

## 論文

## 床版の劣化度評価に活荷重作用時の曲率を適用するための基礎的研究

横山広\*, 角間恒\*\*, 佐藤孝司\*\*\*

\*博(工), 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3 丁目)

\*\*博(工), 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

道路橋床版の耐荷性能の経時変化は、主として疲労劣化を対象としてひびわれ密度やたわみの進展によって整理されてきた。しかしながら近年、材料劣化床版の顕在化によってひびわれ密度では劣化度評価が困難な床版が出現しており、それらも含めて統一的に劣化度を評価する手法があれば維持管理の効率化が図られることになる。そこで、活荷重作用による床版の曲率に着目した基礎的な検討を実施したのでその結果を報告する。

キーワード：劣化度，たわみ，曲率

## 1. はじめに

国内の橋長 15m 以上の橋梁は約 167,000 橋であり、床版橋、カルバートを除いた床版を有すると想定される橋梁数は 133,000 橋という膨大な量である。それら床版の維持管理として平成 26 年より 5 年毎の定期点検が義務化されたことで、近接目視による損傷状況の確認・評価後に、その結果を受けて補修設計や詳細調査が行われ、補修・補強施等の対策が実施されるようになってきている。

床版に着目すれば、昭和 40 年代に頻発した陥没損傷の原因究明として輪荷重走行試験機が開発され、それらが広義の疲労損傷であることが解明された。その劣化過程はひびわれ損傷の進展により最終的には押抜きせん断破壊に至るもので、橋梁定期点検要領（平成 26 年 6 月）では、その劣化過程を参考にひびわれ間隔やひびわれ幅、および漏水・遊離石灰の有無で損傷程度が判定されている。また、床版の詳細調査の場面では、ひびわれ密度法による損傷度評価も行われており、そのひびわれ量から補修・補強工法が選定されている。しかしながら、近年になって塩害や凍害、アルカリシリカ反応等の材料劣化床版が顕在化し、これまでのひびわれに着目した劣化度判定では、その評価が困難になってきている。例えば北陸地方の山間部に位置する橋梁（写真-1）では、橋梁定期点検ではその劣化状況からひびわれ損傷に加えて漏水・遊離石灰が確認されることで、劣化が進行した床版として評価されることになるが、本橋での交通量は少なく、疲労に着目したひびわれ損傷による評価が妥当であるかは不明となる。

そこで本研究では、床版の劣化種類に影響を受けない統一的な劣化度評価を実現するために、床版のたわみ性



写真-1 ASR によるひびわれ損傷が確認された床版

状に着目した検討を実施するものとした。たわみに着目する際には載荷試験を実施する必要があるが、近年、衝撃荷重を載荷する試験法が活発に研究されるようになり<sup>1)</sup>、橋面上の作業のみで荷重作用時のたわみが計測できるようになってきている。具体には、重錘を落下することで衝撃荷重を発生させ、床版上面に設置する速度計や加速度計から得られる波形データを積分処理してたわみとする手法であり、従来の足場を必要とする載荷車による試験とは異なり、簡便にデータを取得することを可能にしている。

## 2. 床版の曲げ変形

## 2.1 床版における曲率

古典理論では、板の純曲げを検討する際に微小範囲の変形を対象とした誘導で曲率に着目している<sup>2)</sup>。曲率とは曲率半径の逆数のことであり、板の曲率  $1/r_x$ 、 $1/r_y$  は次

のように示される。

$$\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_y} = \frac{M}{D(1 + \nu)} \quad (1)$$

ここで、

$M$  : 曲げモーメント

$D$  : 板の曲げ剛性

$\nu$  : ポアソン比

式(1)によれば、曲率は断面力と作用条件、剛性を含めた板構造のたわみ変形を表していると理解される。言い換えれば曲率値のみで床版の状態を評価できれば、それらの計算条件を包括した評価になることが分かる。

## 2.2 床版の曲げ変形

版構造の曲げ変形を理解するために、図-1 に示す単純板のたわみを計算することとした。載荷荷重は  $P=100\text{kN}$  であり、載荷面の形状は長辺方向×短辺方向が  $200 \times 500\text{mm}$  である。ヤング係数はコンクリートを想定して、健全な状態の  $E_c=23.5\text{kN/mm}^2$ 、引張無視のヤング係数比  $n=15$  を考慮した  $E_c=13.3\text{kN/mm}^2$  の2種類を想定した。ポアソン比は  $\nu=0.2$  である。計算結果のたわみの分布図を図-2(a), (b)に示すが、ヤング係数が低下する劣化状態ではたわみが大きくなることで、載荷点近傍のたわみ分布形状が健全な状態を想定した結果よりその先端が小さい半径になっている。さらに、図-2 (c) の概念図に示す通り接円を設定すれば、曲率半径が小さくなり、その逆数の曲率では値が大きくなることが分かる。

## 3. 曲率の計算手法に関する検討

### 3.1 曲率計算の対象範囲の設定

床版構造での荷重載荷時のたわみは、ひびわれが発生していない全断面有効の状態では放物線に近いたわみ分布となるが、ひびわれが発達して劣化が進行するとたわみが局所的に変化することが知られており、前節でも同様の結果となった。ここで、載荷点とその近傍の着目点でのたわみ差で算出する曲率を計算する際には、輪荷重走行試験や実橋載荷試験での変位計位置に統一性が無く、床版支間に合わせて任意に設置されているのが現状である。よって、それらの計測データから曲率を計算するには、条件変化による影響を最小とする範囲設定が必要となる。よって、曲率計算で着目する範囲を区間長と定義し、それを変化させた弾性計算を行い、区間長の影響を把握することとした。計算モデルの平面形状は図-1と同様でヤング係数が  $E_c=23.5\text{kN/mm}^2$  でポアソン比  $\nu=0.2$  であるが、床版厚さは  $240\text{mm}$  も対象とし、載荷面の形状も長辺方向×短辺方向  $200 \times 500\text{mm}$  に加え、 $120 \times 300\text{mm}$  も計算することで載荷面の影響を把握する

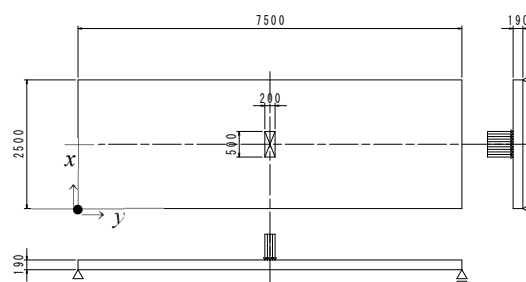
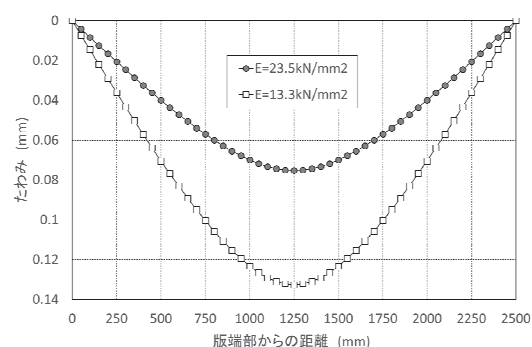
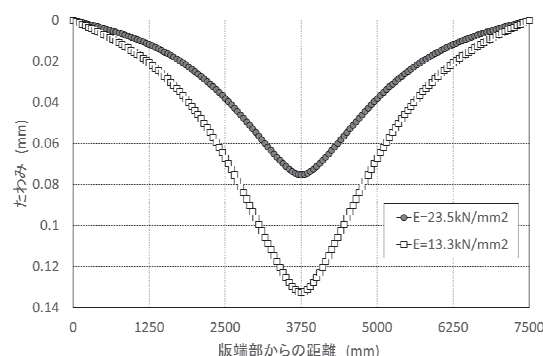


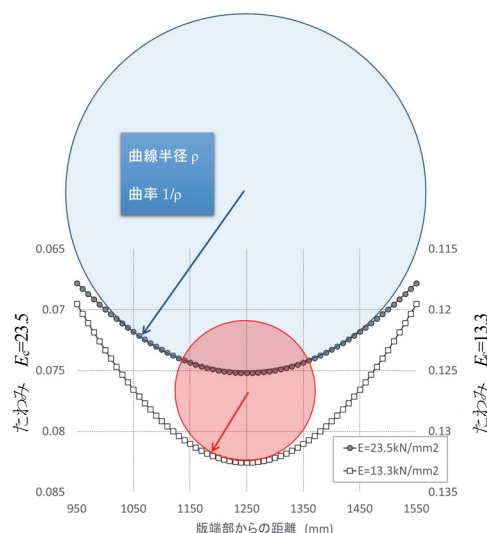
図-1 計算モデル図 (単位: mm)



(a) 版中央の短辺方向

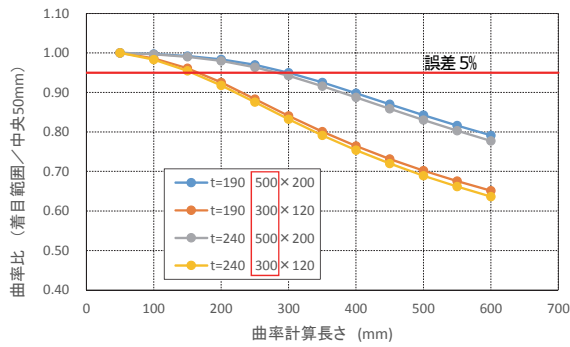


(b) 版中央の長辺方向

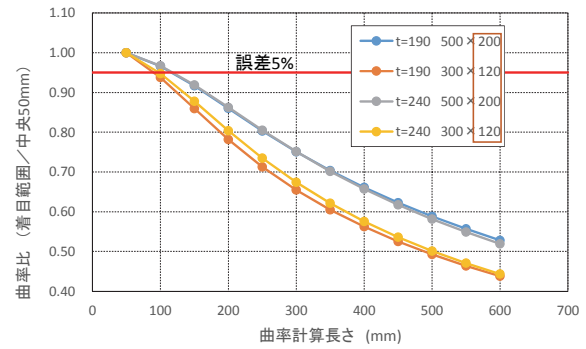


(c) 接円の概念図

図-2 たわみ変形の計算結果



(a) 版中央の短辺方向



(b) 版中央の長辺方向

図-3 曲率計算の着目範囲の計算結果

表-1 計算に用いた物性値

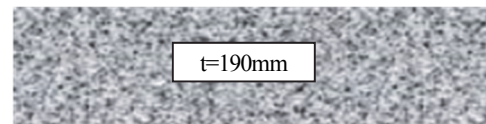
| 計算層数                              |        | 1 層   |       |      | 3 層    |        |
|-----------------------------------|--------|-------|-------|------|--------|--------|
| 計算ケース                             |        | A     | B     | C    | B'     | C'     |
| 中立軸位置 (mm)                        |        | 厚さ中央  |       |      | 63     | 30     |
| ヤング<br>係数<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 1 層目   | 23500 | 13300 | 6700 | 23500  | 23500  |
|                                   | 2 層目   |       |       |      | 13100  | 1175   |
|                                   | 3 層目   |       |       |      | 200000 | 200000 |
| ポアソン比                             | コンクリート | 0.2   | 0.2   | 0.2  | 0.2    | 0.2    |
|                                   | 鋼      | —     | —     | —    | 0.3    | 0.3    |

こととした。

曲率計算でのパラメータとした载荷点中央からの区間長と载荷点中央 50mm の計算結果で除した曲率比の関係を図-3 に示す。ここで基本値として区間長 50mm を採用した理由は荷重载荷中心近傍では曲率が変化しないと推察されるためである。図で示している曲率の区間長は荷重载荷点中央からの距離であり、計算方向の荷重の大きさが理解できるように凡例に赤枠で対象となる幅を囲んでいる。何れの方でも曲率の計算区間を大きくすると中央部分の曲率の計算値との差が大きくなることが分かる。ここで、劣化度を判定する際の実用上の誤差範囲を 5%程度と設定すると荷重幅以内での計算が必要となる。輪荷重走行試験や実橋载荷試験での载荷面形状は統一されていないことから、現状では载荷幅端部までを曲率計算の区間長とすることが望ましいと考えられる。

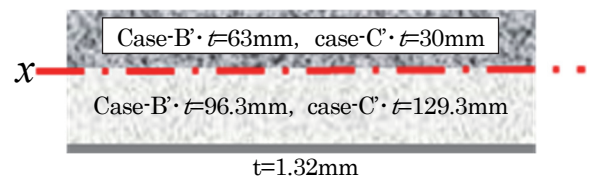
### 3.2 計算条件の違いが曲率に及ぼす影響の試算

弾性計算による床版の計算では全断面でヤング係数を操作する手法が取られているが、荷重载荷点の曲率を計算する際に、計算条件の違いが影響する可能性がある。そこで、弾性計算で床版積層数を 3 層とし、コンクリート構造の断面計算による中立軸より上方のコンクリート層、引張鉄筋断面積を単位幅で除した最下層、それらの上下層を繋ぐ中間層を設定してそれぞれのたわみを算出して曲率を比較する (図-4)。計算に採用したモデルの外観形状は図-1 を採用しており、各種条件毎の物性値は表-1 の通りである。ヤング係数は健全な状態と



計算要因 case-B・ $n=15$ , case-C・ $n=30$

(a) 1 層版モデル (コンクリート全断面)



case-B, case-C のたわみに対応した中間層を設定  
(b) 3 層版モデル (コンクリート 2 層+鉄筋最下層)

図-4 計算断面の概念図

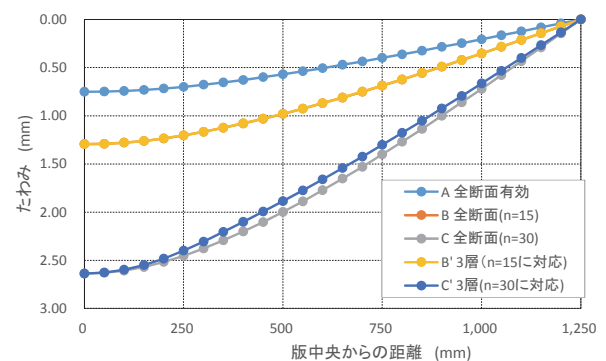


図-5 計算条件の違いによるたわみ分布



引張無視 ( $n=15$ ) に加え、既往の研究<sup>3)</sup>で終局に近いとされる状態の  $n=30$  の  $E_c=6,700\text{N/mm}^2$  を採用した。

計算結果におけるたわみの分布を図-5 に示す。case-B での計算結果を受けて case-B' では最大たわみがほぼ同一となるように中間層のヤング係数を操作している (case-C, case-C' でも同様)。結果として、図では重なっている case-B と case-B' の結果は同じたわみ形態であるが、case-C と case-C' では異なるたわみ形態となっている。表-2 は各計算ケースにおける荷重載荷端までの区間で計算した曲率の比較である。コンクリート断面の引張無視を想定した  $n=15$  では、曲率はほぼ同等となったが破壊前を想定した  $n=30$  では断面構成の違いにより約 30% 程度の差が生じている。これらのことより、床版構造ではひびわれの有無等で断面の状態が異なることから、曲率で劣化度を評価する際には計算手法も含めて注意する必要があることが分かる。本研究では、可能な範囲で簡便に評価できることが望ましいと考え、1 層版モデルで統一して計算を実施することで比較検討することとした。

#### 4. 曲率の計算

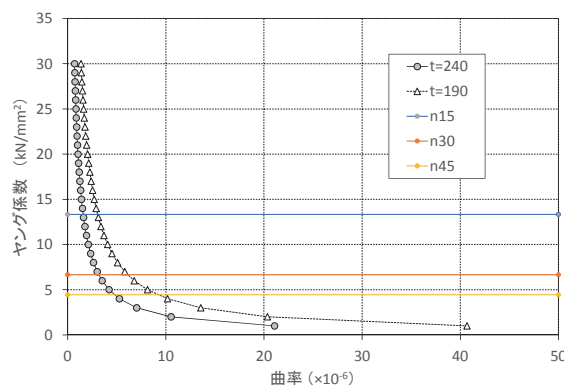
曲率の計算手法の検討を受けて、単純版モデルにおける曲率とヤング係数の関係を計算したものが図-6 である。モデルの形状は図-1 を採用しており、ポアソン比  $\nu=0.2$  で、版厚は  $t=190\text{mm}$  と  $t=240\text{mm}$  の 2 種類とした。図中には目安となるようにコンクリートの引張無視のヤング係数比  $n=15$  に加え、終局に近いヤング係数比  $n=30$ 、及び比較のための  $n=45$  の境界線も示している。図によればヤング係数が低下すると曲率は微増し、 $n=30$  を超えてから急増することが認められる。これは、床版の荷重作用による変形の限界が設定できる可能性を示しており、実橋や輪荷重走行試験の結果を曲率で整理することでその限界点が統一的に設定できる可能性がある。

#### 5. まとめ

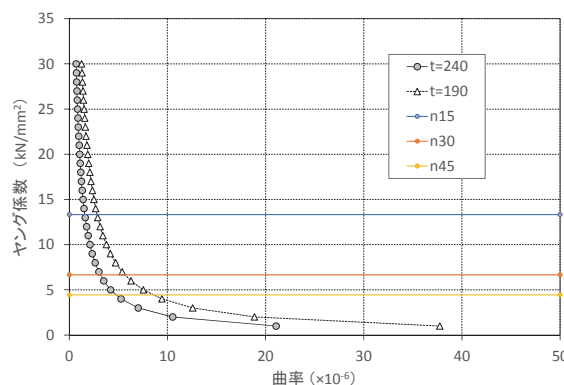
本研究では、床版の劣化種類に影響を受けない統一的な劣化度評価を実現するために、床版の断面力作用時の曲率に着目した検討を実施した。その結果、曲率の計算位置を荷重が等分布となる区間長、即ち荷重端までとすることが計算結果で得られる値の差を小さくすることができること、また、計算条件の違いが曲率に影響をおよぼすことが認められた。それらを考慮して曲率の計算を実施した結果、ヤング係数比が大きくなると曲率も増加することが示されたことから、曲率の変化によって材料劣化も考慮した統一的な劣化度を設定できる可能性がある。

表-2 曲率の計算結果

| 計算ケース | 曲率 ( $\times 10^{-5}$ ) | 比率         |
|-------|-------------------------|------------|
| A     | 0.1679                  | —          |
| B     | 0.2885                  | —          |
| B'    | 0.2909                  | B'/B=1.008 |
| C     | 0.5890                  | —          |
| C'    | 0.7613                  | C'/C=1.293 |



(a) 版中央の短辺方向



(b) 版中央の長辺方向

図-6 曲率の計算結果

今後は各種輪荷重走行試験の結果で曲率を計算し、その妥当性を検証し、劣化度の設定に向けた検討をすすめる予定である。

#### 参考文献

- 1) 横山広, 石尾真理, 玉越隆史: 衝撃荷重による RC 床版の劣化度判定に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 1194-1201, 2016. 3.
- 2) チモシェンコ, ヴォアノフスキー: 板とシェルの理論 (上) 第 1 版 7 刷, ブレイン図書出版, p. 39, 1994. 5.
- 3) 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小版の実測たわみの評価, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 443-451, 2008. 3.

(2016 年 7 月 18 日受付)