

(15) 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

神戸大学工学部 正会員 宮本 文穂  
 神戸大学大学院 学生員 M. W. KING  
 神戸大学大学院 学生員 〇榊井 弘樹

1. まえがき

土木構造物の耐衝撃設計法確立において、衝撃破壊挙動の解明や衝撃作用の特性・頻度等を明らかにすることが必要不可欠となるが、特に後者<sup>1)</sup>においては未だ十分な検討が行われていない現状にある。そこで本研究では、構造物に作用する衝撃力特性をシミュレートするため、衝撃体を多質点系 $n$ にモデル化することによって衝撃体が被衝撃体に及ぼす衝撃力特性、衝撃体の各質点の加速度応答特性等の算定、把握を試みる。さらに、衝撃模型実験結果に基づいて解析結果を検証することによりその精度及び特性を明らかにし、衝撃力シミュレーションの可能性、有効性を検討するものである。

2. 解析法の概略

衝撃力特性のモデル化手法としては、Lumped-mass model<sup>2)</sup>を基本として各質点の回転運動及び軸方向 $z$ 方向の運動(図1では省略されている)を付与して改良した図1に示す多質点系 $n$ にモデル化して用いてモデル化した。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)衝突する可能性の両者が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 $n$ のうちの並進方向の $n$ の定数を $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ 、回転方向の $n$ の定数を $g_1, g_2, g_3, \dots, g_{n-1}$ 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、 $n$ 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、 $n$ は後述する検証実験との対応を考え、 $n$ の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。そして、解析方法としては、各質点重心の並進方向及び重心回りの回転方向の運動方程式(式(1))を逐次積分法(Newmark- $\beta$ 法( $\beta=1/6$ ))を用いて解いた。時間 $t$ における衝撃力 $F_i$ は、一般に $n$ による力の伝達(式(2)第1項)と力積伝播の影響(式(2)第2項)の和として表される式(2)で与えられるが、本研究ではモデルの各 $n$ を完全弾性体として考え、前者(式(3)第1項)のみにより算定することにした。

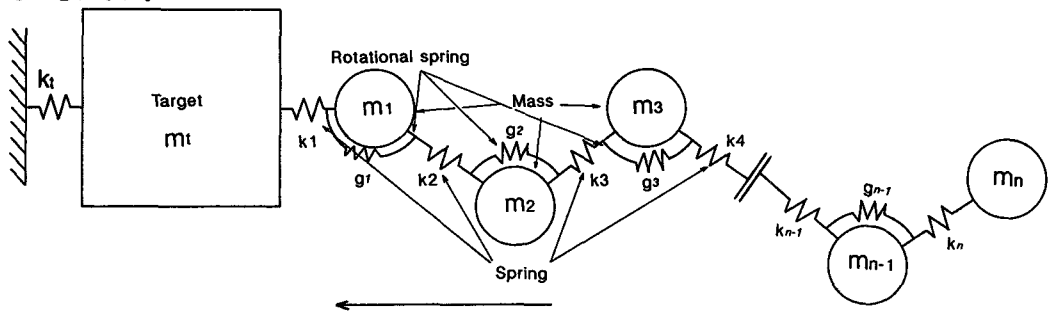


図1 多質点系 $n$ にモデル化

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\}_t + [C] \cdot \{\dot{U}\}_t + [K] \cdot \{U\}_t = \{R\}_t \quad \dots(1)$$

$$F_i = K_i \cdot U_i + I_i / \Delta t \quad \dots(2)$$

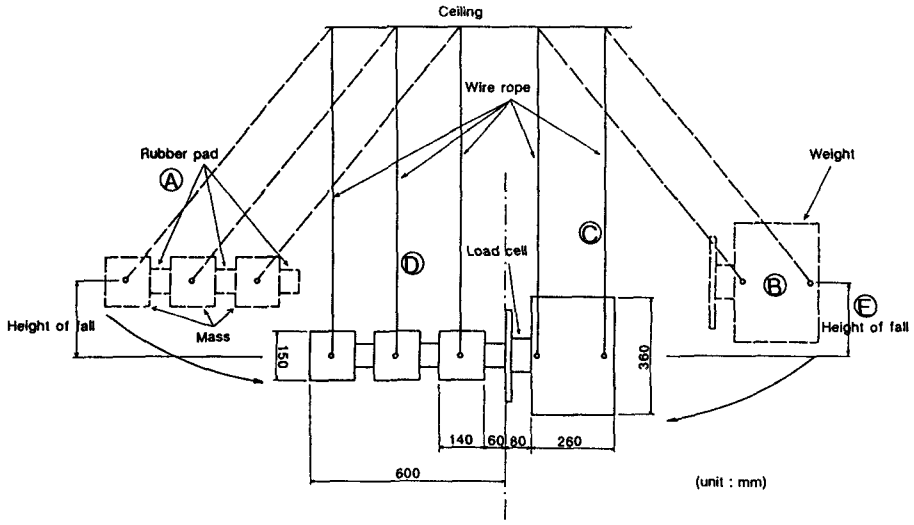


図2 衝撃力特性再現実験装置の概略

表1 実験の種類

Test code	Number of mass	Weight of each mass (kgf)	Mass ratio ( $\Sigma m_1/m_4$ )	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

### 3. 実験の概要

前節の解析法に基づいた解析結果の精度及び有効性を検証するため検証実験を行った。その実験装置の概略を図2に示す。衝撃体には、その質量の変化及び偏心に対応できるように、5枚の鉄板で構成された金属製の質点を、ゴム柱(図2 A)で連結したものをを用いた。一方、被衝撃体には、被衝撃体解析用に対応させ、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200kgfの金属塊(図2 B)を用いた。そして、それぞれをワイヤ(図2 C, D)で吊下げて振り状にし、反対方向に所定の速度が得られる高さ(図2 E)まで引上げて、同時に解放することによって元の位置(図2中Collision point)で衝突するようにした。本研究では、被衝撃体を可動にする事によって被衝撃体にも速度を与え、より大きな相対速度を得る事ができるようにした。そして衝撃体の質点数、1質点あたりの質量、衝突速度、質点の偏心の有無等を変化させて数種類の実験を行い、各質点重心において加速度応答を、また、ロードセルを金属塊に取り付けることにより衝撃力の時間的変化を測定した。実施した実験の種類を表1に示す(Kは偏心を与えた用を示す)。

### 4. 結果と考察

本実験及び解析結果の比較の1例を図3、図4及び表2に示す(図表中の記号D3, D5は1質点あたりの質量を、M1, M2, M3は質点数、Kは偏心を与えた用を、Jは解析結果であることをそれぞれ示す)。

図3、表2より衝撃力特性の実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は実験結果に比べわずかに作用時間を短く、最大衝撃力を小さく算定する傾向が

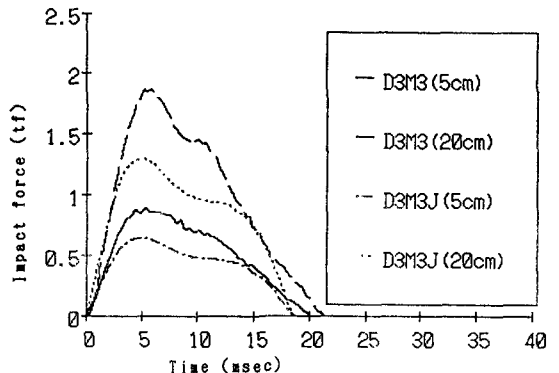


図3 実験、解析による衝撃力特性の比較 (D3M3用)

ある事がわかる。前者は $\gamma$ 柱の弾性、粘性定数を一定と仮定して解析を行ったため、後者は衝撃力の算定において力積伝播の影響を考慮に入れていないためと考えられる。しかし、衝撃力波形や、各質点の応答加速度(図4)を比較してみると先頭の質点の加速度が0、つまり衝撃体が被衝撃体から離れてしまうまでの波形はほぼ一致していることがわかる。また、図3及び表2の実験結果より、衝撃力波形において、落下高さ、すなわち衝突速度が大きい方が最大衝撃力も大きくなり、質点数が多くなると作用時間が長く、1質点あたりの質量を大きくすると立ち上がり時間や作用時間が長くなるという傾向がみられた。しかし、偏心を有する $\gamma$ 柱(D5M3K)は対象とした偏心量が小さかったために偏心の影響が顕著にはみられなかった。これらについては、解析結果からも同様の傾向がみられた。

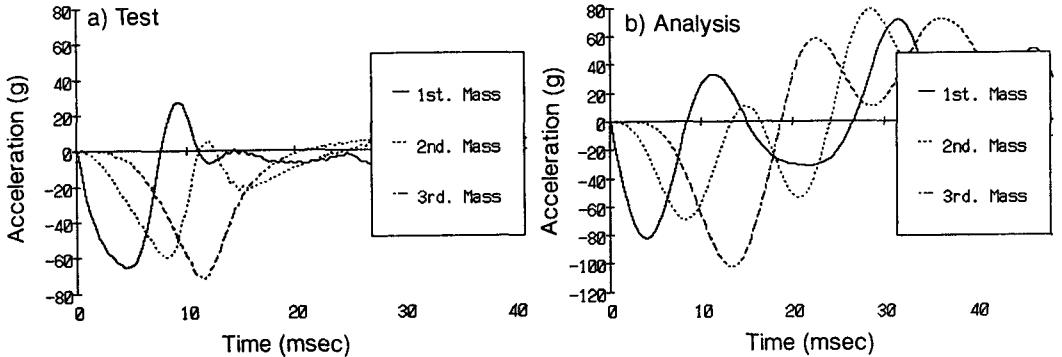


図4 実験、解析による各質点の加速度応答の比較 (D5M3 $\gamma$ 柱)

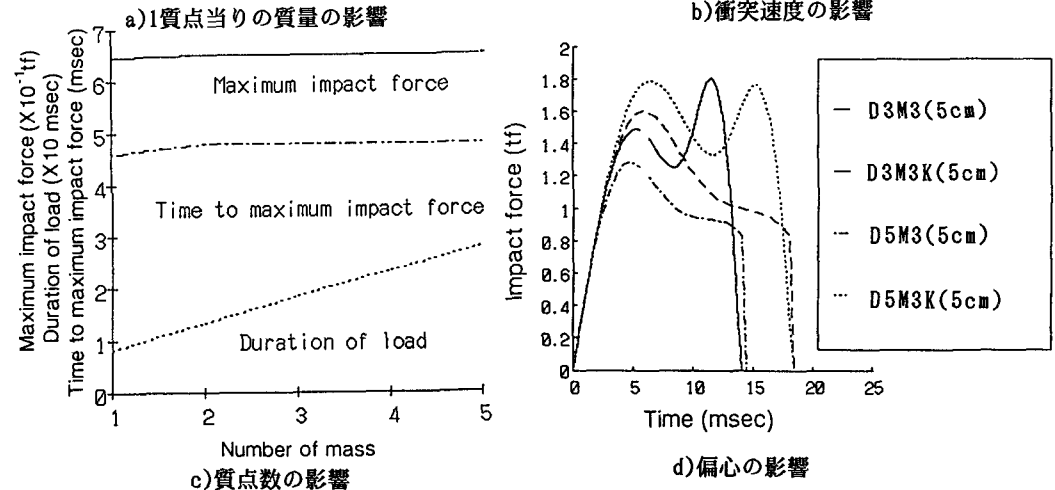
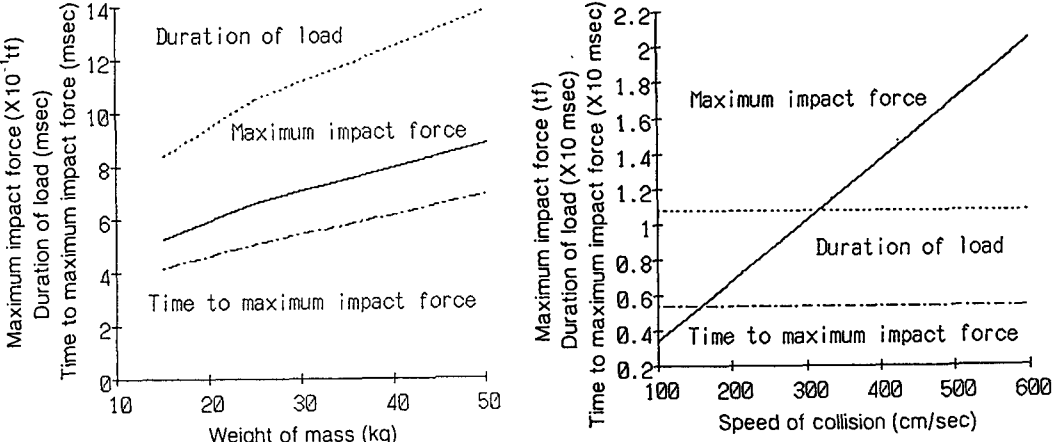
表2 実験及び解析結果の比較

	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	28.8 28.4
	D5M3K	1.98 3.96	1.088 2.282	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	0.1498 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	18.8 18.8

以上の結果を総合して、粘性や力積伝播の影響の考慮等の問題点があるが本解析法が任意の衝撃体 $\gamma$ 柱の衝突時に現れる衝撃力波形及び加速度波形の特徴をほぼシミュレートできると思われる。

一方、構造物に作用する衝撃作用を再現する上で、任意の衝撃力特性より、それに対応する衝撃体の $\gamma$ 柱を得ることも必要である。たとえば、衝撃体がある速度で衝突した時の衝撃力特性より、衝撃体 $\gamma$ 柱が特定できれば、前述の解析法により、あらゆる速度の場合の衝撃力特性が推定可能となるからである。それには、衝撃体 $\gamma$ 柱を構成する各要素の特性(1質点当りの質量、質点数、衝突速度、質点の偏心等)が衝撃力特性を支配すると思われる最大衝撃力、立ち上がり時間、作用時間にどのような影響を及ぼすか明らかにする必要がある。そこで、これらが衝撃力特性にどのような影響を与えるかを、前述の解析法を用いて明らかにしたものを

図5 a)~c)に示す。これより、衝撃体の衝突速度が大きいと最大衝撃力も大きく、質点数が多いと作用時間が長く、1質点あたりの質量が大きいと立ち上がり時間や作用時間が長くなるという傾向があることがわかる。最後に、各質点間の偏心の影響は、実験では与えた偏心量が少なかったためその影響がよく確認できなかった。そこで、3質点マシンの先頭の質点に5cmの偏心を与えたマシンの用いて解析を行った結果、偏心のない場合と比較して作用時間は変わらないが、立ち上がり時間及び最大衝撃力が増加した。また、衝撃力は2つのピークをもち2度目のピーク時に最大衝撃力に達する傾向がみられた(図5 d)参照)。



5. 結論 図5 衝撃体マシンの各要素の特性が衝撃力特性に与える影響

①多質点マシンの用いた本解析法は、衝撃力波形の特徴をほぼシミュレートすることができるが、粘弾塑性体としての材料(ハネ)の特性(非線形性)及び力積伝播の影響を考慮することにより、更に精度を上げることが出来る。②衝撃力特性を支配する要素である最大衝撃力、立ち上がり時間、衝撃作用時間は衝撃体マシンの1質点当りの重量、質点数、衝突速度、質点の偏心等により決定される。③1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し、衝突速度が増加すると最大衝撃力が増加する。

参考文献: 1) L.M.Habip, Paper J5/1, 3rd SMIRT Conference London, 1975, 2) 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, 3) 宮本文穂, M.W.KING, 榎井弘樹: 構造物に作用する衝撃力特性のシミュレーションに関する基礎的研究, 土木学会第45回年次学術講演会, Vol.5, pp.644-645, 1990