

## 論文 道路橋床版への水圧作用による劣化現象の解析的検討

横山 広\*1・関口 幹夫\*2・榎谷 浩\*3・堀川 都志雄\*4

**要旨：**道路橋床版の劣化現象に床版上縁コンクリートの砂利化現象や水平ひび割れが挙げられるが、輪荷重の影響だけではなく、水のコンクリート内部への浸透による水圧作用が関与している可能性がある。本研究では3次元弾性論に基づく厳密な理論をM.A.Biotが提案する圧密方程式に適用し、実橋床版を対象に輪荷重作用位置近傍で水圧が作用する問題の解析を行った。解析の結果、床版内部には輪荷重に水圧の影響が相乗する大きな横せん断応力が発生し、水圧作用端部でのひび割れ発生とそのひび割れが進展する可能性があることが示された。

**キーワード：**道路橋床版, 砂利化, 圧密方程式, 横せん断応力, 水平ひび割れ

### 1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化として、昭和40年代に問題が顕在化した疲労による損傷が挙げられるが、当時の劣化床版の中にはコンクリート床版の上面が砂利化しているものも確認されていた。疲労劣化のメカニズムはその当時に開発された輪荷重走行試験機によって解明され<sup>1)</sup>、砂利化現象も再現されるに至った<sup>2)</sup>。しかしながら、それらの試験によって再現された砂利化現象は、比較的大きな移動荷重の繰り返し载荷の結果で生じたものであり、一般の交通条件で発生する砂利化は異なる要因が影響していると考えべきである。写真-1は寒冷積雪地域の山間部における道路橋床版の舗装撤去後のコンクリート上面の状況であるが、上鉄筋まで砂利化が進展していた。この床版はアルカシリカ反応被害が生じていることが判明しているが、反応生成物が膨張するだけでは微細に砂利化することはない。さらに砂利化の状況を観察すると、全体に湿潤していることが認められる。この湿潤状態と砂利化の関連は不明であるが、少なくとも水がコンクリートに浸透できる環境であることは疑いがない。

そこで本研究では、床版上面コンクリートの砂利化に水が関与していると仮定し、解析的にその影響を検討する。水の悪影響への対策には防水層の設置が有効であるが、新設橋では採用されているものの既設橋では設置されていないものも未だ数多く存在している。さらに塗膜型の防水層ではアスファルト敷設時の転圧により塗膜が損傷するという指摘<sup>3)</sup>もあることから、それが採用された際には状況により新設橋でも水が浸透する危険性が残されている。

筆者らはこれまでに3次元弾性論に基づく理論による

床版問題の厳密な解析を進めてきた。本研究では物体力を有する場合の変位関数からなる多層版理論を導き、それらを圧密方程式に組み込むことによって、コンクリート内に浸透した水による水圧問題を検討する。本研究で着目する内容を以下に示す。

- (a) 輪荷重の作用によって生ずる床版コンクリートに浸透した水による水圧（以下、間隙水圧と称す）を取り扱うために、M.A.Biotが提案する圧密方程式<sup>4)</sup>を適用する。この方程式は土粒子の骨組みの変形に着目した式系であり、物体力を有する変位関数で置換できることになる。
- (b) 誘導した変位関数を用いて水圧を受ける場合の単純版における横せん断応力を算出し、上鉄筋位置に初期ひび割れが発生する可能性を評価する。なお、水の浸透が上鉄筋を超えて下方に進展した場合の横せん断応力の変化にも着目する。



写真-1 劣化床版上縁の砂利化

\*1 (株) 国土開発センター 技術開発研究所設計事業部構造部 (正会員)

\*2 東京都 技術支援・人材育成センター

\*3 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 工博 (正会員)

\*4 大阪工業大学 都市デザイン工学科 工博

(c) 単純版の中央に支持桁を有する境界条件，すなわち連続版を扱えるようにし，荷重と水圧が作用する位置が支持桁近傍に移動した場合の横せん断応力の変化を調べる。

## 2. 解析手法の概要

本研究では3次元弾性論から導かれる厚板理論を中心に据えて解析手法を構築している。以下にその概要を説明する。

### 2.1 厚板理論の概要

本研究で採用した厚板理論とは，Kirchhoff-Love の仮定，すなわち平面保持の仮定から誘導される薄板理論とは異なり，Navier の式からなる3次元弾性体での Galerkin-vector  $f_3$  と Boussinesq の関数  $\theta_3$  に基づく厳密な理論<sup>5)</sup>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。

$$\Delta \Delta f_3 = -(\lambda + 2\mu)Z / (\lambda + \mu),$$

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

ここに，  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$   
 $Z$  ;  $z$  方向の物体力

変位  $u, v, w$  と変位関数  $f_3, \phi_3$  の関係は以下のように示される。

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

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

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

ここに，  $\lambda, \mu$  : Lamé の定数

### 2.2 圧密方程式の導入

床版の格子状のひび割れ部が雨水で充満されるとき，この部位は含水をもつ多孔質物体とみなすことができる。擬似的にひび割れによる弾性係数の部分低下を無視すれば，発生する直応力  $\sigma$  は物質の骨組みに作用する有効応力  $\sigma'$  と間隙水圧  $p$  の和で表され，次のような式で示される。

$$\sigma = \sigma' + p \quad (2)$$

式(2)を考慮した全応力のつりあい式から，例えば  $x$  方向では以下のような有効応力と水圧に分離される式で誘導される。

$$\partial_x \sigma'_x + \partial_y \tau_{xy} + \partial_z \tau_{xz} + \partial_x p + X = 0$$

$$\partial_x \tau_{xy} + \partial_y \sigma'_y + \partial_z \tau_{yz} + \partial_y p + Y = 0$$

$$\partial_x \tau_{xz} + \partial_y \tau_{yz} + \partial_z \sigma'_z + \partial_z p + Z = 0 \quad (3)$$

ここで，  $\partial_x = \partial / \partial x, \partial_y = \partial / \partial y, \partial_z = \partial / \partial z,$

$$\sigma'_x = \lambda e + 2\mu \varepsilon_x, \quad \sigma'_y = \lambda e + 2\mu \varepsilon_y,$$

$$\sigma'_z = \lambda e + 2\mu \varepsilon_z,$$

$$\tau_{xy} = \mu \gamma_{xy}, \quad \tau_{xz} = \mu \gamma_{xz}$$

$$\tau_{yz} = \mu \gamma_{yz} \quad (4)$$

ここで，  $e = \partial_x u + \partial_y v + \partial_z w$  ; 体積ひずみ，

$X, Y, Z$  ; 各方向の物体力の成分

すなわち，水圧  $p$  の勾配は物体力に相当することが判る。これは熱問題での温度変化項を物体力として検討する際の Duhamel の類似と同様である<sup>6)</sup>。

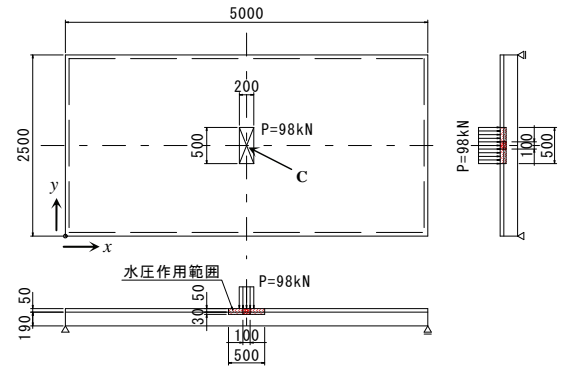
式(4)を式(3)に代入すれば，有効応力に関する Navier の式が得られる。一方，水流の連続式は Darcy の法則から得られ，3次元体の場合には次式となる。

$$\partial_i (\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w) - C \Delta p = 0 \quad (5)$$

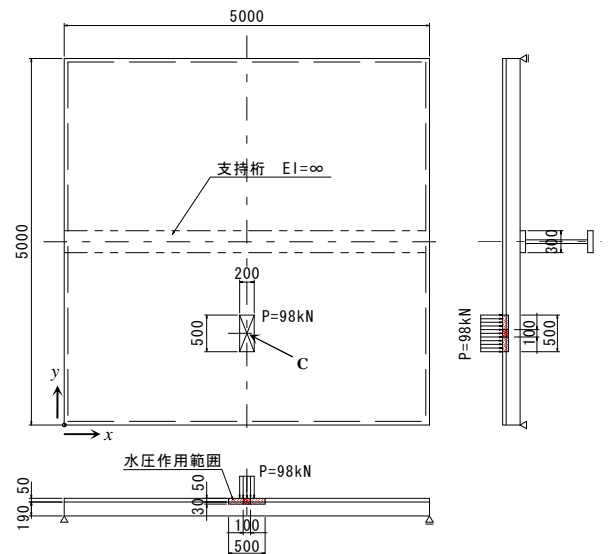
ここで，  $C = k / \gamma_w$ ，  $k$  ; 透水係数，

$\gamma_w$  ; 水の単位質量

式(5)には体積ひずみが水圧の式に混入するため，



(a) 単純版モデル



(b) 中央に支持桁を有するモデル

図-1 計算モデル

表-1 計算に用いた物性値

| 材 料              | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------------------|--------------------------------|-------|
| アスファルト舗装 (冬季を想定) | 2.0                            | 0.4   |
| コンクリート床版         | 14.0                           | 0.2   |

Navier の式と共に連成系を構成することになる。コンクリートは粘土に比べて骨組み構造が強固であり、粘土のような圧密現象を呈すると想定され難いため、式(5)が分離する定常状態を考える。水圧  $p$  は  $\Delta p=0$  を満足するように決定される。この時の水圧  $p$  の  $z$  方向 (版厚方向) の分布は、 $z$  の一次関数となる。

$$p = p_a z + p_b \quad (6)$$

本研究では、雨水で満たされたコンクリートの劣化部輪荷重が作用する場合と、舗装近傍の床版コンクリート内部に水平ひび割れを模した部分を設定してその位置に水が充填されている状態を考える。水圧の大きさは輪荷重 (100kN で載荷形状 200×500mm) の面圧 1.0N/mm<sup>2</sup> とする。これらを多層版に適用する場合、各層の上下面での水圧の大きさを決定して計算を実行する。すなわち、舗装と上鉄筋のかぶり部まで劣化部分やひび割れが存在する場合には、その層には Biot の式を適用し、上鉄筋よりも下位の床版部には通常の Navier 式を用いることになる。

### 3. 計算モデルと諸元

図-1 に計算モデルとして採用した単純版と桁を有する連続版のモデルを示す。橋軸直角方向の支間は単純支持の間隔と桁中心までの距離は、1 方向版としての境界条件とするために双方のモデルで 2.5m とし、橋軸方向はその 2 倍の長さとなる 5.0m とした。支持桁の曲げ剛性は無限大 ( $EI=\infty$ ) とし、その幅を 300mm に設定した。水圧の作用条件は図-2 に示すとおりで、舗装と床版 (上被り 30mm) の一部に水圧を作用させる CASE1 と CASE2 に対して、CASE3 と CASE4 は床版内のかぶり部分の下側に幅 1mm の模擬水平ひび割れが存在するものとしてその内部に水圧を作用させるモデルである。

計算に用いた物性値は表-1 の通りで、コンクリート床版のヤング係数はひび割れ状態である  $n=15$  を考慮した等価換算係数  $E_c=14.0\text{kN/mm}^2$  に設定し、アスファルト舗装は感温性を考慮して冬季の想定値となる  $E_a=2.0\text{kN/mm}^2$  とした。

### 4. 水圧作用を受ける床版の計算結果

#### 4.1 舗装と床版の一部に水圧が作用する問題

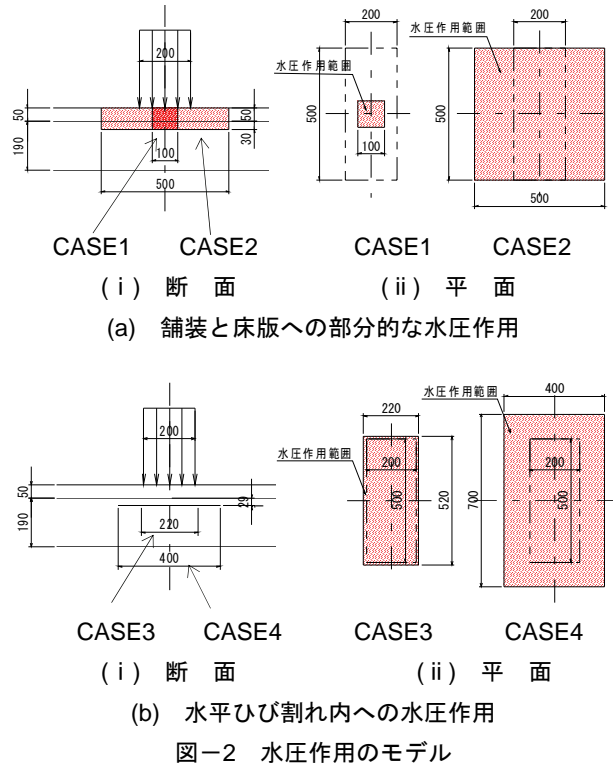
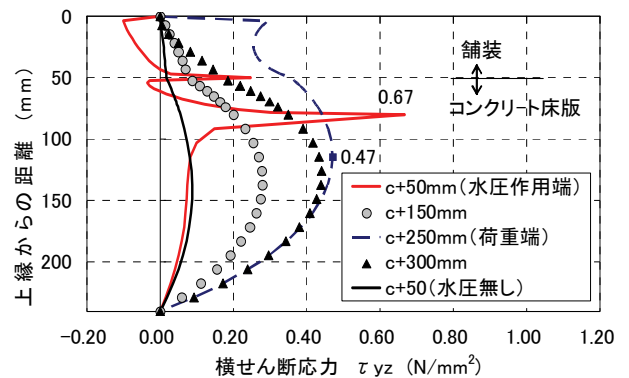
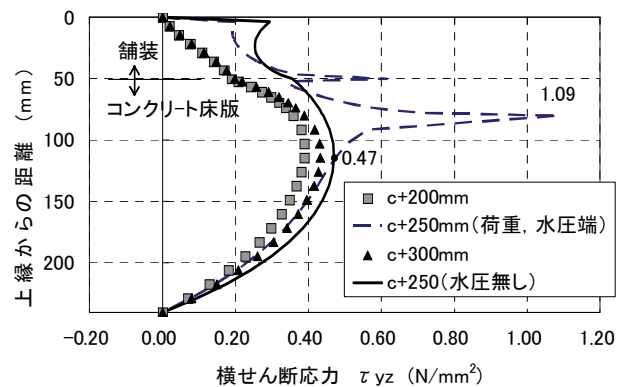


図-2 水圧作用のモデル

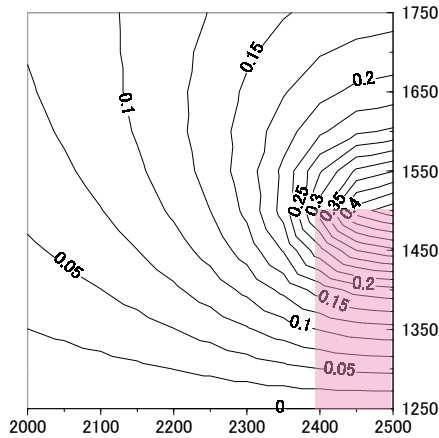


(a) CASE1 の  $\tau_{yz}$

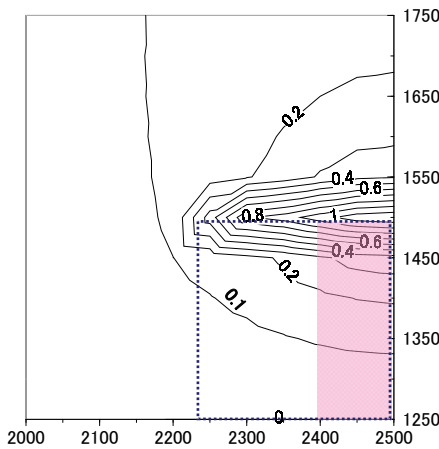


(b) CASE2 の  $\tau_{yz}$

図-3 単純版の水圧作用による横せん断応力



(a) 水圧作用がない場合の  $\tau_{yz}$  の分布



(b) CASE2 の  $\tau_{yz}$  の分布

図-4 横せん断応力の等高線表示

### (1) 単純版の計算結果

舗装と床版の一部に水が浸透し、輪荷重が作用した際の横せん断応力を図-3に示す。図-3(a)はCASE1の水圧を荷重中心部 ( $y=1250\text{mm}$ ) の  $100 \times 100$  の範囲に作用させたもので、水圧作用端の  $c+50\text{mm}$  の位置で舗装と床版の界面、床版コンクリート内部の水圧作用下端で横せん断応力のピークがあり、床版コンクリート内部の値が  $\tau_{yz}=0.67\text{N/mm}^2$  で、荷重が作用している端部の値である  $\tau_{yz}=0.47\text{N/mm}^2$  の 1.42 倍と大きな値となっている。

図-3(b)は水圧の作用端と荷重端とを合わせた場合の横せん断応力であるがピーク値はCASE1よりも大きい  $\tau_{yz}=1.09\text{N/mm}^2$  となっており、水圧作用がない場合のピーク値の 2.32 倍まで大きくなっている。計算値は一般の床版コンクリートの純せん断強度を考慮すると、直ちにひび割れが発生するレベルではないが、コンクリート内部に水が浸透している場合に、ひび割れ発生に繋がる可能性が高いと考えている。

図-4(a)は水圧が作用していない場合の輪荷重のみによる横せん断応力の分布を等高線表示したものである。着目しているのは床版上縁から 30mm の上鉄筋位置を想

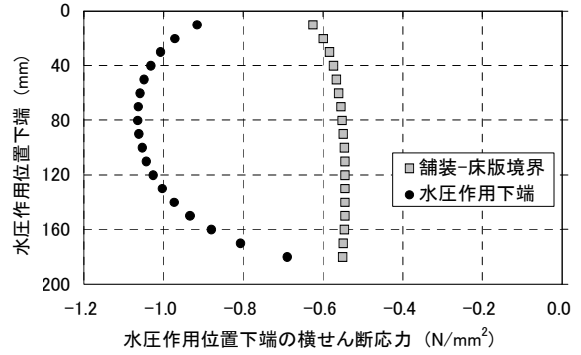


図-5 水圧範囲を下端へ移動した場合の横せん断応力

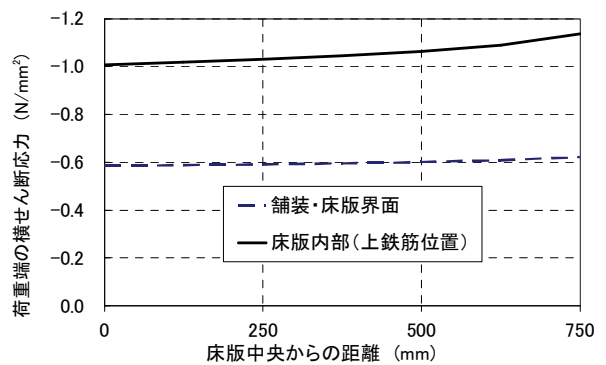


図-6 荷重と水圧作用位置支持桁へ移動した場合の横せん断応力

定した。輪荷重の作用範囲は薄墨で表示しており、図-4(b)では水圧作用範囲を青の破線で表示している。図によれば水圧が作用しない状態でも荷重端で横せん断応力が大きくなっているが、CASE2の水圧を作用させた場合にはさらに顕著に横せん断応力が集中しており、ひび割れ発生の始点になる可能性のあることが判る。

CASE1とCASE2の計算ではコンクリート床版の水圧作用範囲を上縁から 30mm 深さの上鉄筋位置としている。横せん断応力に対しては内部鉄筋の存在によりコンクリートの抵抗断面が欠損している状態となる。すなわち、劣化床版の水平ひび割れが上鉄筋付近に発生している事例が散見される理由として、水の影響による横せん断応力の増大化が挙げられる。

### (2) 連続版の計算結果

水圧の作用範囲を床版厚さ方向に変化させた場合の横せん断応力の影響を図-5に示す。本解析では連続版の支持条件でCASE2の水圧条件を床版支間中央位置 ( $y=1250\text{mm}$ ) としている。着目位置は舗装と床版の界面、および水圧作用位置の下端である。図によれば、横せん断応力のピーク位置は床版厚さに対して中央面付近よりやや上方となっており、舗装と床版の界面のそれに対して大きい値で推移していることが判る。またその応



力レベルは厚さ方向に広い範囲で大きい値となっており、前述の上鉄筋位置のほかにも、水が浸透している状態ではその浸透深さが版厚に対して中央付近である場合に、ひび割れ発生の危険性を孕んでいる。

図-6 は荷重と CASE2 の水圧作用位置を支持桁方向に移動させた場合の、床版上縁から 30mm 深さでの横せん断応力を示している。横せん断応力は荷重位置が支持桁に近づくと大きくなる傾向を示している。増加の程度は緩やかではあるが、ほぼ床版全体で同じレベルのひび割れ発生に関する危険性を内包していることが伺える。

#### 4.2 床版内に水平ひび割れを模擬した層内に水圧が作用する問題

本節では床版内部の上側鉄筋付近に水平ひび割れが発生したと仮定して、単純版の中央と連続版で中央から支持桁側に 500mm の位置に、輪荷重ならびに CASE3, 4 の水圧を作用させた際の発生応力を算出する。なお、水平ひび割れの厚さは 1.0mm とし、水圧は面圧 1.0N/mm<sup>2</sup> としてその範囲内のみ作用させている。

##### (1) 横せん断応力の計算結果

図-7 に横せん断応力の計算結果を示す。水平ひび割れを模擬した位置での算出結果は CASE3, CASE4 のいずれも単純版の中央載荷での値が大きくなっている。上鉄筋より下の床版の分布では、連続版の値が大きくなっており、支持桁の影響が伺える。CASE3 と CASE4 の異なる点は水圧作用位置の範囲の差と輪荷重からの離れの影響が表れており、CASE3 の水圧作用端と荷重端が近い方が横せん断応力が大きい結果となった。

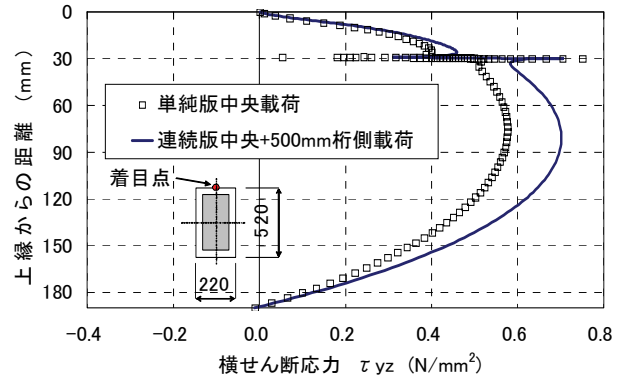
##### (2) 垂直応力の計算結果

垂直応力  $\sigma_z$  の計算結果を図-8 に示す。両方のケースでひび割れを模擬した位置では連続版の値が突出しており、荷重位置が支持桁に近づくとひび割れを模擬した端部の垂直応力が突出し、局所的に引張応力の発生することが判る。ひび割れ位置のほかの値は双方のケースで単純版、連続版ともに同等となっている。よって、CASE2 の計算で横せん断応力によるひび割れ発生の危険性を指摘したが、そのひび割れ位置に横せん断応力の他に引張りの垂直応力が加わり、はく離が進展する可能性のあることが示された。

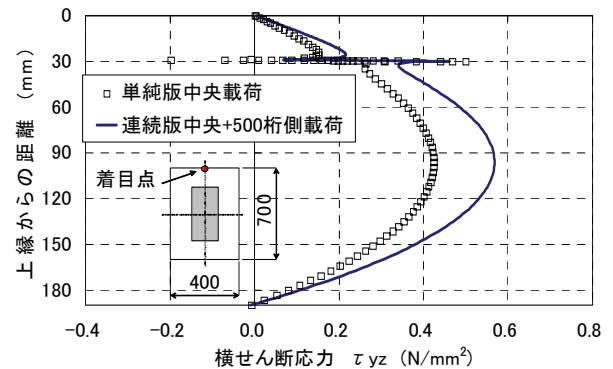
#### 5. まとめ

道路橋の劣化床版に発生している砂利化や上鉄筋付近の水平ひび割れの発生は、現象として把握されているがその発生原因は特定されていない。そこで本研究では道路橋床版の劣化に寄与する水圧の影響を解析的に検討した。以下に得られた知見を列挙する。

(1) M.A.Biot の提案する圧密方程式に変位関数からなる多層版理論を組み込むことによって、コンクリート

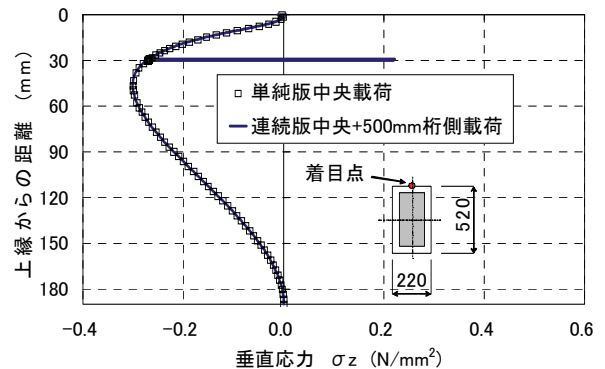


(a) CASE3 の  $\tau_{yz}$

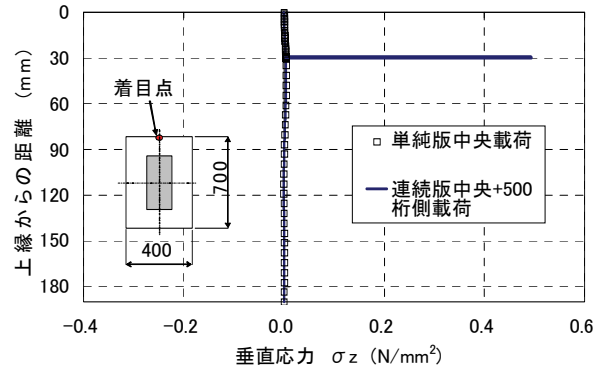


(b) CASE4 の  $\tau_{yz}$

図-7 横せん断応力  $\tau_{yz}$



(a) CASE3 の  $\sigma_z$



(b) CASE4 の  $\sigma_z$

図-8 垂直応力  $\sigma_z$

床版内部に浸透した水による水圧問題が検討可能となる。

- (2) コンクリートに浸透する水圧作用端と荷重端が一致する場合に版内に発生する際の横せん断応力値が増大し、水圧作用位置端部でひび割れが発生する危険性がある。
- (3) 着目した水圧作用範囲の上側鉄筋位置では、横せん断に抵抗するコンクリートの断面が欠損する状態となるため、水平ひび割れの起点となる危険性がさらに増大する。
- (4) 輪荷重と水圧の作用範囲を連続版の支持条件で支持桁近傍へ移動させた場合には、横せん断応力は増加傾向にある。全幅で高い応力レベルとなっていることから、荷重位置による差は顕著ではなく、水が浸透している条件ではどの位置でもひび割れ発生の可能性がある。
- (5) 水平ひび割れを模擬した範囲に水圧を作用させた場合には、その端部に横せん断応力に加えて引張り側の垂直応力による引き剥がしが作用するため、ひび割れが進展する可能性がある。
- (6) 多数の輪荷重の走行繰り返し作用を受けて、(5)で示した応力集中現象が水圧作用部先端で、床版のひび割れ発生と進展を助長すると推測される。

本研究で用いた水平ひび割れを模擬したモデルは、その厚さを 1mm として調和解析を試みているが、実際の

床版にひび割れが発生した場合にはひび割れ面での応力伝達となされないため、厳密にはそれを考慮する必要がある。そこで応力伝達機構が操作できる選点法をひび割れ層の界面に適用する解析で、ひび割れ始端部の応力状態を検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 園田恵一郎，堀川都志雄：輪荷重の反復作用下での道路橋 RC 床版の低サイクル疲労特性，土木学会論文集，第 390 号/V-8，pp.97-106，1988.2.
- 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) 石川裕一，水上善晴：床版防水工の舗装転圧時における検討，土木学会第 56 回年次学術講演会概要集，I-A178，pp.356-357，2001.10.
- 4) Maurice.A.Biot：General theory of three-dimensional consolidation，journal of Applied Physics 12，pp.155-164，February 1941.
- 5) 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.980-986，2007.3.
- 6) 横山広，関口幹夫，堀川都志雄：温度負荷を受ける多層版の変位関数の開発とその応用について，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1346-1353，2011.3.