

# (11) エネルギー基準に基づく耐衝撃設計ケーススタディ

CASE STUDY OF DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SLAB STRUCTURES UNDER SOFT IMPACT LOAD

宮本 文穂\*  
Ayaho MIYAMOTO

\*工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科(〒755 宇部市常盤台2557)

キーワード: 衝撃荷重、RC版構造、エネルギー基準、耐衝撃設計  
(impact load, RC slab structure, energy criteria, impact resistance design)

## 1. はじめに

本論文では、著者らが提案しているソフトな衝撃荷重下でのエネルギー基準および耐荷力基準により安全性照査を行う、RC構造物の全体破壊に対する耐衝撃設計手法<sup>1)</sup>の具体例として、自動車衝突による衝撃作用を受ける鉄筋コンクリート(RC)製高欄について、設定する衝突条件に対して本設計手順に沿ったケーススタディを示してみる。ここでの、安全性の照査はエネルギー基準によって行うものとし、動的解析法として衝撃力の特性を考慮した衝撃破壊挙動解析<sup>2)</sup>を適用する。

## 2. エネルギー基準に基づく耐衝撃設計の概要<sup>3)</sup>

コンクリート版構造に対して、ソフトな衝撃荷重下で考慮すべき主な破壊モード(全体破壊)を、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊とする。このうち、押し抜きせん断破壊は破壊までの吸収エネルギーが小さく、しかも裏面剥離を誘発する可能性が大きいと考えられることから、耐衝撃設計では曲げ破壊を終局限界状態とすることが望ましい。また、衝撃荷重下では同一構造物でも衝撃体の種類あるいは載荷速度(荷重速度)によって破壊モードが変化するため、安全性照査はエネルギー基準によって行う必要がある。ここでは、図1に示すようなエネルギー基準および耐荷力基準を組み合わせた耐衝撃設計のフローに従うものとする。すなわち、対象構造物に対して設計衝撃力とすべき衝撃力~時間関係が与えられている場合には耐荷力基準を適用し(図1②)、また、設定されていない場合においても安全率の算定が必要でない場合には、衝突条件から設計衝撃力となる衝撃力~時間関係をシミュレートする(図1⑤)ことによって耐荷力基準を適用する。一方、安全率の算定を必要とする場合には、安全性照査はエネルギー基準によって行うものとし、設計衝突条件に対して衝撃力特性を考慮した衝撃

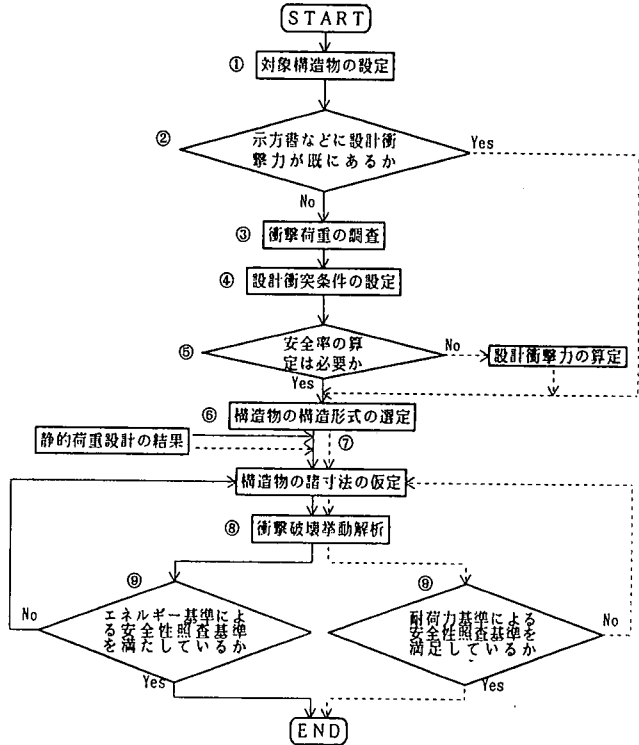


図1 全体破壊に対する耐衝撃設計のフロー

破壊挙動解析<sup>2)</sup>を行う(図1⑧)。これに対して耐荷力基準を適用する場合には、設計衝撃力を入力データとして衝撃破壊挙動解析<sup>4)</sup>を行う(図1⑩)。最後に、エネルギー基準および耐荷力基準による安全性照査のいずれかによって構造物の安全性を確認する(図1⑨)。いずれの場合も、照査基準を満足しない場合には諸寸法を再度仮定する。

エネルギー基準に基づく安全性照査で必要となる版構造の吸収エネルギーは、図2(a)の荷重～載荷点変位曲線で囲まれる部分の面積である「全エネルギー(Total energy; TE)」で評価されるが一般的である。しかし、版構造が局部変形を生じる場合には、構造全体での変形量は小さいものの、載荷点変位が曲げ破壊の場合よりも大きくなり、見掛けのエネルギー吸収能が曲げ破壊の場合よりも優れていると評価される場合があることが考えられる。そこで、耐衝撃性指標として有効と考えられる版構造の変形量を体積積分した「たわみ体積」から版構造全体の平均変形量を求め、図2(b)に示す衝撃力～平均変形量曲線で囲まれる部分の面積で表現されるエネルギー量を「変形エネルギー(Deformation energy; DE)」と定義することにした。これにより、「全エネルギー」とともにコンクリート版構造の吸収エネルギーを表す指標として取り扱い、安全率評価を行った。

安全性の照査は、衝撃体から構造物への加力エネルギー( $E_{re}$ )と各部材の終局吸収エネルギー( $E_{ru}$ )の比較により行う。具体的には、各部材の終局吸収エネルギーは主に載荷速度によって変化するため、設計衝突条件で衝撃破壊挙動解析を行い加力エネルギー( $E_{re}$ )を算定し、この時の平均載荷速度を入力データとして衝撃破壊挙動解析を行って終局吸収エネルギー( $E_{ru}$ )を算定する。さらに、構造物へ入力される衝撃力特性を表す力積 $I$ を考慮して次式によって版構造の安全率を算定するものとした：

$$\gamma_s = \frac{E_{ru} / I_u}{E_{re} / I_e} = \frac{E_{ru} \cdot I_e}{E_{re} \cdot I_u} \quad (1)$$

(ここで、各記号は図3参照)

上式で算定された安全率が1.0以上となれば、版構造の安全性が確保されたことになるが、それ以下の値で安全性が確保できない場合には、断面寸法、鉄筋量、コンクリートの種類などを変更して再検討する。さらに、衝撃破壊モードに関して以下のような検討を行う。一般の設計においては、版構造は曲げ破壊耐荷力よりもせん断破壊耐荷力の方が大きくなるように検討が行われる(図4参照)。一方、衝撃荷重を受けるコンクリート版構造では、載荷速度の上昇とともに押し抜きせん断破壊を生じ易くなることから、破壊は載荷速度( $v_L$ )に応じて、曲げ破壊エネルギー( $E_r(B)$ )および押し抜きせん断破壊エネルギー( $E_r(PS)$ )のうち小さい方に対応した破壊モードに至ると考えられる。例えば、図4の載荷速度 $v_{LU}$ の場合のように両者が逆転する場合には、断面諸量の変更を耐衝撃性評価指標<sup>5)</sup>に基づいて行い、再度衝撃破壊挙動解析を実行し、 $E_4 < E_r(B') < E_r(PS')$ となるようにして、押し抜きせん断破壊の先行を防ぐことが望ましい。

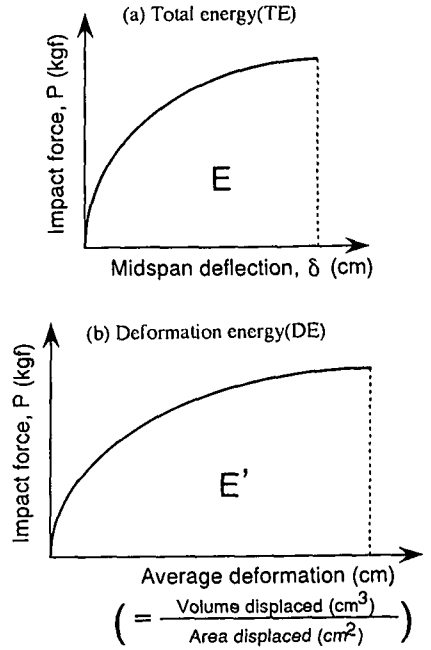


図2 吸収エネルギーの定義

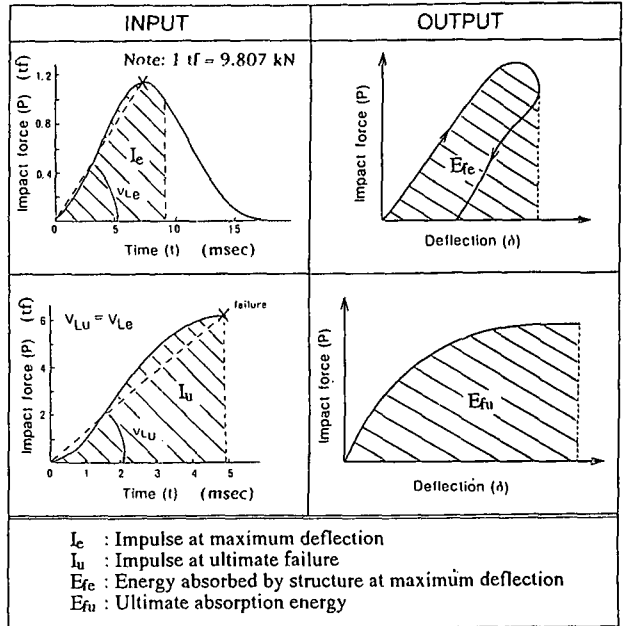


図3 力積と吸収エネルギーの概念図

### 3. RC製高欄の耐衝撃設計ケーススタディ

3.1 設計衝突条件：図5にRC製高欄に対する設計用にモデル化された自動車の設計衝突条件を示す。ここで、多質点モデルで再現される自動車は<sup>6)</sup>、中型の乗用車を想定しており、簡単のために衝突角度はRC高欄に正面衝突（衝突角度=90°）するものと仮定した。設計上の初期値として与える高欄の形状寸法は、静的荷重設計で求められた文献5)のRC高欄と同一（高さ107.5cm，幅400cm，厚さ25cm）とし、衝撃力特性を考慮した衝撃挙動解析に適用した有限要素分割についても同様のものを適用した。

このモデルを基本として、①鉄筋量の変更および②コンクリートの種類の変更を行い、それぞれの補強法の違いが安全率に及ぼす効果を考察する。

3.2 鉄筋量の変更による検討：普通コンクリート製高欄について、部材寸法を一定にして鉄筋量のみを変化させた検討結果を示す。鉄筋量の初期設定には、静的荷重設計で得られた表1の①Case RC1に示す算定値を用いる。以下に、図1に示す耐衝撃設計法のフローに従った設計手順を示す。

①対象構造物の設定：鉄筋コンクリート製高欄。

②設計衝撃力の有無：なし。

③衝撃荷重の調査：自動車の衝突。

④設計衝突条件の設定：図5に示される条件（質点数 = 3，質点重量 = 600kgf(M<sub>1</sub>)，300kgf(M<sub>2</sub>)，300kgf(M<sub>3</sub>)，ばね定数 = 2000kgf/cm(k<sub>1</sub>=k<sub>2</sub>=k<sub>3</sub>)，衝突速度 = 7.5m/sec)，載荷面積 = 600cm<sup>2</sup>（幅：60cm×高さ：10cm），載荷位置 = 中央，基部より上方75cm，衝突角度；90°（正面衝突）。

⑤安全率の算定の要否：必要。

⑥構造形式の選定：鉄筋コンクリート，高欄基部が固定支持の片持ち版形式。

⑦静的荷重設計および構造物の諸寸法の仮定：普通コンクリート（一軸圧縮強度 = 約300kgf/cm<sup>2</sup>）を使用，寸法は，高さ107.5cm，幅400cm，厚さ25cm。

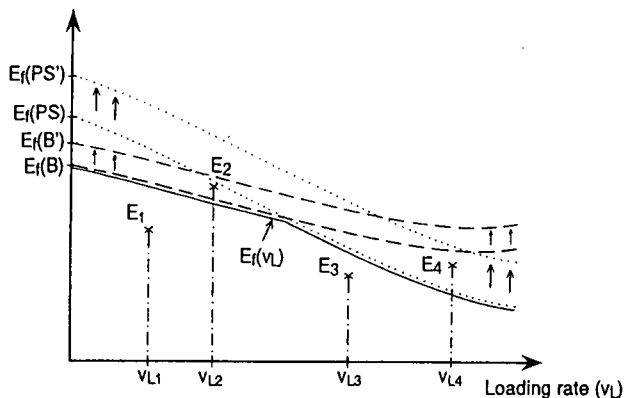
⑧衝撃破壊挙動解析：衝撃力特性を考慮した衝撃破壊挙動解析<sup>2)</sup>を適用して得られた主要な項目についての解析結果を表2中のCase RC1に示す。Case RC1の場合には，裏面のコンクリート要素の圧壊によって高欄は破壊に至った。図6(a),(b)中の記号①は高欄載荷点の水平（配力筋）方向および鉛直（主筋）方向の変形分布を示したものである。これらより，Case RC1の場合には高次振動モードが現れており，衝撃破壊モードが押し抜きせん断破壊であると判断される。

⑨エネルギー基準による安全性照査基準を満たしているか：高欄裏面のコンクリート要素の圧壊によって高欄の破壊に至った。

⑩部材諸寸法の変更：表1の②Case RC2に示すように高欄裏面側の主鉄筋本数を，①Case RC1の13本から20本に増加する。

⑪衝撃破壊挙動解析：解析結果を，Case RC1と同様に，表2中のCase RC2および図6(a),(b)中の記号②にそれぞれ併記する。Case RC2の場合は，高欄前面（載荷面）側のコンクリート要素が圧壊し高欄の破壊（押し抜きせん断破壊）に至った。図6(a),(b)から破壊モードは押し抜きせん断破壊モードと判断されるが，破壊の程度はCase RC1の場合よ

Failure energy (E<sub>f</sub>)



E<sub>f</sub>(v<sub>L</sub>) : Failure envelope for impact loads  
 E<sub>f</sub>(v<sub>L</sub>) = min { E<sub>f</sub>(B), E<sub>f</sub>(PS) }  
 E<sub>f</sub>(B) → E<sub>f</sub>(B') : Structural modifications  
 E<sub>f</sub>(PS) → E<sub>f</sub>(PS') : Structural modifications

図4 破壊エネルギーの概念図

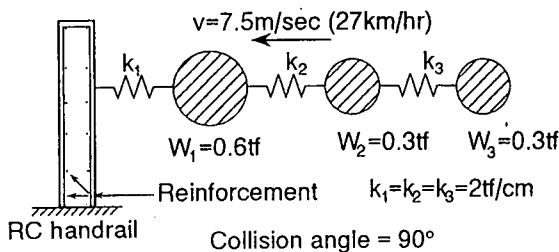


図5 RC製高欄に対する設計衝突条件

りも小さいと考えられる。

表1 RC高欄の補強鉄筋量の条件

⑨ エネルギー基準による安全性照査基準を満たしているか：高欄前面側のコンクリート要素の圧壊により高欄の破壊に至った。

⑦ 部材諸寸法の変更：表1の③Case RC3に示すように、高欄前面側および裏面側の主鉄筋本数を両方とも20本に増加させる。

⑧ 衝撃破壊挙動解析：Case RC1およびCase RC2の場合と同様に解析結果を表2

中のCase RC3に併記し、その変形分布を図6(a),(b)中の記号③に示す。Case RC3の場合には高欄の破壊には至らなかったために、表2のCase RC3の破壊時衝撃力と破壊時変位の欄には、それぞれ最大衝撃力と最大変位を記入した。また、図6(a),(b)中の記号③は、それぞれCase RC3の載荷点最大変位時の載荷点水平（配力筋）方向および鉛直（主筋）方向の変形分布を示したものであり、曲げ変形モードであることがわかる。

⑨ エネルギー基準による安全性照査基準を満たしているか：高欄の破壊に至らなかったため、図1のフローに従って安全性の照査を行う。

ここでは、図1の「①」～「⑥」の記号を「I.」～「VI.」として表し、その手順に沿って以下のように照査を行う。

I. 限界状態の設定：部材の曲げ破壊。

II. 安全率の確認：Case RC3の場合について安全率を算定するために、表2に示すCase RC3の場合の載荷速度  $V_{Le} = 4.14 \text{ tf/msec}$  を  $V_{Lu}$  として衝撃破壊挙動解析を行った。その結果を、表2にCase RC3Uとして併記する。これらの解析結果を用いて安全率を算定すると次のようになる：

全エネルギーによって求められる安全率  $r_i(\text{TE})$  は、次のように算定される。

$$\begin{aligned} r_i(\text{TE}) &= \frac{E_{fu} \times I_c}{E_{fc} \times I_u} \\ &= \frac{E_{RC3U} \times I_{RC3}}{E_{RC3} \times I_{RC3U}} \\ &= \frac{5540 \times 123.5}{1020 \times 224.0} \\ &= 2.99 \end{aligned}$$

載荷面平均変形量から求められるエネルギー（変形エネルギー）を用いて算定される安全率  $r_i(\text{DE})$  は、次のように算定される。

$$\begin{aligned} r_i(\text{DE}) &= \frac{E'_{fu} \times I_c}{E'_{fc} \times I_u} \\ &= \frac{E'_{RC3U} \times I_{RC3}}{E'_{RC3} \times I_{RC3U}} \\ &= \frac{1070 \times 123.5}{363.6 \times 224.0} \\ &= 1.62 \end{aligned}$$

表2 RC高欄の衝撃挙動解析結果一覧

Case	Loading rate (tf/msec)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load (tf)***	Reinforcement yielding load (tf)	Index of local deformation ( $\times 10^4/\text{cm}^2$ )
RC1	4.20	30.86	3.10	21.62	30.12	30.2	10.22
RC2	4.34	30.81	1.15	22.33	30.60	30.6	9.33
RC3	4.14	(30.86)*	(0.50)**	23.24	-----	-----	1.80
RC3U	4.14	43.08	1.41	25.70	40.20	40.4	7.55

Case	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Failure mode*****	Failure condition
RC1	151.1	10300	1620	PS	Concrete crushing at rear face
RC2	143.4	2960	591	PS	Concrete crushing at front face
RC3	123.5	1020****	363.6****	(B)*****	-----
RC3U	224.0	5540	1070	B	Concrete crushing at front face

\* Maximum impact load  
 \*\* Maximum deflection  
 \*\*\* Plasticity in compression  
 \*\*\*\* Energy at maximum deflection  
 \*\*\*\*\* B: Bending, PS: Punching shear  
 \*\*\*\*\* Main deformation mode

Note: 1 tf/ms = 9.807 × 10<sup>3</sup> kN/s; 1 tf = 9.807 kN; 1 kgf·s = 9.807 N·s; 1 kgf·cm = 9.807 × 10<sup>-2</sup> N·m.

これより、安全率がそれぞれ  $r_i(\text{TE}) = 2.99 (> 1.00)$  ,  $r_i(\text{DE}) = 1.62 (> 1.00)$  となり、いずれの評価法でも

安全であることが確認された。

Ⅲ. せん断破壊に対する検討の要否：必要。

Ⅳ. 衝撃破壊モードの推定：表2より Case RC3で適用した荷重速度を破壊に至るまで作用させた結果、曲げ破壊モードとなった。

Ⅴ. せん断破壊を生じる可能性：なし。

Ⅵ. 終了。

3.3 コンクリートの種類の変更による検討：3.2では、鉄筋量を変更することによってRC高欄の耐衝撃性の向上を図ったが、ここでは、3.2と同じ衝撃体モデルの衝突に対して安全性が確保できるようにコンクリートの種類を変更した場合についての検討を行い、安全率の算定を試みる。対象とするコンクリートは高強度コンクリート(HRC)と鋼繊維混入コンクリート(SFRC)とし、文献5)の解析で取り扱ったものと同じ静的材料一軸特性を有するものとする。

(1) HRC高欄

HRC高欄とした場合には、Case RC1と同じ衝突条件で衝撃挙動解析を行った結果、びびわれの発生さえも認められなかった。

表3に今回の解析をCase HRC1として主な

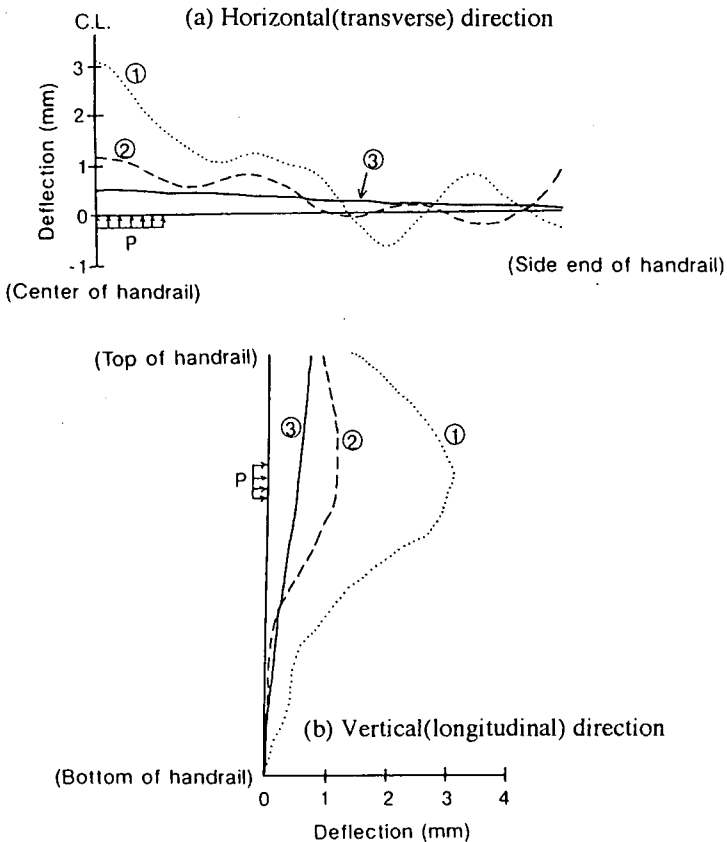


図6 RC製高欄破壊時の変形分布の変化

表3 HRCおよびSFRC高欄の衝撃挙動解析結果一覧

Case	Slab thickness (cm)	Loading rate (tf/msec)	Maximum impact load (tf)	Maximum deflection (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load (tf)**	Reinforcement yielding load (tf)	Index of local deformation ( $\times 10^{-4}/\text{cm}^2$ )
HRC1	25.0	4.14	30.86	0.323	---	---	---	1.76
HRC2*	25.0	4.14	75.39	2.93	60.1	73.1	73.3	10.4
SFRC1	25.0	4.14	30.86	0.680	24.7	---	---	1.65
SFRC2*	25.0	4.14	56.54	3.89	26.9	53.4	54.1	5.70

Case	Volume displaced ( $\text{cm}^3$ )	Impulse ( $\text{kgf}\cdot\text{sec}$ )	Total energy ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}$ )	Deformation energy ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}$ )	Failure / Deformation mode***	Failure condition	Safety factor**** $\gamma_f(\text{TE})$	Safety factor***** $\gamma_f(\text{DE})$
HRC1	505.2	105.4	549.1	210.4	B	---	5.25	2.48
HRC2*	2580	686.0	18750	3395	PS	Concrete crushed (Center)	4.47	2.22
SFRC1	1056	140.3	1489	556.6	B	---		
SFRC2*	3531	385.9	18330	3400	PS	Concrete crushed (Center)		

\* Ultimate loading condition  
 \*\* Plasticity in compression  
 \*\*\* B: Bending, PS: Punching shear  
 \*\*\*\* Safety factor based on total energy  
 \*\*\*\*\* Safety factor based on deformation energy

Note: 1 tf/ms =  $9.807 \times 10^3$  kN/s;  
 1 tf = 9.807 kN; 1  $\text{kgf}\cdot\text{s}$  = 9.807 N·s;  
 1  $\text{kgf}\cdot\text{cm}$  =  $9.807 \times 10^{-2}$  N·m.

解析結果をまとめて示す。この場合、Case RC1の衝突条件では高欄は破壊に至らなかったため、最大変位時の結果を挙げている。また、このCase HRC1での平均荷重速度 $V_L$ は4.14tf/msecであったので、この平均荷重速度を一定としてHRC高欄に漸増衝撃力を作用させ、破壊に至るまで衝撃破壊挙動解析を行った。これをCase HRC2として、表3に主な解析結果を併記する。これらの解析結果から安全率を算出すると、全エネルギーによって求められる値が $\gamma_i(TE) = 5.25$ 、荷重面平均変形量から求められるエネルギーを用いて算定される値が $\gamma_i(DE) = 2.48$ となり、いずれの場合にもCase RC3の鉄筋量を増やした場合よりも安全率が高くなり、安全性に問題はないという評価となった。なお、この場合の全エネルギーから算定される安全率は、変形エネルギーから算定した場合より高く、2.12倍となった。

#### (2) SFRC高欄

次に、コンクリートの種類にSFRCを適用した場合について検討する。SFRC高欄にCase RC1と同じ衝突条件を与えて、衝撃破壊挙動解析を行った結果、高欄の破壊には至らなかった。これをCase SFRC1として、主な解析結果を表3に併記する。また、このCase SFRC1での平均荷重速度(4.14tf/msec)を一定としてSFRC高欄に漸増衝撃力を破壊に至るまで作用させ、衝撃破壊挙動解析を行った結果を表3に併記する。これらのCase SFRC1およびCase SFRC2の解析結果から、安全率の算定を行うと、 $\gamma_i(TE) = 4.47$  ( $\gamma_i(DE) = 2.22$ )となった。また、これより、Case SFRC2の場合には押し抜きせん断破壊となる傾向がみられる、変形分布の状態を表す表3の局所変形指数はCase SFRC2での指標値はCase HRC2の場合の約半分の値であり、局所変形の影響はCase HRC2よりも小さく比較的曲げ破壊に近いことがわかる。

#### 4. 結論

本研究では、ソフトな衝撃を対象としたコンクリート構造物の全体破壊に対する安全性照査をエネルギー基準によって行う耐衝撃設計法の妥当性を確認するために、高欄への自動車衝突等の耐衝撃設計のケーススタディを示した。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

①ソフトな衝撃作用下でのコンクリート版構造に現れる主な破壊モード(全体破壊)は曲げ破壊と押し抜きせん断破壊であり、押し抜きせん断破壊モードの場合には、吸収エネルギーが小さく、裏面剥離を生じる可能性が高いため、耐衝撃設計では曲げ変形モードを終局破壊モードとすることが望ましい。

②本研究で検討したエネルギー基準による安全性照査では、衝撃作用によるコンクリート構造物への加力エネルギー(部材の吸収するエネルギー)と力積の関係を利用して、従来の耐衝撃設計法にはなかった安全率の算定が可能となった。また、衝撃力特性を考慮した衝撃破壊挙動解析を適用することにより、コンクリート構造物の衝撃破壊モードが推定可能な耐衝撃設計が可能となった。

#### 参考文献

- 1) 宮本文穂, 石橋照久, King, M. W.: ソフトな衝撃を受けるコンクリート版構造の耐衝撃設計法の確立に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 1309-1320, 1995. 3.
- 2) 宮本文穂, King, M. W., 石橋照久: 衝撃力特性を考慮したコンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1525-1538, 1993. 3.
- 3) 宮本文穂, King, M. W., 石橋照久: コンクリート版構造の耐衝撃設計に関する基礎的研究, 材料, Vol. 42, No. 491, pp. 1010-1015, 1994. 8.
- 4) A. Miyamoto, King, M. W. and Fujii, M.: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Jour., Vol. 88, No. 4, 1991
- 5) 宮本文穂, 石橋照久, 三戸雅文: コンクリート版構造の耐衝撃性評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1605-1618, 1994. 3.
- 6) 宮本文穂, King, M. W., 石橋照久: 多質点ばねモデルによる衝撃力特性の再現と設計衝撃力の検討, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1515-1528, 1992. 2.