

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

Simulation of Impact Load Characteristics and Investigation of Design Impact Load

宮本 文穂*

M. W. KING**

石橋照久***

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

A proper understanding of the impact load characteristics such as maximum impact force, duration of impact force, time to maximum impact force, impact force-time relation, loading rate, impulse, etc. is necessary for design of concrete structures subjectable to impact loads. This paper discusses the simulation of impact load characteristics acting on concrete structures by employing the multi-mass model. The effect of mass distribution, mass eccentricity, collision speed, etc. are considered. It is found that the analytical method can simulate the impact load characteristics and acceleration response as a result of verification with test results. The influence of different physical factors are investigated by parametric analysis. Furthermore, a method of predicting the physical composition of the impacting body from a known impact load characteristics is suggested and verified with the test results carried on a model car. Finally, a design impact load for vehicle collisions to concrete handrails is proposed.

1. はじめに

コンクリート構造物に対して考慮すべき、突発的な衝突現象としては、飛行機の原子力施設への墜落¹⁾、自動車の高欄あるいは高架橋橋脚への衝突、船舶の防波堤、岸壁および橋脚への衝突等が挙げられ、事故時の乗員保護とともに、衝突の対象となる各種構造物の衝撃破壊の抑制、2次災害の防止が設計において要求される場合がある。また、落石や土砂崩れなどの自然災害では、大規模な被害を起こす恐れがあり、これを阻止する防護壁等を設計する必要がある。さらに、宇宙分野では、近い将来、実現が確実な月面基地等の宇宙構造物の設計の際、隕石の衝突等を考慮する必要がある。

土木構造物の設計における耐衝撃性の配慮としては、静的荷重に衝撃係数を乗じる方法が一般的である。しかし、衝撃作用下における各種構造物では、応力波によって応力場や変形モードが静的荷重の場合とは異なり、また、重要構造物への衝撃作用の可能性の増大、構造物の破壊による大規模な被害の発生確率の増加、衝撃作用にともなう構造物の変形挙動や破壊形式の変化等を考慮すると、耐衝撃性をさらに重要視する必要があり、設計衝撃力に代替の静的荷重を用いるのは合理的とはいえない。このように、コンクリート構造物の耐衝撃設計を行う上で、衝撃作用の特性や頻度等は必要不可欠なものであるが、研究、実験とも未だに十分とはいえず、十分な説明がな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)

*** 神戸大学大学院，工 学 研 究 科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

そこで本研究では、以上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（最大衝撃力、衝撃作用時間、衝撃力立ち上がり時間、衝撃力特性初期の立ち上がり勾配、衝撃力波形、力積など）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ばねモデルを適用して、解析的に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、衝撃実験の結果に基づいて解析結果を検証し、その精度および特性を明らかにするとともに、衝撃力特性解析の可能性、有効性を検討する。次に、各種衝撃力特性より衝撃体モデルを推定するため、衝撃体モデルの各要素（質点、ばね）が衝撃力特性に与える影響を解析的に調べ、既知の衝撃力特性から衝撃体モデルの推定を試み、模型車両による衝突実験を行い、その可能性を検討する。さらに、自動車の構造物への衝突を例にとって、構造物の耐衝撃設計における設計衝撃力の検討を試みる。

2. 衝撃力特性解析

衝撃力特性のシミュレーションを行うために、Lumped-mass model¹⁾を基本として各質点間に回転運動および軸方向減衰(ダッシュポットで表現するもので、図1では省略されている)を付与し、3次元に拡張して改良を加えた図1に示す多質点ばねモデルによって衝撃体をモデル化した。一方、被衝撃体は、コン

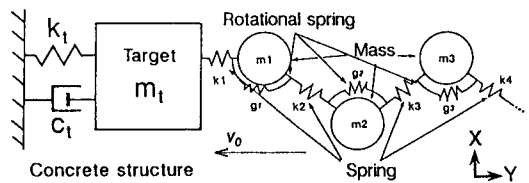


図1 多質点ばねモデル

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、ばねとダッシュポット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。

図1における各質点のx, y, z軸方向および各軸まわりの回転方向の運動方程式(式(1))を逐次積分法であるNewmark-β法を適用して、 Δt 時間刻みごとに逐次計算を行い、衝撃体の動的挙動を解明し、被衝撃体に作用する衝撃力を算定する。

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

- ここで、 $[M]$: 質量および慣性モーメントを示すマトリックス
 $[C]$: 並進および回転方向の粘性減衰マトリックス
 $[K]$: 並進および回転方向の剛性マトリックス
 $\{\ddot{U}\}_t$: 時間 t における並進および回転方向の加速度・角加速度
 $\{\dot{U}\}_t$: 時間 t における並進および回転方向の速度・角速度
 $\{U\}_t$: 時間 t における並進および回転方向の変位・角度
 $\{R\}_t$: 時間 t における外力

被衝撃体に作用する衝撃力 $F(t)$ は、ばねの変形により伝達される力(式(2), 第1項)と、先頭の質点と被衝撃体の衝突時に伝達される力積の変化で表される力(式(2), 第2項)の和より次式¹⁾で算定される。

$$F(t) = k_i \cdot u_i + I_i / \Delta t \quad \dots\dots(2)$$

- ここで、 k_i : 先頭のばねのばね定数
 u_i : 先頭のばねの変形量
 I_i : 被衝撃体に作用する力積

3. 衝撃力特性解析の有効性の検証

3.1 衝撃実験の概要

本研究では、振子式試験装置²⁾を用いて衝撃力特性再現実験を行った。本実験装置の特徴は、図2に示す

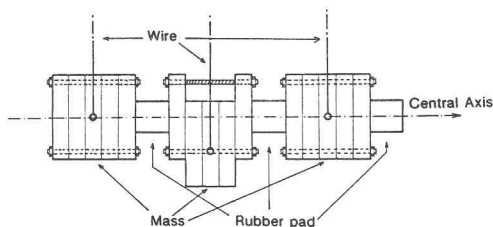


図2 衝突実験に用いた衝撃体の構成

ように、衝撃体の各金属製質点が、鉄板の重ね合わせ方で質量、偏心の変化に対応でき、また、各質点間をばねとダッシュポットの役割をするゴム柱と接着剤で結合し、軸方向および回転方向の変位を可能にしたところにある。一方、被衝撃体には、衝撃体と被衝撃体との質量比を大きくとるように考慮して重量200kgfの金属塊を用いた。本実験装置の概要を写真1に示す。

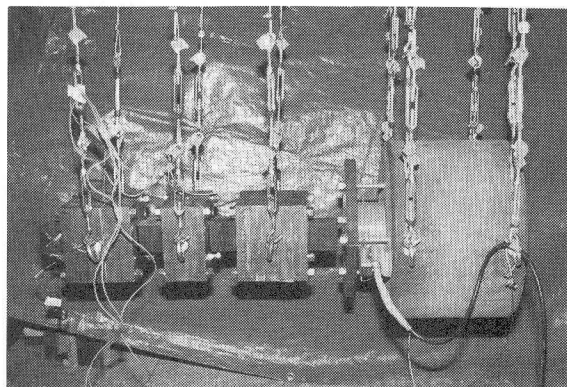


写真1 実験装置の概要

以上の装置により、衝撃体の質点数、質量、偏心量および衝突速度を種々変化させた実験を行い、衝撃体が被衝撃体に及ぼす衝撃力の時間履歴を、金属塊前面に配したロードセルを介して測定し、各質点の重心における加速度を、金属製質点重心位置に開けた円筒内に設置した加速度計で測定した。

3.2 実験の種類

種々の質点構成、衝突速度の衝撃体による衝撃力特性を把握、解析精度の確認のため、以下に示す3種類の実験を行った。すなわち、「シリーズ1」では衝撃体の質点数、質点質量および衝突速度の変化、「シリーズ2」では質量分布と衝突速度の変化、「シリーズ3」では偏心を与えたものに注目した実験をそれぞれ行うことにした。実施した実験の要因別種類を表1にまとめて示す。

3.3 実験結果および解析精度の検証

2. で述べた解析結果の精度および有効性を検証するために、以下に実験結果と解析結果を比較する。ここで、実験で軸方向ばねとして用いたゴムの静的一軸圧縮試験結果から得られた材料特性のうち、一例として「シリーズ2」で使用したものを図3に示す。これらは非線形性を有するので、解析に取り入れるにあたり、図3のように載荷段階のみを多直線で折線近似し、除荷に関しては載荷経路と同じものを用い、粘性減衰定数に関しては「0」として解析を行った（なお、最大荷重が図3の最大値を超える場合については多直線の最終勾配を延長した）。また、衝撃力特性解析によって再現される衝撃力は式(2)によって算定されるが、

表1 実験の種類

Test series	Test code	Number of masses	Distribution and weight of mass (kgf)	Distribution of eccentricity (cm)*	Mass ratio** (impactor/target)
Series 1	D3M1	1	15 - 0 - 0	(0) - (0) - (0)	0.080
	D3M3	3	15 - 15 - 15	(0) - (0) - (0)	0.225
	D5M1	1	25 - 0 - 0	(0) - (0) - (0)	0.126
	D5M3	3	25 - 25 - 25	(0) - (0) - (0)	0.369
Series 2	LHH	3	15 - 25 - 25	(0) - (0) - (0)	0.315
	HLH	3	25 - 15 - 25	(0) - (0) - (0)	0.315
	HHL	3	25 - 25 - 15	(0) - (0) - (0)	0.315
	HHH	3	25 - 25 - 25	(0) - (0) - (0)	0.363
Series 3	MMM	3	25 - 25 - 25	(0) - (0) - (0)	0.363
	UMM	3	25 - 25 - 25	(+3.76) - (0) - (0)	0.363
	MUM	3	25 - 25 - 25	(0) - (+3.76) - (0)	0.363
	MMU	3	25 - 25 - 25	(0) - (0) - (+3.76)	0.363

Note: Spring stiffnesses are slightly different in D5M3, HHH and MMM

*: (+) sign represents upward eccentricity with respect to central axis

** : Mass ratio = Mass of impactor / Mass of target

本実験に関しては、被衝撃体と衝撃体の間にばねおよびダッシュポットの役割をするゴムを介するので、直接的な衝突がなく力積の影響は小さいと考えられ、ばねの変形により伝達される力（式(2), 第1項）のみにより衝撃力を算定した。表2は、試験条件とともに、実験で得られた衝撃力特性と解析結果を比較したものをまとめて示したものである。

(1) 衝撃力による比較（表2参照）

まず、衝撃力特性に関して「シリーズ1」について、試験コード「D5M1」および「D5M3」の実験結果と解析結果を比較したものを図4（a）,（b）に、また、「シリーズ2」からは1例として試験コード「LHH」について比較したものを図5にそれぞれ示す。これらの図より、図4（a）の試験コード「D5M1」の落下高さ20

cmの場合を除いて、実験結果と解析結果は、最大衝撃力に達するまではほぼ一致しており、その後の部分で、いずれも解析では衝撃作用時間を長めに算出する傾向がみられる。これは、ばねとみなしたゴムの静的材料一軸特性において載荷過程と除荷過程は大きく異なり（図3参照）、この除荷過程の完全なモデル化を、今回は行わなかったためであると考ええる。これによって除荷過程での差が生じ、特に、3質点の衝撃体の場合は3つのばねの影響が重ね合わされて、1質点の場合よりも、衝撃作用時間に大きな差が現われたものと言える。

また、図4（a）の試験コード「D5M1」の落下高さ20cmの衝撃力波形で最大衝撃力に違いがみられるのは、他の解析結果が最大衝撃力に達する近傍までは比較的良好に一致していることから、振子式実験装置での衝撃体と被衝撃体の拘束解放時にタイミングのずれが生じ、その結果、衝突速度が遅くなり、それにより最大衝撃力も小さくなったと考えられる。

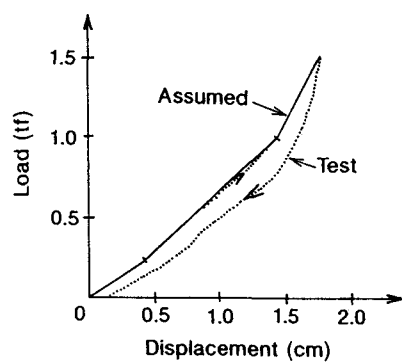
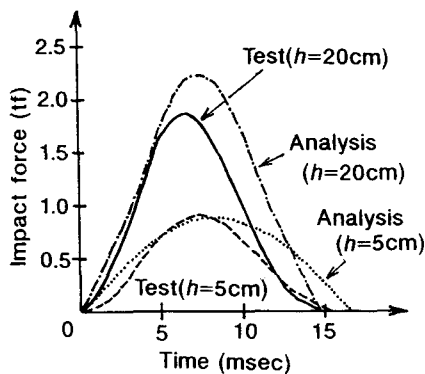


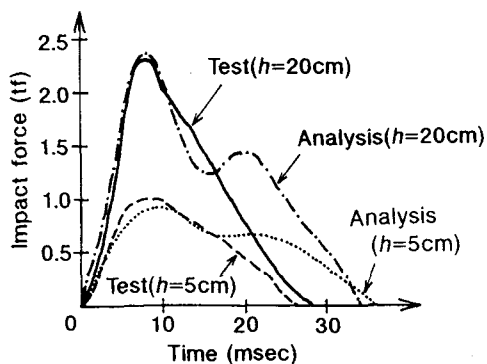
図3 ゴム柱の静的荷重～変位曲線
（「シリーズ2」）

表2 実験結果と解析結果の比較

	Test code	Collision speed (m/sec)	Maximum load (tf)		Loading rate (tf/msec)		Time to max. load (msec)		Duration of load (msec)	
			Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis
Series 1	D3M1	1.98	0.906	0.703	0.216	0.145	4.2	6.8	9.8	13.5
		3.96	1.927	1.625	0.438	0.304	4.4	6.0	9.4	12.5
	D3M3	1.98	0.890	0.733	0.171	0.130	5.2	7.6	20.0	29.7
		3.96	1.882	1.761	0.325	0.260	5.8	7.0	21.2	28.5
	D5M1	1.98	0.905	0.865	0.181	0.150	5.0	8.3	15.8	16.6
		3.96	1.874	2.230	0.284	0.299	6.6	7.5	13.8	15.0
	D5M3	1.98	1.020	0.911	0.121	0.167	8.4	9.1	26.8	36.0
		3.96	2.321	2.351	0.305	0.269	7.6	8.0	28.4	34.5
Series 2	LHH	1.98	0.681	0.580	0.071	0.021	9.6	27.5	40.8	51.5
		3.96	1.271	1.348	0.159	0.150	8.0	9.0	36.8	45.5
	HLH	1.98	0.645	0.699	0.056	0.056	11.6	12.5	37.6	51.5
		3.96	1.820	1.766	0.207	0.168	8.8	10.5	44.0	45.0
	HHL	1.98	0.889	0.701	0.093	0.054	9.6	13.0	35.6	51.0
		3.96	1.815	1.768	0.189	0.168	9.6	10.5	38.4	40.0
	HHH	1.98	0.607	0.701	0.058	0.052	10.4	13.5	48.0	51.5
		3.96	1.879	1.768	0.224	0.168	8.4	10.5	40.8	47.0
Series 3	MMM	1.98	0.707	0.756	0.216	0.066	11.2	11.5	49.2	46.0
		3.96	1.672	1.512	0.438	0.132	10.4	11.5	42.0	46.0
	UMM	1.98	0.670	0.792	0.171	0.045	10.0	44.5	45.2	60.0
		3.96	1.508	2.684	0.325	0.070	9.2	42.5	46.4	46.0
	MUM	1.98	0.745	0.742	0.181	0.068	9.2	11.0	40.0	60.0
		3.96	1.694	1.483	0.284	0.135	9.2	11.0	40.0	24.0
	MMU	1.98	0.719	0.756	0.121	0.066	10.8	11.5	42.0	39.5
		3.96	1.706	1.512	0.305	0.132	10.0	11.5	42.8	37.5



(a)D5M1モデル



(b)D5M3モデル

図4 実験,解析による衝撃力特性の比較(「シリーズ1」)

次に、偏心を与えた「シリーズ3」では、図6に示す試験コード「MMU」で比較すると、落下高さ5cmでは解析結果は、衝撃力波形の形状、衝撃作用時間ともに良好に再現できているが、落下高さ20cmでは最大衝撃力や衝撃作用時間はほぼ再現できているものの、衝撃力波形の形状が実験とは異なっていることがわかる。この原因としては、ゴムの回転方向のばね定数のデータが得られなかったため、その代替として解析に適用したゴム柱の曲げ剛性が、実験でのゴム柱の回転ばねに対応できずに、実験結果よりも緩やかな波形になったものと考えられる。また、実験に用いたゴムの細長比を、座屈の恐れから小さくしたため、質点の回転運動のほとんどが拘束され、結果として、並進方向の運動が主として前後の質点に伝達され、回転方向の運動が十分に伝達されなかったということも考えられる。

(2)応答加速度による比較

図7,図8および図9は、試験コード「D5M3」,「HLH」,「MMU」について、各質点における加速度～時間曲線の実験値と解析値を比較したものである。まず、解析値では各質点とも衝突初期段階において、応答加速度波形の形状はほぼ再現できているが、後半部分では、実験値に比較して、波形が減衰していく様子が見られないばかりでなく、各質点の加速度の方向が一致していないという違いがある。これは、解析で粘性減衰定数を「0」として計算していることと、実験では衝撃作用終了後、衝撃体と被衝撃体が分離するのに対して、解析では衝撃作用後も、ばねで連結されて運動し続けるものとして計算していることが理由として考えられる。これより、解析値での各質点の応答加速度の周期が、実験値よりも長くなり、そのため、衝撃力～時間曲線で作用時間が長くなるという傾向が現れたものと考えられる。

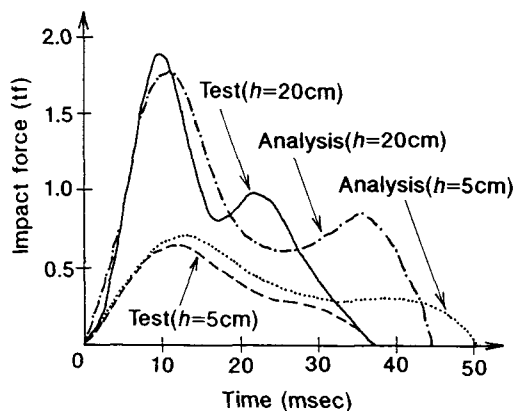


図5 実験,解析による衝撃力特性の比較(「HLH」)

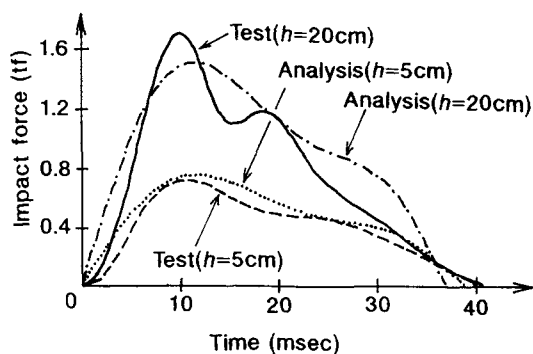
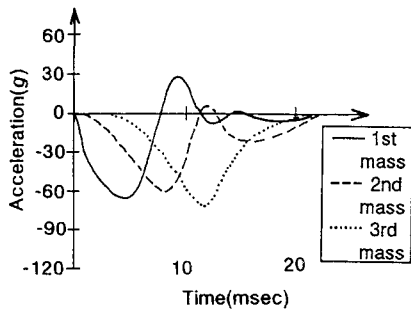
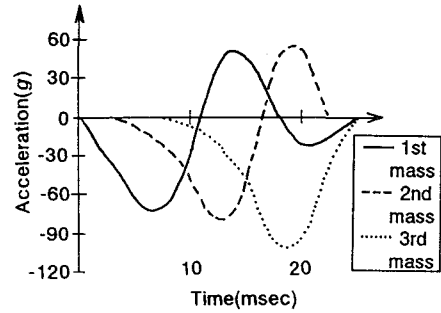


図6 実験,解析による衝撃力特性の比較(「MMU」)

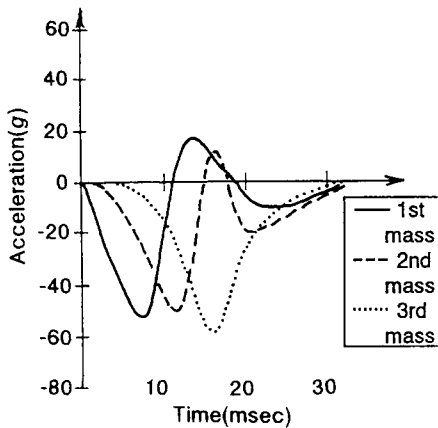


(a)実験

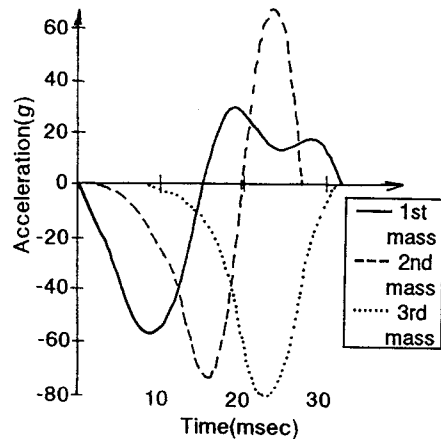


(b)解析

図7 実験, 解析による応答加速度の比較(「FD5M3」)

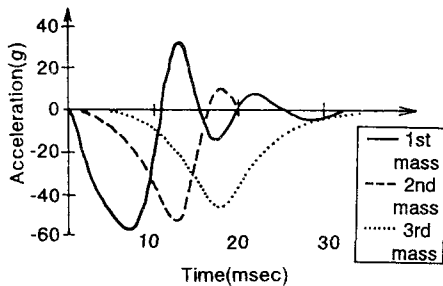


(a)実験

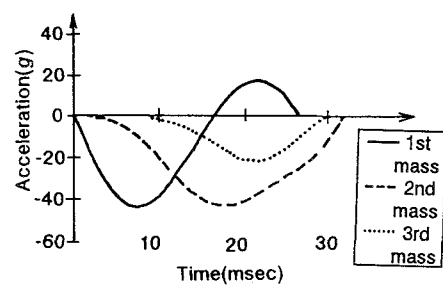


(b)解析

図8 実験, 解析による応答加速度の比較(「FHLH」)



(a)実験



(b)解析

図9 実験, 解析による応答加速度の比較(「FMMU」)

(3) 衝撃力特性シミュレーションの有効性

以上の実験結果と解析結果の比較より、全般的には、衝撃力波形の解析結果は、コンクリート構造物の破壊形式に主に影響を及ぼす第一ピーク（最大衝撃力になることが多い）までほぼ忠実に再現でき、それ以降の衝撃力特性や応答加速度に関しては、波形の概略が再現されており、最大衝撃力の値は、偏心がある場合の一部の例外を除き誤差約 $\pm 15\%$ 以内に収まっている。また、偏心を有する衝撃体については、解析に適用する回転ばねのばね定数の把握と実験方法の改善により、任意の偏心を与えた衝撃体の衝撃力特性の再現が可能である。結局これらは、実験に用いたゴム柱の材料特性（ばね定数、粘性減衰定数）のモデル化の問題が主となっていると考えられ、忠実にモデル化できれば解析の精度は大きく向上し、任意の質点分布の衝撃体について衝撃力特性の再現が可能となる。

4. 衝撃体モデルの各要素が衝撃力特性に及ぼす影響

本研究で適用する多質点ばねモデルを利用して、既知の衝撃力特性から逆に衝撃体の推定（質点数，質点間ばね定数等）を行う際に、パラメーターとなるべき各要素特性の衝撃力特性に及ぼす影響を解析的に調べる。ただし、「4.5 偏心の影響」以外では衝撃体の質点はすべて1軸上にあるものとし、また、「4.4 衝突速度の影響」以外では衝突速度を一定として解析を行っている。

4.1 質量分布の影響

図10は、1軸上にある3質点の衝撃体について、最大衝撃力に大きな影響を及ぼすと考えられる、先頭の質点の重量を20～100kgfに変化させ、残りの質点の重量を25kgf、各質点のばね定数および衝突速度を一定として、衝撃力特性を算定し、先頭の質点の影響を調べた。この図から、1質点目の質量が変化しても、立ち上がりの勾配が等しくなることや、1質点目の質量が大きくなれば、最大衝撃力が増大し立ち上がり時間が長くなることがわかる。これらの関係を明確にするため、1質点目の重量と最大衝撃力および立ち上がり時間との関係を解析的に調べ、それぞれ図11に示す結果を得た。これより、両者とも1質点目の重量の影響はほぼ同様の傾向を示すことが明かである。

また、衝撃体総重量を75kgf、各質点の軸方向ばね定数を1000kgf/cmと固定して、質点数と重量分布を変化させた図12の試験コード「15-15-15-15-15」（5質点の衝撃体で各質点の重量が15kgf）、試験コード「15-30-30」（3質点の衝撃体で先頭の質点から順に重量が15, 30, 30kgf）の解析結果から、先頭の質点の質量と軸方向ばね定数をそれぞれ一定にした場合、立ち上がりから第1ピークまでの波形は等しく、それ以降については、後方に大きな質量が残っていると、第2ピーク以後に最大衝撃力が現れたり、試験コード「15-15-15-15-15」のように質点数が多いと作用時間が長くなる傾向がある。また、試験コード「35-20-20」（3質点の衝撃体で、先頭の質点から順に重量が30, 20, 20kgf）のように、1質点目の質量が後方の質点の質量に比較して大きい場合は、1質点モデル（試験コード「75」）のような比較的単純な衝撃力波形となる。

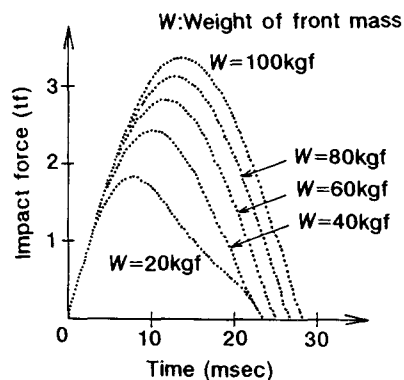


図10 3質点衝撃体における先頭の質点重量の影響

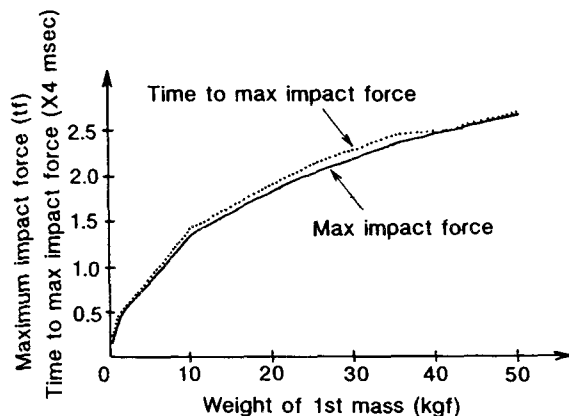


図11 先頭の質点が衝撃力特性に与える影響

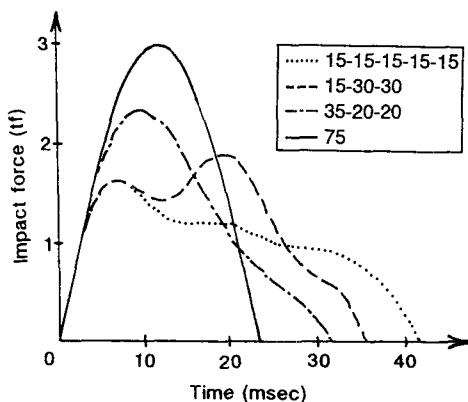


図12 質量分布の違いによる衝撃力特性の比較

4.2 質点数の影響

図13は、衝撃体総質量、ばね定数分布および衝突速度が一定で、かつ各質点の質量を等しくした場合の1, 3, 5質点モデルの衝撃力特性を比較したものである。これより、質点数が増加すると最大衝撃力、立ち上がり時間ともに小さくなる反面、作用時間は長くなる傾向がみられる。このように最大衝撃力、立ち上がり時間が小さくなるのは、主として先頭の質点の質量が小さくなるためであり、作用時間が長くなるのは後方の質点の衝撃体に及ぼす影響の伝達時間によるものである。

4.3 ばね定数の影響

図14は質点配置を一軸上とし、試験コード「25-25-25」（3質点の衝撃体で先頭の質点から順に重量が25, 25, 25kgf）の衝撃体について、先頭の軸方向ばね定数を、500～5000kgf/cmの間で変化させて解析を行い、先頭の軸方向ばね定数と、最大衝撃力、衝撃力立ち上がり時間、衝撃力特性初期の立ち上がりの勾配の関係を比較したものである。これより、先頭の軸方向ばね定数の増加とともに最大衝撃力が増加し、それとともに、衝撃力立ち上がり時間が著しく減少することがわかる。また、衝撃力特性初期の立ち上がりの勾配は、先頭の質点の軸方向ばね定数に比例することがわかる。

一方、2番目、3番目のばね定数が相対的に大きくなった場合の衝撃力特性の比較を図15で行う。図中、試験コード括弧内の「1, 2」は各質点を連結するゴムの軸方向ばね定数および分布を表し、それぞれ1000, 2000kgf/cmであることを示す。これより、試験コード「25-25-25(1-2-1)」では、試験コード「25-25-25(1-1-1)」と比較して若干最大衝撃力が大きく、比較的1質点の衝撃体に似た衝撃力特性となることがわかる。また、「25-25-25(1-1-2)」では、ばね定数の分布の違いによる影響が現れるのは、試験コード「25-25-25(1-2-1)」よりも遅く、衝撃力特性の立ち上がりから最大衝撃力近傍まではほぼ同じ履歴を描くが、試験コード「25-25-25(1-1-1)」と比較して第2ピークが大きくなることをわかる。

4.4 衝突速度の影響

図16は、試験コード「25-25-25」の衝撃体で、衝突速度を2～12m/secまで変化させて、衝撃力特性に及ぼす影響を確認したものである。この図から、衝突速度は、衝撃力立ち上がり時間や衝撃作用時間にはほとんど影響を与えないことがわかる。また、衝突速度と最大衝撃力の関係および衝突速度

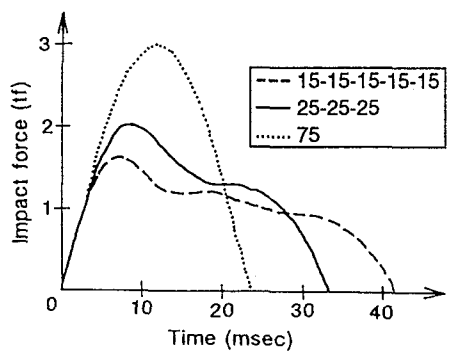


図13 質点数の違いによる衝撃力特性の比較

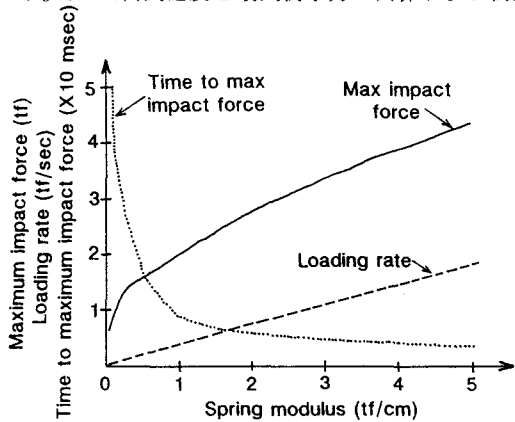


図14 先頭の軸方向ばね定数が衝撃力特性に及ぼす影響

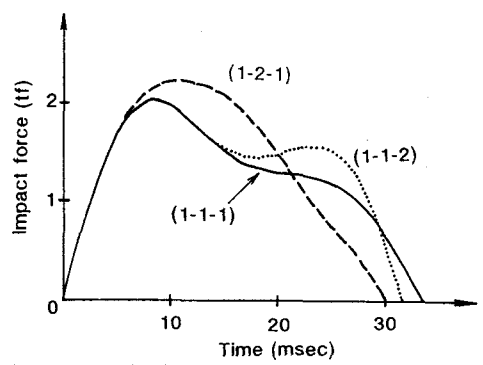


図15 軸方向ばね定数の分布の違いによる影響

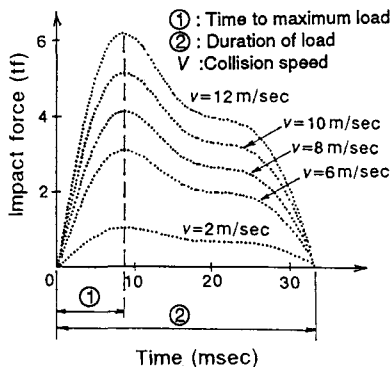


図 1 6 衝突速度の違いによる衝撃力特性の比較

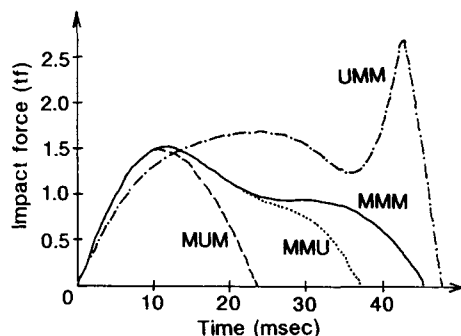


図 1 7 衝撃力特性に及ぼす偏心の影響(「シリーズ3」)

と衝撃力特性初期の立ち上がりの勾配の関係は、ほぼ線形関係になることも明かである。これらより、本解析の範囲内では、衝突速度が衝撃体の固有周期や衝突時の運動量の変化に影響を与えないことが推測できる。

4.5 偏心の影響

図 1 7 は、3. の「シリーズ3」の解析結果として得られた衝撃力特性の比較である。この図より、偏心を有する衝撃体の衝撃力特性を、偏心のない試験コード「MMM」の衝撃力特性と比較すると、偏心が2, 3 質点目にある衝撃体(試験コード「MUM」, 「MMU」)では、最大衝撃力となる第1ピークまではほぼ同じ履歴をたどり、その後それぞれ異なった衝撃力波形を描く。すなわち、試験コード「MMU」は3 質点目に偏心があるため、比較的偏心の影響が被衝撃体に伝わりにくいために、試験コード「MMM」に似た衝撃力波形を描くが、2 質点目に偏心のある試験コード「MUM」は、1 質点の衝撃体に近い衝撃力波形となった。また、先頭の質点に偏心のある試験コード「UMM」は、試験コード「MMM」とは異なった傾向を示し、衝撃力波形後半の鋭い第2ピークが最大衝撃力となっている。これらのことから、偏心の存在が衝撃体の前方になればなるほど、衝撃力特性全体への影響が大きくなることがわかる。

5. 衝撃力特性からの衝撃体モデルの推定

各種構造物の耐衝撃設計を行うには、衝撃体の様々な衝突角度、衝突速度等の衝突条件の内、最も不利な状況についての考慮が必要となる。しかし、その衝突条件によって、衝撃力特性は種々変化し、実験によってすべてを把握することは物理的、経済的に困難なため、ある限られた実験から、種々の衝突条件での衝撃力特性を得る手法の開発が必要となる。そこで、多質点ばねモデルの衝撃力特性解析に System Identification (SI) 法³⁾を適用して、実験で得られた既知の衝撃力特性から、逆に衝撃体モデルを推定し、異なった衝突条件を与えて衝撃力特性を得る方法を考案し、模型実験に適用してその有効性を検証した。

5.1 模型自動車による衝突実験

衝撃体モデル推定の入力データとなる衝撃力特性を得るため、ほぼ1/10スケールで、重量1.4kgfの市販のエンジン付き模型自動車(ラジコン車)を、ロードセルを前面に固定した約50kgfの金属塊に衝突させ、衝撃力の時間履歴を測定した。それと同時に、衝突地点直前で衝突速度(速度計)と跳ね返り速度(高速カメラ)を測定した(図 1 8 参照)。実験は、

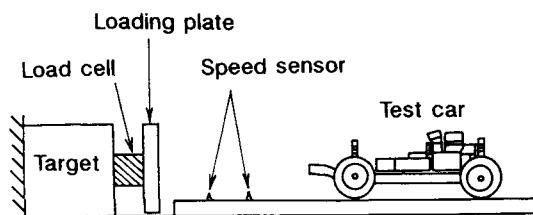


図 1 8 模型自動車による衝突実験の概略

モデル推定を容易にするため、衝突角度を90度（衝突面に垂直）として、同一車両を5回衝突させて行った。

実験で得られた衝撃力特性を、表3および図19にまとめて示す。ここで、図表中の「Test No.」は実験の順番を示し、表3中の「Loading rate」は、衝撃力波形の初期（ここでは最大衝撃力に達するまでの時間の1/4まで）の立ち上がりの勾配を表す。表3より各回で衝突速度が異なるため、直接比較することはできないが、「4.4 衝突速度の影響」より、最大衝撃力と衝突速度の関係はほぼ線形関係であることから（図16参照）、衝撃体のばね定数に変化がないと仮定できる場合には、最大衝撃力と衝突速度の比は一定となる。そこで、本実験結果の[最大衝撃力/衝突速度]を求めると、それぞれ0.40, 0.32, 0.35, 0.35, 0.28kg/secとなり、同一模型自動車を繰り返し衝突させたことにより、シャーシ等に塑性変形が生じ、第1ピークまでの平均剛性が低下したことが確認される。

5.2 逆解析を用いた衝撃体モデル推定法

4. で述べた多質点ばねモデルの各要素や衝突条件と衝撃力特性の関係を利用して、SI法を適用した衝撃体モデル推定法の手順を以下に示す。ただし、ここでは質点に偏心の影響がないものとし、各質点のばねは載荷・除荷ともに線形ばねとする。

- ① 入力データとして、衝撃力特性や衝突条件（衝突速度、衝突角度等）、衝撃体の大まかな種類を与える。
- ② 衝撃力特性の初期の立ち上がり勾配から先頭のばね定数を決定する。
- ③ 衝撃力の第1ピーク値より、先頭の質点質量を決定する。
- ④ 衝撃体の大まかな種類および衝撃力波形の形状より、質点数、各質点質量を仮定する。
- ⑤ 所与の衝撃力特性全体と推定結果の誤差の2乗和が最小となるように、2番目以降のばね定数を決定する。
- ⑥ 決定した衝撃体モデルによる衝撃力特性の精度が所定の範囲におさまらない場合、手順④に戻る。

5.3 衝撃体モデル推定結果の精度検証

実験で得られた「Test No.5」の衝撃力特性、衝突条件を、5.2で述べた手順に適用して、衝撃体モデルの推定を試みた。その際、模型自動車の「車高/車長」が約1/5と比較的小さいため、偏心はないものとして取り扱い、衝撃体の質点数は3質点と仮定した。モデルの推定結果を表4に、また、推定モデルを使用して実験と同じ条件で、解析から得られる衝撃力特性と、実験結果を比較したものを図20に示す。これより、作用

表3 実験結果および測定結果

Test No.	1	2	3	4	5
Collision speed (cm/sec)	490.6	285.7	337.7	288.9	481.5
Rebounding speed (cm/sec)	75	100	115	100	125
Impulse (kgf・sec)	1.287	0.819	0.940	0.796	1.145
Maximum impact force (kgf)	196.7	91.2	118.0	102.0	134.1
Loading rate (kgf/sec)	59290	22800	27650	13900	37350
Duration of impact force (msec)	23.8	25.6	25.4	24.8	24.4

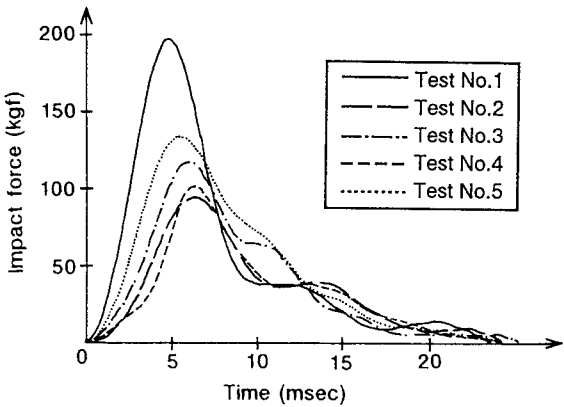


図19 衝突実験で得られた衝撃力特性

表4 推定モデルの質点分布

Number of mass	Distribution of weight (kgf)	Distribution of spring modulus (kgf/cm)
3	0.76 - 0.32 - 0.32	86.2 - 72.0 - 54.2

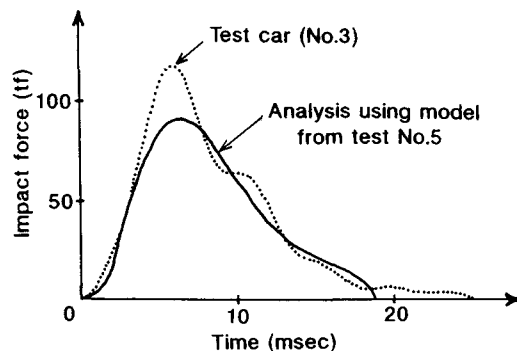
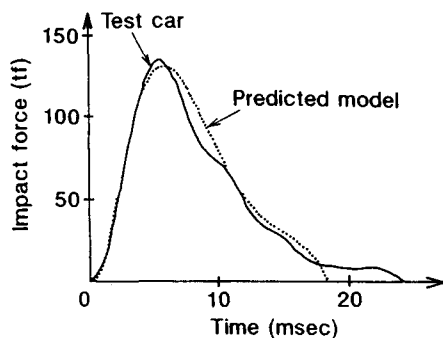


図 2.0 推定モデルによって再現される衝撃力特性

図 2.1 推定モデルに「Test No.3」の衝突条件を与えて再現される衝撃力特性

時間や除荷の部分で若干の違いはみられるが、ほぼ与えられた衝撃力特性を再現できていると言える。

さらに広範囲な衝撃力特性を評価するためには、この推定されたモデルに異なった衝突条件を与えて、衝撃力特性を得る必要がある。その可能性、有効性を検証するために、この推定モデルに、「Test No.3」の衝突条件（表 3 参照）を与え、図 2.1 に示す結果を得た。今回の実験では、第 1 回目で、シャーシ等の補剛材が座屈を起こし、それにより模型自動車の見かけの剛性が低下したため、最大衝撃力付近で異なった傾向を示したが、全体的には精度良く再現できているといえる。この剛性低下の影響や、衝撃力波形の全体的形状等を考慮すると、限られたパターンの実験による衝撃力特性から、任意の衝突条件での衝撃力特性を解析的に精度よく推定することが可能であると考ええる。

6. 自動車における設計衝撃力の検討

種々の衝撃作用を受けるコンクリート構造物の設計上、各種限界状態の設定、設計概念の確立および耐荷力算定法の開発の他に、対象とすべき衝撃力特性を明らかにする必要がある。ここでは、一例として高欄等の道路に隣接した構造物（高欄、ガードフェンス等）への自動車の衝突を取り上げ、設計示方書や各種調査、実験の報告書⁴⁾を参考にして、車両をモデル化し、衝撃体、衝突条件によって種々変化する衝撃力特性を再現し、設計衝撃力の検討を行う。

6.1 車種による検討

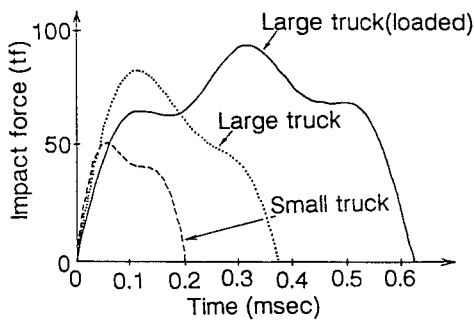
設計示方書、各種調査、実験の報告書⁴⁾を参考にして、検討すべき衝撃体となる自動車の種類、質点構成、衝突条件を表 5 のように設定した。車両は 3 車種について検討し、中型乗用車をエンジンの配置位置の違いによりさらに 3 種類に分け、大型貨物車は荷物を満載した場合についても検討した。

表 5 解析に適用する車種、質点構成および衝突条件

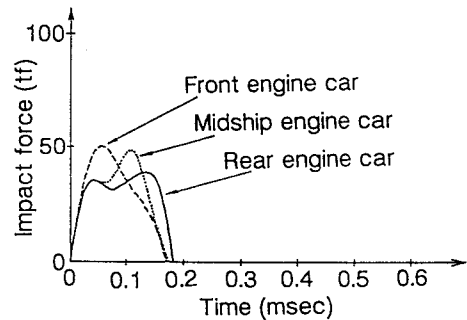
Vehicle type	Total weight (tf)	Distribution of weight (tf)	Collision speed (km/hr)
Automobile (Front engine)	1.2	0.6 - 0.3 - 0.3	80
Automobile (Midship engine)	1.2	0.3 - 0.6 - 0.3	80
Automobile (Rear engine)	1.2	0.3 - 0.3 - 0.6	80
Small truck	1.6	0.6 - 0.5 - 0.5	80
Large truck	5.5	2.5 - 1.3 - 1.7	65
Large truck (loaded)	14.0	2.5 - 5.5 - 6.0	50

* Spring constant: 0.7 (tf/cm), Collision angle: 90 deg.

各車両について算定した衝撃力特性の結果を、図 2.2 (a), (b) に示す。図 2.2 (a) より、貨物満載の大型貨物車が衝突速度 50 km/h にもかかわらず、力積が最も大きく、貨物無し的大型貨物車や小型貨物車とは大き



(a)貨物車



(b)乗用車

図 2.2 車種別による衝撃力特性の比較

く異なる。一方、図 2.2 (b)の 3 種類の中型乗用車では、衝撃力波形のピークの現れ方は異なるものの、力積がほぼ等しいことから、力積に関しては車両重量が大きな影響を持つことがわかる。衝撃力特性初期の立ち上がりは、コンクリート構造物の破壊形式に影響を与え、設計衝撃力には重要な要因であるが、表 5 の条件では図 2.2 (a), (b)の各衝撃力特性の初期の勾配がほぼ等しいことから、破壊の程度は異なるものの、同じ破壊形式⁵⁾になるものと思われる。また、貨物満載の大型貨物車、エンジンの配置位置が中央、後部の中型乗用車は、衝撃力波形の後方に最大衝撃力となるピークを有しているが、これらの衝撃力特性の後半の形状は、コンクリート構造物の破壊進行に影響を与えるため、構造物の衝撃破壊の抑制を考慮する際に大きな意味を持つ。

例えば、高欄の設計を行う場合、衝突車両の逸脱の防止、高欄の破壊形式の制御、破壊の進行の防止等を考えると、入力エネルギーや衝撃力特性の初期の立ち上がり、衝撃力波形の形状（第 1 ピーク以降）が重要となるため、第 1 ピークや力積、入力エネルギーが大きい大型貨物車（荷物満載の場合とそうでない場合）をコンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析⁵⁾に適用して、さらに詳細な検討を行うのが有効であると思われる。ただし、道路の設計条件により通行車両に制限があり、大型貨物車が通らない場合、小型貨物車やエンジンの配置位置が、中央または後方の中型乗用車について検討するのが望ましいと考える。

6.2 衝突速度の検討

4. で示したように衝突速度が増加すると、衝撃力特性初期の立ち上がりや最大衝撃力が増加し、伝達エネルギー量が大きくなる。そのため、できるだけ速い速度（大きな運動エネルギーを有する）に対して検討することが望まれる。しかし、車両の路外逸脱による被害の大きさを考慮のうえ、衝突速度を決定すべきであり、衝突時の車両速度は、走行速度の約 80% の速度にほぼ等しいと報告されており⁴⁾、走行速度の 80% とするのが妥当かと思われる。

6.3 衝突角度による検討

一般に、車両の衝突角度は、直線部で約 15 度、曲線部でも約 16 度以内と言われているが、ハッチンソン（アメリカ）は、分離帯への車両の進入角度（衝突角度）を調査し、衝突角度 0~10 度が 60%，0~20 度では 80% で、40 度以上で衝突する可能性はかなり小さいという結果⁶⁾を得ている。そこで、衝突角度 10, 20, 30, 40 度について多質点系モデルによる衝撃力特性を算定し、図 2.3 のような結果を得た。ただし、衝突車両は表 5 のエンジンの配置位置が前方の中型乗用車とした。

図 2.3 で衝突角度 30, 40 度の場合は、10, 20 度の場合よりも高欄の衝突面に対して、車両の後方の質点の相対的な偏心が大きくなるため、衝突後の車両の方向転換により衝突面に対して作用する衝撃力の垂直分力が増加し、衝撃力特性の後半で第 2 ピークが現れた。それぞれの衝撃力特性を比較すると、同じ衝突速度

(この場合は80km/h)でも、衝突角度によって、衝突面と垂直方向の速度成分が異なるために、衝撃力特性初期の立ち上がりや、衝突角度の大きいものほど急になっている。設計衝撃力という観点からみた場合、衝突角度の減少に伴う衝突後の車両の方向転換や摩擦熱による伝達エネルギー量の減少、衝撃力特性の立ち上がりや衝撃力波形が構造物の破壊挙動に及ぼす影響、前述のように40度以上で衝突する可能性が小さいこと等を考慮すると、衝突角度40度で設計すると構造物に対し最も厳しい条件を与えることになると思われる。

また、高欄等の重要度や、道路周辺の環境による車両の路外逸脱防止の重要度によって、進入角40度以上の場合についても検討すべきであるが、逆に重要度が低い場合は、進入角20度で設計しても良いと思われる。

6.4 被衝撃体材料による検討

図24は、表5のエンジンの配置位置が前方の中型乗用車について、種々の剛性を有するコンクリート版への衝突を想定して解析を行い、衝撃力特性を算定したものである。まず、剛性

(ばね定数) k_t が87tf/cmおよび167tf/cm(それぞれ、普通コンクリート版および高強度コンクリート版の荷重～たわみ曲線の実験結果⁷⁾より算出)の場合には、衝撃体の剛性に比較して被衝撃体の剛性が大きくなりすぎたために、被衝撃体が剛体の役割をしてしまい、衝撃力特性が完全に一致した。これらと対比するために解析した、極端に剛性を減少させた2.0tf/cmおよび0.2tf/cmの衝撃力特性は、それぞれ異なった履歴を描いていることから、被衝撃体の剛性が衝撃体に対してそれほど大きくない場合には、衝撃力特性は種々変化することがわかる。また、被衝撃体の剛性が87tf/cmと0.2tf/cmの衝撃力特性を比較すると、ピークに達する手前まで一致しているのは、衝撃体モデルの各質点

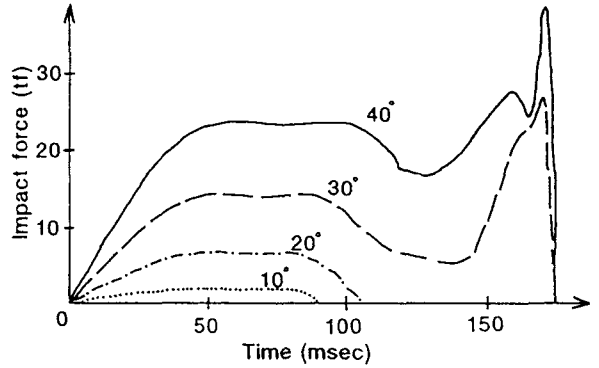


図23 衝突角度による衝撃力特性の比較

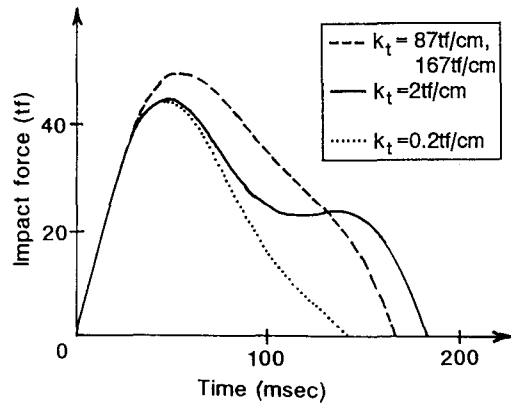
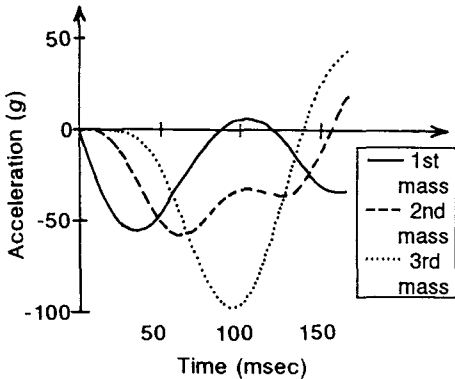
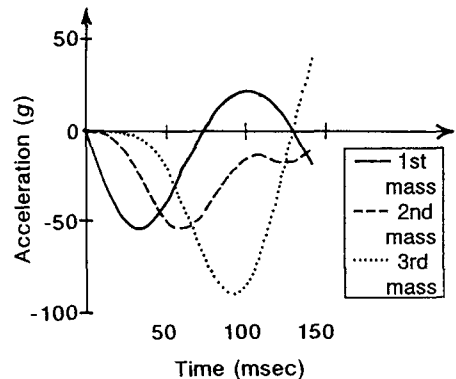


図24 被衝撃体の剛性による衝撃力特性の比較



(a) $k_t = 87\text{tf/cm}$



(b) $k_t = 0.2\text{tf/cm}$

図25 応答加速度の比較

の加速度波形を比較した図 2 5 (a)(b)の前半部分に大きな差がないことによるものであり、図 2 4 の衝撃力特性ピーク以降の差異は応答加速度の後半部分（特に $t=100\text{msec}$ 以降）の違いによるものである。本研究の衝撃力特性解析では、衝撃力特性の把握を目的とし、現段階においては、被衝撃体の破壊進行にともなう剛性低下の問題等を考慮していないためであり、図 2 4 で得られた衝撃力特性を衝撃破壊挙動解析に適用し、その影響を考慮した検討が必要であることを示している。

7. まとめ

本研究は、交通施設の増加および重要構造物の増加に伴い、今後さらに重要視される衝撃現象を解明するため、衝撃体、被衝撃体を多質点ばねでモデル化し、衝撃力シミュレーションの有効性を検証し、衝撃力特性の把握、衝撃力特性から衝撃体モデルの推定、さらに設計衝撃力の検討を行った。以下に、その成果および問題点をまとめる。

- ① 多質点ばねモデルを用いた衝撃力特性解析は、衝撃体の質点が一軸上にある場合は、最大衝撃力に達する近傍までは精度良くシミュレートできていることが明かとなった。しかも、衝撃体モデルの詳細な材料定数（ばね定数、粘性減衰定数）を入力すれば、さらに高精度な衝撃力特性が再現可能である。また、偏心を有する衝撃体の衝撃力特性は、実験での偏心の影響の伝達の問題、解析での回転方向のばね定数の把握の問題があり、さらに検討する必要がある。
- ② 衝撃力特性としては、最大衝撃力、衝撃作用時間、衝撃力立ち上がり時間、衝撃力特性初期の立ち上がりの勾配、衝撃力波形および力積などが挙げられ、衝撃体モデルの要素としては、質点数、各質点の質量、ばね定数、衝突速度等が考えられる。本衝撃力特性解析では、これら衝撃体モデルの要素、衝突条件の変化による衝撃体および被衝撃体の衝撃力特性の特徴をよく再現できる。
- ③ 衝撃体モデルの要素と衝撃力特性の関係を利用して、System Identification (SI法)を適用した、既知の衝撃力特性からの衝撃体モデルの推定が可能であり、推定されたモデルに種々の衝突条件を与えれば、広範囲な設計衝撃力の検討が可能である。
- ④ 自動車衝突を例に設計衝撃力を検討した結果、車両としては、エネルギー、最大衝撃力、力積、衝撃力特性初期の立ち上がり勾配の大きい大型貨物車を対象とするのが適当である。一方、衝突角度は、伝達エネルギー、衝撃力特性初期の立ち上がり、衝突車両の角度別の頻度統計結果等から40度で検討するのが対象構造物に対して最も厳しい条件を与えることになる。
- ⑤ 高欄や中央分離帯の設計衝撃力を検討する際には、コンクリート構造物の衝撃破壊過程の考慮が必要であり、衝撃体モデルを衝撃破壊挙動解析に適用すれば、被衝撃体となる構造物の種々の材料特性や、破壊進行に伴う剛性低下等を考慮した検討が可能である。

参考文献

- 1) J. P. Wolf, K. M. Bucher and P. E. Skrikerud: Response of Equipment to Aircraft Impact, Nuclear Eng. and Design, Vol. 47, pp. 169-193, 1978
- 2) 宮本文穂, M. W. King, 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
- 3) B. M. Douglas and W. H. Reid: Dynamic Tests and SI of Bridge, ASCE Vol. 108, No. ST10, 1988.2
- 4) 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, 昭和 47年11月
- 5) 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
- 6) 日本道路協会: 防護柵設置要綱, p. 9, 昭和47年10月
- 7) 藤井学, 宮本文穂, 鮎子多浩一, 中辻純一郎: 鉄筋コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集 第9巻第2号, pp. 609-614, 1987

(1991年9月30日受付)