

(6) 同一力積衝撃応答スペクトルの提案

Proposal for Response Spectrum based on Identical Impulses

武田慈史*, 河西良幸**
Shigefumi Takeda, Yoshiyuki Kasai

*前橋工科大学大学院, 工学研究科大学院生 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地の 1)

**工博, 前橋工科大学大学院, 工学研究科教授 (同上)

Key Words: Momentum, Impact impulse, Impact response spectrum, Impact response displacement

キーワード: 運動量, 衝撃力積, 衝撃応答スペクトル, 衝撃応答変位

1. 研究の背景と目的

近年, 土木学会や建築学会では飛来物による重要構造物への衝突, 衝撃問題やガス, 火薬等の爆発時の挙動の解明と耐衝突, 耐爆の性能評価や設計のためのガイドラインの構築^{1),2)}が求められるようになった。

先の研究において, 過去に実施された衝突実験結果の衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv (m : 飛来物の質量, v : 衝突速度) の関係を系統的に分析してみたところ, 衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv がかなり近い値であること(即ち, $I \approx (0.8 \sim 1.4)mv$) が把握され, 算定しやすい飛来物の運動量 mv を基に衝撃力積 I を評価し得ることが示唆された。

そこで本論文では耐衝撃設計法構築の観点から, 衝撃力積を基に衝撃応答をできるだけ精度良くしかも簡便に算定する方法を提案することを目的として, 衝撃応答変位を求める方法として衝撃力積をベースにした同一力積衝撃応答スペクトルを案出して図化し, それを用いて衝撃応答変位を算定する方法を提案するものである。

2. 同一力積衝撃応答スペクトルの提案

2.1 同一力積衝撃応答スペクトルの作成方法

図-1 に同一力積衝撃応答スペクトル作成の説明図を示す。まず, 被衝突体(構造物)を選択し, 最大耐力 R_m , 弾性限界変位 δ_{el} , 弾性固有周期 T を設定する。ばね特性は最大耐力後, 最大耐力を維持したまま変形するバイリニア型とする。次に被衝突体に作用させる衝撃力積 I を一定とし, 荷重継続時間 τ を次々と変えて衝撃荷重を被衝突体に作用させ, そのときの最大応答変位 δ_m を計算する。衝撃力積 I を一定としたので荷重継続時間 τ が長くなれば, 最大衝撃荷重 F_p は小さくなる。次に衝撃力積 I の値を変え, 同様に荷重継続時間 τ を次々と変えて

衝撃荷重を被衝突体に作用させ, そのときの最大応答変位 δ_m を計算する。スペクトル作成における計算は弾塑性応答解析プログラム SNAP³⁾ を使用し, 計算刻みを十分細かく選んで時々刻々の計算を行った。減衰を考慮する場合は弾塑性ばねなので各種の方法があるが, ここでは初期剛性比例型減衰を選択した。このようなステップを繰り返し行って図を作成するが, 衝撃力積 I を最大耐力 R_m と弾性固有周期 T の積 $R_m T$ で除することにより基準化し, この力積パラメータと称する $I/(R_m T)$ により整理する。衝撃力積 I と荷重継続時間 τ は飛来物に関わるパラメータ, 最大耐力 R_m と弾性固有周期 T は被衝突体に関わるパラメータである。ここで, 衝撃力積 I は最大衝撃荷重 F_p , 荷重継続時間 τ と荷重形状係数 α により $I = \alpha F_p \tau$ と表すことができ, 図-2 に示すように荷重波形が正弦半波の場合 $\alpha = 2/\pi$, 三角波の場合 $\alpha = 1/2$, 矩形波の場合 $\alpha = 1$ となる。

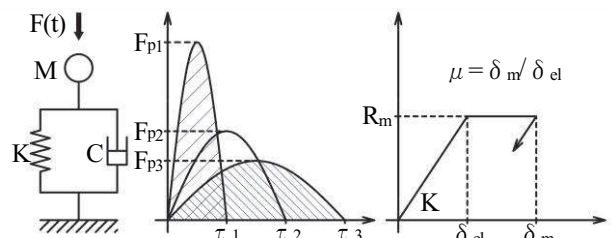


図-1 同一力積衝撃応答スペクトル作成の説明図

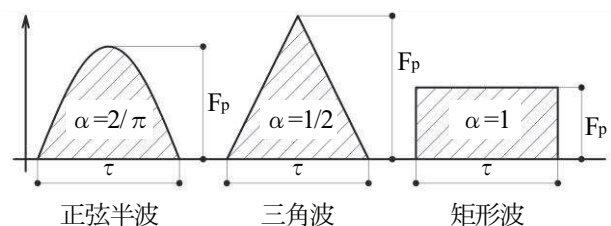


図-2 荷重波形と荷重形状係数 α

また、力積パラメータ $I/(R_m T)$ は

$$\frac{I}{(R_m T)} = \alpha \frac{F_p}{R_m} \frac{\tau}{T}$$

と分解して表すことができ、最大衝撃荷重 F_p と最大耐力 R_m の比 F_p/R_m 、荷重継続時間 τ と弾性固有周期 T の比 τ/T と荷重形状係数 α の積で成り立っていることが分かる。

2.2 同一力積衝撃応答スペクトルの性質

同一力積衝撃応答スペクトル(後述図-9 参照)の縦軸は被衝突体の塑性率 μ ($\mu = \delta_m / \delta_{el}$, δ_m : 最大応答変位, δ_{el} : 弾性限界変位), 横軸は荷重継続時間 τ と弾性固有周期 T の比 τ/T として、力積パラメータ $I/(R_m T)$ により整理しているが、算定例を用いて説明する。

算定例(表-1, 図-3 参照)では力積パラメータ $I/(R_m T) = 1$ となる3ケースを考え、ケース①は I と $R_m T$ が共に大きい場合、ケース②は I と $R_m T$ が共に中程度の場合、ケース③は I と $R_m T$ が共に小さい場合である。

荷重波形を正弦半波とし非減衰の場合の結果を図-4に示す。図-4(a)は縦軸が最大応答変位 δ_m (mm) の線形軸、横軸は荷重継続時間 τ (s) の対数軸である。どのケースも荷重継続時間 τ が短い範囲では最大応答変位 δ_m がある一定値に収束していることが分かる。これは武藤博士が名付けた力積破壊の世界^{4,5)}で、衝撃による破壊は最大衝撃荷重(ピーク値) F_p によって決まるのではなく、衝撃力積 I によって決まるといえるものである。例えて言えば、ゴルフボールをゴルフクラブで強打した際の最大衝撃荷重は30kNにも達すると言われるが、静的にその30kNの力をゴルフクラブに作用させれば容易に折れるが、衝撃的に作用させれば変形も少なく、折れることもないが、折れるとすれば衝撃力積 I が大きいことによって生じるという現象である。荷重継続時間 τ が長くなるにつれ最

大応答変位 δ_m は単調に減少しており、荷重継続時間と被衝突体の卓越周期との共振^{6,7)}による増幅現象はわずかに生じるのみである。更に荷重継続時間 τ が長くなると、最大応答変位 δ_m は極めて小さな値となり、その後0へと収束していくことが分かる。

図-4(b)は縦軸を塑性率 μ の線形軸、横軸を図-4(a)と同じ荷重継続時間 τ (s) の対数軸で示した図である。荷重継続時間 τ が短い範囲では3ケースとも塑性率 $\mu = 20$ 付近の一定値に収束しており、更に図-4(c)で横軸を荷重継続時間 τ と弾性固有周期 T の比 τ/T で基準化すると3ケースは1本の曲線に収束している。つまり、図-4(c)のように塑性率 μ を縦軸、 τ/T を横軸とし、力積パラメータ $I/(R_m T)$ によって整理することで、衝撃力積 I 、被衝突体の最大耐力 R_m 、弾性固有周期 T が種々に異なっても力積パラメータ $I/(R_m T)$ が同一の値であればスペクトルは同じ1本の曲線で表され、種々の衝突条件や衝撃、動的、準静的までの広い領域にわたって一元的に整理するのに有効である。減衰を考慮した場合も同様に3ケースが1本の曲線(図-5(c))で表される。

また、ケース②に関して弾性応答と弾塑性応答の比較を図-6に、減衰の有無の比較を図-7に示す。図-6から分かるように、弾性ばねを用いた場合に比べて弾塑性ばねを用いた場合の最大応答変位 δ_m は当然のことながら大きくなっていること、荷重継続時間 $\tau > 0.1s$ の領域では、弾塑性ばねに比べて弾性ばねの場合の最大応答変位 δ_m の減少割合が小さいことが分かる。耐衝撃設計ではある程度の塑性変形を許容すると考えられるので、弾塑性ばねを用いた衝撃応答スペクトルの必要性が高いことが分かる。図-7の被衝突体の減衰の影響については、塑性率 μ が一定となる $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域では減衰定数 $h=0.03$ を考慮することにより非減衰の場合に比べて2割程度の塑性率 μ の低下となっている。更に τ/T が大きい領域では減衰による塑性率 μ の差は小さくなっている。RC構造物を想定すると減衰定数 $h=0.03$ 程度を考慮することが妥当なので、衝撃応答スペクトルの作成に当たっては減衰定数 $h=0.03$ を考慮することとする。

次に衝撃荷重波形の相違による応答の違いを示す。衝撃荷重波形を正弦半波、三角波、矩形波とし、非減衰で力積パラメータ $I/(R_m T) = 1$ の場合の結果を図-8に示す。 $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域では、衝撃荷重波形に関係なく塑性率 μ はある一定値に収束していることが分かる。 $\tau/T > 0.1(1/10)$ になると応答値に違いが生じ、三角波 > 正弦半波 > 矩形波の順に塑性率 μ が小さくなっている。三角波と正弦半波では近い値を示しているが、三角波が正弦半波より最大1.5倍程度大きな値をとり、三角波と矩形波の比較では三角波が矩形波より最大3.2倍程度大きな値をとる。

以上より同一力積衝撃応答スペクトルの衝撃荷重波形として正弦半波、三角波、矩形波の3種類の場合を用意する。衝突実験結果によっては、そのいずれにも分類し

表-1 算定例3ケースの各パラメータ

ケース	δ_{el} (mm)	R_m (kN)	T (s)	$R_m T$ (kN·s)	I (kN·s)	$I/(R_m T)$
①	0.5	4	0.5	2	2	1
②	1	1	1	1	1	1
③	2	0.25	2	0.5	0.5	1

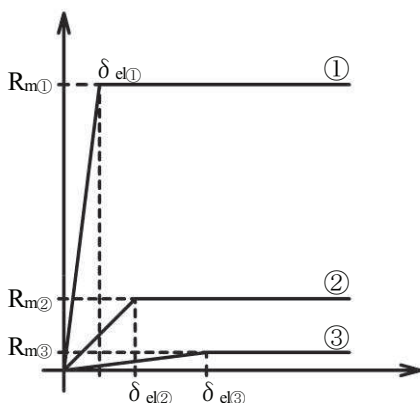


図-3 算定例3ケースの各ばね特性

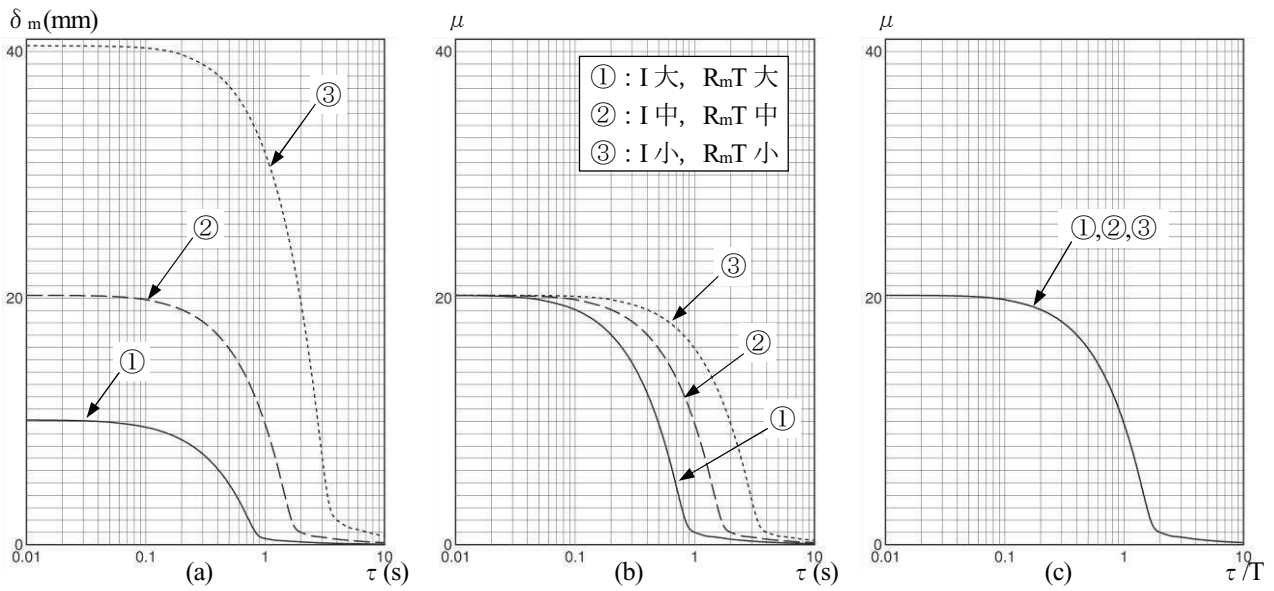


図 - 4 $I/(R_m T)=1$, 正弦半波, 非減衰の作成例

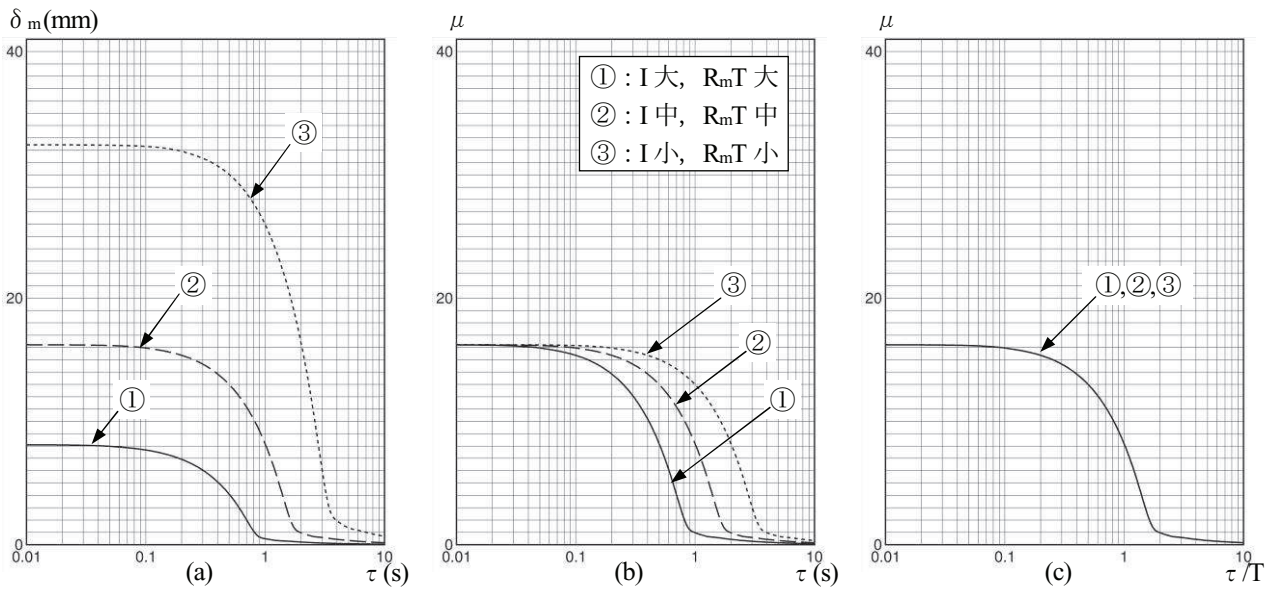


図 - 5 $I/(R_m T)=1$, 正弦半波, 減衰($h=0.03$)の作成例

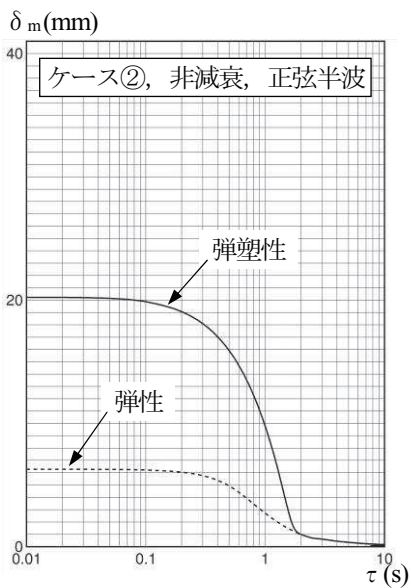


図 - 6 弾性と弾塑性の比較

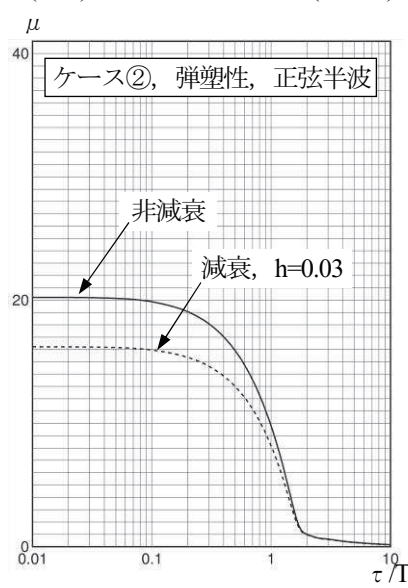


図 - 7 減衰有無の比較

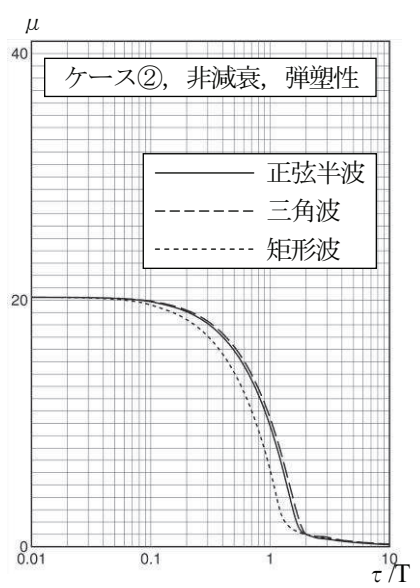


図 - 8 荷重波形の比較

にくい衝撃荷重波形の場合もあり得るが、 $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域では、衝撃荷重の形状には関係なく衝撃応答変位が算定され、 $\tau/T > 0.1(1/10)$ の領域では正弦半波に比べて三角波の場合の衝撃応答変位が大きいことを考慮して三角波を選択すれば大き目の衝撃応答変位が算定される。

次に力積パラメータ $I/(R_m T)$ の値を変化させた場合の同一力積衝撃応答スペクトルを図-9に示す。いずれも減衰定数 $h=0.03$ を考慮している。図-9(a)が正弦半波、図-9(b)が三角波、図-9(c)が矩形波のスペクトルである。どの荷重波形の場合も力積パラメータ $I/(R_m T)$ が大きくなれば、塑性率 μ は増大していく。 $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域では、塑性率 μ はある一定値に収束していることが分かる。 τ/T が増加していくと、塑性率 μ は単調に減少していき、力積パラメータ $I/(R_m T)$ の値が大きいくほど減少の度合いが顕著である。 $\tau/T > 10$ の領域では、塑性率 μ は極めて小さな値となり、その後0に収束していく。

なお、図-9(a)には3章で示す適用例の結果がプロットされている。

塑性率 μ は弾性限界変位 δ_d に対する最大応答変位 δ_m の比 $\mu = \delta_m / \delta_d$ であるが、同一力積衝撃応答スペクトルを用いた算定において残留変位 δ_r を知りたい場合には、例えば文献⁹⁾を参考にすれば残留変位 δ_r と最大応答変位 δ_m は概ね $\delta_r / \delta_m = 0.6 \sim 0.7$ 程度となっており最大応答変位 δ_m から残留変位 δ_r を評価することも不可能ではないが、より詳細な検証が必要であり、今後の課題として挙げられる。

また、同一力積衝撃応答スペクトルは最大耐力に達した後、最大耐力を維持したまま変形するバイリニア型のばね特性を想定しており、曲げ破壊のような靱性のある損傷に対しては適合するが、せん断破壊、貫通、パンチング破壊等の脆性的な損傷に対しての適用性については今後の課題として挙げられる。このため、同一力積衝撃応答スペクトルの使用の際には、曲げ破壊がせん断破壊、

貫通、パンチング破壊より先行することを前提とし、例えば、剛飛来物に対する貫通や裏面剥離については文献⁹⁾に、柔飛来物に対するパンチング破壊については文献^{10), 11)}に述べられているので、これらを参考にチェックすることが望まれる。もしせん断破壊、貫通、パンチング破壊が先行するような場合にはそれらの評価が優先すると考える。

3. 適用例

同一力積衝撃応答スペクトルを用いた適用例として衝突条件の異なる3ケースを示す。表-2に適用例の各パラメータと結果を示し、また、実験結果と詳細計算結果を δ'_m として示す。以下、各適用例について説明する。

適用例 i. 剛飛来物の直接衝突の場合

RC梁への重錘落下衝突とし、飛来物や被衝突体等の条件は文献¹²⁾に記載されている実規模RC梁の重錘落下衝突実験に基づいて設定する。飛来物は重錘で、質量 $m=2t$ 、高さ $h=5m$ 、10mから自由落下衝突させ、衝突速度は各々 $v_5=9.9m/s$ 、 $v_{10}=14.0m/s$ である。被衝突体はRC梁で、長さ9m(支点間距離8m)、梁幅1m、梁せい0.85mである。衝撃力積 I は実験結果を基に設定し、 τ/T は剛飛来物の直接衝突の場合、荷重継続時間 τ は数ms程度(実験結果の荷重継続時間は3~4ms程度)で、被衝突体の弾性固有周期 T より十分に短い。つまり力積破壊の世界にあるので $\tau/T < 0.1(1/10)$ の範囲で決定すれば τ/T によらず最大応答変位 δ_m はある一定値をとるため、本論文では $\tau/T=0.01(1/100)$ とした。スペクトル図は荷重波形を正弦半波、減衰定数 $h=0.03$ を考慮したスペクトル(図-9(a))を用いる。図-9(a)に落下高さ5mの結果 i 5mを●で、落下高さ10mの結果 i 10mを○でプロットする。

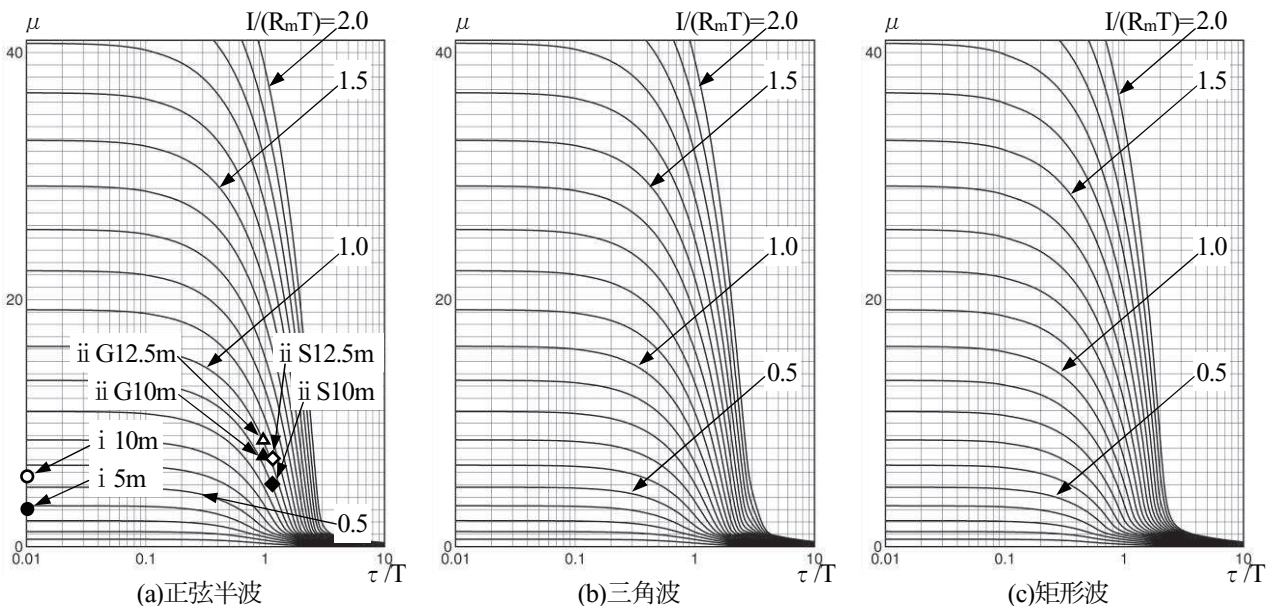


図-9 同一力積衝撃応答スペクトル($h=0.03$)

表 - 2 適用例の各パラメータと結果

適用例		条件	I (kN・s)	R _m (kN)	T (s)	I/R _m T	τ/T	μ	δ _m (mm)	δ' _m (mm)
i	i 5m	h=5m	22.2	551	0.11	0.37	0.01	3.0	47.6	45.5
	i 10m	h=10m	33.4	551	0.11	0.55	0.01	5.7	90.5	87.9
ii	ii G10m	碎石 h=10m	73.5	1,071	0.072	0.95	0.97	7.4	73.9	64.00
	ii G12.5m	碎石 h=12.5m	79.8	1,071	0.072	1.03	0.97	8.6	85.9	85.95
	ii S10m	敷砂 h=10m	67.8	1,071	0.072	0.88	1.11	5.0	50.0	40.20
	ii S12.5m	敷砂 h=12.5m	79.8	1,071	0.072	1.03	1.11	7.1	70.9	68.45
iii		v=50m/s	950	30,000	2.96	0.011	0.12	0.06	35.3	28
		v=100m/s	1,900	30,000	2.96	0.021	0.06	0.125	73.5	64
		v=150m/s	2,850	30,000	2.96	0.032	0.04	0.19	111.7	110

適用例 ii. 緩衝機構を介した間接衝突の場合

緩衝機構を設置した RC スラブへの重錘落下衝突とし、飛来物や被衝突体等の条件は文献¹³⁾に示された碎石あるいは敷砂を設置した大型 RC スラブの重錘落下衝突実験に基づいて設定する。飛来物は重錘で、質量 $m=5t$ 、高さ $h=10m$ 、 $12.5m$ から自由落下衝突させる。被衝突体は、長辺 $5m$ 、短辺 $4m$ 、版厚 $0.4m$ の RC スラブで、支持条件は二辺支持で支点間距離 $4m$ の一方向スラブである。被衝突体は碎石設置の場合と敷砂設置の場合で同じとし、衝撃力積 I は実験結果を基に設定する。荷重継続時間 τ は碎石設置の場合を $\tau=70ms$ 、敷砂設置の場合を $\tau=80ms$ とし、 τ/T は各々 0.97 、 1.11 となる。スペクトル図は荷重波形を正弦半波、減衰定数 $h=0.03$ を考慮したスペクトル(図 - 9(a))を用い、碎石設置の場合の落下高さ $10m$ の結果 ii G10m を▲で、落下高さ $12.5m$ の結果 ii G12.5m を△でプロットし、敷砂設置の場合の落下高さ $10m$ の結果 ii S10m を◆で、落下高さ $12.5m$ の結果 ii S12.5m を◇でプロットする。

適用例 iii. 柔飛来物の衝突の場合

構造物への航空機衝突とし、飛来物や被衝突体等の条件は文献¹⁴⁾、¹⁵⁾にて行われた高層建物への航空機衝突解析に基づいて決定する。飛来物は F-4 ファントム戦闘機で、全長 $L=17.7m$ 、質量 $m=19t$ で、衝突速度 $v_{50}=50m/s$ 、 $v_{100}=100m/s$ 、 $v_{150}=150m/s$ で衝突する場合を考える。被衝突体は地上 20 階の RC 建物で、高さ $81.6m$ 、総重量は $218MN$ (総質量 $22,245t$)である。1 次モードが支配的な応答と予想される 19 階衝突を対象とし、衝撃荷重の作用をきっかけに 1 次モードで全体応答するものとする。柔飛来物衝突による衝撃力積 I は、飛来物の運動量 mv と等しい($I=mv$)として設定し、荷重継続時間 τ は航空機の長さを衝突速度で除した時間にほぼ等しい($\tau=L/v$)として各々設定する。航空機のような柔飛来物衝突の場合¹⁴⁾、¹⁵⁾、

荷重波形は三角形分布に近似することができるため、スペクトル図は荷重波形を三角波、減衰定数 $h=0.03$ を考慮したスペクトル(図 - 9(b))を用いる。適用例 iii は力積パラメータ $I/(R_m T)$ の値が小さいため、プロットは省略する。なお、スペクトル図から結果を求める際は、十分に拡大した図を用いて塑性率 μ を求めている。

以上の適用例から、同一力積衝撃応答スペクトルによって算定した結果は既往の衝突実験や詳細計算結果と良く一致していることが分かる。同一力積衝撃応答スペクトルによって構造物への各種の飛来物衝突の衝撃応答変位を一元的かつ簡便に評価することができ、耐衝撃設計において役立つものと考えられる。

4. まとめ

先の研究において飛来物の運動量 mv と衝撃力積 I の関連に着目して既往の衝突実験結果を分析してみたところ、運動量の変化が力積に等しいとする動力学の基本法則の成立が確認されたので、本論文では、同一力積衝撃応答スペクトルを案出して図化し、それを用いて衝撃応答変位を算定する方法を提案した。その成果の要点は次の通りである。

- 1) 衝撃応答変位を求める方法として衝撃荷重のピーク値に代えて衝撃力積をベースにした同一力積衝撃応答スペクトルを案出した。このスペクトルの縦軸は被衝突体(構造物)の塑性率 μ 、横軸は衝撃荷重の継続時間 τ と被衝突体の弾性固有周期 T の比 τ/T とし、衝撃力積 I は、被衝突体の最大耐力 R_m と弾性固有周期 T の積 $R_m T$ で除した力積パラメータ $I/(R_m T)$ として基準化した。その結果、衝撃力積 I 、被衝突体の最大耐力 R_m 、弾性固有周期 T が種々に異なっても力積パラメータ $I/(R_m T)$ が同一の値であればスペクトルは同じ 1 本の曲線となり、種々の衝突条件を一元的に

整理することが可能となった。

- 2) 提案した同一力積衝撃応答スペクトルの性質として、衝撃荷重の継続時間 τ と被衝突体の弾性固有周期 T の比 τ/T が $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域(いわゆる力積破壊の世界)では、塑性率 μ は一定値を取り、 $\tau/T > 0.1(1/10)$ の領域では τ/T の値が増加していくと、塑性率 μ は単調に減少していく。例えば、敷砂や碎石を設置した場合や柔飛来物の衝突の場合には、衝撃荷重の継続時間 τ が長くなるので、塑性率 μ は $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域に比べてかなり小さな値となる。更に $\tau/T > 10$ の領域では、塑性率 μ は極めて小さな値となり、その後 0 に収束していく。
- 3) 提案した同一力積衝撃応答スペクトルとしては、被衝突体の減衰定数 3%、ばね特性はバイリニア型とし、衝撃荷重波形として正弦半波、三角波、矩形波の 3 種類の場合を用意した。衝突実験結果によっては、そのいずれにも分類しにくい衝撃荷重波形の場合もあり得るが、 $\tau/T < 0.1(1/10)$ の領域では衝撃荷重波形の形状には関係なく衝撃応答変位が算定され、 $\tau/T > 0.1(1/10)$ の領域では衝撃荷重波形の影響を受け、正弦半波に比べて三角波の場合の衝撃応答変位が大きいこととなる。衝撃荷重波形の時刻歴の形状を設定しにくい場合には、三角波の場合を選択すれば大き目の衝撃応答変位を算定できる。また、敷砂や碎石のような緩衝機構が設置される場合、FEM や DEM の解析では緩衝機構の物性を設定しにくいのが、本法では、既往の重錘落下衝突実験の結果を参考にして衝撃荷重の継続時間 τ を幅を持った値として設定すれば、各荷重継続時間 τ に対応した衝撃応答変位を算定できるので、耐衝撃設計のための評価を行いやすい。
- 4) 適用例に示したように、同一力積衝撃応答スペクトルによって算定した結果は既往の衝突実験や詳細計算結果と良く一致することが分かった。

以上の成果を総括的にまとめると、同一力積衝撃応答スペクトルによって構造物への各種の飛来物衝突の衝撃応答変位を一元的かつ簡便に評価することができ、耐衝撃設計において役立つものと考えられる。

なお、この同一力積衝撃応答スペクトルは、曲げ破壊を対象としているが、せん断破壊、貫通、パンチング破壊が先行するような場合にはそれらの評価が優先すると考える。また、曲げの損傷度判定のクライテリアの一つとして塑性率 μ が考えられるが、実験による検証も必要であり今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 濱本卓司, 「耐衝撃設計ガイドラインづくりに向けて」, 2009 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料「衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える」, pp.1-10, 2009 年 8 月.
- 2) 園田佳巨, 「衝撃荷重に対する土木学会の取り組み」, 2009 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料「衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える」, pp.55-61, 2009 年 8 月.
- 3) SNAP(任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム), 株式会社構造システム.
- 4) 武藤清, 「力積破壊の世界 - 爆圧による構造物の破壊に関する考察 - 」, 建築學會論文集, 第 21 号, pp.246-251, 1941 年 4 月.
- 5) 武藤清, 「構造物の動的解析 - 耐震設計シリーズ 4 - 」, 丸善株式会社, 1966 年.
- 6) 河西良幸, 「衝撃荷重を想定した実験」, コンクリート工学, 第 39 巻, 9 号, pp.74-77, 2001 年 9 月.
- 7) 土木学会構造工学委員会衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会, 「衝撃実験・解析の基礎と応用」, 第 4 章 耐衝撃設計に関する検討事例 4.1 1 質点系問題における衝撃応答の簡易評価法(河西良幸執筆担当), pp. 349-363, 2004 年 3 月.
- 8) 岩波光保, 白根勇二, 横田弘, 「繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊性状」, 港湾空港技術研究所資料, No.1152, pp.1-57, 港湾空港技術研究所, 2007 年 6 月.
- 9) 三輪幸治, 「剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート版の裏面剥離の発生メカニズムと耐衝撃補強に関する研究」, 防衛大学校博士論文, 2010 年 3 月.
- 10) P. Barr, "Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures subjected to Impact", 1990 Edition, May 1990.
- 11) 桂正治, 河西良幸, 坪田張二, 「RC への柔飛来物の衝突による貫通、裏面剥離に関する 3 つの既往実験への UKAEA ガイドの評価法の適用性検討」, 第 9 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.187-192, 2008 年 12 月.
- 12) 土木学会構造工学委員会構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会, 「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」, 構造工学シリーズ, No.52, 2007 年 10 月.
- 13) 山口悟, 今野久志, 西弘明, 岸徳光, 栗橋祐介, 「敷砂あるいは碎石を設置した大型 RC スラブに関する衝撃載荷実験」, 平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 66 号, A-17, 4 ページ, 2010 年 2 月.
- 14) 河西良幸, 王国璽, 桑原高久, 「鉄筋コンクリート高層建物への衝撃荷重に対する応答特性 - 航空機衝突による応答と地震応答との比較 - 」, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, pp.221-216, 2005 年 12 月.
- 15) 桑原高久, 河西良幸, 王国璽, 「鉄筋コンクリート高層建物への衝撃荷重に対する応答特性 - その 2 中規模の航空機衝突による応答特性 - 」, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp.143-148, 2006 年 12 月.