

# 論文 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

武田 雅弘<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・小室 雅人<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、門型 RC 造骨組を対象に柱高さの 1/2 点に自動車衝突した場合の耐衝撃性を把握することを目的に、衝突体の衝突速度を 20～80 km/hr まで変化させ、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。その結果、1) 弾性体モデルを使用する場合には、自動車モデルやフルラップモデルを用いる場合と比較して、応答値を過大に評価すること、2) フルラップモデルを使用する場合には、衝撃力波形および変位波形は自動車モデルを用いる場合と概ね一致するものの、残留変位およびひび割れ分布性状は自動車モデルよりも小さく評価される傾向にあることが明らかになった。

**キーワード:** 動的応答, 数値シミュレーション, 有限要素法, 門型 RC 造骨組, 自動車衝突

## 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、脱線による列車の衝突や、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<sup>1), 2)</sup>。偶発作用の一つである車両衝突問題の場合には、衝突体の速度や衝突体と被衝突体間の相互作用を考慮して衝撃荷重を決定しなければならない。しかしながら、構造物の中でも最も単純な構造形式である門型骨組に関しても、未だ十分に検討されていないのが現状である。

このような観点より、本研究では、RC 造に関する合理的な耐衝撃設計法の確立に向け、門型 RC 造骨組を対象とし、柱部に自動車衝突した場合の耐衝撃性を把握することを目的に、三次元弾塑性衝撃応答解析による詳細

解析を実施した。本研究では、以下の 3 つのモデルを設定して、衝突速度を 20～80 km/hr まで変化させた解析を行い、骨組の耐衝撃性に関する比較検討を行った。すなわち、(1) 自動車の有限要素モデルを骨組に衝突させる場合、(2) 自動車モデルを剛体壁に衝突 (フルラップ全面衝突、以後フルラップ衝突) させて得られた衝撃力波形を入力する場合、(3) 自動車と同一質量を有する弾性円柱体を衝突させる場合、である。検討項目は、衝撃力や衝突部における柱の水平変位に関する時刻歴分布、および最大変位や残留変位、骨組のひび割れ分布とした。なお、本数値解析には、有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析汎用コード LS-DYNA (Ver. 971)<sup>3)</sup>を用いている。

## 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<sup>4)</sup>の 1 階部分を取り出した

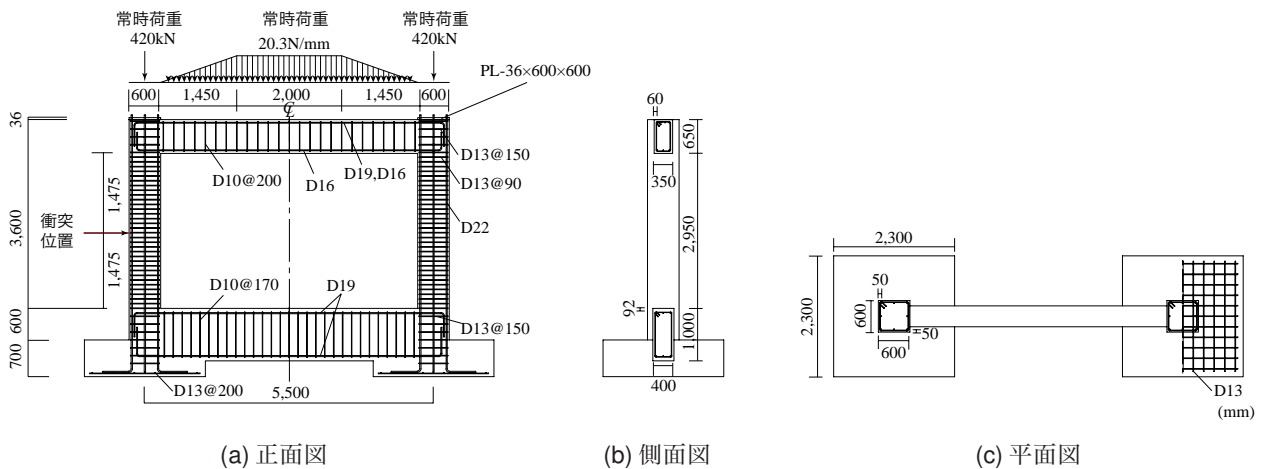


図-1 門型 RC 造骨組の形状寸法および配筋状況

\*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 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 教授 工博 (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)

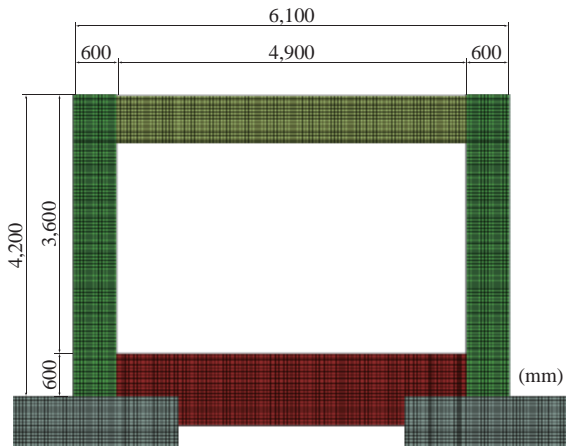


図-2 要素分割状況

表-1 物性値一覧

材料	密度 $\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )	弾性係数 $E$ (GPa)	圧縮/降伏強度 (MPa)	ポアソン比 $\nu$
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
弾性円柱体	2.62	206	-	0.3

ものであり、柱頂部には上階からの自重、梁部には常時荷重を作用させている。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。

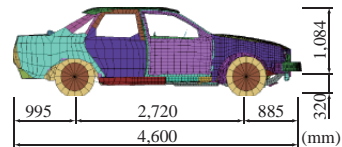
各断面の配筋状況は、梁部は上下端主鉄筋にそれぞれ D19, D16、基礎梁部には上下端主鉄筋に D19 が配筋されており、両梁部とも帯筋には D10 が配筋されている。柱部は主鉄筋に D22、帯筋には D13 が配筋されている。また、基礎スラブには短辺方向、長辺方向ともに D13 が配筋されている。梁部主鉄筋および柱部主鉄筋の芯かぶり、それぞれ 60 mm、50 mm としている。

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。

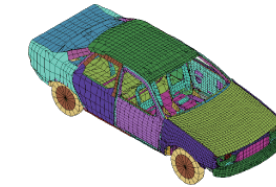
表-1 には、本解析で用いた材料物性値の一覧を示している。コンクリートの圧縮強度およびポアソン比は、それぞれ 21 MPa、1/6 と設定した。また、鉄筋の降伏応力は規格値を用いることとし、D10 および D13 の場合で 295 MPa、D16, D19, D22 の場合で 345 MPa としている。

## 2.2 門型骨組の有限要素モデルおよび解析条件

図-2 には、門型 RC 造骨組の要素分割状況を示している。本数値解析では、後述の自動車モデルが非対称構造であるためフルモデルとして検討を行った。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<sup>5)</sup> できるように、45~60



(a) 自動車<sup>6)</sup>



(b) 弾性円柱体

図-3 衝突体モデル

mm 程度としている。また、各部材は、鉄筋には 2 節点梁要素を、他の要素には 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。常時荷重を再現するために、柱頭部には単位体積重量が 1,167 kN/m<sup>3</sup> となるシェル要素を、梁上面には単位体積重量を 580 kN/m<sup>3</sup> とする厚さ 100 mm の固体要素を配置している。剛性の影響を小さくするために、両要素ともに弾性係数を 0.1 GPa、ポアソン比を 0 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。本門型 RC 造骨組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。

境界条件は基礎スラブ底面を完全固定とし、衝突体-柱間には面と面との接触・剥離を伴うすべりを考慮した接触面を定義している。

## 2.3 衝突体の有限要素モデル

本研究では、門型 RC 造骨組の耐衝撃性を検討するため、2 種類の衝突体を用いて数値解析を実施した。以下、それぞれの衝突体の概要について述べる。

### (1) 自動車モデル

本研究で使用した車両は、NCAC (National Crash Analysis

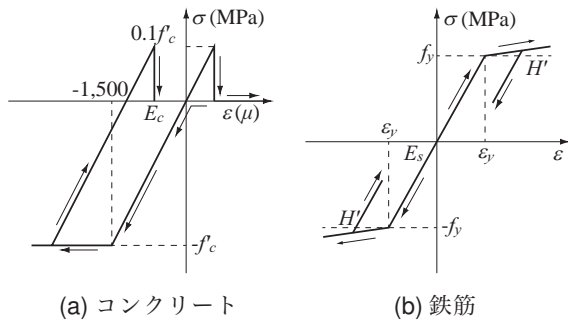


図-4 各材料の応力-ひずみ関係

Center)<sup>6)</sup>で公開されている自動車モデルを採用することとした。図-3 (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28,400および26,800である。また、自動車の総重量は1,350 kgと設定した。

#### (2) 弾性体モデル

他の1つは、自動車を簡易にモデル化する場合を想定して、自動車と同一の質量を有する鋼製の弾性円柱体を仮定した。図-3 (b)には、弾性円柱体の有限要素モデルを示している。形状寸法は一義的に直径600 mm、全長2,050 mmで先端50 mmの部分にテーパ(テーパ半径 $r=902.5$  mm)を施した。全質量は自動車の総重量と等しく1,350 kgとし、全て8節点固体要素でモデル化している。本モデルの総要素数および総節点数は、それぞれ約6,400および7,400である。

#### 2.4 材料物性モデル

図-4には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の材料物性モデルを示している。

図-4 (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、相当ひずみが0.15%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<sup>7)</sup>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-4 (b)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、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硬化係則を適用した。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

また、自動車モデルにおける材料物性モデルに関しては、NCAC<sup>6)</sup>にて公開されている有限要素モデルを直接使用していることより、同モデルにあらかじめ組み込まれている物性モデルをそのまま用いることとした。

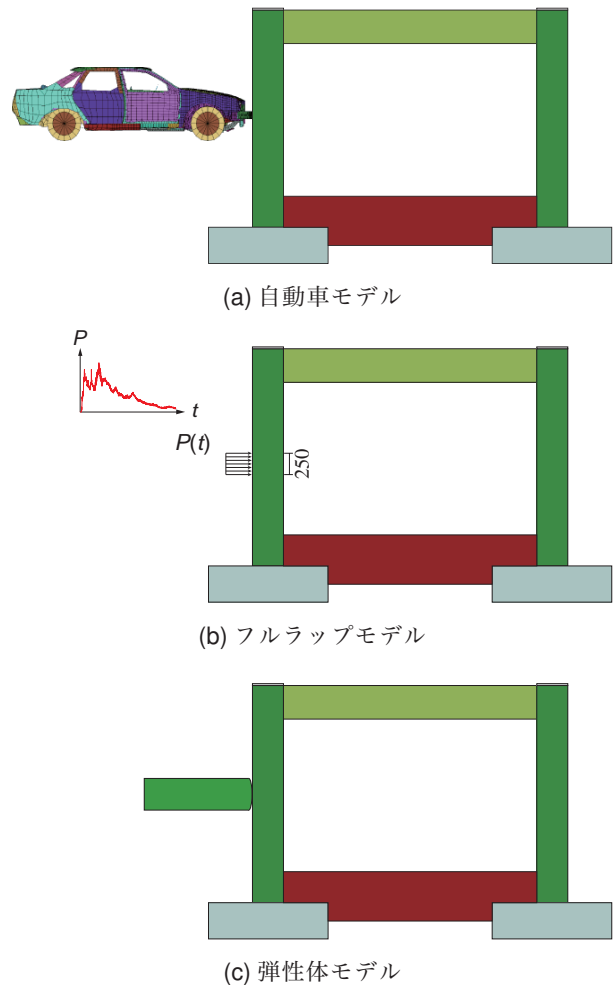


図-5 各解析ケースにおける解析モデル

なお、自動車衝突時には鋼およびコンクリートの両者にひずみ速度効果が発揮され、強度あるいは降伏強度が向上するものと考えられる。しかしながら、ここでは安全側で評価することとし、簡略化して無視することとした。また、減衰に関しても同様に各材料に関する履歴減衰項は考慮するものの、質量および構造減衰項は無視することとした。

#### 2.5 数値解析ケース

本数値解析では、自動車衝突によるRC造骨組の動的応答特性に関する衝撃荷重入力モデル化による影響を検討するために、以下の3種類の入力モデルを設定し、数値解析を実施した。すなわち、

- 1) 自動車モデルを直接RC造骨組に衝突させる場合(以後、自動車モデル);
  - 2) 自動車モデルをフルラップ衝突させ、得られた衝撃力の時刻歴波形を荷重としてRC造骨組に作用させる場合(以後、フルラップモデル);
  - 3) 弾性円柱体モデルを直接RC造骨組に衝突させる場合(以後、弾性体モデル);
- である。

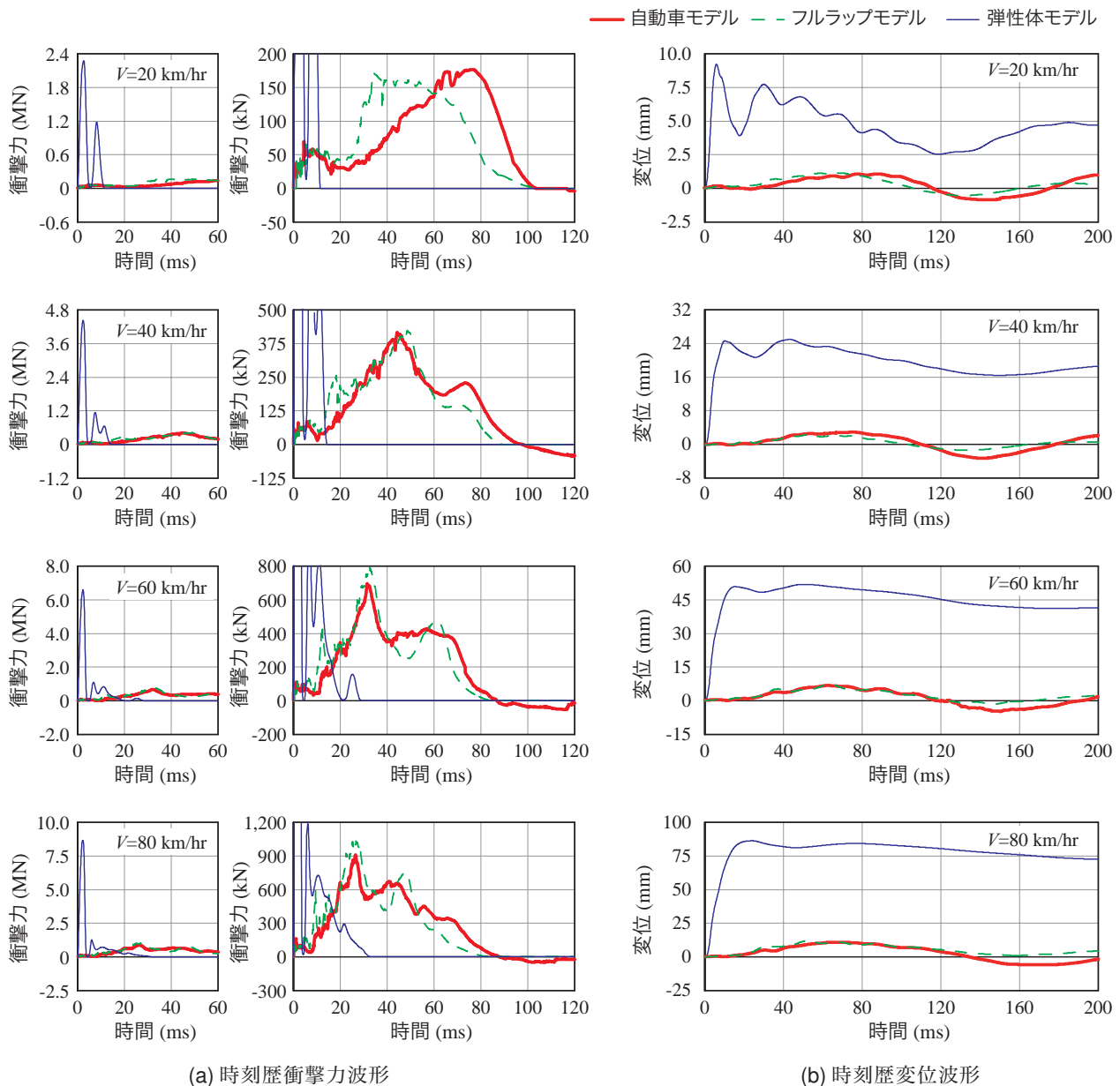


図-6 各種応答波形

図-5には、各解析ケースにおける数値解析モデルを示している。数値解析は、フルラップモデルを除いて、あらかじめ決定された衝突速度 $V$ を衝突体の各節点に与えることによって実施している。なお、フルラップモデルの場合には、高さ250 mm、幅600 mmの領域に等分布荷重となるように衝撃力を作用させている。また、その作用中心位置は柱の長さ方向の1/2点であり、衝撃荷重は水平方向に与えることとした。

### 3. 数値解析結果

#### 3.1 各種応答波形

図-6(a)には、各入力モデルにおける衝撃力の時刻歴波形(0~120 ms)を比較して示している。なお、図の右には、自動車モデルの最大衝撃力に合わせて縦軸を拡大

したものを示している。自動車モデルの場合に着目すると、いずれの衝突速度に関しても衝撃力は緩やかに励起していることが分かる。これは、バンパーの緩衝効果や柱材の局所的な変形による効果であるものと推察される。また、自動車の衝突速度が速くなるにつれて、最大衝撃力の発生時刻も早くなる傾向にあることが分かる。弾性体モデルの場合には、いずれの場合においても衝突初期に非常に大きな衝撃力が発生している。その後、数波の振幅の小さい高周波成分が励起し、緩やかに減少している。衝突初期における大きな衝撃力の発生の要因は、弾性体モデルには自動車モデルのようなバンパー等の緩衝材が設置されていないことによるものと判断される。なお、フルラップモデルの場合には、載荷初期に自動車モデルよりも大きな衝撃力が励起するものの、ある程度の



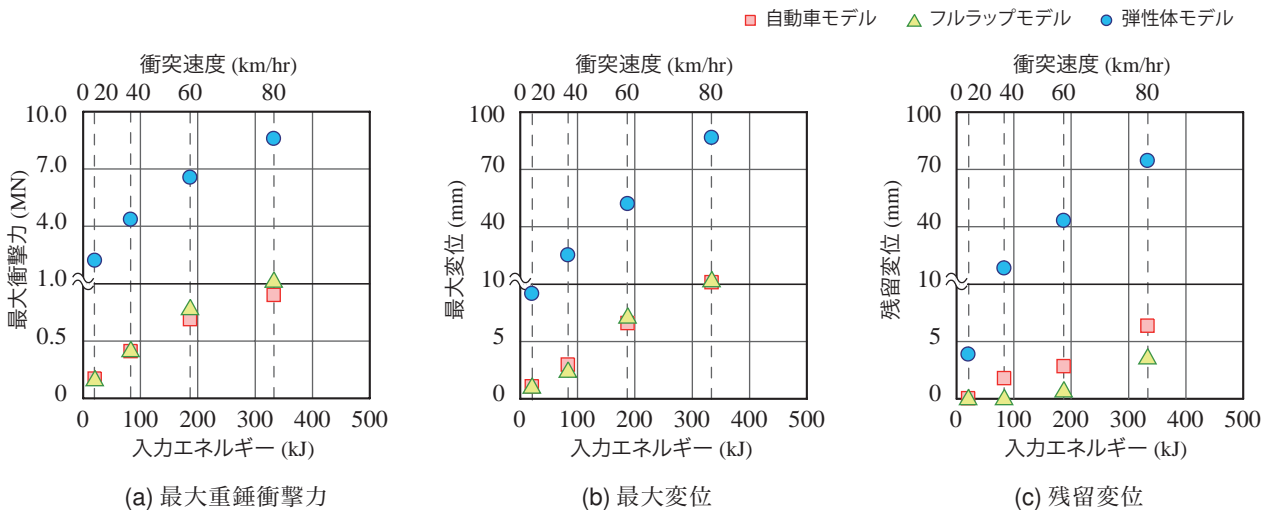


図-7 入力エネルギーと各応答値の関係

時間経過後には自動車モデルの場合と類似の波形性状を示していることが分かる。

図-6 (b) には、各入力モデルの自動車衝突側柱の高さ方向中央点における水平方向変位に関する時刻歴応答を示している。図より弾性体モデルの場合が最も大きな値を示していることが分かる。これは衝撃力波形の場合と同様にバンパー等の緩衝材が設置されていないことによるものと考えられる。一方、自動車モデルの場合には、変位の増加勾配が小さくほぼ線形状に増加し、最大値に至る傾向を示している。その後、衝突側柱は減衰自由振動状態へ移行していることが分かる。なお、最大変位は、 $V = 80 \text{ km/hr}$  の場合で弾性体モデルの 1/8 程度となっている。また、フルラップモデルの場合には、自動車モデルと大略一致した波形性状を示しているが、減衰自由振動における周期が若干異なっていることが分かる。

同一衝突速度による応答波形を比較すると、フルラップモデルの場合には、衝撃力は衝突初期に自動車モデルの値よりも大きいものの、その後は自動車モデルとほぼ同様な性状を示すことや、変位の波形性状が大略一致していることが分かる。これは、自動車衝突による RC 骨組の応答特性は、フルラップモデルを用いることにより十分な精度で解析可能であることを示唆している。一方、弾性体モデルの場合には、応答特性が他のモデルと著しく異なり、最大応答値の発生時刻が非常に早いことや最大変位が 8 倍以上の過大評価となること等より、設計的な観点からは適用不可能であることが分かる。

### 3.2 入力エネルギーと各応答値の関係

図-7 には、入力エネルギーあるいは衝突速度と最大衝撃力、最大変位および残留変位の関係を示している。なお、各応答値の差が大きいため、図中の下半分までは縦軸の目盛を拡大したものを示している。図より、最大衝撃力、最大変位および残留変位ともに弾性体モデルの場

合が自動車モデルやフルラップモデルの場合よりも大きい値を示していることが分かる。また、最大衝撃力と最大変位に関しては各入力モデル共に入力エネルギーに比例して大略線形の増加の傾向を示している。さらに、自動車モデルとフルラップモデルで類似した応答性状を示していることが分かる。

一方、残留変位に関しては、各モデルともある入力エネルギー以降で線形な増加の傾向を示している。また、自動車モデルの場合がフルラップモデルの場合より若干大きい値を示している。これは、フルラップモデルの場合には、載荷面積を幅方向に 600 mm、高さ方向に 250 mm と一定で載荷しているのに対して、自動車モデルの場合には衝突初期にはバンパー部が作用するものの、時間の経過と共に載荷面積が変化し、損傷領域に差が出てくることによるものと推察される。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-8 には、衝突側柱の最大水平変位発生時刻における骨組正面のひび割れ分布および変形状況を各解析モデルで比較して示している。図は衝突速度  $V = 60, 80 \text{ km/hr}$  の場合である。なお、図中の赤色で示された領域（コンクリート要素の最大主応力が  $-0.001 \sim 0.001 \text{ MPa}$  の範囲）は、ひび割れが発生して除荷状態に至っているか、もしくは単に発生応力が小さい要素であることを示している。

(a) 図より、衝突速度  $V = 60 \text{ km/hr}$  の場合について、自動車モデルとフルラップモデルのひび割れ分布を比較すると、骨組全体に渡って発生している損傷の程度は概ね一致しているものと判断される。一方、弾性体モデルの場合には、衝突柱材および梁材の損傷が、他のモデルに比べ非常に大きく評価されていることが分かる。以上より、衝突速度  $V = 60 \text{ km/hr}$  の場合には、フルラップモデルは自動車モデルと同程度の損傷を再現できるのに対して、弾性体モデルは、損傷を過大に評価する傾向にある

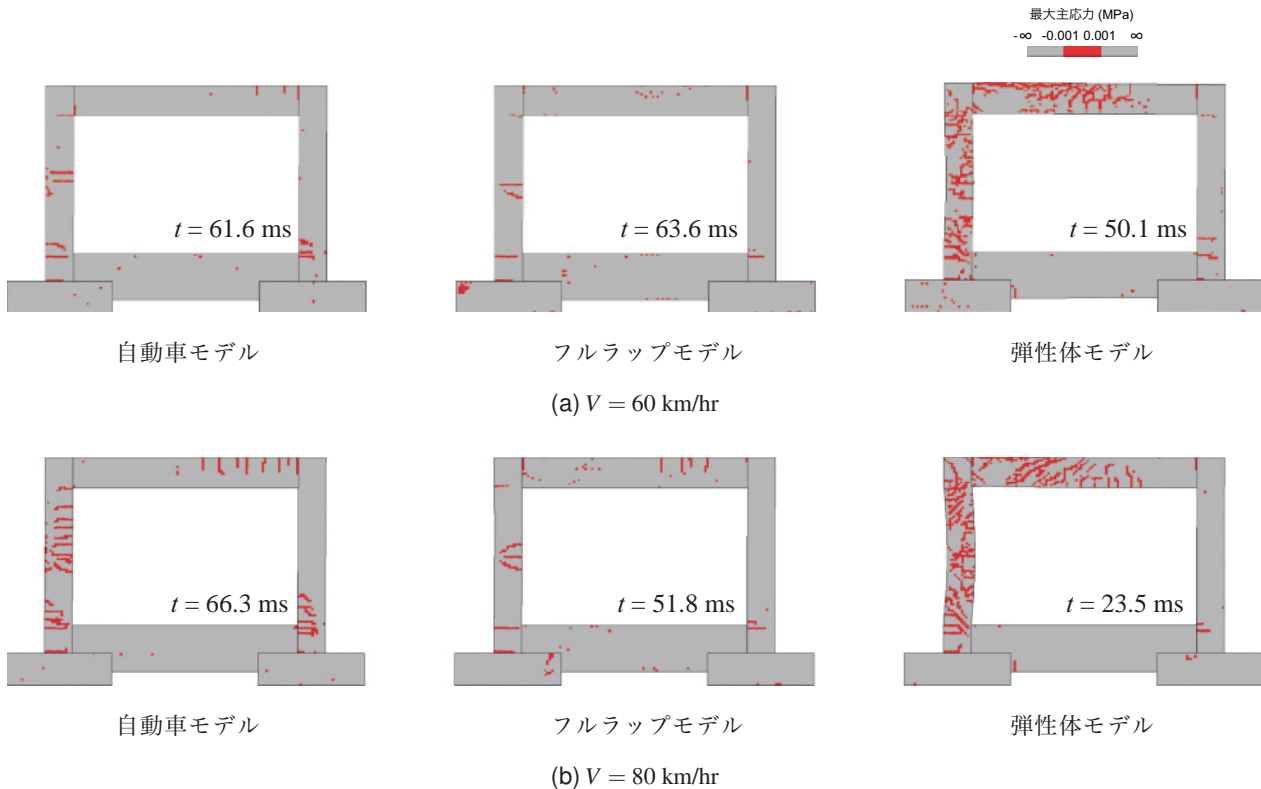


図-8 ひび割れ分布および変形状況 ( $V = 60, 80 \text{ km/hr}$ , 変形倍率: 等倍)

ことが分かる。

次に、(b) 図に示す衝突速度  $V = 80 \text{ km/hr}$  の場合について、自動車モデルとフラップモデルのひび割れ分布を比較すると、衝撃荷重作用域や梁材および非衝突柱材におけるひび割れ分布に若干の差異が見られるものの、両者は比較的一致していることが分かる。この差異は前述のように載荷面積の影響によるものと推察される。一方、弾性体モデルの場合には、衝突速度  $V = 60 \text{ km/hr}$  の場合と同様に、衝突柱材および梁材の損傷が大きく、せん断破壊の傾向を示している。また、梁材上面のかぶりコンクリートに剥離の傾向が見られる。以上より、弾性体モデルの場合には衝突速度にかかわらず、自動車モデルやフラップモデルよりも損傷を過大に評価する傾向にあることが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究では、門型 RC 造骨組を対象に柱高さの 1/2 点に自動車衝突した場合の耐衝撃性を把握することを目的に、衝突体の衝突速度を 20 ~ 80 km/hr まで変化させ、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 弾性体モデルを使用する場合には、自動車モデルやフラップモデルを用いる場合と比較して、最大衝撃力、最大変位および残留変位を過大に評価することが明らかになった。

- 2) フラップモデルを使用する場合には、衝撃力波形および変位波形は自動車モデルを用いる場合と概ね一致するものの、残留変位およびひび割れ分布性状は自動車モデルよりも小さく評価される傾向にある。
- 3) その要因は、フラップモデルの場合には載荷面積が一定であるのに対して、自動車モデルの場合には載荷面積が時間の経過と共に変化するためと推察される。

#### 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，2010.3
- 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) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) National Crash Analysis Center (<http://www.ncac.gwu.edu/>)
- 7) 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.