

論文 応力計測によるコンクリート床版打換え判定方法の提案

村坂 宗信^{*1}・三浦 良則^{*2}・加賀谷 竹敏^{*3}・柴田 公博^{*4}

要旨: 近年実施されている橋梁点検により、コンクリート床版の損傷が多く報告されている。現状では、この結果を基に算定されたひび割れ密度から床版維持対策が策定されているが、このひび割れ密度を正確に評価するには、継続的な点検を続ける上でコスト増加・時間浪費という問題点が抱えている。本論文では、既設鋼桁橋におけるコンクリート床版の損傷レベルの軸となるひび割れ密度を、ランダム交通により発生する鋼桁及び床版歪みを計測することで評価可能とし、最終的にコンクリート床版を打換える判定方法について提案したものである。

キーワード: 応力計測、ひび割れ密度、中立軸変動、床版2方向歪み、光ファイバー

1. はじめに

従来の床版打換え判定は、目視調査から得られるひび割れ密度と供用年数から判断される方法¹⁾がよく用いられている。この方法では、ひび割れ密度が $10.000(\text{m}/\text{m}^2)$ 以上の場合にのみ床版打換え対応を提案しているが、実際はひび割れ密度が $10.000(\text{m}/\text{m}^2)$ 以下の場合でも床版の陥没・剥落現象が多数報告され、床版打換えに至っている。またひび割れ密度自体も点検精度の曖昧さから明確な算定結果が得られていない状況にある。本論文では、秋田県内のコンクリート床版を有する鋼桁橋の応力計測及び供試体を用いた破壊試験結果を整理し、コンクリート床版劣化に伴い鋼桁歪みから得られる中立軸位置

が変動することに着目し、劣化により発生するひび割れ密度と中立軸位置関係を評価した。またコンクリート床版のひび割れ密度を、ランダム走行時に発生する床版2方向歪み分布から得られる近似式の傾きで評価できることを2橋梁の計測データより解明し、鋼桁及び床版の歪み計測からひび割れ密度を推定し、床版打ち換え判定を提案することとした。

2. 鋼桁橋におけるコンクリート床版管理の重要性

図-1は秋田県内における30橋の鋼桁橋主桁応力計測結果を基に、非合成桁及び合成桁の許容応力度に対する設計上の余裕度と実応力計測結果を考慮した余裕度の

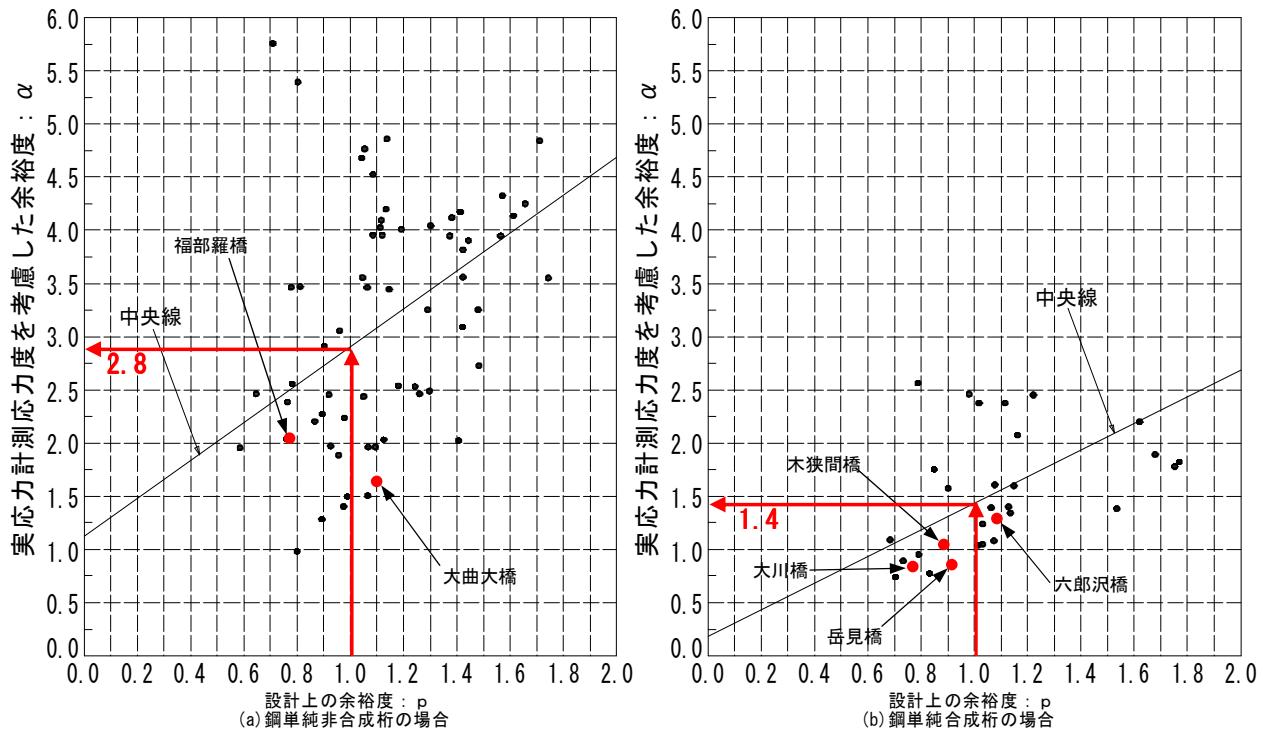


図-1 許容応力度に対する設計上の余裕度と実測値考慮の余裕度との相関性

*1 調査設計会社 水空舎（正会員）

*2 秋田県仙北地域振興局 建設部 部長（非会員）

*3 秋田県仙北地域振興局 建設部 主幹（正会員）

*4 秋田県建設交通部建設交通政策課 政策監（非会員）

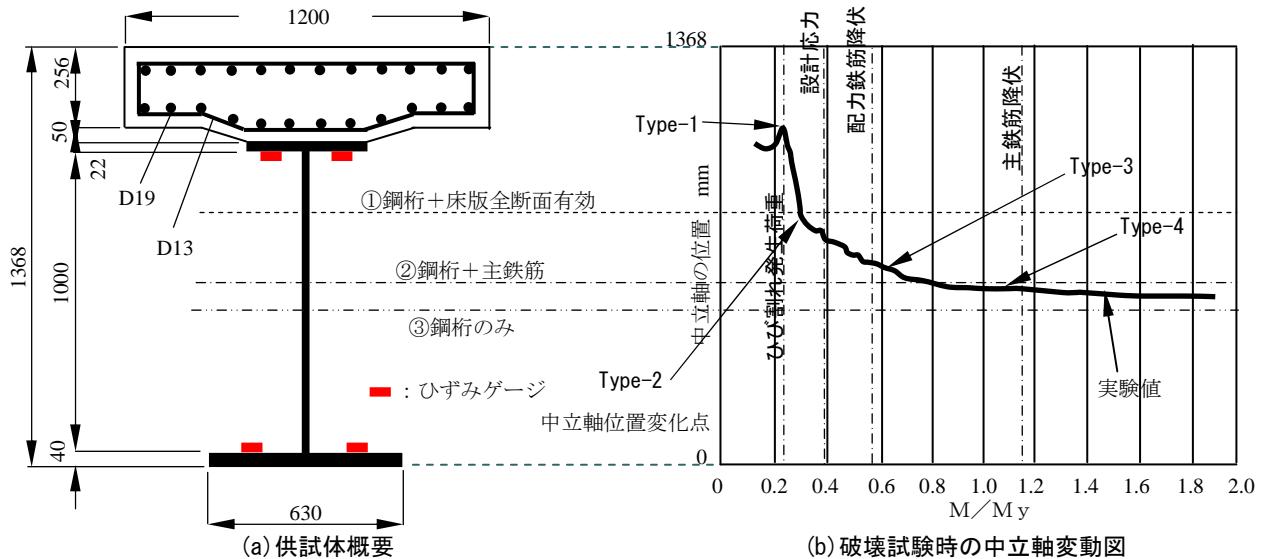


図-2 破壊試験による鋼合成桁の中立軸変動結果

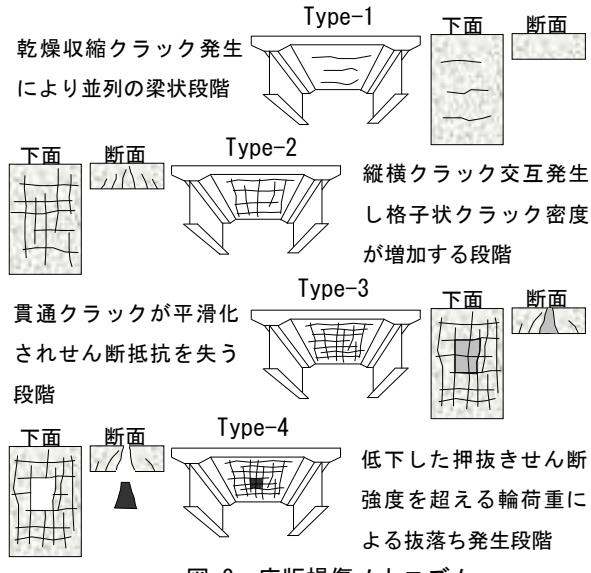


図-3 床版損傷メカニズム

相関性を示したものである。縦軸に実応力計測結果を考慮した余裕度、横軸には設計上の余裕度を示している。非合成桁は設計上無考慮の床版の合成効果が期待できるため余剰耐荷力が大きく、実応力計測を考慮した余裕度は設計上の余裕度の2.8倍程度の安全率が確認できた。反面、合成桁は既に床版剛性を期待しているため余剰耐荷力は小さく、実応力計測を考慮した余裕度は設計上の余裕度の1.4倍程度の安全率を保有している結果となつた。また図中の●点は、床版打換え及び補強対策を実施・予定している橋梁であるが、合成桁に関しては余裕度:1.00を下回る橋梁を確認することができた。これは床版が劣化して合成桁としての剛性低下を示していること示している。また非合成桁橋の中で大曲大橋は床版劣化が顕著である報告があり、そのため余裕度は1.60程度と2.8より大きく下回る結果が確認できた。このように床版劣化は主桁自体の耐荷性能に直結するため、床版の損傷を明確に判定することは非常に重要となる。

3. 床版損傷を管理するポイント

3.1 ひび割れ密度と主桁中立軸位置の関係

(1) 供試体を用いた破壊試験の実施

図-2(a)に示す供試体を用いて連続合成桁支点部の破壊試験を実施し、その際、主桁の上下フランジの歪みを計測することで合成桁の中立軸変動をモニタリングした。中立軸は初期ひび割れが発生する「 $M/M_y=0.25$ 」を境に全断面有効の理論値から鋼桁と鉄筋を考慮した理論値へと移行している。主桁の応力（歪み）に着目すると、鉄筋降伏時の中立軸位置は理論値と実験値でほぼ一致していることが確認できた。これより中立軸の変動を確認することで床版劣化の有無が定性的に評価可能と判断できた。床版損傷のメカニズムは一般に図-3に示す『Type-1→Type-4』に移行するメカニズムが知られている。今回実施した破壊試験過程で得られたひび割れ状態より、各タイプのひび割れ密度を以下のように設定することができた。

- Type-1 ひび割れ密度 $\alpha = 1.000 (\text{m}/\text{m}^2)$
- Type-2 ひび割れ密度 $\alpha = 3.000 (\text{m}/\text{m}^2)$
- Type-3 ひび割れ密度 $\alpha = 6.000 (\text{m}/\text{m}^2)$
- Type-4 ひび割れ密度 $\alpha = 9.000 (\text{m}/\text{m}^2)$

各ひび割れ密度と破壊試験時の中立軸変動位置を図-2(b)中の矢印(→)として明記すると、以下のように考察できた。
 ① 初期ひび割れが発生するレベル($M/M_y=0.25$)が(Type-1)相当となり、設計上の全断面有効の理論値より安全側に中立軸位置が存在する。
 ② (Type-2)のひび割れ密度レベル($\alpha = 3.000 (\text{m}/\text{m}^2)$)において、設計上の全断面有効の理論値より若干下方位置であることが確認できた。今回の破壊試験結果から判断すると、合成桁床版において2方向ひび割れが発生し始めた段階であり中立軸位置の変化点である。このレベルが合

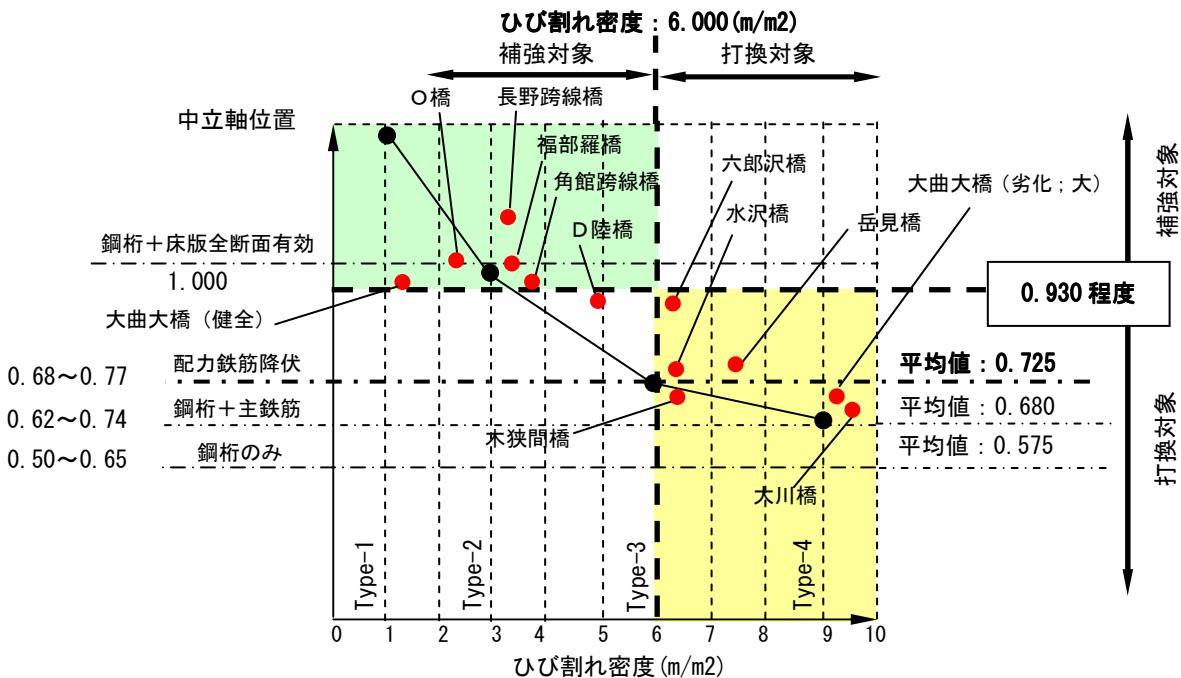


図-4 床版打換え・補強対象となった橋梁の対策前段階でのひび割れ密度と主桁中立軸位置関係図

表-1 秋田県内の合成・非合成桁における床版ひび割れ密度と応力計測により算定された中立軸位置

橋名	橋梁形式	ひび割れ密度 (m/m ²)	中立軸位置 (※1,2)	補強・打換の有無
○橋	非合成桁	2.24	1.027	上面増厚
長野跨線橋	非合成桁	3.34	1.220	上面増厚
角館跨線橋	非合成桁	3.87	0.976	上面増厚
D陸橋	非合成桁	4.88	0.921	上面増厚+ひび割れ注入工
水沢橋	合成桁	6.34	0.805	床版打換
岳見橋	合成桁	7.43	0.814	床版打換
木狭間橋	合成桁	6.35	0.713	床版打換
大川橋	合成桁	9.63	0.692	床版打換
福部羅橋	非合成桁	2.31	1.139	未対応
六郎沢橋	合成桁	6.39	0.927	床版打換
大曲大橋	非合成桁	1.056	0.953	(健全部) 未対応
	非合成桁	9.256	0.712	(劣化; 大) 未対応

※1；中立軸位置とは応力計測により得られた上下フランジひずみ値より算定した中立軸位置と設計上の「鋼桁+床版全断面有効の中立軸位置」の比率を示したものである。

※2；非合成桁においては、合成桁として設計の中立軸を算定し計測結果と比較している。

成桁としての耐荷力性能を確保できる限界の可能性が高いと考えられる。③(Type-3)のひび割れ密度レベル($\alpha = 6.000 (\text{m}/\text{m}^2)$)において配力鉄筋の降伏移行が確認できた。以後の中立軸変動は緩やかになる傾向が確認できた。④(Type-4)は、一般には床版が押し抜きせん断破壊を起こす状況である。この場合の中立軸位置は、設計上の「鋼桁+主鉄筋のみ」の中立軸位置とほぼ同じ位置にあり、床版コンクリート断面の有効性は完全に無い状態であることが確認できた。また(Type-4)のひび割れ状態は、主鉄筋降伏より手前で発生していることが確認で

きた。通常、構造物は自然環境下に位置しており、コンクリート自体の劣化進行を考慮する必要がある。そのため実際の橋梁では、主鉄筋降伏前に押し抜きせん断破壊が発生するものと考えられる。

(2) 実橋梁計測データによるひび割れ密度と主桁中立軸位置の関係

図-4 及び表-1 は、供試体実験結果の考え方を基に秋田県内で実施した床版打換え・補強対象となった橋梁(11 橋梁)の対策前段階でのひび割れ密度と応力計測による主桁中立軸位置関係を整理したものである。「鋼桁

+床版全断面有効の中立軸位置」を「1.000」として、応力計測より得られた上下フランジ歪み値から算定した中立軸位置との比率を整理すると、「①配力鉄筋降伏：0.68～0.77」、「②鋼桁+鉄筋の中立軸位置：0.62～0.74」、「③鋼桁のみ：0.50～0.65」となった。

図-4 の●は、表-1 中に示した各橋梁のひび割れ密度と中立軸位置を示したものである。●は先の破壊試験における Type-1 から Type-4 のひび割れ密度結果をプロットしたものであり、●は非常に近似していることが確認できる。この結果から判断すると、床版打換えを実施した基準は「ひび割れ密度：6.000 (m/m^2) 以上」かつ「中立軸位置：約 0.930 以下」であることが判断できる。これまでに実施した床版打換え判断に対して厳格な調査基準は無く、技術者の判断に任せている状況にあった。従って、ひび割れ密度：6.000 (m/m^2) 以上であっても配力鉄筋が降伏していない橋梁においても床版打換えを実施した状況が窺える。現在、非常に厳しい経済情勢であるため、床版打換えのような大規模工事（高コスト工事）を判断するためにはより明確な基準が必要と考える。

床版打換えのポイントは、ひび割れ密度の観点から判断すると、押し抜きせん断破壊が発生すると道路走行上に支障を來す可能性がある。従って (Type-3) 相当のひび割れ密度 (6.000 m/m^2) 以上をターゲットとすることがポイントとなる。また中立軸位置の観点から判断すると、(Type-3) 相当は先の供試体破壊試験結果において配力鉄筋が降伏する状況にあり、図-4 の結果から判断すると中立軸位置は約 0.725 程度と考えられ、この値より低下する状態が、ひび割れ密度 (6.000 m/m^2) 以上になったとも判断できる。

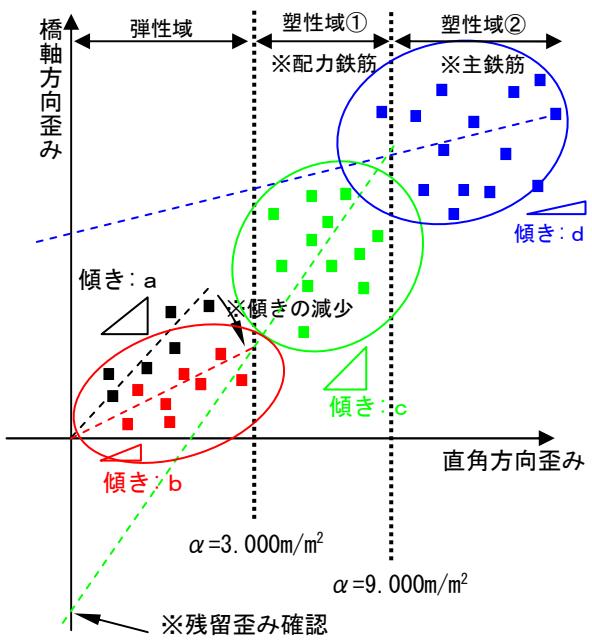


図-5 床版 2 方向歪み分布イメージ図

3.2 床版 2 方向歪みからひび割れ密度の判定

(1) ひび割れ密度と床版 2 方向歪みの関係概要

上述した結果から判断すると、ひび割れ密度 ($6.000 m/m^2$) を超えた段階で、床版打換えを提案することが、合理的と考えられる。しかしながら目視調査におけるひび割れ密度算定には、どうしても“曖昧さ”が含まれてしまう。また近年実施されている橋梁点検結果から明確なひび割れ密度を算定するには精度に難がある。そこで目視調査によるひび割れ密度算定に変わる判定方法として、ランダム走行（通常の走行荷重）に対する床版 2 方向歪み分布を明確にすることで、ある程度のひび割れ密度判定をすることが可能であることが実橋梁の計測結果より判断できた。

計測原理をイメージ化したものが図-5 である。①ひび割れ密度 ($1.000 m/m^2$ 程度) のような主として直角方向にひび割れが発生する場合、発生したひび割れが荷重載荷により幅が開くことで橋軸方向の歪みが増加することが推測される。②ひび割れ密度 : ($3.000 m/m^2$ 程度) までの場合、橋軸方向にもひび割れが発生し、直角方向の歪みが増加するものと推測される。この段階では先の供試体破壊試験結果を参考すると、配力鉄筋の降伏状態には至らないため、荷重除去後、歪みはゼロに戻ると考えられた。従って、この段階までは床版は弾性挙動を示すものと判断できる。③ひび割れ密度 ($3.000 \sim 9.000 m/m^2$ 程度) の場合、ひび割れ密度 ($3.000 m/m^2$ 以上) になると床版撓み最大位置では主鉄筋は弾性挙動をするものの配力鉄筋が降伏域に移行するため、橋軸方向の残留歪みが発生するものと考えられる。また 2 方向歪み値は、ひび割れ密度 ($3.000 m/m^2$ 以下) の場合より増加する傾向が考えられる。④ひび割れ密度 ($9.000 m/m^2$ 以上) の場合、2 方向歪み値は更に増加する傾向が考えられる。ひび割れ密度が大きくなるに従い、主鉄筋が降伏域に移行するため、直角方向の歪み値が増加するものと考えられる。

この図-5 から判断すると、ひび割れ密度と各データから近似される式の傾きにおいて、

- $\sim 1.000 m/m^2$ 程度 傾き : a
- $1.000 \sim 3.000 m/m^2$ 程度 傾き : b ($a > b$)
- $3.000 \sim 9.000 m/m^2$ 程度 傾き : c ($b < c$)
- $9.000 m/m^2 \sim$ 傾き : d ($c > d$)

の関係が確認できるものと推測される。ポイントは①ひび割れ密度 ($3.000 m/m^2$) の変化点として、残留歪みの確認及びその時の近似式の傾き : c の確認が重要となる。

②ひび割れ密度 ($9.000 m/m^2$) の変化点として、近似式の傾き : d の確認及び傾き c と d の大小関係の確認が重要となる。傾き c と d の大小関係を明確にするには、ひび割れ密度 ($3.000 m/m^2$ 以上) の床版に対して、2 方向歪み分布を明確にする計測管理が重要となる。

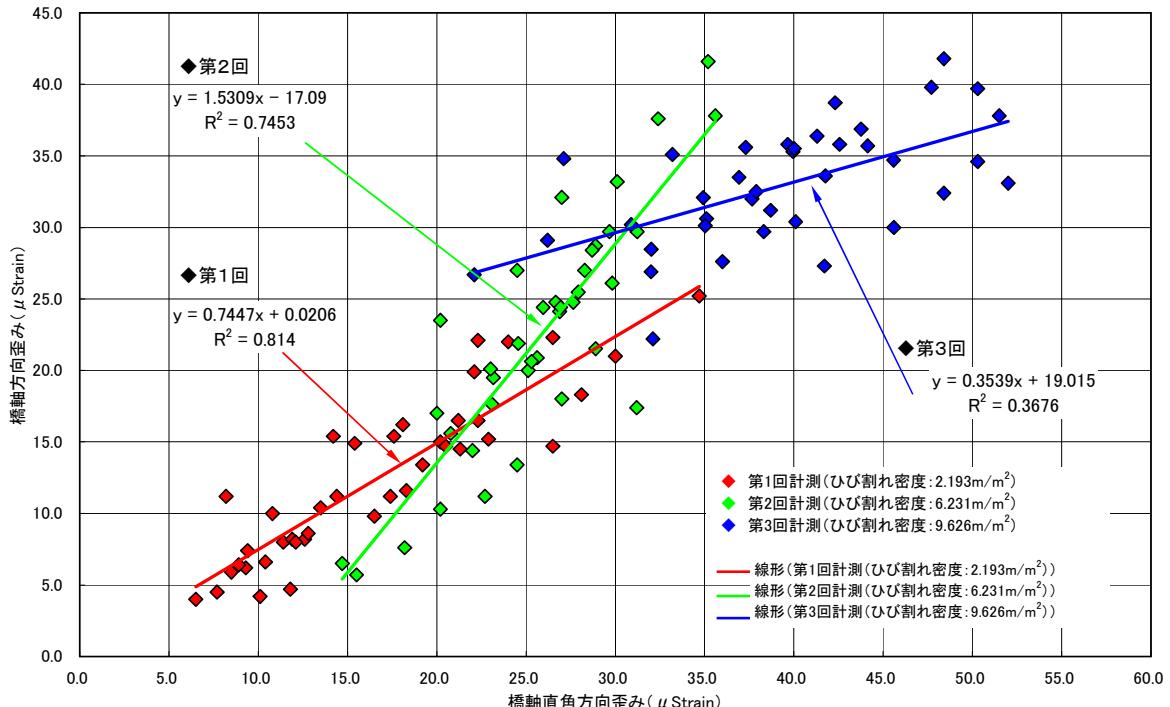


図-6 大川橋における床版2方向歪み分布の経時変化図

(2) 実橋梁計測による確認

①実橋梁検証その1：大川橋

図-6は床版2方向歪み分布図はランダム走行荷重に対する発生歪みをプロットしたものである。歪み計測は第1回計測（ひび割れ密度：2.193m/m²程度）の段階、第2回計測（5年経過後、ひび割れ密度：6.231m/m²程度）の段階、第3回計測（第1回目から7年経過後、ひび割れ密度：9.626m/m²程度）の段階で実施した。大川橋は3主桁の鋼単純合成桁橋であり、計測箇所は支間中央位置で実施した。ひび割れ密度が3.000m/m²以下である第1回計測の近似式は弾性挙動を示しており、X軸との交点はほぼゼロに近似している傾向が確認できた。またひび割れ密度が6.000m/m²程度である第2回計測では、橋軸方向歪みの増加傾向が直角方向より顕著となり、そのため残留歪み（X軸との交点：-17.09）が確認できた。これは配力鉄筋が降伏域に達した影響と考えられる。9.000m/m²以上である第3回計測では、直角方向歪みが増大したことで再度、近似式の傾き値の変化が確認できた。このようにひび割れ密度が3.000m/m²及び6.000、9.000m/m²で近似式の変化点（傾き）が確認できた。以上より、ランダム走行荷重に対する床版2方向歪み分布を管理することで、分布から得られる近似式の傾き変動を管理することが可能と考えられる。このようにひび割れ密度が3.000m/m²及び6.000、9.000m/m²で近似式の変化点（傾き）が確認できた。床版打換えの目安と考えられるひび割れ密度6.000m/m²以上になるには傾き変化が得られるものと考えられた。今回の大川橋での実橋梁検証で、この傾き変化点を把握することが検証され、ある

程度のひび割れ密度を推定することができる判斷できた。

②実橋梁検証その2：大曲大橋

大曲大橋は、同じ径間ににおいて、(1)ひび割れ密度：1.000m/m²以下(2)ひび割れ密度：6.000m/m²程度(3)ひび割れ密度：9.000m/m²以上の3タイプのひび割れ劣化を有している橋梁である。大川橋と同じようにランダム走行荷重に対する床版2方向発生歪みをプロットしたものが図-7である。ひび割れ密度の小さい箇所の方が発生歪みレベルは大きい傾向を示しているが、これは計測箇所が異なるため、主桁の相対撓み差の影響が出ているためである。先の大川橋と同様に、近似式の傾きに着目すると、ひび割れ密度が3.000m/m²以下である第1回計測の近似式は弾性挙動を示しており、X軸との交点はほぼゼロに近似している傾向が確認できた。またひび割れ密度が6.000m/m²程度の箇所では、橋軸方向歪みの増加傾向が直角方向より顕著となり、そのため残留歪み（X軸との交点：-9.45）が確認できた。ひび割れ密度9.000m/m²以上の箇所では、直角方向歪みが増大したことで再度、近似式の傾き値の変化が確認できた。

以上より2橋梁における計測結果から、床版打換えの目安と考えられるひび割れ密度6.000m/m²以上になるには2段階の傾き変化が得られることが確認できた。この傾きを把握することがポイントと考えられる。

4. コンクリート床版打換え判定方法の提案

床版劣化進行を管理するポイントは①劣化進行に伴う鋼桁中立軸位置を管理すること②床版2方向歪みを

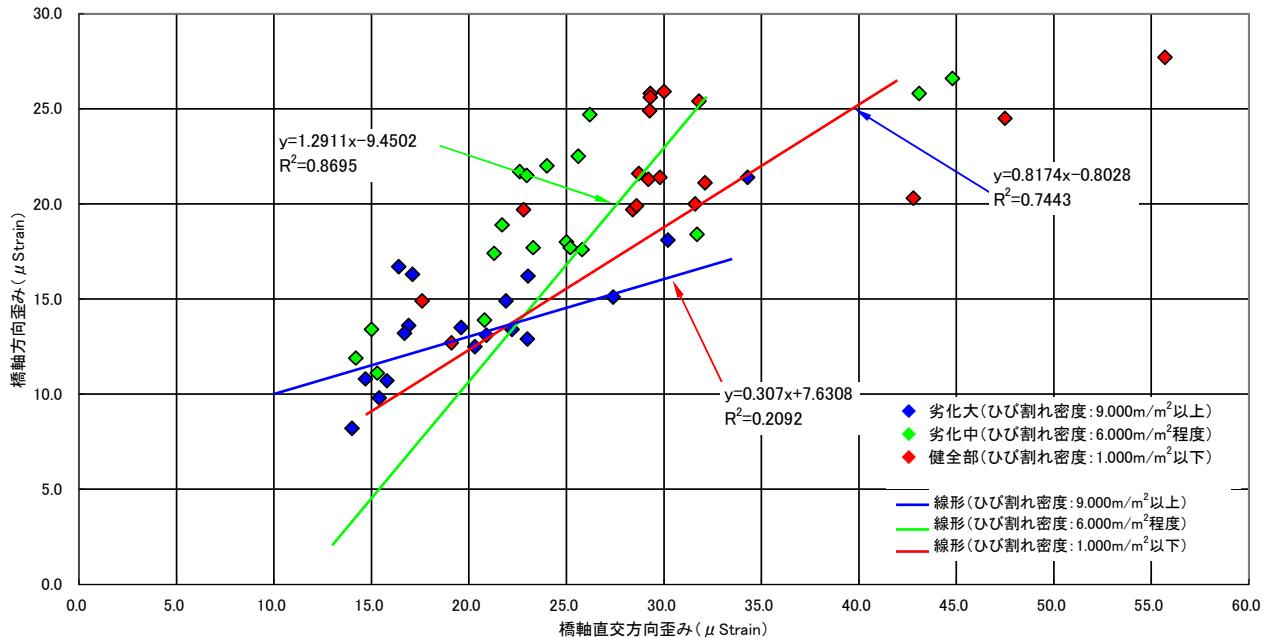


図-7 大曲大橋における床版2方向歪み分布の経時変化図

管理することで床版打換えの目安であるひび割れ密度:6.000m/m²を明確に判断することである。以下に具体的な計測管理方法を提案する。劣化したコンクリート構造物の歪み計測は、通常の歪みゲージを表面に接着した場合、ゲージ長が短いため、ひび割れ間に設置してしまうと構造体としての歪みを評価することはできない。一般にはコンクリート内部の鉄筋に歪みゲージを接着するが、コンクリートをはつる等、構造物を『痛める』傾向となる。対処法としては『長さのある光ファイバー』を用いて、発生しているひび割れを跨ぐ設置方法により構造全体の歪みを評価することが可能となる。光ファイバーによる応力計測²⁾の実績は多数報告されており、今回提案する方法は3本の光ファイバーをより線にて作成したもので、その中を通過する光は、その通路に曲り(マイクロベンディング)があると、その部位で光が外部に漏れ、ファイバー内部を通過する光の強度は減少す

を管理することが可能となり、主桁上下フランジ部(③④)に設置することで中立軸位置を管理することが可能となる。

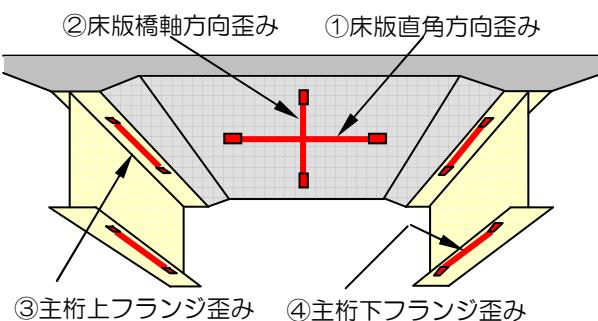
5. 結論

今回の供試体を用いた破壊試験及び実橋梁における応力計測結果から以下のことが検証された。

- (1)コンクリート床版が劣化することで主桁剛性が低下するため、中立軸位置が鋼主桁断面のみの中立軸位置まで移行する傾向が確認できた。
- (2)配力鉄筋が降伏に到達する時の中立軸位置はコンクリート床版を考慮した全断面有効時の中立軸位置を1.000とすると、約0.725に相当し、その時のひび割れ密度は6.000m/m²であることが実橋梁における計測結果から判断できた。
- (3)床版2方向歪み分布から得られる近似式の傾き変化よりひび割れ密度:6.000m/m²を見極めることが可能であることが解明できた。
- (4)以上より、鋼桁の上下フランジ歪み及び床版2方向歪みを定期的に計測することで床版打換え時期を判定することが可能と判断できた。

参考文献

- 1) 前田幸夫・松井繁之:輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol6, pp.221-224, 1984
- 2) 門万寿男、佐藤拓哉:光ファイバセンサによる構造物の長期連続モニタリング、応用力学論文集、Vol6, pp.1-8, 2003.4



る。この原理を用いて光の漏れ量を検出することで、構造物の変形や歪みを計測するセンサーである。センサー設置箇所は、図-8に示すように床版2箇所(①②)に設置することで2方向歪み分布から得られる近似式傾き