

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

Design Concept for Reinforced Concrete Slab Structures under Soft Impact Loads

宮本文穂*, 石橋照久**, Michael W. KING***

by A. Miyamoto*, T. Ishibashi** and M. W. King***

* 工博, 神戸大学助教授, 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 工修, 阪神高速道路公団, 大阪第一建設部 (〒542 大阪市中央区西心斎橋1-2-4)

*** 工博, Sun-Mix Concrete Sdn. Bhd., Malaysia (元神戸大学大学院自然科学研究科学生)

The main objective of this paper is to propose a dynamic design procedure for concrete slab structures to soft impact loads. Firstly, the ultimate limit states of concrete structures are briefly introduced. And then, a design procedure for reinforced concrete(RC) slab structures under impact loads is discussed, based on energy criterion and load criterion. Finally, a few case studies on design of RC slab structures are carried out as an example of the proposed dynamic design procedure.

Key Words: design concept, RC slab structure, soft impact load, energy criterion, load criterion

1. はじめに

コンクリート構造物に対する合理的な耐衝撃設計法を確立するためには, 各種構造物に要求される機能に応じた耐衝撃性評価指標を明確にする必要がある。著者らは, 現在までにソフトな衝撃作用下でのコンクリート構造物の耐衝撃性を解析的に評価するために, コンクリート版構造(鉄筋コンクリート(RC)版およびRC製高欄)について, コンクリートの種類, 載荷速度をパラメータとした衝撃破壊挙動解析を行い, 耐衝撃性の評価に有効であると考えられる, 破壊時衝撃力, 破壊時変位, ひびわれ発生荷重, 全エネルギー, 力積, たわみ体積, 局部変形指数, 衝撃破壊モードの各指標によって各種コンクリート版構造の耐衝撃性能を検討してきた^{1), 2)}。

現行示方書^{3), 4)}では, 衝撃作用を受けるコンクリート構造物に対する配慮は, 設計外力に衝撃係数を乗じる, あるいは, 等価な静的設計荷重に置換することによって, 静的設計法を適用するように規定されているが, 種々の現実に即さない問題点を含むものとなっている⁵⁾。

本研究では, まず, 各種コンクリート構造物の耐衝撃設計において対象となる限界状態についての検討を行い, 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全体破壊に対する耐衝撃設計法の確立を試みる。エネルギー基準による安全性照査では, 衝撃力特性を考慮した衝撃破壊挙動解析⁶⁾を適用することによって衝撃荷重によって部材に伝達されるエネルギー(加力エネルギー)と部材の終局吸収エネルギーおよびそれぞれに対応して部材に伝達される力積から, これまでに提案されている耐衝撃設計法にはない安全率の算定法を提案した。また, 耐衝撃設計に際しては, 部

材の終局状態での破壊モードは曲げ破壊であることが望ましいことから, 載荷速度(荷重速度)と破壊エネルギーの概念に基づく破壊モード改善の考え方を示した。最後に, 自動車衝突を受ける鉄筋コンクリート製高欄等の耐衝撃設計法のケーススタディを示し, 本設計法の妥当性および算定される安全率の有効性を確認した。

2. 各種コンクリート構造物の限界状態

コンクリート構造物に対する航空機や落石などの衝突によって引き起こされる衝撃作用は, 生起確率は非常に小さいものの, 構造物の破壊によって大規模な被害を生じさせる可能性があり, 適切に耐衝撃設計された防護壁などが必要となる。そのため, 耐衝撃設計を行う場合には, 対象構造物の各種限界状態を明らかにしておく必要がある。一般的な静的荷重設計で限界状態の検討を行う場合には, 使用限界状態と終局限界状態が設定され, それぞれについて安全性の検討が行われる。しかし, 耐衝撃設計を必要とする構造物では, 一般に生起確率の非常に小さい衝撃作用を対象とする場合が多いため, 使用限界状態について検討を行う必要性は少なく, 終局限界状態についてのみ安全性の検討を行うのが合理的であると考えられる。ソフトな衝撃作用下でのコンクリート構造物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るが, 押し抜きせん断破壊モードの場合には, 破壊時までの吸収エネルギーが小さく, 裏面剝離などの局部破壊を生じる可能性が高いと考えられ, 耐衝撃設計では曲げ変形モードを終局限界状態とすることが望ましい。Table 1は, 上述の考えに基づき, 単一衝撃で破壊に至る恐れのある構造物において対象となる限界状態を, 衝撃力の特性(ソフトな衝撃, ハードな衝撃)

Table 1 Ultimate state of concrete structures under impact loads

衝撃力の特性	衝撃体	対象構造物（被衝撃体）	対象となる限界状態
ソフトな衝撃	自動車	高欄	部材断面が破壊に至る状態。部材の曲げ変形により衝突時のエネルギーを吸収するが、路下交通に対して被害を及ぼすような押し抜きせん断破壊や裏面剝離を生じない破壊状態。
		ビル／建築物 立体駐車場内の柱	部材断面の破壊により衝突時のエネルギーを吸収する。ただし、構造全体の破壊に至るのではなく、はり部材にヒンジが形成されるような破壊機構。
		橋脚	部材断面の破壊により衝突時のエネルギーを吸収する。ただし、構造全体としての安定性を維持するために支持力の確保が必要である。また、過大な変形が生じると上部構造の交通に障害が出るので、上部構造の交通に支障を来さない程度の局所的な破壊状態に留めることが望まれる。
	船舶	橋桁	部材断面が破壊に至る状態。衝突時に橋桁に過大な変位を与えると、落橋の恐れがあるため、部材に柔軟性を持たせて衝撃作用を柔に受けとめ、落橋を防止する必要がある。
		橋脚	部材断面が破壊に至る状態。部材の変形によりエネルギーを吸収するが、上部構造の交通に影響を与えない程度の損傷状態。ただし、橋脚設置位置の水深が深い場合には補修補強が困難となるため、緩衝装置を設けるか、橋脚が船舶に対して剛に作用し船舶に衝突時のエネルギーを吸収するように設計する必要がある。
		海洋構造物 石油、天然ガス採掘用 プラットフォーム	部材断面が破壊に至る状態。部材の変形により衝突時のエネルギーを吸収するが、構造全体としての安定性は保たれ、上部構造物の活動に被害の出ない程度の損傷状態
	飛行機	原子力施設 重要構造物 シェルター	一層構造：構造物の重要度により、ひびわれを許容しない場合と、ひびわれは許容するが貫通・裏面剝離は許容しない場合に分けられる。 二層構造：外側の構造物の貫通・裏面剝離は許容するが内側の構造物に関しては構造物の重要度によりひびわれを許容しない場合と、ひびわれは許容するが貫通・裏面剝離を許容しない場合に分けられる。
ハードな衝撃	爆発	落石	部材断面が破壊に至る状態。ただし、部材断面の破壊によりコンクリート片が落下し自動車・列車等の交通に被害を与えない程度の破壊で剛体としての安定は保たれる
		シェルター	一層構造：構造物の重要度により、ひびわれを許容しない場合と、ひびわれは許容するが貫通・裏面剝離は許容しない場合に分けられる。 二層構造：外側の構造物の貫通・裏面剝離は許容するが内側の構造物に関しては構造物の重要度によりひびわれを許容しない場合と、ひびわれは許容するが貫通・裏面剝離を許容しない場合に分けられる。

および想定される衝撃体と対応させて示したものである。

例えば、高架道路上に設置される高欄が自動車の衝突による衝撃作用を受ける場合、高欄は比較的頻繁に生じる軽微な衝突については自動車に対して相対的に剛に挙動し、自動車の変形によって衝突時のエネルギーを吸収させ、高欄の損傷は軽微なものであることが望まれる。一方、ごく稀にしか生じないような大きな衝撃作用を生じる大型車両やトレーラーによる衝突事故に対しては、高欄は比較的柔に挙動し、衝突時のエネルギーを吸収するような機能を備えていることが望まれる。その場合、高欄は車両の路外逸脱を防止するだけでなく、路下交通に対する二次災害を生じることのないように設計されなければならない。高欄が車両の逸脱を防止したとしても二次災害の生じる恐れがあるのは、衝撃破壊時の破壊モードが押し抜きせん断となり、せん断コーンが形成されて裏面剝離によって路下交通にコンクリート塊が落下す

る場合である。このようなことから、耐衝撃設計での高欄の終局限界状態は部材断面が破壊に至るが裏面剝離を生じない状態で、終局衝撃破壊モードは曲げ破壊となるように設定するものとする。

一方、原子力関連施設のような最重要構造物の場合には、衝撃作用による破壊規模の程度によっては想像を絶するような被害を生じることが有り得る。そのため、構造物の重要度に応じて、飛来物の衝突による、貫通、貫入を生じないように設計する必要がある場合と、原子炉格納容器のように飛来物の衝突によってひびわれが生じ、気密性が損なわれて放射能漏れの生じることのないように設計する必要がある場合が考えられる。また、このような構造物では、主に、局所的な破壊が問題であり、限界状態での衝撃破壊モードは一般の土木構造物とは異なり、貫通、貫入、裏面剝離、ひびわれ等が検討されることになる。

3. 全体破壊に対する耐衝撃設計法の考え方

一般に、耐衝撃設計を必要とするコンクリート構造物では、生起確率の非常に小さい衝撃を対象とするため、終局限界状態

に対してのみ安全性の確認を行うのが合理的であると考ええる。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、しかも裏面剝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⁷⁾、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。衝撃荷重によるエネルギー伝達機構は、Fig.1に示すように、衝撃体の持つ衝突前の運動エネルギーのうちの一部分あるいは大部分が構造物に伝達され、このエネルギーは構造物自身の運動エネルギーと構造物内に吸収されるエネルギーに分かれる。また、構造物内に

吸収されたエネルギーはひびわれや摩擦、コンクリートの塑性化等の非回復性のエネルギーとひずみエネルギーに分かれ、後者はさらに回復性のひずみエネルギーの場合には運動エネルギーとして部材の振動に費やされ、非回復性のひずみは構造物の吸収エネルギーとなる⁸⁾。一方、設計示方書等によって設計衝撃力として衝撃力～時間関係が与えられた場合には、耐荷力基準によって安全性照査を検討することになる。

本研究では、Fig. 2に示すように、安全性照査をエネルギー基準および耐荷力基準で行う耐衝撃設計法を提案する。図中の途中で実線、破線に分かれている部分では、実線で示される流れがエネルギー基準であり、破線で示される流れが耐荷力基準によるものである。

以下に、Fig. 2のフロー図に沿った設計手順を述べる。

①対象構造物の設定：耐衝撃設計の対象とする構造物の種類を設定する。

②設計衝撃力設定の有無：設計示方書等に設計用の衝撃力～時間関係が設定されている場合には耐荷力基準で、また、設定されていない場合には衝撃荷重の調査を行う。

③衝撃荷重の調査：対象構造物に対して想定される衝撃体の種類、衝突速度等を調査し、確率統計的により危険度を予測する。

④設計衝突条件の設定：衝撃荷重の調査結果から、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する。

⑤安全率算定の要否：安全率の算定が不要な場合、すなわち、設定された耐荷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を決定する。

⑥構造形式の選定：衝撃体の種類、衝突条件、頻度等を考慮してP C構造にするかR C構造にするかという構造形式などの決定や単純支持にするか固定支持にするかといった支持条件等の構造形式の詳細を決定する。

⑦静的荷重設計および構造物の諸寸法の仮定：静的荷重設計を利用して、コンクリートの種類、断面寸法、鉄筋量、P C鋼材量等の構造物の諸寸法を仮定する。

⑧衝撃挙動解析：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。本研究では、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層化有限要素法による衝撃挙動解析を適用し²⁾、設計用衝突条件をデータとして与える。一方、耐荷力基準により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²⁾を行う。

⑨安全性照査：

(a)エネルギー基準による安全性照査

後述の安全性照査法によって構造物の安全性を確認する。

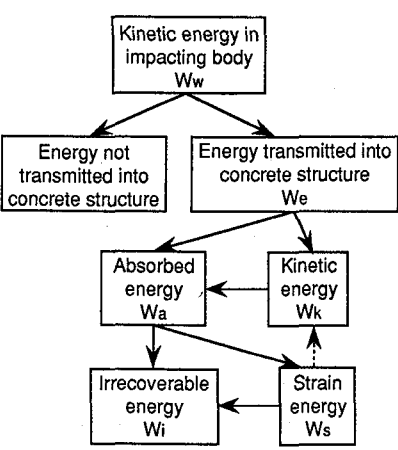


Fig. 1 Energy transformation process of impact collision

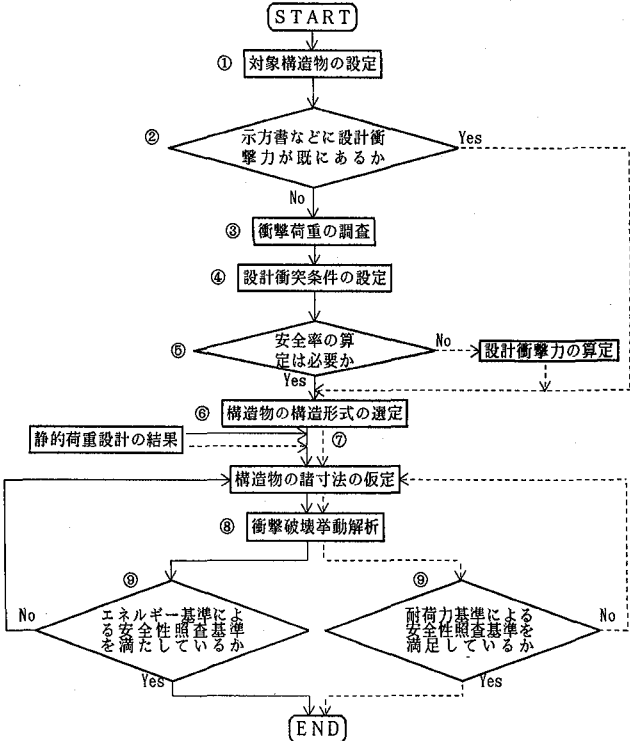


Fig. 2 Flow of dynamic design method for structures under impact load

(b)耐荷力基準による安全性照査

後述の安全性照査法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、⑦の構造物の諸寸法の仮定に戻り再度衝撃挙動解析を行う。

3.1 エネルギー基準による安全性照査法

エネルギー基準によって安全性照査を行う場合、衝撃体の有する運動エネルギーのうち、衝撃作用によって構造物に伝達されるエネルギー量（加力エネルギー）を把握する必要がある。衝撃体が衝突前に持つ運動エネルギーのうち、大まかには衝突時に衝撃体自体の塑性変形によって吸収されるエネルギー、衝撃体のはね返りによる

運動エネルギーおよびその他衝撃体に伝達されないエネルギーを除いたエネルギーが構造物に伝達される加力エネルギーとなる。すなわち、

$$\begin{aligned} & \text{コンクリート構造物への加力エネルギー} (E_{fe}) \\ &= (\text{衝突直前の衝撃体の運動エネルギー}) \\ & - \{ (\text{衝撃体の塑性変形による吸収エネルギー}) \\ & + (\text{衝撃体の跳ね返り後の運動エネルギー}) \\ & + (\text{その他構造物に伝達されないエネルギー}) \} \quad (1) \end{aligned}$$

構造物が上式で表される衝撃体からの加力エネルギー (E_{fe}) を吸収可能であるならば構造物は安全であり、吸収不可能であれば破壊に至ることになり、断面寸法、鉄筋量、コンクリート種類などを再検討する必要がある。

構造物が衝撃体からの加力エネルギー (E_{fe}) 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が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_{fe}) を比較することになる。すなわち、エネルギー基準による安全性照査式の基本式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \text{終局吸収エネルギー} (E_{fu}) > \text{加力エネルギー} (E_{fe}) \\ & \rightarrow \text{安全} \quad (2) \end{aligned}$$

この条件が満たされない場合には、断面寸法、鉄筋量、コンクリート種類等を変更して再度検討を行うことになるが、例えば、部材の吸収エネルギー能を表す耐衝撃性評価指標である「たわみ体積」等¹⁾を用いて効率的にパラメータの変更を行うことも可能である。

構造物への加力エネルギーと部材の終局吸収エネルギーの算定の概念をFig. 3に示す。設計衝突条件による衝撃作用を受ける構造物が破壊に至らない場合、加力エネルギー (部材の吸収するエネルギー) (E_{fe}) は、Fig. 3右上に示す衝撃力～載荷点変位関係の最大変位までの曲線で囲まれる面積として求められる。また、これと対応して、載荷点が最大変位に達するまでに構造物に伝達される力積 (I_e) は、Fig. 3左上の衝撃力～時間関係の斜線部分で表される。このときの載荷速度を V_{Le} とし、これと等しい載荷速度 V_{Lu} ($=V_{Le}$) を有する入力衝撃力の漸増を行い、部材が破壊に至るまで衝撃破壊挙動解析を行う。このときのFig. 3右下に示す破壊時変位に達するまでの衝撃力～変位関係で囲まれる面積で表されるエネルギー量を終局吸収エネルギー (E_{fu})、破壊時変位に達するまでの衝撃力～時間関係で求められる力積を I_u と定義し、図中に示す。ここで、衝撃破壊モードが載荷速度のみに支配されるものと仮定すると、載荷速度が等しい場合、部材が破壊しない場合の変形モードと破壊時の衝撃破壊モードは同一と考えられることから、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を算定するものとした²⁾。

$$\text{安全率 } \gamma_i = \frac{E_{fu} \times I_e}{E_{fe} \times I_u} \quad (3)$$

上式で表される安全率 γ_i が1.0以上であれば、構造物の安全性が確保されることになる。

前述のように、耐衝撃設計では対象構造物の終局限界状態として、衝撃破壊モードを曲げ破壊とすることが望ましいと考えられることから、部材の衝撃破壊モードの改善が必要となる場合がある。そこで、以下の考えに基づく衝撃破壊モードの改善に対する検討方法を示す。

静的荷重下では一般に、各部材は曲げ耐力よりもせん断耐力の方が大きくなるように設計される。そのため、各部材を破壊するのに必要なエネルギーは曲げ破壊エネルギーよりもせん断破壊エネルギーの方が大きくなると考えられる。これに対して、衝撃作用を受けるコンクリート部材では、載荷速度の増大とともにせん断破壊を生じ易くなることから⁷⁾、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 ($E_f(B)$) よりもせん断破壊エネルギー ($E_f(PS)$) の方が小さくなると考える。すなわち、部材の破壊時には載荷速度 (V_L) に応じて、曲げ破壊エネルギー ($E_f(B)$) とせん断破壊エネルギー ($E_f(PS)$) のうち、小さい方に対応した破壊形式が現れると考え、次式の関係が成り立つものとする。

$$E_f(V_L) = \min \{ E_f(B), E_f(PS) \} \quad (4)$$

このような関係を模式的に示したものがFig. 4である。これより、設計衝突条件および終局限界状態に対する衝撃破壊挙動解析の結果、得られるコンクリート部材の状態として以下の4つが考えられる。

- 破壊せず 変形モード: 曲げ (Fig. 4(V_{L1} , E_1) に対応) .. (a)
- 変形モード: せん断 (Fig. 4(V_{L3} , E_3) に対応) .. (b)
- 破壊する 破壊モード: 曲げ (Fig. 4(V_{L2} , E_2) に対応) .. (c)
- 破壊モード: せん断 (Fig. 4(V_{L4} , E_4) に対応) .. (d)

以上の(a)～(d)の各状態によって、破壊モードに対する次のような検討を行う。

(a)の状態: 断面諸量の変更は不要である。

(b)の状態: せん断破壊に対する危険性を重要視する場合には、 $E_3 < E_f(B') < E_f(PS')$ となるように断面諸量を変更する。

(c)の状態: $E_2 < E_f(B')$ となるように断面諸量を変更する。

(d)の状態: 破壊モードが重要でない場合、 $E_4 < \min \{ E_f(B'), E_f(PS') \}$ となるように断面諸量を変更する。せん断破壊に対する危険性を重要視する場合には、 $E_4 < E_f(B') < E_f(PS')$ となるように断面諸量を変更する。

この場合の断面諸量の変更でも耐衝撃性評価指標¹⁾を参考にすることで効率的な変更を行うことが可能となる。衝撃破壊モードが、曲げとなればせん断に対する安全性

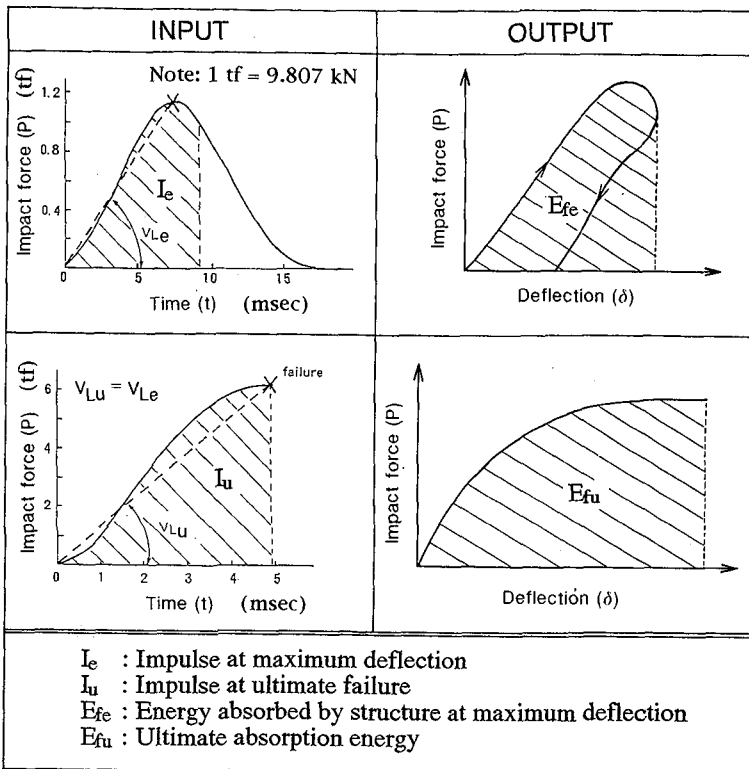


Fig. 3 Calculation of energy absorbed by structure and ultimate absorption energy

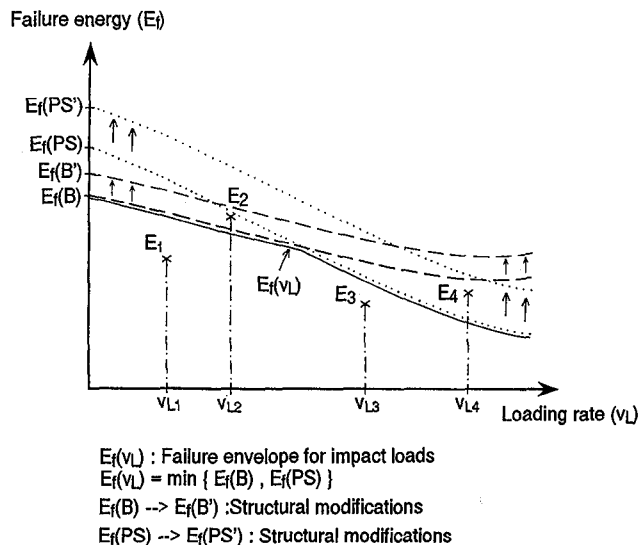


Fig. 4 Concept of failure energy under impact load

が確保されたことになる。

エネルギー基準による安全性照査法のフローをFig. 5に示し、本フローに従った照査手順を以下に述べる。

①終局限界状態の設定

②安全率の確認：安全率が1.0 を越えない場合には、合理的な設計を行うために、耐衝撃性評価指標（例えば、たわみ体積等）を参考にして構造物の断面諸量の変更を行う。

③せん断破壊に対する検討の要否：せん断破壊に対する検討を必要としない場合には安全性照査は終了となる。

④衝撃破壊モードの推定：衝撃挙動解析の結果から衝撃破壊モードを推定する。

⑤せん断破壊を生じる可能性の有無：推定された衝撃破壊モードがせん断破壊を生じる可能性のある押し抜きせん断破壊モード (Fig. 4 ; V_{L3}, E_s) の場合、耐衝撃性評価指標¹⁾を参考にして断面諸量を変更し、再度衝撃挙動解析を行い安全性の検討を行う。

⑥終了

3.2 耐荷力基準による安全性照査法

耐荷力基準による安全性の照査では、Fig. 6のフローに従い、設計衝撃力（衝撃力～時間関係）作用時の構造物の破壊状態が限界状態で設定された状態の範囲内であれば安全であると判断する。設計衝撃力を構造物に作用させて衝撃挙動解析を行った結果、設定された限界状態を越えた場合には、耐衝撃性評価指標¹⁾を参考にして断面諸量の変更を行い再度構造解析を行い、安全性が確保されるまで繰り返し検討する。

3.3 衝撃作用下でのコンクリート部材の吸収エネルギー

前述までのコンクリート部材の吸収エネルギー（加力エネルギー）は、Fig. 7(a)の荷重～載荷点変位曲線で囲まれる部分の面積であり、“全エネルギー”と呼べるものである。しかし、衝撃荷重下でのコンクリート部材では、衝撃作用によって載荷点近傍に変形領域が集中し、せん断破壊に至る局部変形を生じ易く、部材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る場合が考えられる。そのため、せん断破壊を生じる場合でも見掛け上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ように評価されることがある。本来、局部変形を生じる押し抜きせん断破壊では、吸収される全エネルギー量は、部材全体で変形を生じる曲げ破壊の場合よりも小さいのが一般的である。しかし、部材の吸収エネルギーを荷重～載荷点変位曲線で囲まれる面積として評価する限り、上述のような破壊モードの違いによる不合理が生じてしまうことがある。著者らは、耐衝撃性評価指標の一つとして「たわみ体積」をエネルギー吸収能を表す有効な指標の1つとして取り扱っている。この「たわみ体積」は、例えば、コンクリート版の場合には無載荷状態の版面を基準面とし、破壊時の版全面のたわみ曲面を積分し体積表示したものであり¹⁾、版全面で滑らかな変形を生じる曲げ破壊の場合には「たわみ体積」は大きくなり、載荷点近傍の局部変形を生じる押し抜きせん断破壊のような場合には「たわみ体積」は小さくなると考えられる。そこで、局部変形の影響を消去するために、新たに次のようなエネルギー量をコン

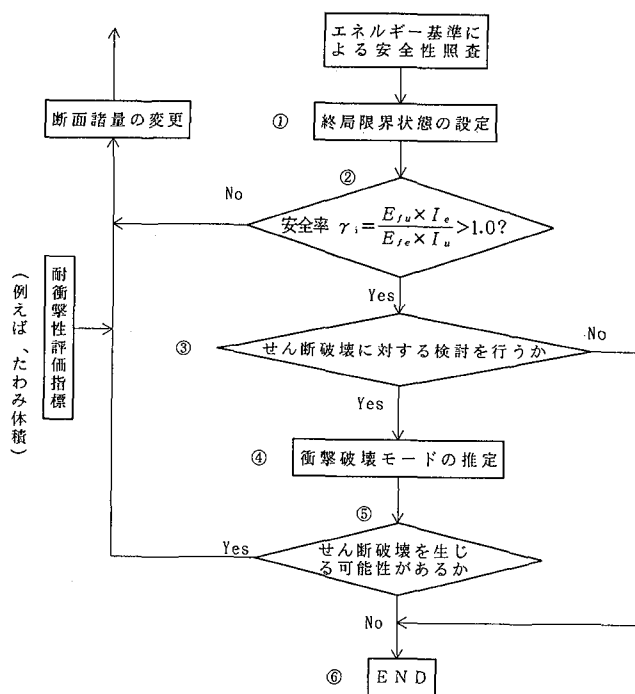


Fig. 5 Flow of safety provision according to energy criterion

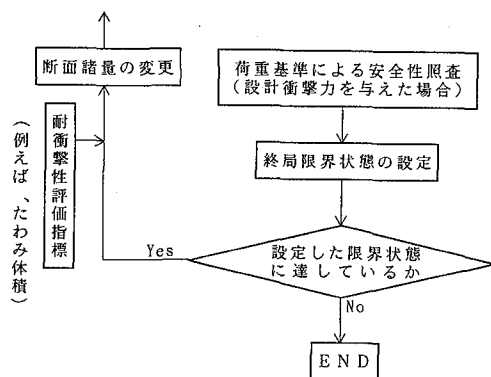


Fig. 6 Flow of safety provision according to load criterion

リート部材の衝撃吸収エネルギーに対応するものとして提案する。すなわち、「たわみ体積」をコンクリート部材の載荷面全体の面積で除し、部材全体の平均変形量を求め、Fig. 7(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)”と定義し,”全エネルギー (Total energy; TE)”とともにコンクリート部材の吸収エネルギーを表す指標として取り扱う。なお、変形エネルギーのディメンジョンは、通常のエネルギー量 (kgf・cm) と同様である。

4. エネルギー基準に基づく耐衝撃設計ケーススタディ

3. で提案した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) 製高欄および飛来物衝突による衝撃作用を受けるコンクリート版について、それぞれ設定する衝突条件に対して

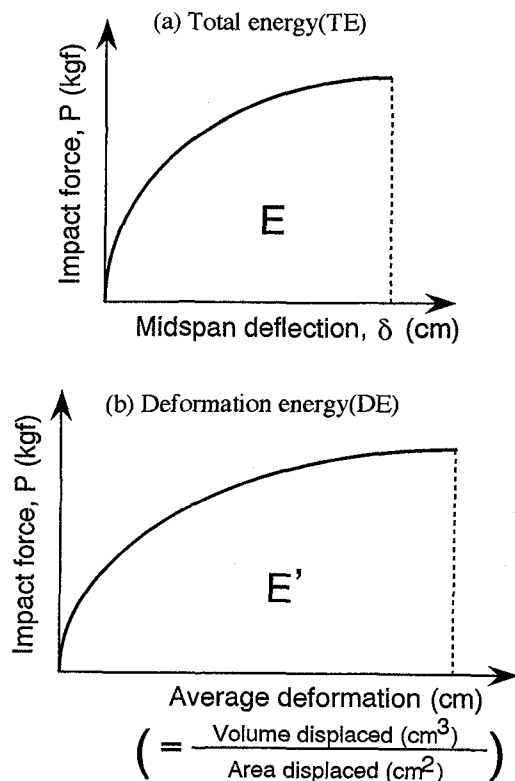


Fig. 7 Definition of energy absorbed during impact loading

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⁶⁾を適用する。また、衝撃体の衝突速度の変化による安全率への影響についても考察する。

4.1 RC製高欄に対する検討

4.1.1 設計衝突条件

Fig. 8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^{9), 10)}、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1)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。

4.1.2 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Table 2の①Case RC1に示す算定値を用いる。

以下に、Fig. 2に示す耐衝撃設計法のフローに従った設

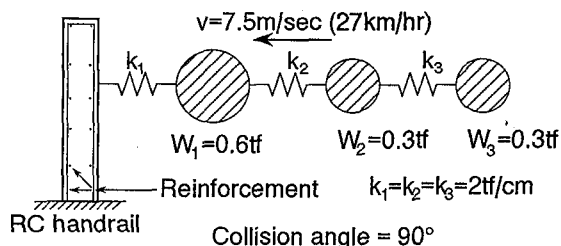


Fig. 8 Setting of design impact condition of RC handrail

Note: 1 tf = 9.807 kN

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：Fig. 8に示される条件（質点数 = 3，質点重量 = 600kgf (M_1), 300kgf (M_2), 300kgf (M_3), ばね定数 = 2000kgf/cm ($k_1=k_2=k_3$), 衝突速度 = 7.5m/sec), 載荷面積 = 600cm² (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

Table 2 Structural modifications of RC handrail

	Tension steel (2nd layer)		Compression steel (7th layer)	
	Longitudinal direction A_s (cm ²)	Transverse direction A_s (cm ²)	Longitudinal direction A_s (cm ²)	Transverse direction A_s (cm ²)
① Case 1	16.471 (13@D13)	10.136 (8@D13)	16.471 (13@D13)	10.136 (8@D13)
② Case 2	25.340 (20@D13)	10.136 (8@D13)	16.471 (13@D13)	10.136 (8@D13)
③ Case 3	25.340 (20@D13)	10.136 (8@D13)	25.340 (20@D13)	10.136 (8@D13)

Table 3 Main results of dynamic analysis for design of RC handrail

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

*** Plasticity in compression

***** B: Bending, PS: Punching shear

** Maximum deflection

**** Energy at maximum deflection

***** Main deformation mode

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

ンクリート（一軸圧縮強度＝約300kgf/cm²）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⁶⁾を適用して得られた主要な項目についての解析結果をTable 3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。Fig. 9(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。また，Fig. 10はCase RC1の場合の衝撃力～載荷点変位関係を示したものであるが，衝撃力が30tf 近くになったあたりから剛性が極度に低下し，一気に破壊に至っていることがわかる。

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。

⑦' 部材諸寸法の変更：Table 2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。

⑧' 衝撃破壊挙動解析：解析結果を，Case RC1と同様に，Table 3中のCase RC2およびFig. 9(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。Fig. 11は，Case RC2の場合の衝撃力～載荷点変位関係を示したものであるが，Case RC1の場合と同じような履歴を描きながら破壊時変位はCase RC1よりも小さくなっている。Fig. 9(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の場合よりも小さいと考えられる。

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：Table 2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Table 3中のCase RC3に併記し，その変形分布をFig. 9(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，Table 3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，

Fig. 9(a), (b)中の記号③は、それぞれCase RC3の荷点最大変位時の荷点水平（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、Fig. 5のフローに従って安全性の照査を行う。

ここでは、Fig. 5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、Table 3に示すCase RC3の場合の荷速度 $V_{Le}=4.14\text{tf/msec}$ を V_{Lu} として衝撃破壊挙動解析を行った。その結果を、Table 3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 $\gamma_i(\text{TE})$ は、次のように算定される。

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

荷点面平均変形量から求められるエネルギー（変形エ

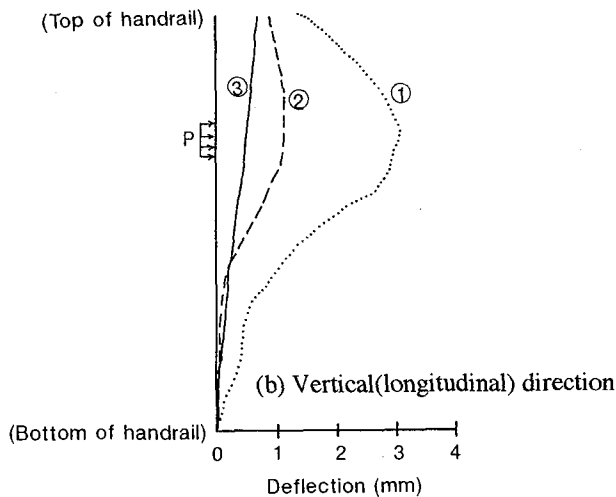
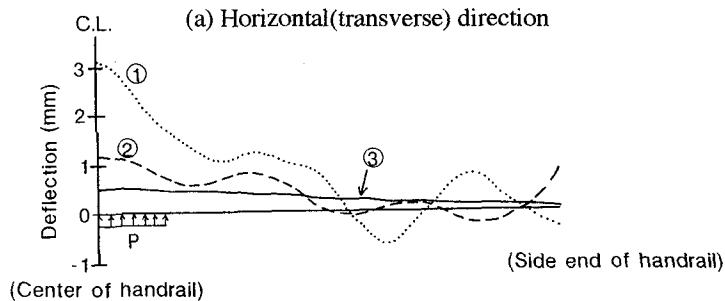


Fig. 9 Distribution of deflection at failure for RC handrails

ネルギー）を用いて算定される安全率 $\gamma_i(\text{DE})$ は、次のように算定される。

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

これより、安全率がそれぞれ $\gamma_i(\text{TE}) = 2.99 (>1.00)$, $\gamma_i(\text{DE}) = 1.62 (>1.00)$ 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：Table 3よりCase RC3で適用した荷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

上述の検討例のCase RC1～Case RC3では、荷点での

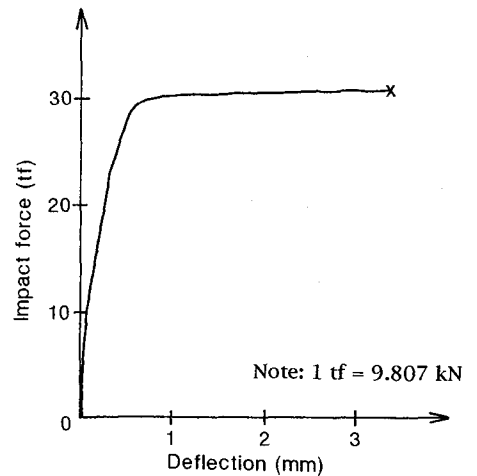


Fig. 10 Impact force - central deflection relation for Case RC1

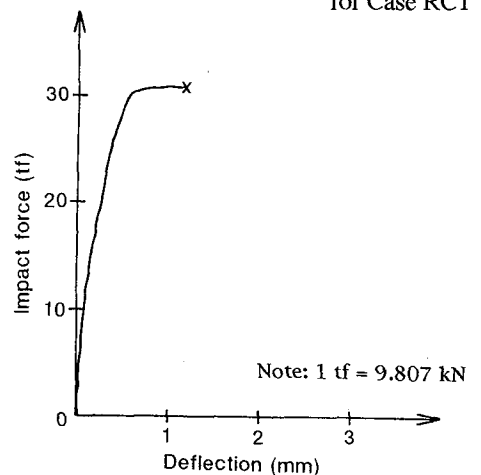


Fig. 11 Impact force - central deflection relation for Case RC2

鉛直方向および水平方向の変形分布から変形モードを推定した。しかし、このように高欄のごく限られた部分だけの変形分布から破壊モードの判断を行うには困難な場合がある。そこで、高欄前面の各節点変位から変形分布図をFig. 12(a)～(c)のようにグラフィック処理すると、全面にわたる変形性状が定性的に容易に把握することが可能となる。図中の矢印が高欄中央の荷点を示し、周囲の色に比して薄い部分は前方に変形し、濃い部分は手前に変形していることを表す。これより、Fig. 12(a), (b)のCase RC1およびCase RC2の場合には、周囲に比べて色の濃い部分や薄い部分が混在し、高次振動モードの影響が現れていることが容易に理解できる。一方、Fig. 12(c)のCase RC3の場合には、変形性状は滑らかで、Case RC1やCase RC2の場合とは大きく異なり、曲げ変形モードであることがわかる。

4.1.3 コンクリートの種類の変更による検討

4.1.2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、4.1.2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1）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、ひびわれの発生さえも認められなかった。Table 4に今回の解析をCase HRC1として主な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、Fig. 13(a), (b)に、Case HRC1の場合の荷点最大変位時の水平（配力筋）方向および鉛直（主筋）方向それぞれの変形分布を示しているが、Case RC1の衝突条件に対してはほとんど変形を生じておらず、しかも曲げ変形モードを呈していることがわかる。このCase HRC1での平均荷速度 V_L は4.14tf/msecであったので、この平均荷速度を一定として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、Table 4に主な解析結果を併記する。Fig. 7(a), (b)にCase HRC2の荷点における

破壊時変形分布をCase HRC1と併記すると、Case HRC1と比較して大きく変形しているが押し抜きせん断破壊モードを呈するようになることがわかる。こ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 $\gamma_i(TE) = 5.25$ 、荷点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。

また、衝撃破壊モードに関しては、Case HRC2の場合で押し抜きせん断破壊となったために、前述の設計手法に従えば破壊モードの改善を検討すべきであるが、今回のケースでは、Case RC1と同じ衝突条件を与えたCase HRC1では、ひびわれも生じなかったことから設定された衝突条件に対しては十分に安全であり、破壊モードの改善の検討の必要はないと考えた。

(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Table 4に併記する。また、このCase SFRC1での平均荷速度（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Table 4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。Fig. 14(a), (b)に、Case SFRC1およびCase SFRC2の荷点水平（配力筋）方向と鉛直（主筋）方向の変形分布を示す。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Table 4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。

(3) HRC高欄およびSFRC高欄の減厚

(2)で述べたHRC高欄の検討結果では、設計衝突条件に対して安全率 $\gamma_i(TE) = 5.25$ （ $\gamma_i(DE) = 2.48$ ）とかなり安全であったことから、高欄厚の減少が可能であると考え、版厚を25cm から20cm に減少させて解析を行った。

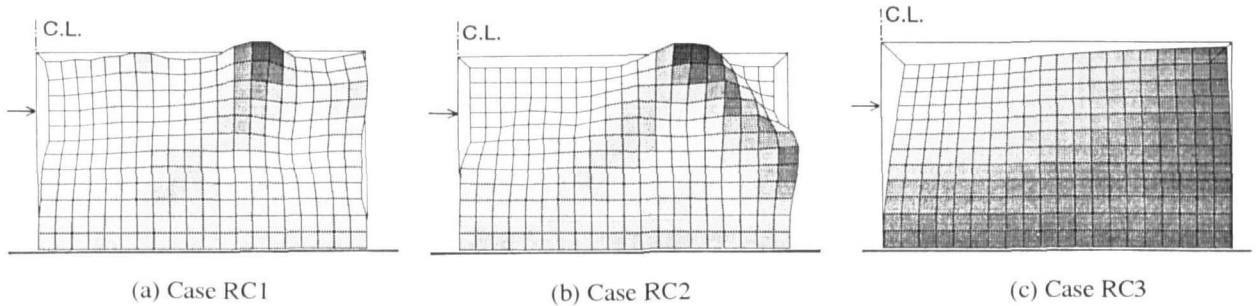


Fig. 12 3-Dimensional deformation mode of RC handrails

Table 4 Main results of dynamic analysis on design of HRC and SFRC handrails

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
HRC3	20.0	4.17	30.86	0.615	---	---	---	1.70
HRC4*	20.0	4.17	58.59	2.81	42.7	56.9	56.9	5.90

Case	Volume displaced (cm ³)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Failure / Deformation mode***	Failure condition	Safety factor**** $\gamma_i(\text{TE})$	Safety factor***** $\gamma_i(\text{DE})$
HRC1	505.2	105.4	549.1	210.4	B	---	5.25	2.48
HRC2*	2580	686.0	18750	3395	PS	Concrete crushed (Center)	---	---
SFRC1	1056	140.3	1489	556.6	B	---	4.47	2.22
SFRC2*	3531	385.9	18330	3400	PS	Concrete crushed (Center)	---	---
HRC3	1045	120.4	1133	499.2	B	---	3.34	1.70
HRC4*	30000	411.6	12940	2909	PS	Concrete crushed (Front face)	---	---

* 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 = 9.807×10^3 kN/s;
 1 tf = 9.807 kN; 1 kgf·s = 9.807 N·s;
 1 kgf·cm = 9.807×10^{-2} N·m.

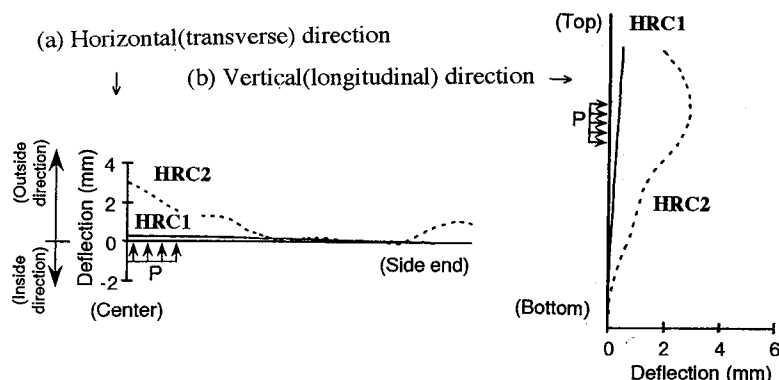


Fig. 13 Distribution of deflection at failure for HRC handrails

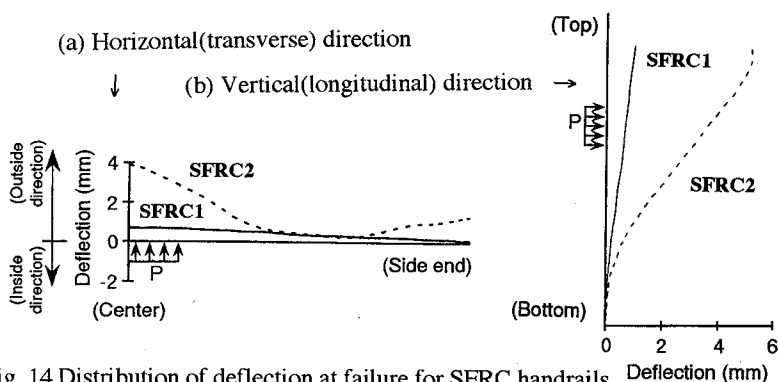


Fig. 14 Distribution of deflection at failure for SFRC handrails

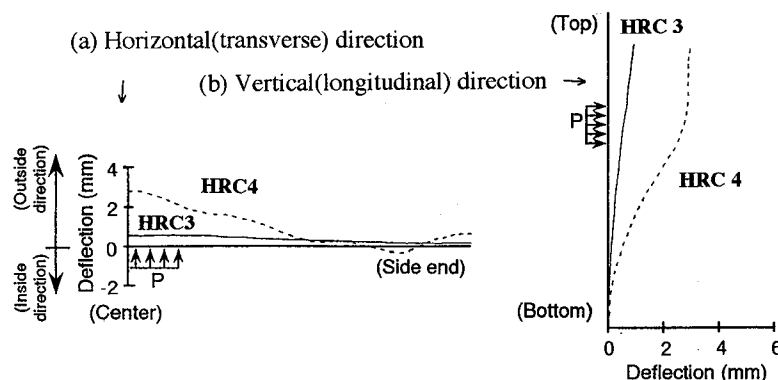


Fig. 15 Distribution of deflection at failure for HRC handrails(with reduced depth)

このHRC高欄に、これまでと同じ設計衝突条件で衝撃破壊挙動解析を行った結果、この場合も高欄の破壊には至らなかった。設計衝突条件下と終局限界状態での主な解析結果を、それぞれCase HRC3およびCase HRC4としてTable 4にまとめて示す。これらの解析結果から、安全率を算定すると $\gamma_i(\text{TE}) = 3.34$ ($\gamma_i(\text{DE}) = 1.70$)となった。これより、HRC高欄では版厚を20cmとしても今回設定された設計衝突条件に対しては安全であることが確認できた。Case HRC3およびCase HRC4の場合の载荷点水平（配力筋）方向および鉛直（主筋）方向の変形分布を、それぞれFig. 15(a), (b)に示す。これより、Case HRC4の場合には、押し抜きせん断破壊モードの傾向を示していることがわかるが、Table 4の局部変形指数がCase HRC2場合の値の約57%であり、Case HRC2の場合よりも局部変形の影響は小さくなっている。これは、Case HRC2の場合にはCase HRC4よりも耐力は向上するが、破壊領域が分散せずに载荷点近傍に集中したためであると考えられる。

HRC高欄の場合と同様に、SFRC高欄についても高欄厚の減少を検討したが、Case RC1の衝突条件に対して、高欄厚20cmおよび23cmいずれの場合も破壊に至った。これよりSFRC高欄の場合、これ以上の減厚はできないことが確認された。

4.2 ひびわれを許容しない構造物についての検討

4.2.1 設計衝突条件

飛来物の衝突によってひびわれが生じるのを許容しない構造物について、耐衝撃設計のケーススタディを示す。このような条件を有する構造物としては、ひびわれの発生によって気密性が損なわれ、内部の放射能が漏れる恐れのある原子炉格納容器などが考えられる。飛来物の原子力施設等への衝突を対象とした実験¹¹⁾を参考にして、縦250cm、横250cm、厚さ40cmの複鉄筋普通コンクリート版をFig. 16に示すように要素分割し、Fig. 17に示すような衝突条件に対して検討する。なお、主鉄筋比は上・下面ともに約0.5%と仮定した。

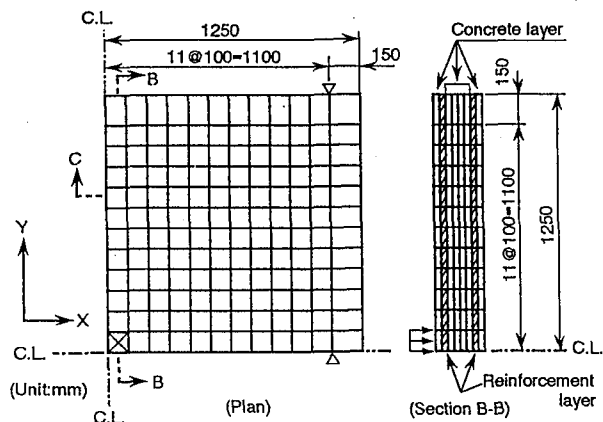


Fig. 16 Layered finite element mesh of RC slab

Table 5 Main results of dynamic analysis on design of RC slab(No crack ultimate condition)

Case	Loading rate (tf/msec)	Maximum deflection (mm)	Maximum impact load (tf)	Cracking load (tf)	Impulse (kgf·sec)	Total energy (kgf·cm)	Deformation energy (kgf·cm)	Safety factor* γ_i (TE)	Safety factor** γ_i (DE)
CR1	71.1	0.253	106.6	106.6	96.32	2044	855.6	—	—
CRH1	62.5	0.582	56.65	—	241.9	5337	3108	1.29	1.15
CRH1U	62.5	0.582	171.9	171.9	236.6	6747	3478	—	—

* Safety factor based on total energy

** Safety factor based on deformation energy

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

4.2.2 HRC版の適用

まず、普通コンクリート版に対してFig. 17の衝突条件で衝撃破壊挙動解析を行った結果、版中央の要素にひびわれが生じた。この解析の主な結果をCase CR1として、Table 5に示す。著者らのコンクリート版構造に関する耐衝撃性の検討結果¹⁾からひびわれ発生抑制に関しては、高強度コンクリート(HRC)が有効であることが明らかとなっており、HRCを適用したケースをCase CRH1として解析を行ったところ、各要素ともひびわれの発生は認められ

Table 6 Main results of effects of safety factor under different collision speeds

Collision speed* (cm/sec)	Loading rate (tf/msec)	Maximum impact load (tf)	Maximum deflection (mm)	Time** (msec)	Impact load** (tf)	Total energy** (kgf·cm)	Deformation energy** (kgf·cm)	Impulse** (kgf·sec)	Safety factor*** γ_i (TE)	Safety factor**** γ_i (DE)
20	1.22	2.38	0.151	3.25	1.50	30.60	19.03	5.670	5.61	4.38
30	1.83	3.57	0.227	3.25	2.25	68.85	42.82	8.506	7.66	3.48
40	2.44	4.76	0.303	3.25	3.00	122.4	76.13	11.34	4.26	2.07
50	3.05	5.95	0.409	3.45	3.25	204.8	121.6	14.88	3.89	2.08
60	3.66	7.14	0.539	3.60	3.47	321.1	185.4	18.40	3.55	1.69
70	4.27	8.33	0.694	3.65	3.89	476.8	267.3	21.67	2.93	1.63
80	5.01	9.52	0.810	3.95	3.46	633.5	370.0	25.94	3.09	1.51
90	5.64	10.7	1.14	3.80	4.41	992.7	516.6	28.56	2.62	1.42
20U	1.22	15.5	1.46	12.7	15.5	1490	724.0	49.21	—	—
30U	1.83	19.0	2.29	10.4	19.0	3070	868.0	49.49	—	—
40U	2.44	16.7	2.13	6.85	16.7	2633	796.0	57.26	—	—
50U	3.05	18.2	2.19	5.95	18.2	2890	916.4	54.00	—	—
60U	3.66	17.2	1.93	4.70	17.2	2502	686.8	40.43	—	—
70U	4.27	19.6	1.95	4.45	19.6	2729	852.5	42.29	—	—
80U	5.01	19.8	1.95	3.95	19.8	2948	838.7	39.08	—	—
90U	5.64	22.3	2.36	3.95	22.3	4011	1130	43.97	—	—

* U indicates ultimate loading condition

** At maximum deflection or at failure (ultimate loading condition)

*** Safety factor based on total energy

**** Safety factor based on deformation energy

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

なかった。そこで、この場合の平均載荷速度を求め、この載荷速度を一定として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。その主な解析結果をCase CRH1UとしてTable 5に併記する。

Case CRH1およびCase CRH1Uの解析結果から、ひびわれに対する安全率を算定すると $\gamma_i(TE) = 1.29$ ($\gamma_i(DE) = 1.15$) が得られ、HRCを用いることによってひびわれの発生に対する安全性が確保されたと考えられる。

4.3 衝撃体の衝突速度が安全率に及ぼす影響

以上のような耐衝撃設計のケーススタディの結果から、本研究で提案した安全率の実用性が明らかになったと考えるが、厳密には部材の安全度を表すものではないので、

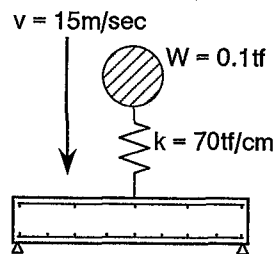


Fig. 17 Design impact condition of RC slab

設計衝突条件での応力状態の違いによって安全率がどのように変化するか把握しておく必要がある。特に、前述のケーススタディでは、安全率を“全エネルギー”および“変形エネルギー”両者の値に対してそれぞれ算定した。その結果、各ケースごとに安全率の比をとってみると、 $\gamma_i(TE)/\gamma_i(DE)$ が2.0前後の値となることがわかったが、それぞれの値が安全率1.0に対してどのような漸近の仕方をするかが不明である。そこで、ここでは、高さ130cm、幅130cm、厚さ13cmの複鉄筋コンクリート版⁷⁾(スパン=120cm)が、重量0.5tf、接触ばね

定数50tf/cm、衝突角度90°の衝突体モデルを受ける場合を例に、設計衝突条件の衝突速度を漸増させてそれぞれ衝撃破壊挙動解析を行い、それぞれに対する安全率の変化を算定した。主な解析結果をTable 6に示す。表中、上段は各衝突速度で衝撃体が衝突する際の衝撃挙動解析結果を、下段はそれぞれの衝突速度に対する終局限界状態に対する衝撃破壊挙動解析の結果をまとめて示したものである。また、Table 6には示していないが、衝突速度95cm/secおよび100cm/secの場合についても衝撃破壊挙動解析を行ったが、いずれの場合においてもRC版の破壊に至った。

この解析結果に基づいて、全エ

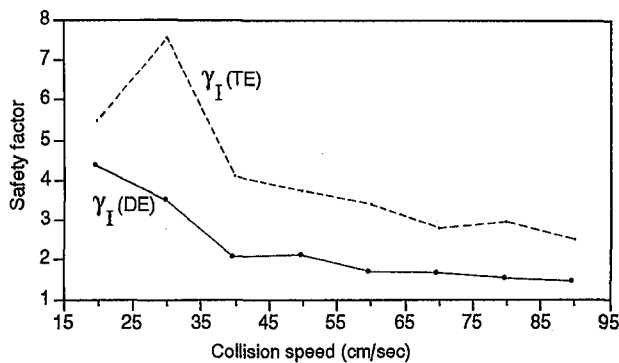


Fig. 18 Safety factor of RC slab under different collision speeds

エネルギーおよび変形エネルギーによって算定される安全率を、Table 6にそれぞれ $\gamma_i(TE)$, $\gamma_i(DE)$ として表し、これらの結果を Fig. 18に示す。この結果から、全エネルギーによって算定される安全率は、設計衝突条件下での解析結果が部材の破壊応力に近い状態でも、比較的高い安全率を有していることがわかる。また、Fig. 18より、全エネルギーの場合の衝突速度30cm/secのケースを除いて、両者ともに安全率1.0への収束性が認められる。

5. 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提案を行い、そ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、裏面剝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本研究で提案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を可能とした。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。さらに、コンクリート構造物の破壊エネルギーと破壊モードの関係から、破壊モードの改善法を提案した。

③コンクリート部材の吸収エネルギーに関して、“全エネルギー(TE)”では、押し抜きせん断破壊を生じるコ

ンクリート版構造の吸収エネルギーを過大に評価する場合がある。そこで、「たわみ体積」から部材の平均変形量を求め、衝撃力～平均変形量曲線で囲まれる面積で表されるエネルギーを新たに“変形エネルギー(DE)”と定義し、全エネルギーとともに吸収エネルギーを評価する指標とした。

④衝撃体の衝突速度をパラメータとして、全エネルギーおよび変形エネルギーによる安全率の変化を比較した結果、いずれの場合も収束する傾向はほぼ同じであるが、全エネルギーから算定される安全率は変形エネルギーで算定する場合の約2倍の値となることがわかり、相互に変換が可能である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) King M. W.: Nonlinear Dynamic Analysis and Design Concepts for Concrete Structures Subjected to Soft Impact Loads, 神戸大学博士論文, 1993. 1
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (共通編, コンクリート橋編), 1978.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 45pp. 1991. 9.
- 5) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993. 12.
- 6) 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.
- 7) Miyamoto, A., King, M. W. and Fujii, M.: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 538-545, Sept. -Oct., 1991.
- 8) 小柳治, 六郷恵哲, 堀口浩司: 繰返し衝撃作用を受ける鋼繊維補強コンクリートはり部材の破壊性状, セメント技報年報, Vol. 38, pp. 381-384, 1984.
- 9) 宮本文穂, King, M. W., 梶井弘樹: 構造物に作用する衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1555-1566, 1991. 3.
- 10) 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.
- 11) 財団法人 電力中央研究所: 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 141pp., 1991. 7.

(1994年9月14日受付)