

## 繰返し衝撃荷重を受けるRC部材の残存性能評価法の実現象への適用

An application of evaluation method of residual performance of RC member under repeated impact load into RC structure

玉井宏樹\*, 園田佳巨\*\*  
Hiroki Tamai\*, Yoshimi Sonoda\*\*

\*博士(工学) 福岡大学助教, 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

\*\*工博 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

To evaluate the residual performance of RC protective structure under repeated impact load is essential for building of performance based design code of protective structure. In this study, an evaluation method for the residual performance of RC member was proposed, which is based on the cumulative damage model of rebar. The cumulative damage model of rebar was based on Manson-Coffin's effect and Miner's rule. By using the method, cumulative damage and residual displacement of RC beam can be better evaluated. Further, the method was applied to residual performance of RC abutment and allowable impact condition of RC bridge girder under pounding between them.

*Key Words: repeated impact analysis, accumulative damage factor, RC beam, pounding of bridge girder, allowable impact condition*

キーワード: 繰返し衝突解析, 累積損傷度, RC はり, 桁端衝突, 許容限界衝突条件

## 1. 緒言

近年, 構造物の耐衝撃設計法は性能照査型に移行しつつあり, 落石防護工や砂防構造物等の衝撃的な荷重の作用が想定される防護構造物についても, 性能を明確に規定した上で保証することが重要になってきている. そのため, 構造物の衝撃挙動をできるだけ簡易かつ正確に評価できる性能照査法を確立することが求められており, 基本的な構造材料である鋼やコンクリートを用いた構造部材の耐衝撃性能に関する様々な研究が行われてきた<sup>1), 2), 3)</sup>. さらに, 土木学会構造工学委員会の構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会が「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」<sup>4)</sup>を2007年10月に取り纏め, 性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を提示した段階にきている. これらの研究は全て構造物に衝撃荷重が単発に作用することを想定して行われている. しかし, 実際のRC製防護構造物の一生を考えると, 比較的小規模な衝突が繰返し作用することにより, その一生に幕を閉じること容易に想定できる. また, 経年劣化した既設RC構造物の数が急激に増加している我が国の現状を鑑みて, 防護構造物の合理的な維持・管理を実現させるためには, 過去に生じた衝撃荷重を何らかの形で勘案した上で余寿命を適切に評価することも重要であると考えられる. つまり, RC製防護構造物は単発衝突に対する性能評価はもちろんであるが, 繰返し衝突に対する性能評価も的確に行ってい

くべきである.

ここで, 繰返し衝突を受けるRC部材の耐衝撃性評価や残存性能評価に関する既往の研究を概観してみると, 解析的研究はほとんど存在せず, そのほとんどが実験的研究である. 例えば, KnabやClifton<sup>5)</sup>は, RC板を対象に繰返し衝突実験を行い, クレーター深さと衝突回数に関する関係性を導き, 繰返し衝突を受けるRC板の累積損傷に関して考察を行っている. また, 山口や別府ら<sup>6), 7)</sup>は消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的検討を行っている. さらに, 白根ら<sup>8)</sup>は, 防波堤の衝撃砕波力, 栈橋上部工の揚圧力, 消波ブロック・船舶・漂流物等の衝撃力が繰返し作用する港湾構造物の破損事例に着目し, 単発衝撃荷重だけではなく, 繰返し衝撃荷重を考慮することの重要性に触れ, 繰返し衝撃荷重を受けるRCはりの破壊挙動の解明のために実験的考察を行っている. 解析的研究はほとんど存在しないが, それは, 単発衝撃荷重が作用するRCはりの挙動を解くだけでも困難である解析の現状を表している.

これらの背景に基づき, 著者らは, コンクリートに累積損傷モデルを提案し, 衝撃外力によるRC部材の累積損傷を定量的に評価可能な手法の開発を試みてきたが, 繰返し衝突による塑性変形履歴を考慮したRC部材の残存性能を定量評価するには至らなかった<sup>9)</sup>. そこで, 本研究では, RC部材の終局状態を内部鉄筋の破断と捉えることで, 寿命予測が容易に可能になると考え, 鉄筋の累積損傷度に着

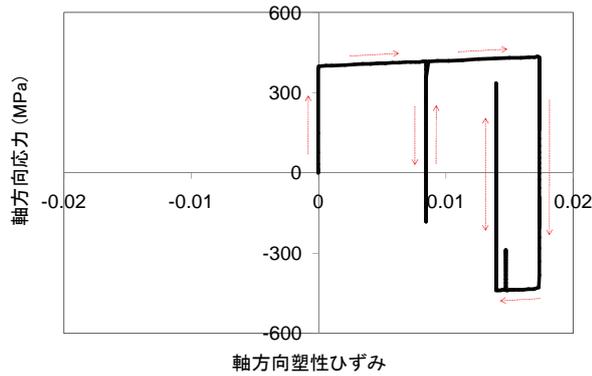


図-1 衝突荷重を受けるRCはり内の鉄筋の軸方向応力-塑性ひずみ関係

目してRC部材の累積残留変位等の残存性能を簡易に評価する方法を提案し、RCはりの繰返し漸増載荷実験のシミュレーションを行うことで、その有用性に関して考察を行った。また、衝突速度をパラメータとした一定速度繰返し衝突解析を実施することで、主鉄筋の累積損傷度と衝突回数との関係や衝突速度と破壊繰返し衝突回数との関係を明らかにした。さらに、実衝突現象である大地震時の橋桁-橋台の繰返し衝突現象への適用を試み、橋桁の橋台に対する許容限界衝突条件の算定を行った。

## 2. 鉄筋の累積損傷度に着目したRC部材の残存性能評価法の概要

本研究で提案したRC部材の残存性能評価法は鉄筋の累積損傷度に着目するものであるが、その鉄筋の累積損傷度はManson-Coffin関係<sup>10)</sup>にMiner則<sup>11)</sup>を適用することによって算出するモデルを考えた。また、コンクリートの累積損傷度に関しては、Lemaireが提案した損傷モデル<sup>12)</sup>を採用することとした。以下に説明する。

### 2.1 鉄筋の累積損傷モデル

本研究では、延性材料の低サイクル疲労破壊の分野で広く知られているManson-Coffin関係をMiner則に適用することによって繰返し衝突を受けるRCはり内の鉄筋に蓄積される累積損傷度を評価可能なモデルを提案した。Manson-Coffin関係とMiner則の融合は、低サイクル疲労下の延性材料の余寿命を評価する簡易な概念として適用可能性が確認されているが、繰返し衝突現象に適用された例はない。提案した累積損傷モデルの説明を以下に示す。

延性材料の低サイクル疲労による破損は主として塑性ひずみの繰返しにより支配され、各サイクルにおいて繰返される塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ と破損までの繰返し回数 $N$ との間には、次式のような関係が成り立つことがよく知られている。この関係式をManson-Coffin関係と呼んでいる。

$$\Delta\varepsilon_p N_f^\alpha = C \quad (1)$$

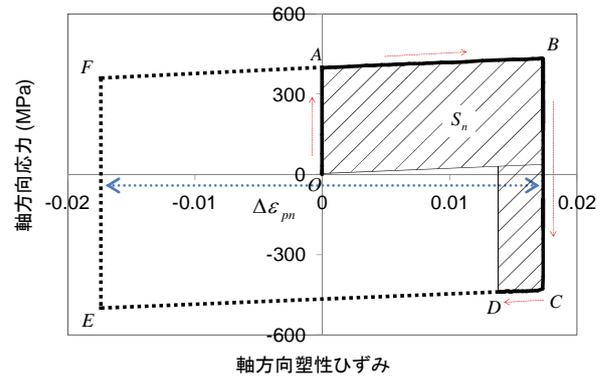


図-2 Manson-Coffin関係へ読み替えるための仮想ループ

ここに、 $\alpha$ および $C$ は材料と試験条件に関する定数である。材料定数に相当する $\alpha$ と $C$ の値は既知量と捉えることができるので、塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ を算出することが可能であれば、破壊を生じさせる繰返し回数 $N_f$ が一義的に算定できることを表している。しかし、Manson-Coffin関係は一定ひずみを繰返したときの理想的な両振幅応答による塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ で定義されているのに対し、本研究で対象としているような衝突現象においては、一般的に衝突荷重を受けるRCはり内の鉄筋の軸方向応力-塑性ひずみ関係は図-1に示すような片振幅応答になる。ちなみに、図-1は実際に重錘の衝突を受けるRCはりの衝撃応答解析を実施し、それにより得られた軸方向応力-塑性ひずみ関係である。そこで、本研究では、図-1を図-2に示すような閉じたヒステリシスループの一部と考えることで、Manson-Coffin関係を適用した。図-2をもとにどのように累積損傷度を評価していくかに関して具体的に以下に記す。

まず $n$ 回目の衝突を考える。始点時を $O$ 、終点を $D$ として図-2に示すように $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$ の閉じた仮想ループを考えた。この仮想ループは、理想的な両振幅で定義されているManson-Coffin関係を、衝撃載荷時に得られる鉄筋の応力-塑性ひずみ関係を表す図-1のようなヒステリシスに適用するために数学的対処として設けたものである。この仮想ループに対する塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_{pn}$ をManson-Coffin関係を用いて算出する。この塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_{pn}$ を用いると一義的に破損までの繰返し衝突回数 $N_{f0n}$ が求められ、さらには、Miner則を用いることにより、 $n$ 回目の衝突時に蓄えられる仮定の損傷度増分量 $\Delta D_{0n}$ が以下のように算出できる。

$$N_{f0n} = \left( \frac{C}{\Delta\varepsilon_{pn}} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$\Delta D_{0n} = \frac{1}{N_{f0n}} \quad (3)$$

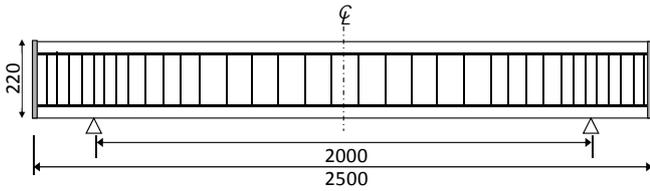


図-3 解析対象のRCはり (単位 : mm)

ここで、 $N_{f0n}$  の添え字  $f$  は破壊時、 $0$  はループが閉じている状態、そして  $n$  は衝突回数をそれぞれ表す。次に、実際に得られた経路  $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  で囲まれる面積を  $S_n$  とし、この面積  $S_n$  が仮想ループの面積  $S_{0n}$  の中で占める割合を  $m_n$  とすると、

$$m_n = \frac{S_n}{S_{0n}} \quad (4)$$

となる。つまり、閉じた仮想ループを設定し、面積比を用いることにより実際に得られた応答を仮想ループ内の一部と考えることで、Manson-Coffin 関係に適用していることとなる。言い換えると、Manson-Coffin 関係を塑性ひずみという物理量ではなく、エネルギー的観点から捉えたことになる。そこで、実際に得られた経路は、閉じたループの  $m_n$  分に相当すると考えることができるので、 $n$  回目の衝突時に蓄えられる仮想の損傷度増分量  $\Delta D_{0n}$  に  $m_n$  を乗じることで、実際の損傷度増分量  $\Delta D_n$  を以下のように定義した。

$$\Delta D_n = m_n \cdot \Delta D_{0n} \quad (5)$$

よって、 $n$  回目の衝突までに蓄積された累積損傷度は以下のように求めることができる。

$$D_n = \sum_{k=1}^n \Delta D_k \quad (6)$$

このように算出された累積損傷度を  $n+1$  回目の鉄筋の初期弾性係数の低減率として考慮することによって繰返し衝突による鉄筋の累積損傷度の影響を解析の中に組み込んでいる。厳密には、鉄筋の破壊と弾性係数の低下は直接繋がるものではないが、本研究では、繰返し衝突作用による RC はり内鉄筋の破断を論じるために、鉄筋要素の破壊を鉄筋の初期弾性係数の低下として捉えたことになる。

## 2.2 コンクリートの累積損傷モデル

本研究では、繰返し衝突を受けるコンクリート材料の累積損傷度を評価するために Lemaitre が提案した損傷モデルを援用することとした。本モデルは著者らが提案したものではないため、詳細説明は参考文献 12) に預け、ここでは簡潔な説明を行う。

コンクリート材料の損傷モデルは損傷力学理論に従うものであり、Lemaitre が提案した損傷進展式は式(7)で表される。

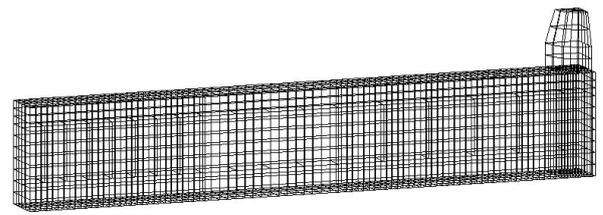


図-4 解析モデル (解析対象の1/4をモデル化)

$$\dot{D} = \frac{Y}{S} \cdot \dot{p} \cdot H(p - p_D) \quad (7)$$

ここに、 $\dot{D}$  は損傷度増分、 $Y$  はひずみエネルギー密度開放率、 $S$  は材料強度を表すパラメータ、 $\dot{p}$  は累積ひずみ増分、 $H$  はヘビサイド関数、 $p_D$  は損傷発生累積塑性ひずみを表す。つまり、本研究では式(7)により算出される損傷度をコンクリートの累積損傷度と捉えることとした。その累積損傷度を式(8)に示す損傷を考慮した構成則に導入することで、繰返し衝突解析による累積損傷度の影響を次回衝突時へ反映させることとした。簡易な累積損傷モデルではあるが、繰返し衝突によるコンクリートの損傷による鉄筋への荷重負担の増加を表現できるものと考えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1 - D) \left\{ E_{ijpq} - \frac{9G^2 \sigma'_{pq} \sigma'_{ij}}{3G\sigma_{eq}^2 - \frac{\sigma_{eq}^3}{1-D} \cdot \frac{\partial F_D}{\partial Y}} \right\} \dot{\epsilon}_{pq} \quad (8)$$

ここに、 $D$  は損傷度、 $G$  はせん断弾性係数、 $\sigma_{eq}$  は相当応力、 $E_{ijpq}$  は弾性剛性マトリクス、 $F_D$  は散逸ポテンシャル関数を表す。式(8)の右辺に  $(1 - D)$  が乗じられていることから、損傷の影響による弾性剛性の低下や、除荷時・再負荷時の剛性低下を表現していることがわかる。つまり、式(8)は塑性過程における応力増分式を表しており、除荷時・再負荷時の応力増分は式(8)右辺第2項を除いた形で表され、その式に負荷時に生じた損傷変数を考慮するようになっている。

## 3. RC部材を対象とした繰返し衝突シミュレーション

本章では、鉄筋の累積損傷度に着目した残存性能評価法の有用性を検証する目的で繰返し衝突を受けるRCはりのシミュレーションを行った。また、入力エネルギーと破壊繰返し衝突回数との関係を明らかにするために、衝突速度をパラメータとした一定速度繰返し衝突解析を実施した。

### 3.1 解析概要

解析対象RCはりは図-3に示すような純スパン2000mmで、はり高さ220mm、はり幅200mmの矩形断面を有する複鉄筋矩形RC単純はりである。これは、安藤らが行った繰返し漸増載荷実験<sup>13)</sup>に使用されたRCはりである。解析モデルを図-4に示すが、解析時間短縮のため1/4モデルで

表-1 材料定数および損傷パラメータ

	鉄筋	コンクリート	
弾性係数(GPa)	206	19.1	
ポアソン比	0.3	0.19	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.85	2.45	
損傷パラメータ	$S$	—	0.0001
	$p_D$	—	0.0008
	$D_{Cr}$	—	0.6
	$\alpha$	0.6	—
	$C$	0.013	—

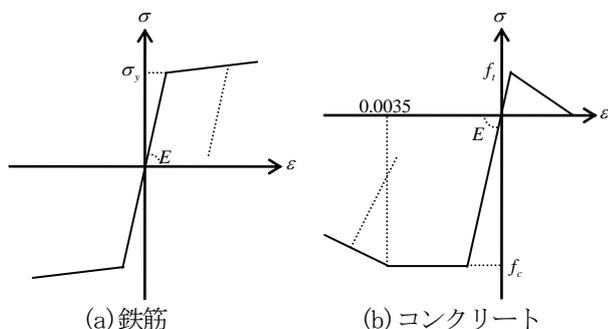


図-5 仮定した応力 - ひずみ関係

モデル化した。なお、鉄筋にはトラス要素、コンクリートおよび重錘にはソリッド要素を用い、鉄筋とコンクリートは完全付着を仮定した。また、鉄筋およびコンクリートの材料定数を表-1 に示す。表中のコンクリートの損傷パラメータは、一軸圧縮試験結果がある場合は、そのシミュレーションを行うことにより決定した。また、仮定した鉄筋とコンクリートの応力 - ひずみ関係を図-5 に示す。一般的に高速変形時の鋼材およびコンクリートにはひずみ速度依存性があることが知られているが、本研究で対象としている現象は比較的低速度であるため、構成則にひずみ速度依存性は考慮していない。時間積分法に関しては、陰解法であるシングルステップフォーポルト法を用い、 $1.0 \times 10^6$  (sec) から  $1.0 \times 10^3$  (sec) までを範囲とした自動制御により時間ステップ幅を決定した。

解析ケースは表-2 に示す全8 ケースである。ケース1 は、安藤らが実施した弾性係数 206GPa、ポアソン比 0.3 の材質を有する質量 200kg で先端形状が扁平型の鋼製重錘を処女载荷速度 1m/s から増分速度 1m/s で矩形断面 RC 単純ばりのスパン中央部に4回衝突させる実験のシミュレーションであり、鉄筋の累積損傷度に着目した残存性能評価法の有用性を検証する目的で実施した。ケース2~ケース7は、1.0m/s~4.0m/s という比較的低速度な衝突速度を対象とした一定速度繰返し衝突解析であり、主鉄筋の累積損傷度と衝突回数や入力エネルギーと破壊繰返し衝突回数の関係を明らかにするために実施した。また、数十回、数百回に至る破壊回数までの衝突解析を実施することは非常に効率が悪く、得策であるとは言えない。つまり、2、3回の繰返し衝突解析を実施することだけで、累積損傷度が1.0となりRCはり最終状態に至る繰返し衝突回数を予測することは非常に重要なことである。そこで、本解析においては、2回衝突までの解析を実施し、その結

表-2 解析ケース

解析ケース	衝突速度 (m/s)	重錘質量 (kg)	備考
ケース1	1.0~4.0	200	漸増载荷 (増分速度 1m/s で 4回衝突)
ケース2	1.0		
ケース3	1.5		
ケース4	2.0		
ケース5	2.5		
ケース6	3.0		
ケース7	4.0		一定速度繰返し衝突 (2回 衝突)
ケース8	約 1.4	400	

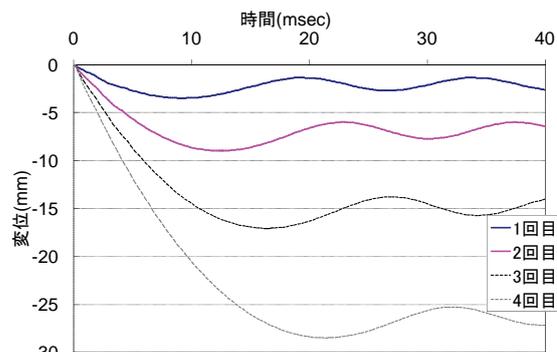


図-6 各衝突回数における鉛直方向変位応答

果から破壊繰返し衝突回数を予測することとした。この際の対象RCはりとは鋼製重錘はケース1と同様のものである。ケース8は、衝突速度約 1.4m/s で質量 400kg の鋼製重錘を一定繰返し衝突させるものであり、運動エネルギーを入力エネルギーと考えた場合、ケース4の入力エネルギーと等しいものである。ケース4と同一入力エネルギーのケース8を設定したのは、繰返し衝突による累積損傷度や破壊繰返し衝突回数が衝突速度と重錘質量のどちらに依存するかを明らかにするためである。

### 3.2 ケース1の解析結果 ~有用性の検証~

ケース1の解析結果として、まず、図-6 に衝突後のスパン中央鉛直方向の変位波形を記す。この図における2回目衝突以降の変位波形は、前回の残留変位値をゼロにリセットして示している。ここで、最大変位に達した後、はりがどの程度逆方向に戻されているのかに着目してみると、衝突回数を重ねるに連れて、最大変位値に対する戻される変位値の割合が減少していく傾向にあり、4回目にはその割合が約 0.11 となり、部材としての復元力を失った状態になったことが伺える。次に、図-7 に繰返し衝突解析により得られた累積残留変位と衝突回数の関係を安藤らが実施した実験結果と比較した形で示す。この図から、本解析において十分な精度で繰返し衝突実験をシミュレートできていることが確認できた。つまり、本研究で提案した累積損傷モデルの妥当性が示された。しかし、衝突回数を重ねるに連れて、解析結果が若干ではあるが大きい値を示した。これは、1回目衝突後の残留変位において実験値が約 1.7mm であったのに対して本解析結果では約 2.0mm となっており、この微小な誤差が衝突回数を重ねる毎に累積

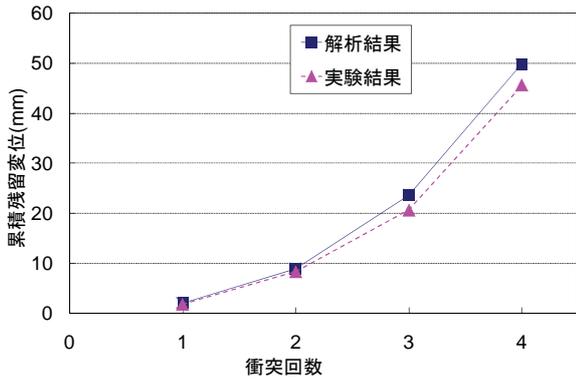


図-7 累積残留変位と衝突回数の関係

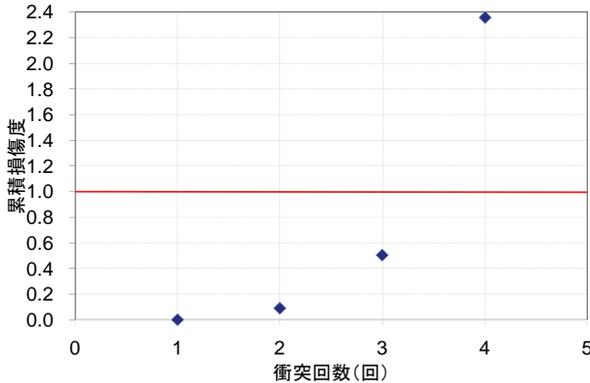


図-8 主鉄筋における衝突回数と累積損傷度の関係

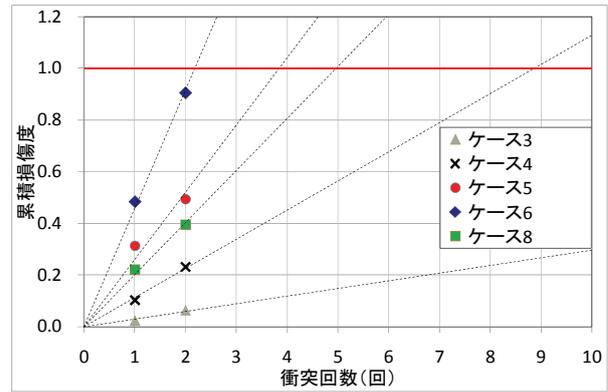


図-9 主鉄筋における累積損傷度と衝突回数の関係

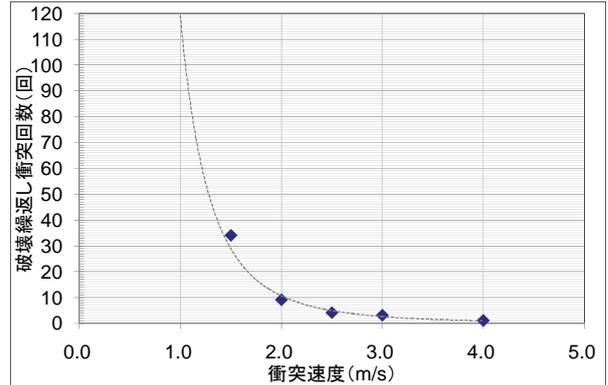


図-10 衝突速度と RC はりの破壊繰返し衝突回数の関係

されたためであると考えられる。次に、主鉄筋の累積損傷度と衝突回数の関係を図-8 に示す。図より、漸増荷重の場合、累積損傷度と衝突回数の関係は累乗関係があることが確認できた。また、4回目衝突後には主鉄筋の累積損傷度が1.0に達しており、初期状態で有していた剛性を全て失い、ほぼ破断した状態を示した。実際には、4回目衝突後にはRCはり内の鉄筋が破断したということは確認できていないが、RCはりが角折れ状態で破壊に至っていることがわかっており、本解析により、その状態を表現できているものと言える。なお、4回目衝突後には、衝突部と支点部近傍のコンクリート要素は圧縮破壊を生じた。これらの結果から、提案した比較的簡易な累積損傷モデルによって、繰返し衝突を受けるRCはりの累積損傷度を定量的に評価可能であることが確認できたとと言える。

しかし、本研究で提案した手法では、繰返し衝突作用により蓄えられたダメージを累積損傷度という指標に置き換え、その累積損傷度を次回衝突時の構成則に適用することで、鉄筋の初期弾性係数の低減やコンクリートの剛性低下や強度劣化を表現し、処女荷重と同じ解析条件で解析を実施しています。つまり、繰返し荷重時のRC部材としての複雑な挙動を適切に表現することは不可能である。

### 3.3 ケース2～ケース8の解析結果

#### (1) 主鉄筋における累積損傷度と衝突回数の関係

ケース2～ケース8の解析結果として、衝突近傍主鉄筋要素の累積損傷度と衝突回数の関係を図-9に示す。まず、同一重錘質量を用いたケース2～ケース7の結果を考察

する。図中には、ケース2とケース7の結果を表示していないが、これは、衝突速度1.0m/sを設定したケース2においては、2回衝突させても主鉄筋は無損傷状態であったからであり、衝突速度4.0m/sを設定したケース7においては、1回衝突時で累積損傷度が1.0に達したからである。衝突速度1.5m/sのケース3においては、衝突近傍主鉄筋要素の累積損傷度は1回目衝突時で0.022、2回目衝突時で0.063となり、同様に衝突速度2.0m/sのケース4においては、1回目衝突時で0.101、2回目衝突時で0.232、衝突速度2.5m/sのケース5においては、1回目衝突時で0.314、2回目衝突時で0.494、衝突速度3.0m/sのケース6においては、1回目衝突時で0.483、2回目衝突時で0.905となった。これらの結果から、ケース3～ケース6では、2回衝突では累積損傷度が1.0を超えることはなかった。また、各ケースでややばらつきはあるが、累積損傷度と衝突回数にはほぼ線形関係が成り立つことが確認できた。つまり、線形近似することで実際に解析を実施した衝突回数2回以降の衝突回数における累積損傷度を線形近似により予測でき、さらには、累積損傷度が1.0を超え、RCはりとして終局に至る破壊繰返し衝突回数の予測を行うことが可能である。

他ケースと異なる重錘質量を用いたケース8の解析結果について考察する。ケース8においては、1回目衝突時で0.221、2回目衝突時で0.394となり、他ケースと同様に主鉄筋の累積損傷度と衝突回数の関係もほぼ線形関係を示した。つまり、処女荷重時の入力エネルギーに関わらず、主鉄筋の累積損傷度と衝突回数の関係は線形関係を示した。しかし、この結果の妥当性を確実なものにするために

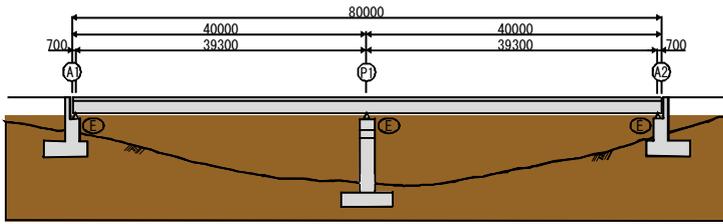


図-11 解析対象橋梁 (単位: mm)

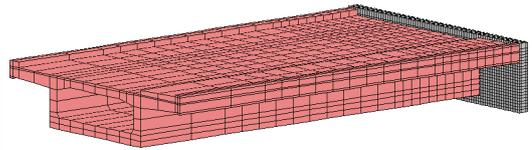


図-13 解析モデル (橋桁とパラペット部)

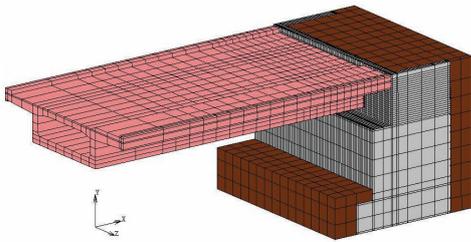


図-12 解析モデル (全体図)

は、今後、繰返し衝突実験結果と比較検討する必要があると考えられる。

## (2) 衝突速度と破壊繰返し衝突回数との関係

ケース2～ケース7の解析結果として、衝突速度と破壊繰返し衝突回数との関係を図-10に示す。累積損傷度と衝突回数に線形関係が成り立ち、各ケースにより線形近似を行うことで累積損傷度が1.0を超え、RCはりとして終局に至る破壊繰返し衝突回数を算出した。なお、RCはりの終局として、主鉄筋の累積損傷度が1.0に達する時、すなわち、内部鉄筋が破断するときに部材としての機能を失うことを想定した。

まず、ケース2～ケース7の結果を考察する。衝突速度1.5m/sであるケース3においては、破壊繰返し衝突回数は34回であり、同様に衝突速度2.0m/sのケース4においては、破壊繰返し衝突回数は9回、衝突速度2.5m/sのケース5においては、破壊繰返し衝突回数は4回、衝突速度3.0m/sのケース6においては、破壊繰返し衝突回数は3回であり、衝突速度4.0m/sのケース7においては、1回衝突時に主鉄筋の累積損傷度が1.0を超えており、破壊繰返し衝突回数は1回であった。もちろんではあるが、衝突速度が大きくなるに従い、破壊繰返し衝突回数は小さくなる傾向が確認できた。また、図より、衝突速度と破壊繰返し衝突回数との関係は累乗近似曲線に従うことが確認できた。この累乗近似曲線に従うと仮定すると、2回衝突後に主鉄筋が無損傷状態であり、鉄筋の累積損傷度から破壊繰返し衝突回数を予測できなかった衝突速度1.0m/sのケース1においても、破壊繰返し衝突回数は120回に及ぶことが予測できる。なお、低サイクル疲労で広く用いられているManson-Coffin関係やMiner則は、両振幅定みずみ载荷による繰返し回数を数万回程度まで想定しているため、それらの概念を応用した本手法においても、数十回・数百回程度の繰返し衝突

回数は適用範囲内であると考えられる。

また、同一入力エネルギーであるケース4とケース8の解析結果を考察する。図-9より、ケース8において主鉄筋の累積損傷度が1.0に達するのは、衝突回数が5回の時であり、この回数が破壊繰返し衝突回数である。一方、図-10よりケース4における破壊繰返し衝突回数は9回であった。つまり、同一入力エネルギーにも関わらず、重錘質量の大きいケース8のほうが破壊繰返し衝突回数は小さくなる結果となった。

## 4. 実現象への適用

前章では、鉄筋の累積損傷度に着目した残存性能評価法を用いることで、繰返し衝突を受けるRCはりの累積残留変位を適切に評価できることを確認した。本章では、実際に繰返し衝突現象が想定される大地震時の橋桁と橋台の衝突現象<sup>14)</sup>に提案した残存性能評価法を適用し、許容限界衝突条件の算出を行った。

### 4.1 解析対象および解析モデル

本研究では、両端部に橋台を有する2径間のPC箱形断面橋梁を解析対象として用いた。解析対象橋梁の側面図を図-11に示す。対象とした橋梁の支承条件はA1、A2橋台において可動支承、P1橋脚において固定支承としている。上部工形式は桁高2.2m、桁幅12.0mを有する2径間連続PC箱桁であり、下部工形式は鉄筋コンクリート橋台および橋脚、基礎工形式は直接基礎である。また橋台はフルウイングを有しており、パラペット部はD13、D19およびD29鉄筋から構成されたRC構造となっている。地盤はI種地盤である。

実際には、図-12に示すように解析対象橋梁のA2橋台とA2橋台側から1/2径間部分の箱桁を忠実にモデル化する必要があるが、本解析では桁端衝突による橋台の累積損傷をパラペット基部鉄筋の累積損傷度によって評価するものであるため、橋桁とパラペット部のみを取り出した図-13を解析モデルとした。パラペット部のモデル化に関しては、パラペット部はコンクリート要素と鉄筋要素から構成されており、コンクリート要素には8積分点を有するソリッド要素を、鉄筋要素にはトラス要素を用いた。衝突体である上部工は、本来は変断面で構成されているが、衝突現象は桁端部で起こり、また、今回の解析では橋台の損傷

表-3 材料定数および損傷パラメータ

	鉄筋	コンクリート	RC 要素
弾性係数(GPa)	206	25.0	28.8
ポアソン比	0.3	0.2	0.2
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.85	2.45	2.69
圧縮強度(MPa)	294	29.4	29.4
引張強度(MPa)	降伏強度	2.94	2.94
損傷パラメータ	$S$	—	0.0001
	$p_D$	—	0.0023
	$D_{cr}$	—	0.6
	$\alpha$	0.6	—
	$C$	0.013	—

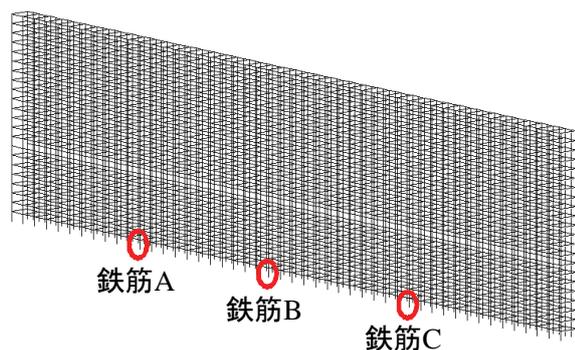


図-14 着目鉄筋の位置

度評価を目的としていることから、桁端部側の断面寸法で統一された等断面でモデル化した。用いた要素は、8積分点を有するソリッド要素である。衝突物である橋桁が被衝突物である橋台に水平に衝突するという理想的な衝突条件を想定しているため、支承やエキスパンションジョイントの忠実なモデル化は行っていない。本解析モデルの総節点数および総要素数はそれぞれ 11808、16475 である。

境界条件に関しては、パラペット部底面と本来ならウィング部が連結されていたパラペット裏面の節点を全自由度固定とした。実現象においては桁端衝突時に橋台自体が少し滑動することが考えられるため、仮定した拘束条件は少し厳しいものとなっている。本解析で用いた材料特性を表-3に記す。鉄筋の損傷パラメータである  $\alpha$  は 0.6、 $C$  は 0.013 とした。また、コンクリートの損傷パラメータに関しては、 $S$  は 0.0001、 $p_D$  は 0.0023、 $D_{cr}$  は 0.6 を用いることとした。上部工である桁は断面内の鉄筋量が非常に小さいことから、鉄筋量から換算された弾性係数を用いた RC 要素として取り扱い、von Mises の弾塑性体としてモデル化した。

衝突条件に関しては、桁の衝突速度が 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0m/sec で橋台に衝突するという 5 ケースを設定した。なお、衝突速度は衝突体である桁の全節点に初期条件として与えた。また、各衝突速度において 2 回繰返し衝突解析を行い、破壊繰返し衝突回数に関しては、図-9 のように 2 回の解析結果を踏まえて線形近似により予測することとした。

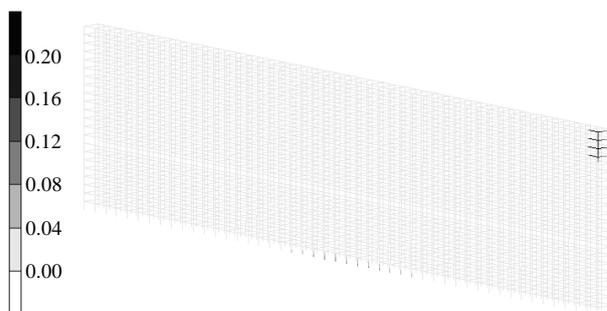


図-15 1回目衝突による累積損傷度分布図 (衝突速度 1.0m/s)

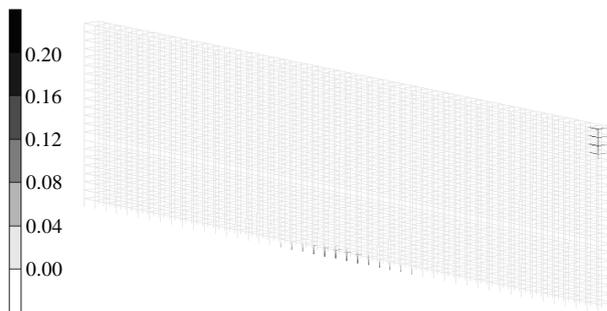


図-16 2回目衝突による累積損傷度分布図 (衝突速度 1.0m/s)

## 4.2 着目鉄筋の設定

本研究で提案した残存性能評価法は鉄筋の累積損傷度に着目するものであり、着目鉄筋を設定する必要がある。例えば、前章では、対象部材が RC はりであったため、着目鉄筋に主鉄筋を選定し、「主鉄筋の累積損傷度が 1.0 に達したら、その RC はりは部材としての機能を失う」という終局状態の仮定をもとに残存性能を評価した。

本解析でも、橋台の累積損傷度評価ならびに許容限界衝突条件の算定を行うためには橋台の終局状態の仮定を適切に行わなければならない。報告によると、大地震時の橋台の破壊は大別すると 3 ケースあると言われている。1 つ目はパラペット基部のせん断破壊、2 つ目はパラペット基部鉄筋の曲げ降伏先行型破壊、3 つ目はウィングのせん断破壊である。本研究では、この 3 ケースのうち 2 つ目のパラペット基部鉄筋の曲げ降伏先行型破壊に本手法を容易に適用できると考え、パラペット基部鉄筋の曲げ降伏先行型破壊が生じると橋台が構造物としての機能を失うと考えたこととした。よって、着目鉄筋を図-14 に示すような 3 箇所を設定した。ちなみに、鉄筋 A と鉄筋 C の距離は桁幅分にほぼ相当する。

## 4.3 解析結果

### (1) 着目鉄筋の累積損傷度

図-15、図-16 に衝突速度 1.0m/s のときの鉄筋の累積損傷度分布図を示す。図-15 は 1 回目衝突後の累積損傷度分布図であるが、パラペット基部に損傷が生じていることが確認できた。具体的には、鉄筋 A において約 0.023、鉄筋 B において約 0.136、鉄筋 C において約 0.024 の累積損傷度が発生している。図-16 は 2 回目衝突後の累積損傷度分

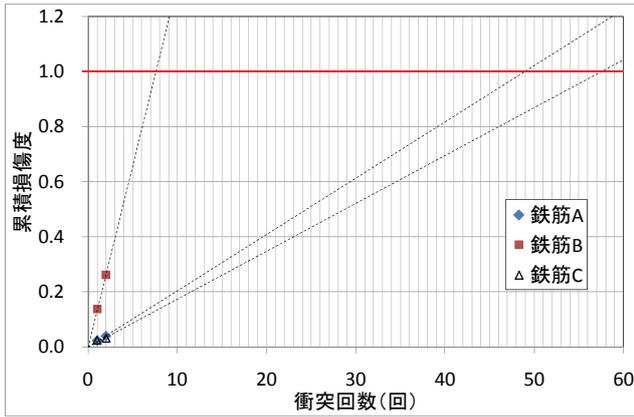


図-17 着目鉄筋における累積損傷度と衝突回数(回)の関係  
(衝突速度 1.0m/s)

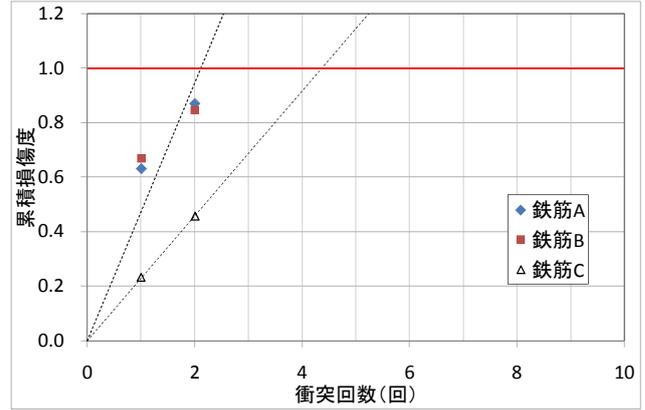


図-20 着目鉄筋における累積損傷度と衝突回数(回)の関係  
(衝突速度 1.5m/s)

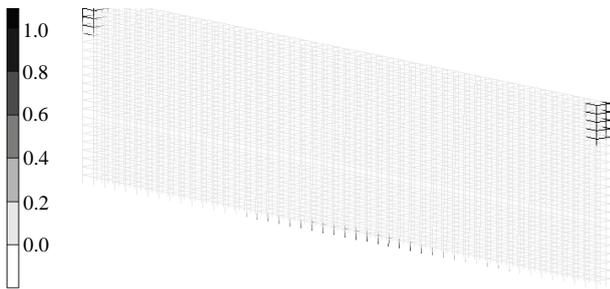


図-18 1回目衝突による累積損傷度分布図  
(衝突速度 1.5m/s)

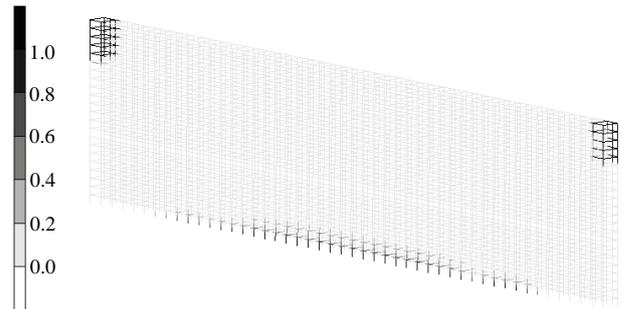


図-21 1回目衝突による累積損傷度分布図  
(衝突速度 2.0m/s)

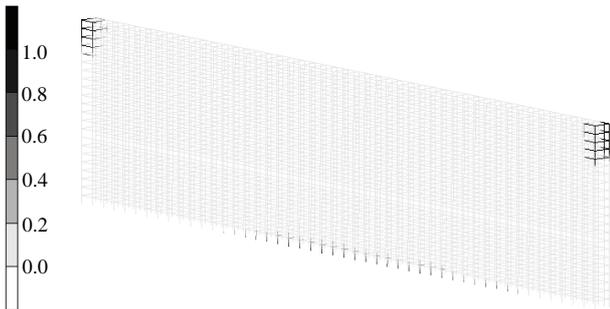


図-19 2回目衝突による累積損傷度分布図  
(衝突速度 1.5m/s)

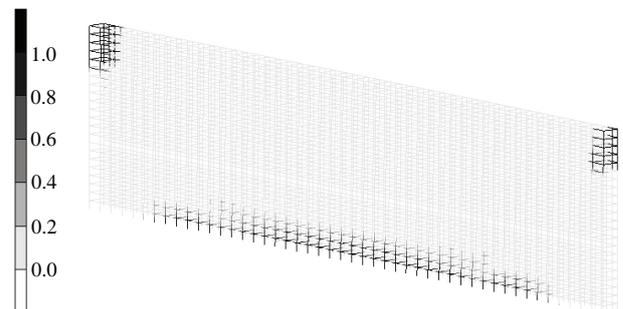


図-22 1回目衝突による累積損傷度分布図  
(衝突速度 2.5m/s)

布図であるが、鉄筋 A において約 0.040、鉄筋 B において約 0.261、鉄筋 C において約 0.031 と 1 回目に比べて累積損傷度が増加しているが、いずれの着目鉄筋においても 1.0 を超えることはなかった。そこで、それぞれの着目鉄筋における累積損傷度と衝突回数(回)の関係を図-17 に示し、線形近似した予測ラインを示してみると、全ての鉄筋の累積損傷度が 1.0 に達するのは衝突回数 58 回であることが確認できた。

同様に、衝突速度 1.5m/s の場合の累積損傷度分布図と累積損傷度と衝突回数(回)の関係をそれぞれ図-18～図-20 に示す。衝突速度 1.0m/s の場合と比較すると、各着目鉄筋における損傷度が大きくなっているが、1.0m/s の場合と同様に 2 回の衝突ではいずれの着目鉄筋においても 1.0 を超えることはなかった。線形近似した予測ラインより、全ての鉄筋の累積損傷度が 1.0 に達するのは衝突回数 5 回であるこ

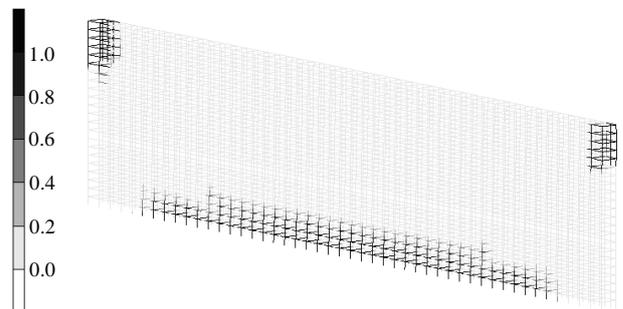


図-23 1回目衝突による累積損傷度分布図  
(衝突速度 3.0m/s)

とが確認できた。

衝突速度 2.0m/s、2.5m/s、3.0m/s のときには、1 回目の衝突により着目鉄筋全て累積損傷度 1.0 に達する結果となり、1 回の衝突で橋台は破壊するものと考えられる。それぞれの累積損傷度分布図を図-21～図-23 に示す。

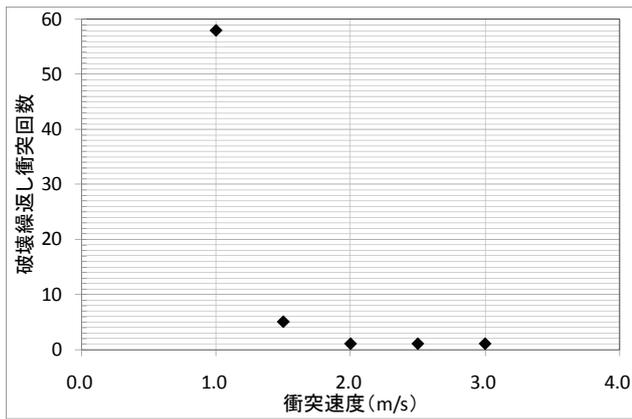


図-24 橋台の破壊繰返し衝突回数と衝突速度の関係

## (2) 許容限界衝突条件の算出

図-24 に破壊繰返し衝突回数と衝突速度の関係を示す。衝突速度 2.0m/s 以上の場合、1 回の衝突によって橋台は破壊するが、衝突速度 1.5m/s の場合、橋台が破壊するまでの繰返し衝突回数は 5 回であり、衝突速度 1.0m/s の場合、58 回という結果になった。つまり、衝突速度 1.0m/s と 2.0m/s の場合で破壊繰返し回数は大きな差が見られた。また、実現象ではレベル 2 相当の地震が発生した場合、遊間の大きさによっては、桁と橋台間で繰返し衝突が起こることが容易に予想できるが、もし仮に繰返し衝突が起こらず単発衝突のみであることを考えると、今回の解析対象の場合、許容できる衝突速度は 1.5m/s ということになる。現行の道路橋示方書では、橋桁と橋台は衝突しないように必要な遊間を設けることが推奨されており、それに伴い、橋台や橋脚の巨大化や橋脚の補強等の不経済な設計になっていることが指摘されている。しかし、本解析で得られたように、1.5m/s の衝突速度は許容できると考えて設計を行うことによって、桁遊間の縮小化を考慮した合理的な設計に繋がると期待できる。さらに、パラペット基部における着目鉄筋の累積損傷度が 1.0 に達したら、パラペット部は破壊し、橋台はその機能を失うという終局状態の仮定を設けることで、各衝突速度における破壊までの繰返し衝突回数や橋台に対する橋桁の許容限界衝突条件を本手法を用いることで比較的容易に算定できることが確認できた。

## 5. 結論

本研究は、鉄筋の累積損傷度に着目した RC 部材の残存性能評価法を提案し、それを用いて、繰返し衝突を受ける RC はりの累積残留変位等の残存性能評価に関する考察を行い、さらに、実現象である大地震時に生じる橋桁-橋台の繰返し衝突現象への適用を試み、許容限界衝突条件の算定を行ったものである。本研究の成果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 繰返し漸増载荷を受ける RC はりのシミュレーションにより、鉄筋の累積損傷度に着目した RC はりの残存性能評価法を用いることで、RC はりの累積残留変位を精度良く評価可能であり、本手法の有用性が確認で

きた。

- (2) 本手法を用いて衝突速度をパラメータとした一定速度繰返し衝突解析を実施したところ、全ケースにおいて主鉄筋の累積損傷度と衝突回数には線形関係があることが確認できた。また、累積損傷度と衝突回数の関係を線形近似することで RC はりとして終局に至る破壊繰返し衝突回数を算出したところ、衝突速度と破壊繰返し衝突回数には累乗関係があることが確認できた。
- (3) 鉄筋の累積損傷度に着目した本手法の実現象への適用可能性を確認する目的で、大地震時に生じる橋桁と橋台の繰返し衝突現象に適用した。その結果、桁端衝突による橋台の累積損傷度を評価する際にも、本手法は有用であることが確認でき、パラペット基部における着目鉄筋の累積損傷度に基づく橋台の終局状態を仮定することで、各衝突速度における破壊繰返し衝突回数や橋台に対する橋桁の許容限界衝突条件を比較的容易に算定できることが確認できた。許容限界衝突条件を算出できたことは、今後、桁遊間の縮小化を考慮した合理的な設計への一助となると考えられる。
- (4) 本研究では、RC 部材の残存性能評価を簡易に行うために鉄筋の累積損傷度に着目した手法を考案し、累積残留変位等の残存性能を評価可能であることを示した。しかし、本手法によって、繰返し衝突を受ける RC 部材の複雑な破壊挙動を定量的に把握することは困難である。今後、繰返し衝突を受ける RC 部材の破壊挙動や残存耐力を定量的に評価可能な手法に発展させるためには、一定速度繰返し衝突実験を行い、その結果を反映させることが不可欠であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静载荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.
- 2) 橋紗代子, 榎谷浩: 有限要素法を用いた鉄筋コンクリートはりの衝撃解析に関する一考察, 第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.7-12, 2006.
- 3) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15, 2004.
- 4) 土木学会: 構造工学技術シリーズ No.52, 性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法, 2007.
- 5) Knab, L. I. and Clifton, J. R.: Cumulative Damage of Reinforced Concrete Subjected to Repeated Impact, Cement and Concrete Research, Vol.12, pp.359-370, 1982.
- 6) 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 衝撃砕波を受ける消波ブロックの直立壁への衝突現象に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol.50, pp.711-715, 2003.
- 7) 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.381-396, 2004.
- 8) 白根勇二, 岩波光保, 横田弘: 繰返し衝撃荷重を受け

- る鉄筋コンクリートはりの耐荷性状, 第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2006.
- 9) 玉井宏樹, 園田佳巨: 損傷モデルを用いた RC はりの衝撃応答解析手法に関する検討, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.411-412, 2007.
- 10) 日本材料学会: 金属材料強度試験便覧, 養賢堂, 1977.
- 11) Miner, A. M. : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, pp.A159-A164, 1945.
- 12) Lemaître, J. : *A Course On Damage Mechanics*, Springer Verlag, 1992.
- 13) 安藤智啓: 曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計手法の開発に関する研究, 室蘭工業大学博士 (工学) 論文, 2001.
- 14) 玉井宏樹, 園田佳巨, 後藤恵一, 梶田幸秀, 濱本朋久: 桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1219-1226, 2007.

(2008 年 9 月 18 日受付)