

論文 床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討

横山 広*1・浦 修造*2・関口 幹夫*3・堀川 都志雄*4

要旨: 劣化床版の水平ひび割れの発生原因と、上面増厚工法におけるはく離問題に関する解析的な検討を 3 次元弾性論に基づく厚板理論によって実施した。何れの問題も横せん断応力の影響が大きいと推察され、局所的な応力分布の厳密解を得ることで詳細に検討した。その結果、劣化床版では横せん断応力のピーク値は上側鉄筋付近に発生し、水平ひび割れの発生位置に一致すること、コンクリートに着目した場合の鉄筋の断面減少でひび割れ発生と進展の危険性が増加することが推察された。上面増厚工法では既設コンクリートとの境界面での横せん断応力は防水層で設定されている規格値を超過しており、はく離の可能性がある。

キーワード: 床版, 水平ひび割れ, 上面増厚工法, はく離, 厚板理論

1. はじめに

昭和 40 年代の道路橋床版のひび割れ損傷に起因して疲労劣化の解明が積極的に進められ、輪荷重走行試験の開発によりそのメカニズムはほぼ解明されている。しかしながら、床版を構成する材料であるコンクリートは現場で成形されることから品質のばらつきを内包しており、締め固め不足などの部分的な欠陥からの劣化進展が耐久性に及ぼす影響も大きいものと推察される。さらにコンクリートは凍害やアルカリ骨材反応などの材料的な劣化現象が生じることで劣化が進行する。それらの材料劣化のメカニズムは個別に研究が進められているが、床版構造に着目すれば材料劣化に関する検討は少なく、耐荷性への影響に関しては未解明な部分が多い¹⁾。

道路橋床版の劣化が進行して耐荷性が低下した場合にはプレキャスト床版による打替え工法が採用され、疲労損傷や凍害劣化によって、過去に数多くの床版が更新されている。それらの施工時に確認される現象として、撤去床版の上面付近の水平ひび割れが挙げられる(写真-1)。水平ひび割れはそのほとんどが床版の上側鉄筋に沿って発生しており、荷重作用によるねじりの影響でひび割れ幅は大きくなるが、その原因は明らかではない。しかしながら、水平ひび割れの発生とその拡大によるコンクリートのかみ合わせの消失によるせん断応力の伝達性能の低下は床版の耐荷性に影響を及ぼすことは明白である。よって、その解明が床版の耐久性向上に有効であることは容易に想像できる。図-1 は輪荷重走行試験により終局に至った鉄筋コンクリート床版供試体²⁾を切断した断面のひび割れ図である。橋軸直角方向断面では押し抜きせん断破壊面が観察されるが、橋軸方向では、断面の上方に水平ひび割れが確認される。ただし、これ

は 160kN の過大な走行荷重の繰り返し载荷によるものであり、実橋の荷重状態が試験と同様であるとは考えにくい。そこで本研究では、水平ひび割れの発生原因に初期欠陥や材料劣化が影響しているものと仮定して、3 次元弾性論に基づく厚板理論による多層版の解析³⁾で、横せん断応力に着目して、その原因について基礎的な検討を加える。厚板理論は有限要素法で得られる近似解とは異

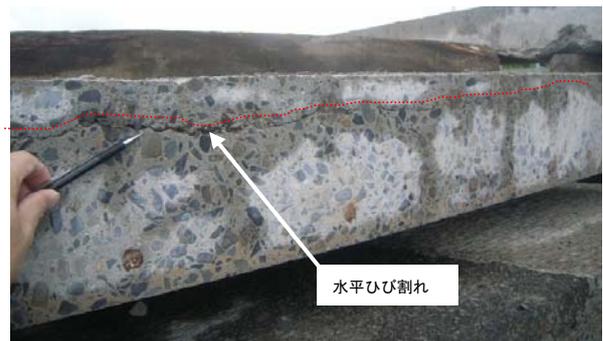


写真-1 撤去床版の水平ひび割れ

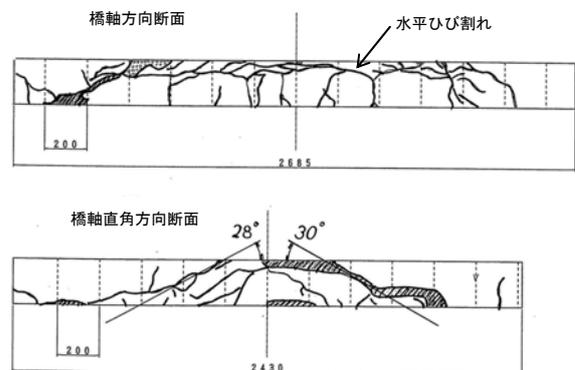


図-1 輪荷重走行試験後の供試体ひび割れ

*1 国土開発センター 設計事業部構造部主席技師 (正会員)

*2 国土開発センター 設計事業部構造部リーダー

*3 東京都 土木技術支援・人材育成センター

*4 大阪工業大学工学部 都市デザイン工学科 工博

なり，厳密解が得られるのでひび割れ発生の有無などの局所的な検討に威力を発揮する。

さらに同様の解析手法で上面増厚工法の既設床版との接触界面におけるはく離問題を検討する。この問題も床版内部に発生する横せん断応力に起因する劣化現象であることが推量される。

2. 計算方法とモデル

本研究で採用した厚板理論とは，Kirchhoff-Love の仮定から誘導される薄板理論とは異なり，3次元弾性論による変位関数 f_3 (ガラーキネクトル) と ϕ_3 (ブーシネスクの関数) に基づく厳密な理論であり，その基礎微分方程式は式(1)のように示される。実際の応力値の算定では，フーリエ級数を用いて計算を行っている。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

ここに， $\Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z$

$$\partial^2 x = \partial^2 / \partial x^2, \quad \partial^2 y = \partial^2 / \partial y^2, \quad \partial^2 z = \partial^2 / \partial z^2$$

変位関数 u, v, w と変位関数 f_3, ϕ_3 の関係は以下のよう示される。

$$2\mu u = -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3$$

$$2\mu v = -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3$$

$$2\mu w = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 z + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 x + \partial^2 y) \right] f_3$$

ここに， λ, μ : Lamé の定数

計算対象となる床版は図-2 に示すとおり，橋軸方向が 5.0m で橋軸直角方向が 2.5m の単純支持長方形版で，その厚さは 200mm とした。載荷荷重は道路橋示方書に準じて 100kN とし，接触面の載荷形状は 200×500mm で床版中央に載荷した。床版劣化による水平ひび割れの検討モデルではアスファルト舗装の厚さを 50mm として，舗装と床版の接触界面には滑りがなく応力が伝達されるものとした。次に，上面増厚工法の解析モデルでは，施工時に既設床版を 10mm 切削することを考慮して床版厚さを 190mm とし，増厚コンクリートの厚さは一般的な 60mm で，床版劣化の検討と同様に既設床版との付着界面には滑りが無いものとした。何れの計算でも既設床版の状態として健全床版と劣化床版を設定しており，健全床版の設計基準強度を $f'_{ck}=21\text{N/mm}^2$ とし，道路橋示方書のヤング係数を採用した。劣化床版は床版剛性が低下している状態を表現するものとし，引張無視（ひび割れ考慮）のヤング係数比 $n=15$ に加え，既往の研究⁴⁾で確認されている等価なヤング係数比 $n=31$ でも計算している。ここで本研究では，コンクリートのひび割れ断面での骨材のかみ合わせ，および鉄筋とコンクリートとの付着切れ等による劣化床版のマクロ的な表現として，劣化床版のたわみと全断面有効時の応力状態を想定する厚板理論によるたわみ値とを等価にする床版の曲げ剛性

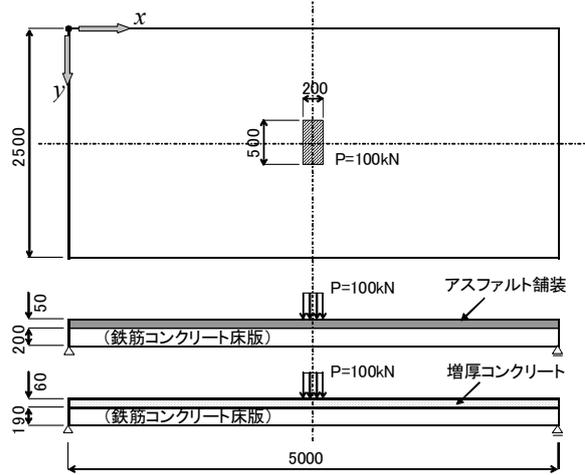


図-2 計算モデル

表-1 材料物性

材料	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
アスファルト舗装(冬季)	2.0	0.4
増厚コンクリート	33.0	0.2
既設コンクリート床版(健全)	21.5	0.2
既設コンクリート床版(劣化 n=15)	14.0	0.2
既設コンクリート床版(劣化 n=31)	6.5	0.2

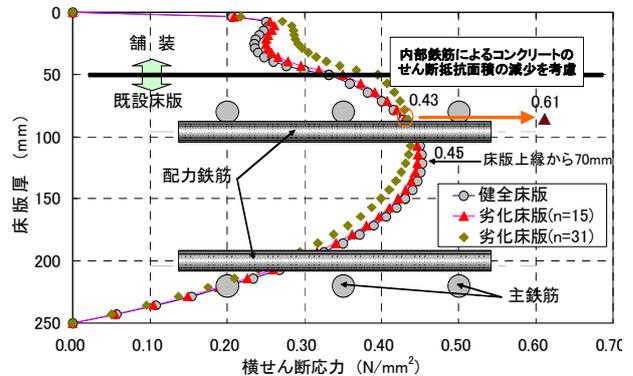


図-3 劣化床版の横せん断応力の分布

から，劣化床版の換算ヤング係数を導入する手法をとっている。床版と舗装もしくは増厚コンクリートとの付着特性の把握には，床版の変形状態が主として影響するため，ヤング係数を操作する手法で概ね問題はないと推量される。表-1 は計算に用いた物性値である。

3. 劣化床版の計算結果

劣化床版の横せん断応力の計算結果を図-3 に示す。図は荷重端部の橋軸直角方向（主鉄筋方向）の分布を示したもので，舗装と床版の境界と内部鋼材の配置を示している。ここで示した内部鋼材は D16 が使用されていると仮定した主鉄筋・配力鉄筋の位置である。図によれば健全床版の横せん断応力のピーク値は 0.45N/mm^2 程度で

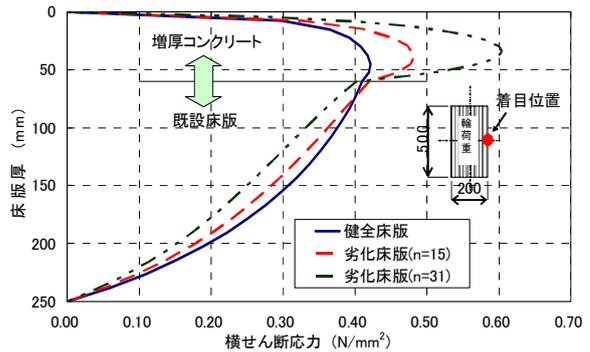
床版上面から約 70mm の位置に発生している。ヤング係数比を $n=15$ とした劣化床版ではピーク値はほぼ同等であるが、その位置は床版上縁から 65mm と健全床版よりも上側にシフトしている。それに対し $n=31$ の劣化床版では、ピーク値が 0.44 N/mm^2 と僅かに減少しているが、その位置は床版上縁から 50mm と大きく移動している。この位置は上側配力鉄筋の直近となっており、打ち替え対象となった既設床版の水平ひび割れの発生位置にもほぼ一致している。ここで床版を構成するコンクリートに着目すれば断面内部に配置される鉄筋は抵抗断面を減少させる異物であり、断面の減少からコンクリートの横せん断応力も増加することが推察される。図中の鉄筋考慮の■印は、D16 鉄筋が主鉄筋方向と配力鉄筋方向のそれぞれに 100mm ピッチに配置された場合の平面投影面積を減じたコンクリート部のみの純面積を勘案した割り増し係数を横せん断応力に乗じた仮定値である。主鉄筋と配力鉄筋は厳密に言えば同一平面上にはなく、断面減少率は過大となる可能性がある。ただし、コンクリートは 20mm 程度の粗骨材を含む複合材料であり、せん断破壊面が切断面のような平滑さを持つとは考えにくいことから、矛盾はないと考えている。このような考え方による鉄筋位置の横せん断応力の仮定値は大きく突出し、水平ひび割れの発生および進展の要因となる可能性が増大する。しかしながら、コンクリートのせん断破壊に進展するせん断強度よりも小さい値であることから、他の要因が影響していることになる。コンクリートの打ち込みでは、内部鉄筋の下側にブリージング水が滞留し空隙となる場合もあることから、その部分での応力集中的な要因が影響している可能性もある。ただし、この仮定は推論の域を出ないので、鉄筋と接触する部分の応力集中の検討やスタッドジベルのせん断試験を模擬したモデル供試体によるせん断試験等を実施し、妥当性を検証する必要がある。

4. 上面増厚の計算結果

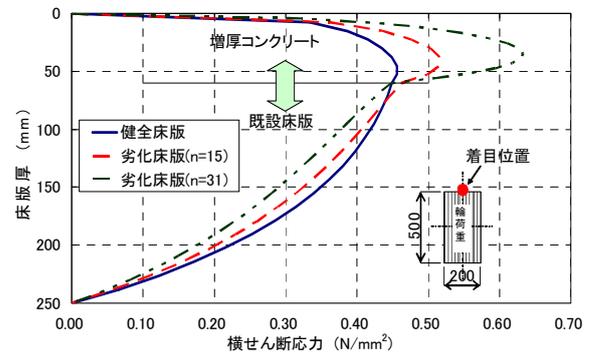
4.1 床版との境界面における横せん断応力

上面増厚工法は劣化床版への補強工法として、主として国内の高速道路で広く採用されている。ただし、最近になっては離間問題が顕在化しており、各種の検討が進められている。図-4 は多層版解析による既設床版と増厚コンクリートとの境界部分に発生する横せん断応力の計算結果で、輪荷重の橋軸方向端部中央と橋軸直角方向の端部中央およびその角部の値を示した。応力の方向は、橋軸方向と橋軸直角方向は輪荷重の端部の辺に直行する外向き方向で、角部は橋軸方向と橋軸直角方向を合応力ベクトルとした主方向である。

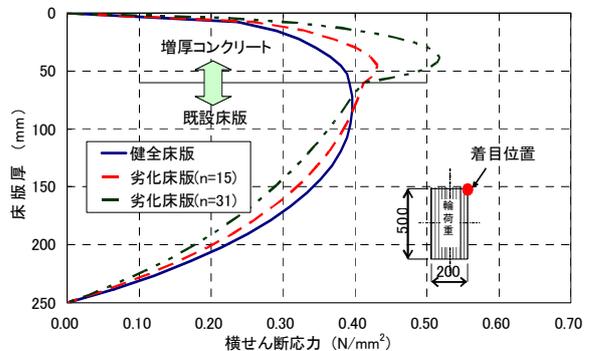
図によればほとんどの計算結果で増厚コンクリート



(a) 輪荷重の橋軸方向端部中央



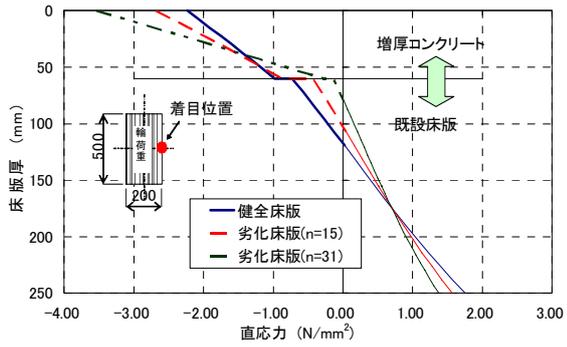
(b) 輪荷重の橋軸直角方向端部中央



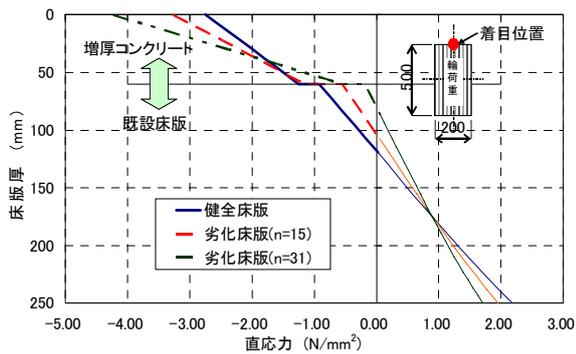
(c) 輪荷重の角部

図-4 上面増厚工法における横せん断応力分布

の内部に横せん断応力のピーク値が存在することと既設床版では増厚コンクリートとの境界面、もしくはその付近に発生することが判る。横せん断応力のピーク値は、橋軸直角方向>橋軸方向>角部となっており、劣化床版の計算結果が健全床版と比較して大きい値となっている。ただし、境界面のみに着目すれば、既設床版の劣化状態に関係なく横せん断応力の発生レベルはほぼ同等となっている。因みに図-5 は橋軸方向と橋軸直角方向の着目点における直応力の板厚方向の分布である。横せん断応力の分布で判るように、増厚コンクリートが圧縮



(a) 輪荷重の橋軸方向端部中央



(b) 輪荷重の橋軸直角方向端部中央

図-5 上面増厚工法における直応力分布



写真-2 舗装撤去後の床版上面の劣化状況

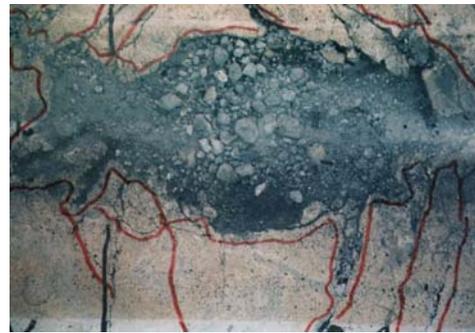


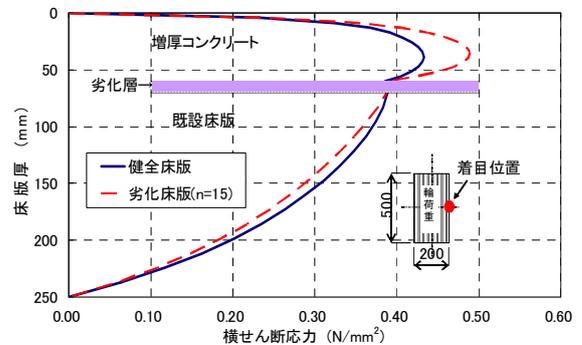
写真-3 輪荷重走行試験による上面の砂利化

応力を受け持っており、既設床版の劣化にあわせて中立軸が上昇していることが判る。本計算ではヤング係数比で劣化床版を表現していることから、内部鉄筋を有するひび割れ状態の応力分布とは異なることになるものの、主として横せん断応力に着目しているため、床版の変形状態の方が重要であると考えている。

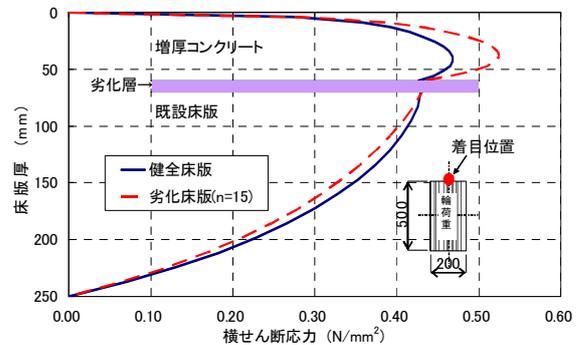
一方、床版コンクリートの付着に関するせん断応力度（付着せん断）の規格値として防水層で 0.2N/mm^2 の値が提示されている⁵⁾。それらの付着試験による終局状態は防水層に用いる材料の付着特性が優れているためコンクリート面の破壊となることが知られている。本計算結果は何れの計算結果でもその値を超過しており、既設コンクリート面からのはく離の危険性が高いと推察される。ただし、防水層における規格値であり、コンクリート相互の付着に対して適用できるかという懸念が残る。これに関しては材料構成が同等のコンクリートであっても、ヤング係数が大きく異なる場合には強度の小さい側のコンクリートの横せん断応力がはく離に対して支配的になると考えている。よって、コンクリート相互の一体性のみを期待するのではなく、機械的なアンカー効果を有する一体化手法の採用が望まれる。

4.2 劣化層を考慮した横せん断応力の分布

上面増厚工法の施工では、舗装の撤去後に専用の機械でショットブラストによる表面処理が行われる。その際



(a) 輪荷重の橋軸方向端部中央



(b) 輪荷重の橋軸直角方向端部中央

図-6 劣化層を有する場合の横せん断応力分布

に、表面的なコンクリートの劣化部分は除去されるが、層状の劣化層が存在する場合には、除去できない可能性がある。写真-2 は寒冷積雪地の山間部の橋梁でアスファルト舗装に多数のひび割れが発生したため、舗装を撤去して床版上面を確認した際の劣化状況である。コンクリート表面には多数の微細なひび割れが発生しており、ペースト部分が消失して骨材が露出している部分も見られた。写真-3 は輪荷重走行試験²⁾によって床版上面が砂利化した供試体の状況である。輪荷重走行試験では上面のはく離領域が拡大した後に、そのはく離部分が圧壊するようにして砂利化が進行する。よって、写真-2 の山間部の橋梁とは異なっており、荷重載荷以外の劣化要因が存在することになる。本研究で想定している層状の劣化は、融雪剤として散布される塩化カルシウムによるコンクリート劣化⁶⁾である。

図-6 は劣化層を 10mm 厚さで設定し、その層のヤング係数を劣化床版 (n=15) の 1/10 に設定して計算した結果である。図-4 の劣化層のない計算と比較すれば、橋軸方向、橋軸直角方向ともに分布曲線の形状が異なり、劣化層のある方が境界面の横せん断応力が小さく、ピーク値は劣化層を有する方がやや大きい値となっている。劣化層が存在する場合でも、横せん断応力のレベルは存在しない場合と同等であることから、せん断強度が低下する劣化部分ではさらにはく離の危険性が增大することになる。

5. まとめ

本研究では厚板理論によって、劣化床版と上面増厚工法に関する解析的な検討を実施した。何れの問題も横せん断応力の影響が大きいと推察され、局所的な応力分布の厳密解を得ることで詳細な検討が可能になる。

以下に本研究で得られた知見を列挙する。

- (1) 劣化床版の横せん断応力のピーク値は、床版の劣化が進行しても同等であるが、断面内での位置が異なりヤング係数比を大きくすると上方に移動する。実橋床版で確認されている n=31 では上側配力鉄筋位置にほぼ一致する。
- (2) 劣化床版の検討で、コンクリートに着目し内部鉄筋による断面減少による割り増し係数を考慮すれば、水平ひび割れの発生、進展の要因となる可能性が増大する。ただし、応力集中などの検討から妥当性を確認する必要がある。
- (3) 上面増厚の計算結果では、横せん断応力のピーク値は増厚コンクリート内部に存在し、既設床版では増厚コンクリートとの境界面、もしくはその近傍に発

生する。

- (4) 上面増し厚における横せん断応力のピーク値の大小は、輪荷重作用位置の橋軸直角方向>橋軸方向>交差部の順となり、劣化床版の値が健全床版よりも大きい。ただし、境界面では既設床版の劣化状態に関係なく、横せん断応力の発生レベルはほぼ同等である。
- (5) 増厚コンクリートの境界面に発生する横せん断応力は、防水層の規格値を超過しており、はく離の危険性があると推察される。
- (6) 増厚コンクリートと既設床版の境界面に劣化層を考慮した場合、横せん断応力の分布形状が異なるものとなるが、横せん断応力のレベルは劣化層のない場合とほぼ同等である。ただし、劣化した場合にはせん断強度が低下するのではなくはく離の危険性は増大する。

本研究は水平ひび割れの発生原因や、上面増厚工法における増厚コンクリートのはく離に関する基礎的な解析検討である。今後、水平ひび割れに関しては、モデル試験によって鉄筋付近の応力集中に関する検証を行う予定であり、上面増厚工法では、はく離領域を設定した計算で、付着面とはく離面との境界部分の横せん断応力に着目した計算を実施して、その領域の拡大の可能性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 横山広, 堀川都志雄, 川崎文義, 渡邊悠輔, 久保善司: 凍結防止材の影響を受けた構造物の実態調査, 土木学会中部支部研究発表会, pp.423-424, 2008.3.
- 2) 横山広, 篠原晃, 関口幹夫, 堀川都志雄: ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労耐久性評価手法, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.999-1006, 2004.3.
- 3) 横山広, 安東祐樹, 谷口義則, 関口幹夫, 堀川都志雄: 局部はく離を考慮した輪荷重下における舗装と床版界面の応力解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.980-987, 2007.3.
- 4) 関口幹夫, 横山広, 堀川都志雄: リブ付き多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価, 構造工学論文集 Vol.54A, pp.442-451, 2008.3.
- 5) 財団法人災害科学研究所: 道路橋床版高機能防水システムの耐久性評価に関する研究, 2005.9.
- 6) 川村満紀, S. チャタジー: コンクリートの材料科学, 森北出版, 2002.9.

