

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

Integrated Impact Failure Analysis of Concrete Slab Structures
with Consideration of Impact Load Characteristics

宮本文穂^{*)}M. W. King^{**)}石橋照久^{***)}

By Ayaho MIYAMOTO*, Michael W. KING** and Teruhisa ISHIBASHI***

An integrated analytical procedure for analysis of reinforced concrete structures under soft impact collisions is proposed. The impacting body is modeled using a lumped-mass model, which is capable of predicting the resultant impact load characteristics for an arbitrary collision. On the other hand, a nonlinear dynamic layered finite element procedure is employed for predicting the ultimate behaviors and also impact failure modes of concrete slab structures. Both the analyses are then linked up through a dynamic interactive procedure. The interactive procedure is capable of simulating accurately the effects of effective mass and effective stiffness of the concrete structure, and the results can be upgraded at each time step. Furthermore, the energy transmission process during impact collision can also be predicted. Finally, the ultimate behaviors and failure modes for reinforced concrete handrails and fiber reinforced plastic (FRP) reinforced concrete slabs under impact collision are studied. The kinetic energy transmitted by an impacting body as well as the energy absorbed by concrete slab structures are found to be affected by the final failure modes in the structure.

1. はじめに

コンクリート構造物に対する耐衝撃設計法を確立する上で、材料の破壊条件などに対応させた構造物の各種限界状態を高精度に予測することが可能な衝撃応答解析法の開発とともに、コンクリート構造物に作用する可能性のある衝撃力の特性と衝撃作用の発生頻度を明らかにし、両者を相互に統合した破壊挙動を検討することが重要となる。

鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対する衝撃問題を取り扱う場合、衝撃体と構造物の特性の相互関係によって、“ハードな衝撃”と“ソフトな衝撃”に分類して考えるのが一般的となっている¹⁾。通常、RC構造物に対する車両、船舶、航空機などの衝突では、衝撃体の変形を伴いながら衝突する現象と考えられる。その結果、衝撃力の立ち上がりの比較的ゆっくりした、しかも作用時間の比較的長い衝撃作用 (ソフトな衝撃) とみなせる場合が多い。

一方、RC構造物の衝撃問題には、離散化手法に分類される有限要素法²⁾、個別要素法^{3), 4)}などの解析手法が適用されているが、衝撃力の特性を十分に考慮した、耐衝撃設計に反映可能な衝撃応答解析法はまだ十分に確立されていないのが現状と考えられる。

^{*)} 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)

^{**)} 工博, 神戸大学大学院, 自然科学研究科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

^{***)} 工修, 阪神高速道路公団 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

本研究では、衝撃力の特性を考慮したRC版構造の衝撃応答解析を可能にするために、多質点ばねモデルによる衝撃力特性解析とRC版構造に対する衝撃破壊挙動解析の両者の間で各時間増分毎に相互に必要なデータの授受を行うという手法で2つの解析手法を統合する。これによって、被衝撃体の剛性や衝撃作用中にコンクリート構造物に生じるひびわれや部分破壊の考慮が可能となり、比較的簡単に構造物に生じる実際の現象と対応させた衝撃力特性のもとでの衝撃破壊挙動解析が実現できる。また、2つの解析手法を統合することで得られる利点を確認するために、一例として鉄筋コンクリート製高欄および鉄筋あるいは連続繊維プラスチック（FRP）筋で補強されたコンクリート版に対する衝撃破壊挙動解析を行い、統合することによって可能となるコンクリート構造物に伝達される運動エネルギー収支の評価を含めた耐衝撃性評価を行う。

2. 衝撃力特性のモデル化^{5), 6)}

2.1 衝撃力特性の定義

コンクリート構造物は多様な形で衝撃力が作用し、その結果発生する衝撃力の特性は、衝撃体と被衝撃体相互の特性などによって影響を受けるが、主として衝撃体に支配されるものと考えられる。衝撃力は、一般に継続時間が短く、衝撃直後に衝撃波を発生させるため、構造物の耐衝撃設計法を確立するには衝撃力の特性やその発生頻度などのデータが必要不可欠となる。

そこで、ここではコンクリート構造物に作用する衝撃力の特性を評価するために、図-1に模式的に示したような物理特性として、衝撃力特性を以下のような諸量で定義した：①最大衝撃力（Maximum impact force）、②衝撃作用時間（Duration of impact force）、③衝撃力立ち上がり時間（最大衝撃力に達するまでの時間；Time to maximum force）、④衝撃力特性初期の立ち上がり勾配（載荷速度；Loading rate）、⑤衝撃力波形（Shape of impact force）、⑥力積（Impulse）。

以上のような定義に従って、コンクリート構造物の種々の衝撃現象に対する衝撃力特性の各数値を定量的に決定すれば、確率論などを適用した耐衝撃設計を効率的に行うことが可能となると考える。

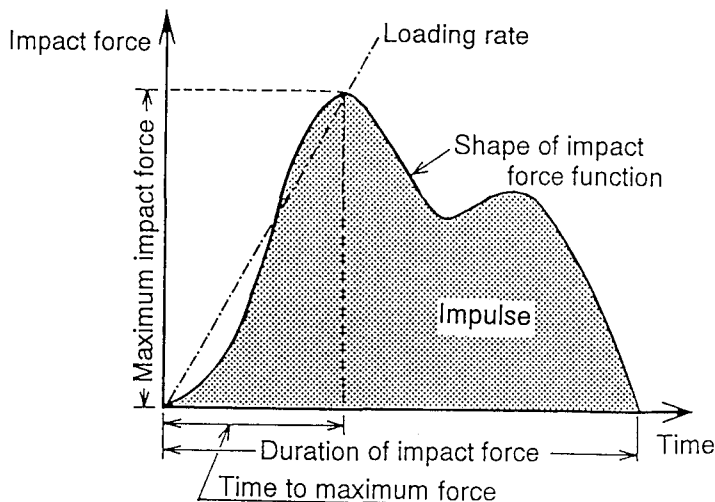


図-1 衝撃力特性の定義

2.2 多質点ばねモデルによる衝撃力特性の解析

衝撃力特性の解析には、図-2に示すような多質点ばねモデルを使用した。本解析モデルは、Lumped-mass modelを基本として、各質点(m_i)間に非線形軸方向ばね(k_i)と回転ばね(g_i)および回転運動減衰と軸方向減衰(ダッシュポットで表現するもので図-2では省略している)をそれぞれ与え(非線形粘弾性ばね)、各質点の並進方向と回転方向の自由度を持たせることにより、質点の分布が一軸上にある衝撃体だけでなく偏心を有する場合にも衝撃力特性の再現が可能である。一方、被衝撃体はコンクリート構造物を想定し、完全剛体ではないある大きさを持った質点(m_t)とし、線形ばね(k_t)とダッシュポット(c_t)によって完全剛体に連結されているものとしてモデル化した。このようなモデルによる数値解析手法を用いて、被衝撃体に作用する衝撃力特性、衝撃体各質点の加速度応答特性などの算定を行った。また、これらの結果を振子式試験装置を用いた衝撃力実験結果と比較することにより、解析法の妥当性を検証して精度および特性を明らかにするとともに、衝撃力特性の評価の有効性を検討した。なお、衝撃力特性の解析方法の詳細および解析結果の検証方法の詳細については巻末の参考文献5)および6)を参照されたい。

3. RC版構造の衝撃破壊挙動の解析手法^{7), 8)}

RC版構造の衝撃破壊挙動解析には、薄板の曲げ有限要素解析を積層化手法を用いて準3次元に拡張した非線形積層化有限要素法を用いた。本解析では、図-3に示すようにRC版がコンクリート層と補強筋層で表されるいくつかの層の積み重ねで構成されていると考え、各層を平面応力状態として取り扱う。各要素は

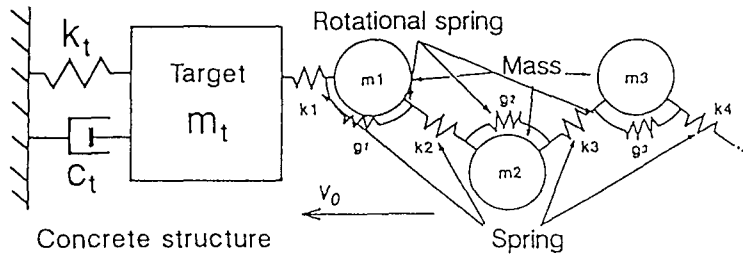


図-2 多質点ばねモデル^{5), 6)}

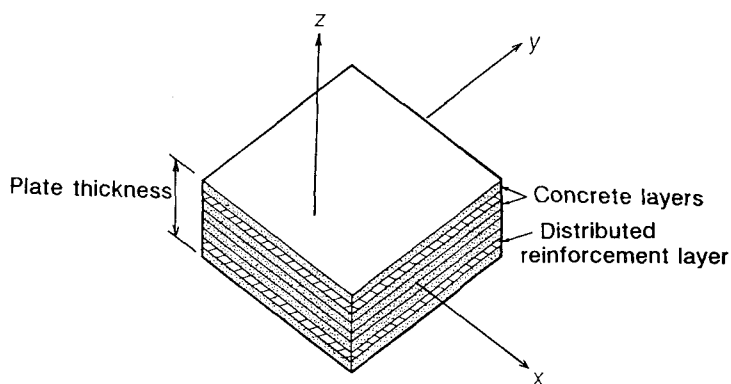


図-3 積層化の概念図
および座標軸

4 節点からなる非適合長方形要素とし、要素の各節点は5自由度を有する。動的平衡方程式の解法には Newmark- β 法($\beta=1/4$)を用いるが、衝撃作用下でのコンクリート構造物の挙動は、衝撃力の作用時間が短いために減衰の影響は小さいと考えられ、ここでは減衰の影響を無視した。RC版構造の解析上の破壊の定義は、RC断面内でのコンクリートの圧壊時、あるいは補強筋の破断時とし、その衝撃破壊モードは変形性状、要素の破壊状態、ひびわれ分布などを総合的に考慮して決定した⁸⁾。すなわち、衝撃破壊モードを、ソフトな衝撃現象に特有な曲げ(B)、曲げ挙動先行の押し抜きせん断破壊(B $\rightarrow$ PS)および押し抜きせん断破壊(PS)に分類した。

本研究における衝撃破壊挙動解析の解析フローを図-4に示す。なお、本解析における基本仮定は以下に示すとおりである：

- ① RC版を仮想コンクリート層と、軸力と平面方向のせん断力を負担する線材として取り扱う補強筋層でモデル化する。なお、コンクリート層と補強筋層の層間付着は完全付着とする。
- ② 要素で代表されるコンクリート各層は平面応力場にあるものとし、層間にすべりは生じないものとするが、衝撃作用時に生じる面外せん断応力の影響は解析に取り入れる。
- ③ コンクリートの破壊条件には、Ottoosenの3軸応力条件下での破壊条件⁹⁾を用い、補強筋については1軸破壊条件を適用する。コンクリートの材料特性は、静的1軸試験データに基づいて、3軸応力状態におけ

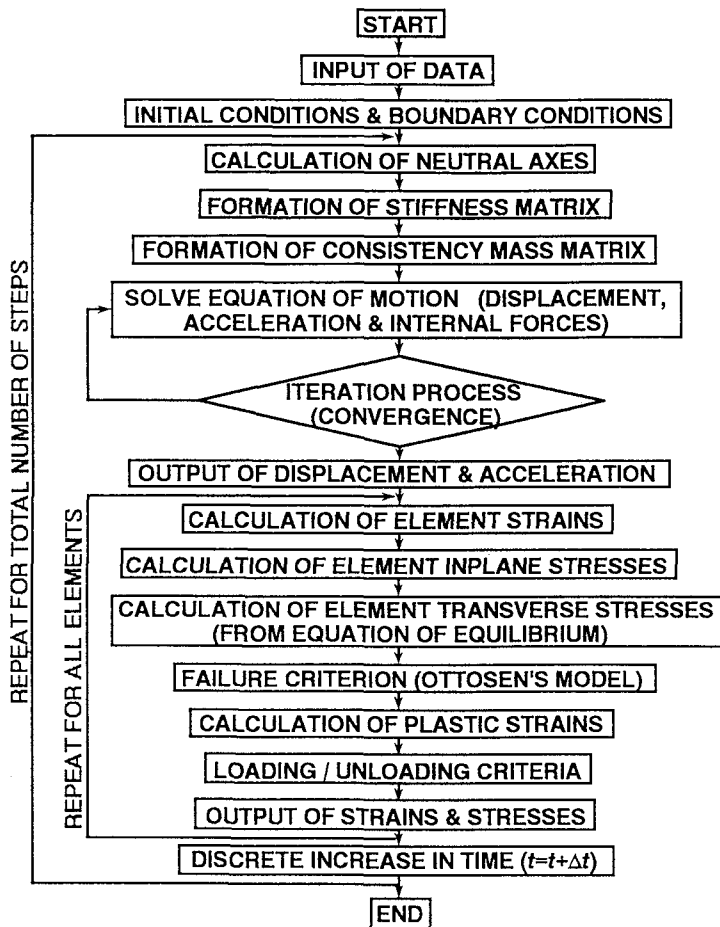


図-4 コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析フロー

る相当応力～相当ひずみ関係に変換した3軸特性を用いる。

④ 弾性範囲を越えるコンクリート要素は直交異方性体と仮定する。なお、各要素の破断および破壊条件の取扱いは、その部分に蓄積されたひずみエネルギーを、内部応力に等価な要素節点力に置換する方法とする。

以上のような解析手法に基づいた解析結果の検証は、大型RC版に対する衝撃破壊実験結果との比較により行い、ほぼ精度良く破壊前の弾性挙動、ひびわれ発生後の終局挙動および破壊モードなどの予測が可能であることを確認している。なお、衝撃破壊挙動の解析方法の詳細および解析結果の検証精度の詳細については巻末の参考文献7)および8)を参照されたい。

4. 衝撃力特性を考慮したRC版構造の衝撃破壊挙動解析

4.1 衝撃力特性解析^{5)・6)}と衝撃破壊挙動解析^{7)・8)}の統合

衝撃作用を受けるコンクリート構造物に生じる最大衝撃力は、被衝撃体であるコンクリート構造物の剛性などによっても左右され、コンクリート構造物の剛性が高いと最大衝撃力は大きくなり、逆に、剛性が低い場合には最大衝撃力は小さくなる傾向がある。また、コンクリート構造物にひびわれあるいは部分的破壊が生じると、剛性が低下し発生する最大衝撃力は減少する。多質点ばねモデルによる衝撃力特性解析では、このようなコンクリート構造物の衝撃破壊の進行に伴う剛性低下を考慮していないため、衝撃力を過大評価する傾向があり、構造物の実際の現象と忠実に対応した衝撃力特性を表現できない場合がある。そのため、本手法による衝撃力特性解析では衝撃力特性を定義する諸量の算定やそれを利用した設計衝撃力の決定に適用するには有効であるが、コンクリート構造物の衝撃破壊過程を考慮した衝撃力特性解析を単独で行うことはできない。

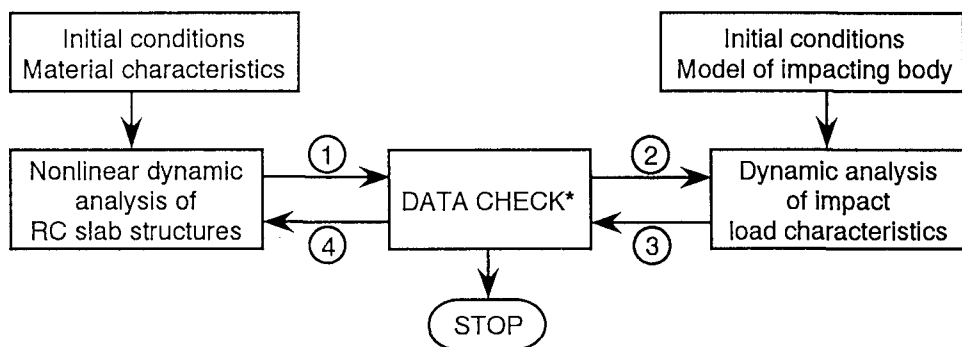
一方、RC版構造に対する衝撃破壊挙動解析では、これまで衝撃入力データは上述の衝撃力特性解析で得られる衝撃力～時間関係、あるいは本研究室で振り子式衝撃破壊試験装置により行われた鉄筋コンクリート版の衝撃破壊試験より得られる衝撃力～時間関係を利用して与えていた。しかし、前者のデータを利用する場合、先に述べた理由から実際の衝撃現象とは異なった外力を与えることになり、また、後者のデータを利用する場合では、衝撃破壊試験で得られたデータが単体の重錘（剛体）の衝突によるものであり、解析手法の検証や各種コンクリート版の破壊モードや耐衝撃性を評価するには有効であるが、多質点で構成されるとみなされる自動車、航空機などの衝撃体に対しては直接利用することはできないと考えられる。

そこで本研究では、上述両者の解析データを相互に有機的に結び付ける（統合する）ことによって、それぞれ単独の解析方法で欠点（弱点）となる部分を解消するとともに、多様（質量分布、衝突角度など）な衝撃力特性のもとでの衝撃破壊挙動解析を可能とする。

図－5は、衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析を統合して解析するのに必要なデータの授受の状態を示したものである。すなわち、2つの解析法を統合して合理的な解析を行うためには、衝撃力特性の解析部分ではコンクリート版の変位、速度、加速度、ひずみ、応力、コンクリート版の状態（破壊の進行状態；ひびわれ発生、塑性状態および剛性低下など）、有効質量、有効剛性などが、一方、衝撃破壊挙動解析部分ではこれに対応した衝撃力が各時間増分毎に必要となる。ここで、コンクリート版の有効質量の初期値は部材の全質量とし、有効剛性は衝撃力と変形の関係から求められる見かけの剛性とした。また、衝撃体モデルの各種物理特性の初期値は、参考文献6)に示すSI(System Identification)法によって推定可能である。

図中に示す①～④では、各時間増分毎に次のようなデータの授受が行われる：

①：衝撃破壊挙動解析部分からコンクリート版の変位、速度、加速度、ひずみ、応力、コンクリート版の状態、有効質量および有効剛性が入力され、コンクリート版の破壊条件の判定が行われる。コンクリート版に破壊が生じた場合は解析を終了する。ただし、破壊が生じていてもさらに解析を継続する必要がある場合には、さらに次の過程へと進む。



- * Failure criteria (structural failure) or end of impact collision
- ① Displacement, velocity, acceleration, strain, stress, slab status, effective mass, effective stiffness
 - ② Displacement, velocity, acceleration, effective mass, effective stiffness
 - ③ Displacement, velocity, acceleration, impact force
 - ④ Impact force

図－５ 衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析の統合法

②：①で衝撃破壊挙動解析部分から出力されたデータのうち、コンクリート版の変位、速度、加速度、有効質量および有効剛性が衝撃力特性解析部分に引き渡される。

③：衝撃力特性解析部分より、衝撃体の変位、速度、加速度、衝撃力を出力し、コンクリート版と衝撃体の接触判定が行われる。判定の結果、接触が継続しており、さらに計算を継続する場合は次の④に進み、衝撃作用が終了したと判定されると解析を終了する。

④：衝撃破壊挙動解析部分に衝撃力が入力され、次の時間増分に対する衝撃破壊挙動解析が行われる。

上述の方法で、各時間ステップ毎に衝撃力特性解析部分にコンクリート版の有効質量、有効剛性を直接入力すると、コンクリート版の剛性低下に伴う有効質量、有効剛性の変化に対応することが可能となり、また、多質点で構成される物体の衝突に対しても対応できるようになる。

このように２つの解析を統合した場合、計算は構造物が破壊に至るまで、あるいは衝突現象が終わるまで行うことが可能となる。また、解析結果から、コンクリート構造物と衝撃体双方の動的挙動の評価や、コンクリート構造物に伝達される運動エネルギー収支の評価が可能となり、衝撃作用を受けるコンクリート構造物の耐衝撃設計を考える際の有効な手助けとなると考える。

4.2 RC版構造の衝撃破壊挙動の解析結果

衝撃力特性解析と衝撃破壊挙動解析を統合する利点を確認するために、次の２つのシリーズの解析を行った。すなわち、第１のシリーズは、鉄筋コンクリート製高欄に重量2.5tfの単体の重錘が衝突する場合（図－６(a) Model I）と、同様の高欄に総重量がそれぞれ1.2tf, 1.6tfの３質点で構成される衝撃体が衝突する場合（図－６(b) Model II, III）である。ここで、Model IとModel II, IIIとの相違は、衝撃体の特性としてModel Iの衝撃体は剛体、Model II, IIIの衝撃体は比較的柔な（変形を伴う）ものとしている点である。一方、第２のシリーズは、重量0.5tfの単体の重錘が鉄筋あるいは連続繊維補強プラスチック（FRP）筋で補強したコンクリート版に衝突する場合（図－６(c) Model IV）である。ただし、今回の解析例では、簡単のため衝撃体は各構造物に対して正面衝突するものとして取り扱う。

(1) 鉄筋コンクリート製高欄の解析 (Model I, II, III)

ここでは、解析手法の適用例として、図-6 (a), (b)に示すModel I～IIIの3種類の異なった衝撃体による高速道路などに設置されるコンクリート製高欄への衝突現象を解析する。ここで、Model Iによる解析は、同じ種類の鉄筋コンクリート製高欄で過去に行われた実物実験¹⁰⁾の結果をシミュレートするためのものである。実物実験では、鉄筋コンクリート製高欄に重量2.5tfの単体の重錘を高さ105.2cm (位置エネルギー; 2.63tf・m) から、ゴム板などの緩衝材を介さずに振り子式に落下させて直接衝突させた。解析に用いた接触ばねのばね定数は、参考文献6)に示すSI法を使用して、実物実験の結果から推定した値を用いた。一方、Model II, IIIは、鉄筋コンクリート製高欄に自動車衝突することを想定したものであり、図-6 (b)に示すModel IIの衝撃体の質点分布はフロントエンジンの乗用車を、また、Model IIIでは小型トラックを簡略的にモデル化したものである⁵⁾。Model II, IIIの衝突速度と総重量は、設計示方書や各種調査結果¹¹⁾を参考にして決定したものであり、接触ばねを含めたモデルのばね定数は乗用車の静的圧縮試験で得られた平均剛性¹²⁾を用いた。

図-7は解析に用いた幅400×高さ107.5×厚さ25cmの複鉄筋コンクリート製高欄の要素分割を示したものであり、高欄を厚さ方向に8層に積層化し、第2層と第7層を鉄筋層として解析を行った。衝撃力特性解析部分で得られる衝撃力は、高欄中央上端部付近の所定位置に部分等分布 (パッチ) 载荷として衝撃破壊挙動解析部分に入力される (図-5参照)。

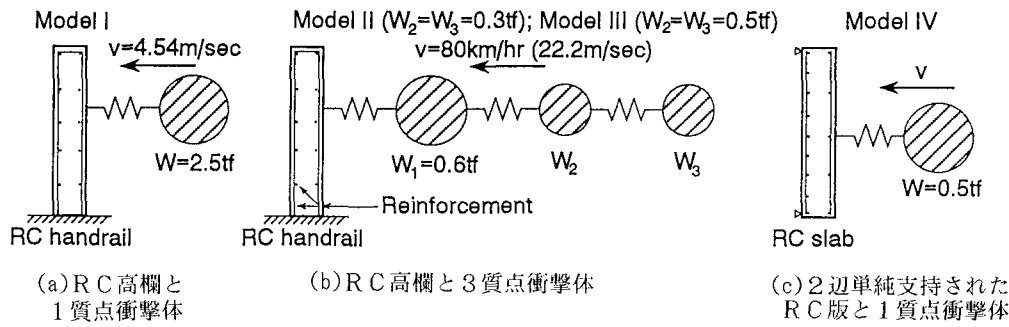


図-6 解析モデルの概略

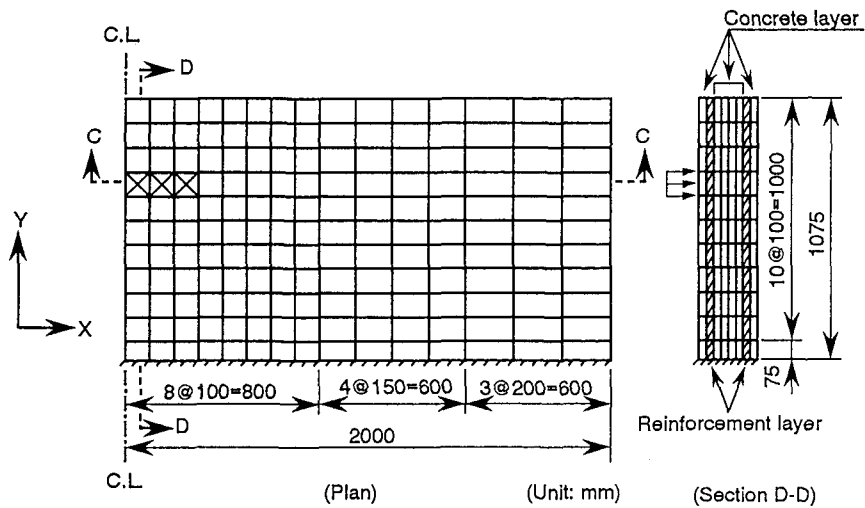


図-7 RC高欄の積層化有限要素モデル (1/2部分)

表－１ ＲＣ高欄の解析結果

Model	Loading rate (tf/ms)	Load at failure (tf)	Deflection at failure* (mm)	Impulse (kgf・sec)	Index of local deformation** ($\times 10^{-4}/\text{cm}^2$)	Kinetic energy transmitted**** ($\times 10^2 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$)	Energy absorbed***** (kgf・cm)	Failure mode***
I	356.4	249.5	0.64	72.5	14.77	699	12040	PS
II	1.22	35.9	2.54	592.5	1.60	13745	8037	B
III	1.22	36.0	2.40	599.0	2.50	13947	7562	B

* Maximum deflection at loaded point

** At section C-C of Fig.7

*** B:Bending, PS:Punching Shear

**** Amount of kinetic energy lost in impacting body

***** Obtained by integration of impact load - loaded point deflection curve

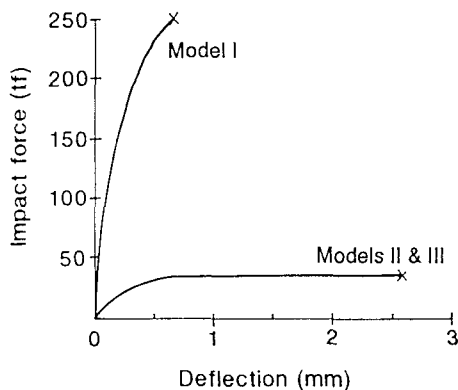
高速道路などに設置される鉄筋コンクリート製高欄の耐衝撃設計を考える場合，同一のコンクリート製高欄が，比較的遅い衝突に対しては，見かけ上剛な壁となることによって衝突時のエネルギーの大部分を自動車に吸収させるが，速度の速い衝突に対しては衝突を止めるために剛として働くよりも，衝突によるエネルギーをより多く吸収できる柔な壁として挙動する２つの機能を備えていることが望ましいと考えられる。このような考え方にたって衝突現象を取り扱う場合，局部変形の評価が重要な問題となる。衝撃作用を受けるコンクリート構造物は局部変形を生じ易く，破壊形式が押し抜きせん断断となり易いことが知られている。そこで，局部変形の程度を定量的に取り扱うために局部変形指数を次式により定義する：

$$\text{局部変形指数}(I_L) = \frac{\text{破壊時曲率}(1/R)}{\text{破壊時変位}(\delta_u)} \quad (1)$$

上式では，破壊時曲率を破壊時の載荷点最大たわみで除して，たわみによる影響を消去している。従って，局部変形指数はその値が大きい方が，載荷点での局部変形の影響が大きく現れていると言える¹³⁾。

上述３種類のモデルに対する衝撃破壊挙動解析の結果をまとめて表－１に示す。表－１より，全評価項目についてModel II, IIIの結果がほぼ同一の値となっているのに対して，Model Iの各評価値は他のモデルと比べて全体的に異なった値を示しており，全体として異なったタイプの破壊挙動を示していることがわかる。また，Model Iの載荷速度はModel II, IIIに比べかなり大きい，力積や衝撃体の消散する運動エネルギーの量は小さい。これは，Model Iの解析では接触ばね定数として衝撃初期の極短い作用時間内に大きな衝撃力が作用するためであると考えられ，局部破壊（押し抜きせん断破壊）を起こす恐れのあることを示している。これに対して，Model II, IIIでは，破壊時衝撃力(Load at failure)は比較的小さいが，載荷速度が小さいために力積量や衝撃体の消散する運動エネルギーはかなり大きくなる。これらのことは，局部的な破壊である押し抜きせん断破壊の場合には，消散する運動エネルギー量は極僅かであるのに対して，曲げ破壊モードでは大量の運動エネルギーを消散可能であることを示している。また，表－１に併記したように，式（１）に基づいて算出した局部変形指数は押し抜きせん断破壊モードでは高い値となり，局部変形の卓越する衝撃破壊モードと良い対応を示していると言え，押し抜きせん断破壊モードの評価に有効となるものと考えられる。

図－８は，３種類のモデルで解析した衝撃力～載荷点変位関係を示したものである。図－８より，Model II, IIIの衝撃力～載荷点変位関係はほぼ同じであるのに対して，Model Iでは全体的に他のモデルに対する結果とは異なっている。

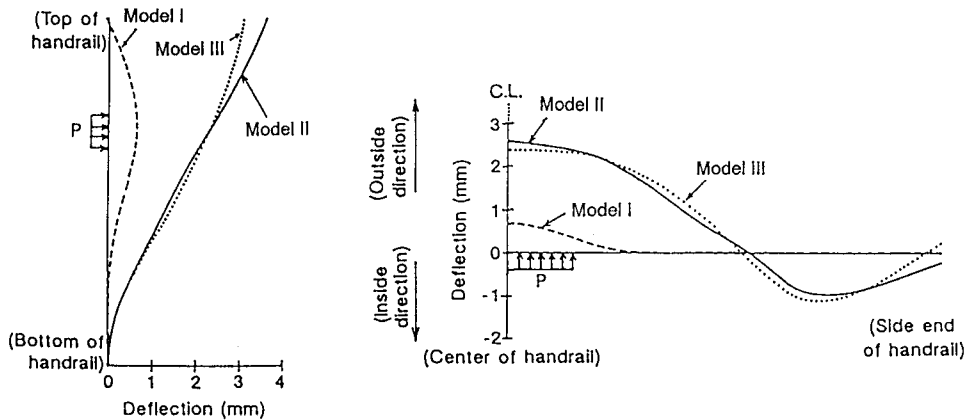


図－８ ＲＣ高欄の衝撃力～載荷点変位関係の比較

これは、Model I の衝撃体を剛としたことにより、載荷速度が上昇し、載荷速度とともに初期剛性も上がったためであると考えられる。この現象は構造物の慣性力の影響と考えられ、載荷速度の大きい衝突では慣性力も増大する。一方、Model II、III の自動車の場合には、衝突の間に車両の変形が生じ、載荷速度が遅くなる結果、慣性力の効果が小さくなっている。さらに、図-8より、Model I では最大衝撃力は大きい、他の2つのモデルと比較してみると破壊時変位は小さい。これはModel I では載荷時間が短いことによるものと考えることができる。

図-9は、衝撃破壊時の断面のたわみ分布を示したものである。図-9から、Model IIやModel IIIでは変形は高欄全体にわたって分布しているのに対して、Model I では明らかに変形が高欄載荷点近傍に集中していることがわかる。

図-10は、Model I、IIの解析から得られる高欄の載荷面と裏面の主応力直角方向を示したものであり、ひびわれ方向の分布を表していると言える。また、図-11は、Model I、IIの解析による高欄の破壊時の変形モードを示したものである。前掲図-8、図-9より、Model Iの解析では慣性力の影響と高次振動モードの影響を受けていることが明らかであり、これが局部変形の生じる原因となることを示している。そのため、Model Iのひびわれパターンは図-10(a)に示すように複雑となり、図-11(a)のModel Iの変形モードは高欄載荷点近傍で押し抜きせん断破壊モードとなることがわかる。一方、Model IIの場合には、図-10(b)ではひびわれパターンが滑らかに分布し、図-11(b)の変形モードに対応しており、曲げ破壊となることが予想される。



(a)鉛直方向（図-7のD-D断面） (b)水平方向（図-7のC-C断面）

図-9 RC高欄のたわみ分布

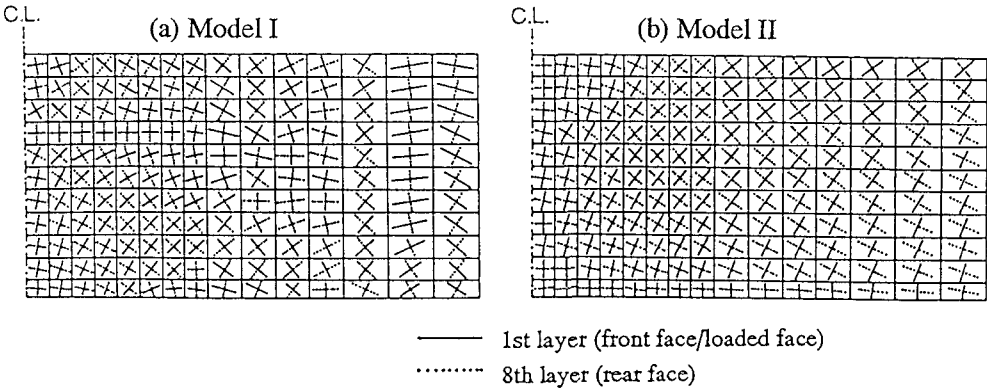


図-10 RC高欄の主応力に直角方向分布図

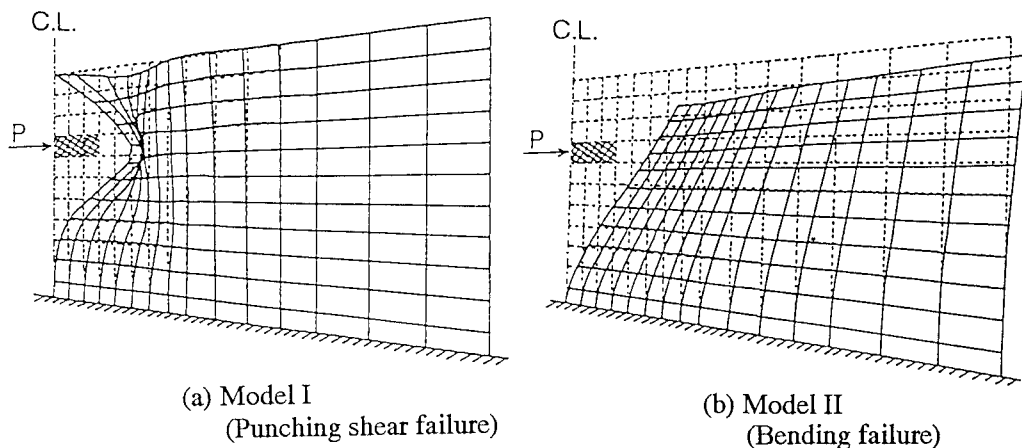


図-1 1 R C高欄の破壊時における変形モード

(2) 連続繊維補強コンクリート版の解析 (Model IV)

近年、高耐食性、非磁性、高強度、軽量など優れた材料特性を有することから、連続繊維補強プラスチック (FRP) 材が鉄筋の代替として、腐食環境の海洋構造物やリニアモーターカーの非磁性ガイドウェイなどへの適用が期待されている。しかし、FRP筋を鉄筋の代替として適用する場合、①現状では鋼材に比べ弾性係数が小さい、②鋼材の降伏に相当する現象がなく、脆性的な引張破断を生じる恐れがある、などの欠点も指摘されている。そこで、ここでは上述のようなFRP筋の利点・欠点が、エネルギー的観点からの評価基準が必要になると考えられる衝撃作用下での破壊挙動にどのような影響を及ぼすかを解析的に検討する。

解析例としては、図-6 (c)のModel IVに示す重量0.5tfの単体の重錘が、FRP筋および鉄筋で補強された複補強筋コンクリート版に衝突する現象を取り上げる。ここで、図-6に示すModel IVの接触ばねのばね定数は、本研究室で行われた衝撃破壊実験の結果⁷⁾からSI法を適用して推定した値を用いた。また、重錘の衝突速度は、同様の衝撃破壊実験⁷⁾で得られた値、すなわち、コンクリート版が重錘衝突後、最大衝撃力に達することによって破壊に至るまでの時間が約2msecという結果に基づいて、衝突後2msecで衝撃力が最大となり、かつ衝撃力波形の勾配が零となる時点で破壊が生じるように試行錯誤によって決定した。図-1 2は、解析に用いる複補強筋コンクリート版の要素分割の1/4部分を示したもので、コンクリート版全体の寸法は130×130×13cmであり、スパン120cmで2辺単純支持されている。解析では、コンクリート版を厚さ方向に8層に積層化し、第2層と第7層を鉄筋あるいはFRP筋の補強筋層とする。衝撃力特性解析部分で得られる衝撃力は、版中央部分等分布 (パッチ) 载荷として衝撃破壊挙動解析部分に入力される。

現在のところ、FRP筋を建設用補強材として用いるための規定は明確には定まっていない。また、入手可能なFRP筋のほとんどは、普通鉄筋と比較して高引張強度であるが弾性係数は小さい。しかし、将来的には鉄筋と同程度あるいはそれ以上の弾性係数を有するFRP筋の出現も予想されることから、本解析では、表-2に示すType AとType Bという2つの異なった機械的特性を有するFRP筋を設定した。2つのタイプのFRP筋は、普通鉄筋の弾性係数のそれぞれ1.3倍、0.5倍のものを選定した。さらに、鉄筋を使用した場合と同レベルでの比較基準を設けるために、応力～ひずみ曲線で囲まれる面積が普通鉄筋のものと等しくなるように設定し、すべての補強筋、つまりFRP筋と鉄筋の破断に必要なエネルギー量を等価にした。さらに、過去に著者らが行った解析結果から、低弾性係数のFRP筋で補強したコンクリート版は鉄筋コンクリート版と比較して低い衝撃力で破壊することが明らかとなっているため (補強筋量は一定)¹³⁾、FRP筋を高強度コンクリート (HRC) と組み合わせて使用した場合の耐衝撃性の改善効果についても検討した。

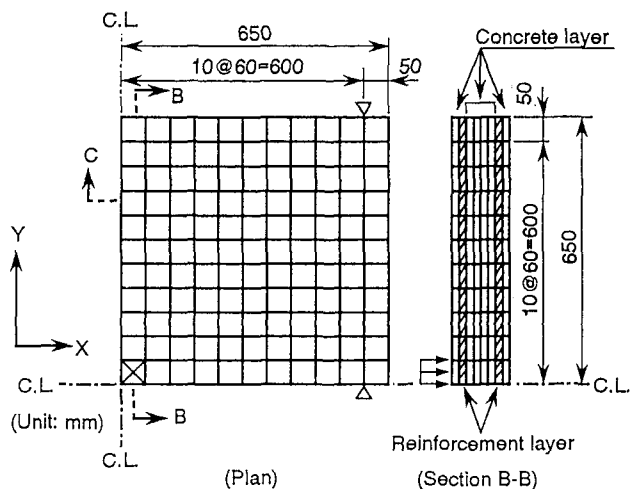


図-1 2 R C版の積層化有限要素モデル (1/4部分)

表-2 補強筋の機械的性質

Reinforcement	Abbrev.	Yield point (kgf/cm ²)	Yield strain (μ)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Tensile strain (μ)	Young's modulus (x10 ⁶ kgf/cm ²) [ratio]
Steel (SD35)	D13	3500	1667	4800	50000	2.10 [1.0]
FRP Type A	A	-	-	32900	12000	2.73 [1.3]
FRP Type B	B	-	-	20400	19400	1.05 [0.5]

表-3 R C版の解析結果

Slab	Concrete type	Bar type	Loading rate (tf/ms)	Load at failure (tf)	Deflection at failure (mm)	Cracking load (tf)	Concrete plasticity load* (tf)	Impulse (kgf·sec)	Index of local deformation		Failure mode**
									(Longitudinal) (x10 ⁻⁴ /cm ²)	(Transverse) (x10 ⁻⁴ /cm ²)	
D-1	Normal strength	D13	14.63	30.00	1.76	14.75	21.40	34.53	11.89	9.11	B→PS
A-1	Normal strength	A	19.51	40.00	2.02	16.70	25.53	46.04	8.27	10.78	B
B-1	Normal strength	B	10.65	19.17	1.04	12.02	15.41	18.09	17.86	17.85	B→PS
A-2	High strength	A	32.28	64.56	2.51	29.57	43.92	71.57	8.67	8.57	B
B-2	High strength	B	14.80	29.80	1.60	21.40	24.70	33.03	11.42	14.26	B→PS

Slab	Collision speed*** (cm/sec)	Speed*** at slab failure (cm/sec)	Kinetic energy transmitted**** (kgf·cm)	Energy absorbed***** (kgf·cm)	Comments
D-1	174	74	6326	4463	Reinforcement yielding at 28.4tf; Concrete crushing
A-1	232	99	11231	6754	Concrete crushing
B-1	111	47	2579	1658	Concrete crushing
A-2	374	159	29234	13170	Concrete crushing
B-2	173	74	6238	4128	Reinforcement failure

* Plasticity in compression zone

** B:Bending, B→PS:Bending to Punching Shear

*** Speed of impacting body

**** Amount of kinetic energy lost in impacting body

***** Obtained by integration of impact load - midspan deflection curve

表-3に解析結果をまとめて示す。ここで、普通強度コンクリートの圧縮強度は約300kgf/cm²、高強度コンクリートの圧縮強度は約900kgf/cm²として解析を行った（補強筋量は一定）。表-3より、A-1、A-2版のみが曲げ破壊モードであり、他の3種類のコンクリート版では衝撃初期に曲げ挙動先行の破壊モードを呈し、その後、押し抜きせん断破壊モードに移行している。また、破壊時衝撃力や破壊時変位は曲げ破壊モードの場合には他に比べて大きくなる傾向がある。さらに、局変形指数は曲げ破壊モードでは他の破壊モードに比べて低い値となり、衝撃破壊モードと良く対応していることがわかる。全体的には、B-1版の局変形指数

が最も大きな値となり、押し抜きせん断破壊モードが生じ易いことを示している。これに対して、衝撃体からコンクリート版に伝達される運動エネルギーの収支に関しては、曲げ破壊では消散する運動エネルギー量は大きいのに対して、曲げから押し抜きせん断破壊モードに移行する破壊モードでは運動エネルギーの消散については優れているとは言えない。このことは、B-1版で特に顕著に表れており、運動エネルギーを僅かしか消散していないことから明らかである。これと同様のことがコンクリート版の吸収エネルギーについても言える。ここでの「吸収エネルギー」とは、衝撃力～版中央変位関係を積分することによって算出したものである。すなわち、B-1版では吸収エネルギーも小さく、このような局所的な変形の押し抜きせん断破壊ではエネルギーの消散量が小さいことを示している。

さらに表-3より、高強度コンクリートとFRP筋を組み合わせ使用した場合、いずれのコンクリート版も普通強度コンクリートを使用した版に比べて耐衝撃性が向上していることがわかる。例えば、B-2版の解析結果は、D-1版に近い値を示しており、特に載荷速度、破壊時衝撃力、破壊時変位、伝達エネルギーについてこのことが言える。しかし、鉄筋の場合とは異なり、FRP筋は降伏しないために、B-2版では補強筋の脆性的な破壊を生じる恐れがあることに注意する必要がある。一方、A-2版では、すべての値がA-1版よりも向上し、耐衝撃性の高いことを示している。これらのことから、高強度コンクリートはFRP筋の弾性係数が小さいという欠点を補うことが可能であると考えられるが、FRP筋の破断を防ぐための特別な配慮が必要である。

図-13に各種コンクリート版の衝撃力～版中央変位関係を示す。これより、B-1版ではひびわれ発生後の剛性低下が著しく、普通鉄筋で補強したD-1版よりもかなり耐衝撃性の劣ることがわかる。図-14は典型的な変形を示す3種類のコンクリート版の衝撃破壊時の変形モード(1/4部分)を示したものである。図-14(a)のA-2版は曲げ破壊モードであり、変形が版全体にわたって広がっている。図-14(b)の鉄筋コンクリート版(D-1版)および図-14(c)のB-1版では、変形は版中央に集中する傾向を示しており、局部変形(押し抜きせん断)破壊に対する注意が必要であることがわかる。特に、図-14(c)のB-1版では高次振動の卓越した影響が認められ、その影響は主筋方向と配力筋方向の両方向に表れている。一般的に、高い弾性係数のFRP筋で補強したコンクリート版は優れた耐衝撃性を示す。すなわち、高強度コンクリートを利用すると、すべてのタイプのコンクリート版の終局挙動および破壊モードは改善されるが、補強筋の破断については十分に注意する必要がある。

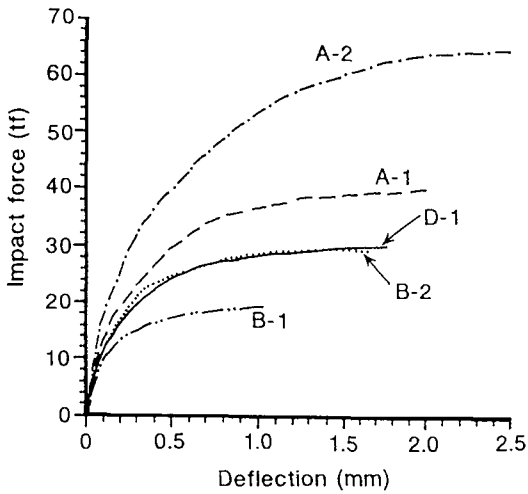
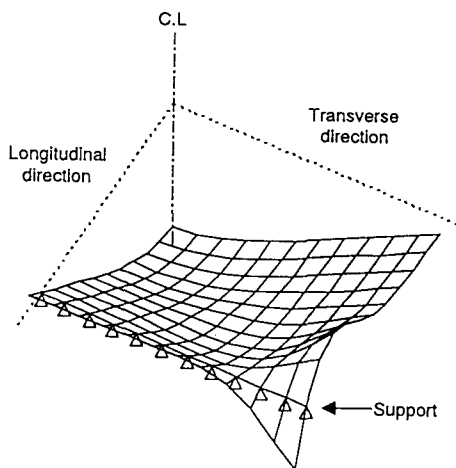
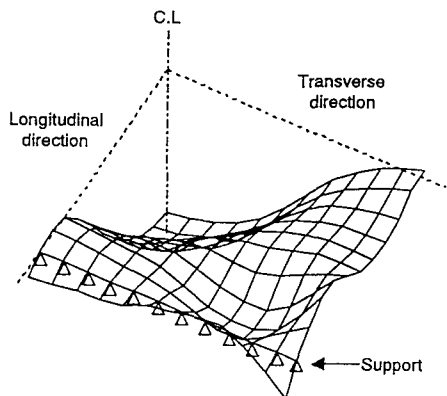


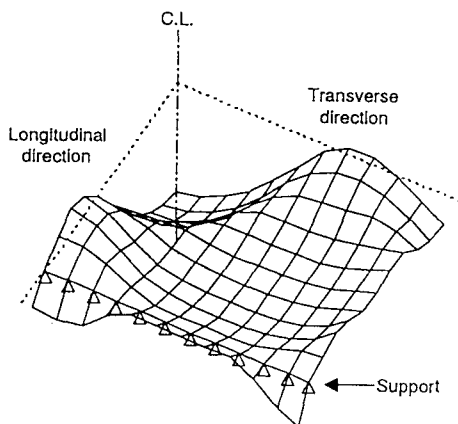
図-13 RC版の衝撃力～版中央変位関係の比較



(a)A-2版 (曲げ破壊モード)



(b)D-1版 (曲げ→押し抜きせん断破壊モード)



(c)B-1版 (曲げ→押し抜きせん断破壊モード)

図-14 R C 版の破壊時における変形モード

5. 結論

本研究で得られた成果をまとめると次のようになる。

- (1) 多質点ばねモデルによる衝撃力特性解析と R C 版構造に対する衝撃破壊挙動解析を、相互にデータをやりとりすることにより統合し、衝撃力特性を十分に考慮できる R C 版構造の衝撃応答解析を可能にした。このことにより、被衝撃体であるコンクリート構造物の有効質量および有効剛性を直接考慮できるようになった。
- (2) 統合された解析法による鉄筋コンクリート製高欄の解析を行った結果、高欄の衝撃破壊モードは剛な衝撃体が衝突する場合には押し抜きせん断破壊モードとなり易く、一方、衝突により変形を生じる比較的柔な衝撃体の衝突では曲げ破壊に近い破壊モードになることが明らかとなった。また、局変形指数は衝撃破壊モードと良い対応を示し、局変形の影響を定量的に表すことが可能となった。
- (3) 2つの解析法を統合することにより、コンクリート構造物に伝達される運動エネルギーやコンクリート

構造物の吸収エネルギーの評価が可能になり、曲げ破壊モードとなる部材はエネルギー吸収性能に優れるのに対して、押し抜きせん断破壊モードとなる部材では吸収されるエネルギー量は小さくなることがわかった。(4) 将来開発の期待される高弾性係数のFRP筋を鉄筋の代替として適用したコンクリート版は、最大衝撃力、局部変形指数、各種エネルギー量などの面で優れた耐衝撃性を示す。また、高強度コンクリートとFRP筋を組み合わせると、耐衝撃性は向上しFRP筋の弾性係数が普通鉄筋よりも小さいという欠点を補うことが可能であると考えられるが、破壊が脆性的となり易いことから特別な配慮が必要である。

参考文献

- 1) RILEM, CEB, IABSE, IASS Interassociation Symposium: Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading - Introductory Report, Berlin(BAM), 147pp., June 2-4, 1982.
- 2) J. Ghaboussi, W.A. Millavec and J. Isenberg: R/C Structures under Impulsive Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, No. 3, pp.505-522, Mar. 1984.
- 3) H. Morikawa and N. Kobayashi: Local Fracture Analysis of a RC Slab by the Discrete Element Method, Structures Under Shock and Impact II - Proceedings, UK, pp.321-332, June 16-18, 1992.
- 4) 園田恵一郎, 上林厚志: 衝撃荷重を受ける弾性体の解析に対する剛体バネモデルの適用性, 土木学会論文誌, No. 441, 1-18, pp.147-155, 1992年1月.
- 5) 宮本文穂, M.W.King, 榊井弘樹: 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年3月.
- 6) 宮本文穂, M.W.King, 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年3月.
- 7) A. Miyamoto, M.W.King and M. Fujii: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs Under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 4, pp.411-419, July-Aug. 1991.
- 8) A. Miyamoto, M.W.King and M. Fujii: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs Under Impulsive Loads, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp.538-545, Sept.-Oct. 1991.
- 9) N.S. Ottosen: A Failure Criterion for Concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp.527-535, Apr. 1977.
- 10) 阪神高速道路公団, 財団法人建設工学研究所: プレキャスト高欄の衝撃破壊実験業務報告書, 50pp., 1987年3月.
- 11) 例えば, 阪神高速道路公団, 八千代エンジニアリング株式会社: 中央分離帯防護柵実車衝突実験報告書, pp. 6-7, 1972年11月.
- 12) M. M. Kamal and J. A. Wolf, Jr.: Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 458pp., 1982.
- 13) 宮本文穂, M.W.King, 三戸雅文: FRP筋を用いたコンクリート版の衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価, コンクリート工学論文集, Vol. 4, No. 1, pp.20-33, 1993年1月.

(1992年9月21日受付)