

ファイバー要素を用いた両端固定 RC 柱の衝撃応答解析に関する適用性検討

Applicability of fiber element method on impact response analysis of fixed RC column

室蘭工業大学大学院
(株) 構研エンジニアリング
室蘭工業大学大学院
釧路工業高等専門学校

○ 学生員 武田 雅弘 (Masahiro Takeda)
正 員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

建築物は、一般に固定荷重、積載荷重および地震荷重や風荷重等を考慮して設計が行われている。しかしながら、発生確率はきわめて低いが、自動車やヘリコプター等の衝突、列車の脱線による衝突や、ガスの屋内外爆発による偶発的な衝撃荷重の作用も想定され、人命にかかわる大事故に至る場合も少なくない。現在、日本建築学会では、このような偶発作用に対する設計ガイドラインの構築に向けた検討が鋭意進められている^{1),2)}。

このような状況のもと、著者らは、これまでに基本構造部材である RC 梁に着目して、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³⁾や数値解析を実施してきた。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、実験結果を精度良く再現可能であることを明らかにしている⁴⁾。

一方、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⁵⁾や藤掛ら⁶⁾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。

前述のように、衝撃荷重を受ける基本構造部材の耐衝撃挙動に関しては、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、推定・評価が可能であることが明らかになっている。しかしながら、実務レベルでの構造物の耐衝撃設計を想定すると、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が必要となる。

このような背景より、本研究では基本構造部材である

表-1 物性値一覧

材料	密度 ρ (ton/m ³)	弾性係数 E (GPa)	強度 (MPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	14	21	0.167
D13	7.85	206	295	0.3
D22	7.85	206	345	0.3

RC 柱を対象に、スパン中央部に車両衝突荷重が作用した場合を想定し、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析を実施した。また、同一条件で実施した三次元弾塑性衝撃応答解析より得られた結果をベンチマークとして両者を比較することにより、その適用性について検討を行った。ここでは、入力荷重として自動車およびトラックの2種類を想定し、衝突速度を $V = 20 \sim 80$ km/hr まで変化させた衝撃応答解析を実施し、載荷点変位と柱の損傷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 Engineer's Studio⁷⁾ および弾塑性衝撃応答解析用コード LS-DYNA (Ver. 971)⁸⁾ を使用した。

2. 数値解析概要

2.1 両端固定 RC 柱

図-1には、本数値解析で対象とした RC 柱の形状寸法および配筋状況を示している。本モデルは、標準的な3階建事務所建築設計例⁹⁾の1階部分の柱材を取り出したもので、柱長 2,950 mm、断面寸法 600 × 600 mm である。配筋状況に関しては、主鉄筋に D22 が 8 本、帯筋には D13 が 90 mm 間隔で配筋されており、主鉄筋の芯かぶりは 50 mm としている。

表-1には、本解析で用いた材料物性値の一覧を示している。コンクリートの圧縮強度 f'_c およびポアソン比 ν_c は、それぞれ 21 MPa、1/6 と設定した。また、鉄筋の降伏応力 f_y は規格値を用いることとし、D13 の場合で 295 MPa、D22 の場合で 345 MPa としている。なお、ポアソン比 ν_s はいずれも 0.3 とした。

2.2 数値解析モデルおよび境界条件

図-2(a)には、本数値解析で用いたファイバーモデルにおける要素分割状況を示している。ファイバー要素の要素長に関しては、要素長を変化させた事前解析を踏まえ、桁高 D の 1/2 を採用することとした。柱断面の分割に関しては、柱幅および柱高をそれぞれ 24 分割している。衝撃荷重の載荷方法に関しては、後述のように事前に実施したフルラップ衝突解析より得られた衝撃力波形を図に示すようにスパン中央の節点に作用させることによって再現した。

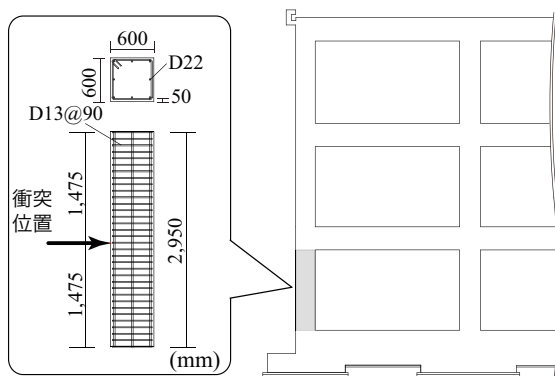


図-1 RC 柱の形状寸法および配筋状況

総要素数: 60,960
総節点数: 63,125

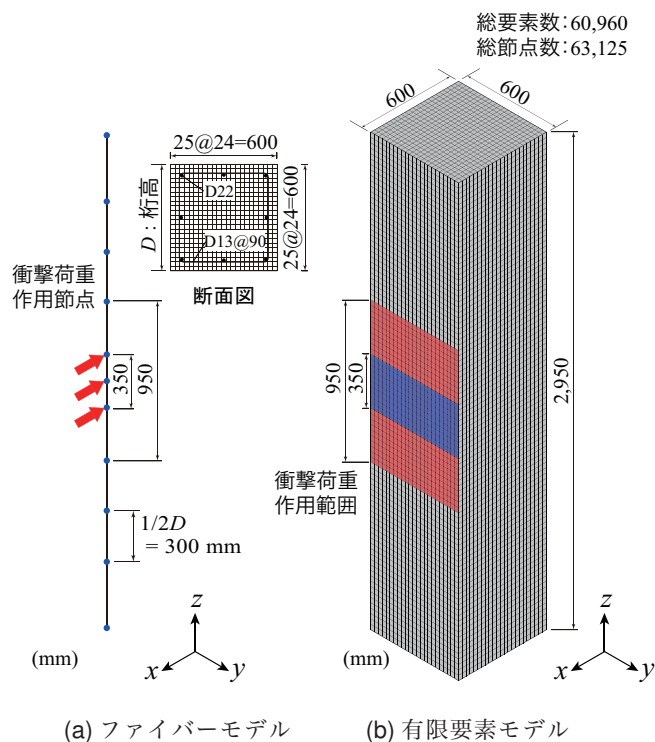


图-2 要素分割状況

図-2(b)には、RC柱の要素分割状況を示している。要素分割において、軸方向の要素長をコンクリートのひび割れの影響が適切に評価できるように、25~30 mm 程度としている。また、鉄筋には2節点梁要素を、コンクリートの要素には8節点固体要素を用いてモデル化している。なお、鉄筋とコンクリートは完全付着とした。各要素の積分点に関しては、固体要素には1点積分、梁要素には精度を向上させるために2x2 Gauss 積分を用いている。本モデルにおける総要素数および総節点数は、それぞれ約61,000 および 63,000 である。

衝撃荷重の载荷方法に関しては、ファイバーモデルと同様の衝撃力波形をスパン中央の载荷面（自動車：350 × 600 mm，トラック：950 × 600 mm）に作用させることによって再現した。また、境界条件に関しては、両モデルともに柱材の両端部を完全固定と設定した。

2.3 材料物性モデル

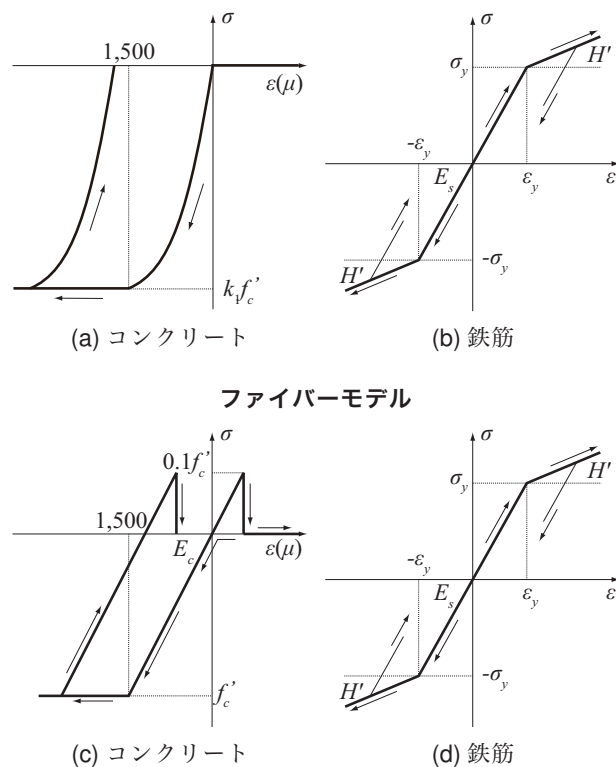
(1) ファイバー要素解析

図-3(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。ここでは、土木学会式に準拠し、圧縮側に関しては降伏点までを2次曲線で近似し、簡略化のため圧縮軟化は考慮しないものとした。なお、降伏応力は $k=0.85$ として $k f'_c$ と設定した。その時のひずみ ε_c は $1,500 \mu$ である。また、引張強度は簡略化するため考慮していない。

図-3(b)には、鉄筋に用いた応力-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。また、単位体積質量 ρ_s には公称値である $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた。なお、塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の 1% を仮定している。

(2) 有限要素解析

図-3(c)にはコンクリートに関する応力-ひずみ関係



有限要素法

図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 解析ケース

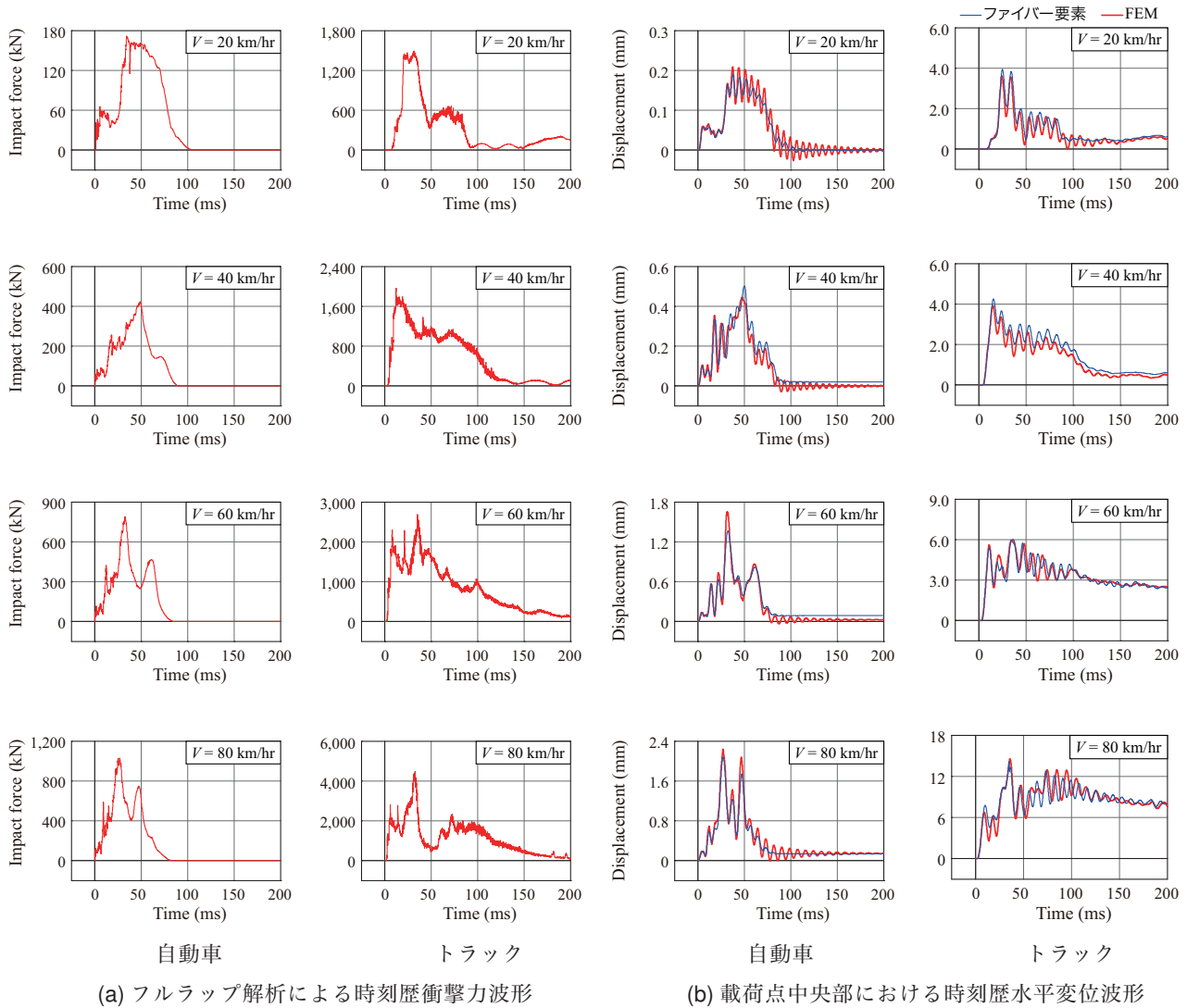
ケース名	車両種別	衝突速度 V (km/hr)	ケース名	車両種別	衝突速度 V (km/hr)
A-V20	自動車	20	B-V20	トラック	20
A-V40		40	B-V40		40
A-V20		60	B-V20		60
A-V20		80	B-V20		80

を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500 \mu$ に達した時点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。また、引張側に関しては、引張強度に達した段階で、応力を完全に解放するものとしている。なお、引張強度は RC 梁に関する重錘落下衝撃応答解析時と同様に圧縮強度の $1/10$ と仮定した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用し、内部摩擦角を 30° としている。

図-3 (d) には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。材料構成則には、ファイバーモデルと同様に塑性硬化係数 H' を弾性係数の 1% とするパイリニア型の等方硬化則を適用した。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

2.4 数値解析ケース

表-2には、各解析ケースの一覧を示している。本数値解析では、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析の適用性を検討するために、2種類の入力荷重を設定した。すなわち、入力荷重としてNCAC¹⁰⁾で公開されている自動車モデルおよびトラックモデルの2種類を採用し、それぞれのモデルを所定の速度で剛体壁に衝突（以後、フルラップ解析）させ、得られた衝撃力波形を用いた。また、自動車



図－4 各種時刻歴応答波形

およびトラックの総重量はそれぞれ、1,350 kg、8,000 kgと設定した。

3. 数値解析結果および考察

3.1 各種応答波形

図－4 (a) には、フルラップ解析より得られた自動車およびトラックに関する衝撃力の時刻歴波形を比較して示している。自動車の場合に注目すると、衝突速度の増加に伴って、衝撃力は増加する傾向が見られる。一方で、衝撃力の継続時間は短くなる傾向にあることが分かる。トラックに着目すると、最大衝撃力は自動車の5～10倍程度になっており、荷重継続時間に関しても2倍程度の値を示している。なお、前述のように衝撃応答解析を行う際には、この衝撃力波形を入力荷重として作用させている。

図－4 (b) には、衝撃応答解析より得られた柱のспан中央点での水平変位の時刻歴波形を、ファイバー要素解析とFEM解析を比較する形で示している。いずれの衝突速度においても、FEM解析の場合には最大変位発生時以降で高周波成分が励起されている。一方、ファイバー要素の場合には高周波成分が励起するものの、その振幅はFEM結果よりも小さい。従って、ファイバー要素を用いる場

合には、後述のように10%程度の解析係数を考慮することにより、工学的に十分適用可能であることが分かる。

残留変位に関しては、車種や衝突速度にかかわらずファイバー要素を用いる場合がFEM解析結果よりも若干大きい値を示している。また、両者もと入力荷重が自動車の場合には、いずれの衝突速度においても、残留変位がほぼ発生していないことが分かる。

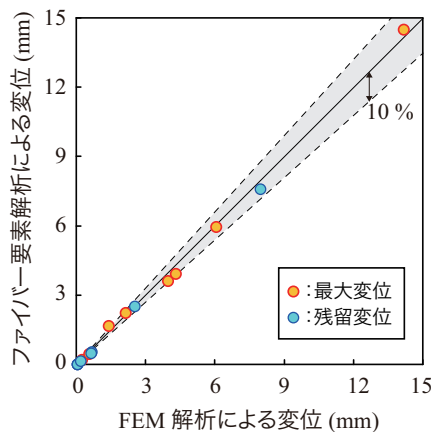
3.2 各応答値に関する比較

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変位 $\delta_{\max}$ 、最大変位発生時刻 $T_{\max}$ および残留変位 δ_{res} の一覧を示している。また、図－5には、表－3に示した最大変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} について、ファイバー要素とFEM解析の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。

表および図より、最大変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} に関するファイバー要素とFEM解析の結果の間を見るとき、その誤差は衝突速度や入力モデルにかかわらず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。

表-3 各種応答値一覧

ケース名	最大変位 $\delta_{\max}$ (mm)		最大変位発生時刻 $T_{\max}$ (ms)		残留変位 δ_{res} (mm)	
	ファイバー要素	FEM 解析	ファイバー要素	FEM 解析	ファイバー要素	FEM 解析
A-V20	0.19	0.21	37.8	37.4	0.00	0.00
A-V40	0.50	0.45	50.0	47.5	0.02	0.00
A-V60	1.37	1.65	32.2	31.1	0.09	0.03
A-V80	2.08	2.24	27.1	26.9	0.14	0.15
B-V20	3.93	3.63	24.9	24.5	0.62	0.52
B-V40	4.26	3.93	15.5	15.0	0.60	0.49
B-V60	6.03	5.96	35.8	34.4	2.49	2.50
B-V80	14.16	14.53	35.3	36.0	7.95	7.59

図-5 最大変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} の比較

これより、提案のファイバー要素を用いた数値解析手法は、衝突速度や入力モデルにかかわらず 10 % 以内の誤差で柱の変位を評価できることが明らかになった。

3.3 損傷の評価に関する比較

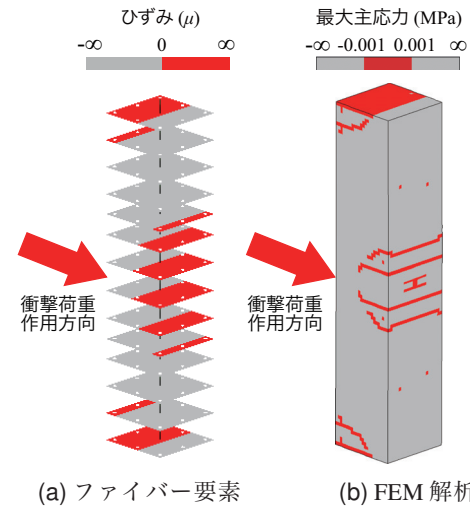
図-6 には、トラックが $V=60$ km/hr で衝突した場合における最大変位発生時のファイバー要素のひずみ分布と FEM 解析の最大主応力分布を比較して示している。(a)、(b) 図ともに赤色で示される箇所がひび割れと等価と考えられる部分を表している。図より、ファイバーモデルはスパン中央や柱の端部に発生した曲げに起因するひび割れを大略再現できていることが分かる。

以上より、ファイバー要素を用いることによって両端固定 RC 柱の衝撃応答性状を適切に再現可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、実設計レベルでの衝撃応答解析を可能とするために、基本構造部材である RC 柱を対象に車両衝突荷重が作用した場合を想定し、ファイバー要素を用いた衝撃応答解析を実施し、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析の結果と比較することにより、その適用性の検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると、以下ようになる。

- 1) 載荷点変位波形に関しては、ファイバー要素は 10 % 程度の解析係数を考慮することにより、衝突速度や入力モデルに拘わらず十分に評価可能である。

図-6 損傷の評価 (トラック; $V=60$ km/hr)

- 2) また、スパン中央部や端部に発生する曲げひび割れに関しても適切に評価可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造物の耐衝撃設計に関するワークショップ，2010.4
- 2) 日本建築学会：構造物の耐衝撃設計ガイドラインに関するシンポジウム，2010.11.30-12.1
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol. 55A, pp. 1204-1214, 2009.3.
- 7) Engineer's Studio, <http://www.forum8.co.jp>
- 8) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，付 3・構造設計例，1991
- 10) National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu>