

## (29) 両端固定 RC 柱の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究

Numerical study on impact resistant behavior of both sides fixed RC columns

岸 徳光\*, 三上 浩\*\*, 小室雅人\*\*\*, 花岡健治\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Masato Komuro, and Kenji Hanaoka

\*工博 室蘭工業大学大学院教授 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*博 (工) 三井住友建設 (株) 技術開発センター 主席研究員 (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*博 (工) 室蘭工業大学大学院講師 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*室蘭工業大学大学院工学研究科 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Key Words : fixed column, RC, impact resistance, numerical analysis

キーワード：固定柱，鉄筋コンクリート，耐衝撃，数値解析

## 1. はじめに

耐衝撃用途の土木構造物には、落石から市民や道路交通網を守るための防護構造物がある。一方、建築の代表的構造物には原子力発電諸施設がある。これらの構造物は、基本的に耐衝撃性を考慮した設計が施されている。しかしながら、近年、RC 造や S 造建築物に対する車両衝突がたびたび発生しており、耐衝撃設計法の確立が喫緊の課題となっている。

このような観点から、本研究では RC 造建物の柱部に車両が衝突した場合を想定し、3 層 RC 造骨組における柱部を両端固定柱に簡易にモデル化した場合の耐衝撃特性について検討を行うこととした。具体的には、標準的な RC 造 3 階建事務所建物の 1 階柱部を取り上げて両端固定柱にモデル化し、重量 20 kN の車両モデル (円柱体) をバンパー無し状態で衝突させた場合について検討を行うこととした。衝突速度は、時速 20 km から 20 km 間隔に 100 km までを対象に設定した。

## 2. 数値解析の概要

## 2.1 試験体概要および解析ケース

図-1 には、本数値解析で対象とした両端固定 RC 柱の形状寸法及び配筋状況を示している。柱部の断面寸法は幅 × 奥行きが 600 × 600 mm で、柱高さが 2,950 mm である。上下、両側面に柱を拘束させるための梁を配置し、上下縁面を完全固定としている。柱拘束用 RC 梁の断面寸法は 400 × 1,000 mm であり、両側面方向のスパン長は 1,600 mm である。柱部には、主鉄筋に D22、帯鉄筋に D13 が配筋されている。固定部 RC 梁には主鉄筋に D19、帯鉄筋に D10 が配筋されている。また、主鉄筋の芯かぶりを 50 mm、固定部 RC 梁の芯かぶりを 60 mm

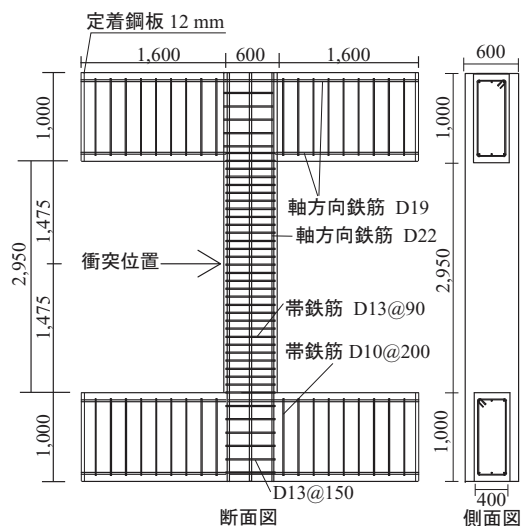


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

としている。さらに、固定用 RC 梁の端部には厚さ 12 mm の定着鋼板を設置し鉄筋の定着長を節約している。

本解析では、車両衝突を模擬して重量が 20 kN の円柱状物体を柱中央部に水平方向から衝突させ、数値解析を行った。なお、衝突体は直径 600 mm、全長 2,050 mm で先端 50 mm の部分にテーパが施されている。

表-1 には、本数値解析で行った解析ケースの一覧を、表-2 には、本数値解析で用いた物性値一覧を示している。なお、数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA<sup>1)</sup>を用いている。

## 2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-2 には、本数値解析で用いた両端固定 RC 柱の要素分割状況を示している。解析モデルは構造及び荷重条件の対称性を考慮した 1/2 モデルとしている。境界条件

表-1 解析ケース一覧

解析ケース名	衝突体重量 W (kN)	衝突速度 V (km/h)	入力エネルギー E (kJ)
W20V20	20	20	31
W20V40		40	124
W20V60		60	279
W20V80		80	496
W20V100		100	775

表-2 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 v
コンクリート	2.35	14	21	0.167
D10, D13	7.85	206	295	0.3
D19, D22	7.85	206	345	0.3
定着鋼板	7.85	206	400	0.3
衝突体	3.57	206	-	0.3

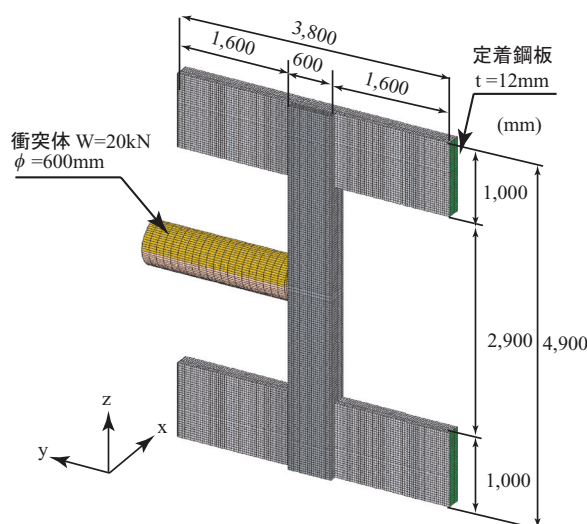


図-2 要素分割状況

は、対称境界面にはシムメトリー条件を入力し、上述のとおり、固定用 RC 梁上下端面を完全固定とした。衝突体一柱間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリート一鉄筋要素間は完全付着としている。

各要素間に関しては、コンクリート、定着鋼板、衝突体は 8 節点固体要素、鉄筋は 2 節点梁要素を用いてモデル化している。要素の積分点に関しては、要素の変形量と計算精度を考慮して、固体要素には 1 点積分を用い、梁要素には精度を向上させるため  $2 \times 2$  Gauss 積分を用いている。また、本解析では自重を全部材に考慮した。減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、水平方向振動モードの最低次固有振動数に対して 5.0% と設定している。解析モデルの総節点数および総要素数は、274,420, 260,584 であり、解析時間は 200 ms までとした。

### 2.3 材料物性モデル

図-3 には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。図-3 (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 1,500  $\mu$  に達した状態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、引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定しており、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用した。図-3 (b) には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素の物性モデルには、塑性硬化係数  $H'$  を弾性係数  $E_s$  の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用している。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用した。

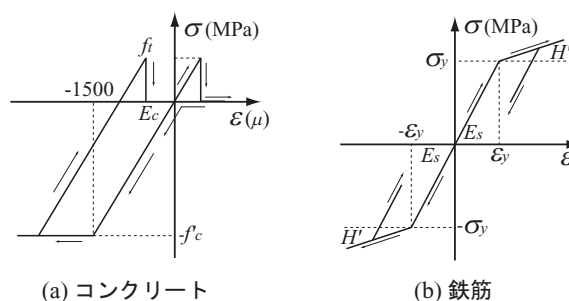


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

## 3. 数値解析結果

### 3.1 各種応答波形

図-4 には、数値解析結果より得られた衝撃力波形及び水平方向の載荷点変位波形を示している。(a) 図の衝撃力波形に着目すると、最大衝撃力は衝突速度の増加と共に増加していることが分かる。波形性状は、いずれの場合も衝突体の衝突直後から衝撃力が急激に励起して最大値に至り、その後振幅が小さく周期の長い第 2 波及び第 3 波で構成されている。また、衝突速度  $V = 20$  km/h では第 1 波と第 2 波の振幅及び周期は類似の値となっているが、衝突速度の増大と共に第 1 波目の最大値が増加する傾向を示し、第 2 波目の周期が長くなることより、第 1 波目と第 2 波目の振幅及び周期の差が徐々に大きくなっていることが分かる。

次に、(b) 図の載荷点変位波形に着目すると、衝突体衝突後に緩やかに最大値に至り、その後残留変位成分を含む減衰自由振動状態に至っている。しかしながら、減衰自由振動状態での振幅は非常に小さく、かつ周期が非常に長いことから過減衰状態に至っていることが分かる。これより、著しい損傷を受けていることが推察される。

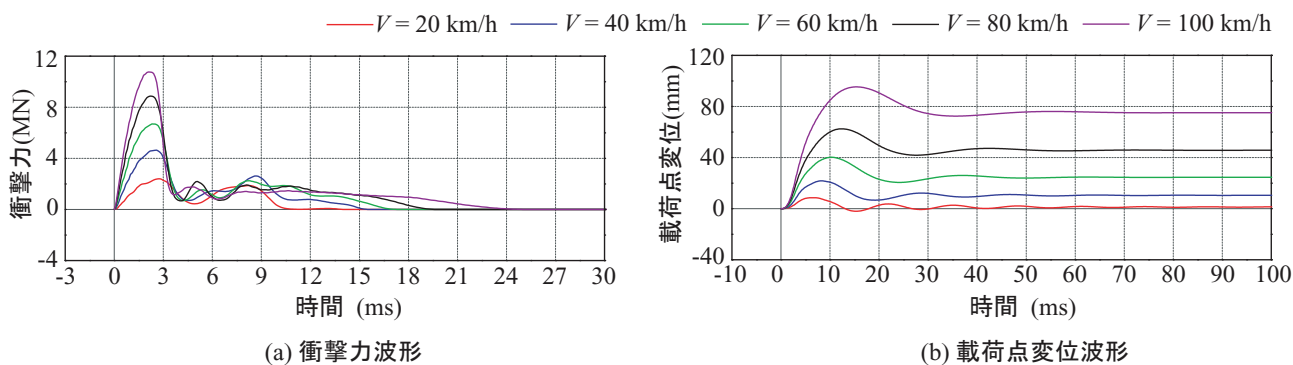


図-4 各種応答波形

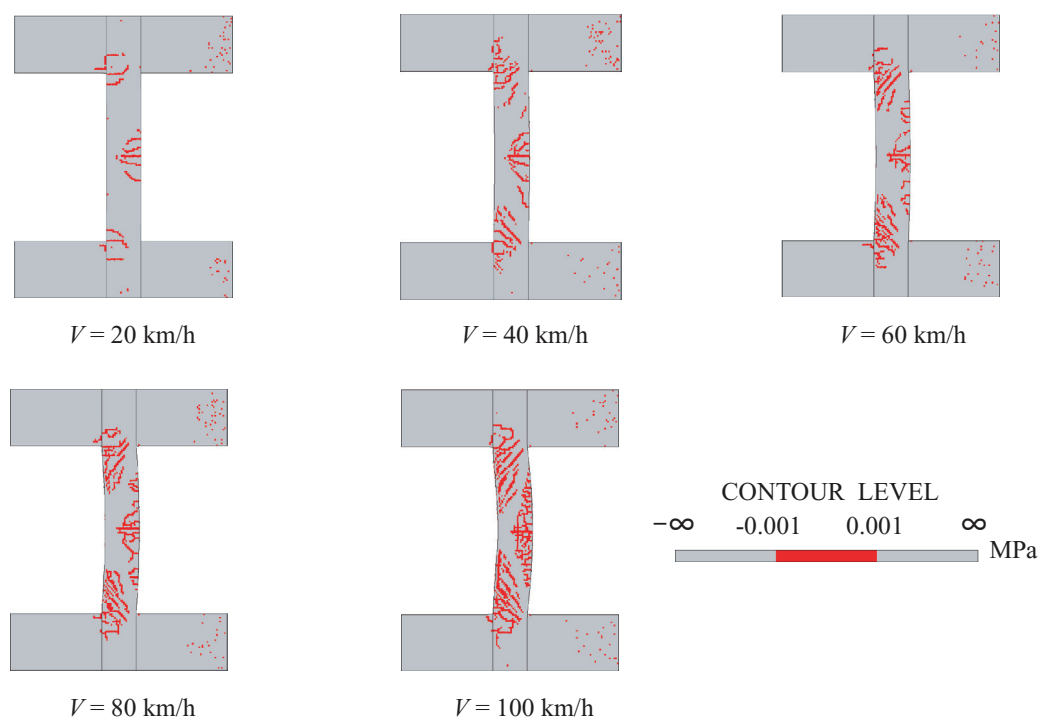


図-5 ひび割れ分布図

### 3.2 ひび割れ分布

図-5には、各衝突速度における柱内に生じるひび割れ分布を示している。ここでは、図-3に示したコンクリートの応力-ひずみ関係から、最大主応力が零近傍の値を示す場合には、応力が真に小さいか、あるいはひび割れが発生していることを意味している。本研究ではこの特性を利用してひび割れ分布を推定評価するものとする。図より、衝突速度  $V=20$  km/h には、載荷点の裏面に曲げと斜めひび割れが発生しており、かつ固定端における載荷側近傍では負曲げによる曲げひび割れが発生している。その後、衝突速度の増加に対応して載荷点裏面のひび割れは柱高さ方向に広がっており、固定端近傍内側では斜めひび割れが顕在化している。衝突速度  $V=100$  km/h では載荷点部で押し抜けせん断破壊が卓越する傾向を示している。

### 3.3 ひび割れおよび曲げモーメント分布の時系列推移状況

図-6には、衝突速度  $V=60$  km/h におけるひび割れおよび曲げモーメント分布の時系列推移状況を示している。 $t=2.5$  ms 時点では、載荷点裏面に曲げと斜めひび割れが発生しており、時間の経過と共に固定端における負曲げによる曲げひび割れや斜めひび割れも発生し、進展している。固定端近傍におけるひび割れの進展に比較して載荷点裏面のひび割れの進展は小さい。最大曲げモーメントは  $t=7.5 \sim 10$  ms 時に発生しているようである。ただし、ひび割れの発生は曲げモーメントがほぼ零に減衰した  $t=20$  ms 時点で最大となり、その後進展していないことが分かる。また、曲げモーメント分布の時系列推移状況から、 $V=60$  km/h の場合には、柱は車両衝突によって両振れの振動を示さずに、正載荷状態で零に減衰していることが分かる。

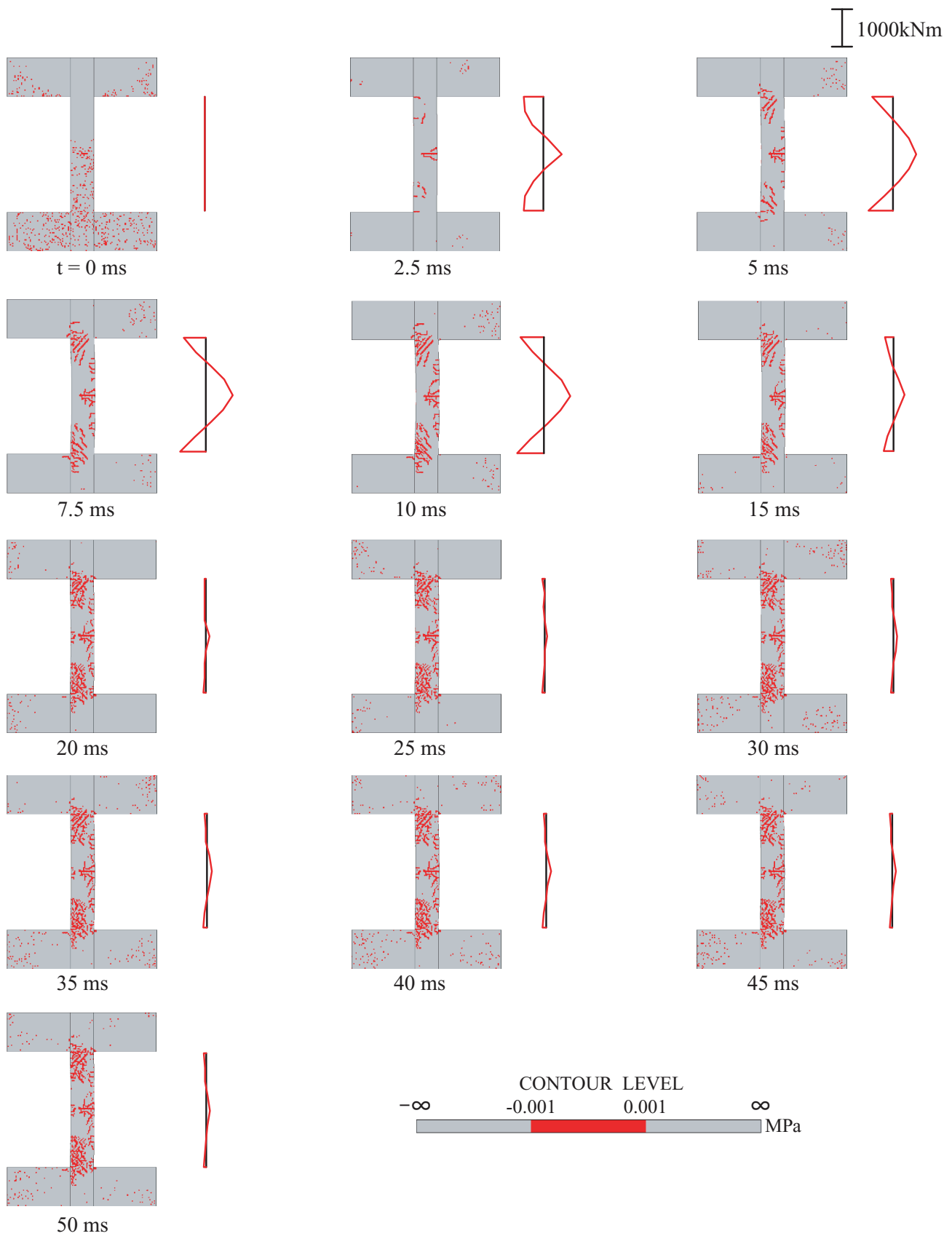
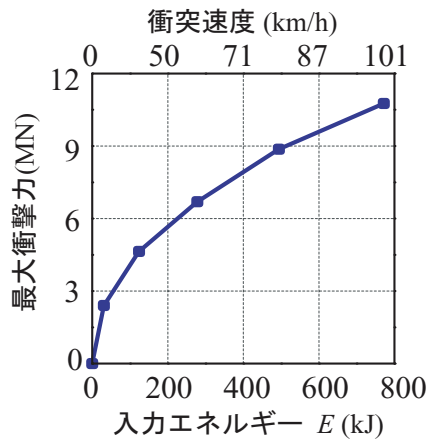
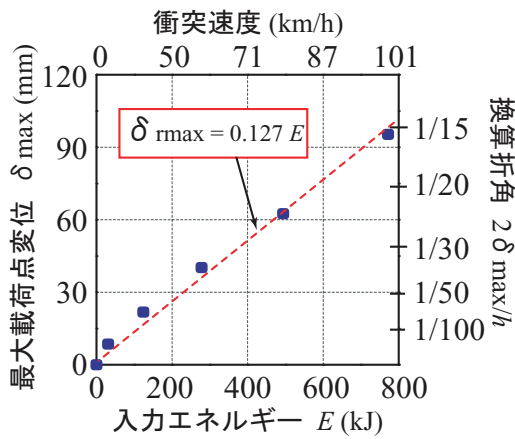


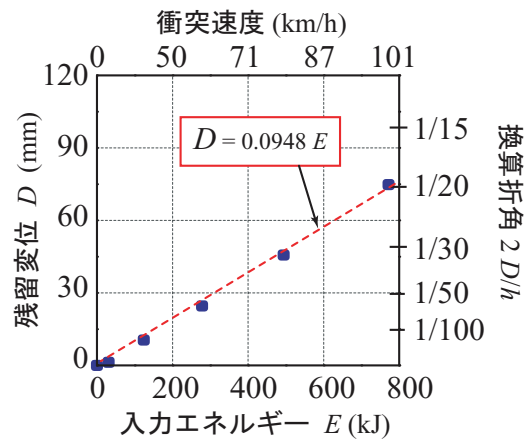
図-6 時系列ひび割れ分布図・曲げモーメント分布図 (W20V60)



(a) 最大衝撃力



(b) 最大载荷点変位



(c) 载荷点残留変位

図-7 各応答値と入力エネルギーの関係

### 3.4 最大応答値の分布性状と耐衝撃設計法へのアプローチ

図-7には、横軸に入力エネルギーあるいは衝突体の衝突速度 (km/h) を取った場合における各応答値 (最大衝撃力, 最大载荷点変位  $\delta_{max}$ , 残留変位  $D$ ) を取って整理している。(a) 図より, 最大衝撃力は入力エネルギーの1/2 乗にほぼ比例する傾向を示している。

一方, (b), (c) 図の最大载荷点変位及び残留変位は入力エネルギーに対してほぼ線形に増加していることが分かる。ここで, それぞれに対して回帰直線を求めると, 次式のように示される。すなわち,

$$\delta_{max} = 0.127E \quad (1)$$

$$D = 0.0948E \quad (2)$$

ここで, 重錘落下衝撃実験結果から, 単純支持 RC 梁の場合には, 静的曲げ耐力  $P_{usc}$ , 残留変位  $D$ , 入力エネルギー  $E$  を用いて, 次式の関係式が成立することが明らかに<sup>2)</sup>。

$$P_{usc} = \alpha \frac{E}{D} \quad (3)$$

ただし,  $\alpha$  は比例定数である。

いま, 本両端固定 RC 柱に対しても, 同様の関係式が成立するものと仮定して定式化を試みる。本両端固定柱を単純支持 RC 梁と仮定した時の静的曲げ耐力は, 断面分割法を用いて  $P_{usc} = 380 \text{ kN}$  として得られる。この値を用い, 上式 (1), (2) に対応する  $\alpha$  を求め数式化すると, 次式のように示される。

$$P_{usc} = 0.05 \frac{E}{\delta_{max}^*} \quad (4)$$

$$P_{usc} = 0.04 \frac{E}{D^*} \quad (5)$$

これより, 入力エネルギー  $E$  (kJ) や各限界状態に対する設定最大変位  $\delta_{max}^*$  (m) あるいは残留変位  $D^*$  (m) を与えると要求の静的曲げ耐力  $P_{usc}$  (kN) が評価可能となる。逆に静的曲げ耐力  $P_{usc}$  や入力エネルギー  $E$  が与えられる場合には, 最大変位  $\delta_{max}^*$  や残留変位  $D^*$  を求めることができ, 各性能を照査可能となる。

#### 4. まとめ

本研究では、RC 造建物の柱部に車両が衝突した場合における耐衝撃設計法を確立することを最終目的に、柱部を簡易に両端固定柱にモデル化し、バンパー無しの車両衝突を想定した 20 kN 円柱体衝突による衝撃応答解析を実施した。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) 最大衝撃力は入力エネルギーに対してほぼ 1/2 乗に比例する傾向を示す。
- 2) 最大載荷点変位や残留変位は入力エネルギーに対してほぼ線形に増加する。
- 3) RC 柱は正載荷状態で最大応答を示し、その後交番振動を示さずに零に減衰する。

- 4) 2) の関係を用いて、最大載荷点変位や残留変位と入力エネルギー、柱の静的曲げ耐力からなる関係式を定式化した。

今後は、断面の異なる RC 柱に関する検討を種々行い、信頼性の高い類似の関係式を定式化することによって、RC 柱の耐衝撃設計が可能になるものと推察される。

#### 参考文献

- 1) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6
- 2) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 岡田 慎哉 (2007) : 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.54 A, pp. 1077-1088.