

論文 RC 中空床版橋に生じたクラック損傷の評価方法

佐々木 誠*¹・幸左 賢二*²・岡 弘幸*³・小郷 政弘*⁴

要旨：本研究では、特に著しい損傷が報告されている RC 中空床版橋を対象に、クラック損傷と断面力との関係について評価方法を検討した。その結果、クラック損傷と断面力を損傷度 D_c と超過率 M/Ma で評価することにより相関性がみられた。 D_c が 0.5 以下では M/Ma に関係なく損傷は軽微であり、 D_c が 1.0 程度になるものは、 $M/Ma=0.8$ 程度で 0.2mm 以下のクラックが多数発生する定常状態相当の損傷となり、 M/Ma が増加するとクラック幅が増加していく傾向となった。

キーワード：RC 中空床版橋，クラック損傷，超過率，定常状態

1. はじめに

わが国では、建設されてから 30 年を経過する橋梁が増えてきており、コンクリート橋の損傷状況が報告されている。これらの橋梁の損傷要因は、橋梁自体の老朽化、塩害、中性化そしてアルカリ骨材反応などによる耐久性の低下と、荷重の増加による耐荷力不足ということが考えられる。耐荷力不足は、道路構造令の改定に伴う活荷重の増大などにより、設計時に考慮した状態より厳しい供用状況にあると考えられる。

本研究では、供用年数約 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、コンクリートの剥離・剥落、鉄筋露出、漏水・エフロレンスおよびクラック発生などの損傷項目の中から、クラック損傷に注目して、曲げモーメントとの関係を明らかにする。また、クラック損傷状態をクラック本数が増加しないと考えられる定常状態を基準に評価すると共に、クラック損傷と曲げモーメントの相関から、各橋梁の損傷状態をランク付けする指標を提案する。

2. 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。

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。

そこで損傷分析の対象構造形式として RC 中空床版橋を選び、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

*¹九州工業大学 工学部建設社会工学科 工修 (正会員)

*²九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*³福岡北九州高速道路公社 保全部

*⁴ (株) 構造技術研究所 代表取締役社長

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。

3. 代表的な橋梁の損傷状況と評価方法

損傷状態の評価方法を検討するために、代表としてE橋を用いて損傷分析を行う。評価方法は、図-2に示す検討フローに沿って行う。

3.1 E橋の損傷状況

図-3にE橋の全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図を示す。E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。

3.2 曲げモーメント超過率の算出

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 : $\sigma_{sa} = 180\text{N/mm}^2$ 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_{sa} を使用し、使用状態での断面耐力の基準とする。

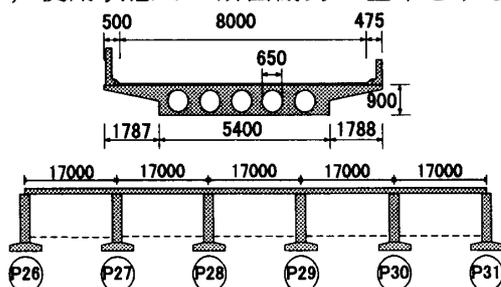


図-3 E橋全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図

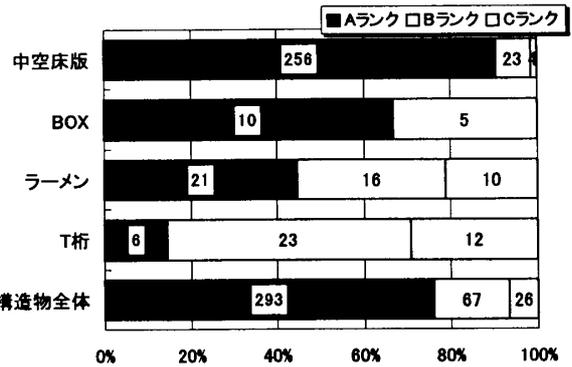


図-1 損傷ランク

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	4	1	0	0
B高架橋	5	18	5	0	0	0
C高架橋	6	11~16	2	0	3	1
D高架橋	5	18	2	3	0	0
E高架橋	5	17	5	0	0	0
合計	26		18	4	3	1

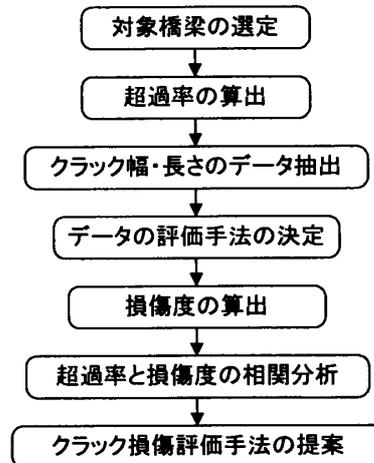


図-2 検討フロー



3.3 損傷状態評価方法

対象橋梁のクラック損傷が、橋軸直角方向にのみ発生していることから、損傷は図-4に示すように、床版下面を橋軸方向に1m間隔に区分した断面*i*ごとに損傷度として表し、曲げモーメントの超過率と対応させた評価を行う。

(1) クラック間隔による評価

式(2)によりクラック損傷度 D_1 を求める。

$$D_1 = l_{\max} / l_{\text{ave}} \quad (2)$$

ここに、

l_{\max} : コンクリート標準示方書から求められる最大クラック間隔 (mm)

l_{ave} : 実橋のクラック間隔 = $1000/n$ (mm)

l_{ave} の求め方を以下に示す (図-4(a)参照)。床版下面を橋軸方向に1.0m間隔で区分した断面*i*の中で、さらに橋軸直角方向にも等間隔(0.5m)に m 本線分を引き、これを線分 j とする。線分 j と交わったクラックの交点数 (n) を求め、断面*i*間の線分 j の長さ(1.0m)を交点数で除した値を断面*i*の平均クラック間隔 l_{ave} として評価する。

クラック間隔による損傷度 D_1 と超過率の相関を図-5に示す。近似曲線は、プロットされた点の傾向を精度良く示すために、最も相関係数の高い対数曲線を用いた。近似曲線は、超過率が上がるにつれて損傷度も高くなっていることから D_1 と超過率には相関があることが分かる。また、 D_1 が1.0に近づくと、クラック間隔は定常状態に近づくことを意味し、クラック間隔は狭くなる。近似曲線より超過率が1.0に近づくと、 D_1 も1.0に近い値となることから、断面力が大きくなるほどクラック間隔が狭くなると考えられる。

(2) クラック幅による評価

式(3)によりクラック損傷度 D_{wn} を求める。

$$D_{wn} = \frac{\sum w}{w_{\max} \times n_{\min} \times m} \quad (3)$$

ここに、

$\sum w$: 実橋の総クラック幅

w_{\max} : コンクリート標準示方書から求められる

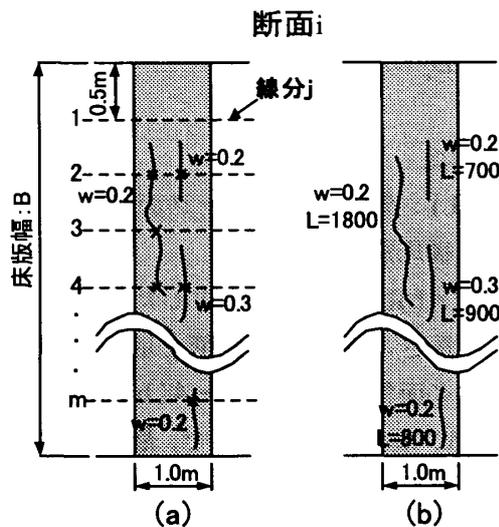


図-4 クラック評価

る最大クラック幅

n_{\min} : 定常状態時に1m間に発生するクラック本数

m : 線分 j の本数

$\sum w$ は断面*i*の中で、線分 j と交わったクラックの幅を足し合わせた総クラック幅である。最大クラック幅 w_{\max} 算出時の σ_s は、 M_a を算出する際に利用した 180N/mm^2 を用いる。E 高架橋の w_{\max} は 0.266mm であり許容ひび割れ幅 0.242mm とほぼ一致している。1m間に発生するクラック本数 n_{\min} は、式(4)に示すように最大クラック間隔より求める。

$$n_{\min} = 1000 / l_{\max} \quad (4)$$

超過率と D_{wn} との相関図を図-6に示す。図-5と同様に近似曲線を算出すると、クラック間隔による評価と同様に、クラック幅は断面力が大きいほど、損傷が激しくなっていることが考えられる。また、式(3)より損傷度 D_{wn} は D_1 に幅の要素を加えた評価方法であることが分かる。よって D_{wn} は、クラック幅の大小により強弱がつけられるため、 D_1 と比較すると近似曲線がほぼ一致しているのに対し、相関係数が低く、損傷度が分散していることが分かる。

(3) クラック損傷面積による評価

式(5)によりクラック損傷度 D_c を求める。

$$D_c = \frac{\sum (w \times L)}{w_{\max} \times B \times n_{\min}} \quad (5)$$

ここに、

$\Sigma(w \times L)$: 実橋の総クラック面積

B : 実橋床版幅

$\Sigma(w \times L)$ 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(b)参照)。損傷度 D_c は、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 $\Sigma(w \times L)$ を無次元化したものである。

これより求めた損傷度と超過率の相関を図-7に示す。これまでの評価方法と同様に近似曲線を引くと、クラック面積による損傷度は断面力が高いほど、高くなっていることが考えられる。

D_{wn} と D_c の評価方法を比較すると以下のことが言える。 D_{wn} は、橋軸直角方向 0.5m 間隔でクラックを評価しているものであるが、 D_{wn} と D_c の評価式から、 D_{wn} は m を増やすことで D_c の評価に近づき、線分 j の間隔を微小にし、積分して算出することで D_c と同じ評価になることが考えられる。よって、 D_{wn} では評価できない各線分間に存在する短いクラックの評価が D_c で可能となるため、図-6と図-7を比較すると、 D_c と D_{wn} の相関曲線はほぼ一致しているが、 D_c の方が高い相関係数となっている。よって RC 中空床版橋の損傷状態は、クラック損傷面積を用いることにより、より精度よく評価することができる。以下、その他の対象橋梁に関しても損傷度 D_c の評価方法を用いて検討を行う。

4. 対象橋梁検討結果

表-1 の対象橋梁全体の損傷度と超過率の関係と、各橋梁別の近似曲線を図-8に示す。

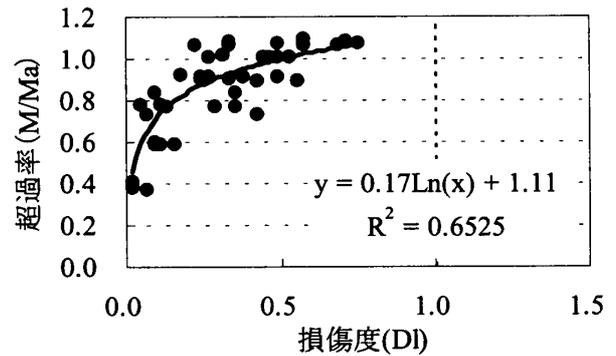


図-5 損傷度 D_1 と超過率の相関

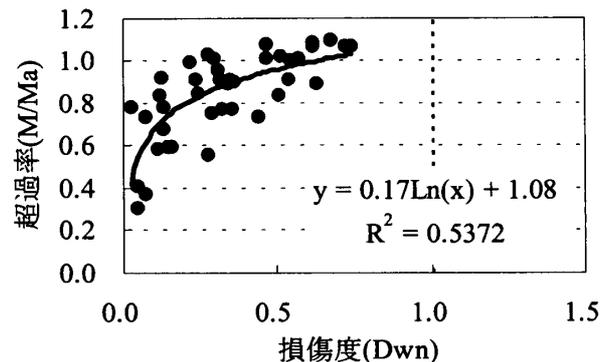


図-6 クラック幅と超過率の相関

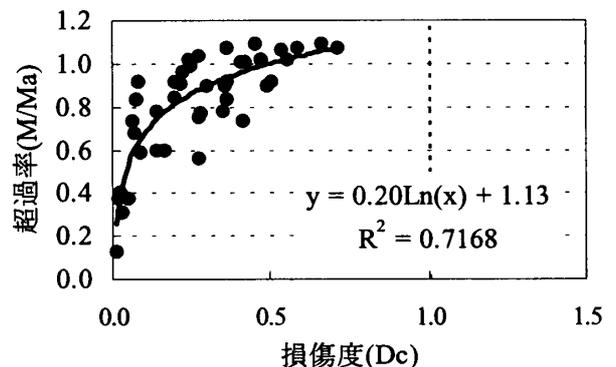


図-7 クラック損傷面積と超過率の相関

ただし、B橋とC橋は同じ傾向を示しているためC橋のみ示すこととする。

4.1 最大損傷度の比較

損傷度の最大値の違いについて考察する。図-8の近似曲線より、A橋は D_c の最大値が 0.3 程度であるが、他の橋梁は $D_c=0.6 \sim 0.9$ 付近まで損傷度が存在している。これは、図-3, 10, 11 の損傷図からもわかるように、A橋は比較的損傷が軽微な橋梁であると考えられる。また、図-9よりA橋のクラックはすべて 0.2mm 以下となっている。このように損傷度が軽微な状態を損傷ランク 1 とする。

4.2 超過率の比較

$D_c=1.0$ 付近まで損傷度が存在している C, D, E 橋の超過率に着目して考察を行う。

(1) C 橋について

$M/Ma=0.8$ 程度となる C 橋は、図-9 から分かるように、0.2mm 以下のクラックが 90% 程度を占めており、また、近似曲線の傾向を同様とした B 橋と同じような割合となっている。図-11 の損傷図から分かるように、細かいクラックが多数入っている。C 橋はクラックの本数が多数発生しているが、クラック幅は許容クラック幅以下の 0.2mm 以下であることから、クラック本数が一定となる定常状態に近いと考えられる。このような損傷状態を損傷ランク 2 とする。

(2) D 橋について

$M/Ma=0.9$ 程度となる D 橋は、図-9 から分かるように、0.2~0.3mm のクラック幅が約 90% を占めていることから、定常状態を超え、荷重によりクラック幅が進展していく状況であると考える。これは、C 橋より損傷状態が進んでいると考える。

(3) E 橋について

$M/Ma=1.0$ 程度となる E 橋は、図-9 から分かるように、クラック幅の分布は 0.2~0.3mm が 70%、その他は 0.3mm 以上となっている。これは、D 橋に比べさらに損傷が進んだ状態と考えられ、0.3mm を超えるような有害なクラックが発生していると考えられる。このような損傷状態を損傷ランク 3 とする。

以上の考察より、相関図における損傷ランクをまとめたものを図-12 に示す。

D_c が 0.5 に満たないような橋梁は、定常状態に達していない損傷状態と考えられ、軽微な損傷状態といえる。 D_c が 0.5 を超え 1.0 付近まで存在する橋梁は、 M/Ma の値によって損傷状態が異なると考えられ、 $M/Ma=0.8$ 程度でクラック本数が増加しない定常状態に達した損傷と考えられる。また、 M/Ma が増加するにつれてクラック幅が増加していく傾向があ

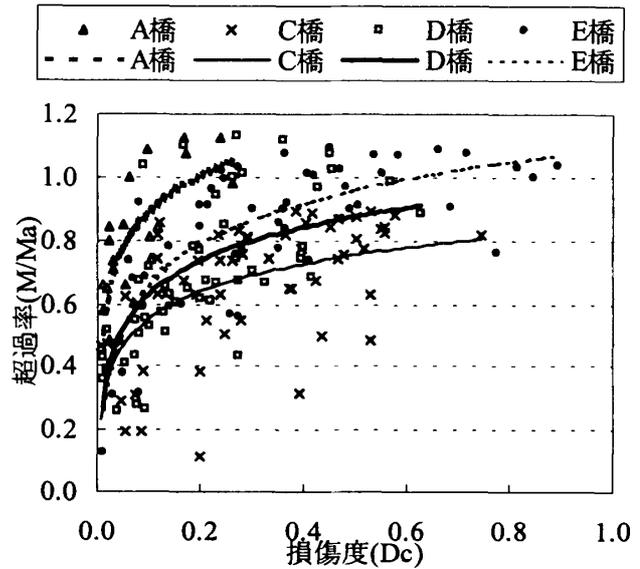


図-8 各橋梁の相関図

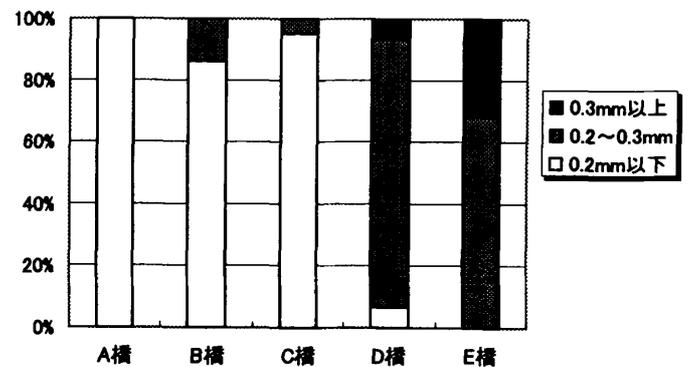


図-9 橋梁別クラック幅分布

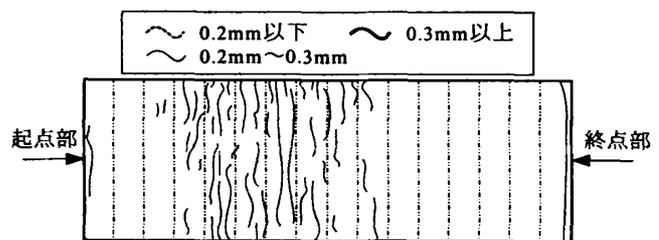


図-10 A 橋損傷図

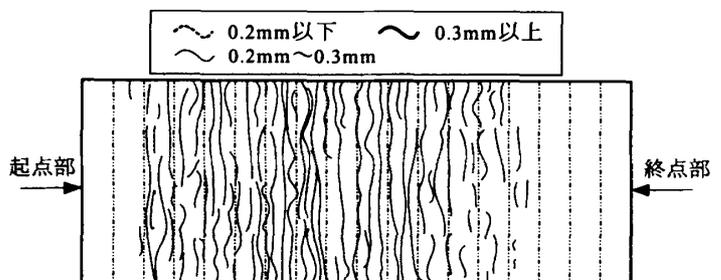


図-11 C 橋損傷図

る。よって、 $D_c=1.0$ に近い損傷かつ $M/Ma=0.8$ を超えるような橋梁は、D, E 橋のように 0.2mm を超えるような有害なクラックが発生

すると考えられ、補修・補強対策が必要であるとされる。

5. RC 中空床版橋の特徴

RC 中空床版橋は、版内を中空にして自重を軽減し、充実床版橋と T 桁橋の中間的な構造と考えられる。力の伝達方向は、図-13 に示すように充実床版橋は 2 方向に力が伝達され、版として全体に力が分配される。しかし、中空床版橋は床版内にボイドが存在することから、力の伝達方向は、橋軸方向の 1 方向が主な力の伝達方向と考えられ、橋軸直角方向への荷重分配効果が小さいと考えられる。

また、中空床版橋の荷重伝達のイメージを図-14 に示す。これより、中空床版橋はボイド上に荷重がかかると、充実部を通じて床版下面方向に荷重が伝達される。それにより、ボイド下面は荷重がほとんど伝達されないため、充実部を T 桁で評価した方が実構造に近いと考えられる。実際、断面計算を行う時もボイド部を無視した T 断面で行っている。

検討対象橋梁の中空床版橋は、設計断面力に版理論による断面力を用いている。他の充実床版橋も同様に、版理論による断面力を用いて設計をしている。しかし、対象路線内の充実床版橋は、中空床版橋のような著しい損傷はない。これは中空床版橋特有な傾向であると考えられ、設計断面力評価の検討が必要であるとする。

6. まとめ

(1) 損傷と断面力の関係は、クラック損傷をクラック面積で評価し、定常状態相当のクラック面積で無次元化した損傷度と、断面力は、発生断面力を鉄筋応力度 $\sigma_s=180\text{N/mm}^2$ 発生時の断面力で無次元化した超過率を用いた。損傷度と超過率により、損傷と断面力の相関性が評価できた。

(2) D_c が 0.5 以下になるような橋梁は、超過率に関係なく、損傷が軽微であると考えられる。

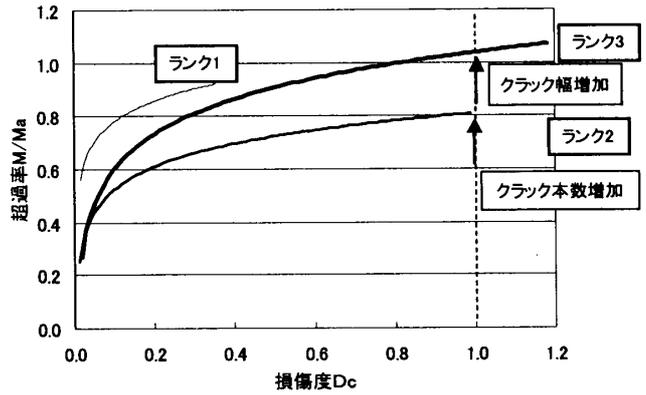


図-12 損傷ランク

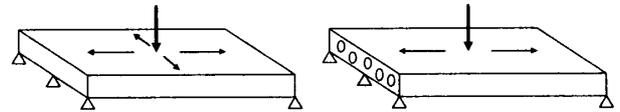


図-13 力の伝達方向

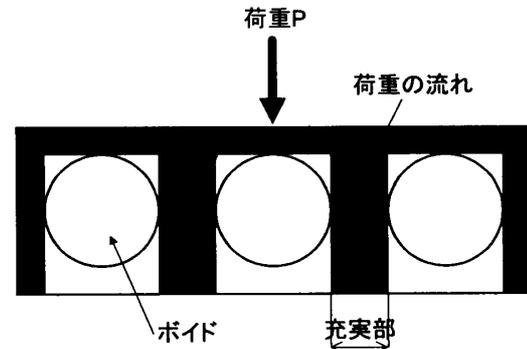


図-14 中空床版の荷重伝達イメージ図

(3) D_c が 1.0 程度になる橋梁は、 $M/Ma=0.8$ で損傷が著しくなると考えられることから、このような損傷を防ぐために、引張鉄筋の許容応力度を設計値の 8 割程度 (150N/mm^2) として設計するとよい。また、中空床版橋の設計断面力の評価方法を検討した方がよいと考えられる。

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，pp.100～102，2002.3
- 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