

(18) 繰返し衝突が作用する RC 部材の残存性能評価に関する研究

A study on evaluation of residual performance of RC member under repeated impact load

玉井宏樹*, 園田佳巨**, 坂田力

Hiroki Tamai*, Yoshimi Sonoda**, Tsutomu Sakata***

*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)

*博士(学術) 福岡大学准教授, 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)

Key Words: repeated impact analysis, accumulative damage level, RC beam

キーワード: 繰返し衝突解析, 累積損傷度, RC はり

1. 緒言

2007年10月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から「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」¹⁾が出され, 性能照査型耐衝撃設計の基礎が確立された段階にきている。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, 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, L.I.Knab や J.R.Clifton²⁾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³⁾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⁴⁾は, 防波堤の衝撃碎波力, 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。

そこで, 本研究では, 鉄筋の累積損傷度に着目して 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。

2. 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, 鉄筋およびコンクリートの累積損傷モデルを以下に説明する。

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⁵⁾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。提案した累積損傷モデルの説明を以下に示す。

Manson-Coffin 関係は, 材料定数に相当する α 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 $\Delta \epsilon_p$ 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したときの理想的な両振幅応答による塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ 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。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 をもとにした累積損傷度の評価法を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, まず, この仮想ループに対する塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_{pn}$ を Manson-Coffin 関係を用いて算出する。この塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_{pn}$ を用いると一義的に破壊までの繰返し衝突回数 N_{fn} 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想の損傷度増分量 ΔD_{0n} が以下のように算出できる。

$$N_{f0n} = \left(\frac{C}{\Delta \varepsilon_{pn}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

$$\Delta D_{0n} = \frac{1}{N_{f0n}} \quad (2)$$

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、

$$m_n = \frac{S_n}{S_{0n}} \quad (3)$$

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 ΔD_{0n} に m_n を乗じることで、実際の損傷度増分量 ΔD_n を以下のように定義した。

$$\Delta D_n = m_n \cdot \Delta D_{0n} \quad (4)$$

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。

$$D_n = \sum_{k=1}^n \Delta D_k \quad (5)$$

このように算出された累積損傷度を $n+1$ 回目の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。

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⁶⁾を採用することとした。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6)に預け、ここでは簡潔な説明を行う。

コンクリート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(6)で表される。

$$\dot{D} = \frac{Y}{S} \cdot \dot{p} \cdot H(p - p_D) \quad (6)$$

ここに、 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、 H はヘビサイド関数、 p_D は損傷発

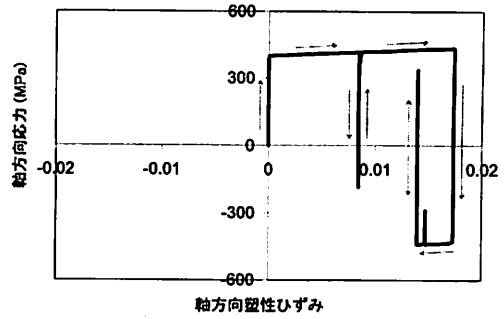


図-1 衝突荷重を受けるRCはり内の鉄筋の軸方向応力-塑性ひずみ関係

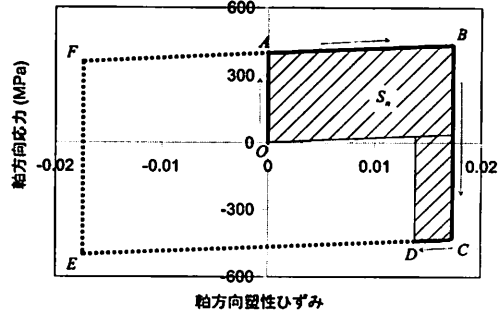


図-2 Manson-Coffin 関係へ読み替えるための仮想ループ

生累積塑性ひずみを表す。つまり、本研究では式(6)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(7)に示す損傷を考慮した構成則を導入することで、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定性的には表現できるものと考えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1-D) \left\{ E_{ijpq} - \frac{9G^2 \sigma'_{pq} \sigma'_{ij}}{3G\sigma_{eq}^2 - \frac{\sigma_{eq}^3}{1-D} \cdot \frac{\partial F_D}{\partial Y}} \right\} \dot{\varepsilon}_{pq} \quad (7)$$

ここに、 G はせん断弾性係数、 σ_{eq} は相当応力、 E_{ijpq} は弾性剛性マトリクスを表す。

3. RC部材を対象とした繰返し衝突シミュレーション

3.1 解析概要

解析対象 RC はりは純スパン 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荷重実験⁷⁾に使用された RC はりである。解析モデルは図-3に示す対称性を考慮した 1/4 モデルであり、鉄筋にはトラス要素、コンクリートおよび重錘には固体要素を用いた。また、鉄筋およびコンクリートの材料定数を表-1に示す。

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 の鋼製重錘を処女載荷速度

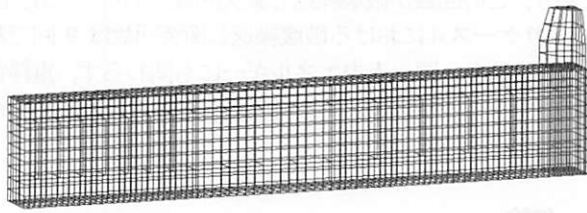


図-3 解析モデル (解析対象の1/4をモデル化)

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	—

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		一定速度繰返し衝突 (2回衝突)
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		
ケース8	約1.4	400	

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、衝突速度をパラメータ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、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、本解析においては、2回衝突までの解析を実施し、その結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。

3.2 ケース1の解析結果 ~有用性の検証~

まず、ケース1の解析結果として図-4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

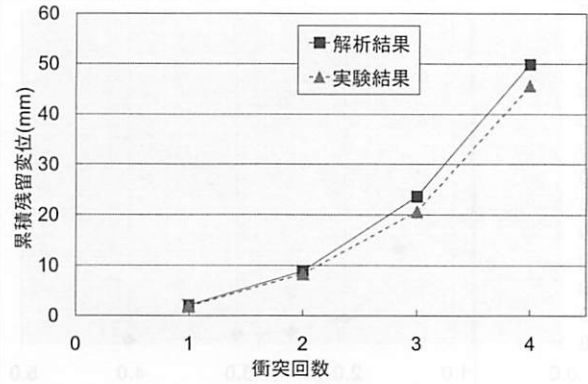


図-4 累積残留変位と衝突回数の関係

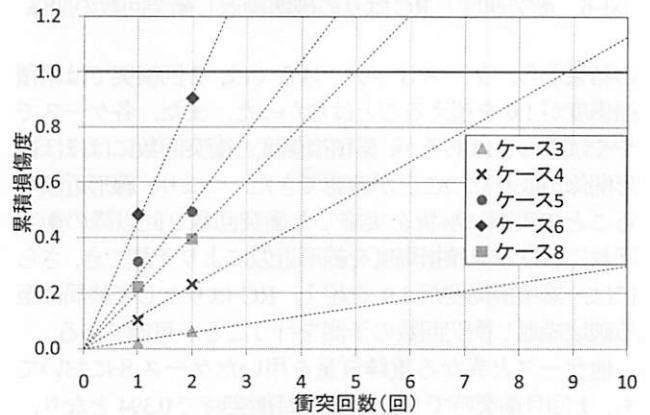


図-5 主鉄筋における累積損傷度と衝突回数の関係

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されたためであると考えられる。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言える。

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-5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

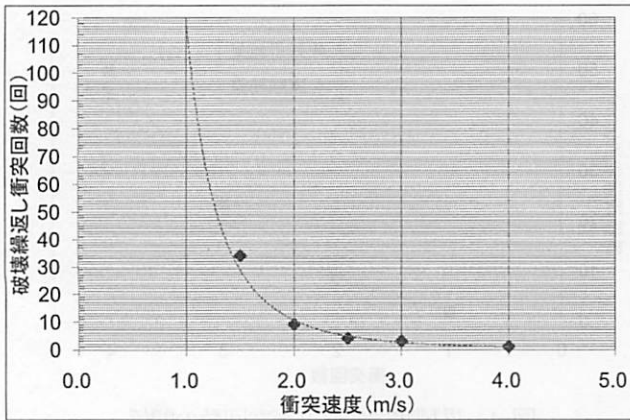


図-6 衝突速度とRCはりの破壊繰返し衝突回数の関係

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においても、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。

(2) 衝突速度と破壊繰返し衝突回数の関係

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の関係を図-6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。

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、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。

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-5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-6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. 結論

本研究では、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った。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 繰返し衝突を受ける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はりの破壊繰返し衝突回数を算出した場合、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) 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) 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。
- 2) L.I.Knab and J.R.Clifton：Cumulative Damage of Reinforced Concrete Subjected to Repeated Impact, Cement and Concrete Research, Vol.12, pp.359-370, 1982。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 日本材料学会：金属材料強度試験便覧、養賢堂、1977。
- 6) Lemaitre, J.：A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1992。
- 7) 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。