

論文 RC 中空床版橋の損傷要因分析

幸左賢二*¹・北原秀樹*²・小郷政弘*³・荒木茂*⁴

要旨：旧基準によって設計された道路橋の床版には、供用年数の長期化に伴う耐久性の低下や車両の大型化、交通量の増加に伴う耐力不足等による損傷が発生している。そこで本研究では、特に著しい損傷が報告されている実橋梁の RC 中空床版橋を対象として損傷要因分析を行った。損傷要因分析では、損傷の種類を分類し、耐力不足等の損傷要因を特定することにより、実際の損傷との関係を明らかにした。また、その中で、クラック損傷と曲げ耐力不足の關係に着目し、RC 中空床版橋について補強対象橋梁を選定するための指標を提案した。

キーワード：RC 中空床版、損傷要因分析、耐力不足、超過率

1. はじめに

我が国では、昭和 30 年代から始まった道路交通網の整備により多くのコンクリート橋梁が建設されてきた。しかし、建設時から数十年経過した現在では、平成 5 年 11 月の道路構造例の改正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も厳しい供用状況にある。そのうえ、橋梁自体の老朽化や周辺環境の変化に伴い、構造物の疲労耐久性の低下と塩害や中性化、アルカリ骨材反応など自然環境劣化が相乗し、早急に何らかの維持管理対策が必要な橋梁が増えてきている。

このような状況の中、旧基準により設計された道路橋の床版には、実際に耐力不足と考えられる損傷や供用年数の長期化に伴う損傷が発生している。その中でも RC 中空床版橋に著しい損傷が報告されている。主な損傷は、橋軸直角方向のクラックやコンクリートの剥離・欠落、鉄筋露出、漏水・遊離石灰の発生などである。

本研究では、供用年数約 30 年の都市内高速道路橋の中から RC 中空床版橋を対象に損傷要因分析を行い、耐力不足等などの損傷要因

と実際の損傷との関係を明らかにすることを目的とする。具体的な検討対象橋梁として、RC 中空床版橋の中から、比較的損傷の多い 5 径間連続橋(A 高架橋)と比較的損傷の少ない 6 径間連続橋(B 高架橋)、および損傷が多い単純橋(C 高架橋)の 3 橋を選定する。

本文では、これらの損傷要因分析結果について述べるとともに、補強対象橋梁を選定するための指標を提案する。

図-1 に検討フローを示す。

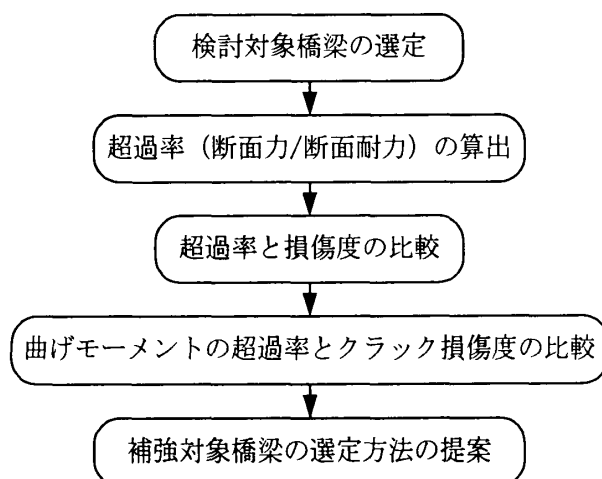


図-1 検討フロー

*¹九州工業大学 工学部建設社会工学科 Ph.D (正会員)

*²九州工業大学 工学部建設社会工学 (正会員)

*³㈱構造技術研究所 代表取締役社長

*⁴九州工業大学工学部 工学部建設社会工学科

2. 検討対象橋梁と損傷状況

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 径間連続の RC 中空床版橋の高架橋で、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、床版起点部と終点部と中央分離帯付近にコンクリートの剥離・欠落が見られる。

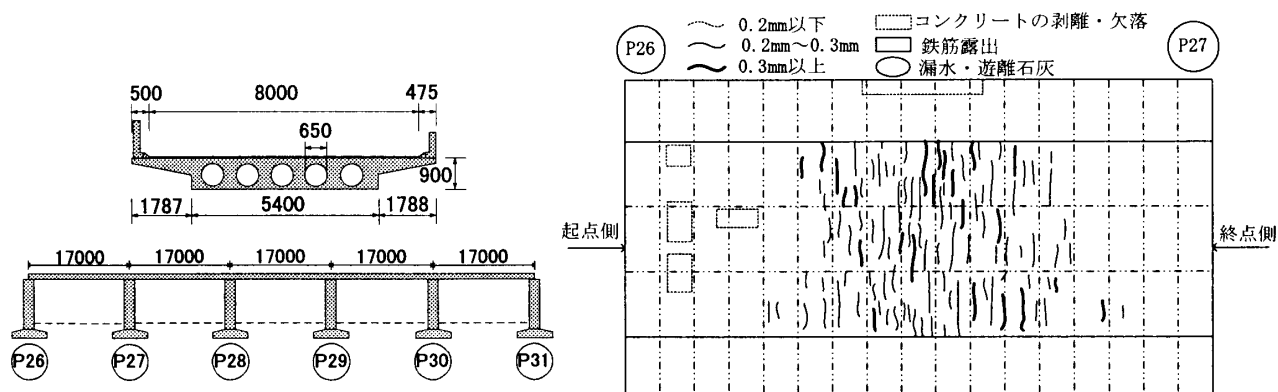


図-2 A 高架橋全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図

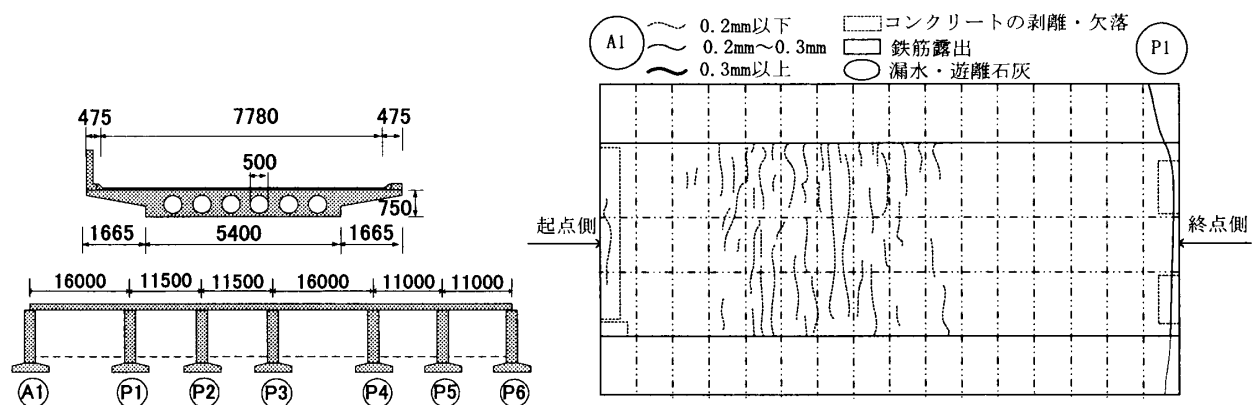


図-3 B 高架橋全体一般図と第一径間の床版下面の損傷図

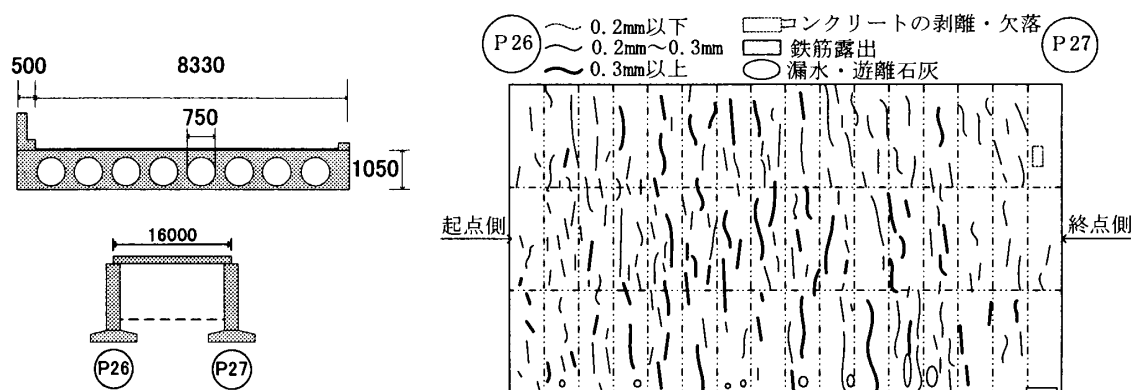


図-4 C 高架橋全体一般図と床版下面の損傷図

図-4 に C 高架橋の全体一般図と床版下面の損傷図を示す。C 高架橋は単純の RC 中空床版橋で、床版厚さ 105cm、径間長 15m であり、主鉄筋 D29(SD295)を使用している。損傷状況は床版下面全体に 0.3mm 程度のクラックが発生しており、中央分離帯付近には遊離石灰が発生している。

3. 損傷度評価

橋梁の損傷を照査するため、点数化により損傷度を算出する。損傷度はクラック損傷とクラック以外の損傷を分けて算出し、床版下面を 1m 単位で区切り算出している。クラック損傷度はクラックの本数に表-1 に示すクラック幅による点数をクラック数に乗じて式(1)のように算出する。

クラック損傷度=(クラックの数)×(点数) (1)

クラック幅による点数は、コンクリート標準示方書¹⁾のクラック幅算出式より鉄筋に発生する応力(σ_s)をクラック幅(w)より逆算して求め、その比により設定している。式(2)にクラック幅算出式を示す。

$$w = k \{ 4c + 0.7(Cs - \phi) \} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (2)$$

ここに、

w : ひび割れ幅(mm), σ_s : 鉄筋応力(N/mm),
 Cs : 鉄筋中心間隔(mm), ϕ : 鉄筋径(mm),
 E_s : 鉄筋弾性係数(N/mm²), c : かぶり(mm),
 ε'_{csd} : コンクリートの収縮・クリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮する数値

式(2)よりひび割れ幅が発生した時の鉄筋応力を算出すると、 $w = 0.1, 0.2, 0.3\text{mm}$ でそれぞれ $\sigma_s = 50, 100, 180\text{(N/mm)}$ が得られるので、この比からそれぞれ 1, 2, 4 点と設定している。

クラック以外の損傷度は損傷面積に表-1 に示すクラック以外の損傷の点数を乗じて、式(3)のように算出する。

クラック以外の損傷度=(損傷面積)×(点数) (3)

コンクリートの剥離・欠落や鉄筋露出に比べ、漏水・遊離石灰は床版を貫通するような特に重大な損傷と考え、点数を高くしている。また、点数化については耐力不足との比較を考え、第三者への影響を無視した。写真-1～3に、クラック以外の損傷状況を示す。

表-1 損傷の分類と点数

	損傷の分類	点数
クラック損傷	0.2mm以下のクラック	1
	0.2～0.3mmのクラック	2
	0.3mm以上のクラック	4
クラック以外の損傷	かぶりコンクリートの剥離・欠落	1
	鉄筋露出	2
	漏水・遊離石灰	4



写真-1 コンクリートの剥離・欠落



写真-2 鉄筋の露出



写真-3 漏水・遊離石灰

4. 耐力照査方法

RC 中空床版における床版部の安全性を照査するために、超過率を用いて耐力の照査を行った。ここで超過率とは、式(4)に示すように、断面作用力を断面耐力で除したものであり、安全性を検討する指標である。特に、1を超えると耐力不足と考える。

$$\text{超過率} = (\text{断面作用力}) / (\text{断面耐力}) \quad (4)$$

断面作用力の算出における、活荷重は現行の設計荷重である B 活荷重(TL25)を用いている。曲げモーメント、せん断力の超過率を算出し、実損傷の位置と損傷度を比較する事により耐力不足と損傷の関係を調べた。断面耐力については、曲げモーメントについて式(5)、(6)に示す M_c , M_a (表-2 参照)の 2 パターン、せん断力についても式(9)、(10)に示す S_c と $S_{sa}+S_c$ (表-2 参照)の 2 パターンの照査を行った。

$$\text{超過率} = M(\text{死荷重} + \text{活荷重作用時}) / M_c \quad (5)$$

$$\text{超過率} = M(\text{死荷重} + \text{活荷重作用時}) / M_a \quad (6)$$

M : 断面に発生する曲げモーメント

M_c : クラック発生時の曲げモーメント

M_a : 0.3mm クラック発生時の曲げモーメント

$$\text{超過率} = S(\text{死荷重} + \text{活荷重作用時}) / S_c \quad (7)$$

$$\text{超過率} = S(\text{死荷重} + \text{活荷重作用時}) / (S_{sa} + S_c) \quad (8)$$

S : 断面に発生するせん断力

S_{sa} : 帯鉄筋の応力度の許容値

S_c : コンクリートのせん断応力度の許容値

5. 検討結果

5.1 A 高架橋

図-5 に A 高架橋の全径間における超過率とクラック損傷度の関係を示す。棒グラフは損傷度を示し、折れ線グラフは超過率を表す。クラック損傷度は径間ごとでばらつきはあるものの、全径間において、支間中央部に近づくほど大きくなるという傾向がみられる。曲げモーメントの超過率は、クラック損傷度同様、支間中央部よりになるほど大きくなる。次に、せん断力の超過率は、クラック損傷度と異なり、支点部付近で大きくなる。以上より、曲げモーメントの超過率とクラック損傷度は相関が確認できるが、せん断力の超過率とは相関が確認できない。よって、曲げ耐力不足がクラックの主な発生原因として考えられる。また、径間ごとにばらついているものの、超過率 $M/M_c > 1$ となる程度からクラック損傷が発生していることから M_c は妥当にクラック発生時の耐力を評価できていると判断できる。

表-2 各耐力と応力・ひずみ状態

着目	耐力	応力状態	
曲げモーメント	M_c	$\sigma_c = 0.5\sigma_{ck}^{2/3}$	引張側コンクリート応力度が曲げ引張強度に達する
	M_a	$\sigma_s = 180(\text{N/mm}^2)$	引張主鉄筋応力度が $180(\text{N/mm}^2)$ に達する
せん断力	S_c	$\tau = 0.39(\text{N/mm}^2)$	コンクリートのせん断応力度が許容値に達する
	$S_c + S_{sa}$	$\sigma_s = 180(\text{N/mm}^2)$	帯鉄筋応力度が許容値に達する

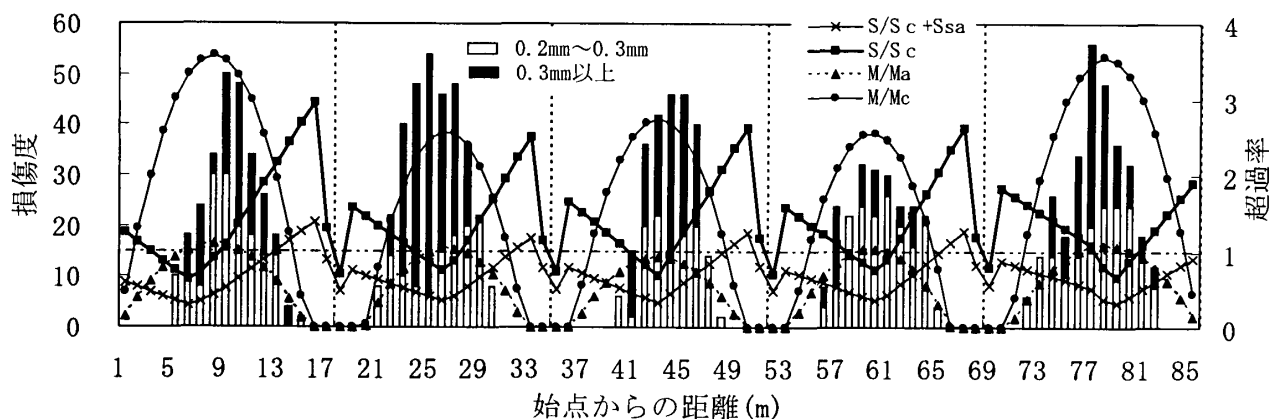


図-5 A 高架橋の全径間における超過率とクラック損傷度の関係

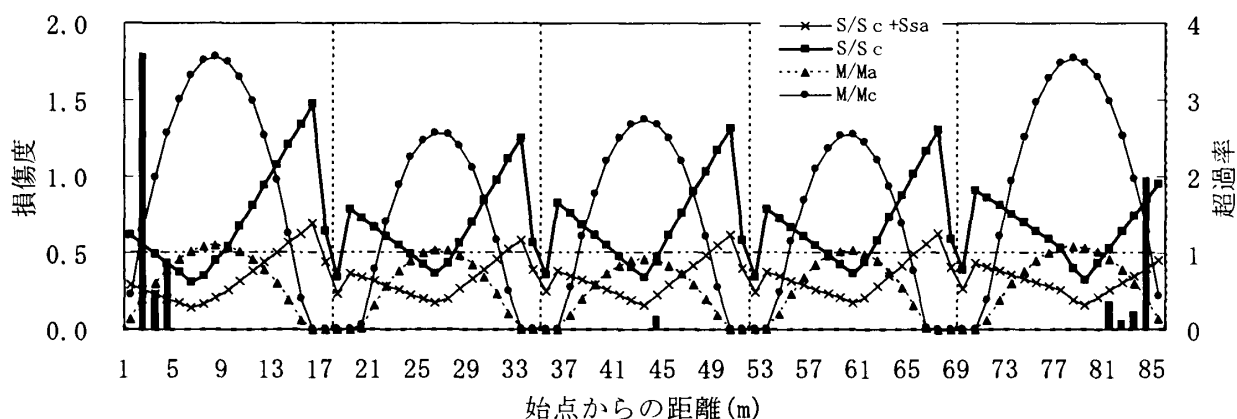


図-6 A 高架橋の全径間における超過率とクラック以外の損傷度

図-6 に A 高架橋の全径間における超過率とクラック以外の損傷度の関係を示す。曲げモーメント及びせん断力の超過率はクラック以外の損傷と相関が確認できなかった。よって、クラック以外の損傷の原因は耐力不足以外にあると考えられ、耐力不足を改善しても、損傷の抑制に効果を期待できないと考えられる。A 高架橋のクラック以外の損傷は主にコンクリートの剥離・欠落によるもので、床版起点部や中央分離帯付近に発生している。このような損傷が発生した原因は、耐力不足以外の要因によると考えられ、例えば施工上の問題や、発生箇所が雨水の流れやすい箇所である事から、雨水による劣化などが一因と推測される。

以上の結果より、A 高架橋ではクラックによる損傷は主に曲げ耐力不足により発生し、クラック以外の損傷は、耐力不足以外に原因があると考えられる。よってクラックによる損傷に対しては曲げ耐力の補強が必要であり、クラック以外の損傷については耐力を増強しても損傷の抑制に効果を期待できないと考えられる。

5.2 B 高架橋・C 高架橋

図-7 に B 高架橋の第一径間における曲げモーメントの超過率とクラック損傷度の関係を示す。ここでは、第一径間を代表に検討する。B 高架橋は A 高架橋や C 高架橋に比べ健全な橋梁であり、クラックもほとんどが幅 0.2mm 以下であった。また、超過率も A 高架橋や C 高架橋のように大きくなく、損傷が進

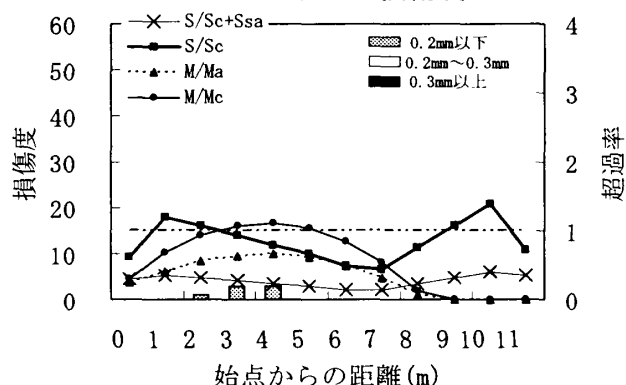


図-7 B 高架橋の第三径間における超過率とクラック損傷度

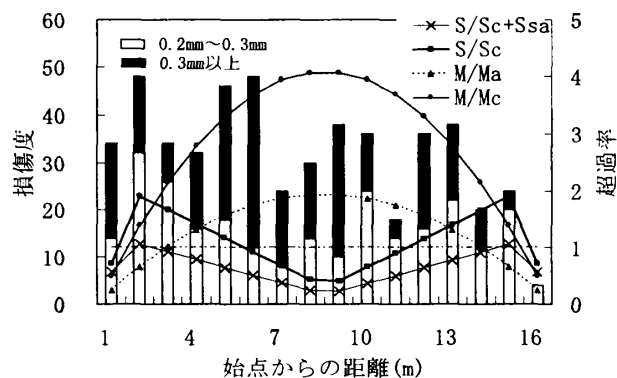


図-8 C 高架橋における超過率とクラック損傷度

展しなかったものと考えられる。クラック損傷度が支間中央部で大きくなる傾向も A 高架橋ほど顕著に現れなかったが、曲げモーメントの超過率とクラック損傷度の相関は確認できた。以上より、B 高架橋の検討を行った結果、軽微な損傷しか見られないが A 高架橋と同様に、曲げモーメントの超過率とクラック損傷度の間に相関あることが分かった。

図-8 に C 高架橋における曲げモーメントの超過率とクラック損傷度の関係を示す。C

高架橋は支間全域に0.3mm以上のクラックが入っている。ここで図-8の M/Ma に着目すると、端支点部から橋軸方向に2m程度のところで超過率1.0以上となっており、支間中央部では1.0を大きく超え、2.0程度となっている。これはA高架橋やB高架橋に比べ、特に大きい超過率であるといえる。このような超過率と損傷状況から判断して、超過率がある程度大きくなれば、損傷は一樣に大きくなるものと考えられる。

5.3 曲げモーメントとクラック損傷の関係

図-9にA～C高架橋の曲げモーメントの超過率とクラック損傷度の関係を示す。ここでは、補強設計を考慮して設計耐力に直接関係する超過率 M/Ma について検討する。図中の○印と●印はそれぞれ単純橋であるC高架橋と連続橋であるAおよびB高架橋の結果をプロットしている。これによると、単純橋であるC高架橋は連続橋と比べて床版下面の正曲げモーメントが卓越するため、超過率は許容曲げモーメント Ma に対して最大1.92、クラック損傷度も18～48と大きくなっていることがわかる。したがって、単純橋は連続橋と比べて耐力不足による影響を受けやすい構造であり、クラック損傷の進展も著しいことから、補強の優先順位は高いと言える。一方、連続橋の場合は、クラック損傷が著しい橋梁と比較的軽微な橋梁をプロットしたため、超過率、損傷度とも幅広く分布しているものの、超過率が0.6を超えると超過率の増加割合に比べてクラック損傷度が著しく進展する右肩上がりの傾向が確認できる。ここで、超過率とクラック損傷度の関係は大きく2つの範囲で傾向が異なるが、図中に示すように超過率0.6以上で損傷が著しく進展する範囲と損傷が軽微な範囲で各々の変動係数が最も小さくなる損傷度は12となる。よって、損傷度12を境に2つの範囲で回帰分析を行った。図中の実線は近似直線を示し、点線は5%超過直線を示している。結果、近似直線の傾きは損

傷度0～12の範囲で0.029、損傷度12以上の範囲で0.0046と小さくなることから、損傷度12以上ではクラック損傷が著しく進展する重要な損傷と判断する。また、損傷度12以上の範囲で5%超過直線の下限值は超過率0.6となることから、RC連続中空床版橋の補強対象については超過率0.6以上を目安として選定することを提案する。

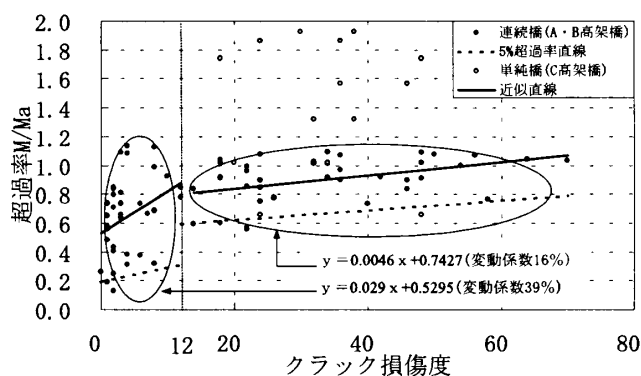


図-9 A高架橋とB高架橋の曲げモーメント M/Ma の超過率とクラック損傷度の関係

6. まとめ

- (1) RC連続中空床版橋のクラック損傷は曲げモーメントの超過率と相関があることを確認した。よって、曲げ耐力不足がクラック損傷の主な原因と考えられる。また、 $M/Mc=1.0$ 程度でクラック損傷が発生したことより、 Mc はクラック発生時の耐力を評価していると考えられる。
- (2) RC中空床版橋のクラック以外の損傷は耐力不足以外の要因により発生していることが考えられるため、耐力の増強対象とはならない。
- (3) RC中空床版橋で曲げモーメントの超過率 M/Ma が0.6以上の場合、耐力不足が原因でクラック損傷が大きく進展する危険性が高い。よって、曲げモーメントの超過率が0.6以上の橋梁を優先して補強することが望ましい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編・同解説，pp.90-92，1996