

神戸大学工学部 正 員 〇宮本文穂

神戸大学工学部 正 員 森川英典

神戸大学大学院 学生員 Michael W. King 阪神高速道路公団 正 員 石橋照久

1. まえがき 本研究は、ソフトな衝撃作用を対象とし、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手法を提案するとともに、これに基づいて、高速道路コンクリート製高欄への自動車衝突を例とした耐衝撃設計のケーススタディを試みた結果を述べるものである。

2. 全体破壊に対する耐衝撃設計の考え方 ソフトな衝撃作用下でコンクリート構造物に現れる主要な破壊モード（全体破壊）は、曲げ破壊と押し抜きせん断破壊である。このうち、押し抜きせん断破壊モード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ことが考えられるため、耐衝撃設計では曲げ破壊モードを終局限界状態にするのが望ましい。衝撃荷重下での破壊挙動は、静的荷重下と大きく異なり、同一コンクリート構造物（被衝撃体）でも衝撃体の種類あるいは載荷速度によって破壊モードが異なるため¹⁾、安全性の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、エネルギー基準および耐力基準を組合わせた耐衝撃設計法の手順を以下のように提案する。すなわち、対象構造物に対して設計に用いるべき衝撃力～時間関係が設定されている場合には耐力基準で、また、設定されていない場合にはエネルギー基準で安全性照査を行う。もし、設定されていなければ、想定される衝撃体の種類、衝突速度等を調査し、予測する。次いで、耐衝撃設計で考慮すべき衝撃体の種類、衝突速度、衝突角度等の衝突条件を設定し、安全率の算定が不要な場合、すなわち、耐力基準を満足しているかどうかで設計を行う場合には、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し、設計衝撃力を衝撃破壊挙動解析に作用させる際に必要な衝突位置および載荷面積などを決定する。さらに、静的荷重設計を参照してコンクリートの種類、断面寸法、鉄筋量等の構造物の諸寸法を仮定する。以上のデータをもとに、設定した衝撃体の衝突条件、あるいは設計衝撃力に対して衝撃挙動解析を行う。ここで、エネルギー基準による安全性照査を行う場合には、衝撃力特性を考慮した非線形積分層化有限要素法による衝撃破壊挙動解析²⁾を適用し、設計用衝突条件をデータとして与える。一方、耐力基準による安全性照査を行う場合には、設計衝撃力を入力データとして衝撃破壊挙動解析³⁾を行う。最後に、エネルギー基準による安全性照査および耐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。なお、いずれの安全性照査も満足しない場合は、構造物の諸寸法の仮定を再設定する。

3. エネルギー基準による安全性照査 構造物が衝撃体からの加力エネルギー（ E_{fo} ）を吸収可能であるかどうかの判定は、各部材の終局吸収エネルギー（ E_{fu} ）を算定し、比較することで可能となる。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、設計対象とする衝撃体の衝突条件で生じる載荷速度を入力データとして衝撃挙動解析を行い、その場合の終局吸収エネルギー（ E_{fu} ）と衝撃体の加力エネルギー（ E_{fo} ）を比較することになる。ここでは、構造物へ入力される衝撃力特性を表す力積 I を考慮した次式を定義することによって構造物の安全率 γ_i を算定するものとした：

$$\gamma_i = \frac{E_{fu}/I_u}{E_{fo}/I_o} = \frac{E_{fu} \cdot I_o}{E_{fo} \cdot I_u} \quad (\text{ここで、各記号は図1参照}) \quad (1)$$

算定された安全率 γ_i が1.0 以上となれば、構造物の安全性は確保されることになるが、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を行う。さらに、ここで、構造物の衝撃破壊モードについても検討を加える。すなわち、静的荷重下では一般に、構造物は曲げ耐力よりも押し抜きせん断耐力の方が大きくなるように設計される。これに対して、衝撃作用を受けるコンクリート構造物では、載荷速度の増大とともに押し抜きせん断破壊を生じ易くなることから¹⁾、最初は曲げ破壊先行であったものが載荷速度を漸増させていくとある載荷速度を越えると曲げ破壊エネルギーよりも押し抜きせん断破壊エネルギーの方が小さくなる。衝撃破壊モードが押し抜きせん断の場合には、押し抜きせん断破壊に対する耐衝撃性を向上させ衝

Ayaho MIYAMOTO, Hidenori MORIKAWA, Michael W. KING, Teruhisa ISHIBASHI

撃破壊モードを改善するために、断面諸量の変更を耐衝撃性評価指標に基づいて行い、再度衝撃挙動解析を実行することによって押し抜きせん断破壊の先行を防ぐ。

4. エネルギー基準に基づく耐衝撃設計ケーススタディ ここでは、前述までの耐衝撃設計法の具体例として、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)製高欄の耐衝撃設計のケーススタディを示す。図2に高欄に対する設計衝突条件を示す。多質点モデルで再現される自動車は⁴⁾、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高欄に正面衝突するものと仮定した。まず、静的荷重設計で求められたコンクリート部材寸法および鉄筋量の初期設定を、表1のRC1のように仮定する。ここでは、一例として鉄筋量のみを変化させた検討結果を示す。なお、衝撃破壊挙動解析には衝撃力特性を考慮した解析手法²⁾を適用した。表1には、衝撃破壊挙動解析結果の主要な項目をまとめて併記しているが、RC1およびRC2の場合には、それぞれ裏面および前面(載荷面)側のコンクリート要素の圧壊によっていずれも押し抜きせん断破壊に至った。これに対し、高欄前面側および裏面側の主鉄筋本数を両方とも増加させたRC3の場合には高欄が破壊に至らなかったために、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ている。従って、このRC3の場合について、安全率を算定するために、表1に示すRC3の場合の載荷速度 $V_{L0}=4.14\text{tf/msec}$ を V_{L0} として衝撃破壊挙動解析を実行した。その結果を表1に併記する。これらの解析結果を用いてI値⁶⁾基準に基づく安全率を算定すると次のようになり、しかも、曲げ破壊モードとなるため、耐衝撃性が満足されたものとする。

$$\gamma_i = \frac{E_{fu} \cdot I_u}{E_{fe} \cdot I_u} = \frac{E_{RC3U} \cdot I_{RC3}}{E_{RC3} \cdot I_{RC3U}} = \frac{5540 \times 123.5}{1020 \times 224.0} = 2.99 (>1.00) \quad (2)$$

【参考文献】1)A.Miyamoto, et al.: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Jour., Vol. 88, No. 5, 1991,

2)宮本、他：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, 1993. 3, 3)A.Miyamoto, et al.: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Jour., Vol. 88, No. 4, 1991, 4)宮本、他：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、Vol38A, 1992. 3

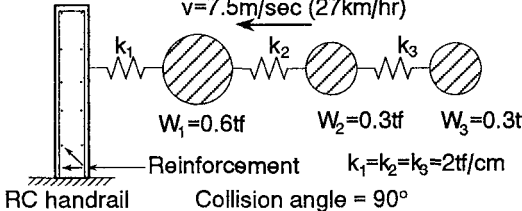


図2 RC高欄に対する設計衝突条件

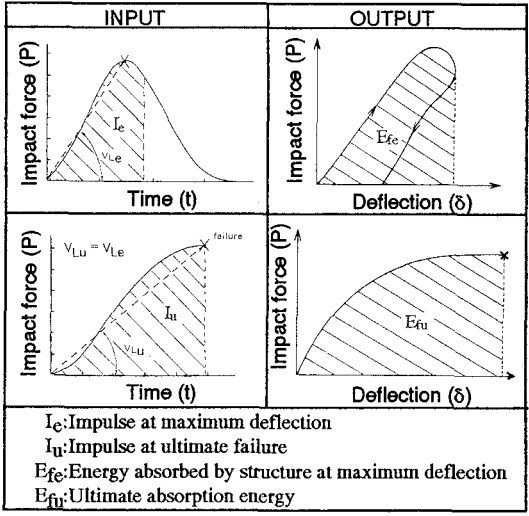


図1 力積と吸収エネルギーの概念図

表1 RC高欄の補強鉄筋量および衝撃破壊挙動解析結果の一覧

Case	Tension steel* $A_S(\text{cm}^2)$	Compression steel* $A_S(\text{cm}^2)$	Loading rate (tf/msec)	Load at failure (tf)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Failure [Deformation] mode	Failure condition
RC1	16.47 [13]	16.47 [13]	4.20	30.86	151.1	10300	Punching shear	Concrete crushing at rear face
RC2	25.34 [20]	16.47 [13]	4.34	30.81	143.4	2960	Punching shear	Concrete crushing at front face
RC3	25.34 [20]	25.34 [20]	4.14	(30.86)**	123.5	1020***	[Bending]	-----
RC3U	25.34 [20]	25.34 [20]	4.14	43.08	224.0	5540	Bending	Concrete crushing at front face

* Value in brackets indicate number of D13 reinforcing bars in horizontal direction
Number of reinforcing bars in vertical direction is kept constant. $A_S=10.14\text{cm}^2(8\phi\text{D13})$
** Maximum impact load *** Energy at maximum deflection