

論文 上床版厚が不足した RC 中空床版橋の疲労破壊に関する検討

喜多 雄士^{*1}・山下 恭敬^{*2}・渡邊 晋也^{*3}・菊地 新平^{*4}

要旨：RC 中空床版橋では、上床版厚が不足した箇所では床版が抜け落ちる事例が確認されている。疲労により抜け落ちが生じると仮定し、その破壊形態を確認するために上床版厚が不足した実物大試験体の輪荷重走行試験を行った。輪荷重走行試験は、たわみが急増するまで行い、ひび割れの進展状況や試験後に内部ひび割れの観察を実施し、床版内部を横断する斜めひび割れの発生によって破壊したと考えられた。非線形 FEM 静的解析でも床版内部に斜めひび割れが生じることが確認できた。したがって、輪荷重の繰返しの疲労によって床版内部に斜めひび割れが生じて、抜け落ちに至ることが示唆された。

キーワード：RC 中空床版橋、抜け落ち、疲労、輪荷重走行試験

1. はじめに

RC 中空床版橋は、桁を中空にした合理的な構造で経済的な鉄筋コンクリート橋として、名神高速道路や東名高速道路をはじめとした高速道路で多く採用されている橋梁形式であり、NEXCO 管理橋梁の約 3 割を占めている。しかし、写真-1 に示す床版部の抜け落ちが発生する場合があります、また上床版の点検もできない等の理由により、現在 NEXCO では採用されていない。

床版の抜け落ちは、建設時のコンクリート打設により円筒型枠（以下、ボイドという）の固定が外れて浮き上がることに伴い、ボイドかぶり厚さが不足した箇所が発生している¹⁾。舗装の変状箇所の開削調査において、亀甲状のひび割れが床版に生じている場合も確認されており、抜け落ち過程における床版の変状と推定される。ボイドかぶり厚さが薄い箇所では抜け落ちが生じていることから、NEXCO では電磁波レーダー等による非破壊検査によるボイドかぶり厚さの調査を実施しており、設計ボイドかぶり厚さ 150mm を確保できていない箇所が確認されている。飯土井ら²⁾によれば、関東地方整備局が管理する RC 中空床版橋のうち、ボイドかぶり厚さが 100 mm 未満のものは全体の 18%、150mm 未満のものは 55% であり、RC 中空床版橋のボイドかぶり厚さ不足箇所は多く、抜け落ちによる第三者影響を防止するためにも、対応していくことは重要な課題である。ただ、名神高速道路の建設記録によれば、RC 中空床版橋のボイドかぶり厚さは、建設当初は 100 mm とし、ボイドの浮き上がりが生じる場合を想定して 150 mm に変更しており、明確な設計に基づいて設定された厚さではない。したがって、本研究では疲労耐久性の観点から必要な床版厚を検討するにあたり、抜け落ちの破壊形態を確認するために輪荷重走行試験を行った。



写真-1 床版抜け落ち事例

2. 輪荷重走行試験

2.1 試験体

表-1 に試験水準、表-2 に使用材料、表-3 にコンクリート配合、図-1 に試験体図を示す。RC 中空床版橋は、タイドアーチの耐荷機構になることが仮定されているものの、ボイド径に対するボイドかぶりの比が小さくなると版理論が想定する応力性状に近くなることが解析で確認されている³⁾。版構造の場合が疲労耐久性の観点から厳しいと仮定し、RC 中空床版橋で適用されているボイド径の中で比較的大きい $\phi 700$ mm とした。ボイドかぶり厚さの設計値は、高速自動車国道設計要領（昭和 39 年）以降、150 mm の一定値としている。試験体のボイドかぶり厚さは、ボイド直上の橋軸方向鉄筋と干渉するまでボイドが浮き上がった場合の 50 mm と、それよりも浮き上がりが小さい 80 mm、そしてボイドかぶり厚さ 50 mm のものが供用後に舗装補修時の切削機械による過切削や床版の劣化等により 30 mm となった場合を想定した 3 水準とした。コンクリート圧縮強度の設計基準強度は、24 N/mm²（材齢 28 日）とし、試験時の圧縮強度が設計基準強度

*1 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員 修士（工学）（正会員）

*2 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員

*3 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 副主幹 博士（工学）（正会員）

*4 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究員

を大きく上回らないように呼び強度 21 N/mm² で配合設計を行った。鉄筋は、主鉄筋には D32 (SD345)、開口補強鉄筋には D16 (SD345)、配力鉄筋およびせん断補強鉄筋には D13 (SD345) を用いた。

2.2 試験方法

表－1 試験水準

ケース	ボイドかぶり 厚さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)		載荷方法
		材齢28日	試験開始時	
30W	30	28.9	31.9	ダブルタイヤ模擬
50T	50	34.7	36.7	タンデム
80T	80	31.0	31.0	タンデム

表－2 使用材料

種類	記号	密度	備考
水	W	1.0	地下水
セメント	C	3.16	普通ポルトランドセメント
細骨材1	S1	2.64	富士川中流域
細骨材2	S2	2.60	山梨県南巨摩郡南部町
粗骨材	G1	2.66	富士川中流域
粗骨材	G2	2.68	山梨県南巨摩郡南部町
混和剤	Ad	—	AE減水剤 標準型

表－3 コンクリート配合

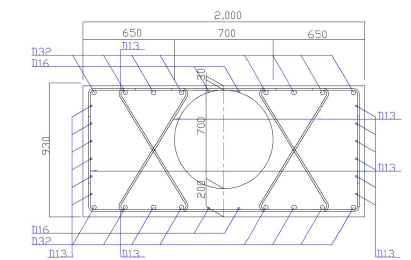
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
59.8	49.7	163	273	557	364	567	381	3.28

輪荷重走行試験は、(株)高速道路総合技術研究所が所有する大型移動載荷疲労試験機を用いた。載荷方法は、図－2 に示すダブルタイヤ模擬載荷またはタンデム載荷で行った。写真－2 にタンデム載荷の試験状況を示す。

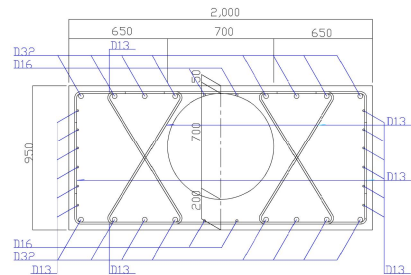
鋼橋コンクリート系床版の輪荷重走行試験で一般的に使用される載荷ブロック (500×200 mm) を用いると、RC 中空床版橋の場合はボイドかぶり厚さの大きい箇所に荷重が集中する傾向になることが解析および実験から確認された⁴⁾。したがって、載荷端部に応力が集中してもボイドかぶり厚さの薄い範囲に荷重が作用するように、安全側の評価としてダブルタイヤの片輪 (200×200 mm) が床版に直接作用することを模擬した載荷方法とした。また、試験体の変形に追従しやすくするため、接触面には厚さ 1mm のステンレス板入りのゴム積層板を用いた。ゴムの高さを 20～40 mm で変化させて予備解析と載荷試験を行い、荷重の偏りや発生ひずみに有意な差が見られなかったため、試験時のゴムのせん断変形量を小さくするために、ゴム高さは 20 mm とした。ケース 30W の輪荷重走行試験では、定期的に感圧紙を用いて試験体上

面に作用する圧力を測定した。その結果、車輪が橋軸直角方向に回転しない構造であるため、ボイド頂部側の残留変位増加に伴い、荷重が充実部に偏る傾向が見られる課題が確認された。そのため、50T と 80T では、橋軸直角方向の荷重の偏りがないう、2 軸 2 輪によるタンデム載荷を採用した。なお、タンデム載荷としたのは、輪荷重走行試験機の最低荷重が 157kN であり、単輪載荷だとゴム積層板の面積が小さく初期面圧が大きくなるためである。また、前輪と後輪の中間において発生するたわみは十分小さいことから、独立して荷重が載荷しているものとしてみなした。

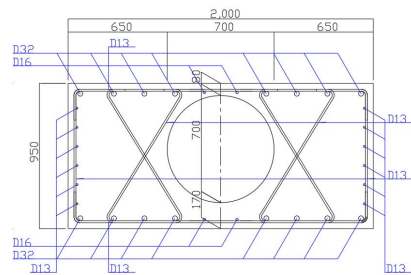
載荷荷重は、鋼橋 RC 床版との疲労耐久性を相対的に比較ができるように、文献⁵⁾と同様に 157kN から 4 万回ごとに 19.6kN ずつ荷重を増加させる階段状荷重漸増載荷の乾燥条件とした。荷重増加の度に、試験体の中心とその前後約 600 mm の位置の 3 点で静的載荷を行い、300 mm 間隔で設置した変位計を用いてたわみを計測した。試験体は、水平方向を固定し、ブルマンで鋼製架台と L 字アングル材により横ずれを防止した。



(a) ボイドかぶり厚さ 30 mm

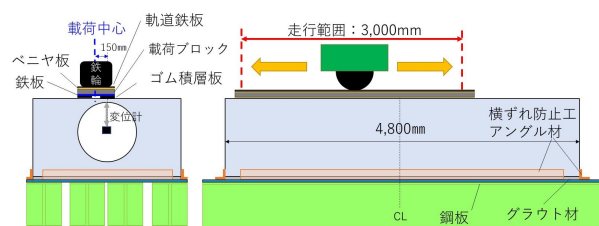


(b) ボイドかぶり厚さ 50 mm

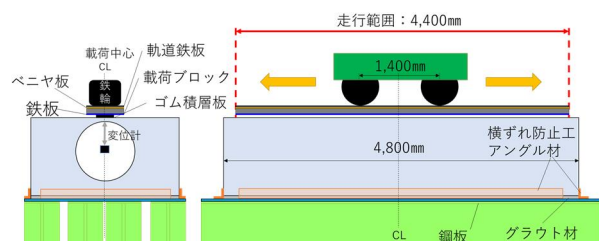


(c) ボイドかぶり厚さ 80 mm

図－1 試験体図(単位 mm)

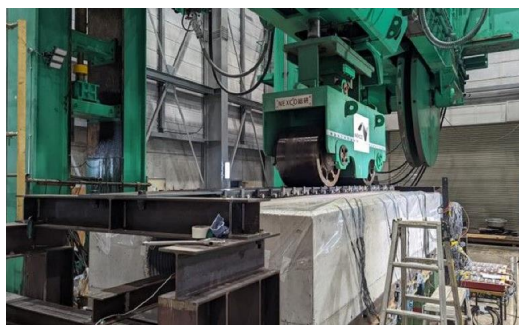


(a) ダブルタイヤ模擬載荷



(b) タンデム載荷

図ー2 載荷方法



写真ー2 タンデム載荷試験状況

3. 試験結果

3.1 たわみ

破壊箇所に近い地点で計測された活荷重たわみの走行回数による推移を図ー3に示す。走行回数は鉄輪が通過した回数を示しており、試験機が1往復するとダブルタイヤ模擬載荷は2回、タンデム載荷は4回走行する。

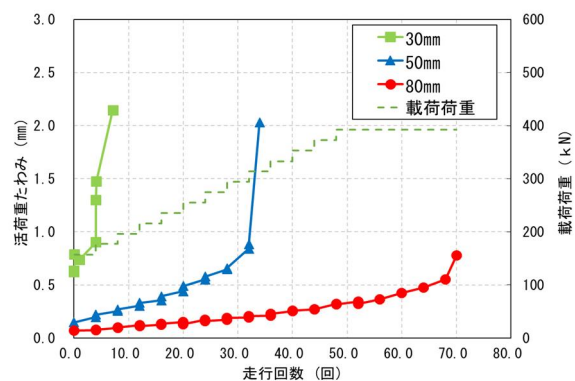
破壊をたわみの急増し始める点とすると、破壊時走行回数は30Wで4.1万回、50Tで32万回、80Tで68万回となり、ボイドかぶり厚さが大きいほど疲労耐久性が高い結果が得られた。文献⁵⁾の鋼橋RC床版の同一の載荷条件で行われた輪荷重走行試験では、平成8年の道路橋示方書で設計された鋼橋RC床版の破壊時走行回数は約22~37万回以上としており、ボイドかぶり80mmの場合はこれと同等以上の回数で破壊したといえる。

3.2 破壊性状の観察

各ケースの輪荷重走行試験の試験終了時までのボイド上面のコンクリート上床版下面のひび割れ等の発生状況を図ー4に示す。

(1) 80T

ボイド頂部の曲げ引張が生じる位置にひび割れが入り、



図ー3 活荷重たわみの推移

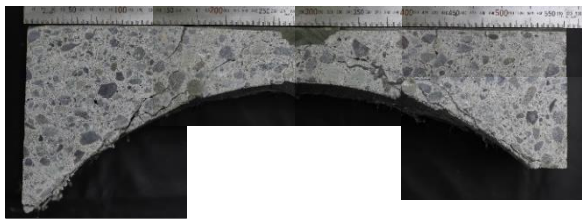
約8万回まで橋軸方向に連続し、約8万回から36万回にかけて橋軸直角方向の配力鉄筋位置でおおよそ等間隔のひび割れが生じる。約36万回以降はボイド頂部以外にも橋軸方向のひび割れが生じ、ひび割れが格子状になり、走行回数が大きくなるにつれてひび割れ密度が大きくなっていく。たわみが急増する68万回で供試体中心から水平方向に200mm程度離れた両方の位置に連続した橋軸方向のひび割れが発生していた。このひび割れの深さを確認するために、図ー5に示すとおり床版内部のひび割れ状況を観察した。橋軸直角方向断面では、両端から発生したひび割れは斜め方向に進展しており、床版内部を横断していた。橋軸方向断面を観察すると、この斜めひび割れは橋軸方向にも連続して発生していることが確認された。したがって、この斜めひび割れの発生によって、たわみが急増したと考えられる。

(2) 50T

ボイド上面に発生するひび割れは、80Tと概ね類似していた。異なる点は32万回で橋軸方向鉄筋位置での連続したひび割れが生じた後に、33.9万回で供試体中心から水平方向に200mm離れた両方の位置に連続した橋軸方向のひび割れが生じたことである。図ー6に床版内部のひび割れ状況を示す。80Tと同様に斜めひび割れが確認され、橋軸方向にも連続していた。また、床版上面にはコンクリートの剥離が見られた点も80Tや30Wと異なっていた。圧縮応力が高い位置の剥離であることから、圧縮疲労破壊である可能性がある。

(3) 30W

ボイド上面に発生するひび割れは、概ね80Tや50Tと類似していた。たわみ急増後の破壊の過程を確認するため、抜け落ちが生じるまで試験を継続した。図ー7より、斜めのひび割れと鉛直方向のひび割れで囲まれたコンクリート片が落下し、それからその上部のコンクリート片も落下することで抜け落ちが生じていた。抜け落ち形状は、写真ー1に示す抜け落ちと類似しており、実現象を再現できていると考えた。



図－6 50T の破壊部の内部ひび割れ発生状況



図－7 30W の破壊部の上床版下面の状況

4. 非線形 FEM 静的解析

上床版厚が不足した RC 中空床版橋の静的載荷による破壊性状を確認するために、汎用非線形有限要素プログラムである DIANA を用いて、コンクリートのひび割れを考慮した材料の非線形静的解析を行った。

4.1 解析ケース

ボイドかぶり厚さ 30, 50, 80mm の 3 ケースとした。

4.2 解析条件

解析モデルを図－8 に示す。解析モデルの寸法は、実験供試体橋軸方向長さを短くした $2,000 \times 2,000 \times 950$ mm とした。載荷は、ダブルタイヤの片輪が載荷することを模擬し、ゴム板 ($200 \times 200 \times 20$ mm)、鋼板、載荷ブロック、ベニヤ板および鉄輪をモデル化し、異種材料間すべての境界にはインターフェース要素を設定して各材料の変形の影響を考慮した荷重が床版上面に作用するようにした。メッシュ寸法を統一するため、ボイドかぶり厚さ 30 mm のケースに併せて最小 10mm 単位に設定した。鉄筋は埋込鉄筋要素とした。ひび割れモデルには全ひずみモデルを用い、コンクリートの応力ひずみ曲線やひび割れによる圧縮強度の低減モデル等についてはコンクリート標準示方書に準拠した。

4.3 解析結果

(1) 荷重変位関係

荷重変位関係を図－9 に示す。ボイド頂部の要素からの変位を抽出し、いずれも変位が 2 mm 程度に達した時点で急増し、ボイドかぶり厚さが大きいほど荷重が大きくなる傾向が得られた。変位が急増する点を破壊荷重とすると、ボイドかぶり厚さ 30 mm で 187kN, 50 mm で 315kN, 80 mm で 525kN の荷重で破壊しており、床版の設計荷重 50kN に対して余裕があることが確認された。

なお、この設計荷重は、ダブルタイヤの片輪相当である T 荷重 (100kN) の半分として設定した。

(2) ひび割れひずみ

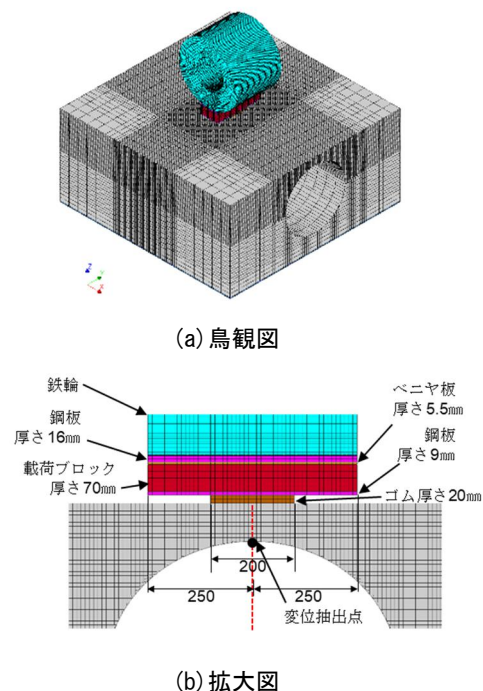
ボイドかぶり厚さ 80 mm の破壊時のひび割れひずみを図－10 に示す。ひび割れひずみが卓越する箇所は床版内部で斜めひび割れが見られ、ボイドかぶり厚さ 50 mm および 30 mm でも同様の結果が得られた。

(3) 最大・最小主応力度およびせん断応力度

ボイドかぶり厚さ 80 mm の破壊時の最大および最小主応力度、せん断応力度を図－11～図－13 に示す。最大主応力度は、載荷範囲端部付近の床版上面やボイド上面の正曲げ領域の広範囲で大きく、斜め方向が特に卓越しているわけではない。最小主応力度は載荷位置直下の床版上面が最も大きく、そして載荷範囲から斜め方向に作用する圧縮応力がボイドと交わる部分でも卓越していた。せん断応力度は、載荷範囲から斜め方向に卓越しており、輪荷重走行試験で見られる斜めひび割れと類似しているようにはみえるが、せん断に起因したひび割れかは十分に検証できていない。

ボイドかぶり厚さ 50 mm および 30 mm の場合、ボイドかぶり厚さが薄いほど最大・最小およびせん断応力度の発生応力は大きくなるが、同様の結果が得られた。

RC 中空床版橋の静的載荷および輪荷重による動的載荷による詳細な破壊メカニズムについては、引き続き検討する必要があると考えられる。



図－8 解析モデル

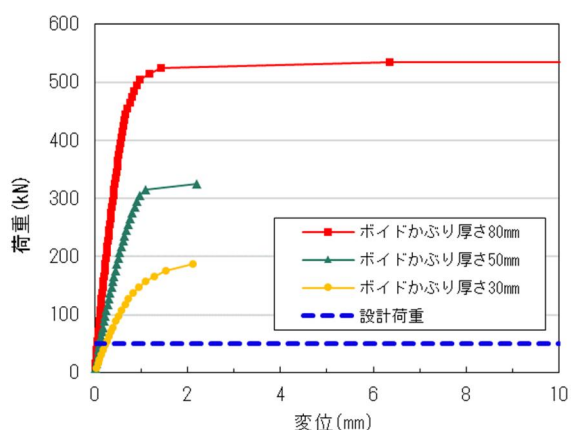


図-9 荷重変位関係

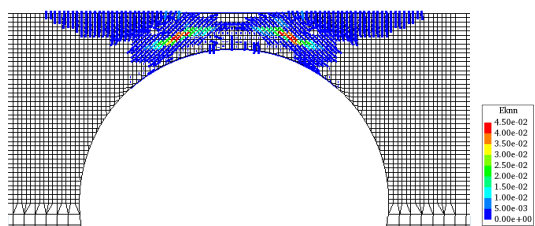


図-10 ひび割れひずみ (80 mm, 525kN)

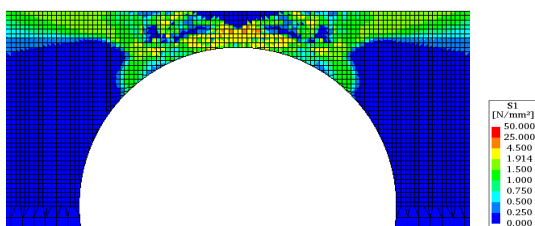


図-11 最大主応力度 (80 mm, 525kN)

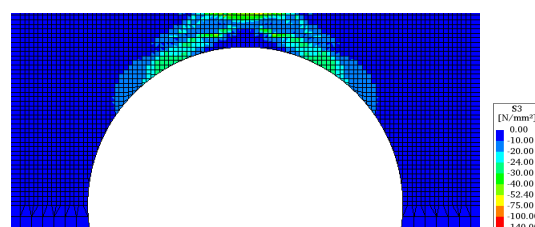


図-12 最小主応力度 (80 mm, 525kN)

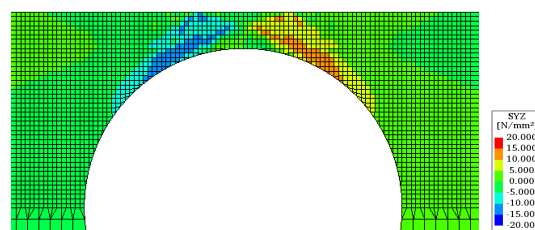


図-13 せん断応力度 (80 mm, 525kN)

5. まとめ

輪荷重走行試験および非線形 FEM 静的解析により、荷重の繰返し作用によって、床版内部に横断した斜めひび割れが生じることで抜け落ちに至ることが示唆された。

この斜めひび割れの発生原因については、今後の検討課題である。

- (1) ボイドかぶりが大きいほど、輪荷重走行試験の破壊走行回数は増加し、疲労耐久性は高くなる。ボイドかぶり 80 mm の場合は、平成 8 年道路橋で設計された鋼橋 RC 床版の破壊走行回数と同等以上であった。
- (2) ケース 30W,50T,80T の全てで、破壊時に試験体中心から水平方向に 200 mm 程度離れた両方の位置で、ボイド上面に橋軸方向に連続したひび割れが発生した。80T と 50T の切断面の観察により、このひび割れは床版内部を横断した斜めひび割れであり、橋軸方向にも連続していることが確認された。したがって、この斜めひび割れの発生によってたわみが急増したと考えられた。
- (3) ケース 30W の抜け落ち過程の観察により、斜めひび割れと鉛直方向のひび割れで囲まれたコンクリート片が落下し、それからその上部のコンクリート片が落下することで抜け落ちが生じていた。抜け落ち形状が現場で生じているものと類似しているため、本試験で抜け落ちを再現できていると考えた。
- (4) 非線形 FEM 静的解析により、ボイドかぶり厚さが大きいほど破壊時の荷重は大きくなる。
- (5) 非線形 FEM 静的解析により、破壊時のひび割れ状況を確認すると内部に斜めのひび割れが卓越していた。

謝辞

非線形 FEM 静的解析は、オリエンタル白石㈱の俵綾子氏、久松健一氏、大田千尋氏のご協力のもと行いました。ここに、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，第 7 回委員会資料，p17，2022
- 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力照査方法等の検討，構造工学論文集 Vol.65A，pp.634-645，2019
- 3) 平野義徳，白戸真大：中空床版円筒型枠上部コンクリート抜け落ちに関する耐力・耐久性の一検討，PC 工学会第 29 回シンポジウム論文集，pp.35-40，2020
- 4) 喜多雄士，高原良太，山下恭敬，安部誠司，渡邊晋也，菊地新平：上床版厚が不足した RC 中空床版橋の輪荷重走行試験，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，2023
- 5) 中谷晶一，内田賢一，西川和廣，神田昌幸，宮崎和彦，川間重一ら：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第 28 号，2002