

緊張した炭素繊維シートによる RC 中空床版橋の補強効果に関する検討

九州工業大学工学部 正会員 Ph. D. ○幸左賢二
 九州工業大学工学部 工学修士 佐々木誠
 九州工業大学工学部 池田憲司
 新構造技術株式会社 正会員 工学修士 栗根 聡

1. はじめに

都市高速道路には、建設当時から約 30 年を経過する RC 橋梁が増えてきており、年々増加する交通量と車両の大型化にともなう耐力不足、劣化等の損傷が数多く報告されていることから、早急な補強・補強が必要とされている。しかし、損傷状態を十分把握しないままに補修・補強を行うと、本来行うべき補強を怠ったり、適切な量の補強を行えなかったりと、危険であり、経済的にも非効率なものになってしまう恐れがある。

そこで本研究では、供用年数が約 30 年の都市高速道路の中から、最も損傷が著しいと報告されている RC 中空床版橋を対象に、特に激しい損傷が現れているひび割れ損傷に注目して、曲げモーメントとの関係を損傷分析より明らかにする。さらに、損傷分析の結果をもとに、補強工法および効果についての検討を行う。補強工法に関しては、炭素繊維シート接着工法による補修も盛んに行われてきている。しかし、単なるシートの接着のみでは使用状態での補強効果はあまり期待できず、また、シート強度を十分発揮することなく剥離破壊する傾向にあることなどから、シートに緊張力を与えて接着する工法が注目されている。このことから本研究では、RC 中空床版橋をモデルとした梁の下面に、緊張した炭素繊維シートを貼り付けた場合に得られる補強効果を解析的に評価する。

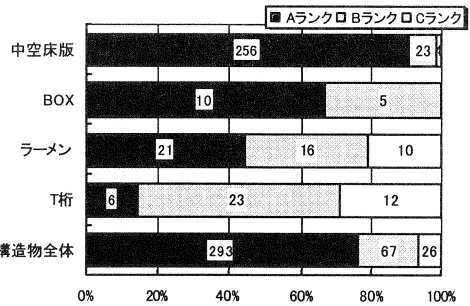


図-1 損傷ランク

2. 損傷分析

2.1 橋梁健全度調査結果および対象橋梁

本研究で対象とした都市高速道路の橋梁健全度調査結果の概要を以下に示す。調査対象橋梁は全体で 667 径間あり、材料別で分けると、RC 橋が 386 径間と全体の 58% を占め、次に PC 橋が 145 径間、鋼橋が 136 径間となっており、非常に RC 橋の多い路線であることがわかる。

表-1 対象橋梁

	径間数	径間長(m)	損傷ランク			
			A	B	C	OK
A高架橋	5	17	5	0	0	0
B高架橋	5	17	4	1	0	0
C高架橋	6	11~16	2	0	3	1
D高架橋	5	18	2	3	0	0
合計	16		8	4	3	1

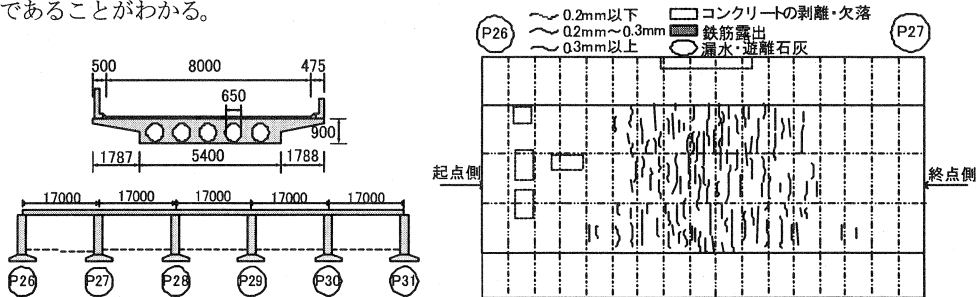


図-2 A 橋全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図

次にRC橋の損傷ランク判定の結果を図-1に示す。損傷ランクはA, B, Cの3段階で区別されており、この中でAランクとは、損傷が著しく早急な補修が必要とされる径間として判定されたものである。RC橋は全386径間中76%にあたる293径間がAランク損傷と判定されている。さらに構造形式別にみると、中空床版橋は、全283径間中90%にあたる256径間がAランクと判定されており、RC橋の中でも特に損傷が著しい構造形式であることがわかる。そこでRC中空床版橋を対象に検討を行った。表-1に選定した評価対象橋梁の損傷ランク別径間数を示す。対象橋梁には、異なったランク判定を受けた橋梁の損傷状態を評価するために、Aランクと判定された径間のみからなる橋梁やBランク及びCランクと判定された径間を含む橋梁などを選んでいく。

2.2 損傷状況の評価方法

損傷の評価方法を検討するため、最も損傷の激しいAランクと判定されたA高架橋を対象橋梁として評価方法を説明する。図-2にA高架橋の全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図を示す。A高架橋は5径間連続RC中空床版橋で、上部工は床版厚さ90cm、支間長17mであり、主鉄筋D32(SD295)を使用している。損傷状況は支間中央部に曲げ耐力不足と思われる幅0.3mm程度のクラックが多数みられ、床版始点部と終点部と中央分離帯付近にコンクリートの剥離・剥落が見られる。評価方法は、図-3に示す検討フローに沿って、損傷度と曲げモーメントの超過率を対応させた評価を行う。

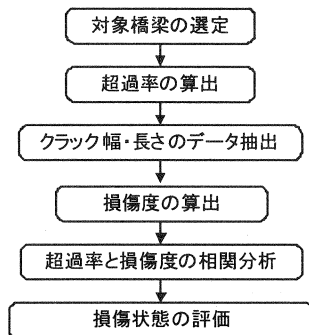


図-3 検討フロー

2.3 曲げモーメント超過率および損傷度の算出

曲げモーメント超過率を式(1)により算出する。

$$\text{超過率} = M(\text{死荷重} + \text{活荷重作用時}) / Ma \quad (1)$$

ここに、M：断面に発生する曲げモーメント

Ma： $\sigma_{ss} = 180\text{N/mm}^2$ 時の曲げモーメント

断面作用力Mの算出は、1本棒におけるフレーム解析によって行っている。解析に用いる活荷重は、設計当時のTL20とは異なり、現行の設計荷重であるB活荷重(TL25)を用いている。Ma算出には鉄筋許容応力度 σ_{ss} を使用し、使用状態での断面耐力の基準とする。式(2)によりクラック損傷度D_cを求める。

$$D_c = \frac{\sum(w \times L)}{w_{\max} \times B \times n_{\max}} \quad (2)$$

ここに、 $\sum(w \times L)$ ：実橋の総クラック面積 (mm²)

B：実橋床版幅 (mm)

w_{\max} ： $\sigma_s = 180\text{N/mm}^2$ 発生時に想定される最大クラック幅 (mm)

n_{\max} ：最大クラック本数

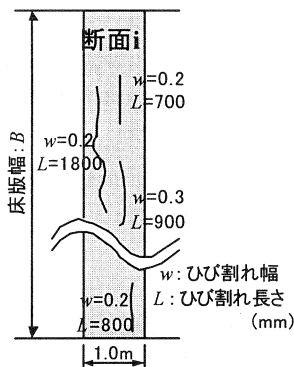


図-4 クラックの評価

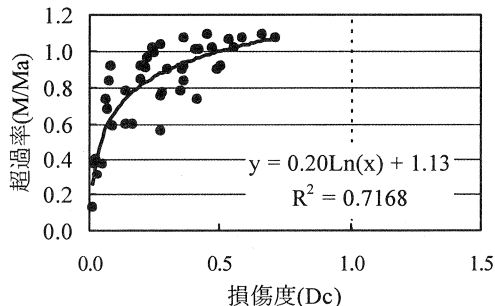


図-5 クラック損傷度 Dc と超過率の相関

$\sum(w \times L)$ は断面iに発生したクラック損傷の幅と長さより求めた面積を足し合わせた総クラック面積である(図-4参照)。損傷度D_cは、土木学会のひび割れ幅算定式を用いて、 $\sigma_s = 180\text{N/mm}^2$ 発生時に想定される最大クラック幅で、最大本数のクラックが床版全幅に発生した時のクラック損傷面積によって総面積 $\sum(w \times L)$ を無次元化したものである。この値を用いることにより、異なる径間の損傷状況を比較することができる。

2.4 損傷状態の評価

求めた損傷度と超過率の相関を図-5 に示す。得られた分布点の近似曲線を引くと、クラック面積による損傷度は断面力超過率が大きいほど、高くなっており、断面力との間に強い相関があることが分かる。他の橋梁についても同様の評価方法を行ない超過率と損傷度の分布点を図-6 に示す。各橋梁によってばらつきはあるものの、損傷度の著しい橋梁はどの対象橋梁からも見られなかった。しかし健全度調査においてAランクと診断された橋梁においては損傷度 $D_c=1.0$ に近い大きな値を示しており、また、それらの多くの橋梁において、すでに許容ひびわれ幅を上回るひび割れが多数発生していることから、損傷を制御するための早急な補修・補強対策が必要であると考えられる。

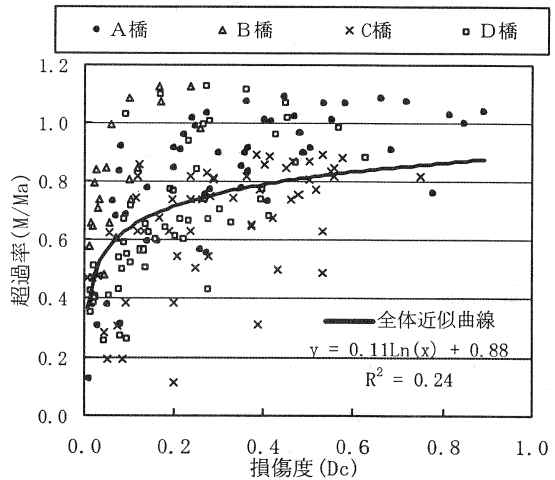


図-6 各橋梁の相関図

表-2 補強効果の計算条件

補強工法	補強条件の詳細
炭素繊維シート	高強度炭素繊維シート1層(目付200g/m ²) 床版下面充実部に全面接着
プレストレス導入1	外ケーブル緊張量1124kN (下面縁応力度1N/mm ²)
プレストレス導入2	外ケーブル緊張量2293kN (下面縁応力度2N/mm ²)

3. 対象橋梁の補強工法の検討

今回の検討の対象としている RC 中空床版橋のひび割れ損傷にはボイド部までひび割れが貫通したものなどもあり、ひび割れ注入だけでは十分補えない状態となっている。また、耐力的な改善を行わない限り、今後さらにひび割れが開口して行くことも考えられることから、長期的な維持管理を考慮した場合、耐力を増強させる補強対策の必要がある。

これまでに、損傷を受けた RC 床版を対象とした補修・補強による維持管理対策にはさまざまな工法が用いられてきている。一般的に採用されてきたものとして下面打替工法、下面増圧工法、鋼板接着工法、外ケーブル工法などが挙げられる。さらに近年では、軽量でありかつ高強度で、施工性にも優れた炭素繊維シート接着工法が頻繁に用いられるようになってきている。

そこで、炭素繊維シート接着補強工法に注目し、本研究の対象となっている都市高速道路のRC中空床版橋のうち25径間を対象に、炭素繊維シート接着工法を用いて補強した場合と、外ケーブル工法により補強した場合で補強効果の違いを断面計算によって比較することにより、使用状態における補強効果がどの程度あるかを検討した。表-2に断面計算に用いた補強工法の詳細を示す。炭素繊維シート接着工法においては、床版下面全面に目付量 200g/m²の高強度炭素繊維シートを1層補強したケースで計算を行い、プレストレス導入ケースにおいては、緊張量を下縁応力度が1N/mm²もしくは2N/mm²となる2ケースのプレストレス力を軸力および曲げモーメントをそれぞれ与えた。断面計算により、各補強工法とも補強後に活荷重(TL-20)を載荷させた場合に発生する引張主鉄筋の応力度と、無補強の場合に発生する主鉄筋応力度との差から、主鉄筋応

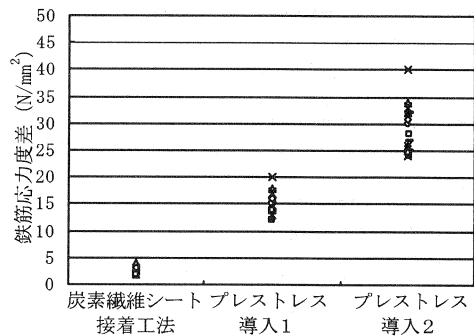


図-7 補強工法による補強効果の比較

力度の低減量を求めた。その算出結果を図-7に示す。軸力を導入しない炭素繊維シート1層を補強したケースに比べて、プレストレス導入ケースでは、鉄筋応力度の大幅な低減効果が確認できる。このことから、曲げ耐力補強に対して、プレストレスの導入には非常に効果が高いと言える。

以上より、炭素繊維シートを緊張接着し、シート自体にプレストレスを導入すれば、曲げ耐力の増加に対して有効になるとともに、ひび割れの制御効果や、使用状態における剛性の回復など外ケーブル工法と同様の効果が期待されていることから、本検討では、炭素繊維シートの緊張接着工法を選定した。

4. 補強工法の解析的検討

4.1 解析概要

炭素繊維シートに緊張力を導入した場合の補強効果の検討を行うため、FEMによる2次元弾塑性解析を行った。実橋の床版をモデル化した場合、要素数が増え、解析に膨大な時間を要するため、本解析ではA高架橋第一径間の中央部の断面を対象に、圧縮および引張鉄筋比をそれぞれ一致させてスケールダウンし、RC中空単純梁に置き換えてモデル化した。梁の断面は床版の隣り合うボイドに挟まれた充実部分とし、ボイド1個分の中空断面を梁の側面の奥行きを変化させることによって表現し、図-8に示すような解析モデルを用いた。

解析のケースを表-3に示す。無補強のケースをN、補強したケースをFとし、シート層数および緊張量をパラメータとした計7体のモデルに関して解析を行った。載荷条件としては、シートに緊張力を導入するケースF1-1, 2および、F2-1, 2に関しては、初期条件として炭素繊維シートの各要素に引張応力を与え、その後、鉛直方向に強制荷重を与えた。

4.2 解析モデル

解析で適用した要素特性としては、コンクリートおよび炭素繊維シートには平面応力要素、鉄筋にはトラス要素を用いた。鉄筋とコンクリートは完全付着とし、コンクリートと炭素繊維シートの界面付着モデルは図-9に示すようにシートとコンクリートの剥離破壊を考慮しない弾性モデルとしている。表-4にコンクリート、鉄筋および炭素繊維シートの材料特性を示す。

表-3 解析ケース

供試体case	シート枚数(層)	緊張応力(N/mm ²)
N	0	-
F1-0	1	0.0f _r 0
F1-1	1	0.3f _r (1020)
F1-2	1	0.5f _r (1700)
F2-0	2	0.0f _r 0
F2-1	2	0.3f _r (1020)
F2-2	2	0.5f _r (1700)

f_r: シート破断強度 3400N/mm²

表-4 材料特性

材料	特性	特性値
コンクリート	弾性係数E _c (N/mm ²)	28000
	引張強度f _c (N/mm ²)	2.1
	圧縮強度f _c (N/mm ²)	28
	ポアソン比	0.2
鉄筋	弾性係数E _s (N/mm ²)	210000
	引張強度f _s (N/mm ²)	295
	降伏ひずみε _s (μ)	1405
	ポアソン比	0.3
炭素繊維シート	弾性係数E _t (N/mm ²)	230000
	破断強度f _t (N/mm ²)	3400
	破断ひずみε _t (μ)	14700
	ポアソン比	0.4
	目付量(200g/m ²)	200
	厚さ(mm)	0.167

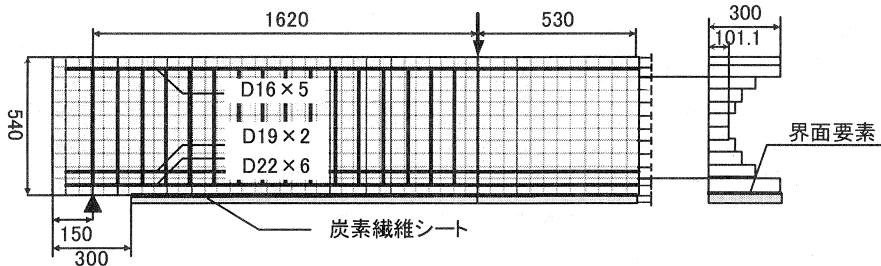


図-8 解析モデル要素分割図および断面奥行き方向説明図

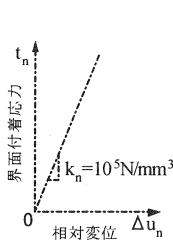


図-9 コンクリートとシートの
界面応力度—相対変位関係

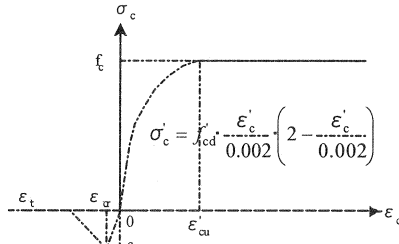


図-10 コンクリートの
応力度—ひずみモデル

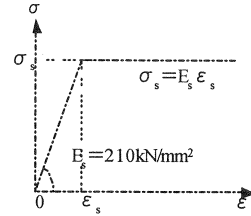


図-11 鉄筋の
応力度—ひずみモデル

各材料の降伏基準としては、コンクリートの圧縮域には、Drucker-pragarの降伏基準を、引張域には最大主応力基準を用いた。また、鉄筋には Von-Misesの降伏基準を用いた。なお、ひび割れモデルには、要素内に均等にひび割れが生じると仮定した分布ひび割れモデルを用いた。図-10 に解析に用いたコンクリートの応力—ひずみ関係、図-11, 12 にはそれぞれ鉄筋および炭素繊維シートの応力ひずみ関係を示す。

4.3 解析結果

まず、炭素繊維シート要素に初期緊張力を導入することによって、コンクリートと炭素繊維シートの界面に発生した水平せん断応力の分布状態としてケース F1-2 の結果を図-13 に示す。各シート要素への緊張力導入により、シート端部に近づくにつれて大きな界面水平せん断応力が発生していることがわかる。他の緊張力を導入したケースに関しても同様の傾向が確認されている。次に、補強量および緊張力をパラメータとした各検討ケースの解析結果として、図-14 に荷重—変位関係を示す。補強ケースに関しては、シートが破断するまでの挙動を示している。この図より、無補強のケース N に比べ、すべての補強ケースにおいて初降伏荷重後の耐力が増加していることがわかる。また、主鉄筋の降伏以前においては、緊張を与えないケース F1-0, F2-0 はほとんど同じ勾配を示しているが、緊張を与えたケース F1-1, 2 および F2-1, 2 では緊張を増すにつれて、それぞれ剛性が高くなっていることがわかる。表-5 に示す各ケースの初期ひび割れ発生時、初降伏時、終局時の載荷荷重から、初期ひび割れ発生荷重 P_c は、無緊張ケースと無補強ケースではほぼ同一荷重であるのに対して、緊張したケースでは載荷荷重が大幅に上がっており、ひび割れの制御効果が見られる。さらに、初降伏荷重 P_y においても、無緊張ケースの荷重増加分に比べると、シート緊張ケースでは 30~50% 程度の大幅な増加が見られる。

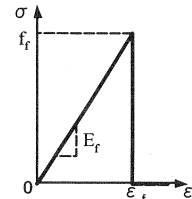


図-12 炭素繊維シート
の応力度—ひずみモデル

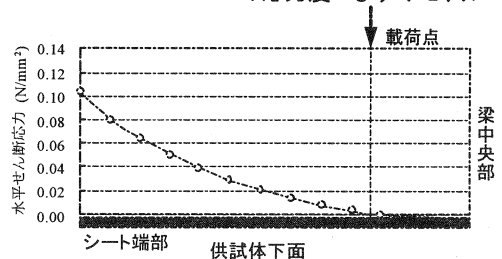


図-13 緊張力の導入による
付着界面の水平せん断応力 (F1-2)

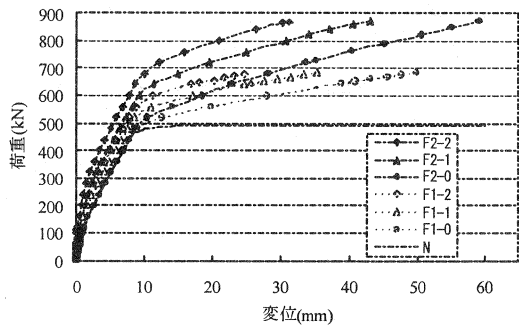


図-14 荷重—変位曲線

表-5 解析結果

検討ケース	初期ひび割れ発生荷重 P_c (kN)	初降伏荷重 P_y (kN)	終局荷重 P_u (kN)
N	77	456	470
F1-0	78	520	685
F1-1	130	610	685
F1-2	157	600	685
F2-0	79	520	875
F2-1	180	630	875
F2-2	237	710	875

4.4 解析による緊張力導入効果の評価

解析結果の詳細に関して検討する。図-15 にシート 2 層を補強したケース F2 と無補強ケース N の梁中央部下の引張主鉄筋の荷重-ひずみ関係を示す。緊張力を導入したケースでは、シートの緊張効果により荷重載荷開始時には鉄筋に圧縮ひずみが発生しており、緊張力の増加につれて鉄筋の降伏を遅らせていることがわかる。

また、同一荷重で各検討ケースに発生している引張主鉄筋応力度の比較を行うため、無補強ケース N の初降伏荷重 $P=456\text{kN}$ における引張鉄筋応力度と緊張量の関係を図-16 に示す。図より無補強ケース N に比べ、補強量および緊張量が増すにつれて鉄筋応力度の負担が低減されており、特にケース F2-2 においては、無補強ケース N の場合の 1/2 程度にまで抑えられている。

図-17 にシート 2 層を補強したケース F2 の梁中央部におけるシートの荷重-ひずみ関係を示す。緊張力導入ケースの F2-1 と F2-2 では、緊張力導入後からのひずみの挙動を示している。図より、何れのケースにおいても主鉄筋降伏荷重に達すると、急激にシートのひずみが伸びており、炭素繊維シートが耐力を負担していることが分かる。また、無緊張ケース F2-0 では、シートのひずみが破断ひずみ 14700μ の 1 割にも満たない 1000μ 程度に達した状態ですでに主鉄筋が降伏しているのに対して、緊張力を導入したケース F2-1 では、主鉄筋が降伏するまでに、破断ひずみの約 50%、F2-2 では約 60% のひずみがシートに発生しており、鉄筋が降伏するまでの使用状態において炭素繊維シートの能力が十分に発揮されていることがわかる。さらに、主鉄筋の降伏後も最大荷重まで、シートひずみに余裕を持った状態となっており、初期緊張力が最大耐力に影響を与えない結果が得られた。

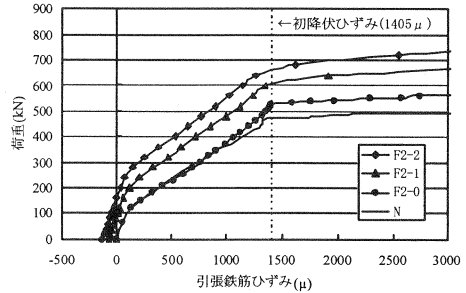


図-15 荷重-引張鉄筋ひずみ曲線 (シート 2 層補強ケース)

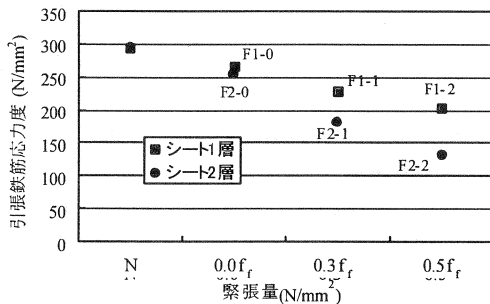


図-16 ケース N の降伏荷重 ($P=456\text{kN}$) での引張主鉄筋応力度の比較

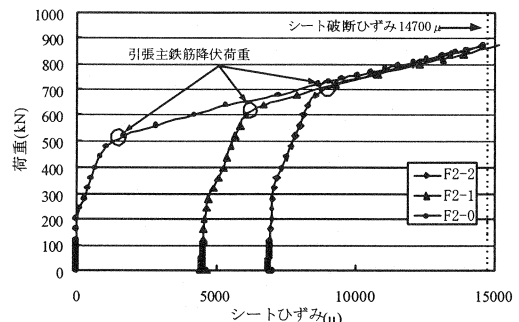


図-17 荷重-シートひずみ関係 (シート 2 層補強ケース)

5. まとめ

以上より今回得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 損傷分析の結果、超過率と損傷度の相関により、対象橋梁のひび割れ損傷は曲げ作用力の影響によるものである事が分かった。さらに、橋梁ごとの損傷を数値で表すことにより損傷程度を相対的に評価できた。
- (2) 緊張力を導入することにより、炭素繊維シートの材料特性が有効に発揮され、引張主鉄筋の応力の負担を大幅に低減できることがわかり、対象橋梁に対して効果的な補強を行うことができると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編、2002.3
- 2) 幸左賢二, 北原秀樹, 小郷政弘, 荒木茂：RC 中空床版橋の損傷要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1841-1846, 2003