、調査範囲などを考慮して選定することになると考えられる一方で、いずれの方法でも、調査結果の解釈が必要になり、調査の方法の特性や誤差特性を考慮して調査結果を評価する必要がある。そこで、以下では、非破壊計測（電磁波レーダー法）と微破壊計測（小径削孔）で計測された事例に基づいて、調査結果の評価にあたって考慮するのがよい点を整理した。

3.2 非破壊計測結果と微破壊計測結果の比較

3.2.1 車載式電磁波レーダーと上面削孔の比較

直轄国道の中空床版橋にて、車載式電磁波レーダーによる計測を1次調査で、ボイド管が浮き上がっていると想定される箇所（図- 3.2.1）において舗装を剥がし、車載式電磁波レーダー探査（非破壊）を実施し、同じ箇所でも上面からのドリル削孔により実測（微破壊）2次調査が実施された事例があった。結果を表- 3.2.1 に示す。調べられた範囲では非破壊と微破壊の結果の差は-8～+5mmと±10%程度に収まっていた。

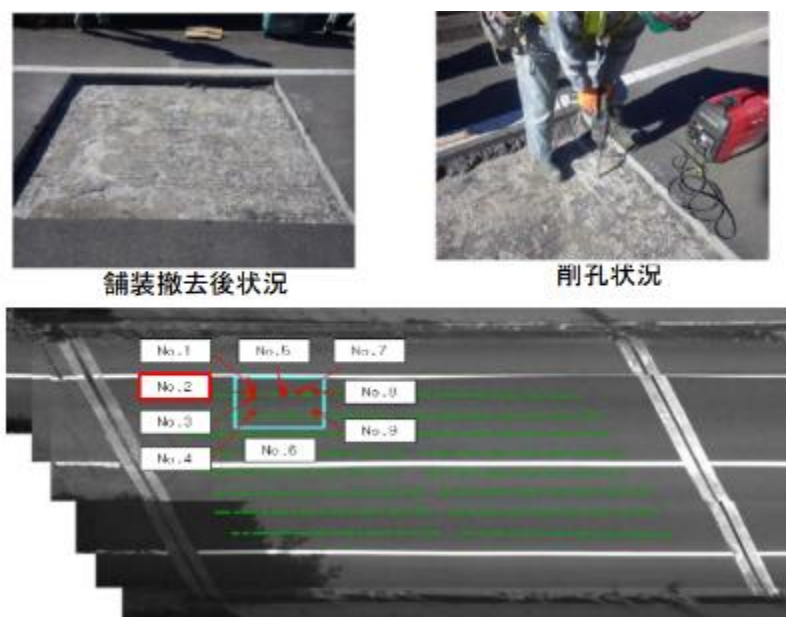


図- 3.2.1 2次調査の状況と調査位置

表- 3.2.1 非破壊調査と微破壊調査の比較

[単位：mm]

削孔位置No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
解析結果 スケル力の	床版上面深度	70	70	70	70	80	70	80	80	80
	ボイド天端深度	160	230	160	130	130	120	130	170	230
	中空かぶり厚	90	160	90	60	50	50	50	90	150
実測	削孔結果	90	—	84	65	45	53	50	82	143

3.2.2 車載式電磁波レーダーと下面削孔の比較

(1)概要

直轄道路の RC 中空床版橋（一部 PC あり）にて、1 次調査として車載型電磁波レーダーを用いた上床版厚の調査が行われ、2 次調査として下面から中空型枠下面の頂部まで微破壊削孔を行って下床版厚を計測し、床版全厚から中空型枠の直径と下床版厚を引いて上床版厚を推定された例があった（下面よりの削孔）。電磁波レーダーによる計測は一定の精度を有していると考えられるが、下面よりの削孔による計測から上床版厚を推定する方法は精度が不明である。一方、下面よりの削孔であれば交通規制を行わずに実施できるため、精度に期待できるのであれば有効である。そこで、これらの結果の比較から、微破壊検査の誤差程度の評価を試みる。

(2)計測結果の比較

電磁波レーダーによる橋面からの上床版厚の計測結果と、同位置における下面からの微破壊調査による計測結果から推定した上床版厚を比較した結果を表-3.2.2 に示す。なお、RC 中空床版橋の 7-①と、PC 中空床版橋の 1-①については、非破壊調査（レーダー）と微破壊調査（下面削孔）の差分が大きすぎるため、異常値と捉え今回の評価からは除外した。

全体に微破壊調査の方が上床版厚が大きく出る傾向にあった。異常値を除いても、非破壊調査（車載型電磁波レーダー）と微破壊調査（下面よりの削孔計測）では、マイナス側の最大で -10mm、プラス側の最大で 61mm の差異がある。一方、唯一の上面よりの削孔調査を実施した 1-①では、上面から直接測定した結果と非破壊にて計測した結果の差異は確認されていない。

図- 3.2.2 に 2 つの計測方法の相関関係を示す。非破壊調査（レーダー）の計測結果を横軸に、微破壊調査（下面削孔）の計測結果を縦軸に取っている。ばらつきはあるものの、1:1 となる線（灰破線）から平行移動したような近似線（青点線）となっており、一定の相関性は見られる。

図- 3.2.3 には、非破壊調査（レーダー）と微破壊調査（下面削孔）の差分の正規分布を示す。差分の平均値は 26mm、標準偏差は 18mm となっており、比較的ばらつきが大きいことが分かった。

これらのことから、非破壊調査と微破壊調査の関係性にはある程度の相関があり全体的な傾向を見ることはできるものの、個別の計測結果の差に対しては相応のばらつきを有していることが分かった。

表- 3.2.2 上床版厚調査結果

構造区分	橋梁 番号	供用開始 (年)	調査 番号	設計値	非破壊 調査結果	微破壊調査		調査結果の差 (微破壊-非破壊)
						調査方法	調査結果	
RC 中空 床版橋	1	1991 年	①	150 mm	60 mm	上 面 削 孔	60 mm	0 mm
	2	1970 年	①	150 mm	70 mm	下 面 削 孔	89 mm	19 mm
	3	1969 年	①	150 mm	60 mm	下 面 削 孔	54 mm	-6 mm
			②		50 mm	下 面 削 孔	66 mm	16 mm
			③		50 mm	下 面 削 孔	45 mm	-5 mm
			④		60 mm	下 面 削 孔	50 mm	-10 mm
			⑤		60 mm	下 面 削 孔	75 mm	15 mm
	4	1970 年	①	150 mm	30 mm	下 面 削 孔	59 mm	29 mm
			②		30 mm	下 面 削 孔	91 mm	61 mm
	5	1970 年	①	150 mm	60 mm	下 面 削 孔	82 mm	22 mm
			②		70 mm	下 面 削 孔	96 mm	26 mm
			③		70 mm	下 面 削 孔	86 mm	16 mm
	6	1978 年	①	150 mm	90 mm	下 面 削 孔	145 mm	55 mm
			②		100 mm	下 面 削 孔	130 mm	30 mm
			③		80 mm	下 面 削 孔	130 mm	50 mm
			④		60 mm	下 面 削 孔	110 mm	50 mm
			⑤		50 mm	下 面 削 孔	100 mm	50 mm
			⑥		120 mm	下 面 削 孔	145 mm	25 mm
			⑦		40 mm	下 面 削 孔	65 mm	25 mm
			⑧		60 mm	下 面 削 孔	75 mm	15 mm
			⑨		40 mm	下 面 削 孔	85 mm	45 mm
	7	1978 年	①	150 mm	80 mm	下 面 削 孔	190 mm	110 mm
			②		40 mm	下 面 削 孔	80 mm	40 mm
			③		60 mm	下 面 削 孔	90 mm	30 mm
			④		60 mm	下 面 削 孔	80 mm	20 mm
			⑤		40 mm	下 面 削 孔	50 mm	10 mm
	8	1978 年	①	150 mm	80 mm	下 面 削 孔	130 mm	50 mm
			②		110 mm	下 面 削 孔	130 mm	20 mm
			③		80 mm	下 面 削 孔	90 mm	10 mm
			④		120 mm	下 面 削 孔	130 mm	10 mm
			⑤		110 mm	下 面 削 孔	135 mm	25 mm
			⑥		90 mm	下 面 削 孔	120 mm	30 mm
			⑦		80 mm	下 面 削 孔	120 mm	40 mm
			⑧		80 mm	下 面 削 孔	125 mm	45 mm
	9	1978 年	①	150 mm	80 mm	下 面 削 孔	95 mm	15 mm
			②		80 mm	下 面 削 孔	110 mm	30 mm
			③		90 mm	下 面 削 孔	135 mm	45 mm
			④		100 mm	下 面 削 孔	140 mm	40 mm
PC 中空 床版橋	1	1970 年	①	150 mm	20 mm	下 面 削 孔	139 mm	119 mm
			②		60 mm	下 面 削 孔	80 mm	20 mm
			③		60 mm	下 面 削 孔	59 mm	-1 mm
凡例				異常値と思われる結果		前5平均：66mm (微破壊の方が大きい)		

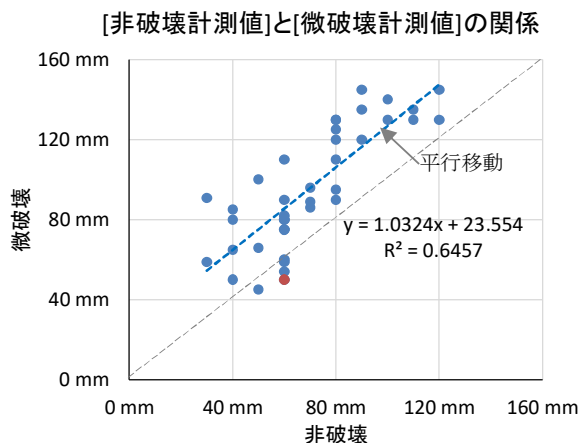


図- 3.2.2 床版厚調査 計測値の関係

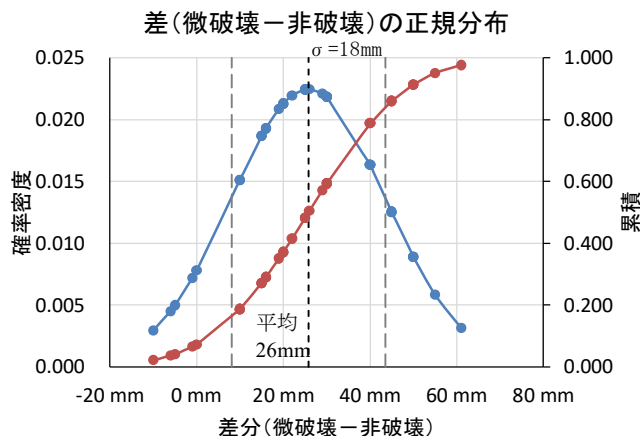


図- 3.2.3 床版厚調査 差の正規分布

(3)下面削孔による誤差の評価

車載型電磁波レーダーによる計測誤差は、一般に $-10\text{mm} \sim +10\text{mm}$ と言われており、3.2.1の例においても $-8\text{mm} \sim +5\text{mm}$ と高精度であった。一方、下面からの微破壊調査による上床版厚計測は、以下の4つの誤差を有すると考えられる。

- ①中空床版橋の施工誤差として、床版厚の出来形基準は一般に、 $-10\text{mm} \sim +20\text{mm}$ とされている場合が多い。
- ②中空型枠（ボイド管）の製作誤差が直径で $-10\text{mm} \sim +10\text{mm}$ とされている。
- ③レーダーで推定された中空型枠中心位置と、微破壊検査の削孔位置のずれによる誤差が $0\text{mm} \sim +10\text{mm}$ 程度あると考えられる。
- ④施工時の誤差として中空型枠（ボイド管）が変形する可能性がある。

これらを取りまとめたものを図- 3.2.4 に示す。これらの誤差を集計すると、以下のようになる。

- | | | |
|------------------|---|--|
| ③下床版厚計測時の誤差 | : | $0\text{mm} \sim +10\text{mm}$ |
| ①～②上床版厚推定時の誤差 | : | $-30\text{mm} \sim +20\text{mm}$ |
| ①～③推定後の合計誤差 | : | $-30\text{mm} \sim +30\text{mm}$ |
| ①～④型枠変形を考慮した合計誤差 | : | $-30\text{mm} + \alpha \sim +30\text{mm} + \alpha$ |

一方、実際の計測結果では、非破壊調査の結果を正とした場合で誤差が $-10\text{mm} \sim +61\text{mm}$ となっており、①～③の合計誤差と異なっていた。したがって、実際の橋において浮き上がりが生じるといったようなケースでは、型枠下面も変形していることが考えられる。しかし、型枠の変形は微破壊調査では捉えられないため、下面よりの削孔で上床版厚を推定するのは難しいものと考えられる。

これらのことから、下面よりの削孔による計測では、路面の交通規制が不要となるメリットはあるものの、非破壊調査（電磁波レーダー）に比べて精度面の優位性が低いと考えられる。

なお、例えば、図- 3.2.5 のように下面よりの削孔にて型枠下面に微小な孔をあけ、中空型枠の上部からの距離を計測することで型枠の変形や製作精度による誤差を排除でき、精度が向上するものと考えられるが、躯体や型枠を傷つけることとなるため慎重に行う必要がある。

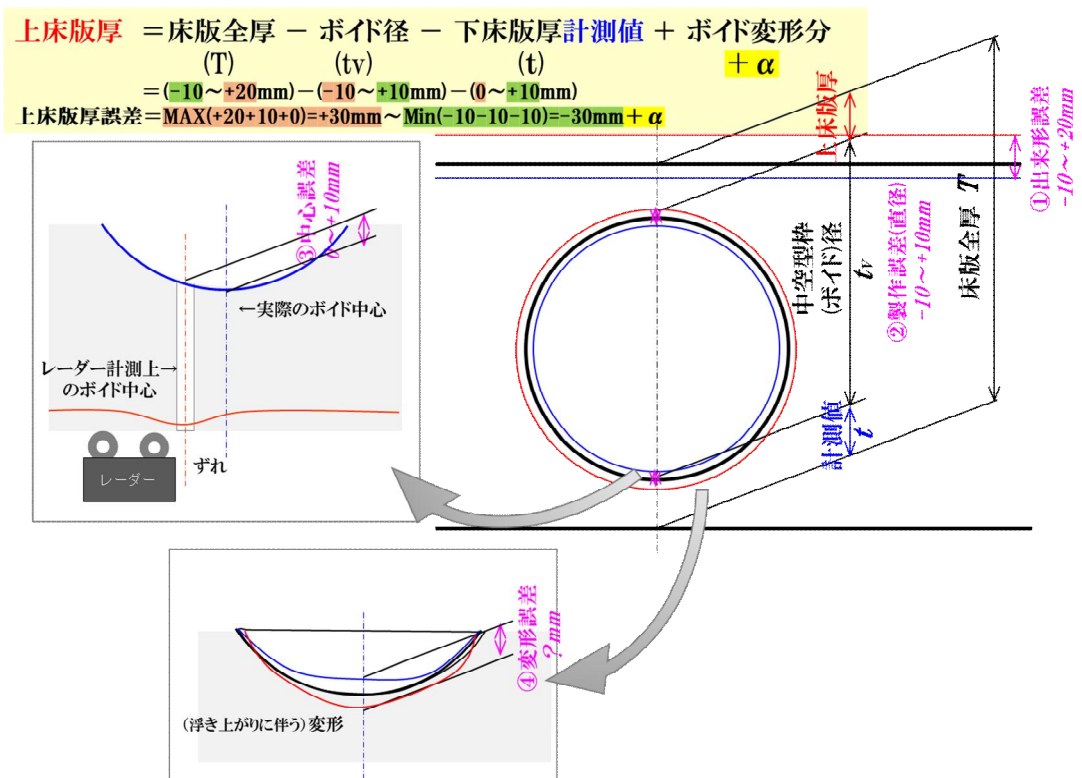


図- 3.2.4 下面削孔計測による上床版厚推定において想定される誤差

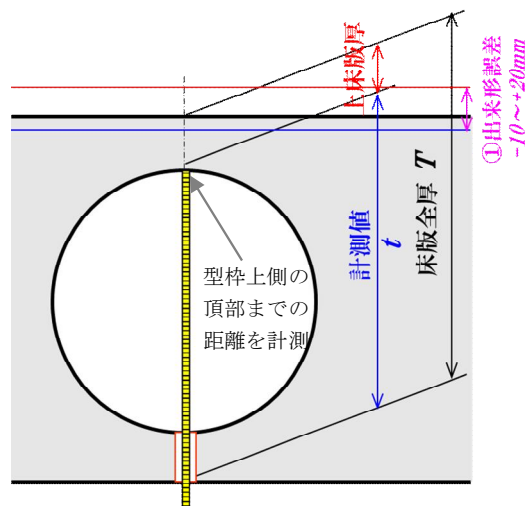


図- 3.2.5 下面削孔計測の精度を上げる方法の例

3.2.3 各計測方法の妥当性について

下面よりの削孔調査による検証は、交通規制が不要であり比較的簡易に上床版厚を求められるが、各種誤差要因により精度は低く、調査結果の傾向を把握できる程度にとどまると考えられる。一方、上面よりの削孔調査では正確な値が計測でき、非破壊計測との比較では、非破壊（車載型電磁波レーダー）と微破壊（削孔調査）の計測値はおおむね一致していた。

3.3 調査方法の提案

以上の分析結果から、例えば、電磁波レーダーを用いる場合の調査方法として、以下の方法及び手順を提案する。

①事前準備

設計図書等から中空型枠（ボイド管）の位置や径を推定しておき、調査時の参考にする。また、床版厚が不足している箇所は、舗装等に影響が出ている可能性があるため、事前に点検結果等を確認しておくのが良い。

②1次調査

対象橋梁に対して1次調査を行う。型枠の浮き上がりは施工不良も一つの原因であることから、中空床版橋の全域において生じる可能性があるため、調査範囲に留意する。

③調査の整理

1次調査で得られたデータを整理し、床版厚ごとに範囲をマッピングし、浮き上がり等により床版厚が薄い箇所を特定する。このとき、予め用いる機器等の適用範囲や誤差程度について情報を収集し、結果の評価に反映させる必要がある。

④2次調査

1次調査で不明瞭だった範囲や判断が難しい箇所がある場合は2次調査の実施を検討する。なお、下面からの削孔調査では、2次調査に求められる精度は得られない可能性が高いことに注意する必要がある。

4章. 補修施工方法に対する検証検討

4.1 型枠材の要求性能の整理

4.1.1 各種規準書類による型枠材の要求事項

中空型枠上部の踏み抜き補修に使用する型枠材の要求性能を検討するにあたり、道路橋示方書等の基準書類^{1), 2), 3), 4)}に示される既存の型枠に関する規定を表-4.1.1に整理した。

表- 4.1.1 既存の型枠に関する規定

種類	内 容
道路橋示方書 ¹⁾	1) 型枠及び支保工は、コンクリートの打込みから硬化にいたるまでの起こり得る最も不利な組合せの荷重に対して、十分な強度と安全性を有するものでなければならない。 2) 型枠及び支保工は、完成した構造物が所要の性能を確保できるように、その形状及び位置が正確に保たなければならない。 3) 型枠及び支保工は、コンクリートの耐久性及び表面の出来形を損なわないように配慮しなければならない。 4) 型枠及び支保工の設計及び施工にあたっては、コンクリート打設に伴う型枠及び支保工のたわみの影響について予測し、設計の前提条件の確保並びに完成部材に悪影響を及ぼさないような措置が講じられなければならない。 5) 型枠の設計にあたっては、鉛直方向荷重として、型枠、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機械器具、仮設等の重量及び衝撃等を考慮する。また、水平方向の荷重として、フレッシュコンクリートの側圧が考慮されなければならない。 6) 型枠は、モルタルの漏れない構造としなければならない。 7) 型枠内面には、はく離剤を塗布することを原則とする。 8) 型枠を組立てる場合の部材のかどは、面取りを行うことを原則とする。 9) 型枠の締付け材は、型枠を取りはずした後、コンクリート表面に残らないものが使用されなければならない。また、塩害の影響を受ける地域では、型枠、セパレータ及び型枠組立てに用いた補助鋼材は、かぶり内から除去されなければならない。 10) 支保工は、プレストレッシング時のプレストレス力によるコンクリートの変形及び反力の移動を阻害しないものが使用されなければならない。 11) 型枠及び支保工は、コンクリートに設計で想定しない応力等を与えないように取りはずされなければならない。 12) 型枠及び支保工は、部材等が所定の出来形を満足するように施工されなければならない。 13) 型枠及び支保工は、コンクリート打込み前に部材等が所定の出来形を満足するような寸法で堅固に設置されていることを確認する。
コンクリート標準示方書 ²⁾	1) 型枠および支保工は、コンクリート構造物が設計図書に示されている形状、寸法となるよう事前に作成した施工計画書に従い、設計、施工しなければならない。 2) 型枠および支保工は、鉛直方向荷重、水平方向荷重、コンクリートの側圧および特殊荷重に対して、必要な強度と剛性を有し、構造物の形状、寸法にずれが生じないように設計、施工しなければならない。 3) 型枠および支保工の組立は、要求される精度が満足されているか、コンクリートの打込み前に組立精度を確認しなければならない。 4) 型枠および支保工は、構造物の種類、規模、重要度、施工条件および環境条件を考慮して、鉛直方向荷重、水平方向荷重、コンクリートの側圧および特殊荷重に示す各荷重に対して安全性を確保できるように設計しなければならない。なお、支保工の設計においては、強度に加えて変形について考慮するものとする。 5) 型枠および支保工に用いる材料は、強度、剛性、耐久性、作業性、打ち込まれるコンクリートに対する影響、コンクリート構造物の美観および経済性を考慮して選定しなければならない。

	6) 型枠および支保工の材料として用いる木板、合板、鋼材等は、それぞれ JIS または JAS に適合するものを用いることを標準とする。 7) 水密性を要するコンクリートにおける型枠の締付け金物は、漏水に対して悪影響のないものを用いなければならない。 8) 型枠は、作用荷重に対して、形状および位置を正確に保てるように、適切な締付け金具を選定しなければならない。 9) 型枠は、組立および取外し作業が容易で、取外し時にコンクリートその他に振動や衝撃等を及ぼさない構造としなければならない。また、せき板またはパネルの継目はなるべく部材軸に直角または平行とし、モルタルが漏出しない構造としなければならない。 10) 特に指定のない場合でも、コンクリートのかどに面取りができる構造を標準とする。 11) 必要のある場合には、型枠の清掃、検査およびコンクリートの打込みに配慮して、適切な位置に一時的な開口部を設けなければならない。 12) 型枠の施工にあたっては、所定の型枠材を用い、所定の精度内におさまるよう、加工および組立を行わなければならない。また、締付け金物は、型枠を取り外した後、コンクリート表面に残しておいてはならない。 13) せき板内面には、剥離剤を塗布することを原則とする。 14) コンクリートを打ち込む前および打込み中に、型枠の寸法および不具合の有無を確認しなければならない。
コンクリート道路橋施工便覧 ³⁾	1) 型枠および支保工とは、構造物の施工にあたり、フレッシュコンクリートから十分強度がでて安定した状態になるまで、仮に支えておく仮設構造物である。 2) 型枠の設計には、鉛直方向荷重として、型枠、コンクリート、鉄筋、作業員、施工機器器具、仮設備などの重量および衝撃等を、水平方向荷重として、フレッシュコンクリートの側圧を考慮する必要がある。 3) プレストレストコンクリート橋にも用いる型枠および支保工としては、部材にプレストレスを与え、コンクリートの弾性変形を拘束しない構造を選定する必要がある。 4) 型枠に使用する材料は、要求されるコンクリート部材の寸法が正確で、打ち上げ面の仕上がりがよく、転用が容易で、かつ安全に作業できるものを使用する必要がある。 5) 木製型枠の材料としては、すぎ、えぞ松、赤松等多く使用されている。板材は厚さが正しく、死節、割れ、腐れ等の欠点がないものを使用する必要がある。せき板相互の接合部は、合じゃくり等の加工をしてセメントミルクの流出を防止するような構造とするのがよい。 6) 薄鉄板性円筒型枠は、中空床版橋等で用いられており、薄肉鋼板をスパイラル鋼管に成型して製作することが多い。この種の型枠は、コンクリート構造物の内部に閉断面を形成するものである、中空部に滞水が生じないように水抜き孔を必ず設ける必要がある。また、水抜き孔をファイバースコープ等が挿入できる径以上とすると供用後の維持管理に有用である。 7) コンクリート橋で用いられる紙製型枠はコンクリート中に空洞（ボイド）を設けるために使用される円形及び角形のもの、あるいは化粧型枠として使用されるものがある。発泡スチロール製型枠は主に化粧型枠として使用されている。紙製型枠、発泡スチロール製型枠ともに軽量かつ加工が容易であるから、工期の短縮が望まれるものの、その材質上取扱い時には火気に注意する必要がある。 8) 型枠組立て材は、型枠が組み立てられてからコンクリートが打込まれ、それが硬化するまでの間、型枠を所定の形と位置に保持するような材料とする必要がある。
JIS 設計製造便覧 ⁴⁾	1) スラブ橋げたに使用する埋設枠は、コンクリートの締固めに十分耐える構造であること。材質としては、木材、段ボール、発泡スチロール 2) 埋設枠の位置を正確に確保するために適当なジグで固定しなければならない。

4.1.2 中空床版上部に対する型枠材の性能指標の整理

中空床版橋としての所定の耐荷性や耐久性を確保するため、上記で示す型枠材の既存規定及び中空型枠上部の踏み抜き補修事例を踏まえて、型枠材に対する要求性能を以下に示す。なお、型枠材は、構造物が安定する状態となるまで、仮に支えておく仮設材であることを前提条件とする。

- ① コンクリートの必要強度発現、所定の躯体形状・寸法を確保する等、構造物が安定する状態となるまで、考慮すべき荷重に対し、十分な強度特性や剛性を有すること。
- ② 補修のために、健全部のコンクリートや鉄筋を必要以上に撤去しなくてもよい等、施工性に優れること。
- ③ 型枠材とし、構造物の内部へ存置されることから、供用時（輪荷重載荷時）の応力伝達機構を阻害しないこと。
- ④ 型枠材の存置による重量増加に伴い、上部工や下部工の耐荷性・耐震性等の所定の性能に著しい影響を与えないこと。

上記①～④より、埋め込み材料又は型枠材の性能指標を表-4.1.2に整理した。

表- 4.1.2 埋め込み材料又は型枠材の性能指標

性能指標	型枠材(木材等)	型枠以外の 埋め戻し材料	確認内容
耐荷性	応力検討	一軸圧縮強度	コンクリートの自重等に耐えうる強度を有しているか
剛 性	応力検討 たわみ制限	(埋戻材硬化後) 弾性係数	どの程度の弾性係数であれば、自重等により型枠材が沈下しないのか
施工性	狭小部への型枠挿入のし易さ 狭小部での型枠組立易さ（時間、挿入可能 or 不可） コンクリートの撤去幅や鉄筋の切断範囲		簡単に型枠が設置できるのか、どの程度、健全部のコンクリートや鉄筋を撤去する必要があるのか
中空型枠の 排水性	中空型枠内が滞水しない構造		水抜き孔が閉塞されることはないか

4.2 型枠材の施工方法に対する実験的検証

4.2.1 中空型枠上部の踏み抜きにおける補修方法の実験的検証（試験）

(1) 中空型枠上部の踏み抜き補修の検証試験計画

中空型枠の踏み抜きに対し、型枠材料は表- 4.1.2 を満たせば特定するものではないが、本検証においては、2.2 に示したとおり、踏み抜き補修の作業標準を提案するため、対策事例で用いられていた「発泡ウレタン」と「吊り型枠」を用い施工性と型枠性能を検証する。

1)中空型枠上部の踏み抜き補修の検証試験

踏み抜き補修に使用する非構造部材としての埋め込み材料及び型枠材の施工性能の検証を行うことを目的とし、補修工事を行う場合、緊急性が高い場合が多くあるものと想定し施工性と型枠としての性能について検証を行った。

[検証試験①-1] 発泡ウレタンを中空内部に充填して型枠材として使用されているケース

本試験では、2 章の事例を踏まえ、発泡ウレタンの使用条件を以下とした。

- 1) 中空型枠が極端に浮き上がり、型枠形状が煩雑となる
- 2) 床版鉄筋を切断しないため吊り型枠が設置できない
- 3) 補修施工延長が長く平面線形等があり、型枠形状が煩雑になる

[検証試験①-2] 吊り型枠の設置（埋め殺し）されているケース

本試験では、2 章の事例を踏まえ、吊り型枠の使用条件を以下とした。

- 1) 変状形状の変化が小さく、型枠形状が簡略である
- 2) 型枠設置のため、床版鉄筋等を撤去可能で設置作業が容易である
- 3) 補修施工箇所が部分的であり、型枠形状が簡略である

2)検証試験ケース

本検証試験では、対策事例が確認されている a) 型枠材として発泡ウレタンを使用した検証試験[①-1]と、b)吊り型枠の設置（埋め殺し）されているケース（検証試験[①-2]）の2 ケースを想定した。

3)試験供試体

- ・施工速度の検証を主たる目的のため、実物大相当の試験供試体とし、試験供試体の形状、配筋図を図- 4.2.1 に示す。試験供試体の配筋は、標準的な鉄筋（主筋、配力筋、スターラップ）を配置した（写真- 4.2.1）。補修を想定した箇所（以降、2 次コンクリート）を図- 4.2.1 の水色ハッチング部に示す。
- ・試験供試体に用いる中空型枠は、 $\phi 650\text{mm} \times$ 管厚 1.0mm の波形リブ付き中空型枠 1 体を用いた（写真- 4.2.1）。なお、発泡ウレタンや吊り型枠の型枠材を埋め込む開口部を設ける。開口サイズは、試験供試体の天端から 200mm の位置での幅 346mm（奥行 4,400mm）とした。
- ・中空型枠（吊り型枠側のみ）に水抜き孔（内径 $\phi 30\text{mm}$ ）を端部 1 箇所に配置した。水抜き孔は滞水試験と同様に開閉式とした。
- ・コンクリート打設は 2 回に分けて行った。1 回目の打設では、補修を想定した箇所（図の水色

ハッチング部) 以外行い (図- 4.2.1)、このコンクリート上面はレイトンス処理を行った。(写真- 4.2.2)

- ・ 型枠材 (発泡ウレタン、吊り型枠) を設置したあとに、補修を想定した箇所の 2 次コンクリート打設を行った。



写真- 4.2.1 中空型枠及び鉄筋配置状況



写真- 4.2.2 1次コン打設完了状況

試験体配筋図

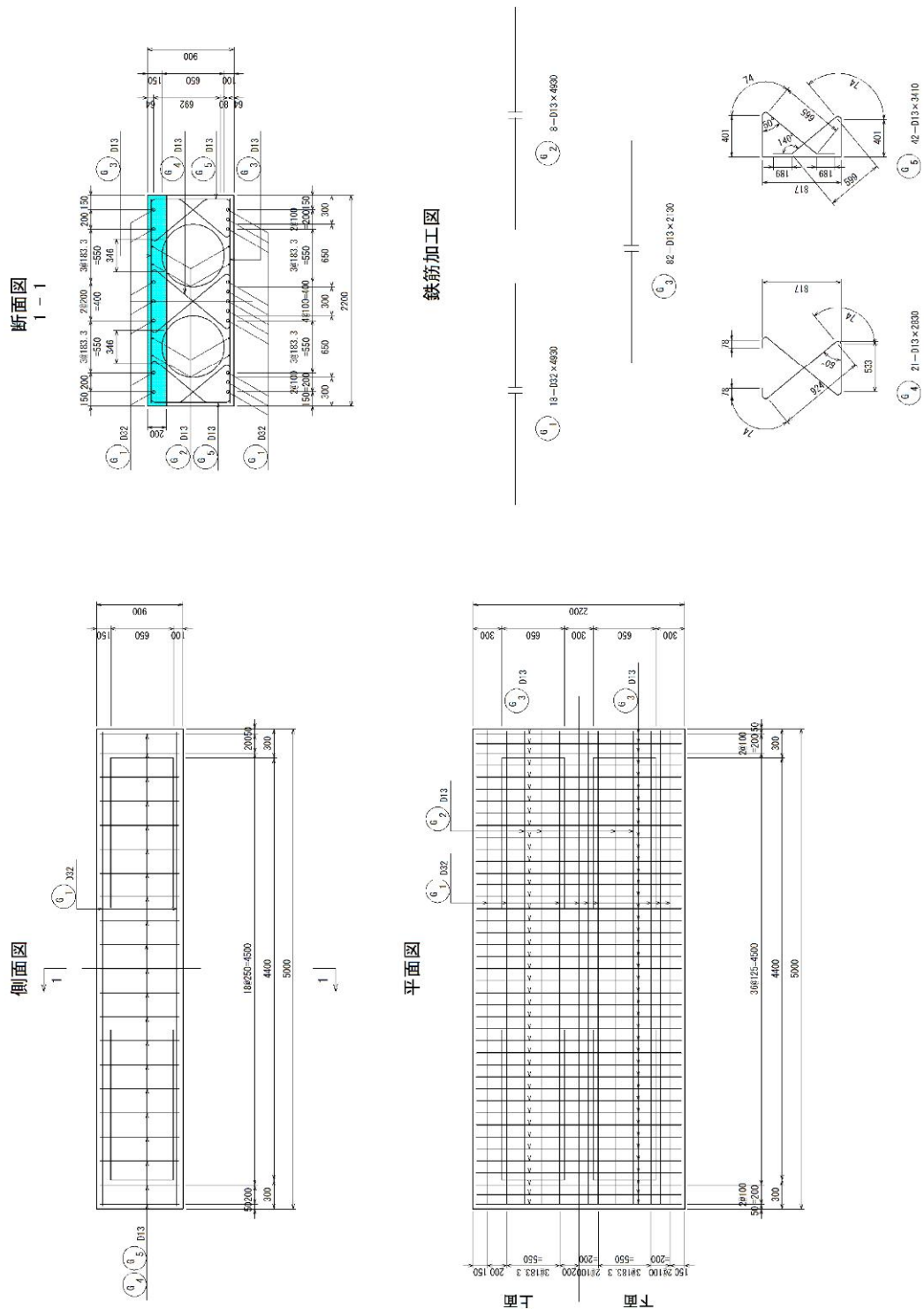


図- 4.2.1 試験供試体の形状、配筋図

4) 型枠材として発泡ウレタンを使用した検証試験[①-1]

① 発泡ウレタンの使用材料

本検証試験では、中空床版橋での埋め戻し材料としての発泡ウレタンのうち、施工実績があり、柔らかく成形作業の施工性がよいとされている発泡倍率 40 倍の発泡ウレタンを使用した。

② 発泡ウレタン物理的性状試験方法

発泡ウレタンの硬化特性を把握するうえで、以下の手順により、圧縮強度及び弾性係数を測定し、物理的性状を確認した。

- ・発泡ウレタンを、材料指定の容積比で混合し、発泡体を形成
- ・コア抜きドリルを用いて $\phi 60 \times 50\text{mm}$ のサイズに切出し
- ・一軸圧縮試験を実施

本試験で使用した発泡ウレタン（下表 C）の弾性係数を図-4.2.2 に示す。

製 品	発泡倍率 (倍)	最大圧縮強度 (MPa)	最大ひずみ※ (%)	弾性係数 (MPa)
A	12	1.10	6.3	49.1
B	20	0.48	5.3	19.5
C	40	0.17	6.2	6.1

※圧縮強度最大点のひずみ

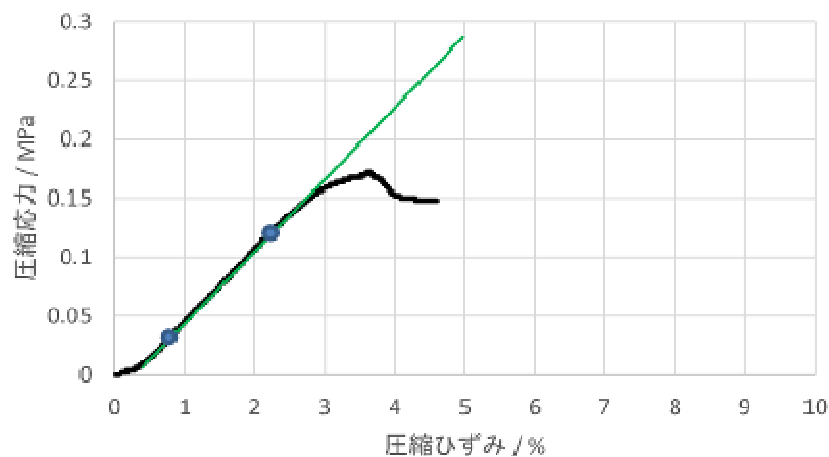


図- 4.2.2 使用した発泡ウレタンの弾性係数

③ 施工手順

検証試験 1（発泡ウレタン）の手順を図- 4.2.3 に示す。対策事例における発泡ウレタン充填の施工手順をもとに行った。

- a) 中空型枠内に、中空型枠の残骸や、鋭利な鉄片などないか確認を行い、除去した。
- b) 中空型枠から発泡ウレタンが溢れ、鉄筋に付着しないように、中空型枠上部の開口部両脇に養生板などを設置した。
- c) Air 用注入機のキャリブレーション完了後、注入機に接続した注入ホースより、発泡ウレタンを中空型枠内部に流し入れ、発泡・充填、硬化させた（写真- 4.2.3）。
- d) 発泡ウレタン充填後に、隙間が生じた場合は、追加充填を行った。
- e) 養生板の撤去後に、過発泡などのウレタンの不要部分を小型のノコギリやカッターなどで切除し、成型した（写真- 4.2.4、図- 4.2.4）。ウレタンの成型時には、床版厚（ $t=150\text{mm}$ ）を確保することに留意した。



写真- 4.2.3 ウレタン充填状況



写真- 4.2.4 ウレタン成型完了状況

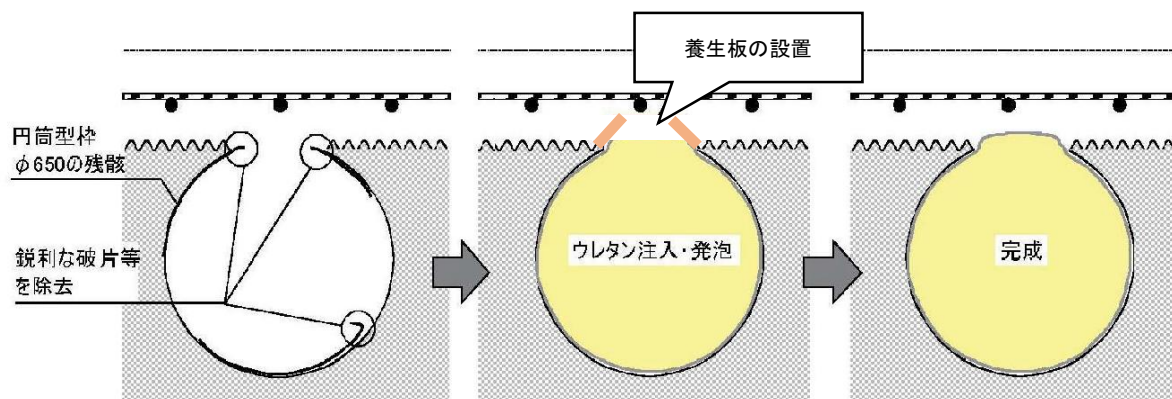


図- 4.2.3 検証実験 1（発泡ウレタン）の手順^{b)}

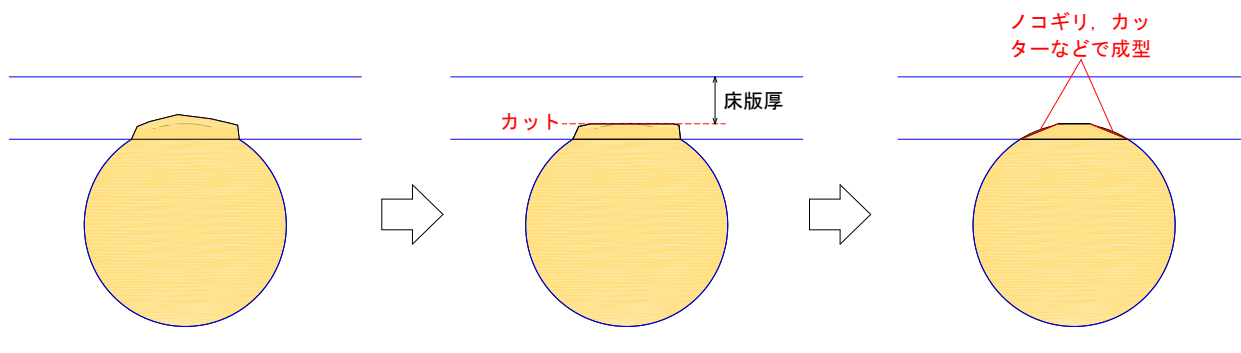


図- 4.2.4 発泡ウレタンの成型手順

5) 型枠材として吊り型枠を使用した検証試験[①-2]

① 使用材料と試験方法

吊り型枠（埋設型枠）の形状を図- 4.2.5 に示す。現況復旧を目的にしているため、円形を確保する強固な型枠とし、材質は木製とする。

吊り型枠（埋設型枠）構造は、上床版補修後、閉塞の有無を、直接目視や水抜き孔より、先端可動式工業用ファイバースコープで視認し、コンクリート打設に伴う型枠設置の状況を視認し静止画を撮影した。

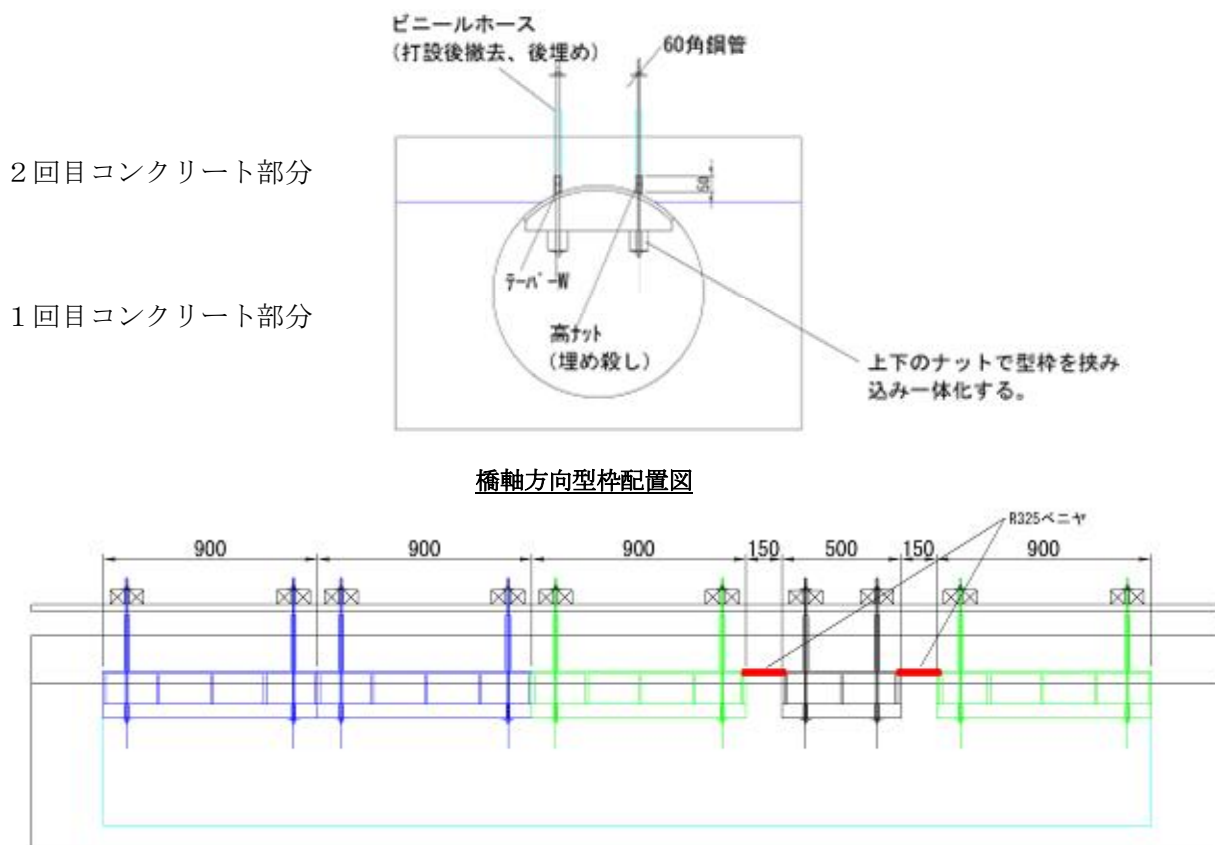


図- 4.2.5 吊り型枠（埋設型枠）の形状

②施工手順

検証試験[①-2]（吊り型枠の設置）の手順を以下に示す。

- a) 中空型枠の残骸や、鋭利な鉄片、コンクリートゴミなどを除去した。
- b) 中空型枠上部の上床版厚を確保できる型枠形状を確認し、予め型枠を加工した（写真- 4.2.5）。
- c) コンパネを中空型枠内に差し込み、ボルトで上部 60 角鋼管へ仮固定した（図- 4.2.6）。
- d) 必要な上床版厚さを確認しながら、吊り型枠がコンクリート打設時に下方に変動しないように、確実に 60 角鋼管部ナットで締めつけを行い、固定した（写真- 4.2.6）。
- e) 2 次コンクリート打設時に、中空型枠内にコンクリートのノロ等が漏れないように、端部型枠の隙間に、シール材、隙間テープで養生した（写真- 4.2.7）。



写真- 4.2.5 吊り型枠製作状況

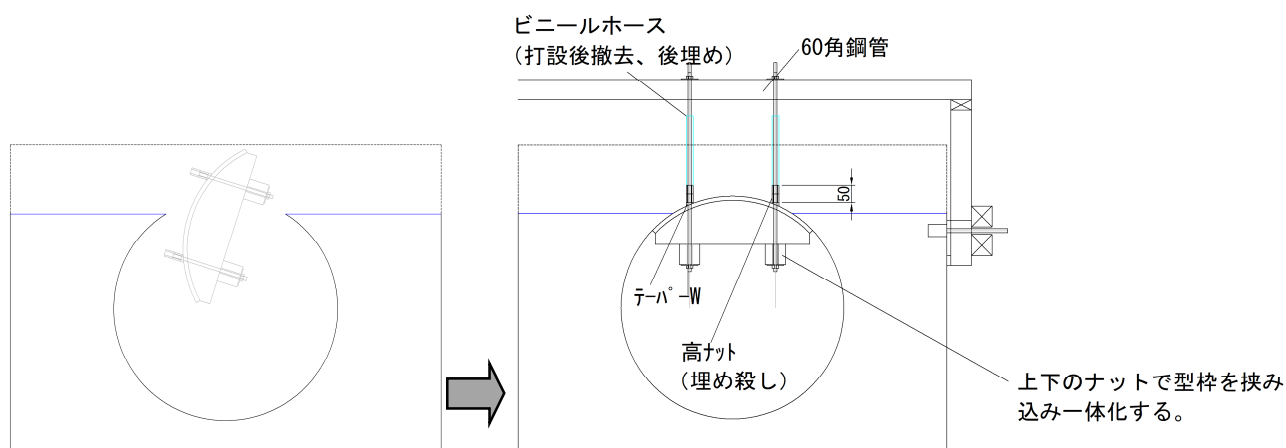


図- 4.2.6 検証実験[①-2]（吊り型枠の設置）の手順



写真- 4.2.6 吊り型枠取付け状況



写真- 4.2.7 吊り型枠設置完了状況

4.2.2 試験結果

(1) 型枠材による施工性検証結果

表- 4.2.1 に、本検証試験における発泡ウレタン及び吊り型枠の施工タイムスケジュールを示す。

1)型枠材として発泡ウレタンを使用した検証試験[①-1]

- ・発泡ウレタンは、15 分で注入完了した。ウレタン充填完了の 5 分後に、ウレタンの表面温度が 40℃程度まで下がったため、作業員 4 名でウレタン成型作業を開始し、40 分程度（1m 当り 10 分程度）で作業を終え、発泡ウレタンの合計作業時間は 60 分となった。ただし、ウレタン充填の時間は、15 分程度であり、45 分は発泡ウレタンの成型に要した。

2)型枠材として吊り型枠を使用した検証試験[①-2]

- ・吊り型枠は、事前に型枠製作を完了していたため、最初の 3 部材は各 5 分かかっていたが、慣れてくると設置時間も早くなっていた。
- ・型枠部材間に配置する調整枠は、上からだけの作業となるため型枠の差し込みと固定に、5 分/箇所程度費やした。
- ・事前に吊り型枠を製作し準備したため、型枠設置に要した時間は 35 分程度であった。

表- 4.2.1 型枠材（発泡ウレタン、吊り型枠）の施工タイムスケジュール

作業時間 (分)	検証実験作業内容	
	発泡ウレタン	吊り型枠
0	ウレタン注入開始	型枠設置開始
5		(1 部材目設置完了)
10		(2 部材目設置完了)
15	ウレタン充填完了	(3 部材目設置完了)
20	ウレタン成型開始	(4、5 部材目設置完了)
25	(成型作業 1m 当り	(調整板 1 枚目設置)
30	10 分程度)	(調整板 2 枚目切断、設置)
35		吊り型枠設置完了
40		
45		
50		
55		
60	ウレタン成型完了	

なお、発泡ウレタン樹脂注入による型枠構造では、ウレタン充填後の成型に時間を要している。ただ、この成型については、既設中空型枠内に同径のポリエチレン円筒袋を挿入して、この円筒袋内に発泡ウレタンを充填することで、充填完了後の上部成型を省略している施工事例がある。この事例における施工要領を図- 4.2.7 に示す。このポリエチレン円筒袋の使用による発泡ウレタン充填では、大幅な作業時間の短縮が図れる。

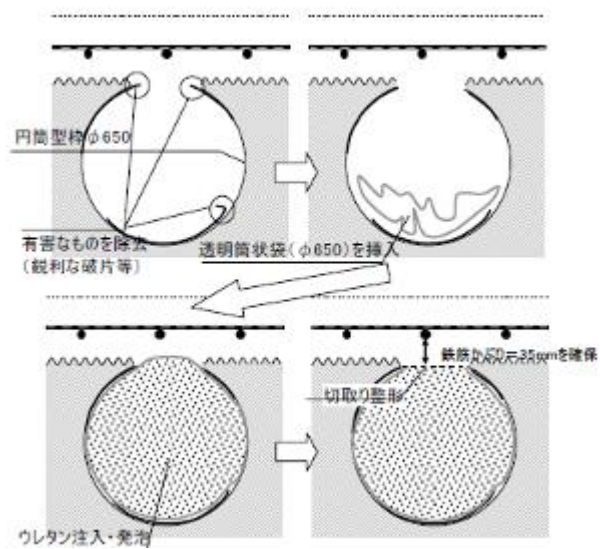


図-4.2.7 発泡ウレタン充填におけるポリエチレン円筒袋の併用事例

(2) 2次コンクリート打設時の高さ計測

1) 型枠材の沈下量の計測方法

- ・ 本検証試験では、2次コンクリート打設時に、床版厚（試験供試体の床版厚：150mm）が確保されているか確認することを目的に、コンクリート打設時における型枠材の沈下量の計測を行った。
- ・ 型枠材（ウレタン材及び吊り型枠）上に計測器具（ネジボルト）を垂直になるように固定した（写真- 4.2.8）。計測器具は、ウレタン及び吊り型枠にそれぞれ 1m 間隔で 5 箇所ずつ設置した（図- 4.2.8）。
- ・ 型枠材の沈下量の計測方法は、床版天端（計測器具には黄色のシールを貼付）から 50mm の高さに水糸（赤）を張り、2次コンクリート打設前後の高さを測定した（写真- 4.2.9）。
※5mm が基準値となり、(+)側が型枠材の沈下、(-)側が型枠材の浮き傾向となる。
- ・ レベルによる測定も併用して行った。



写真- 4.2.8 計測器具設置状況



写真- 4.2.9 沈下量測定方法

平面図

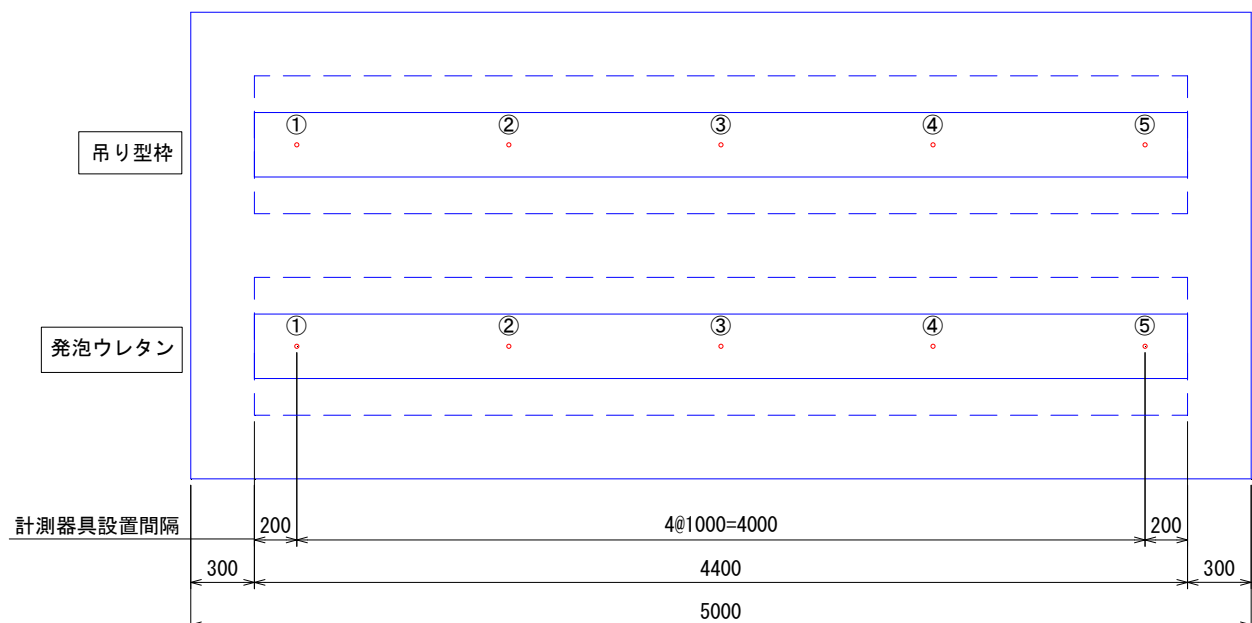


図- 4.2.8 計測器具設置箇所（計測位置）

2) 計測結果

発泡ウレタン及び吊り型枠の型枠材の沈下量の計測結果を表- 4.2.2 に示す。1～2mm の沈下が見られる箇所があったが、測定の誤差範囲内と考えられ、型枠材による大きな沈下は発生しなかった。

表- 4.2.2 沈下量計測結果

(単位：mm)

型枠材	計測位置	計測器具（ネジボルト）による測定				レベルによる測定
		打設前(a)	打設中(b)	打設完了(c)	沈下量	沈下量
ウレタン	①	50	50	51	-1	-1
	②	50	50	50	0	0
	③	50	51	50	0	0
	④	50	50	51	-1	-1
	⑤	50	51	52	-2	0
吊り型枠	①	50	51	51	-1	0
	②	50	50	50	0	-1
	③	50	51	50	0	0
	④	50	52	51	-1	-1
	⑤	50	52	52	-2	-2

※50mm が基準値となり、(+)側が型枠材の沈下、(-)側が型枠材の浮き傾向となる。

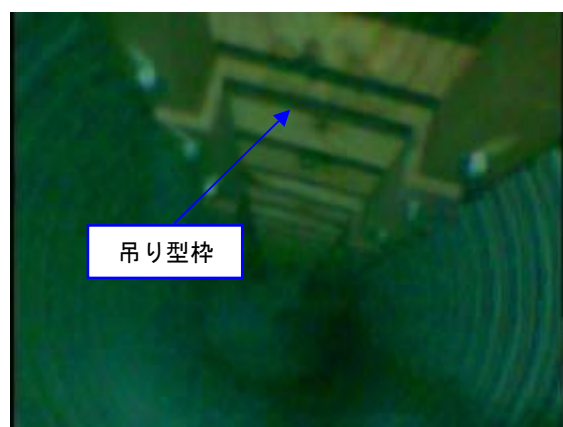
(3) 外観調査

1)発泡ウレタンの隙間確認

発泡ウレタン内部は 200℃付近まで温度上昇して徐々に冷却されるが、その際に多少収縮して隙間ができる懸念があった。検証試験前日の事前試験では、発泡後のウレタンを切断し断面を確認したが、隙間がないことを確認した。

2)吊り型枠の中空内の調査（漏れ状況の確認結果）

打設中のファイバースコープによる中空型枠内の視認は、型枠の変形は確認できなかった（写真- 4.2.10）。また、型枠端部からのノロ漏れもなく、強固な型枠固定状況であることを確認した。



<打設開始時>



<打設完了後>

写真- 4.2.10 ファイバースコープによる内部確認

(4) 発泡ウレタンの温度計測

発泡ウレタンの温度履歴を図- 4.2.9 に示す。発泡ウレタンの温度特性を把握するために、発泡ウレタン充填完了後（15 分）から発泡ウレタン表面の温度計測を実施した。また、ウレタンの内部温度は 200℃近くと高温になるため、別途、反応発熱温度試験により温度測定を実施した。

発泡ウレタン表面温度は、発泡ウレタン充填完了後 5 分程度で 40℃程度まで降下した。

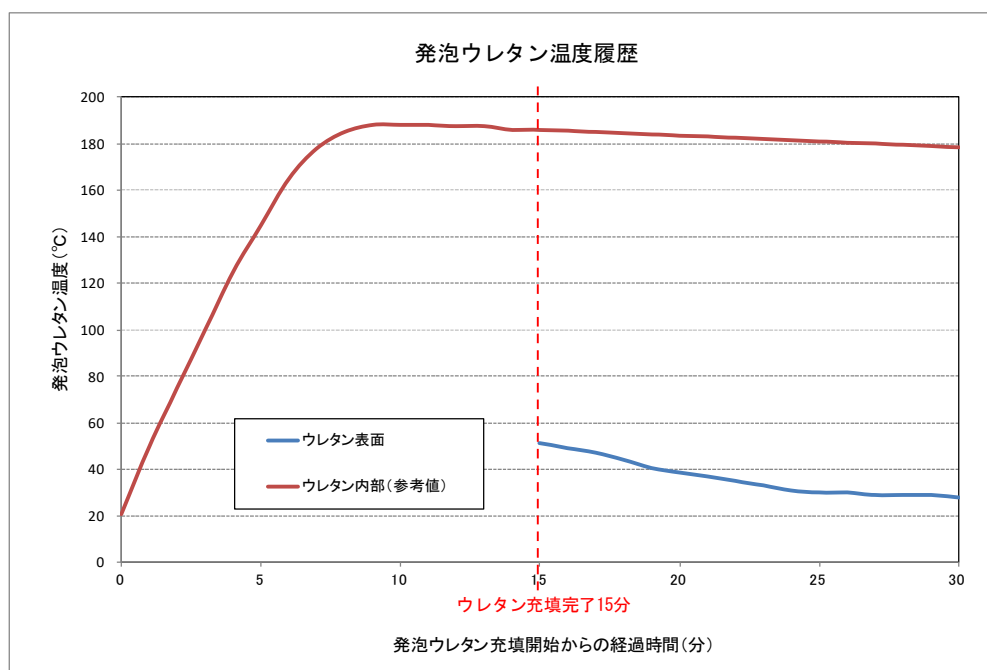


図- 4.2.9 発泡ウレタン温度履歴

4.3 型枠材の性能指標の確認

中空床版橋における床版上面の打替えにあたって、表- 4.3.1 に示す性能指標（表- 4.1.2 のうち、型枠材に関する性能指標）を設定した上で、実験で指標を確認した結果、耐荷重性や剛性については、表- 4.3.2 に示す沈下量計測より、型枠材としての性能が確保されているものと評価できる。以上の結果より、発泡ウレタン充填並びに吊り型枠構造とも、床版上面の打替えに対しては、型枠材としての性能を有していることが確認できた。施工性については、今回の本検証実験での施工時間は表-4.2.1 に示すように、吊り型枠構造に比較して発泡ウレタン充填での型枠施工時間が長くなった。これは、発泡ウレタン充填後の上部成型によるものである。発泡ウレタン充填での施工事例ではポリエチレン円筒袋を使用して、この発泡ウレタン上部の成型を省略されている事例もある。

また、本実証実験では、中空型枠上部の鉄筋（橋軸方向・橋軸直角方向）は、一旦、撤去しての型枠を設置したが、調査した事例の中で、発泡ウレタン充填（ポリエチレン円筒袋併用）やエアージェット式では、鉄筋を残置したままで型枠設置作業が実施されている例も確認された。

表- 4.3.1 型枠材の性能指標と確認内容

性能指標	型枠材(木材等)	型枠以外の 埋め戻し材料	確認内容
耐荷重性	応力検討	一軸圧縮強度	コンクリートの自重等に耐えうる強度を有しているか
剛 性	応力検討 たわみ制限	(埋戻材硬化後) 弾性係数	どの程度の弾性係数であれば、自重等により型枠材が沈下しないのか
施工性	狭小部への型枠挿入のし易さ 狭小部での型枠組立易さ（時間、挿入可能 or 不可） コンクリートの撤去幅や鉄筋の切断範囲		簡単に型枠が設置できるのか、どの程度、健全部のコンクリートや鉄筋を撤去する必要があるのか

表- 4.3.2 実証実験における沈下量

型枠材	計測位置	(単位：mm)			
		計測器具（ネジボルト）による測定			
		打設前(a)	打設中(b)	打設完了(c)	レベルによる測定
ウレタン	①	50	50	51	沈下量
	②	50	50	50	沈下量
	③	50	51	50	沈下量
	④	50	50	51	沈下量
	⑤	50	51	52	沈下量
吊り型枠	①	50	51	51	沈下量
	②	50	50	50	沈下量
	③	50	51	50	沈下量
	④	50	52	51	沈下量
	⑤	50	52	52	沈下量

4.4 施工方法のまとめと留意事項

4.4.1 対策範囲の設定

施工範囲設定における留意事項を以下に示す。

- ・道路陥没等の踏み抜きに対する緊急対応については、踏み抜き箇所の早期復旧を目的として、部分的な補修が可能となる、吊り型枠構造での中空型枠上部の打替えを検討するのがよい一方で、同一施工である当該橋梁で他の中空型枠上部の床版厚不足となっている可能性は高いと考えられる。非破壊検査等により当該橋梁のコンクリート床版厚を調査して、全面的な床版打替えや上面増厚による恒久対策についても併せて検討を行うのがよいと考えられる。
- ・全面的な床版打替えにあたっての型枠構造選定においては、本報告での試験結果や改善事項を踏まえて検討することが望ましい。また、本報告書の試験では、中空型枠上部の鉄筋は、一度、撤去して再配置してコンクリート打設を実施した。実橋において、中空型枠上部の鉄筋を残存させた状態で全面を含む広範囲での打替え時には、吊り型枠構造の適用が困難であることに留意が必要である。
- ・恒久的な対策にあたっては、非破壊検査等による橋梁全体のコンクリート床版厚を調査（計測）した上で、補修範囲を設定するのがよいと考えられる。
- ・計測したコンクリート床版厚とボイド径により、既存の耐荷力評価を行い、補修要否を検討するのがよいと考えられる。
- ・橋梁の全面的な中空型枠上部のコンクリート打替えを計画する際には、中空型枠上部のコンクリート撤去時における構造計算を実施して、必要に応じて、支保工等を計画するべきである。連続桁での中間支点上では、中空型枠上部のコンクリート撤去により、引張鉄筋とコンクリートの一体性が損なわれるため、支保工設置が必須となる事に留意する必要がある。
- ・既設コンクリートに塩化物イオンが浸透して、上面打替えコンクリート部と残存コンクリートで塩化物イオン量の差異が大きい場合、その水平打継界面での塩化物イオンの拡散によりマクロセル腐食が生じ、早期の再劣化が生じることが懸念される。そのため、マクロセル腐食対策についても検討が必要となる。マクロセル腐食については、打継面に含侵性表面保護材を塗布して、母材コンクリートの吸水防止効果により電気抵抗を増加させることによるマクロ腐食対策が記載された文献 6) や、文献 6) に対する施工後 5 年を経過した効果モニタリングが報告されている文献 7)、並びに、亜鉛を主材とした犠牲陽極剤によるマクロセル腐食対策が記載されている文献 8) 等が参考となると考えられる。

4.4.2 実験結果から得られた知見と改善事項

(1) 型枠材として発泡ウレタンを使用した検証試験[①-1]

【得られた知見】

- ・発泡ウレタンは粘弾性体であり、力が加わるとゆっくり変形する性質がある。床版打設後に未硬化コンクリートの重量で変形すると、ひびわれ発生の原因となるため、変形量をあらかじめ施工前に確認する必要がある。
- ・発泡ウレタンの表面温度の計測結果より、比較的早い段階（充填完了後 5 分程度）で発泡ウレタンの成型作業に入ることが可能である。したがって、緊急時対応にも、発泡ウレタンを型枠材として採用可能であると考えられる。

- ・発泡ウレタン成型作業に作業員 4 名で 40 分程度要したが、熟練作業員の配置や作業員人数の増員などにより、作業時間の短縮は可能である。本検証試験では、発泡ウレタン成型作業を小型のノコギリで行ったが、電動の切断機材を活用することにより、施工性は向上すると考えられる。
- ・本研究で実施した試験施工においては、発泡ウレタン膨張後の成型を実施したが、図- 4.2.7 で示すようなポリエチレン円筒袋を使用することにより、施工性は向上すると考えられる。

【改善事項】

- ・発泡ウレタン成型作業をうまく行えず、段差など生じた場合の調整作業を想定して 1cm 程度の薄いウレタン板を事前準備するのがよいと考えられる。

(2) 型枠材として吊り型枠を使用した検証試験[①-2]

【得られた知見】

- ・吊り型枠を使用した場合、型枠の変動が目視可能で、強固な型枠を構築できる。
- ・型枠を吊り型枠とすることで、床版上に吊り部材（60 角鋼管）を配置する必要があり、コンクリート打設時の天端仕上げにトロウエル等の機械の使用ができない。
- ・型枠設置は少人数の人力で行われる。今回の実験のように、中空型枠内に人が入れなければ、型枠の設置作業は態勢が不十分となり、多勢で行えないため効率が悪くなると推察される。
- ・本検証試験のように鉄筋間隔以上の大型の型枠を設置する場合、上床版鉄筋の解体や切断が必要となり、また、型枠設置後に 60 角鋼管の間に鉄筋を再配置する必要があるため、相当の時間を別途考慮する必要がある。本検証試験では、吊り型枠のほうが、発泡ウレタン充填よりも設置時間が短く済んだ（吊り型枠 35 分＜発泡ウレタン 60 分）が、鉄筋の解体作業や再配置作業を考慮していないため、これを考慮した場合、同程度の時間になると推察される。
- ・吊り型枠は、補修工事前に事前に準備、製作しておく必要があり、緊急時対応には不向きな面がある。既設の中空型枠形状を事前に把握することが必要であり、中空型枠の浮き上がりや変形がある場合は、吊り型枠を配置できない場合があり、現地合わせの型枠が必要となるため、調査時にはこれに留意し検討する必要がある。ただし、中空型枠を円形形状に拘らないのであれば、補修事例のように板状のコンパネを型枠として採用することも考えられる。

【改善事項】

- ・吊り型枠の中空内の調査では、型枠接合部からわずかではあるがノロ漏れがあったように見受けられたため、実施工では、隙間テープやコーキングすることがよいと考えられる。
- ・光源挿入孔が必要である。

(3)まとめ

これらの試験により、発泡ウレタン及び吊り型枠とも、中空床版上部への型枠材としての適用が可能であるとの事が確認されたとともに、工程計画時に参考となる単位量当たりの施工時間が確認された。

ただし、本試験を通じて、いくつかの改善事項も確認されたため、実施工にあたっては、以下の

改善も含めて計画することが望ましい。

① 発泡ウレタン充填工法

本試験では、発泡ウレタン充填後のボイド上部の成型に時間を要した。この成型する時間を短縮するため、ポリエチレン円筒袋の併用やボイド上部へのウレタン板等での発泡ウレタン充填（膨張）に対する蓋設置について検討することが望ましい。

② 吊り型枠

本試験では、吊り型枠のパネル間で、コンクリート打設によるコンクリートノロの漏出が確認された。吊り型枠設置後、パネル間へのシーリング処理についても検討することが望ましい。

【4 章の参考文献】

- 1) 道路橋示方書・同解説，平成 29 年 11 月，（社）日本道路協会，2017
- 2) 2023 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，2023 年 9 月，（社）土木学会，2023
- 3) コンクリート道路橋施工便覧，令和 2 年，（社）日本道路協会，2020
- 4) JIS による道路橋用 PC 橋桁設計・製造便覧，2020 年 8 月，（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会
- 5) （社）日本道路協会：道路橋補修・補強事例集（2012 年版），pp231，2012.3
- 6) 文献 6: 松田ら，塩害により損傷したコンクリート橋のリニューアルー阪和自動車道松島高架橋ー，橋梁と基礎，Vol.41，No.5，pp21～pp25，2007.5
- 7) 文献 7：高橋ら，施工後 5 年を経過した遮蔽型マクロセル腐食対策の効果，土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)，V-241，pp481～pp482，2011
- 8) 文献 8：平石ら，犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp1431～pp1436，2002

Ⅱ-3 目 次

1 章.	概要	Ⅱ-110
1.1	研究の背景と目的	Ⅱ-110
1.2	研究の流れ	Ⅱ-111
2 章.	滞水の要因	Ⅱ-112
2.1	構造的特徴と滞水の要因	Ⅱ-112
2.2	水の浸入要因の整理	Ⅱ-113
2.3	排水不良要因の整理	Ⅱ-116
3 章.	事例調査	Ⅱ-118
3.1	型枠内調査事例	Ⅱ-118
3.2	補修事例	Ⅱ-119
3.3	事例調査を踏まえた検討課題の抽出	Ⅱ-121
4 章.	補修施工方法に対する検討	Ⅱ-122
4.1	中空型枠の排水性・点検性に関する検証試験の概要	Ⅱ-122
4.2	試験計画	Ⅱ-122
4.2.1	中空型枠内の排水性に関する検証試験[①]の計画	Ⅱ-122
4.2.2	中空型枠内の点検性に関する検証試験[②]の計画	Ⅱ-125
4.3	試験結果	Ⅱ-126
4.3.1	中空型枠内の排水性に関する検証試験[①]の結果	Ⅱ-126
4.3.2	中空型枠内の点検性に関する検証試験[②]の結果	Ⅱ-131
4.3.3	試験結果のまとめ・補修における留意事項	Ⅱ-131

Ⅱ-3 中空型枠内の滞水対策

1章. 概要

1.1 研究の背景と目的

コンクリート床版橋に分類される場所打ちコンクリート中空床版橋（以下、中空床版橋）は、中空型枠を用いて、コンクリート床版を空洞化させた橋梁形式である。国土交通省が管理する中空床版橋は、1950年代から10年ごとに200～500橋の整備が進められているが、整備開始から50年以上を経過した現在、中空床版橋特有の損傷事例として、中空床版橋下面の漏水や中空型枠内の滞水が確認されている。床版部がRC構造であること、結露が発生する可能性があることを考えると、型枠内で滞水が生じるおそれがあり、滞水が継続すると内部鋼材の健全性などに影響を与えることが懸念される。現在、新設においては水抜き孔を設置することとされており、また、既設においても追加で設置された事例があるが、その水抜き孔の効果については明らかではなく、位置や個数の決め方にも確立した知見はない。

そこで、本編「Ⅱ-3 中空型枠内の滞水対策」は、水抜き孔の効果を実験的に把握するとともに、新設、既設の区別なく適宜参考にできる、内部の点検も考慮した設置位置や径の設定方法、施工方法や管理方法について、標準案を提案することを目的としている。

1.2 研究の流れ

本章の構成は、図-1.2.1 及び以下に示す。

「1 章 概要」では、本研究の背景及び目的、研究の流れ、報告書の構成を示した。

「2 章 滞水の要因」では、中空床版橋の滞水発生までの要因を「根本要因」「直接要因」に大別した上で、それぞれが要因とされる一般論について示した。

「3 章 事例調査」では、調査事例及び対策事例の調査を踏まえ、滞水が生じた中空床版橋の補修方法に関する検討課題の抽出を行ったものを示した。

「4 章 補修施工方法に対する検討」では、排水性ならびに点検性に着目した検証実験の結果より、補修施工方法に対する留意事項を整理して示した。

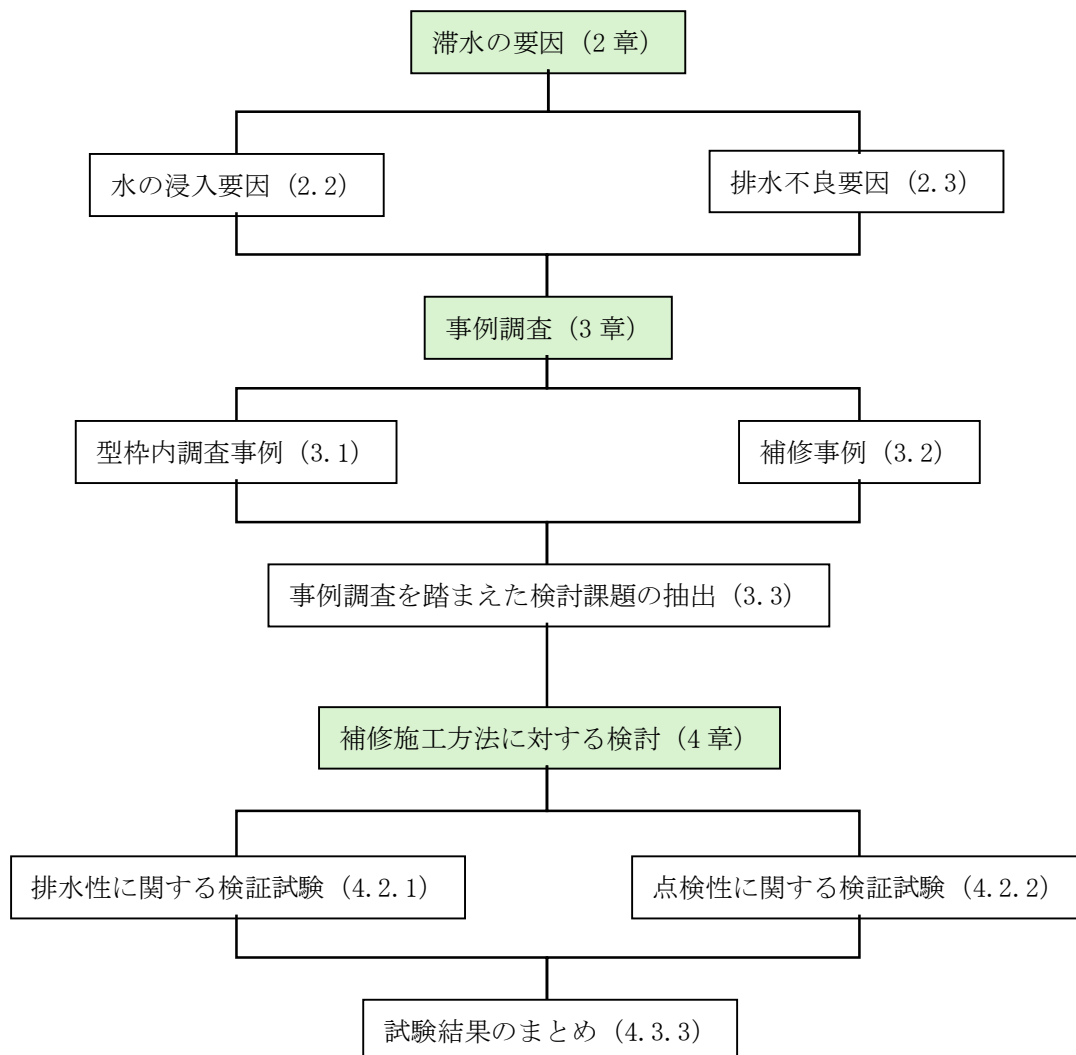


図- 1.2.1 本研究のフロー

2章. 滞水の要因

2.1 構造的特徴と滞水の要因

中空床版橋の概要図を図- 2.1.1 に示す。中空床版橋は、ボイド管等の中空型枠により肉抜きした床版橋で、一般に現場打ちで施工される。床版部が RC 構造のため型枠を覆うコンクリートにひびわれの発生がありうること、現場打ちで一定期間は型枠が外にさらされ、打設時期によっては型枠内部に結露が発生する可能性があることを考えると、型枠内で滞水が生じるおそれがある。

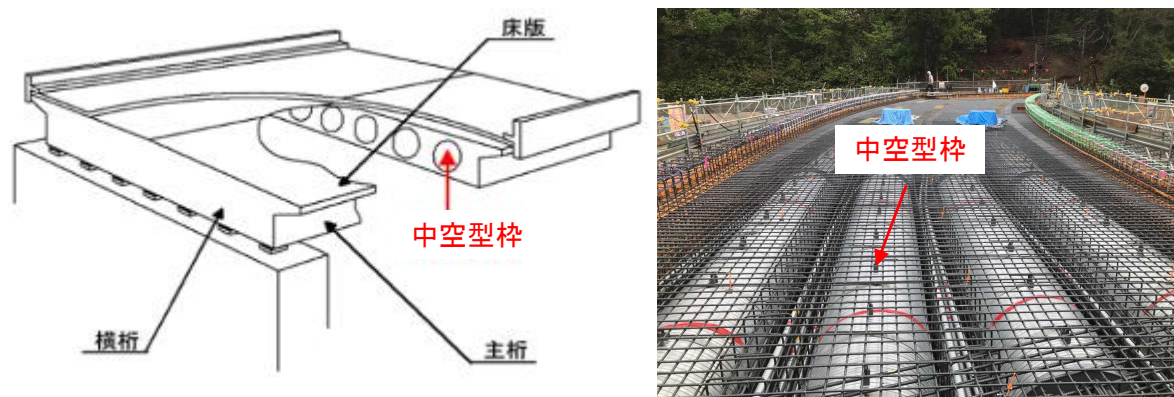


図- 2.1.1 中空床版橋の概要図

中空型枠内の滞水は図- 2.1.2 に示す過程を辿ると考えられる。滞水は、「水が浸入すること」と、「水が排水されないこと」の2つの事象が重なることで生じると考えられる。

水の浸入に関しては、中空型枠内での水分の発生、または外部からの水の浸入が挙げられる。一方、水の排出に関しては、水抜き孔が無い、または変形や目詰まりによる排水性の低下が挙げられる。滞水発生までの要因を「(1) 水の浸入」と「(2) 排水不良」に大別し、これらが重なることで滞水が生じることを整理する。

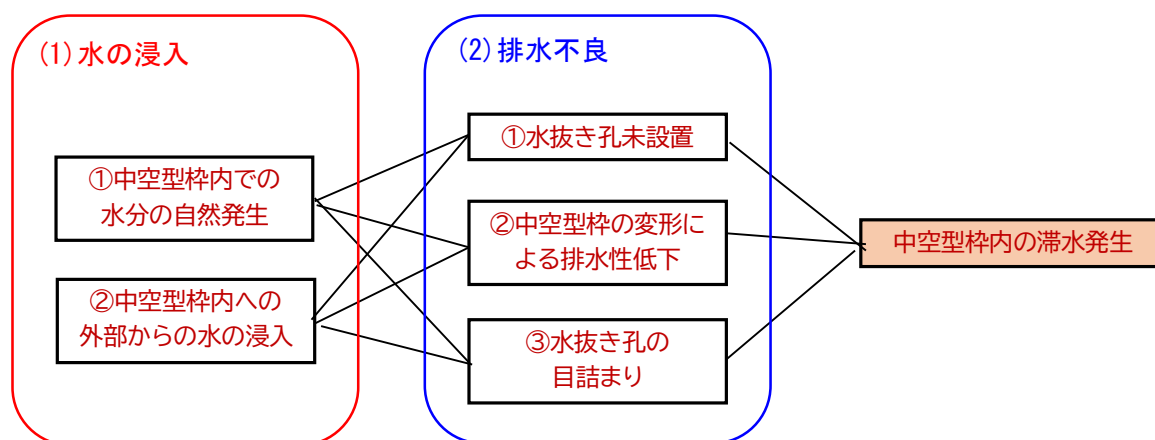


図- 2.1.2 滞水発生と要因の関係性

2.2 水の浸入要因の整理

滞水が発生する要因のうち、水の浸入要因は、①中空型枠内での水分の自然発生、②中空型枠内への外部からの水の浸入が考えられる。

①の水分の自然発生は、結露がこれにあたる。結露は、中空型枠内の暖かい水蒸気を多量に含んだ空気が冷やされた場合（中空型枠内とコンクリートに温度差が生じた場合）に、飽和水蒸気量を超えると余分な水蒸気が水滴に変化することで生じる。結露が繰り返されることで滞水が生じる可能性がある。

②の外部からの水の浸入は、橋面防水層の未設置（図- 2.2.1、写真- 2.2.1 参照）、または劣化による中空型枠頂部からの漏水（図- 2.2.2、写真- 2.2.2 参照）と考えられる。

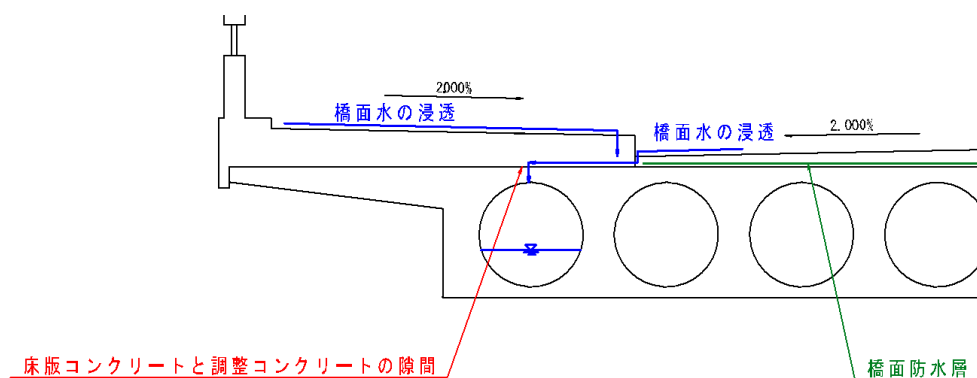


図- 2.2.1 中空型枠への水の浸入経路



写真- 2.2.1 境界部の隙間

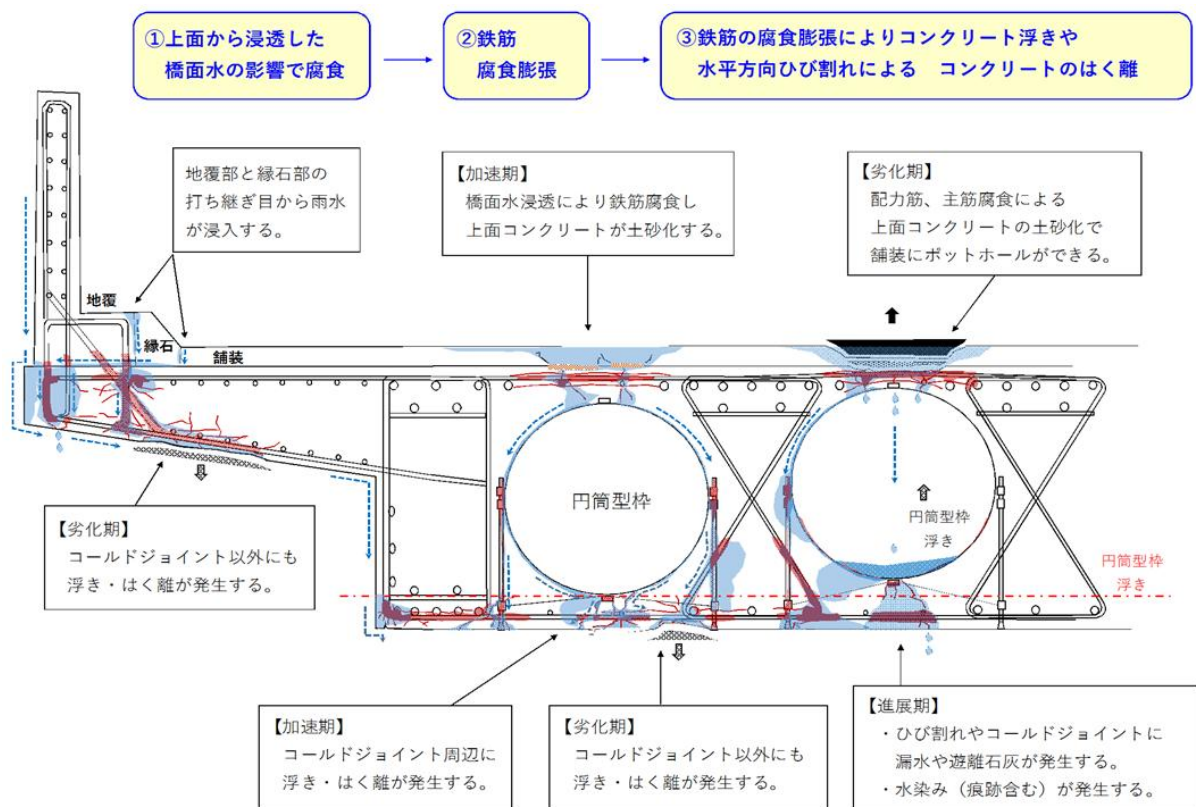


図- 2.2.2 中空型枠への水の浸入経路

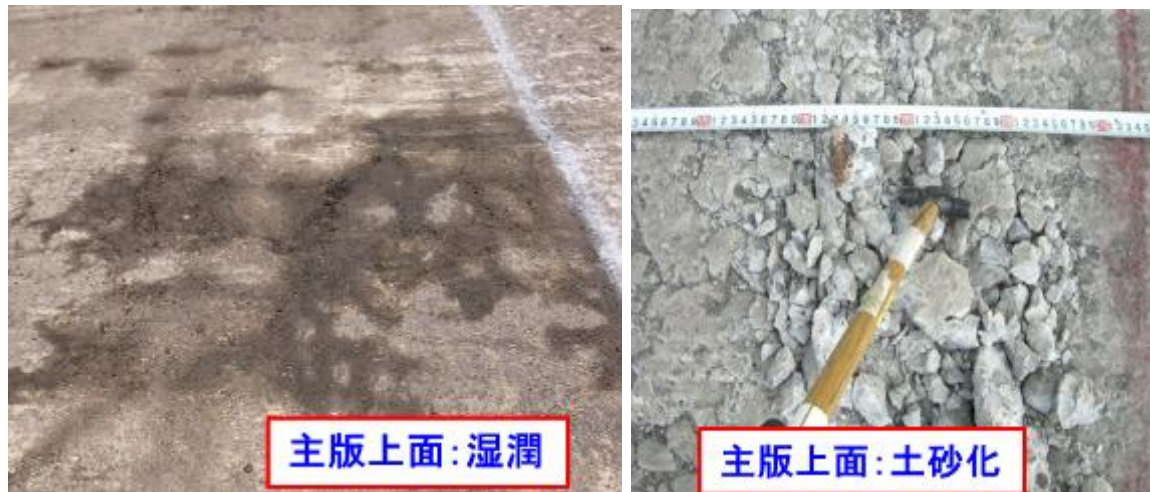


写真- 2.2.2 主版上面の劣化事例

また、中空床版の上面からの漏水が生じた場合、中空型枠の溶接部より中空型枠内部に浸水することもある（写真- 2.2.3 参照）。



写真- 2.2.3 中空型枠内部への溶接部よりの浸水例

2.3 排水不良要因の整理

滞水が発生する要因のうち、排水不良の要因は、①水抜き孔未設置、②中空型枠の変形による排水性低下、③水抜き孔の目詰まりであると考えられる。

① 水抜き孔未設置（水抜き孔の有無）

水抜き孔の有無は建設時の技術基準に依存するものと考えられる。技術基準の変遷は「Ⅱ-1 中空床版橋の健全性評価編」に詳述しているが、平成 10 年（1998 年）のコンクリート道路橋施工便覧¹⁾に初めて水抜き孔を設けることが記載されたことから、それ以前の橋では水抜き孔が無い可能性がある。

② 中空型枠の変形による排水性低下

水抜き孔を設置していても、型枠の浮き上がりや移動、変形に伴い、水抜き孔が脱落・変形・移動すれば、排水性の低下が生じる。中空型枠の浮き上がりや変形についても、技術の変遷とともに改善されていると考えられる。技術基準の変遷は「Ⅱ-1 中空床版橋の健全性評価編」に詳述しているが、昭和 43 年（1968 年）の道路橋示方書²⁾にて初めて浮き上がり対策の必要性が明記されたものの具体案は記載されず、平成 13 年（2001 年）の PC 建協の通達にて初めて浮き上がり防止の具体案が示された。

変形についても、昭和 53 年（1978 年）の道路橋示方書²⁾にて初めて型枠の材質・寸法の確認、型枠の形状保持等が明記された。

よって、各基準類の整備前の橋では浮き上がりや変形のリスクが相対的に高い可能性がある。

③ 水抜き孔の目詰まり

水抜き孔の目詰まりについては、既報の文献等での事例は確認できなかったが、PC 建協が会員に行ったヒヤリングでは、コンクリートのノロ等により水抜き孔の目詰まりが生じており、下面より目詰まり材を撤去した際に、中空型枠内部より水が流出した事例の報告があった。目詰まりした水抜き孔から湿気は入り込むが、冷却され水になった後は排出されないことは十分に考えられる。

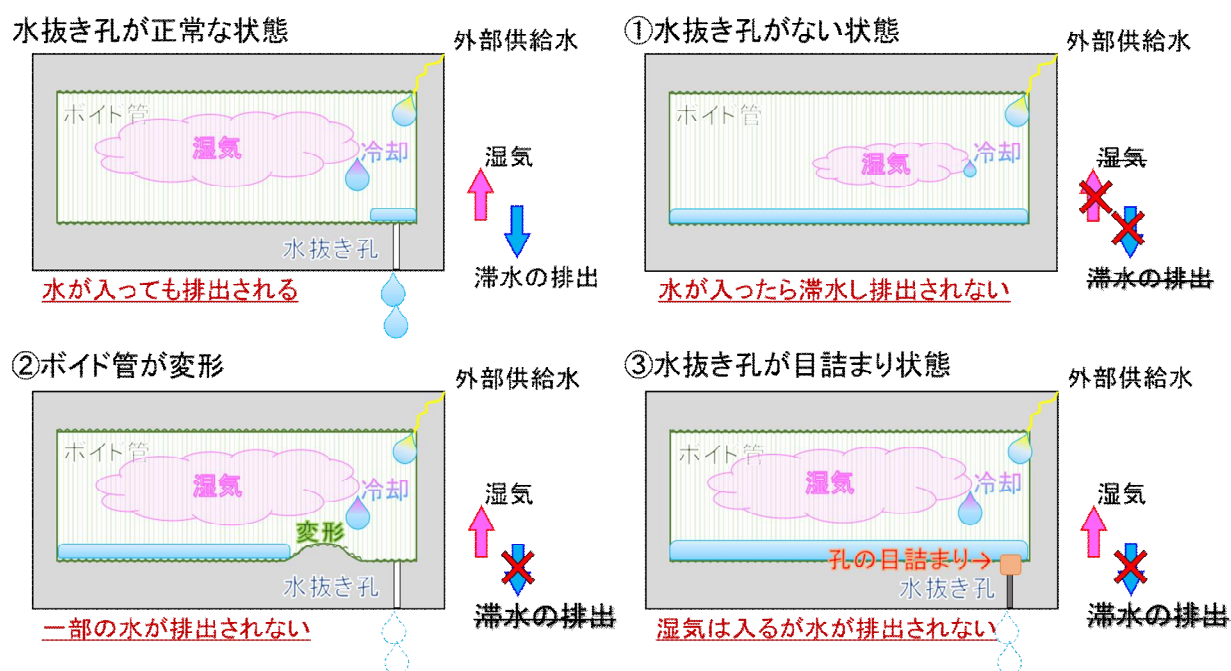


図- 2.3.1 滞水が発生する直接要因のイメージ

【2章の参考文献】

- 1) コンクリート道路橋施工便覧 昭和 59 年 2 月, (社) 日本道路協会, 1984
 コンクリート道路橋施工便覧 平成 10 年 1 月, (社) 日本道路協会, 1998
 コンクリート道路橋施工便覧 令和 2 年 9 月, (社) 日本道路協会, 2020
- 2) 道路橋示方書・同解説 昭和 39 年 6 月, (社) 日本道路協会, 1961
 道路橋示方書・同解説 昭和 53 年 3 月, (社) 日本道路協会, 1978
 道路橋示方書・同解説 平成 2 年 3 月, (社) 日本道路協会, 1990
 道路橋示方書・同解説 平成 6 年 2 月, (社) 日本道路協会, 1994
 道路橋示方書・同解説 平成 8 年 12 月, (社) 日本道路協会, 1996
 道路橋示方書・同解説 平成 24 年 3 月, (社) 日本道路協会, 2012
 道路橋示方書・同解説 平成 29 年 11 月, (社) 日本道路協会, 2017

3章. 事例調査

3.1 型枠内調査事例

中空型枠内の滞水を対策するためには、内部の状態を知ることが重要である。本研究の文献調査により収集した型枠内調査事例を「Ⅱ-1 編 中空床版橋の健全性評価」に掲載している。調査方法は、桁下からコア削孔を行った後にカメラを挿入し、滞水状況や型枠の形状を観察している。

調査結果から得られた知見として、以下のようなものがある。

- ・滞水していた中空床版橋は、床版下面に漏水痕や遊離石灰などの水の影響が確認されている。
滞水が生じている型枠は、橋面の横断勾配の低い側の直下付近が多い。床版下面の変状もその付近に集中しており、比較的変状の程度が大きいものが多い（写真- 3.1.1）。
- ・水抜き孔がある場合は、その周辺に濡れ色、苔、錆などが見られる場合もある（写真- 3.1.2）。
- ・そもそも、水抜き孔が無いという事例もあった。
- ・型枠内のカメラの画像では、ボイド管の変形や、滞水部の発錆が見られている（写真- 3.1.3）。

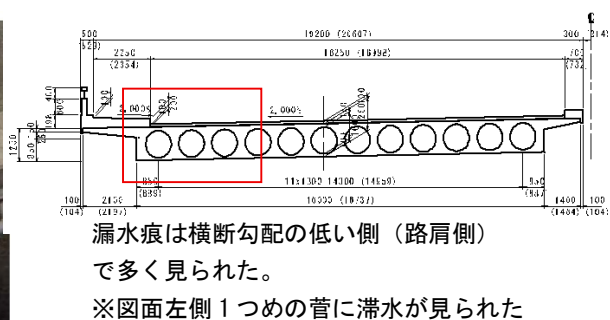


写真- 3.1.1 中空床版橋の下面の変状例



写真- 3.1.2 既設水抜き孔の変状例

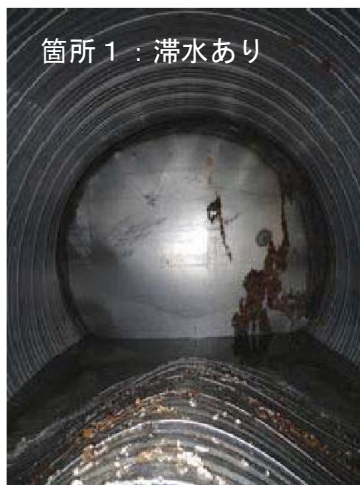


写真- 3.1.3 中空型枠内の滞水状況例

3.2 補修事例

円筒型枠内部の滞水に対する補修事例を、文献調査により収集を図ったが、確認できなかった。
PC 建協へのヒヤリングで得られた補修事例を以下に示す。

1) 補修事例

対策方法：中空床版橋の底版面からのコア削孔

橋梁形式：4 径間連続 RC 中空床版橋、竣工年：1978 年(昭和 53 年)

橋 長 ： 216.0m



写真- 3.2.1 橋梁図（左：側面状況，右：下面状況）



写真- 3.2.2 コア削孔（φ40）対策

3.3 事例調査を踏まえた検討課題の抽出

建設当初から水抜き孔が設置されていない事例が確認された。この事後対応として、対策事例のとおり、既設中空床版橋の底版からコア削孔を行い、中空型枠内部の排水を図られた事例が確認された。

ただし、単純に排水性や点検性を確保するために、意図なく多数のコアを削孔するのではなく、コア削孔により、必要以上に既設構造物の健全性を損傷させないといった配慮が必要であり、排水性と点検性を踏まえた最小コア削孔径やコア削孔数の目安を示すことが重要である。

以上のことより、今後の検討課題として、中空型枠の水抜き孔の適切な配置細目を確認するため、中空型枠内の「排水性」と「点検性」に関する2つの検証実験を実施する。

なお、円筒型枠内の滞水に対する調査方法については、主版下面への漏水（痕）や遊離石灰等の外観上の変状が確認されている。主版下面での前述の変状が確認された場合、以下の手順で、円筒型枠内部の滞水に関する調査を実施することとなる。

- a) 外観遠望目視等での主版下面の漏水（痕）や遊離石灰の確認
- b) 外観遠望目視で水抜き孔の有無の確認
- c) 水抜き孔が配置されている場合は、水抜き孔よりファイバースコープ等による内部の確認
- d) 水抜き孔が配置されていない場合は、「排水性」と「点検性」を考慮した水抜き孔を設置し、内部を確認

4章. 補修施工方法に対する検討

中空型枠内の滞水に対し、排水性や点検性を踏まえて、補修施工方法の作業標準を提案するため、3.3 に示した通り、配置根拠が明確でない水抜き孔の配置と排水性を確認することとし、その水抜き孔からの点検が行えるかを検証する試験を実施した。

4.1 中空型枠の排水性・点検性に関する検証試験の概要

本試験では以下に示す検証試験②-1 中空型枠の排水性、検証試験②-2 中空型枠内の点検性に関する検証を行う。

[検証試験①] 中空型枠内の排水性に関する検証試験

本試験では、第3章3.3に示す検討課題を踏まえて、中空型枠の据付勾配（橋梁の縦断勾配）及び水抜き孔の配置箇所・個数をパラメーターとして変化させ、中空型枠内の排水性について評価を行った。

ただし、中空型枠の下面の変形により型枠内に滞水が生じている事例については、変形状況によりコア削孔数や削孔箇所が変わるため、本検証試験の対象外とした。

[検証試験②] 中空型枠内の点検性に関する検証試験

本試験では、第3章3.3に示す検討課題を踏まえて、水抜き孔の内径 $\phi 30\text{mm}$ の条件におけるファイバースコープを用いた中空型枠内の点検性（点検のし易さ）の評価を行った。

4.2 試験計画

4.2.1 中空型枠内の排水性に関する検証試験[①]の計画

(1) 試験供試体

中空型枠及び水抜き孔の形状・寸法を図-4.2.1～図-4.2.3、写真-4.2.1、写真-4.2.2に示す。中空型枠は、施工実績の多い $\phi 1000\text{mm} \times$ 管厚1.0mmの波形リブ付き中空型枠1体を用いた。中空型枠の水抜き孔は、排水性の観点から、孔径を大きくすることを検討したが、孔径を標準径 $\phi 30\text{mm}$ より大きくすることで、鳥類や小動物等の侵入が懸念されたため、現行の標準径 $\phi 30\text{mm} \times 1$ 種類に決定した。また、据付勾配の低い側の端部に第1孔、中空型枠の中間部に第2孔を設置した。なお、中空型枠内の滞水状況を目視確認するため、頂部に透明枠（ 200×450 ）を設置した（写真-4.2.3）。

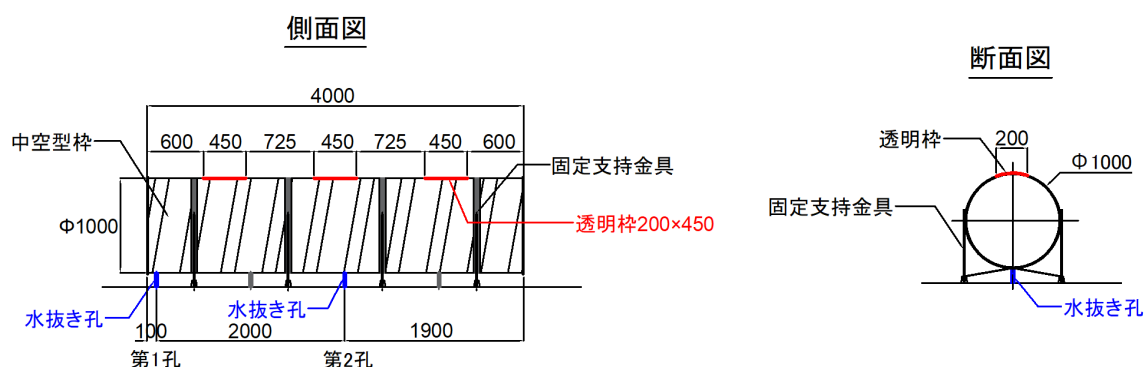


図-4.2.1 中空型枠試験体の形状・寸法



写真- 4.2.1 中空型枠試験体の設置状況



写真- 4.2.2 水抜き孔

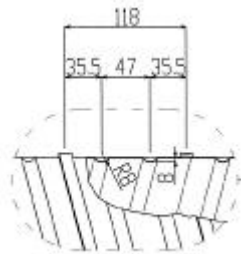


図- 4.2.2 波形リブ寸法

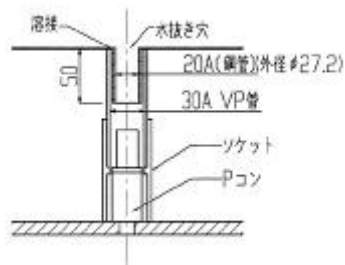


図- 4.2.3 水抜き孔の形状・寸法



写真- 4.2.3 透明枠

(2) 試験方法

試験方法は、中空型枠を 3 パターンの据付勾配 (0.1%, 2%, 4%) にて設置し、各据付勾配ともに中空型枠内へ約 100 ㎖を滞水させた後、水抜き孔内径φ30mm の第 1 孔、第 2 孔を順次開栓する。本試験のパラメーター及び試験ケースを表- 4.2.1 に示す。

表- 4.2.1 滞水検証試験パラメーターと試験ケース

水抜き / 縦断勾配	0.1%	2%	4%		備 考
端 部：第 1 孔*開 中間部：第 2 孔*閉	○	○	○		※○試験実施
端 部：第 1 孔*開 中間部：第 2 孔*開	○	○	○		

[検証試験①の手順] (図-4.2.4)。

- 1)中空型枠を所定の据付勾配にて設置する。
- 2)中空型枠内に約 100 ㍓の水を投入し、数分間静止状態を保つ。詳細の投入量は表-4.2.2 に示す。
- 3)第 1 孔のバルブを開栓し、中空型枠内の水の排出量を計測、記録する。(第 1 孔開栓、第 2 孔閉栓)
- 4)滞水の有無及び滞水有りの場合、滞水の発生状況を撮影する。
- 5)第 1 孔の排水が止まったことを確認した後、中央部に設置した第 2 孔のバルブを開栓する。(第 1 孔開栓、第 2 孔開栓)
- 6)滞水の有無及び滞水有りの場合、滞水の発生状況を撮影する。滞水状況は、中空型枠上部の透明枠から直接目視確認するとともに、中空型枠の妻枠に設置した $\phi 50\text{mm}$ の孔から撮影し、排出時には中空型枠内の密閉性を確保するため、蓋を設置する。
- 7)中空型枠の据付勾配毎 (0.1%⇒2%⇒4%の順序) にて上記 1)～7)を繰り返す (表-4.2.1 : 計 6 ケース)。

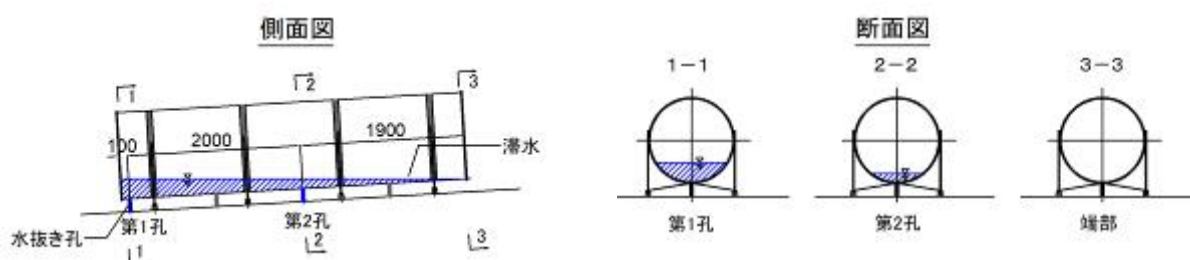


図-4.2.4 検証試験方法

表-4.2.2 型枠内への投入数量の内訳

		①i=0.1%	②i=2.0%	③i=4.0%
		勾配差 4mm	勾配差 80mm	勾配差 160mm
投入数量の内訳	1	10.016	10.006	10.000
	2	10.032	10.062	9.998
	3	10.012	10.012	10.010
	4	10.016	10.036	10.002
	5	10.024	10.062	9.994
	6	10.024	10.056	10.005
	7	10.012	10.028	10.004
	8	10.020	10.040	9.998
	9	10.026	9.878	9.998
	10	9.994	9.830	9.624
I) 投入総量		100.176	100.010	99.633

(3) 評価方法

滞水の有無及び滞水状況（滞水量、滞水状況、排水状況、排水時間）をもとに、中空型枠内に浸入した水が滞水しない適切な水切り孔の配置位置、配置数を評価する。また、定期点検時、水抜き孔が設置されていない場合や、水抜き孔の排水性が低下している場合の適切な削孔径、削孔間隔の目安としても評価する。

4.2.2 中空型枠内の点検性に関する検証試験②の計画

(1) 試験供試体

中空型枠：検証試験②-1 と同じ、水抜き孔の内径：検証試験 1 と同じ $\phi 30\text{mm}$

(2) 試験方法

検証試験②の試験方法及び手順を以下に示す。

- 1)先端可動式工業用ファイバースコープを用いて、中空型枠端部の状況を第 1 孔、第 2 孔から挿入し、端部付近を確認する（図- 4.2.5）。ファイバースコープは、カメラヘッドの直径が $\phi 6.9\text{mm}$ の小型のもので、先端に LED ライトを有し、挿入部が防水仕様のものを用いた。
- 2)ファイバースコープにより端部までの可視状況を確認する（表- 4.2.3）。可視状況は静止画を撮影する。

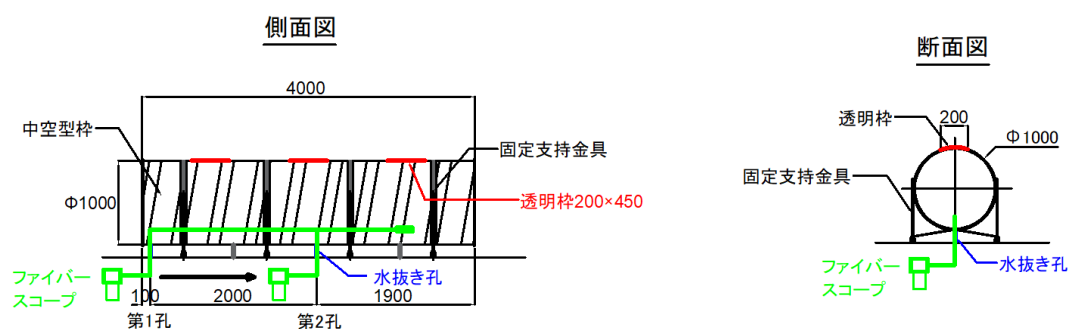


図- 4.2.5 試験概要及びファイバースコープ挿入順序

表- 4.2.3 検証試験ケース一覧

水抜き孔径 点検位置	$\phi 30\text{mm}$	備 考
	可視状況	
第 1 孔から挿入	○（可能） or ×（不可）	
第 2 孔から挿入	○（可能） or ×（不可）	

(3) 評価方法

中空型枠内の可視状況及びファイバースコープの操作性（端部までの可視状況、検査員の所見）をもとに、供用後における中空型枠内の点検性を評価する。

4.3 試験結果

4.3.1 中空型枠内の排水性に関する検証試験①の結果

滞水の有無及び滞水状況（滞水量、滞水状況、排水状況、排水時間）に着目した試験結果を以下に示す。測定結果を表- 4.3.1、据付勾配毎の滞水量・排水時間の比較を図- 4.3.1、図- 4.3.2 に示す。

- ・中空型枠内の滞水は、すべての据付勾配（0.1%、2%、4%）において、水抜き第1孔・第2孔開栓後（全6ケース）も生じており、その状況は中空型枠内の全長に渡り滞水が発生していた。
- ・排出後の中空型枠内の滞水量は、中空型枠の端部に配置した水抜き第1孔の開栓時が約1.6～2.7ℓ、端部配置の第1孔と中間部に配置した第2孔の同時開栓時も約1.6～2.5ℓで、据付勾配毎や水抜き孔の個数で顕著な差は生じなかった。
- ・すべての据付勾配において、中空型枠の端部配置の水抜き第1孔開栓時（第2孔閉栓）に、中空型枠内のほとんどの水量（滞水量の97%以上）が排出された。
- ・すべての据付勾配において、中空型枠の中間部配置の第2孔開栓時には、水抜き孔周囲の中空型枠の内リブに残っていた水のみが局部的に排出され、その量は0.05～0.2ℓと微量であった。
- ・滞水の排出時間は、縦断勾配の影響を受けており、縦断勾配が大きいほど、排水速度が早く、排出時間が短かった。据付勾配0.1%の排出時間は、据付勾配4%の約2.3倍、据付勾配2%の約1.8倍の時間を要していた。

表- 4.3.1 排水性の測定結果

据付け勾配				①i=0.1%	②i=2.0%	③i=4.0%
phase				勾配差 4mm	勾配差 80mm	勾配差 160mm
phase1	第1孔：開 第2孔：閉	phase1 滞水の有無		有り	有り	有り
		1) 投入総量※	ℓ	100.20	100.00	99.60
		2) phase1 排出量	ℓ	97.50 (投入量の97.3%)	97.50 (投入量の97.5%)	98.00 (投入量の98.4%)
		3) phase1 滞水量	ℓ	2.70 (投入量の2.7%)	2.50 (投入量の2.5%)	1.60 (投入量の1.6%)
		4) 排出時間	分秒	08分30秒	04分50秒	03分40秒
phase2	第1孔：開 第2孔：開	phase2 滞水の有無		有り	有り	有り
		5) 開始時水量 (=3))	ℓ	2.70	2.50	1.60
		6) phase2 排出量	ℓ	0.20 (投入量の0.2%)	0.06 (投入量の0.1%)	0.06 (投入量の0.1%)
		7) 総排出量 (2)+6))	ℓ	97.70 (投入量の97.5%)	97.56 (投入量の97.6%)	98.06 (投入量の98.5%)
		8) 最終滞水量	ℓ	2.50 (投入量の2.5%)	2.44 (投入量の2.4%)	1.54 (投入量の1.5%)
		9) 排出時間	分秒	00分10秒	00分10秒	00分10秒

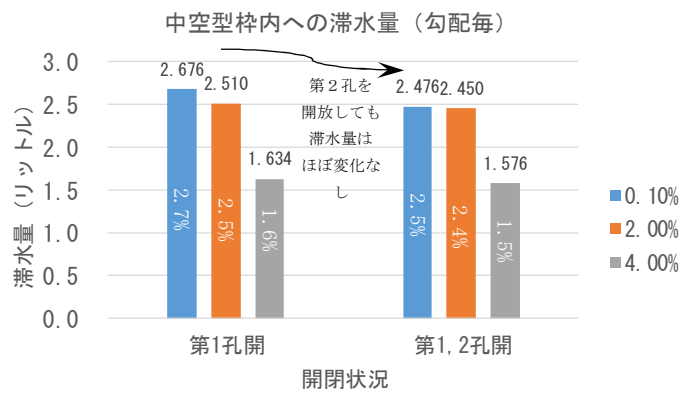


図- 4.3.1 据付勾配毎の滞水量比較

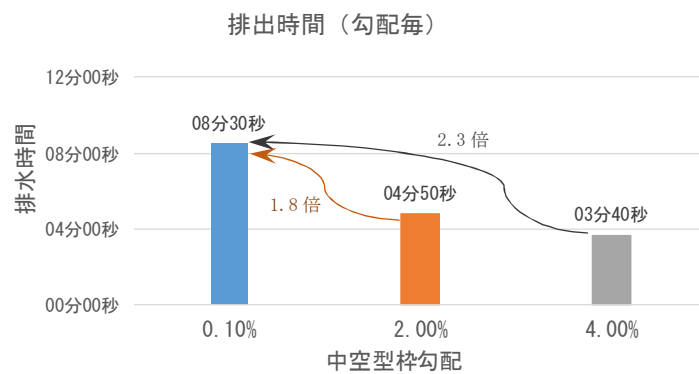


図- 4.3.2 据付勾配毎の排出時間比較

据付勾配 0.1%



据付勾配 0.1%
注水完了（妻枠）



据付勾配 0.1%
注水完了（中央透明枠）



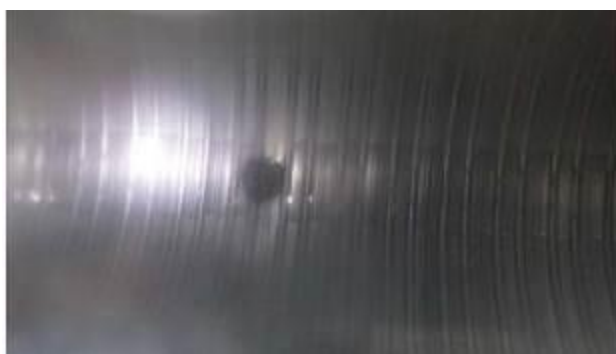
据付勾配 0.1% 第 1 孔開栓
滞水状況（妻枠）



据付勾配 0.1% 第 1 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）



据付勾配 0.1% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（妻枠）

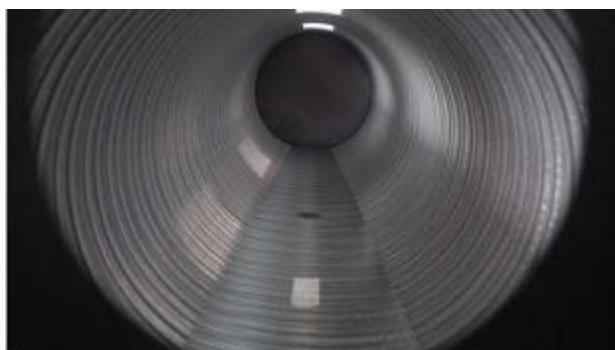


据付勾配 0.1% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）

表- 4.3.2 据付勾配 0.1%時の計測値

計測値					
水抜き孔の状態	滞水 有・無	滞水量 (ℓ)	排出量 (ℓ)	排出量累計 (ℓ)	排出に要した 時間
第 1 孔*開栓 第 2 孔*閉栓	○	2.676	97.5	97.5	8 分 30 秒
第 1 孔*開栓 第 2 孔*開栓	○	2.476	0.2	97.7	10 秒以内

据付勾配 2.0%



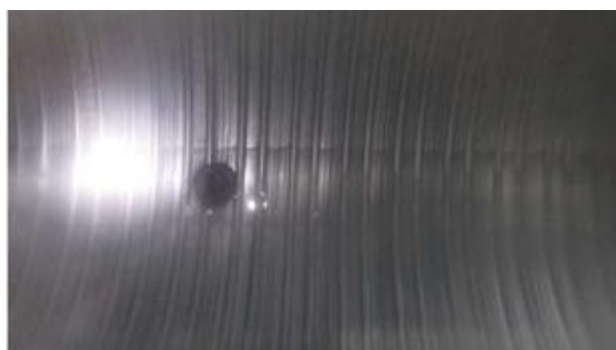
据付勾配 2.0%
注水完了（妻枠）



据付勾配 2.0%
注水完了（中央透明枠）



据付勾配 2.0% 第 1 孔開栓
滞水状況（妻枠）



据付勾配 2.0% 第 1 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）



据付勾配 2.0% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（妻枠）



据付勾配 2.0% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）

表- 4.3.3 据付勾配 2.0%時の計測値

計測値					
水抜き孔の状態	滞水 有・無	滞水量 (ℓ)	排出量 (ℓ)	排出量累計 (ℓ)	排出に要した 時間
第 1 孔*開栓 第 2 孔*閉栓	○	2.510	97.5	97.5	4 分 50 秒
第 1 孔*開栓 第 2 孔*開栓	○	2.450	0.06	97.56	10 秒以内

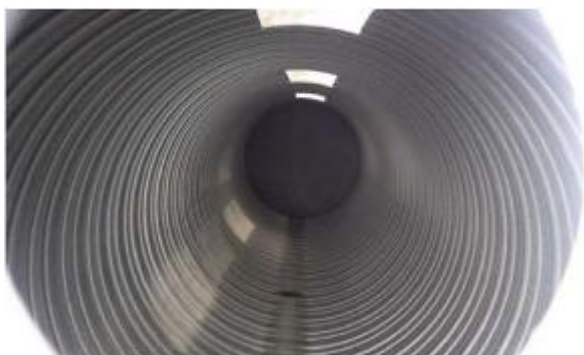
据付勾配 4.0%



据付勾配 4.0%
注水完了（妻枠）



据付勾配 4.0%
注水完了（中央透明枠）



据付勾配 4.0% 第 1 孔開栓
滞水状況（妻枠）



据付勾配 4.0% 第 1 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）



据付勾配 4.0% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（妻枠）



据付勾配 4.0% 第 1, 2 孔開栓
滞水状況（中央透明枠）

表- 4.3.4 据付勾配 4.0%時の計測値

計測値					
水抜き孔の状態	滞水 有・無	滞水量 (ℓ)	排出量 (ℓ)	排出量累計 (ℓ)	排出に要した 時間
第 1 孔*開栓 第 2 孔*閉栓	○	1.634	98.0	98.0	3 分 40 秒
第 1 孔*開栓 第 2 孔*開栓	○	1.576	0.058	98.058	10 秒以内

4.3.2 中空型枠内の点検性に関する検証試験②の結果

- ファイバースコープを水抜き孔φ30mm×第1孔、第2孔に挿入した結果、ファイバースコープのLEDライトのみでは中空型枠内が暗い状態で、型枠端部まで確認できなかった（表-4.3.5）。
- 内部の状態確認のためには別途、光源挿入孔が必要である。ただし、型枠内を照らすのに十分な光源が一体化したファイバースコープを用いる場合はその限りではない。

表- 4.3.5 検証試験②結果

水抜き孔径 点検位置	φ 30mm	検査員の所見
	可視状況	
第1孔から挿入	×（不可）	・ 型枠内が暗い状態で型枠端部までの様子が確認できない。
第2孔から挿入	×（不可）	

4.3.3 試験結果のまとめ・補修における留意事項

（排水性）

- （1）中空型枠の据付勾配が緩やかなほど、排水状況や排水時間を要したが、中空型枠の端部に配置した水抜き孔1箇所の開栓により、最終的には緩やかな据付勾配でも中空型枠内に滞水させた水量の97%以上が排出されたことが確認できた。
- （2）排出後に型枠内へ残った滞水量は、約1.6～2.7ℓ（計算上全長4mに渡り深さ6～8mm以下で型枠内リブ凹部に滞水している程度）であり、中空型枠の据付勾配（緩やかな勾配、急な勾配）の違いによって、中空型枠内の滞水に大きな差がないことが確認できた。
- （3）中空型枠の中間部配置の水抜き第2孔開栓時、第2孔周囲の型枠内リブ凹部に残っていた微量の水が排出される程度（約0.2ℓ）で、中間部配置の水抜き第2孔の排水効果は小さいことが確認された。
- （4）試験計画時には密閉空間の中空型枠の内圧に対して、排出する水抜き孔の径が小さく、表面張力と大気圧の関係から、水抜き孔1箇所では水が排出されないことが懸念されたが、水抜き孔1箇所でも排水性を有していることが確認できた。

以上より、一様な浮き上がりが認められた中空型枠を含めて、中空型枠が変形していない場合、型枠1個あたり水抜き孔φ30mmを低い勾配側へ1箇所設置することで、排水性を有することが確認できた。一方で、局所的な浮き上がり、変形が認められた中空型枠に対しては、中空型枠の変形状況を確認した上で、最低部へ水抜き孔φ30mmを設置する必要がある。

（点検性）

- （5）水抜き孔1箇所では中空型枠内が暗い状態で、型枠端部まで確認できなかった。内部の状態確認のためには別途、光源挿入孔が必要である。

以上より、水抜き孔は排水機能としては1箇所ですりるが、点検目的としては別途光源挿入孔等の併設を検討するのがよいと考えられる。