

I-69

RC 梁の一次元弾性衝撃応答解析

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 柴田俊文
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 村井伸康
 (樹地崎工業土木部技術課 正会員 須藤敦史

1. はじめに

衝撃荷重の作用する土木構造物の力学的挙動特性の把握は設計上重要であり、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の大型化、複雑化等による基礎的研究の必要性から、多くの報告がある。衝撃問題の解析的研究においては、有限要素法や個別要素法に基づく研究があり、実験結果との比較によりその数値適用性を検討している。しかし衝撃現象は、構造物に生じる応力波の伝播、反射、重複や、局所変形の発生等の複雑な挙動を伴うため、その解析モデルの構築は容易ではなく、簡易なモデルの解析結果による基本的応答特性の把握が、広い衝撃現象に適用可能な汎用性のあるモデル作成には重要であると思われる。そこで本研究ではRC梁に対する重錘落下の衝撃問題を考え、RC梁と重錘をそれぞれ一次元の有限要素法で離散化して弾性解析を行った。また応答変位、支点反力、衝撃力波形等に注目して実験値との比較を行い、適用性の検討を試みた。

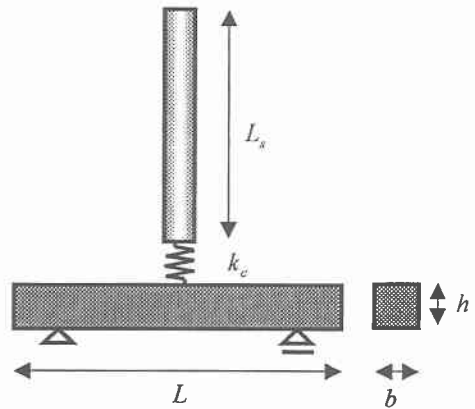


図-1 解析モデル

2. 解析概要

図-1 に解析モデルを示す。単純支持された梁中央に、重錘が初期速度 v_0 で衝突する場合を考える。梁は弾性の範囲で適用可能であるとし、本研究では Timoshenko 梁理論を採用する。また梁の断面に関しては、コンクリートの引張部分を無視し、上下鉄筋を考慮して、断面二次モーメント I 及び面積 A を換算する。ここで、梁の高さを h 、幅を b 、梁の長さを L 、弾性係数を E 、ポアソン比を ν 、及び密度を ρ とする。また重錘と梁の間に接触要素 k_c を考慮し、重錘先端部の変位を u_1 、梁中央部の変位を u_2 とすると、衝撃力 f は次式で評価することができる。

$$f = k_c (u_1 - u_2) \quad (1)$$

梁及び重錘の離散化に有限要素法を採用すると、運動方程式は次のマトリックス方程式で表すことができる。

$$[M] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{du}{dt} \right\} + [K] \{u\} = \{f_0\} \quad (2)$$

One-Dimensional Elastic Impact Analysis on RC Beams

Toshifumi SHIBATA, Takashi MIKAMI, Yasunobu MURAI and Atsushi SUTOH

表-1 解析諸元

	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν	h (m)	b (m)
Type-A	19.3	2.446×10^2	0.19	0.16	0.16
Type-B	19.1	2.446×10^2	0.19	0.16	0.16
	L (m)	主鉄筋の径	I (m ⁴)	A (m ²)	v_0 (m/sec)
Type-A	2.5 [2.0]	D19	3.6×10^{-5}	0.22×10^{-1}	2.0
Type-B	2.5 [2.0]	D10	1.8×10^{-5}	0.65×10^{-2}	1.0

ここで $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{u\}$ は変位ベクトルであり、 $\{f_0\}$ は荷重ベクトルである。また、梁には一次元のはり要素、重錘には一次元の棒（トラス）要素を使用した。ここで、重錘の断面積は一定であるとし、重力の影響を式(2)の右辺 $\{f_0\}$ に考慮した。なお、初期条件として重錘各節点に初期速度を付加した。減衰は梁のみに作用するものとし、剛性マトリックスを用いて以下の式より算出する。

$$[C] = \frac{2\zeta}{\omega} [K] \tag{3}$$

ここで ζ は減衰定数、 ω はモデル全体の一次固有角振動数である。

3. 数値解析例

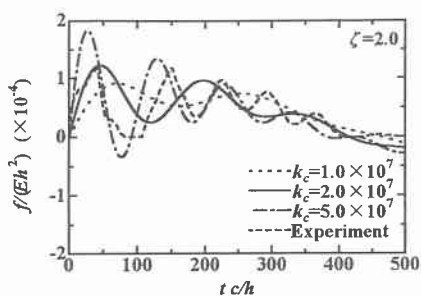
ここで数値解析結果を示すが、梁の分割数は $N=50, 100$ 、重錘の分割数は $N=10, 20$ としてその結果が変わらなかったため、本研究では以下のすべての解析でそれぞれ $N=50, N=10$ を使用した。また時間刻みは解析対象である梁の基本周期の $1/1000$ 以下となるように設定した。横軸に無次元化時間 $t c/h$ 、縦軸に衝撃力 f/Eh^2 、反力 R/Eh^2 及び変位 u/h をそれぞれ無次元化して(a)、(b)及び(c)に示す。

表-1に解析に用いた諸元を示す。ここで L の太括弧内の数字は純スパン長を表す。なお重錘はいずれの場合も、長さ $L_s=1.614$ (m)、重量 1.96 (kN)、弾性係数 206 (GPa)のものを使用した。

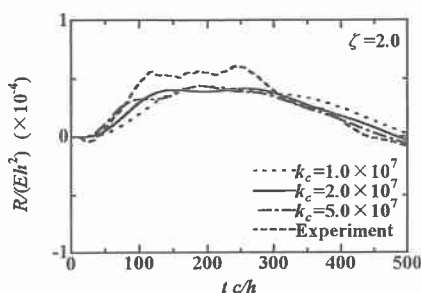
図-2は接触要素の影響を検討するため、Type-Aの梁を用いてばね定数を $k_e=1.0 \times 10^7, 2.0 \times 10^7, 5.0 \times 10^7$ (N/m)と変化させ、減衰定数を $\zeta=0.2$ として解析を行った結果である。これによると、反力及び変位波形ではばね定数に関係なくほぼ同じ値を示している。しかし衝撃力波形においては、ばね定数を大きくすると高次の振動が発生し、かつ最大衝撃力は大きくなっており、 $k_e=2.0 \times 10^7$ (N/m)で良好な結果が得られていることが確認できる。

図-3は減衰の影響を検討するため、Type-Aの梁を用いて減衰定数を $\zeta=0.1, 0.2$ 及び 0.5 の三種類に変化させた結果である。ここで、接触要素は先の解析で結果が良好であった $k_e=2.0 \times 10^7$ (N/m)を使用した。反力、変位波形では減衰定数による大きな差は見られないが、衝撃力に関しては、減衰を大きくするに従い、振幅が小さくなっているのがわかる。この結果からは、 $\zeta=0.1$ から 0.2 で良好な結果が得られているのがわかる。

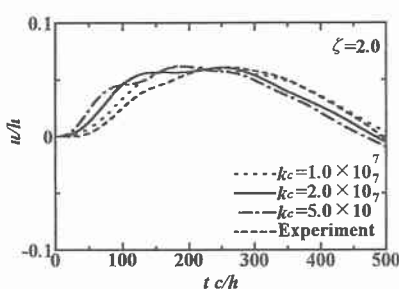
以上の結果からもわかるように、衝撃力は接触要素や減衰、特に前者によって大きく変化しており、適切な値を導出する理論的な裏付けにも欠けている。接触要素を取り上げて考えると、その値は衝突する二つの物体に依存すると推察でき、異なる梁や重錘、あるいは異なった衝突速度に対して、先に示した値の適用性の可否を検討することは、理論的背景の考察には不可欠である。



(a) 衝撃力波形

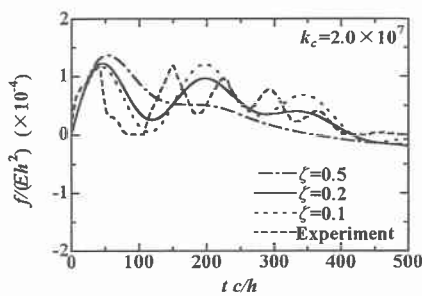


(b) 反力波形

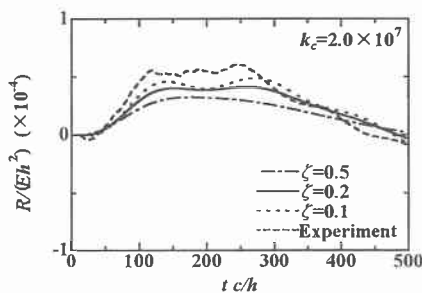


(c) 変位波形

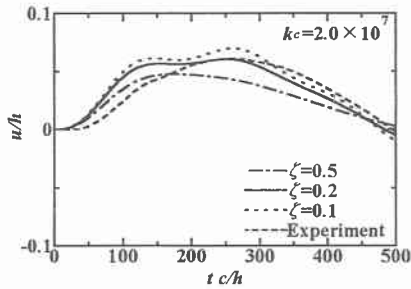
図-2 接触要素を変化させたときの
各応答波形 (Type-A)



(a) 衝撃力波形



(b) 反力波形

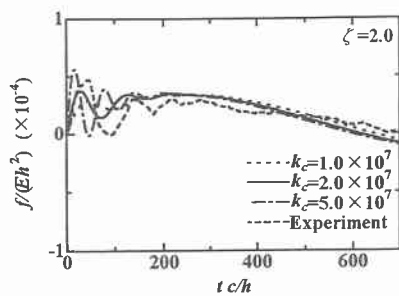


(c) 変位波形

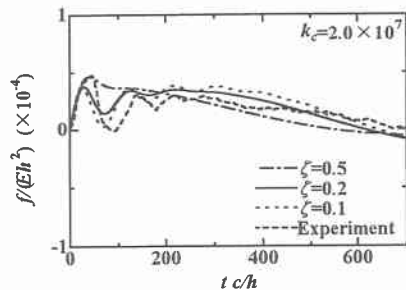
図-3 減衰定数を変化させたときの
各応答波形 (Type-A)

以上の理由をふまえ、図-4 に主鉄筋と重錘の衝突速度が異なる Type-B の梁に対する結果を示す。ここで、接触要素は図-2 の解析で使用した三種類の値について解析を行った。衝撃力や反力のピーク値でやや実験値と異なる値が出てきているものの、本解析モデルは良好な適用性を示しているといえる。

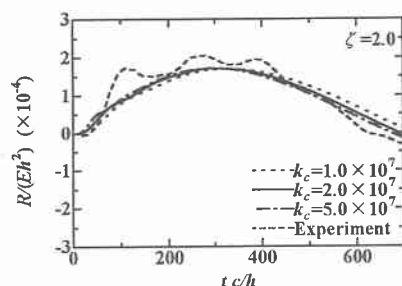
図-5 は、減衰定数を図-3 に使用した三種類の減衰定数について解析した結果であり、接触要素は $k_c = 2.0 \times 10^7$ (N/m) を用いている。解析に用いた減衰定数の範囲では、先程と同様に、 $\zeta = 0.1$ から 0.2 で良好な結果が得られているのがわかる。以上の結果より、解析を行った範囲内では、接触要素及び減衰定数の値は初期衝突速度、断面の所量の影響を受けにくく、また一次元の要素を用いても十分適用が可能であることが考えられる。



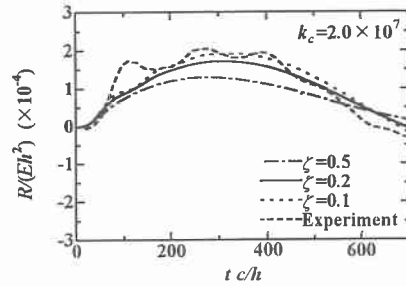
(a) 衝撃力波形



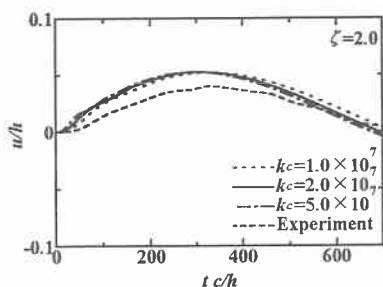
(a) 衝撃力波形



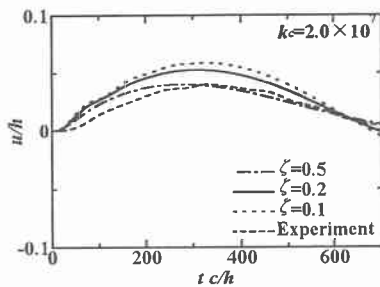
(b) 反力波形



(b) 反力波形



(c) 変位波形



(c) 変位波形

図-4 接触要素を変化させたときの
各応答波形 (Type-B)

図-5 減衰定数を変化させたときの
各応答波形 (Type-B)

4. まとめ

- (1) 弾性の範囲内での一次元のはり要素、棒要素を用いたモデルの適用性が示された。
- (2) 接触要素の値は初期速度、断面の所量の影響を受けにくいことが推察できるが、理論的な導出方法は今後の課題である。

最後に本研究を行うにあたり、室蘭工業大学の岸徳光教授、安藤智啓氏に多大なるご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。