

論文 車両衝突を受ける門型RC造骨組のファイバー要素解析

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

要旨：本研究では最も単純な構造形式である門型RC造骨組を対象に、柱の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。その結果、載荷点変位および曲げモーメントに関しては、ファイバー要素解析では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かかわらず十分に評価可能であることが明らかになった。これより、ファイバー要素を用いることによって、衝撃荷重下のRC構造物の動的応答特性を比較的簡易に評価可能であることを確認した。

キーワード：ファイバー要素, 衝撃応答解析, RC造骨組, 車両衝突, 耐衝撃設計

1. はじめに

建築物は、一般に永続的に作用する固定荷重や積載荷重、発生や変動が確率的に表現できる風荷重や地震荷重等を考慮して設計が行われている。一方、発生確率がきわめて低い自動車やヘリコプター等の衝突や、ガスの屋内外爆発等の偶発的な衝撃荷重に対しては、十分に考慮された設計がなされておらず、その設計法も明示されていない。このため、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、実験結果を精度良く再現可能であることを明らかにしている。

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、その動的挙動の推定や評価が可能である。しかしながら、実務レベルで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、本研究では最も単純な構造形式である門型RC造骨組を対象に、柱の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、同一条件下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、ファイバー要素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

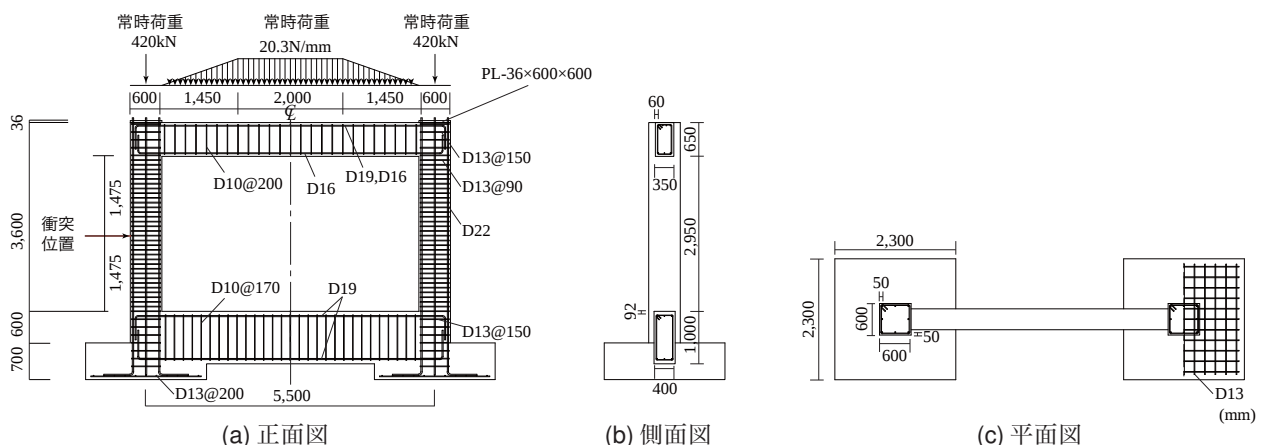


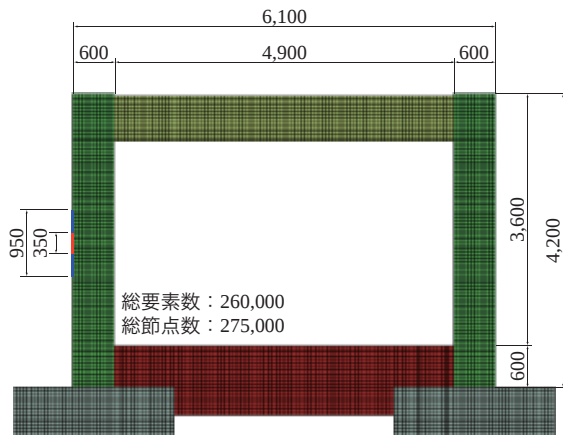
図-1 門型RC造骨組の形状寸法および配筋状況

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

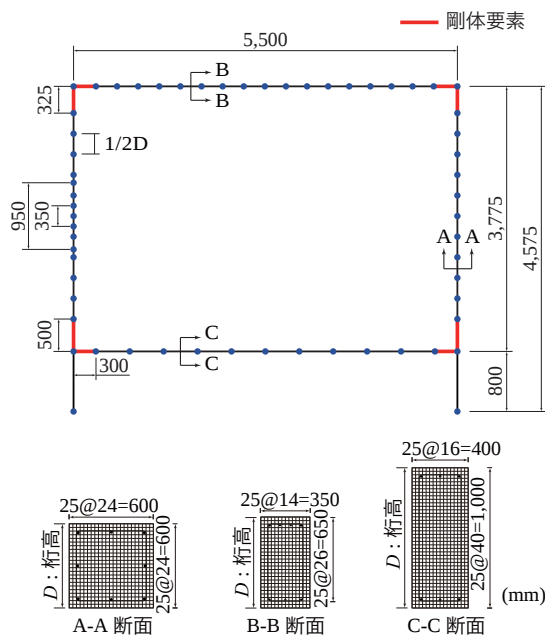
*2 (株)構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



(a) 有限要素モデル



(b) ファイバーモデル

図－2 要素分割状況

を $V = 20 \sim 80 \text{ km/hr}$ まで変化させた衝撃応答解析を実施し、载荷点変位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 門型 RC 造骨組

図－1 には、本数値解析で対象とした門型 RC 造骨組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 階部分を取り出したものである。門型 RC 造骨組の柱中心間隔は 5,500 mm、柱長が 2,950 mm、内空幅が 4,900 mm である。柱、梁の断面寸法はそれぞれ 600×600 mm、350×650 mm である。

各断面の配筋状況は、梁部は上下端主鉄筋にそれぞれ D19、D16、基礎梁部には上下端主鉄筋に D19 が配筋されており、両梁部とも帯筋には D10 が配筋されている。柱

表－1 物性値一覧

材料	密度 ρ (ton/m^3)	弾性係数 E (GPa)	圧縮/降伏 強度 (MPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	14	21	0.167
D10 / D13	7.85	206	295	0.3
D16 / D19 / D22	7.85	206	345	0.3
柱頭定着鋼板	7.85	206	400	0.3

部は主鉄筋に D22、帯筋には D13 が配筋されている。また、基礎スラブには短辺方向、長辺方向ともに D13 が配筋されている。梁部主鉄筋および柱部主鉄筋の芯かぶり、それぞれ 60 mm、50 mm としている。

骨組には、鉛直荷重として上層階からの荷重 420 kN を柱頭部に、梁部には 2 階床部に作用する常時荷重 20.3 N/mm を梁上面に作用させている。

表－1 には、本解析で用いた骨組の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およびポアソン比は、それぞれ 21 MPa、1/6 と設定した。また、鉄筋の降伏応力は規格値を用いることとし、D10 および D13 の場合で 295 MPa、D16、D19、D22 の場合で 345 MPa としている。

2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図－2 (a) には、対象骨組の有限要素解析における要素分割状況を示している。要素分割において、柱および梁の各軸方向の要素長は、コンクリートのひび割れの影響が適切に評価⁵⁾ できるように、45～60 mm 程度としている。また、鉄筋には 2 節点梁要素を、コンクリートおよび定着鋼板の要素には 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 2×2 Gauss 積分を用いている。対象モデルにおける総要素数および総節点数は、それぞれ約 260,000 および 275,000 である。

図－2 (b) 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。各断面の分割に関しては、幅および高さ方向をそれぞれ一辺が 25 mm の正方形となるように分割している。柱と梁の接合部には、図に示すように剛体要素を配置し、剛域を考慮している。

衝撃荷重の载荷方法に関しては、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柱のスパン中央の節点に作用させる（自動車：350 mm、トラック：950 mm）ことによって再現した。

境界条件に関しては、両解析モデルともに基礎スラブの底面を完全拘束とした。また、常時荷重を再現するために、柱頭部および梁上面には前述のように上層階からの荷重等を質量として付加している。

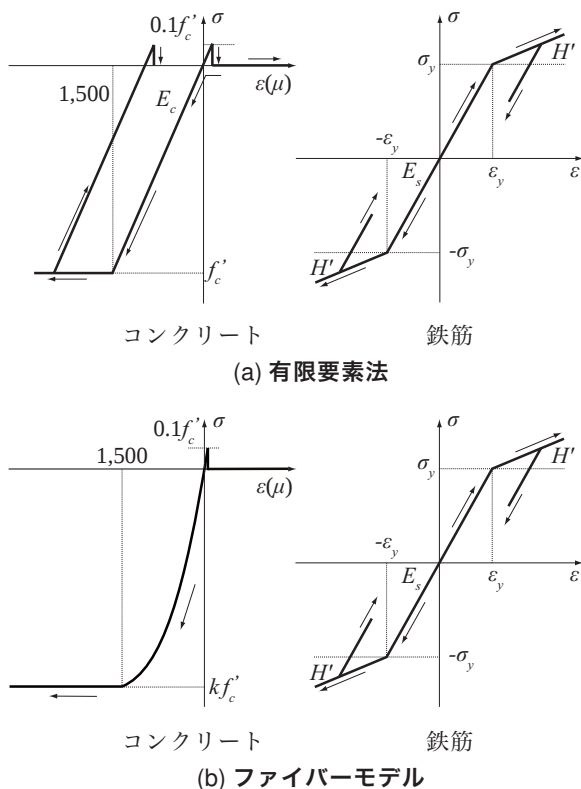


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

2.3 材料物性モデル

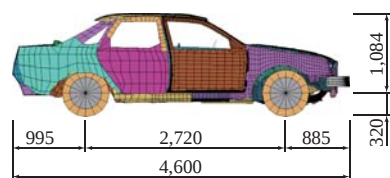
(1) 有限要素解析

図-3 (a) には有限要素解析に用いた応力-ひずみ関係を示している。コンクリートには、既往の研究^{10),11)}において用いられている構成則を使用した。すなわち、圧縮側に関しては相当ひずみが1,500 μ 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。

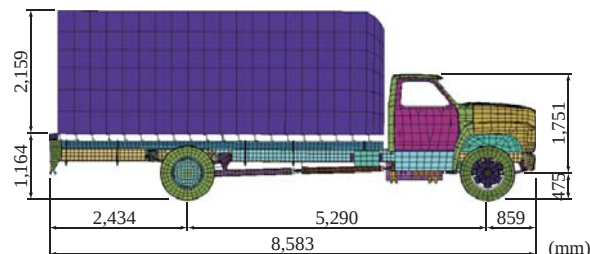
鉄筋要素に用いた構成則モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮したバイリニア型の等方弾塑性体モデルである。また、単位体積質量 ρ_s には公称値である 7.85×10^3 kg/m³ を用いた。なお、塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%を仮定している。

(2) ファイバー要素解析

図-3 (b) にはファイバー要素解析に用いた応力-ひずみ関係を示している。コンクリートに関しては、有限要素解析で用いた構成則と極力同一となるように設定したものの、圧縮側に関して降伏点までを2次曲線で近似している点、簡略化のため圧縮軟化は考慮していない点が有限要素解析とは異なっている。なお、圧縮応力 f'_c にかかる係数 k に関しては $k=1$ とし、圧縮ひずみ $\epsilon_c = 1,500$



(a) 自動車



(b) トラック

図-4 衝突体

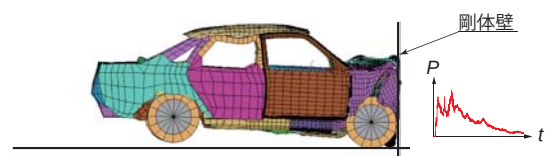


図-5 フルラップ解析の一例（自動車：V = 60 km/hr）

μ と設定することで FEM と同一の条件とした。引張強度に関しても FEM と同一の条件に設定している。

鉄筋に用いた応力-ひずみ関係には、有限要素法と同様に塑性硬化係数 H' を弾性係数の1%とするバイリニア型の等方硬化則を適用した。

2.4 入力荷重の決定方法と解析ケース

構造物の衝撃応答は衝突体と被衝突体の接触による相互作用によって大きく異なることが知られている。そのため、本解析ではこれらの相互作用を排除するために、両解析モデルに対して同一の衝撃荷重を与えることとした。すなわち、図-4に示す2種類の衝突体（自動車およびトラック）を用いて、図-5に示すように剛体壁から1 mm の位置に車両を配置し、各ケースで設定した衝突速度を車両の有限要素モデルの各節点に初速度として与え、剛体壁に衝突させるフルラップ解析を実施し、得られた衝撃力を入力荷重として両解析モデルに作用させた。以下、衝撃力を算出するために使用した衝突体の概要について説明する。

(1) 自動車

自動車には、NCAC (National Crash Analysis Center)¹²⁾ で公開されている有限要素モデルを採用することとした。図-4 (a) には、自動車の有限要素モデルを示している。本モデルは梁要素、シェル要素および8節点固体要素から構成されている。本モデルの総要素数および総節点数は、それぞれ約26,800および28,400である。また、自動

表－２ 解析ケース一覧

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

車の総重量は 1,350 kg と設定した。

(2) トラック

衝突解析に用いたトラックモデルは、自動車モデルと同様に NCAC で公開されている有限要素モデルを用いた。

図－４ (b) にはトラックモデルの有限要素モデルを示している。梁要素、シェル要素および 8 節点固体要素から構成されている。本モデルの総要素数および総節点数は、それぞれ約 35,000 および 39,000 である。また、トラックの総重量は 8,000 kg、その内積載物重量は 2,800 kg と設定している。

表－２には、各解析ケースの一覧を示している。フルラップ解析より得られた入力荷重を、それぞれのモデルの柱のスパン中央部の節点に水平方向に作用させることにより解析を実施した。

3. 数値解析結果

3.1 固有振動解析結果

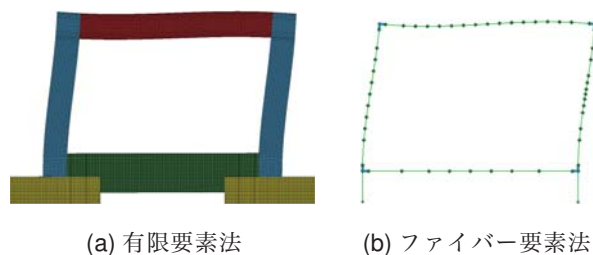
表－３には、ファイバー要素を用いた骨組モデルの妥当性の検討および衝撃応答解析に用いる減衰定数を算出するために実施した固有振動解析結果を一覧にして示している。また、図－６には両者の最低次固有振動モードを比較して示している。表より、両解析結果より得られた固有振動数は、いずれの振動モードに関しても比較的良く対応しており、両者の最低次固有振動数の差は 3 % 以下であることが分かる。これより、ファイバー要素解析に用いた骨組モデルは振動特性を十分に再現できるモデルであることが分かる。なお、衝撃応答解析時における減衰に関しては、質量比例型減衰を採用し、衝撃力の作用方向成分が最も卓越すると考えられる水平方向の最低次固有振動数に対して 5 % とした。

3.2 各種応答波形

図－７ (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。自動車の場合に着目すると、衝突初期に衝撃力が一度減少し、その後再び衝撃力が増加し、最大衝撃力に達していることが分かる。これは衝突初期には自動車の前面に設置されているバンパーの緩衝効果が発揮されたことによるものと推察される。また、衝突速度の増加に伴って、衝撃力の最大値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

表－３ 固有振動数一覧

振動モード	固有振動数 (Hz)	
	有限要素法	ファイバー要素解析
1 次モード	15.2	15.6
2 次モード	41.5	42.7
3 次モード	83.7	85.0
4 次モード	87.1	88.8
5 次モード	116.5	121.2



図－６ 最低次固有振動モード

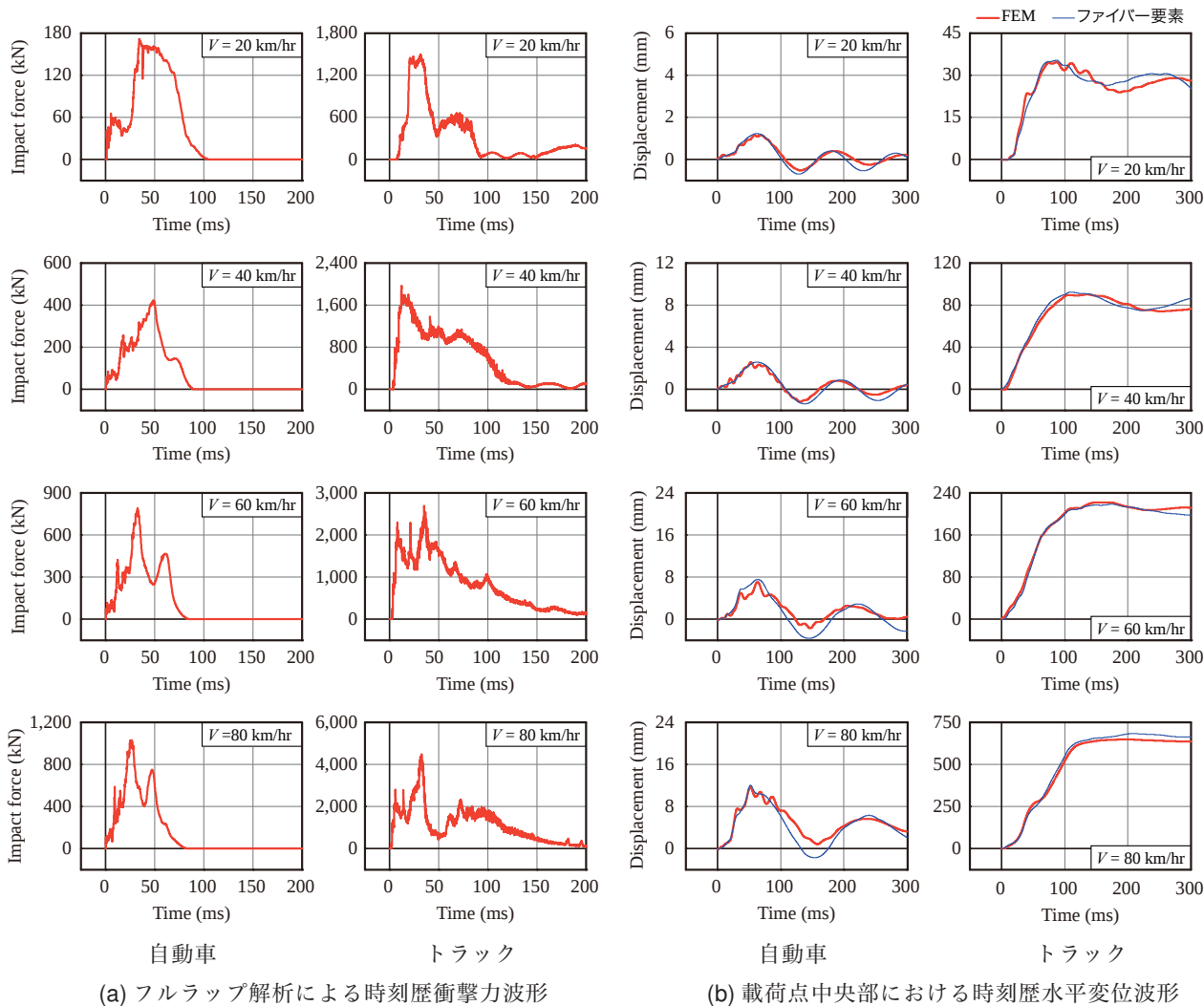
分かる。次に、衝突体がトラックの場合に着目すると、最大衝撃力は自動車の 5 ～ 10 倍程度になっており、荷重継続時間に関しても 2 倍程度の値を示している。

以上より、自動車およびトラックの衝突によって発生する衝撃力は緩衝材を含む数多くの部材の影響により非常に複雑な波形性状を示していることが分かる。本解析では、この衝撃力波形を入力荷重として両解析モデルに作用させることにより、衝撃応答解析を実施した。

図－７ (b) には、衝撃応答解析より得られた骨組の衝突側柱スパン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。自動車の場合に着目すると、衝突速度が $V = 40$ km/hr まではほぼ残留変位が発生しておらず、弾性応答の範囲であることが分かる。両解析結果を比較すると、初期勾配や最大変位、自由振動状態での周期が良く対応していることが分かる。衝突速度が $V \geq 60$ km/hr の場合に関しても、最大変位発生後の勾配に若干の違いが確認できるものの、最大値や周期などの全体的な応答性状に関しては、FEM 解析結果を十分に再現できているものと判断される。

次に、入力荷重がトラックの場合に着目すると、入力荷重が自動車に比べて大きいため、残留変位も大きくなっていることが分かる。衝突速度が $V \leq 60$ km/hr の範囲では、自由振動状態における周期に若干の差異が見られるものの、衝突初期の波形の立ち上がりから最大変位に至るまでは、両者は非常に良く一致しており、ファイバー要素を用いる場合でも十分に再現可能であることが分かる。

以上より、ファイバー要素解析では車両の種類や衝突速度にかかわらず、FEM 解析結果の応答性状を十分に再現可能であるものと判断される。



図－7 各種時刻歴応答波形

3.3 各応答値に関する比較

表－4には、解析結果から得られた全ての解析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} を一覧にして示している。また、図－8には、表－4に示した最大変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} について、ファイバー要素解析および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示している。なお、図中の45°勾配を有する実直線は、両解析モデルの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解析とFEM解析の結果の間を見ると、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。さらに、すべての結果でファイバー要素解析の場合がFEM解析より大きな値を示していることから、ファイバー要素を用いた場合には安全側の評価を与えることが分かる。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。従って、ファイバー要素を用いる場合には、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。

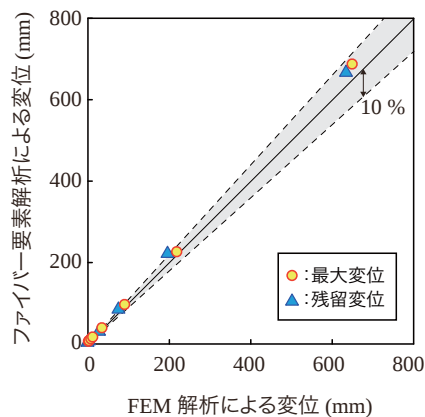
なお、両解析モデルの計算時間を比較すると、FEM解析を用いる場合には約28,000 secであるのに対し、ファイバー要素を用いた場合には約110 secであり、計算時間はFEM解析の1/250程度となっている。このことは、実務レベルでの耐衝撃設計を想定すると、ファイバー要素を用いた解析が非常に有効であることを明示している。

3.4 モーメント分布

図－9には、自動車およびトラック衝突におけるFEM解析およびファイバー要素解析より得られた骨組の最大モーメント分布図を比較して示している。図は衝突速度 $V = 20 \text{ km/hr}$ 、 60 km/hr の結果である。衝突速度にかかわらず、ファイバー要素解析の結果はFEM解析結果のモーメント分布を大略再現していることが分かる。また、トラック衝突の場合の衝突速度 $V = 60 \text{ km/hr}$ では、柱材のモーメント分布に若干の差異が見られるものの、衝突位

表－４ 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)	
	FEM	ファイバー要素	FEM	ファイバー要素	FEM	ファイバー要素
A-V20	1.0	1.1	68.7	61.8	0.0	0.0
A-V40	2.4	2.4	52.6	61.8	0.0	0.0
A-V60	7.1	7.5	63.6	63.5	0.7	0.6
A-V80	11.7	12.1	51.8	52.3	3.5	3.1
B-V20	34.7	35.4	86.9	87.7	26.9	27.8
B-V40	90.3	92.5	135.7	110.0	75.7	81.7
B-V60	218.7	222.0	172.8	150.6	196.6	218.3
B-V80	649.1	682.9	197.4	207.6	634.2	664.2

図－８ 最大変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} の比較

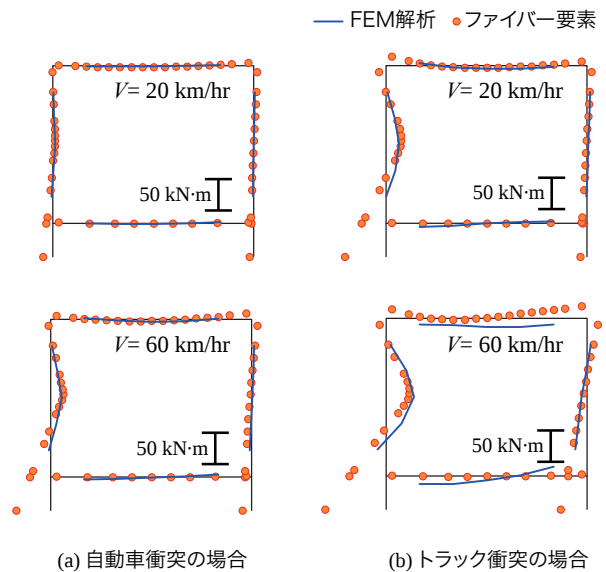
置のモーメント分布に関しては、精度よく再現しているものと判断される。これより、モーメント分布に関しても十分に適用可能であることが分かる。

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、門型 RC 造骨組を対象に柱のスパン中央部に車両衝突荷重が作用した場合を想定した、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。その結果、載荷点変位および曲げモーメントに関しては、ファイバー要素解析では 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かかわらず十分に評価可能であることが明らかになった。

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



図－９ ファイバー要素解析におけるモーメント分布

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，梶谷 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的評価，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) 岸 徳光，A.B. Qadir，三上 浩，岡田慎哉：破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討，構造工学論文集，Vol. 53A，pp. 1227-1238，2007.3.
- 11) 武田雅弘，岸 徳光，小室雅人：自動車衝突下における門型 RC 造骨組に関する詳細応答解析，コンクリート工学年次論文集，vol.34，pp. 697-702，2012.7.
- 12) National Crash Analysis Center，<http://www.ncac.gwu.edu>