

ファイバー要素を用いた RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis of RC beams using fiber element approach

室蘭工業大学 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
構研エンジニアリング ○正 員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
(株)JSOL 正 員 武田 雅弘 (Masahiro Takeda)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

著者らの研究グループは、衝撃荷重を受ける RC 梁の耐衝撃挙動を明らかにするために、既往の研究においてスパン長、断面寸法、鉄筋比の異なる小型から大型に至る RC 梁を対象に数多くの衝撃実験¹⁾や数値解析²⁾を実施してきた。その結果、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施することにより、実験結果を大略再現可能なことを明らかにしている。しかしながら、実務レベルにおける構造物の耐衝撃設計を考えた場合には、高度な三次元弾塑性衝撃応答解析に代わるより簡易な解析手法の確立が重要と考えられる。

一方、近年構造物の耐震設計分野では、構造物の地震時挙動や耐震安全性を検討するために、ファイバー要素を用いた時刻歴応答解析が広く実施されている。また、その適用性に関しては、実験的・数値解析的に数多くの検討が行われている。しかしながら、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析に関しては、山本ら³⁾や藤掛ら⁴⁾の研究があるものの、それほど多くは実施されていないのが現状である。

このような背景より、本研究では衝撃荷重を受ける小型 RC 梁を対象に、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析を実施し、その適用性に関する検討を行った。ここでは、形状寸法の異なる 2 種類の矩形 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験¹⁾を対象に数値解析を実施し、载荷点変位および支点反力に着目して検討を行った。なお、本数値解析には、汎用解析ソフトである Engineer's Studio⁵⁾を使用した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図 1 には、本数値解析に用いた RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。A 梁は梁幅が 200 mm、梁高が 250 mm、純スパン長が 3 m、B 梁はそれぞれ 200 mm、300 mm、2.7 m の矩形 RC 梁である。なお、コンクリートの圧縮強度 f'_c および主鉄筋の降伏強度 σ_y は、A 梁ではそれぞれ 23.5 MPa、404 MPa、B 梁では 23.6 MPa、380 MPa であった。表 1 には RC 梁の静的設計値の一覧²⁾を示している。表 1 より、本 RC 梁は計算せん断余裕度が 1.5 以上であることより、静的には曲げ破壊型で終局に至ることが分かる。

2.2 実験方法

実験は、鋼製重錘を所定の高さから梁スパン中央に一度だけ自由落下させることにより実施している。表 2 には実験ケースを一覧にして示している。使用した重錘

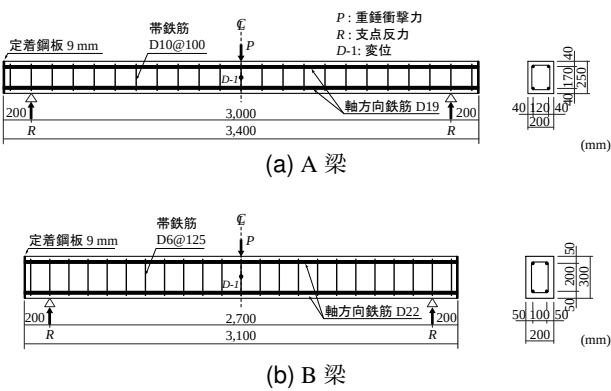


図 1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表 1 静的設計値

試験体名	主鉄筋比 ρ_t (%)	計算曲げ 耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断 耐力 V_{usc} (kN)	計算せん断 余裕度 α
A 梁	1.36	57.5	97.4	1.70
B 梁	1.55	94.9	177.6	1.87

表 2 実験ケース

試験体名	重錘質量 M (kg)	衝突速度 V (m/s)
A 梁	300	4.0, 5.0, 6.0, 7.0
B 梁	500	3.13, 4.20, 5.05, 5.78, 6.42, 7.00

の質量は、A および B 梁で異なり、それぞれ 300 kg、500 kg である。

RC 梁は写真 1 に示すように支点反力測定用ロードセル付きの支点治具上に設置し、かつ重錘落下衝撃荷重載荷時の梁端部の跳ね上がりを防止するために、鋼棒と鋼梁からなる跳ね上がり防止治具を用いて固定されている。また、その治具は支点と共に軸を中心に回転でき、ピン支持に近い構造となっている。実験における測定項目は、重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位である。なお、後述の解析には、実験で得られた重錘衝撃力を入力荷重として梁スパン中央に与えている。

3. 数値解析の概要

3.1 材料物性モデル

図 2 には、ファイバー要素解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料構成則を示している。

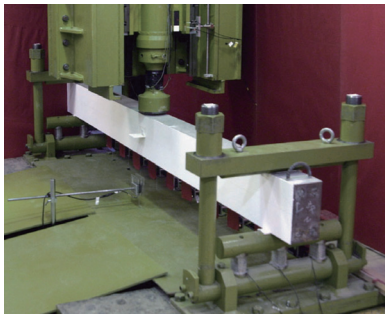


写真1 実験状況

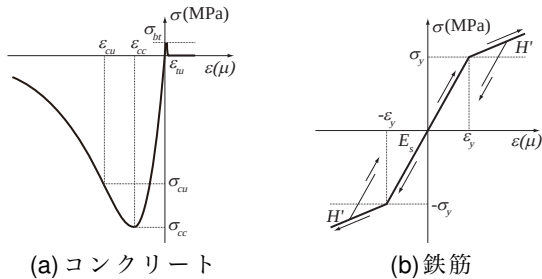


図2 材料構成則

(1) コンクリート

図2(a)にはコンクリート要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。土木学会コンクリート標準示方書に準拠し、圧縮側に関しては多次曲線で近似されており、引張側に関しては引張強度に達した段階で応力が解放されるようなモデルとなっている。また、分散クラックモデルに基づく経路依存型の材料構成則であり、除荷や再載荷の過程も考慮している。

(2) 鉄筋

図2(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に用いた応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素に用いた構成則モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮したバイリニア型の等方弾塑性体モデルである。弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s および単位体積質量 ρ_s には、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$, $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた。また、塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%を仮定している。

3.2 数値解析モデルと境界条件

本論文では、ファイバー要素における要素長が解析結果に与える影響を検討するために、長手方向の要素分割長(以下、要素長)を変化させた解析を実施し、適切な要素長を決定している。図3には、本数値解析で用いたファイバーモデルの要素分割状況の一例を示している。なお、梁断面の分割に関しては、図に示すように梁幅および梁高をそれぞれ10分割とした。

実験におけるRC梁は、写真1に示すように専用の治具によって固定されている。しかしながら、これらの治具を本数値解析で適切にモデル化することは煩雑さを伴うことより、支点のモデル化に関する事前解析を実施した。その結果、支点治具が梁の動的応答性状に及ぼす影響が極めて小さいことが確認されたため、治具のモデ

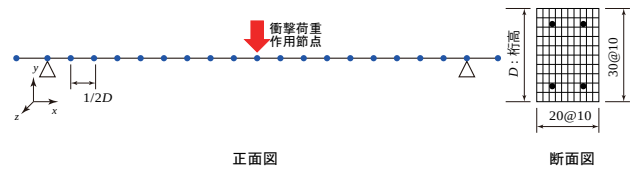


図3 ファイバー要素の分割状況(B梁の場合)

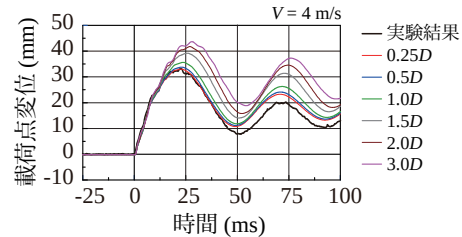


図4 荷点変位波形と要素長の関係(A梁)

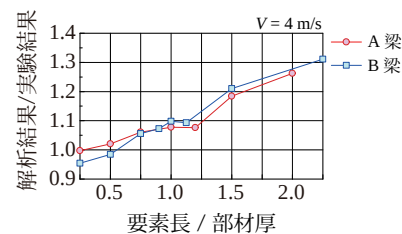


図5 最大変位と要素長の関係(A, B梁)

ル化は省略した。なお、支点位置に相当する節点に z 軸回りの回転を許容することによって支点部の挙動を再現することとした。

衝撃荷重の荷重方法に関しては、実験結果より得られた重錘衝撃力波形をスパン中央の節点に作用させることによって再現した。なお、減衰定数 h は質量比例型減衰項のみを考慮することとし、鉛直方向最低次振動数に対して $h = 1\%$ とした。

4. 数値解析結果と考察

4.1 要素長に関する検討

前述のように、ファイバーモデルを用いる場合には要素長が解析結果に与える影響を確認する必要がある。ここでは、AおよびB梁の $V = 4 \text{ m/s}$ を対象として、要素長と実験結果の比較により、最適な要素長を検討した。

図4には、A梁の場合における要素長と荷点変位波形の関係を示している。図より、要素長が大きくなるほど、荷点変位も過大に評価する傾向にあることが分かる。図5には、A, B梁における最大変位と要素長の関係について、縦軸に解析結果と実験結果と比を取って整理している。図より、A, B梁ともに実験結果との誤差を10%以内にするためには、要素長は部材厚の1倍程度以下とする必要があることが分かる。また、本数値解析の範囲では0.5Dとすることで実験結果を精度よく再現できるものと判断し、最適な要素長を0.5Dとすることとした。

4.2 各種時刻歴応答波形

図6および図7には、A, B梁に関する時刻歴応答波

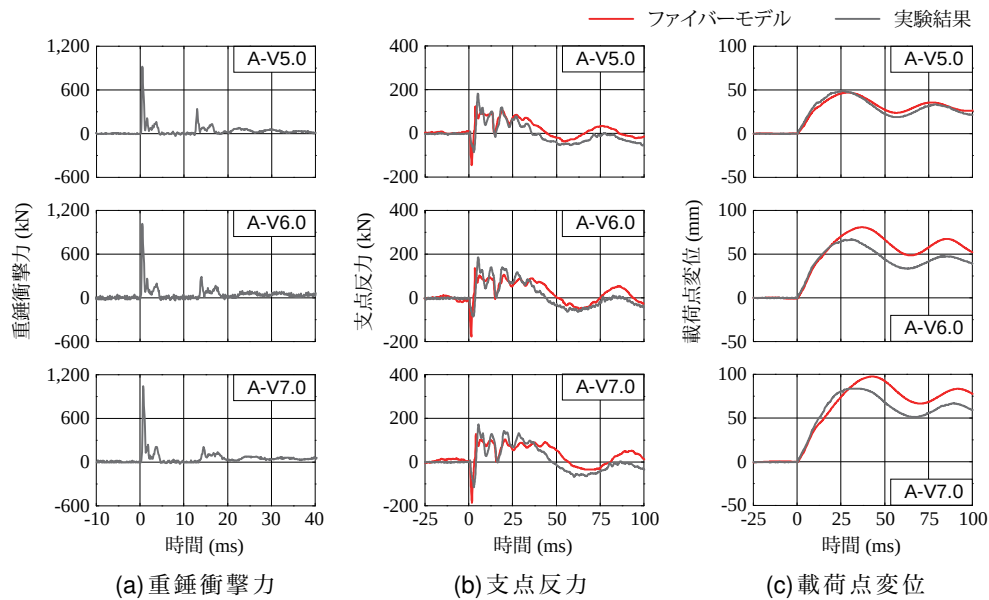


図 6 A梁における各種時刻歴応答波形

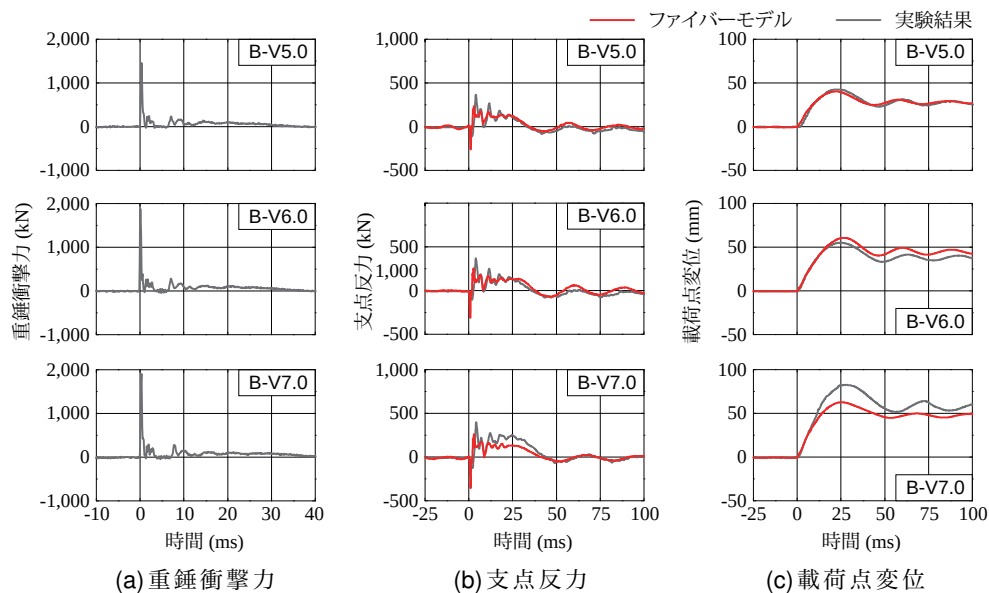


図 7 B梁における各種時刻歴応答波形

形を示している。ここでは、衝突速度 $V \approx 5, 6, 7$ m/sについて抜粋して示している。

(a)図の重錘衝撃力波形に着目すると、衝突初期に発生した振幅の大きく周期の短い第1波と、後続の振幅が小さく周期の長い第2波から構成されていることが分かる。なお、前述のようにファイバー要素解析には、この衝撃力波形を入力荷重として設定している。

次に、(b)図に示す実験結果の支点反力波形に着目すると、いずれの衝突速度に関しても重錘衝突直後に負の値を示し、その後正の値に反転し最大応答値に至っている。その後、高周波の振動を伴いながら徐々に低下し、自由減衰振動に移行している。自由減衰振動に至るまでの時間に着目すると、(a)図に示す重錘衝撃力の作用時間が2～3 msであるのに対して、支点反力は30～50 msと長く、また衝突速度に対応して長くなる傾向にある。

一方、解析結果における支点反力波形に着目すると、最大支点反力は実験結果よりも小さく評価されているものの、最大支点反力発生前後の波形性状に関しては精度よく再現している。さらに、負反力に転じる時刻なども大略一致しているものと判断される。

(c)図に示す载荷点変位波形に着目すると、実験結果の場合には、正弦半波状の主波動を示した後、いずれの梁においても残留変位が発生している。なお、最大変位発生以降の波形において、減衰自由振動状態が見られることより、梁の損傷程度は比較的軽微であるものと推察される。解析結果と実験結果を比較すると、解析結果は初期勾配や最大変位、残留変位など実験結果を大略再現できることが分かる。また、最大変位発生後の減衰自由振動状態の波形性状に関しても大略再現可能であることが分かる。しかしながら、A梁の衝突速度が $V \geq 6$ m/s

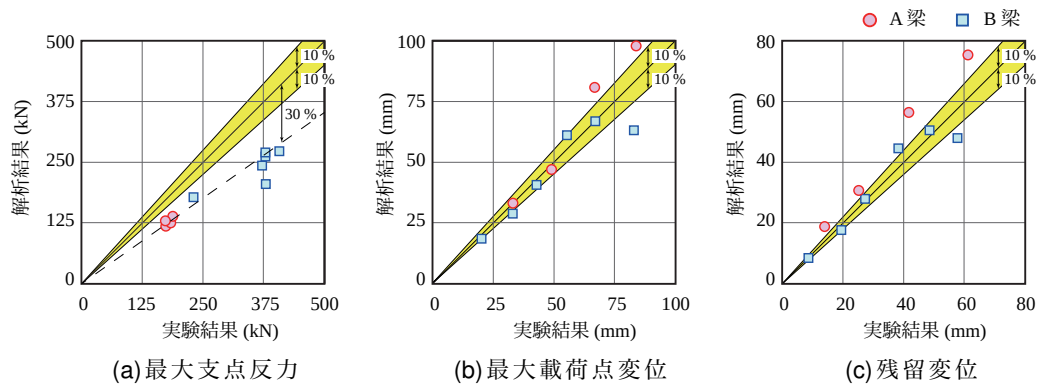


図 8 各応答値に関する解析結果と実験結果の比較

表 3 各種応答値一覧

ケース名	最大支点反力 $R_{\max}$ (kN)		最大変位 $\delta_{\max}$ (mm)		残留変位 δ_{res} (mm)	
	実験 結果	解析 結果	実験 結果	解析 結果	実験 結果	解析 結果
A-V4.0	173.29	118.59	33.09	33.04	13.94	18.84
A-V5.0	183.54	124.86	49.03	46.91	25.19	30.76
A-V6.0	188.20	138.54	66.79	80.78	41.67	56.45
A-V7.0	172.74	129.03	83.95	97.81	61.20	75.35
B-V3.0	230.83	178.68	20.37	18.39	8.62	8.59
B-V4.0	380.03	205.68	33.11	28.70	19.47	17.72
B-V5.0	372.43	243.25	43.00	40.64	27.31	28.05
B-V6.0	378.98	262.12	55.53	61.08	38.35	44.61
B-V6.5	379.29	270.87	67.21	66.86	48.64	50.67
B-V7.0	408.12	272.88	83.12	63.16	57.87	48.06

の結果に見られるように、衝突速度の増加に伴い、梁の損傷が大きくなると、解析結果の精度は低くなる傾向にあることが分かる。

4.3 各応答値に関する数値解析結果と実験結果の比較

表 3 には、解析結果から得られた全てのケースにおける最大支点反力 $R_{\max}$ 、最大載荷点変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} を一覧にして示している。また、図 8 には、表 3 に示した最大支点反力 $R_{\max}$ 、最大載荷点変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} について、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。なお、図中の 45° 勾配を有する実直線は、解析結果と実験結果が一致していることを、網掛の部分はそれに対する誤差幅 10 % を意味している。すなわち、実直線より下側の領域は実験結果が大きいことを、上側の領域は解析結果が大きいことを示している。

(a) 図より、最大支点反力に関する解析結果と実験結果の関係を見ると、解析結果は実験結果よりも最大支点反力を約 30 % 過小に評価する傾向にあることが分かる。なお、実験結果における最大支点反力は、衝突速度にかかわらず、ほぼ一定値となる傾向を示しており、数値解析結果においてもその傾向は確認できる。

(b) 図より、最大載荷点変位 $\delta_{\max}$ に関する解析結果と実験結果の関係を見ると、その誤差は、形状寸法や衝突速度にかかわらずほぼ 10 % 以内の領域に分布しており、

両者の値は非常によく対応していることが分かる。

また、(c) 図に示す残留変位 δ_{res} に関しては、A 梁の解析結果は実験結果を過大評価する傾向にあるものの、B 梁の場合にはその誤差はほぼ 10 % 以内であることが分かる。

以上より、提案のファイバー要素を用いた数値解析手法は、最大支点反力は過小評価する傾向が見られるものの、最大変位に関しては 10 % 以内の誤差で評価できることが明らかになった。

5. まとめ

- 1) 曲げ破壊型で終局に至る RC 梁の場合には、要素長を部材厚の 1/2 程度とすることにより、衝撃荷重載荷位置における梁の応答変位を精度よく再現可能である。
- 2) また、支点反力に関しては、最大応答値を過小評価する傾向にあるものの、その波形性状を大略再現可能である。

今後は、実規模に近い大型 RC 梁に対しても数値解析を実施し、ファイバー要素を用いた解析手法の適用性について更なる検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 25420566) の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp. 1251-1260, 2007.
- 2) 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.
- 3) 山本満明, 榎谷 浩, 堀江義徳: 断面分割法を用いたコンクリートはりの衝撃挙動解析に関する一考察, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 4, pp. 259-268, 2001.
- 4) 藤掛一典, リー・ビン, サム・スーン: 衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位の解析的評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 1204-1214, 2009.
- 5) Engineer's Studio, フォーラムエイト社