

(26) 繰返し衝突が作用するRC部材の累積損傷に関する一考察

A Numerical study on cumulative damage of RC members under repeated impact loading

玉井宏樹*, 篠崎誠**

Hiroki TAMAI*, Makoto SHINOZAKI**

*博士(工学), 福岡大学助教, 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)

**福岡大学大学院修士課程学生, 建設工学専攻(〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

キーワード: RC部材, 性能照査, 繰返し衝突, 累積損傷
(RC member, performance check, repeated impact, cumulative damage)

1. 緒言

近年, 構造物の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた研究が様々な実施されており, 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では「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」¹⁾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と言える。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も容易に想定できる。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。

上記のような背景の下, 著者らは, 繰返し衝撃荷重が作用するRCはりの累積損傷度や残存性能評価を適切に評価可能な解析手法の確立に向けた研究^{2),3)}を実施してきた。その結果, 鉄筋とコンクリートに損傷力学ベースの累積損傷モデルを導入することで, 繰返し衝撃荷重時のRCはりの累積残留変位を適切に再現できることを確認した。また, 鉄筋の累積損傷度に着目することで, 部材の残存性能を簡易に評価可能であることを示した。

本論文は, まず, 繰返し衝突が作用するRC部材の累積損傷や残存性能に関する知見を得るために, 繰返し衝突に関連する国内外の既往の研究を整理し, 著者らが過去に提案した累積損傷モデルを導入した衝撃解析手法の概要について述べている。次に, 提案手法を用いて, 同一累積入力エネルギーに基づく複数の繰返し衝突解析を実施することで, 累積入力エネルギーと部材の累積損傷度の関係性に関して検討を行い, さらに繰返し衝突による部材の累積損傷と単発衝突による部材の累積損傷の関係性について考察を行ったものである。

2. 既往の研究のレビュー

繰返し衝突を受けるRC部材の累積損傷や残存性能評価に関する既往の研究を概観してみる。まず, 実験的研究では, Knab や Clifton⁴⁾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⁵⁾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⁶⁾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。

次に, 解析的研究では, 著者らの取り組み以外では, 岸⁷⁾がLS-DYNAを用いて, RC桁の繰返し衝撃解析を実施し, 繰返し衝撃荷重載荷の累積残留変位と単一載荷における残留変位が等しくなる時の重錘の落下高さを同定し, 落下高さは繰返し載荷時の全入力エネルギーと等価になる高さにほぼ対応することや, そのときの除荷後の自由振動性状は最終繰返し載荷時のそれとほぼ対応することを明らかにしている。

3. 累積損傷モデルを用いた繰返し衝撃解析手法の概要

3.1 解析手法の概要

著者らが提案した繰返し衝突解析手法は鉄筋とコンクリートにそれぞれ累積損傷モデルを導入し, それらにより算出された累積損傷度を剛性や強度の低下率として捉えたものである。簡単に説明すると, 鉄筋の累積損傷モデルは, 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。コンクリートの累積損傷度を評価するためには、鉄筋と同様に低サイクル疲労の概念を適用することが得策であると考えられるが、コンクリートの繰返し衝突現象に関する研究はほとんど存在せず、どのようなモデルを用いるべきか知見不足な点が否めないため、本研究では Lemaitre の損傷モデルに基づいた損傷連成の弾塑性構成式を用いることで、コンクリートの累積損傷度を評価することとした。詳細な説明は参考文献 1) に譲り、本論文では割愛させていただく。

3.2 解析手法の妥当性検証

解析手法の妥当性検証には、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載荷速度 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 回衝突させる漸増繰返し衝突実験⁹⁾を用いた。解析対象 RC はりは図-1 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 単純ばりである。解析モデル、材料定数をそれぞれ図-2、表-1 に示す。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、仮定した鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係を図-3 に示す。構成則にひずみ速度依存性は考慮していない。時間積分法は、陰解法であるシングルステップフーボルト法を用い、 1.0×10^{-6} (sec) から 1.0×10^{-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。

妥当性検証のための解析結果として、図-4 に解析により得られた累積残留変位と衝突回数との関係を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と考えている。

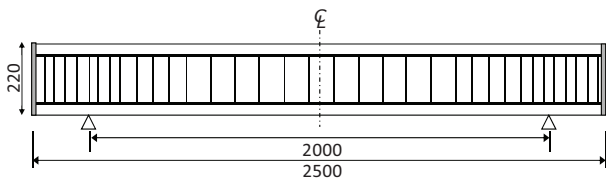


図-1 解析対象 RC はり (単位:mm)

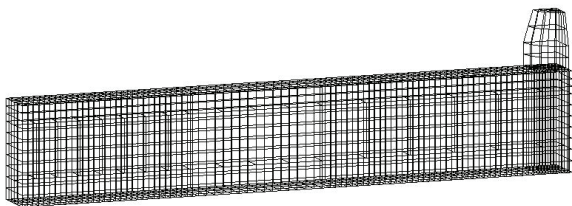


図-2 解析モデル (対象性を考慮した 1/4 モデル)

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 ³)	7.85	2.45	
損傷パラメータ	S	—	0.0001
	P_D	—	0.0008
	D_{Cr}	—	0.6
	α	0.6	—
	C	0.013	—

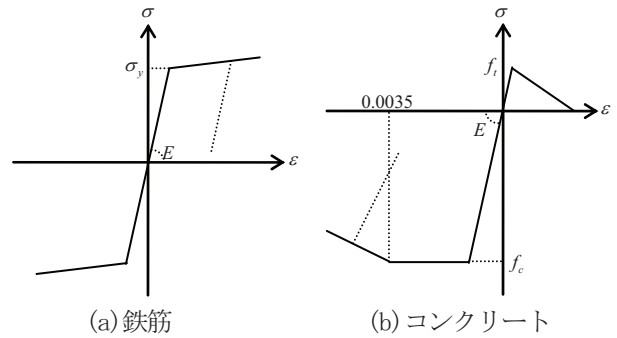


図-3 仮定した応力-ひずみ関係

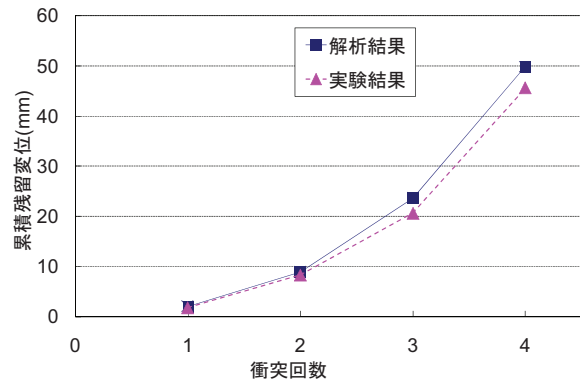


図-4 累積残留変位の比較

4. 累積入力エネルギーと累積損傷の関係

4.1 解析概要

繰返し衝突を受ける RC はりの累積残留変位や主鉄筋の累積損傷が累積入力エネルギーと如何なる関係にあるか、また、同一入力エネルギーの単発衝突による損傷状態と如何なる関係にあるかを調べる目的で、衝突物質量と衝突回数を一定とした同一累積入力エネルギーの複数の解析を実施した。ここで、衝突物質量を一定とした場合の累積入力エネルギーは式(1)で定義されるものである。

$$\text{累積入力エネルギー} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m v_i^2 \right) \quad (1)$$

ここに、 n は衝突回数、 m は衝突物質量、 v は衝突速度を表す。本研究では、衝突物質量を 200kg、衝突回数を

3回と一定とした。また、解析対象 RC はり、解析モデル、材料モデルならびに解析手法は妥当性が検証された 3.2 と同じである。

表-2 解析ケース

解析ケース	衝突速度(m/s)			備考
	1回目	2回目	3回目	
ケース 1	1.0	2.0	3.0	漸増 繰返
ケース 2	1.0	3.0	2.0	ランダム 繰返
ケース 3	2.0	1.0	3.0	
ケース 4	2.0	3.0	1.0	
ケース 5	3.0	1.0	2.0	
ケース 6	3.0	2.0	1.0	漸減 繰返
ケース 7	約 2.2	約 2.2	約 2.2	一定 繰返
ケース 8	約 3.7	—	—	単発

4.2 解析ケース

解析ケースは表-2 に示す 8 ケースで、大別すると漸増繰返し衝突、漸減繰返し衝突、一定速度繰返し衝突、ランダム繰返し衝突、単発衝突である。ケース 1 は 1 回目衝突速度 1.0m/s から増分速度 1.0m/s で繰返し衝突させる漸増繰返し衝突であり、ケース 6 は 1 回目衝突速度 3.0m/s から 1.0m/s ごと漸減させる漸減繰返し衝突である。ケース 2～5 は衝突回数と衝突速度に特に規則性を設けていないケースで、本研究においてはランダム繰返し衝突と呼んでいる。ケース 7 は 1 回目、2 回目、3 回目で同一衝突速度になるように算出した約 2.2m/s を衝突速度とした一定繰返し衝突である。ケース 8 は、3 回の繰返し衝突による累積入力エネルギーと等しい単発衝突速度を算出し、それを用いた単発衝突である。ケース 8 は、繰返し衝突を受ける RC はりの累積残留変位や主鉄筋の累積損傷が同一入力エネルギーの単発衝突による損傷状態と如何なる関係にあるかを調べる目的で設定した。全ケースを見てわかるように、本研究では比較的低速度の衝突現象に絞って検討を実施した。

4.3 解析結果

(1) 同一累積入力エネルギーと累積残留変位の関係

図-5 は累積残留変位と衝突回数の関係を表したものである。この図から、漸増繰返し衝突（ケース 1）の場合、1 回目で約 1.9mm、2 回目で 9.5mm、3 回目で 23.3mm と衝突回数との関係は累乗的に増加していることが確認できた。一方、漸減繰返し衝突（ケース 6）では、1 回目の衝突で約 15.1mm と大きく残留し、その後、衝突回数に伴い、累積増加率が低減していく傾向が確認できた。一定速度繰返し衝突（ケース 7）では、1 回目

で約 8.0mm、2 回目で約 16.0mm、3 回目で約 24.0mm という風に線形的に増加していくことが確認できた。また、ランダム繰返し衝突（ケース 2～5）の場合、衝突順番と衝突速度に規則性がないので、結果として表れる累積残留変位と衝突回数にも規則的な関係は見られないことが確認できた。ケース 2～7 の 3 回衝突後の最終的な累積残留変位を確認すると、ケース 1 は約 23.3mm、ケース 2 は約 23.9mm、ケース 3 は約 23.9mm、ケース 4 は約 24.4mm、ケース 5 は約 24.0mm、ケース 6 は約 24.1mm、ケース 7 は約 24.0mm となり、ほぼ同じ値であった。つまり、衝突物質量と衝突回数を一定とした場合、衝突順番や衝突速度に関係なく、累積入力エネルギーが同一であれば、部材損傷の簡易的な指標である累積残留変位はほぼ同じ値を示すことが確認できた。

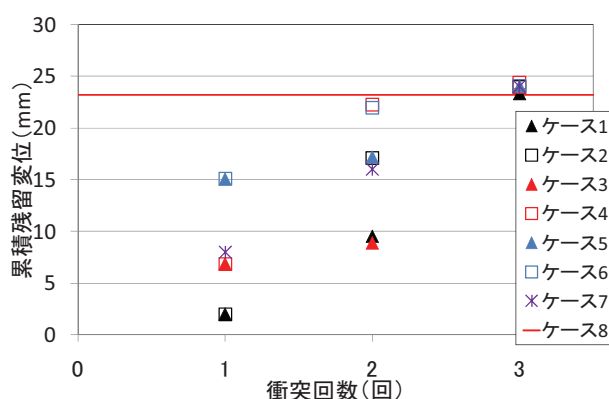


図-5 累積残留変位と衝突回数の関係
(全ケースの比較)

(2) 同一累積入力エネルギーと主鉄筋の累積損傷の関係

図-6 に主鉄筋の累積損傷度と衝突回数の関係を示す。主鉄筋の累積損傷度も部材の累積残留変位と同様に、漸増繰返し衝突（ケース 1）の場合、衝突回数が増えるに連れて累乗的に増加する傾向にあり、漸減繰返し衝突（ケース 6）の場合、1 回目の衝突により損傷度が約 0.45 と大きな値を示し、その後、衝突回数に伴い、累積値が小さくなる傾向が確認できた。また、一定速度繰返し衝突（ケース 7）の場合、1 回目で約 0.15、2 回目で約 0.28、3 回目で約 0.44 と線形的に増加していく傾向にあり、ランダム繰返し衝突（ケース 2～5）の場合、累積損傷度と繰返し衝突回数には特に規則性はないことが確認できた。3 回目衝突後の最終的な主鉄筋の累積損傷度は、ケース 1 で約 0.50、ケース 2 で約 0.56、ケース 3 で約 0.53、ケース 4 で約 0.53、ケース 5 で約 0.52、ケース 6 で約 0.54、ケース 7 で約 0.44 となり、全ケース約 0.50 くらいで同じであることが確認できた。つまり、衝突物質量と衝突回数を一定とした場合、衝突順番や衝突速度に関係なく、累積入力エネルギーが同一であれば、部材損傷の簡易的な指標である主鉄筋の累積損傷度はほぼ同じ値を示すことが確認できた。

さらに、RC 部材の累積残留変位と主鉄筋の累積損傷度の傾向が同様であったことから、RC 部材の累積残留変位と主鉄筋の累積損傷度は1対1対応の等価な関係にあると言える。



図-6 主鉄筋の最大累積損傷度と衝突回数との関係 (全ケースの比較)

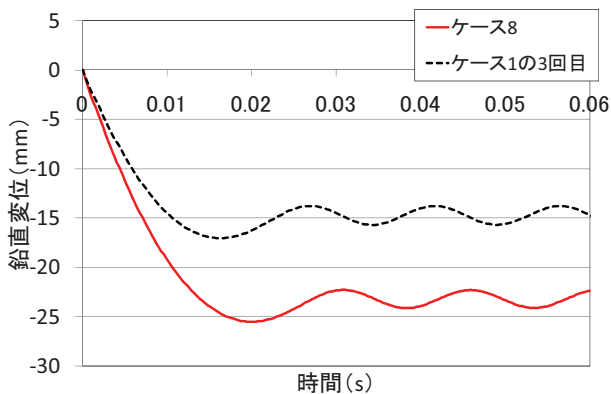


図-7 変位応答比較 (ケース1の3回目とケース8)

(3) 繰返し衝突による累積損傷と単発衝突による損傷の関係

まず、図-5より、繰返し衝突によるRC部材の累積残留変位は、本解析条件の場合、約24mm前後に収まった。一方、同一入力エネルギーを有する単発衝突(ケース8)の場合、残留変位は約23.2mmとなった。次に、図-6より、繰返し衝突による主鉄筋の累積損傷度は、本解析条件の場合、約0.5前後に収まった。一方、同一入力エネルギーを有する単発衝突(ケース8)の場合、損傷度は約0.60となった。また、図-7に、ケース1の3回目衝突時の変位応答とケース8の単発衝突時の変位応答との比較図を示す。過去2回分の累積残留変位をゼロにリセットしてグラフ化しているため、最大変位が異なるのは当たり前だが、最大変位以降の自由振動特性がほぼ等しい傾向を示していることがわかる。

これらの結果から、繰返し衝突によるRC部材の累積損傷状態は、繰返し衝突による累積入力エネルギーを有する単発衝突によるRC部材の損傷状態とほぼ等価であることが確認できた。

5. 結論

本研究の成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 提案手法を用いて、同一累積入力エネルギーに基づく複数の繰返し衝突解析を実施した。その結果、衝突物質と衝突回数を一定とした場合、衝突順番や衝突速度に関係なく、累積入力エネルギーが同一であれば、部材損傷の簡易的な指標である累積残留変位はほぼ同じ値を示すことが確認できた。また、その傾向は、主鉄筋の累積損傷度でも同様であり、部材の累積残留変位と主鉄筋の累積損傷度は1対1対応の等価な関係にあることが考えられる。
- (2) また、繰返し衝突によるRC部材の累積損傷状態は、繰返し衝突による累積入力エネルギーを有する単発衝突によるRC部材の損傷状態とほぼ等価であることが確認できた。このことは、繰返し衝突問題を簡易に単発衝突問題として置換して考えることの可能性を示しているといえる。

本研究の提案手法では、部材の累積残留変位や鉄筋のひずみなどマクロ応答の再現精度は高いが、ひび割れ分布などの局所応答を評価するには至っていない。今後、繰返し衝突を受けるRC部材をより精度良く評価するためには、コンクリートの局所破壊を適切に評価可能な局所損傷モデルを構築する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会 構造工学委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，構造工学技術シリーズNo.52，2007。
- 2) 玉井宏樹，園田佳巨：繰返し衝撃荷重を受けるRC部材の残存性能評価に関する解析的研究，土木学会論文集A Vol.64, No.4, pp.915-925, 2008。
- 3) 玉井宏樹，園田佳巨：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，構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 1366-1375, 2009。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 岸徳光，今野久志，三上浩：実規模RC桁の繰返し重錘落下衝撃挙動解析に関する破壊エネルギー等価概念の適用性検討，構造工学論文集，Vol. 56A, pp. 1137-1148, 2010。
- 8) 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。