

論文 衝撃荷重を受ける RC はりの動的応答性状に関するファイバー要素解析法の適用性

小室 雅人^{*1}・牛渡 裕二^{*2}・武田 雅弘^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：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を対象に数値解析を実施し、載荷点変位および支点反力に着目して検討を行った。その結果、1) 曲げ破壊型で終局に至る RC 梁の場合には、要素長を桁高の 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こと、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こと、などが明らかになった。

キーワード：ファイバー要素、動的応答性状、RC はり、衝撃応答解析

1. はじめに

現在、落石防護施設構造物等の耐衝撃用途鉄筋コンクリート（以後、RC）構造物は、落石対策便覧¹⁾等の要領に基づき許容応力度設計法の下に設計が行われている。一方で、構造物の設計法は、許容応力度設計法から性能照査型設計法へ移行しており、耐衝撃用途構造物に関しても同設計法に基づいた耐衝撃設計法の確立が望まれている。

このような状況のもと、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²⁾や数値解析^{3), 4)}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、実務レベルでの構造物の耐衝撃設計を考える場合には、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必要であると判断される。

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法が実務的に広く用いられている⁵⁾。しかしながら、衝撃応答解析に関しては、山本ら⁶⁾や藤掛ら⁷⁾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、本研究ではファイバー要素を用いた衝撃応答解析法の妥当性を検討することを目的に、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²⁾を対象にファイバー要素を用いた数値解析を実施し、主に載荷点変位および支点反力に着目してその適用性に関する検討を行った。なお、本数値解析には、汎用解析用ソフトである Engineer's Studio⁸⁾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 の矩形 RC 梁であり、主鉄筋として D19 を 4 本、帯鉄筋として D10 を 100 mm 間隔で配筋している。また、B 梁は梁幅が 200 mm、梁高が 300 mm、純スパン長が 2.7 m であり、主鉄筋には D22 を 4 本、帯鉄筋には D6 を 125 mm 間隔で配筋している。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

表－1 静的設計値

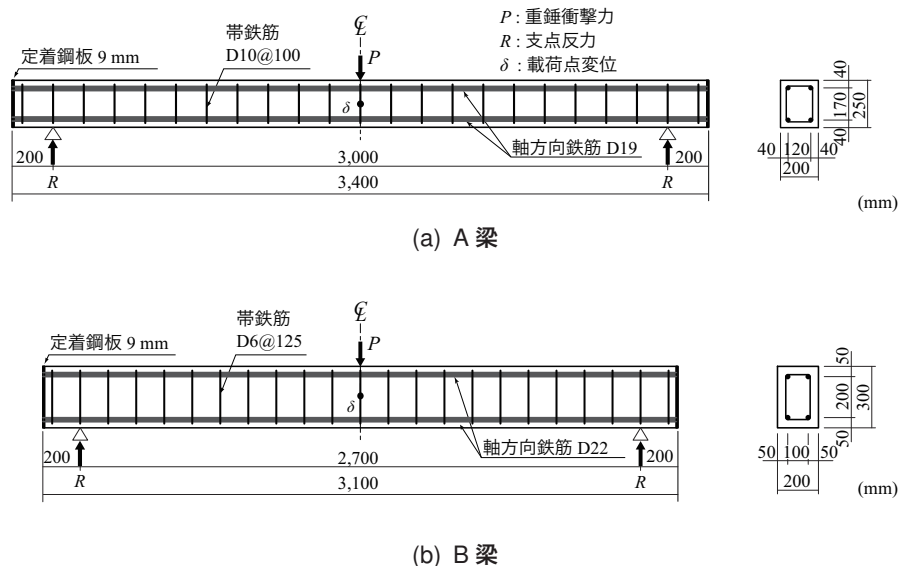
試験体名	主鉄筋比 p_t (%)	計算曲げ耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断耐力 V_{usc} (kN)	計算せん断余裕度 α
A 梁	1.36	57.5	97.4	1.70
B 梁	1.55	94.9	177.6	1.87

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

*2 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 博(工) (正会員)

*3 (株) JSOL エンジニアリング本部 修(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



図－１ RC 梁の形状寸法および配筋状況

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



写真－１ 実験状況

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。なお、跳ね上がり防止用治具は支点と共に軸を中心に回転できるように工夫されている。これより、支点部の境界条件は、ピン支持に近い構造となっている。

測定項目は、重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 δ 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、本解析で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。

(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。コンクリートに関しては、東京大学コンクリート研究室で開発されたコンクリートの除荷・再載荷を含む経路依存型の構成則モデル^{9), 10)}を用いており、圧縮領域における応力－ひずみ関係は次式で表される。

$$\sigma = KE_0(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (1a)$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{peak}}} \left[1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{peak}}} \right) \right] \right\} \quad (1b)$$

$$E_0 = 2 \frac{f'_c}{\varepsilon_{\text{peak}}}, \quad \varepsilon_{\text{peak}} = 447.2 \cdot f'_c \cdot 10^{-6} \quad (1c, d)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{\max} - \frac{20}{7} \varepsilon_{\text{peak}} \left[1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{peak}}} \right) \right] \quad (1e)$$

ここで、 f'_c ：圧縮強度 (MPa)、 ε_p ：塑性ひずみ、 ε_{\max} ：過去に受けた圧縮ひずみの最大値である。

一方、引張側に関しては (2) 式で表され、引張強度 f_t に達した段階で応力が解放されるモデルである。なお、引張強度に関しては圧縮強度の 1/10 とした。

$$\sigma = R_f \cdot f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon} \right)^C \quad (2a)$$

$$R_f = K^3, \quad f_t = 0.1 f'_c \quad (2b, c)$$

$$\varepsilon_{tu} = 102.9 \cdot f'_c^{1/6} \cdot 10^{-6} \quad (2d)$$

ここで、 C ：引張軟化係数であり、本解析では $C = 7.5$ と設定した。

(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

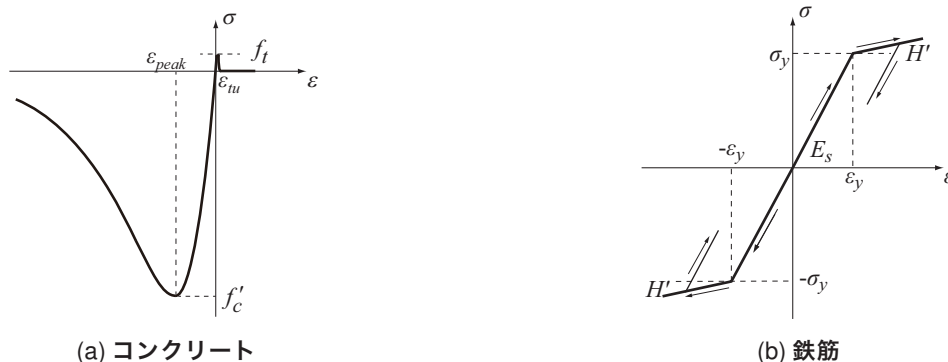


図-2 材料構成則

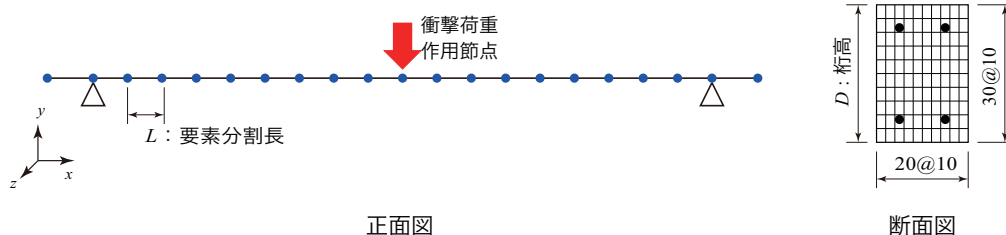


図-3 ファイバー要素の分割状況(B 梁の場合)

よびポアソン比 ν_s および単位体積質量 ρ_s は、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$, $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。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 L (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。本解析では要素(部材)の中央に一つの Gauss 積分点をもつ 1 次の Timoshenko 梁要素を用いた。したがって、各要素の曲率分布は一定である。また、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ことより、ここではそのモデル化を省略した。なお、支点位置に相当する節点に対して 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。

衝撃荷重の载荷方法に関しては、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

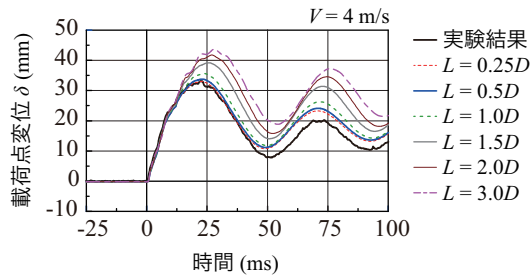
前述のように、ファイバーモデルを用いる場合には要素長 L が解析結果に与える影響を確認する必要がある。ここでは、A および B 梁の $V = 4 \text{ m/s}$ を対象として、要素長を変化させた解析結果と実験結果を比較することにより検討を行った。なお、要素長 L は桁高 D に対する割合で整理することとした。

図-4 には、A 梁の場合における要素長 L と载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、载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 L は桁高 D と同程度以下にする必要があることが分かる。

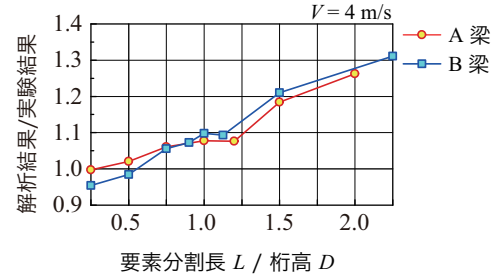
本数値解析の範囲では $L = 0.5D$ とすることで実験結果を精度よく再現できるものと判断し、要素長を $0.5D$ 程度とすることとした。

4.2 各種時刻歴応答波形

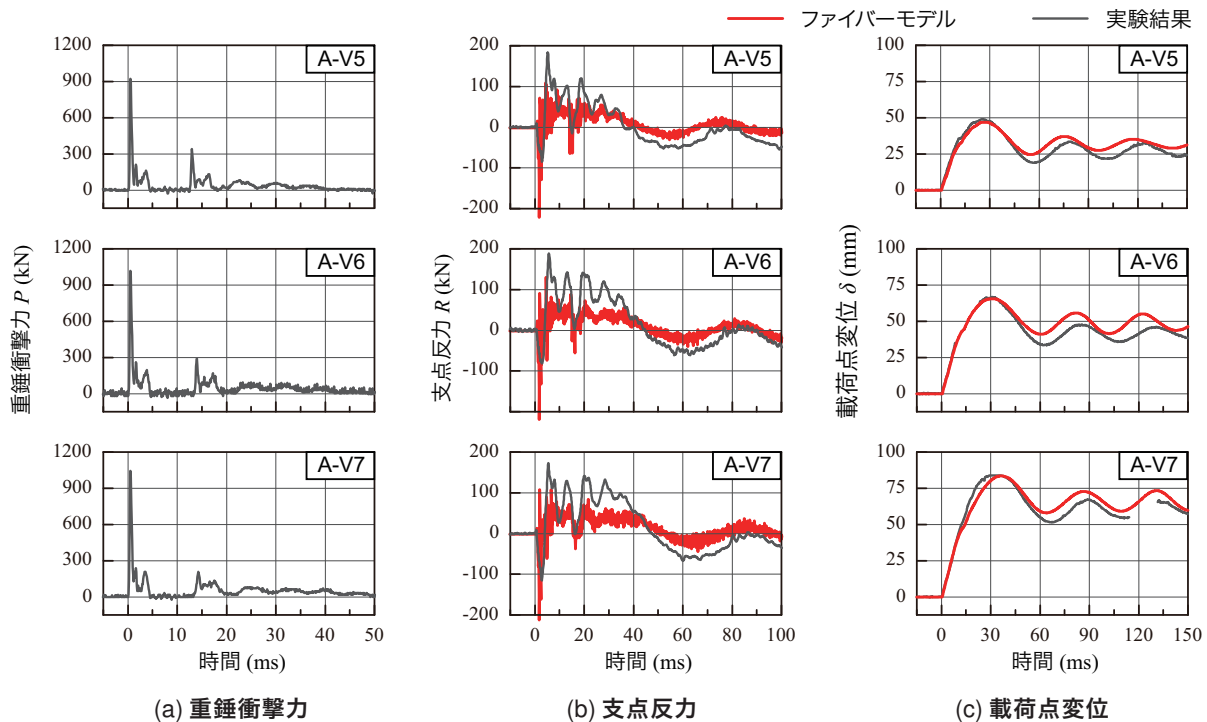
図-6 および図-7 には、A, B 梁に関する時刻歴応答波形を示している。ここでは、衝突速度 $V \approx 5, 6, 7 \text{ m/s}$ に



図－４ 載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)



図－６ A 梁における各種時刻歴応答波形

ついて抜粋して示している。

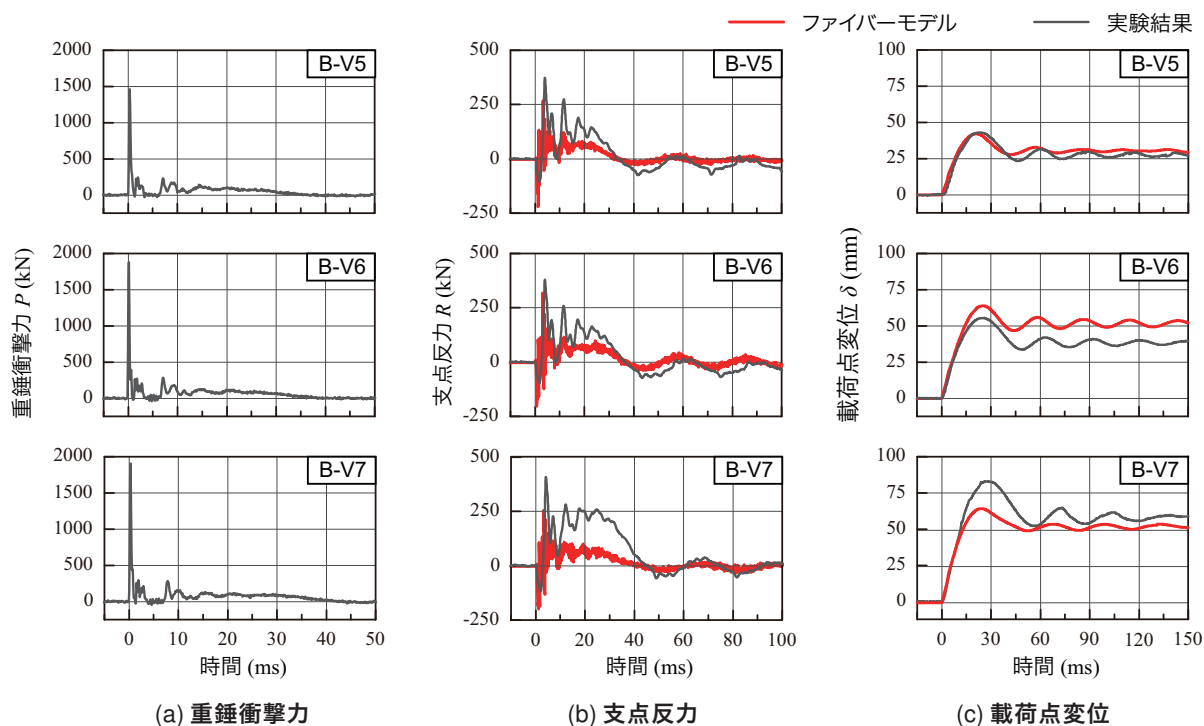
(a) 図の重錘衝撃力波形に着目すると、波形は衝突初期に発生した振幅が大きく周期の短い第 1 波と、後続の振幅が小さく周期の長い第 2 波から構成されていることが分かる。なお、前述のようにファイバー要素解析には、この衝撃力波形を入力荷重として設定している。

次に、(b) 図に示す実験結果の支点反力波形に着目すると、波形は、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、その後正側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、減衰自由振動に移行している。減衰自由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ことが分かる。

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、反力の作用継続時間は両者でほぼ一致していることより、波形全体の性状は大略再現できることが分かる。しかしながら、衝突速度 V の大きい B-V7 梁の場合には、支点反力における第 2 波目を小さく評価していることが分かる。これは、衝突速度の増大とともに載荷点直下近傍に斜め 45 度のひび割れが顕在化することを実験的に確認していることより、このような斜めひび割れが顕在化する場合には、第 2 波目の再現性が低くなる傾向にあるものと推察される。なお、最大支点反力における両者の差は、支点治具のモデル化(支持条件)による影響が一つの要因と考えられる。

(c) 図に示す載荷点変位波形に着目すると、実験結果は、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、最大変位発生以降には減衰自由振動状態に移行していることより、梁の損傷程



図－７ B 梁における各種時刻歴応答波形

表－３ 各種応答値一覧

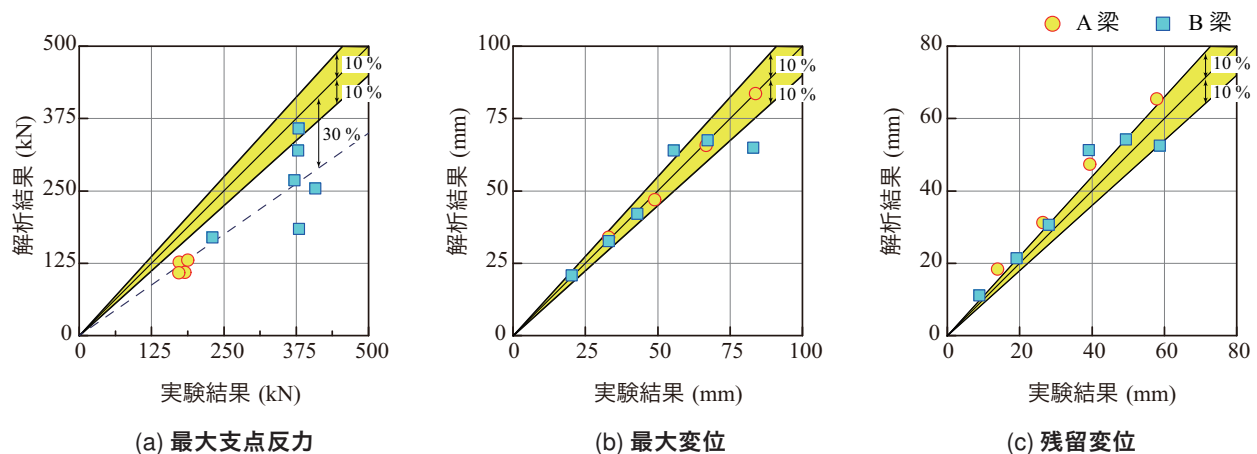
ケース名	衝突速度 V (m/s)	最大支点反力 R_{\max}		最大変位 δ_{\max}		残留変位 δ_{res}	
		R_{\max} (kN)		δ_{\max} (mm)		δ_{res} (mm)	
		実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果
A-V4.0	4.0	173.3	126.2	33.1	33.8	14.0	18.3
A-V5.0	5.0	183.5	108.4	49.0	46.9	26.5	31.2
A-V6.0	6.0	188.2	130.1	66.8	65.5	39.5	47.3
A-V7.0	7.0	172.7	108.1	84.0	83.5	58.0	65.3
B-V3.0	3.13	230.8	169.1	20.4	20.8	8.9	11.0
B-V4.0	4.20	380.0	184.4	33.1	32.6	19.2	21.4
B-V5.0	5.05	372.4	267.7	43.0	42.1	28.1	30.5
B-V6.0	5.78	379.0	319.3	55.5	63.9	39.1	51.3
B-V6.5	6.42	379.3	357.4	67.2	67.4	49.4	54.2
B-V7.0	7.0	408.1	254.2	83.1	64.9	58.8	52.4

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、残留変位等の実験結果を精度よく再現できていることが分かる。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できていることが分かる。しかしながら、B 梁の衝突速度が $V \geq 6$ m/s の結果に見られるように、衝突速度の増加に伴って梁の損傷が顕在化すると、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（以後、最大変位） δ_{\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} 、最大変位 δ_{\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、実線より下側の領域



図－8 各応答値に関する解析結果と実験結果の比較

は実験結果が解析結果より大きいことを、上側の領域は解析結果が実験結果より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過小に評価する傾向にあることが分かる。最大誤差は約 50 % であるものの、大部分は 30 % 程度以内に分布していることが分かる。

(b) 図より、最大変位 δ_{\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、解析結果は実験結果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、解析結果は実験結果を若干過大に評価する傾向にあるものの、最大変位と同様にその誤差はほぼ 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法は、最大支点反力を過小に評価する傾向にあるものの、最大変位を 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

本研究では、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析法に関する適用性を検討すること目的に、小型矩形 RC 梁の重錘落下衝撃実験を対象に検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると、以下のよう示される。

- 1) 曲げ破壊型で終局に至る RC 梁の場合には、要素長を桁高の 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) 支点反力に関しては、最大応答値を過小に評価する傾向があるものの、その波形性状は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衝撃応答解析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) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.
- 2) 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.
- 3) 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) 岸 徳光，今野久志，三上 浩，岡田慎哉：大型 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 54A，pp. 1077-1088，2008.
- 5) 堺 淳一，川島一彦：ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析，構造工学論文集，土木学会，Vol. 45，pp. 935-946，1999.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Engineer's Studio，フォーラムエイト社
- 9) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.
- 10) Maekawa, K, Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.