

繰返し衝撃載荷を受ける RC ラーメン構造に関する数値解析手法の検討

A consideration on numerical analysis method for RC Portal frame subjected to iterative loading

寒地土木研究所 ○正 員 岡田慎哉 (Shin-ya okada)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 寒地土木研究所 正 員 今野久志 (Hisashi Konno)
 寒地土木研究所 正 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

現在、我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。ロックシェッドに代表される耐衝撃構造物の設計に関しては、現在においても許容応力度法設計によって行われているところであるが、これらの設計に関しても、今後、性能照査型設計法に移行し、より合理的な設計を可能とする必要であるものと考えられる。

性能照査型設計法の適用に当たっては、要求される性能に対して想定される各種の限界状態に適合した断面設計を行うことが必要である。具体的には、少なくとも使用限界状態や終局限界状態の規定、また、それに対応した耐力照査手法の確立が必要となる。

また、今後は道路インフラの高齢化が進み、インフラの維持管理が重要となってくる。これは落石防護構造物においても同様である。この場合には既設の構造物の性能を精度よく推定することが必要となる。しかしながら、既設構造物においては必ずしも健全な状態で維持されているとは限らず、ある程度の損傷や劣化を伴う場合が多い。この場合においては、これらの損傷や劣化を考慮に入れた性能照査が必要になる。

著者らは過去に RC 部材の衝撃挙動解析に関して、小型部材を対象に衝撃荷重載荷に対する各種解析手法の妥当性の検討¹⁾等を実施しており、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示している。また、アーチ構造やラーメン構造などの構造全体系を考慮した場合についても^{2),3)}高い精度を有していることを確認している。

さらに、この手法を発展させ、損傷を受けた構造物に対しても精度よく解析を実施することが可能となれば、前述のような維持管理における補修補強設計において、現状の性能を照査するための有効な手法となる。

このような観点から、本研究では耐衝撃用途 RC 構造物の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、繰返し衝撃荷重を作用させた小型 RC ラーメン模型を対象として、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法を提案し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。

なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 971)⁴⁾を用いている。

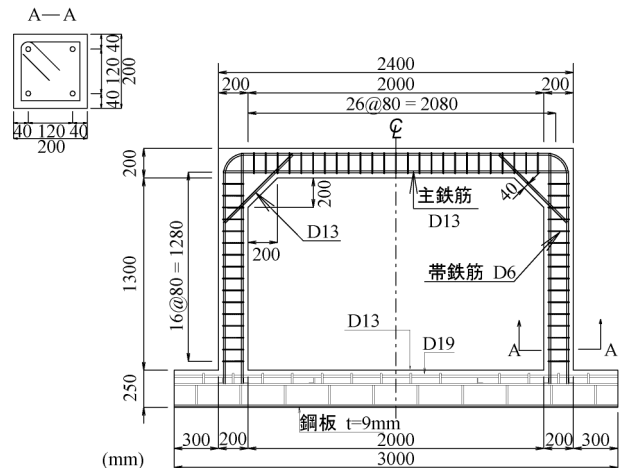


図-1 小型 RC ラーメン模型形状寸法

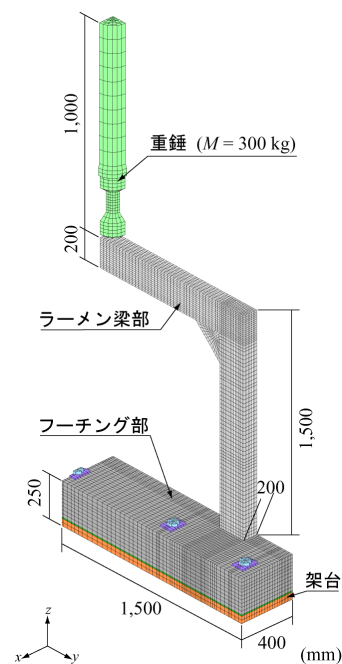
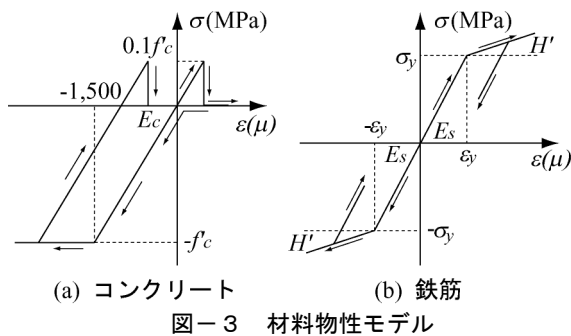


図-2 数値解析モデル

2. 実験概要

図-1には、小型 RC ラーメン模型の概要を示す。本解析で対象としたのは、実構造の 1/4 程度の大きさに縮小したラーメン構造の模型である。内空幅 2,000 mm、内空高さ 1,300 mm とし、部材断面は 200×200 mm の矩形断面とした。主鉄筋には D13 を用い、帯鉄筋として D6 を 80 mm ピッチで配筋している。なお、



頂版部と側壁部の間に 200 mm のハンチを有する。

本数値解析では、小型 RC ラーメン模型の入力エネルギーに対する損傷程度を把握することを目的として実施した、初期衝突速度および増分衝突速度を 1 m/s とした漸増繰返し衝撃実験を対象としている。

3. 解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2には、本数値解析で用いた RC ラーメン構造の要素分割状況を示している。

せん断補強筋要素には剛性、断面積、質量を等価とした梁要素を用い、その他の要素には全て 8 節点の三次元固体要素を用いて離散化している。なお、要素の積分点は 1 点積分を基本としているが、軸方向鉄筋に関しては断面方向に 1 要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して 8 点積分とした。

解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮し、スパン方向および断面幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとし、面对称を設定している。境界条件として、架台下面を完全固定とし、固定のための治具をモデル化し、試験体の固定条件を再現している。また、重錘-コンクリート間、固定治具-コンクリート間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。なお、コンクリート-鉄筋要素間は完全付着とした。

減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.0 % と設定している。

3.2 材料物性モデル

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。

図-3(a)には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相対ひずみが 1,500 μ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定している。なお、モデルには実験時の材料物性値を用いることとし、圧縮強度を 25.3 MPa とした。

図-3(b)には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素に用いた物性モデルは、塑性硬化係数 H' を弾性係数 E の 1 % とするバイリニア型の弾塑性体とした。硬化則には等方硬化則を適用している。なお、用いた降伏強度は実験に用いた鉄筋のミルシートから設定しており、D13 に関しては 391MPa、D6 に関

しては 365 MPa と設定した。

重錘、支点治具および定着鋼板に関する全要素に関しては、弾性体とした。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と設定している。なお、各材料の降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

3.3 繰返し衝撃荷重載荷時の解析概要

本数値解析では、繰返し衝撃荷重載荷実験を適切に再現するために、以下の手順で数値解析を実施している。

- 1) 重錘要素を繰返し載荷回数分だけ、予め RC 梁上に重複して設置する。
 - 2) 一次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は、重錘が RC 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 200 ms とする。なお、減衰定数は、前項で述べているように、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.0 % とする。
 - 3) 一次載荷時の数値解析終了後、鉛直方向最低次固有振動数に対する臨界減衰定数を入力して 200 ms 間の数値解析を実施し、RC 梁を数値解析的に静止させる。同時に一次載荷時に使用した重錘要素を除去する。
 - 4) 二次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は一次載荷時と同様に 200 ms とする。なお、減衰定数は、一次載荷時と同様の値を入力する。
 - 5) 以降 n 次載荷終了まで 3)、4) の手順を繰り返す。
- 以上により、数値解析を実施している。

4. 数値解析結果

4.1 重錘衝撃力

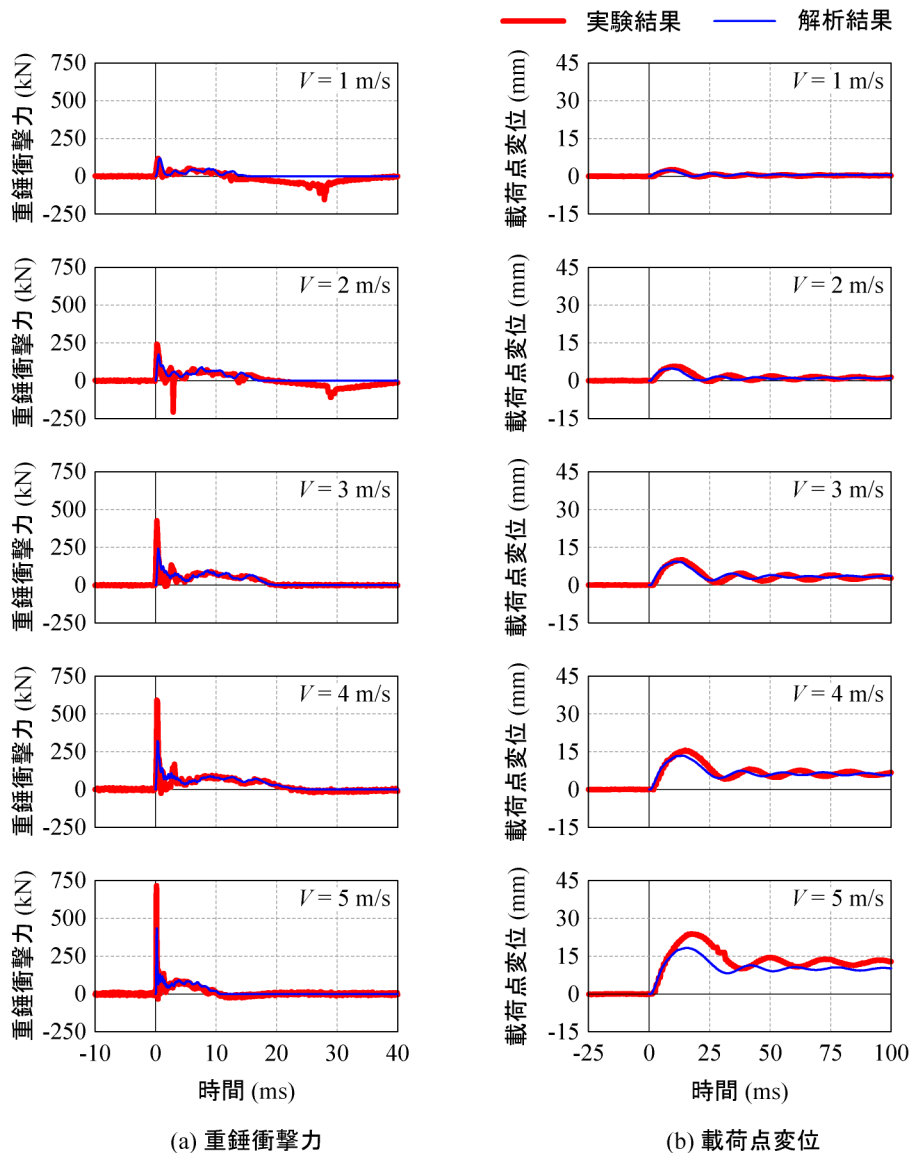
図-4には、各種応答波形を実験結果と解析結果を重ねて示す。図-4(a)には、重錘衝撃力波形を示す。

図より、実験結果から、重錘衝撃力波形は衝突回数に関わらず、重錘衝突と同時に急激に立ち上がる第 1 波と、その後、10 ~ 20 ms 程度の振幅の小さい正弦半波状の第 2 波により構成されている。また第 1 波においてその最大値を示している。

数値解析結果は、第 1 波に関しては衝突回数 1 回目 ($V = 1 \text{ m/s}$) においては略等価な評価となっているものの、衝突回数の増加に伴い、過少評価する傾向が見られる。その後の第 2 波においては、衝突回数に関わらず大略等しい評価となっている。

図-5には、実験結果および解析結果の各最大応答値について、その関係を表す形で示す。図-5(a)には、重錘衝撃力の関係を示す。

図より、重錘衝撃力の最大値は、衝突回数の増加に伴い実験結果との差異が増加する傾向を示し、数値解析結果が最大で 45 % 程度の過少評価となっていることが分かる。これは、数値解析において繰返し衝突さによる衝突点の局所的な圧壊が精度よく再現されておらず、衝突時の応答に差異が生じているものと推察される。



図－4 各種応答波形

4. 2 載荷点変位

図－4 (b)には、載荷点変位波形を実験結果と解析結果を重ねて示す。

図より、実験結果から載荷点変位波形は重錘衝突から若干遅れて励起され、緩やかに最大値を示した後、残留変位成分を含む自由減衰振動状態に移行する傾向を示している。

数値解析結果は、衝突回数5回目（速度 $V = 5$ m/s）の場合において若干の過小評価となっているものの、この波形性状を良く再現している。また、その残留変位や自由減衰振動についても良く再現している。

図－5 (b)には、実験結果および解析結果の最大載荷点変位について、その関係を表す形で示す。

図より、載荷点変位の最大値は非常に高い再現性を示しており、その実験結果との差異は5%程度に収まっている。

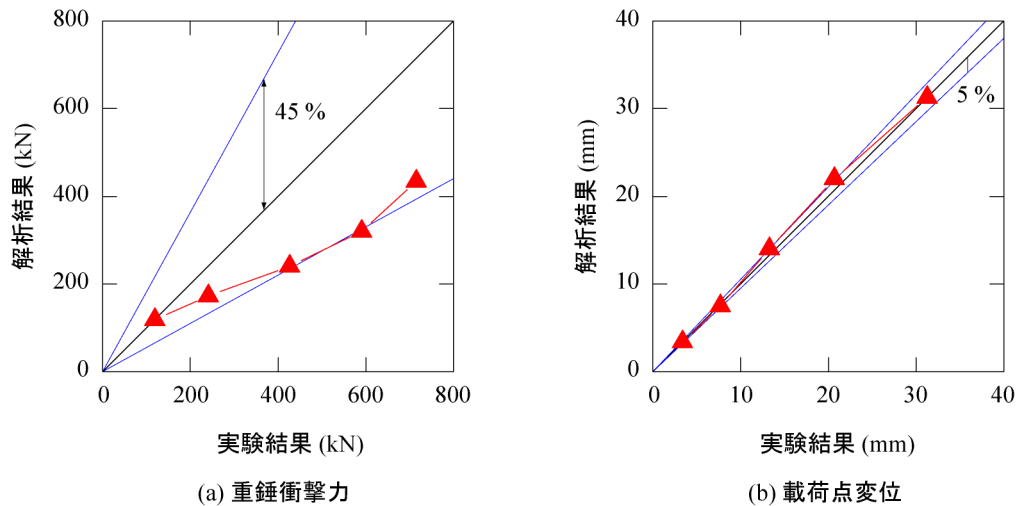
これより、本解析手法は損傷が累積してゆく状態を極めて良好に再現可能であるものと判断される。

4. 3 ひび割れ分布

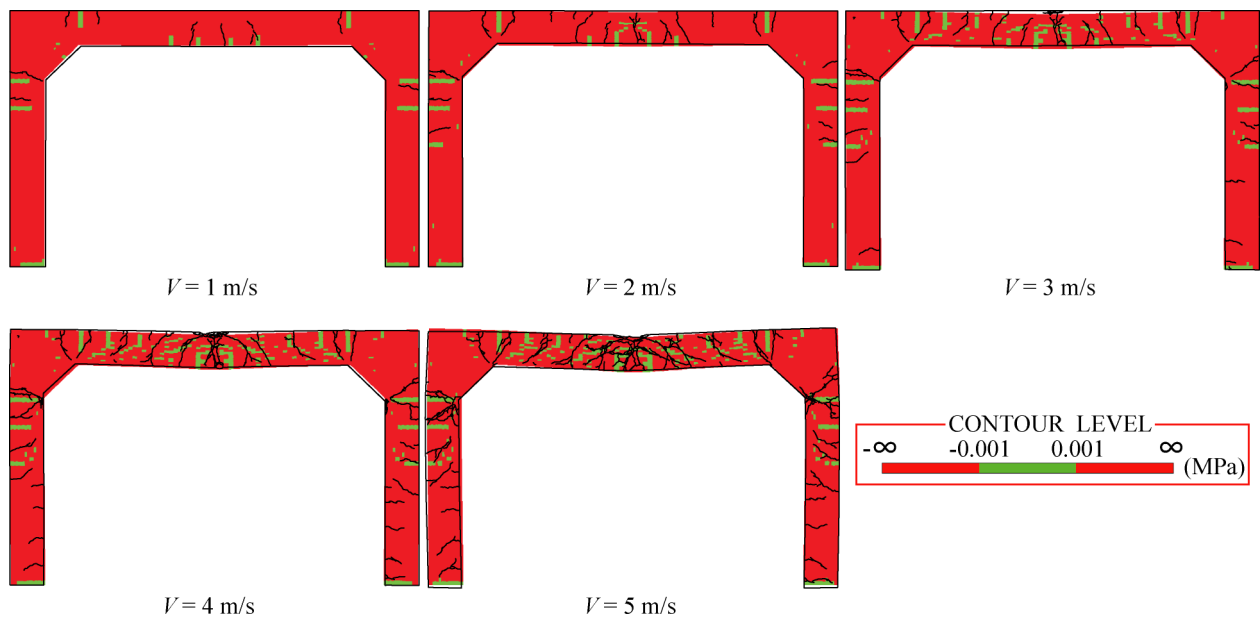
図－6には、実験終了後のひび割れ分布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお、数値解析結果は、図中緑色で示された要素がひび割れと等価と判断される要素である。

図より、実験結果においては衝突速度が増加するに伴いひび割れが進展し、併せてひび割れ範囲が拡大していることが分かる。また、衝突回数5回目（速度 $V = 5$ m/s）の場合には載荷点近傍において押し抜きせん断状の斜めひび割れが生じていることが確認できる。

数値解析結果に着目すると、衝突回数1回目（速度 $V = 1$ m/s）の場合について見ると、ひび割れ発生位置およびそのひび割れ長に関して、実験結果を良く再現していることが分かる。さらに衝突速度が増加するにつれてひび割れが進展する状況についても、その進展状況やひび割れ発生範囲の増加についても実験結果を良く再現している。衝突回数4回目（速度 $V = 4$ m/s）以降において、側壁下部の内縁に生じるひび割れについて、数値解析結果はこれを再現できていないものの、衝突回数5回



図ー5 各最大応答値の実験結果と解析結果の関係



図ー6 ひび割れ分布性状

($V = 5 \text{ m/s}$) までの損傷範囲の傾向を良く再現しているものと判断される。

5. まとめ

本研究では、耐衝撃用途 RC 構造の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、ラーメン構造を対象として繰り返し衝撃荷重載荷時の残存耐力評価法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析手法を提案し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 提案の解析手法を用いることにより、各載荷時の最大重錘衝撃力に関しては実験結果を過小評価する傾向を示すものの、重錘衝撃力波形性状は大略再現可能である。
- 2) 載荷点変位波形に関しては、各載荷時の最大応答変位や、除荷後の減衰自由振動特性、残留変位を精度よく評価可能である。
- 3) 各載荷時点における累積のひび割れ分布に関しても、

実験結果を大略再現可能である。

- 4) 提案の手法を用いることで、RC ラーメン構造の繰返し衝撃荷重載荷時の累積損傷の程度や残存耐力に関する評価が可能であるものと推察される。

参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 2) 岡田慎哉, 岸徳光, 今野久志, 川瀬良司: RC アーチ構造の衝撃応答解析手法の開発に関する研究, 構造工学論文集 Vol.53A CD-ROM, 2007.3.
- 3) 西弘明, 岸徳光, 岡田慎哉, 千葉知子: 重錘落下衝撃荷重載荷時の RC ラーメン模型に関する弾塑性衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, 2008.7.
- 4) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.