

衝撃力が作用する RC 梁の一次元弾性応答特性

ONE-DIMENSIONAL ELASTIC IMPACT RESPONSE ON RC BEAMS

柴田俊文*, 三上 隆**, 須藤敦史***, 村井伸康****

Toshifumi SHIBATA, Takashi MIKAMI, Atsushi SUTOH and Nobuyasu MURAI

*修士(工学) 北海道大学大学院 博士後期課程 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

**工博 北海道大学大学院教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

***博士(工学) (株)地崎工業土木部技術課 (〒105-8488 東京都港区西新橋2-23-1)

****北海道大学大学院 修士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

キーワード: RC 梁、一次元解析、弾性解析、衝撃力

(RC beam, one-dimensional analysis, elastic analysis, impact force)

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非常に重要であり、複雑化、大型化が顕著である鉄筋コンクリート (RC) 構造物による基礎的研究の必要性から、多くの報告がなされている。衝撃問題の解析的研究においては、有限要素法等に基づく研究があり、実験結果との比較によりその数値妥当性の検討を行っている^{1),2)}。しかし衝撃現象は、構造物に発生する応力波の伝播、反射、重複、透過や、局所変形の発生等の複雑な挙動を伴うため、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、多様な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、両物体間に接触ばねを考慮して弾性解析を行う。また衝撃力波形、応答変位、支点反力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る。

2. 解析モデル及び基礎方程式

図-1 に解析モデルを示す。単純支持された RC 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、本研究では

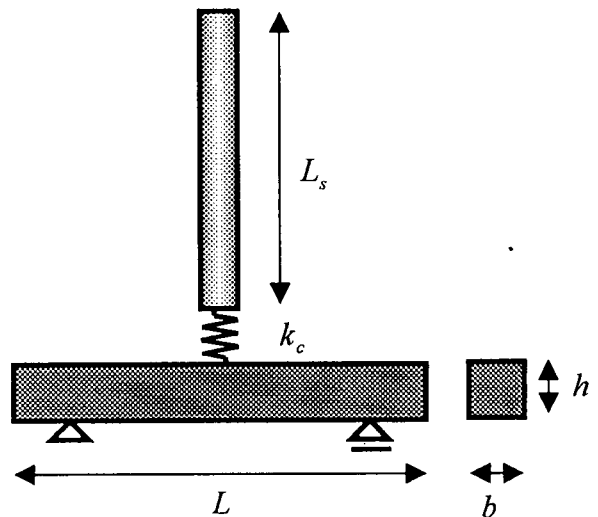


図-1 解析モデル

Timoshenko 梁理論を用いて解析を行う。ここで、コンクリートの引張を無視し、引張、圧縮両鉄筋を考慮に入れて、梁の剛性に対する断面二次モーメント I と断面積 A を計算する。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 、そして密度を ρ とする。また重錘と梁の間に接触ばね k_c を考慮し、重錘先端部の変位を u_1 、梁中央部の変

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

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。

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

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、梁には次元のはり要素、重錘には次元の棒（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、重錘に対する重力の影響は荷重ベクトルで考慮した。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。

$$[C] = \frac{2\zeta}{\omega} [K] \quad (3)$$

ここで ζ は減衰定数、 ω は一次固有角振動数である。また、運動方程式の時間に関する離散化には、Newmark β 法を採用した。

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、以下のすべての例でそれぞれ $N=50, N=10$ を使用して解析を行った。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 $t c/h$ を示し、縦軸に無次元化した衝撃力 f/Eh^2 、反力 R/Eh^2 及び変位 u/h （それぞれ図の(a), (b)及び(c))を示した。なお、全ての結果に

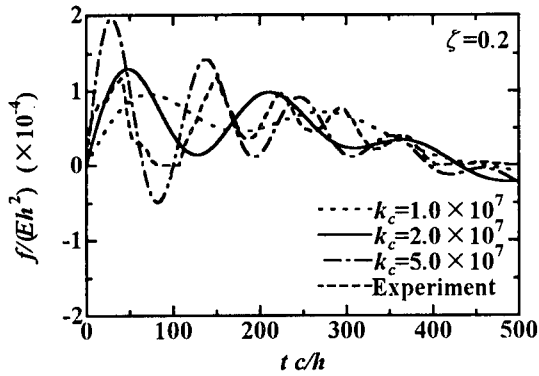
おいて実験値の波形は破線で示した。

表-1 に解析に用いた諸元を示す。本研究では Type-A, B の二種類の RC 梁について解析を行う。ここで L の大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。

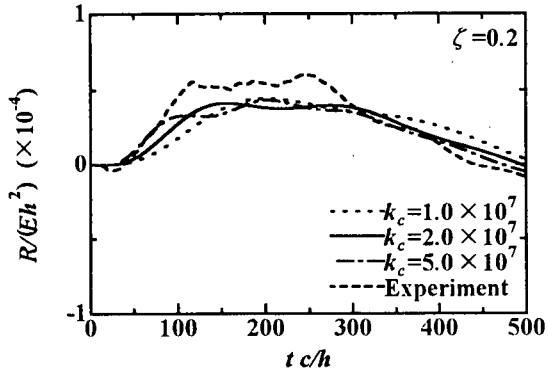
図-2 は接触ばねの影響を検討するため、Type-A の梁を用いて $k_c=1.0 \times 10^7, 2.0 \times 10^7, 5.0 \times 10^7$ (N/m)と変化させ（それぞれ結果を点線、実線、一点鎖線で示す）、減衰定数を $\zeta=0.2$ として解析を行った結果である。これによると、反力及び変位波形では接触ばねに関係なくほぼ同じ応答値を示している。しかし衝撃力波形においては、接触ばねを大きくすると高次の振動が発生し、かつ最大衝撃力は大きくなっており、その値によって波形に大きな差が生じているのがわかる。後半部で波形の周期にやや差が見られるものの、 $k_c=2.0 \times 10^7$ (N/m) を用いた場合に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 （それぞれ結果を点線、実線、一点鎖線で示す）の三種類に変化させて解析した結果である。ここで、接触ばねは先の解析で結果が良好であった $k_c=2.0 \times 10^7$ (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。

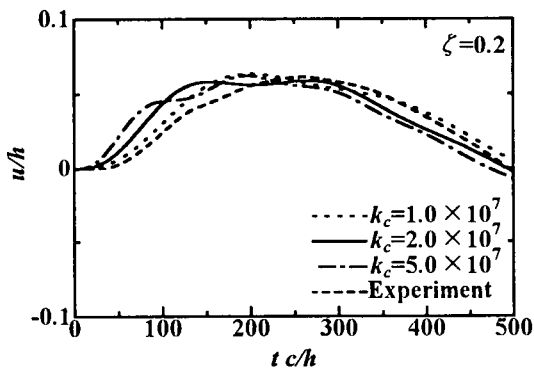
以上の結果からもわかるように、衝撃力は接触ばねと減衰定数、特に前者によって大きく変化しているが、適切な値を導出する理論的な裏付けに欠けている。接触ばねを取り上げて考えると、その値は衝突する二つの物体に依存すると推量でき、異なる梁や重錘、あるいは異なる初期速度に対して、適切な値を調べることは、理論的背景の考察には不可欠



(a) 衝撃力波形



(b) 反力波形



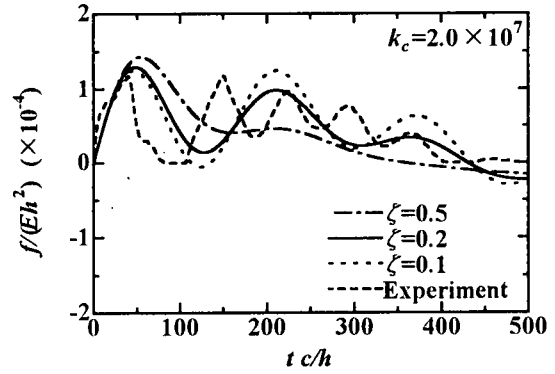
(c) 変位波形

図-2 接触ばねを変化させたときの各応答波形 (Type-A)

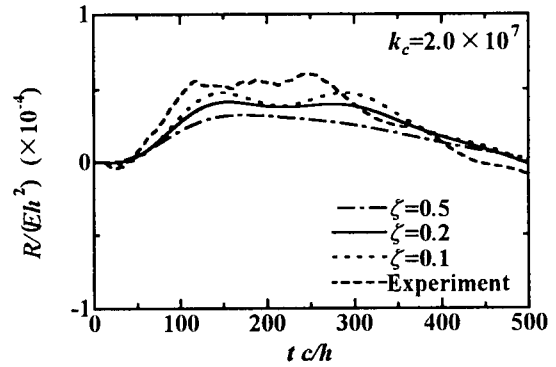
である。

以上の理由をふまえ、図-4に主鉄筋と重錘の初期速度が異なる Type-B の梁に対する結果を示す。ここで、接触ばねは図-2の解析で使用した三種類の値を用いた。この場合 $k_c = 1.0 \times 10^7$ (N/m) で良好な結果を確認することができ、先の解析結果で示した値とはやや異なっている。このことから、接触ばねは初期速度と梁の剛性の両方、あるいはいずれか片方の影響は受けるということが推察できる。

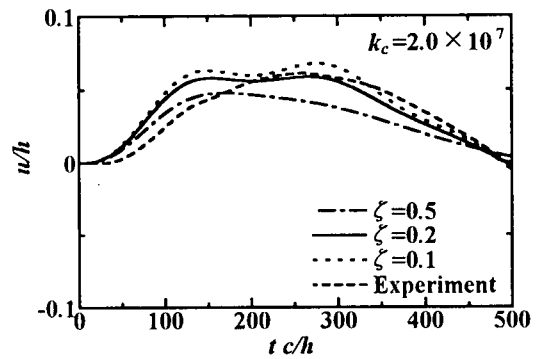
図-5は減衰定数を図-3で使用した三種類の減衰



(a) 衝撃力波形



(b) 反力波形



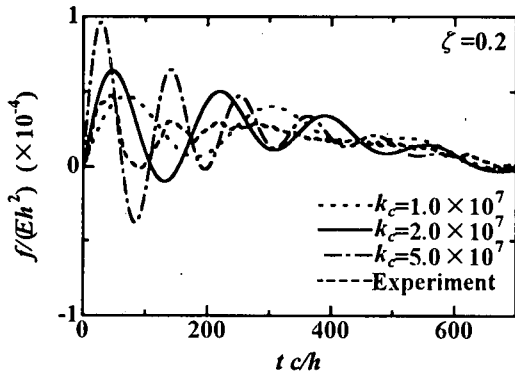
(c) 変位波形

図-3 減衰定数を変化させたときの各応答波形 (Type-A)

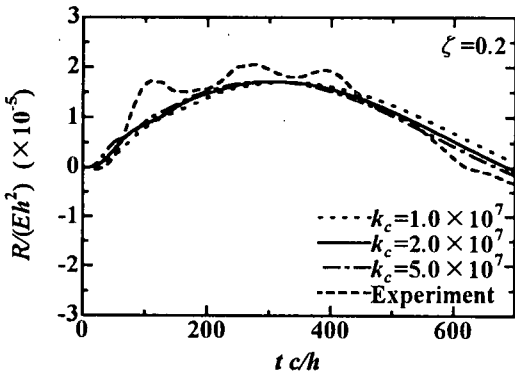
定数について解析した結果であり、接触ばねは $k_c = 1.0 \times 10^7$ (N/m) を用いている。解析に用いた減衰定数の範囲では、先程と同様に $\zeta = 0.1$ から 0.2 で良好な結果が得られており、適切な減衰定数の値は初期速度と梁の剛性の影響を受けにくいことがわかる。

4. まとめ

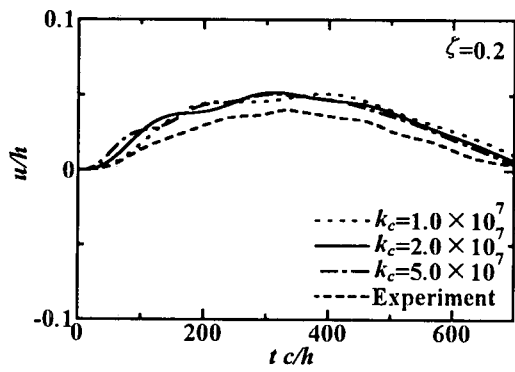
(1) 弾性の範囲内における一次元のはり要素、棒要素を用いたモデルの適用性が示された。



(a) 衝撃力波形

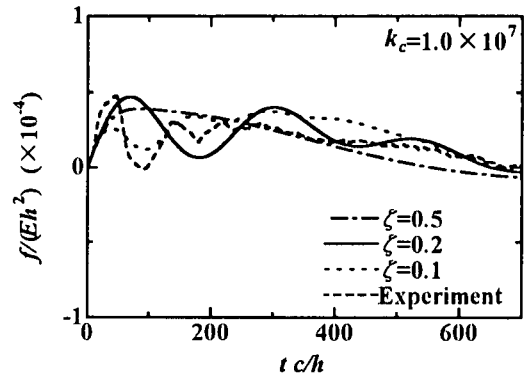


(b) 反力波形

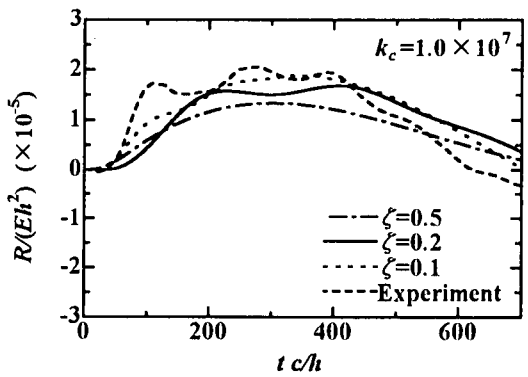


(c) 変位波形

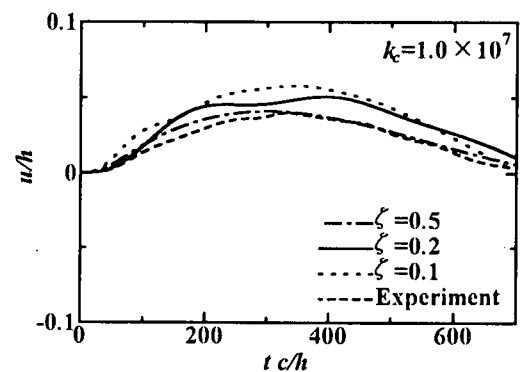
図-4 接触ばねを変化させたときの
各応答波形 (Type-B)



(a) 衝撃力波形



(b) 反力波形



(c) 変位波形

図-5 減衰定数を変化させたときの
各応答波形 (Type-B)

(2) 減衰定数は初期速度、断面の諸量の影響を受けにくいことが推察できるが、接触ばねと併せ、これらの値の理論的な導出方法は今後の研究課題である。

謝辞

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。

参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619, pp.215-233, 1999.
- 2) 衝撃問題研究小委員会: 構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, 1993.