

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

Numerical Modeling of Impact Load Characteristics Acting on Structures

宮本 文穂*

M.W.KING**

榊井 弘樹***

By Ayaho MIYAMOTO*, Michael W. KING** and Hiroki MASUI***

This paper focuses on the simulation of impact load characteristics acting on structures during accidental collisions of vehicles, aircraft, ship, etc. Firstly, the phenomena of collisions of two bodies in space are modeled as a system consisting of masses, springs and dampers. Each mass has the longitudinal and rotational degrees-of-freedom in order to simulate eccentricity in the colliding body. Next, parametric evaluations of the resulting impact load characteristics based on the effects of weight of each mass, number of masses and collision speed are carried out. These parameters are considered to be the main factors that influence the final impact load-time function. Verification of the analytical method is carried out through comparisons with experimental results. The parameters are found to be related to factors such as maximum impact force, time to maximum impact force and loading duration.

1. はじめに

原子力施設、海洋構造物あるいは近い将来の建設が予想される宇宙基地へのコンクリート構造の適用などきびしい外力環境にさらされるコンクリート構造物の中には、偶発的外力（飛行機、船舶、車両、隕石等の衝突）として衝撃作用に対する配慮が必要となる場合がある。しかし、このような衝撃作用に対するコンクリート構造物の挙動は複雑となり、また、外力特性及びこれによる破壊現象の把握の困難さ等から設計上効果的な対処ができない現状にある。最近の越前海岸における崖崩れによってマイクロバスがロックシェッドもろとも押しつぶされた事故(1989.7.16)は、我々に偶発的外力の予測の困難さと、これらの構造物が衝撃作用によって破壊したときの被害の大きさを教えてくれた。それゆえ、これらの設計において耐衝撃性を無視することは出来なくなってきた。一方、コンクリート構造物の設計において考慮される衝撃力の算定においても、静的荷重に衝撃係数を掛けることによって動的効果を表しているか、または、地震応答解析に用いられている手法を適用して動的挙動を求めている。しかし、衝撃体が及ぼす衝撃力特性は、地震荷重とは異なり、単一方向性を持ち、継続時間が短い上に衝撃波を発生させたりするため、こういった1元的側面または、他の手法の代用によって全てを表現し得るものではない。これら耐衝撃設計を行う上で衝撃作用の特性・頻度等は必要不可欠のものであるが、未だに十分解明されていないのが現状である。

* 工博，神戸大学助教授，工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 工修，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，三菱重工業株式会社 (〒100 東京都千代田区丸の内2-5-1)

そこで本研究では、上記のような観点からコンクリート構造物に作用する衝撃力特性を取り上げ、コンクリート構造物に衝突する衝撃体に多質点系モデル（質点群に偏心がある場合も考慮）を適用して、被衝撃体に及ぼす衝撃力特性、衝撃体各質点の加速度応答特性の算定・把握を試み、衝撃模型実験結果に基づいて解析結果を検証する事によりその精度及び特性を明かにし、衝撃力シミュレーションの可能性、有効性を検討する。すなわち、まず質点数、質点重量、衝突速度を順次変えて、さらに衝撃体の質点群に偏心がある場合についても衝突実験を行い、これらの変化によって衝撃力特性がいかなる影響を受けるかを検討する。

2. 衝撃作用のモデル化の現状

コンクリート構造物に作用する衝撃作用の例として、航空機が原子力発電所施設に落下衝突する現象が想定される場合がある。この場合に用いられる衝撃作用の解析モデルとして、一般によく知られている2つの代表例であるRiera model^{1),2)}とLumped-mass model¹⁾が挙げられる。以下にこの2つのモデルがいかなる特徴を持っているのか等の簡単な説明を試みる。

2.1 Riera model^{1),2)}

原子力構造物に作用する航空機の衝撃力に関する研究において、図1に示すようなモデルを提案したRieraはその先駆をなした。このモデルの特徴は図1を見て分かるように、機体を剛な連続体と見なし、被衝撃体との接触面では機体が座屈を起し、それによって機体後部が減速すると仮定するもので、衝撃力特性は、これらの座屈荷重（式(1),第1項）及び機体後部の減速による荷重（式(1),第2項）の和をもって次式のように表される。

$$F(t) = R_b(t) + \bar{m}(t) \cdot [\dot{u}_a(t) - \dot{u}_t(t)]^2 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\text{ただし、} R_b(t) = [m_a - m_b(t)] \cdot \ddot{u}_a(t) \quad \cdots \cdots (2)$$

- ここで、 $\bar{m}(t)$: 時刻 t に接触面で圧壊した機体の質量
 $m_b(t)$: 時刻 t までに圧壊した機体の総質量
 m_a : 航空機の総質量
 $R_b(t)$: 時刻 t における座屈荷重
 $F(t)$: 時刻 t における衝撃力
 $\dot{u}_a(t)$: 時刻 t における航空機の前縁速度
 $\dot{u}_t(t)$: 時刻 t における標的の速度
 $\ddot{u}_a(t)$: 時刻 t における航空機の前縁加速度

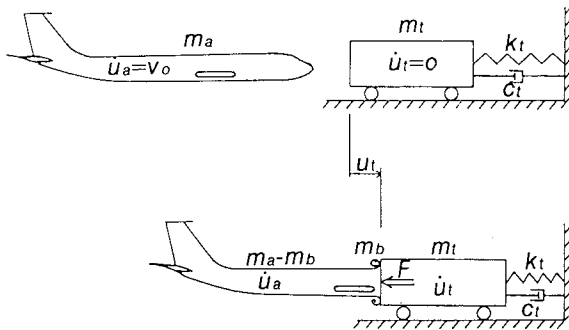


図1 Riera model

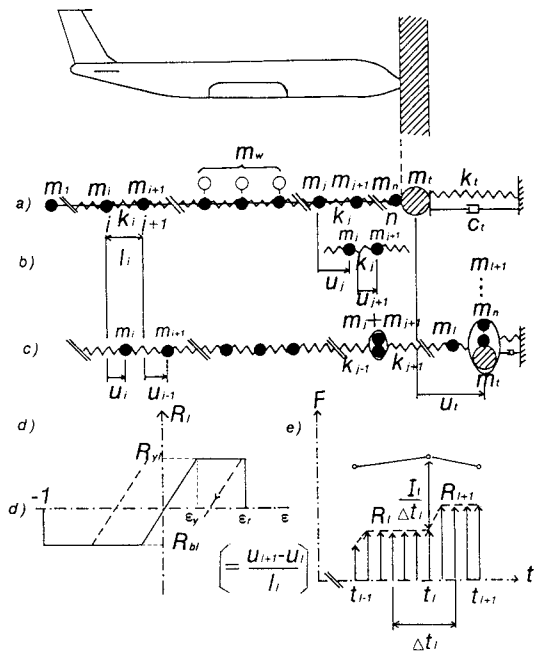


図2 Lumped-mass model

2.2 Lumped-mass model¹⁾

図2-a), 図2-b)のように衝撃体を多数の質点 ($m_1 \sim m_n$) とバネ ($k_1 \sim k_{n-1}$) から成るものとしてモデル化し、それがバネ(バネ定数 k_i), ダッシュポット(粘性減衰係数 c_i)によって不動点に連結された質点 m_i でモデル化された被衝撃体に衝突する場合を考える。ここで、各質点は前後の質点及び被衝撃体に接触すると一体となって1つの質点として作用するものと仮定している(図2-c))。また、一体となった質点間のバネについては自由度を減らすことによって対応させる。質点間のバネの特性は図2-d)に示すように完全弾塑性と仮定し、座屈荷重 R_{bi} 、降伏荷重 R_{pi} 、降伏ひずみ ε_p 、弾性係数(バネ定数) k_i を有するものとしている。

1) 質点の衝突(図2 b), c)参照)

質点同士が衝突すると一体となって運動するため、運動量保存則より次式が得られ、衝突後の速度が求まる。

$$\dot{u}_{j+1} \cdot m_{j+1} + \dot{u}_j \cdot m_j = \dot{u}_{j+1} \cdot (m_{j+1} + m_j) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、
 m_j : 質点 j の質量
 $\dot{u}_j$: 質点 j の速度(衝突前)
 $\dot{u}_j^+$: 質点 j の速度(衝突後)

同様に質点 m_n と被衝撃体の質点 m_t との衝突では、次式が成り立つ。

$$\dot{u}_n^+ = \dot{u}_t^+ = (\dot{u}_n \cdot m_n + \dot{u}_t \cdot m_t) / (m_n + m_t) \quad \dots\dots(4)$$

以下、順次新しい被衝撃体の質点 ($m_n + m_t$) と次の質点 m_{n-1} との衝突を考えていき、最終的に質点 m_i が被衝撃体の質点 ($m_t + m_b$) に衝突する時は、次式が成り立つ。

$$\dot{u}_i^+ = \{ \dot{u}_i \cdot m_i + \dot{u}_t \cdot (m_t + m_b) \} / (m_t + m_b + m_i) \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 m_b : 質点 m_i が被衝撃体に衝突するまでに被衝撃体 m_t に衝突した質点 $m_n \sim m_{i+1}$ の質量の合計。

2) 衝撃力特性の算定

被衝撃体に作用する衝撃力は次の2つからなるものとする。

a) 衝突する質点の単位時間における質点の相対減速により起こる力(被衝撃体からみて)

質点 m_i と被衝撃体との衝突時に伝達された力積 I_i は次式のようになる。

$$I_i = -m_i \cdot (\dot{u}_i^+ - \dot{u}_i^-) = (m_t + m_b) (\dot{u}_i^+ - \dot{u}_i^-) \quad \dots\dots(6)$$

また、力積 I_i が伝達されるに必要な微小時間は次式を用いて求める。

$$\Delta t_i = 0.5 \cdot (t_{i-1} - t_{i+1}) \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 t_{i-1} : 質点 m_{i-1} が被衝撃体に衝突するまでの時間
 t_{i+1} : 質点 m_{i+1} が被衝撃体に衝突するまでの時間

b) 衝突した質点と次の質点との間のバネの伸縮によって起こる力

質点間の距離の差にバネ定数を乗じた次式を用いて算出する。

$$R_i(t_i) = k_i \cdot (u_i(t_i) - u_{i+1}(t_i)) \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 u_i : 質点 i の変位
 u_{i+1} : 質点 $i+1$ の変位

以上より、 t_i 時において被衝撃体に作用する衝撃力 $F(t_i)$ は次式で表される(図2 e)参照)。

$$F(t_i) = R_i + I_i / \Delta t_i \quad \dots\dots(9)$$

前述2.1及び2.2の両モデルを実際に使って種々の衝突速度に対するボーイング707-320の衝撃力を算定した結果¹⁾を比較したものを図3に示す。

この図より両者から導き出された衝撃力～時間曲線は非常によく一致することがわかる。つまり、両モデルによ

る解析結果にはほとんど差がないといえるので、本研究では、Lumped-mass modelに回転拘束バネ及びダッシュポットの付与等によって改良を加えた多質点バネモデルを用いることにした。その理由として、Lumped-mass modelは、モデル化及び改良が比較的容易で、パラメータ解析及び確認実験もしやすいことが挙げられる。一方、Riera modelの場合、衝撃体の座屈強度及び詳細な質量分布も考える必要があるため実験も再現しにくい事があげられる。

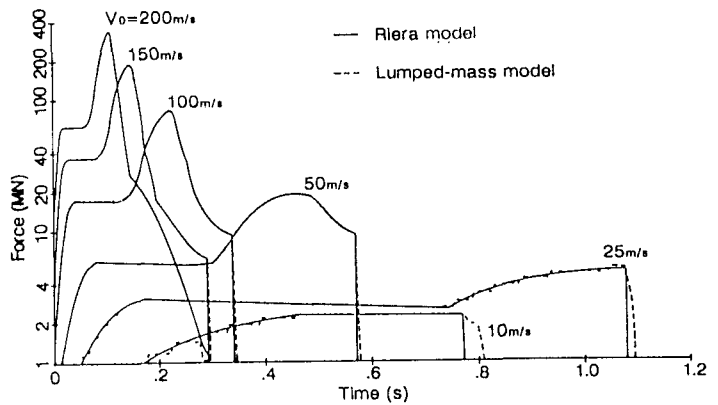


図3 Riera model及びLumped-mass modelによるボーイング707-320の衝撃力特性¹⁾の比較

3. コンクリート構造物に作用する衝撃力特性の算定

3.1 解析モデルの概要

衝撃力特性解析(衝撃力特性シミュレーションのための解析)のために、Lumped-mass model(2.2 参照)を基本として各質点の回転運動及び軸方向ダッシュポット(図4では省略されている)を付与して改良した図4に示す多質点バネモデルによってモデル化した。すなわち、実際に想定される衝撃体である自動車・航空機などでは、衝撃体の質量分布が1直線上にあるとは限らず、また自動車や船舶のように斜めに(衝突面とある角度をもって)衝突する可能性も考えられるからである。このため、衝撃体の質点数を $1, 2, 3, \dots, n$ とし、それぞれの質点の質量を $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ 、各質点間に配置するバネのうち並進方向のバネ定数を $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ 、回転方向のバネ定数を $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ とし、各質点間の並進方向の粘性減衰係数を $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ とするモデルを考案した。一方、被衝撃体はコンクリート構造物等を想定し、完全剛体とはせず、ある大きさを持った質点とし、バネによって完全剛体に取り付けられているものとしてモデル化した。この場合、バネは後述する検証実験との対応を考え、バネ定数が極端に小さいが、被衝撃体質点と完全剛体との衝突はないものとした。

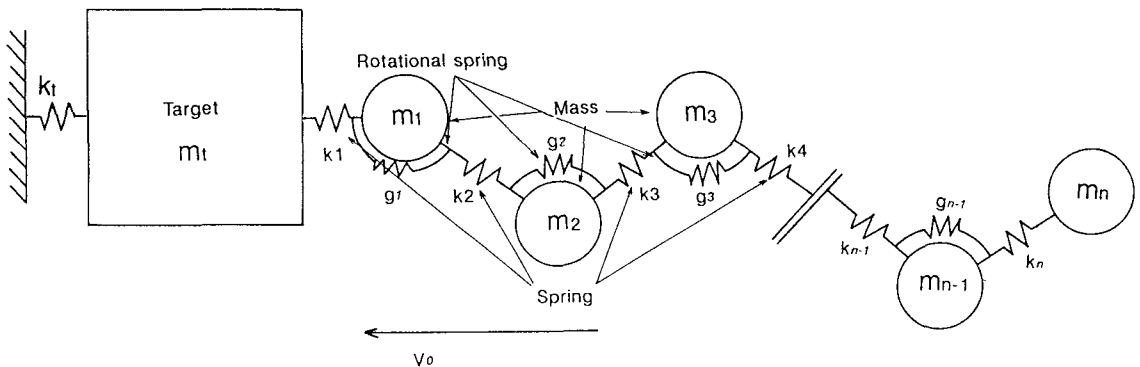


図4 多質点バネモデル

3.2 衝撃力特性の解析手法

解析方法の概略を述べると、図4において質点の運動を重心の並進方向の運動と重心回りの回転運動に分解し、

それぞれに対する運動方程式を逐次積分法であるNewmark- β 法の考え方を適用して、 Δt 時間刻みの繰り返し計算を行って衝撃体の運動を解明し、被衝撃体に作用する衝撃力特性を算定しようとするものである。

以下、モデルの解析方法を具体的に説明する。

解析モデルの運動方程式はマトリックスを使って以下のように表わされる。

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\}_t + [C] \cdot \{\dot{U}\}_t + [K] \cdot \{U\}_t = \{R\}_t \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 $[M]$: 質量及び慣性モーメントを示すマトリックス

$[C]$: 並進のみの粘性減衰マトリックス (回転方向の減衰はデータ不足のためゼロと仮定した)

$[K]$: 並進及び回転方向の剛性マトリックス

$\{\ddot{U}\}_t$: 時間 t における並進及び回転方向の加速度・角加速度

$\{\dot{U}\}_t$: 時間 t における並進及び回転方向の速度・角速度

$\{U\}_t$: 時間 t における並進及び回転方向の変位・角度

$\{R\}_t$: 時間 t における外力

式(10)の微小時間 Δt における増分形は次式で表わされる。

$$[M] \cdot \{\Delta \ddot{U}\}_{t \rightarrow t+\Delta t} + [C] \cdot \{\Delta \dot{U}\}_{t \rightarrow t+\Delta t} + [K] \cdot \{\Delta U\}_{t \rightarrow t+\Delta t} = \{\Delta R\}_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad \dots\dots(11)$$

式(11)に逐次積分法を適用する。逐次積分法としてNewmark- β 法($\beta=1/6$)の考え方をい用いと次式が得られる。

$$\{\Delta U\}_t = \{\dot{U}\}_t \cdot \Delta t + \{\ddot{U}\}_t \cdot \frac{\Delta t^2}{2} + \{\Delta \dot{U}\}_t \cdot \frac{\Delta t^2}{6} \quad \dots\dots(12)$$

$$\{\Delta \dot{U}\}_t = \{\ddot{U}\}_t \cdot \Delta t + \{\Delta \ddot{U}\}_t \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad \dots\dots(13)$$

式(12)及び式(13)を用いて式(11)を変形すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} & ([M] + \frac{\Delta t}{2}[C] + \frac{\Delta t^2}{6}[K]) \cdot \{\Delta \ddot{U}\}_t \\ & = \{\Delta R\}_{t \rightarrow t+\Delta t} - [\Delta t \cdot [C] + \frac{\Delta t^2}{2}[K]] \cdot \{\ddot{U}\}_t - [K] \cdot \Delta t \cdot \{\dot{U}\}_t \\ & = \{\Delta R\}_{t \rightarrow t+\Delta t} - [K] \left[\{\dot{U}\}_t \cdot \Delta t + \{\ddot{U}\}_t \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \right] - [C] \cdot \{\dot{U}\}_t \cdot \Delta t \quad \dots\dots(14) \end{aligned}$$

式(14)に示す運動方程式の増分形を時間刻み Δt として以下のような手順で逐次積分を行い、各時間ステップにおける加速度、速度、変位を算定した。すなわち、

- ① 初期条件として衝突速度を与える。
- ② 式(14)に示す運動方程式の増分形より $\{\Delta \ddot{U}\}_t$ を求める。
- ③ ②で求めた加速度増分を用いて式(12)及び式(13)より $\{\Delta \dot{U}\}_t$ 及び $\{\Delta U\}_t$ を求める。
- ④ 式(15)及び式(16)のように、速度増分、変位増分を1つ前の時間ステップにおける速度、変位に加えることにより、次式によって次ステップの速度 $\{\dot{U}\}_{t+\Delta t}$ 及び変位 $\{U\}_{t+\Delta t}$ を求める。

$$\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{U}\}_t + \{\Delta \dot{U}\}_t \quad \dots\dots(15)$$

$$\{U\}_{t+\Delta t} = \{U\}_t + \{\Delta U\}_t \quad \dots\dots(16)$$

- ⑤ 逐次積分法による誤差の蓄積を防ぐため式(17)に示す運動方程式より加速度 $\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}$ を求める。

$$\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} = [M]^{-1} [\{R\}_{t+\Delta t} - [C] \cdot \{\dot{U}\}_{t+\Delta t} - [K] \cdot \{U\}_{t+\Delta t}] \quad \dots\dots(17)$$

- ⑥ これらの $\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}$, $\{\dot{U}\}_{t+\Delta t}$, $\{U\}_{t+\Delta t}$ を用い②～⑤の計算を繰り返し行う。

3.3 衝撃力の算定

衝撃力 $F(t)$ は、一般にバネの変形により伝達される力(式(9),第1項)と運動量の変化(力積)で表わさ

れる力（式(9),第2項）の和より次式により算定されるが、本研究の対象はソフトな衝撃⁴⁾であるため式(9),第2項の力積の影響は小さいと思われる。そこで、次式第1項のみにより衝撃力を算定することとする。

$$F(t)=k_i\cdot u_i+I_i/\Delta t\qquad\qquad\qquad\cdots\cdots(18)$$

4. 多質点バネモデルを用いた衝撃力特性解析結果の検証実験

4.1 衝撃実験

3.で述べた解析方法の有効性を検証するために多質点バネモデルに対応させた3質点の衝撃体について以下の様な実験を行うことにした。

4.2 実験方法及び測定方法

実験装置を図5に示す。衝撃体は、図5に示すように3つの金属製の質点をバネの役割を持つゴム柱で連結したものを使用した。金属製の質点はその重量の変化及び偏心に対応できるように数枚の鉄板を重ね合わせ、4隅をボルト留めしたものを用い、ゴム柱（図5 ④）を鉄板との接触面において接着剤で接着することによって質点同士を連結し、質点間の軸方向及び回転方向の変位を可能にした。一方、被衝撃体には、被衝撃体解析モデルに対応させ、かつ衝撃体と被衝撃体との質量比をできるだけ大きくとるように考慮して重量200kgfの金属塊（図5 ⑥）を用いた。これらの質点を図5に示すように、衝撃体と被衝撃体の所定の衝突速度を容易に得られるようにするために両者を上方より金属塊では4本（図5 ③）、質点では各々2本のワイヤーロープ（図5 ⑤）で振り状に吊り下げた。なお、各ワイヤーロープの余分な動きを拘束することにより各質点の円周運動方向と直角方向の運動を拘束し、正確な衝突が実現可能なようにした。そして、両者を反対方向に所定の速度が得られる高さ（図5 ⑤）まで引き上げ、同時に開放することによって元の位置（図5のCollision point）で衝突させるようにした。このように、衝撃体と被衝撃体の両方を可動にすることによって被衝撃体にも速度を与え、限られた空間内で広範囲の衝突速度を得ることが出来るところが本装置の特色である。

以上の方法で衝撃体の質点数,1質点あたりの重量,衝突速度等を変化させた場合の実験を行い、衝撃体が被衝撃体に及ぼす衝撃力の時間的変化を被衝撃体である金属塊前面に取り付けたロードセルで測定し、各質点の重心

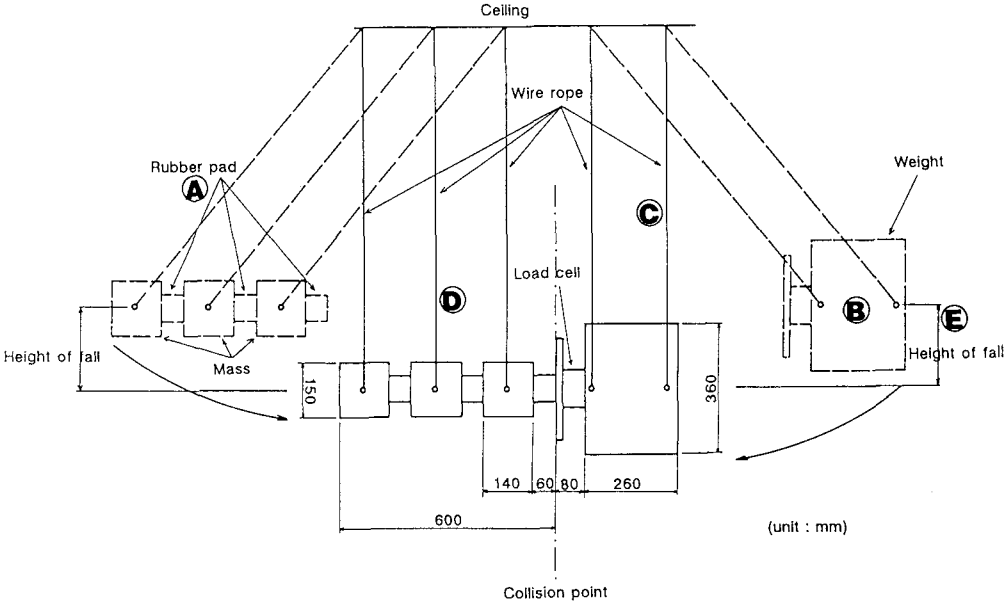


図5 衝撃力特性再現装置の概要

における加速度の時間的変化を金属製質点の重心位置に開けた円筒形の穴に設置した加速度計によって測定した。そして、これらを動ひずみアンプを介してアナログデータレコーダーで記録した。

表1 実験の種類

Test code	Number of mass	Weight of each mass (kgf)	Mass ratio ($\Sigma m_i / m_4$)	Amount of eccentricity (mm)	Spring modulus (kgf/cm)
D3M1	1	15.90	0.0795	0	1150
D3M2	2	15.08	0.1508	0	1150
D3M3	3	15.01	0.2252	0	1150
D5M1	1	25.20	0.1260	0	1150
D5M2	2	24.60	0.2460	0	1150
D5M3	3	24.57	0.3686	0	1150
D5M3K	3	24.57	0.3686	12.5	1150

4.3 実験の種類

解析結果との比較及び衝撃力特性の変化を明らかにするため衝突速度や質点重量・質点数の変化、偏心を与える等により数種類の実験を行った。実施した実験の種類を表1に示す。なお表1中で、「TEST CODE D5M3K」は質点の重心を変化（偏心を与える）させて回転慣性を与えたものであり、この場合は、図6のように3質点のうち中央の質点を構成する5枚の鉄板のうち、2枚目から4枚目を31.5mmだけ下方にずらすことにより中央質点の重心を水平衝突線上より下に12.5mm偏心させた。

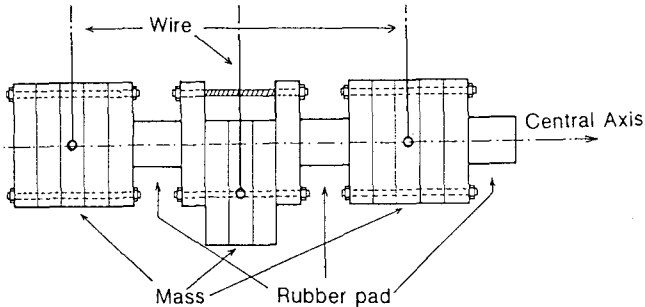


図6 衝撃力特性再現実験に用いた衝撃体（3質点の場合）

5. 多質点バネモデルを用いた衝撃力特性解析結果の有効性の検証

5.1 実験結果及び解析結果の比較

3. で述べた解析結果の精度及び有効性を検証するため実験結果と解析結果を比較する。ここで、解析は実験との対応を考え、実験とほぼ対応させた条件で行った。まず、被衝撃体（質量 m_t ）と完全剛体との間のバネのバネ定数 k_t は実験では極端に小さいものとし、 $k_t = 1.0 \times 10^{-6} \text{ kgf/cm}$ と仮定した。また、衝撃体を構成する質点間のバネの役割を果たすものとしてゴム柱（7.5cm×7.5cm×6cm）を使用したため、その材料特性として実験より得られたゴム柱の静的荷重～変位関係（図7）を直線近似してバネ定数 $k_i = 1150 \text{ kgf/cm}$ （自動車の車体のバネ定数³⁾を参考にした）を入力した。さらに、ゴム柱の粘性減衰係数は材料試験の結果から求められないので、実験における载荷速度

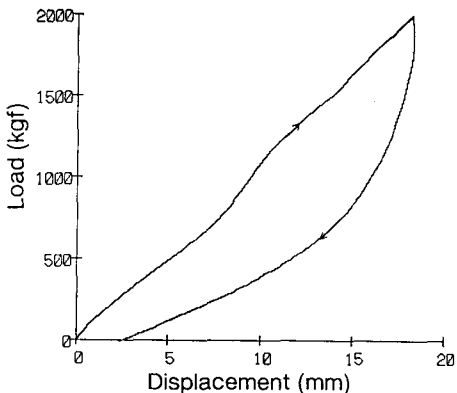


図7 ゴム柱の静的荷重～変位曲線

（最大衝撃力/最大衝撃力に達する時間）と、それに対応する解析による計算値（衝撃体が3質点の場合）がほぼ一致するように試算を繰り返して粘性減衰係数 $c_i = 210 \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}$ を決定した。これによって得られた実験及び解析結果を表2及び図8～図11にまとめて示す。表2の中の記号の説明は以下の通りである。

- $D_i (i=3,5)$: 質点に使用している鉄板の枚数
- $M_j (j=1,2,3)$: 質点の数
- J : 解析を意味する, K : 偏心を有するモデル

表2 実験及び解析結果の比較

	Test and analysis code	Speed of collision (m/sec)	Maximum load (tf)	Loading rate (tf/msec)	Time to maximum load(msec)	Duration of load (msec)
Test	D3M1	1.98 3.96	0.906 1.927	0.2157 0.4380	4.2 4.4	9.8 9.4
	D3M3	1.98 3.96	0.890 1.882	0.1712 0.3245	5.2 5.8	20.0 21.2
	D5M1	1.98 3.96	0.905 1.874	0.1810 0.2839	5.0 6.6	15.8 13.8
	D5M3	1.98 3.96	1.020 2.321	0.1214 0.3054	8.4 7.6	26.8 28.4
	D5M3K	1.98 3.96	1.088 2.262	0.1295 0.2976	8.4 7.6	27.2 27.6
Analysis	D3M1J	1.98 3.96	0.638 1.276	0.1450 0.3038	4.4 4.4	8.8 8.8
	D3M3J	1.98 3.96	0.650 1.300	0.1300 0.2600	5.0 5.0	18.5 18.5
	D5M1J	1.98 3.96	0.778 1.556	0.1496 0.2992	5.2 5.2	10.6 10.6
	D5M3J	1.98 3.96	0.999 1.614	0.1665 0.2690	6.0 6.0	23.0 23.0
	D5M3KJ	1.98 3.96	0.794 1.588	0.1323 0.2647	6.0 6.0	19.6 19.6

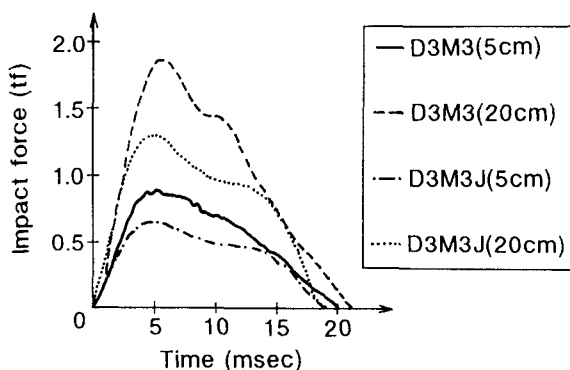
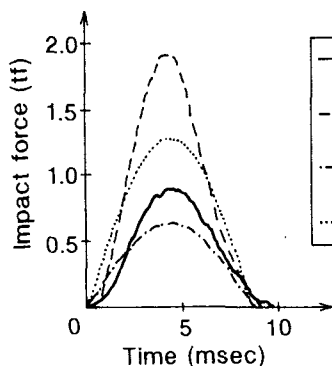


図8 実験,解析による衝撃力特性の比較 (D3M1について) 図9 実験,解析による衝撃力特性の比較 (D3M3について)

1) 衝撃力における比較

図8,図9は、衝撃体が1質点及び3質点の場合の衝撃力～時間曲線を解析及び実験で比較したものである(図中の記号の最後にJのつくものは解析結果を示す)。これらの図より解析結果・実験結果を比較すると、衝撃体が1質点においては、初期の立ち上がりが実験結果の方が解析結果に比べやや緩やかとなっているが、その後は解析結果の方が緩やかになっている。一方、衝撃体が3質点の場合は、全体的に両者でほぼ立ち上がりが一致していることがわかる。ここで言う「立ち上がり」とは衝撃力～時間曲線の傾きのことである。これは質点と質点をつないでいるゴム柱の粘性による粘性減衰項の影響によるものと考えられる。すなわち、1質点の場合、3質点に比べて質量が小さいので慣性項の値が小さくなり、その分相対的に粘性減衰項が大きくなる。そのためにゴム柱の有する真の粘性減衰係数と、解析において仮定した粘性減衰係数のわずかな差が、1質点の場合、解析値と実験値の大き

な差になって表われたものと考えられる。一方、立ち上がりの定量的な指標として载荷速度（loading rate:表2参照、最大衝撃力／立ち上がり時間で求める）をもって比較すると衝撃体が1質点、3質点の両者ではほぼ同じ精度を示した（実験値が解析値の約1.3倍；表2参照）。

また、図8、図9より、解析結果よりも実験結果の方が衝撃力の作用時間が長くなる傾向がみられる。この原因として図7に示されているようにゴム柱の荷重～変位曲線が除荷時は下に凸の曲線を描いているが、解析では直線近似したため、除荷時の衝撃力曲線の傾きが载荷時に比べて緩やかになったことにより実験結果の方が長くなったものと思われる。

さらに、衝撃力の最大値を比較してみると、表2より1質点においても3質点においても、ほぼ同様の差異がみられた（実験値が解析値の1.02倍～1.40倍）。その原因としてゴム柱の材料特性の捉え方（実際は非線形である）や力積伝播の影響が考えられる。

次に、偏心を有するモデルは表2によると偏心のないモデルと同じ傾向を示し、偏心の影響も、対象とした偏心量が小さかったために顕著にはみられなかった点で共通の結果を得た。また、载荷速度を比較しても、ほぼ同じ値を示していることがわかる。

2) 加速度における比較

図10、図11は、衝撃体が2質点及び3質点の場合における各質点の加速度～時間曲線の実験値と解析値を比較したものである。衝撃体が2質点及び3質点の双方とも、解析値の方が実験値よりも最大値が大きくなる傾向を示している。しかし双方とも、過渡振動時には実験値も解析値も、最大値についての差異はみられるもののほぼ同様の曲線を描いている。ところが、その後の自由振動の領域にはいると、実験値は急激に減衰して、収束するのに対して、解析値はそれほど減衰しない。これは実験の場合、衝撃作用終了後に衝撃体及び被衝撃体は分離するのに対し、解析の場合は、衝撃作用終了後も衝撃体と被衝撃体はバネにより連結されたまま運動するものとして計算しているためであると考えられる。

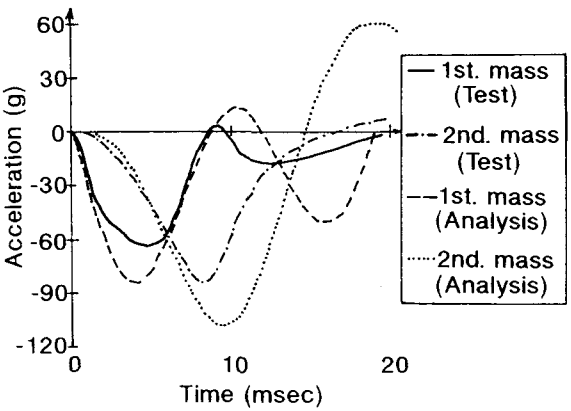


図10 実験、解析による各質点の加速度応答の比較 (D5M2㊦'㊦)

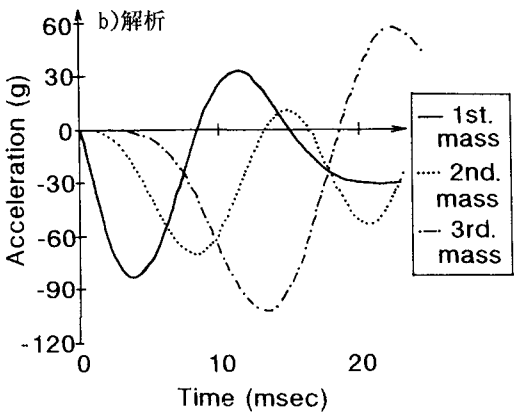
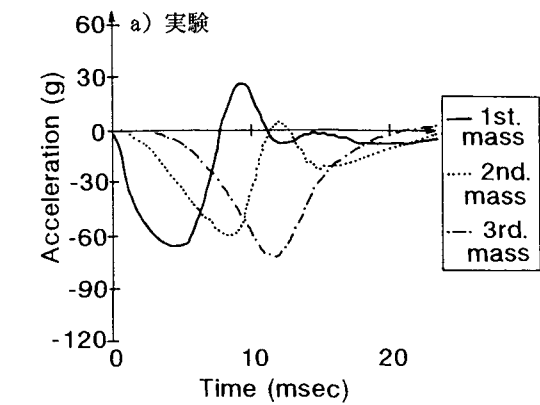


図11 実験、解析による各質点の加速度応答の比較 (D5M3㊦'㊦)

5.2 解析方法の有効性

以上のように実験結果と解析結果を比較・検討したが、衝撃力・各質点加速度ともにそれらの最大値や作用時間等に僅かな差異がみられるが、立ち上がり時間(最大衝撃力に達するまでの時間)は実験値、解析値ともほぼ同じとなっており、衝撃体が3質点における波形もほぼ両者で相似なものが得られている。つまり、本解析手法を用

いれば、初期条件が与えられるとその衝撃体が衝突した際に現われると思われる衝撃力波形の特徴を精度よく予測することが可能であると思われる。

6. 衝撃力特性の解明

構造物に作用する衝撃作用を再現する上で、衝撃力波形を支配すると思われる最大衝撃力、立ち上がり時間、作用時間について調べることが必要である。衝撃体を前述のようなモデル化手法を用い、その特徴と対応させた質点やバネによってモデル化することを想定する以上、これらのモデルを構成する各要素をどの様に定量化すれば任意の衝撃体の衝撃力特性を得ることが出来るのか知らねばならない。このため、モデルを構成する各要素（1 質点当りの重量、質点数、衝突速度、質点の偏心等）が衝撃力特性にどのような影響を及ぼすのか解析により調べることにする。

1) 1 質点当りの重量が衝撃力特性に与える影響

図12は衝撃体の質点数1，衝突速度200cm/secとした場合の1 質点当りの重量の変化が、衝撃力特性にどのような影響を及ぼすかを調べたものである。データ数が少なかったためデータ系列に屈曲点がみられるが、1 質点当りの重量が大きくなるほどほぼ直線的に最大衝撃力が大きく、立ち上がり時間・衝撃力の作用時間も長くなることがわかる。

2) 衝突速度が衝撃力特性に与える影響

図13は衝撃体の質点数1，1 質点当りの重量が25kgfとした場合に衝撃体及び被衝撃体の衝突時の相対速度が衝撃力特性にどのような影響を及ぼすかを示したものである。これより、衝突速度が大きくなるとほぼそれに比例して最大衝撃力は大きくなるが、立ち上がり時間・衝撃力の作用時間は変化しないことがわかる。これは振動の周期がゴム柱のバネ定数と質点の重量の総和によって決定されるためであると考えられる。

3) 質点数が衝撃力特性に与える影響

図14は質点数が1,2,・・・5と変わったときに衝撃力特性がどう変化するかについて比較したものである。これより、質点数が増えるとほぼ直線的に作用時間が長くなるが、立ち上がり時間・最大衝撃力はほとんど変わらない。つまり、各質点の運動にずれがあるため、衝突面に近いものから順次遅れてロードセルに力を及ぼし、衝撃体が多質点の場合の衝撃力波形は、各質点に作用する荷重～時間曲線を重ね合わせることによって出力されるものと考えられ、それゆえ作用時間のみが長くなると思われる。

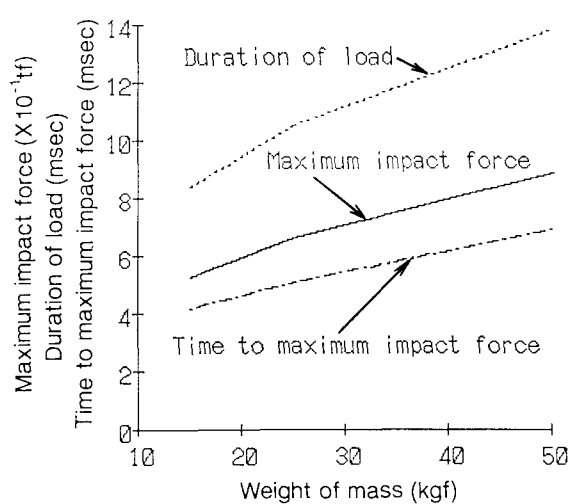


図12 1 質点当りの重量が衝撃力特性に与える影響

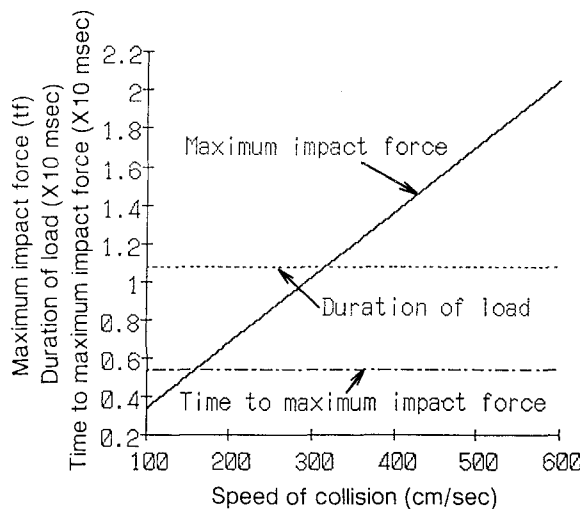


図13 衝突速度が衝撃力特性に与える影響

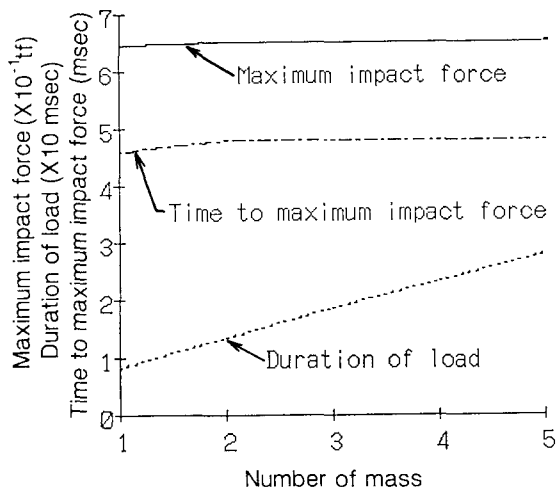


図14 質点数が衝撃力特性に与える影響

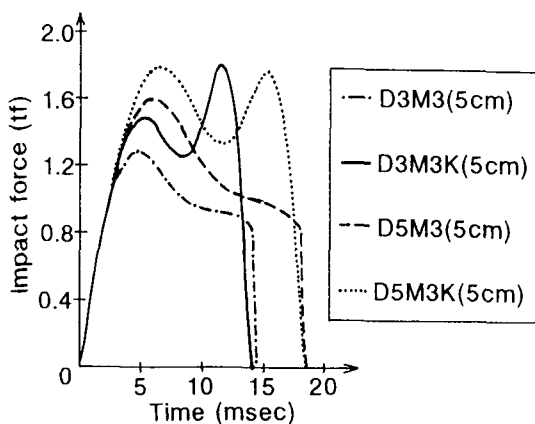


図15 偏心が衝撃力特性に与える影響

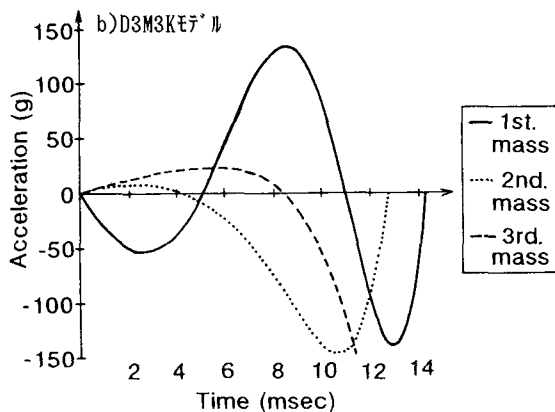
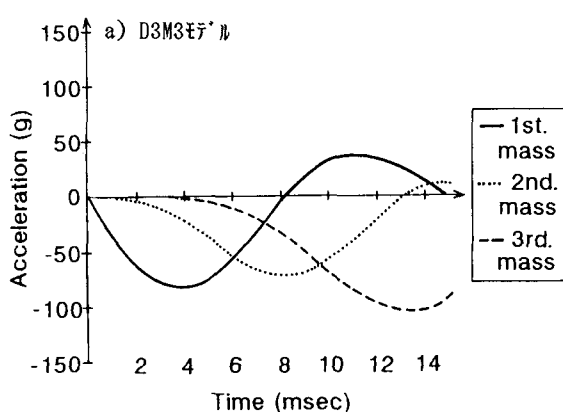


図16 偏心が各質点の加速度応答に与える影響

4) 偏心による影響

偏心による影響は前述(5.1 1)衝撃力における比較)したように偏心量が少なかったため、正確には確認することが出来なかった。そこで、3質点モデルの先頭の質点に5cmの偏心を与えたモデルで解析を行い図15のような結果を得た。図中の記号は前述同様、D3は1質点当り15kgf, D5は1質点当り25kgf, M3は3質点, (5cm)は落下高さ5cm(衝突速度1.98m/sec), Kは偏心があるモデルを、それぞれ示す。ここで、回転バネ定数 g は、偏心の影響を調べるという目的から適当な値を与えた。この図によると質点に偏心を与えることによって衝撃力波形に大きな変化が生じ、最大衝撃力の増加がみられるのみならず、そのピーク位置が時間的に後方に現れる結果となった。これは、衝撃体に偏心が存在することによって衝撃体モデルの各質点に回転方向の運動が加わり、それが並進方向の運動に影響を与え、各質点の加速度の時刻歴応答が変化したからである。図16 a), b)は、前述の「D3M3(5cm)」及び「D3M3K(5cm)」の各質点の加速度応答波形であるが、2, 3番目の質点の加速度応答のピークが時間的に後方にズレるとともに、ピーク値が大きくなっていることが確認される。このため、このような衝撃力特性を得る結果となったものと思われる。この結果より偏心による影響を考慮に入れることの必要性が改めて確認される。

以上、衝撃体モデル各要素が衝撃力波形に及ぼす影響を確認した。これらを用いると、種々の衝撃体による任意の衝撃力波形が与えられた(測定された)場合、その衝撃力波形全体(ピークがいくつあるのか、最大衝撃力がどのピークで発生するのか)より偏心の有無とその量を推定し、最大衝撃力・立ち上がり時間・作用時間より

1 質点あたりの質量、作用時間より質点数、最大衝撃力より衝突速度等を未知量として求めれば、与えられた衝撃力波形の概略的傾向を再現できる衝撃体モデルをほぼ確定できることになる。一方、本研究では被衝撃体側の粘性を考慮しなかったが、被衝撃体としてコンクリート構造物を考える場合、コンクリートの特性を表すためには粘性を考慮する必要がある、これらの剛性及び粘性の組み合わせにより様々なコンクリートの特性をも考慮することが出来ると考えられる。これらを用いれば、同一衝撃体モデルが任意の速度・任意の角度及び任意の被衝撃体に衝突した場合における衝撃力波形を推定することが出来ると考える。

7. まとめ

本研究は、交通施設の増加及び重要施設の増加に伴い、ますます重要視されるであろう衝撃現象の機構を解明するため、まず、衝撃力に焦点を当てて、その特性を調べ、モデル化を検討しようとしたものである。そこで、多質点バネモデルを用いて衝撃力特性の解析を行い、実験によってその妥当性を検討し、衝撃力特性を解析的にシミュレートすることを試みた。その成果及び問題点を以下にまとめる。

- ① 多質点バネモデルを用いた本解析結果は、衝撃力の最大値及び作用時間は僅かに異なるが、実験による衝撃力～時間曲線や過渡振動の間の応答加速度曲線をよくシミュレートしている。しかし、さらに精度を上げるために衝撃力の算出にあたって、粘弾塑性体としての材料（バネ）の特性（非線形性）及び力積伝播の影響を考慮に入れる必要がある。
- ② 衝撃力特性を支配する要素として最大衝撃力、立ち上がり時間、衝撃作用時間が考えられるが、それらを決定するものとして1質点当りの重量、質点数、衝突速度、質点の偏心等が考えられる。
- ③ 1質点当りの重量が増加すると最大衝撃力、立ち上がり時間、衝撃作用時間がともに増加し、質点数が増加すると衝撃作用時間が増加するが、最大衝撃力、立ち上がり時間は変化しない。そして、衝突速度が増加すると最大衝撃力のみが増加し、立ち上がり時間、衝撃作用時間は変化しないことが明らかとなった。
- ④ 偏心を与えたモデルは実験では偏心量が小さすぎたため偏心による影響を見出す事は出来なかったが、衝撃力特性を解明するうえで、偏心の影響は見逃せないものであり、偏心量等の影響を明らかにする必要がある。解析モデルに適当な偏心を与えて解析を行った結果、偏心のない場合に対し少し大きめの最大衝撃力を算出し、複数のピークを持つ衝撃力波形が現われる様になったり、最大衝撃力が最初のピークに現われるとは限らないようになる事がわかった。
- ⑤ コンクリート構造物に作用する衝撃力特性を対象とする場合、被衝撃体をモデル化するうえで剛性・粘性は不可欠で、これらの組み合わせにより様々なコンクリートの特性をも考慮することが出来ると考えられる。
- ⑥ 上記②～③より任意の衝撃力波形より衝撃体・被衝撃体モデルが推定され、ひいては各種条件を変化させた場合の衝撃力波形を推定することが可能となる。

参考文献

1) J.P.Wolf, K.M.Bucher and P.E.Skrikerud: Response of Equipment to Aircraft Impact, Nuclear Engineering and Design, Vol.47, pp.169-193, 1978, 2) J.D.Riera: Basic Concepts and Load Characteristics in Impact Problems, RILEM, CEB, IABSE, IASS, Interassociation Symposium, Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, Introductory Report, Berlin(BAM), pp.7-29, 1982.6, 3) Mounir M.Kamel and Joseph A.Wolf, Jr.: Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, pp.316~355, 1982, 4) 藤井学 宮本文穂: 衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動、コンクリート工学、第21巻9号、pp.25-36, 1983.9

(1990年10月12日受付)