

曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する各種同定解析

IDENTIFICATION ANALYSES ON IMPACT BEHAVIOR OF
FLEXURAL-FAILURE-TYPE RC BEAMS DUE TO A STEEL-WEIGHT FALLING

岡田慎哉*, 岸 徳光**, 三上 浩***, 安藤智啓****

Shin-ya OKADA, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Tomohiro ANDO

- *修(工) 北海道開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)
**工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)
***博(工) 三井建設(株)主席研究員 構造研究室 (〒270-0132 流山市駒木 518-2)
****博(工) 防衛庁第4研究所研究員 施設構造研究室 (〒229-0006 相模原市潤野辺 2-9-54)

キーワード: 曲げ破壊型 RC 梁, 衝撃挙動, 衝撃応答解析, 同定
(flexural-failure-type RC beams, impact behavior, impact response analysis, identification)

1. はじめに

近年, 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の衝撃挙動を精度良く同定可能な数値解析手法を確立するために, 各研究機関で RC 梁を用いた衝撃応答解析が盛んに行われている^{1)~3)}. 著者らも, RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する多くの弾塑性衝撃応答解析を実施し, 別途実施して得られた実験結果と比較することにより解析結果の妥当性を検討してきた. その結果, RC 梁に作用する衝撃力 (以後, 重錘衝撃力), 支点部に伝達される衝撃反力 (以後, 支点反力) および RC 梁の変位等の衝撃挙動を比較的精度良く同定することが可能な三次元弾塑性衝撃応答解析手法を提案している⁴⁾. しかしながら, 上述の検討は, 重錘を RC 梁に衝突させる速度入力による場合を対象に行ったものであり, 衝撃荷重を直接作用させる荷重入力の場合や, 強制変位を与える変位入力による場合に対しては行なっていない.

一方, 重錘が RC 梁に衝突することによって重錘に発生する衝撃力波形 (重錘衝撃力波形) は, 波動の継続時間や振幅の大きさの異なる数波が連なった複雑な分布性状を示すことが知られている⁴⁾. しかしながら, それぞれの波形成分が RC 梁の衝撃挙動に与える影響度合いに関しては, ほとんど明らかに

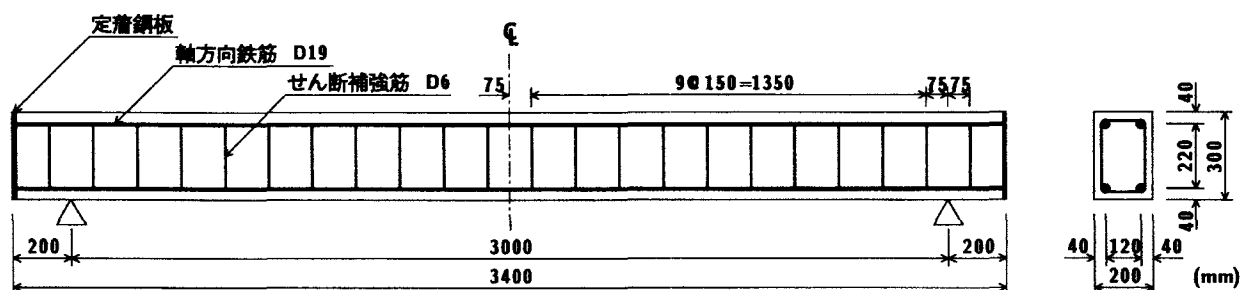
されていない.

このような観点より, 本研究では, 速度入力, 荷重入力および変位入力による解析結果が, RC 梁の衝撃挙動の精度に与える影響に関して検討を試みることにした. また, 荷重入力の場合に限定して, RC 梁に作用する荷重を, (1) 重錘衝撃力波形全体, (2) 衝撃初期に励起される第1波のみ, (3) 第1波後に励起される第2波のみとして与えた場合の3種類を設定し, これら荷重の載荷方法が RC 梁の衝撃挙動に与える影響度合いも合わせて検討した. なお, RC 梁には, 静載荷時には曲げ型で破壊に至る (曲げ破壊型) RC 梁を用いることとした.

2. 解析概要

2.1 RC 梁の形状寸法

図-1には, 本数値解析で対象とした RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している. 本 RC 梁は, 断面 (梁幅×梁高×全長) が 200×300×3,400 mm の複鉄筋矩形 RC 梁である. また, 軸方向鉄筋 (D19) はかぶり 40 mm の位置に上下に2本ずつ, せん断補強筋 (D6) は 150 mm 間隔に配筋している. このうち, 軸方向鉄筋は, 定着長を節約するために梁端面で厚さ約 10 mm の定着鋼板に溶接・定



図－１ RC 梁の形状寸法および配筋状況

表－１ コンクリートの材料物性の一覧

密度 ρ_c (g/cm ³)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
2.35	32.3	28.3	0.18

表－２ 軸方向鉄筋の材料物性の一覧

名称	密度 ρ_s (g/cm ³)	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D19	7.85	379	206	0.3

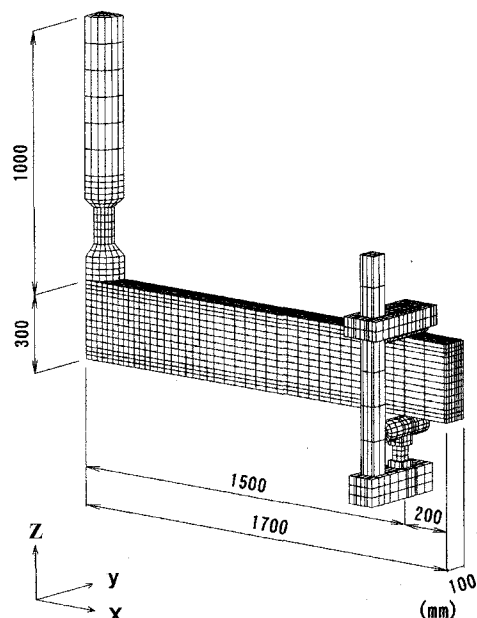
着されている。なお、表－１および表－２には、コンクリートと軸方向鉄筋の材料特性値を示している。

2.2 数値解析モデル

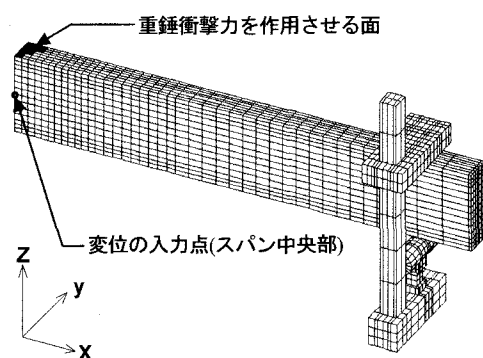
図－２には、速度入力、荷重入力および変位入力時の数値解析に用いる有限要素モデルを示している。速度入力の場合には、RC 梁の他、衝突体としての重錘および支点治具もモデル化している。一方、荷重入力および変位入力の場合には、重錘はモデル化せず、RC 梁と支点治具のみをモデル化している。解析対象は、RC 梁等の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に２等分した 1/4 モデルである。

適用した要素タイプは、基本的には８節点あるいは６節点の三次元固体要素である。しかしながら、せん断補強筋要素には、要素サイズが他の要素と比較して小さく、解析所要時間に大きな影響を与えることが予想されるため、剛性、断面積、重量が等価な梁要素を適用した。なお、要素の積分点数は１点積分を基本としているが、軸方向鉄筋要素に関しては断面方向に１要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して８点積分としている。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面－面間の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面



(a) 速度入力の解析に用いるモデル



(b) 荷重入力および変位入力の解析に用いるモデル

図－２ 有限要素モデル

を設定している。また、コンクリートと軸方向鉄筋およびせん断補強筋の要素間は、完全付着を仮定している。

2.3 材料物性モデル

コンクリート要素に用いる物性モデルは、圧縮側

表－３ 解析ケース一覧

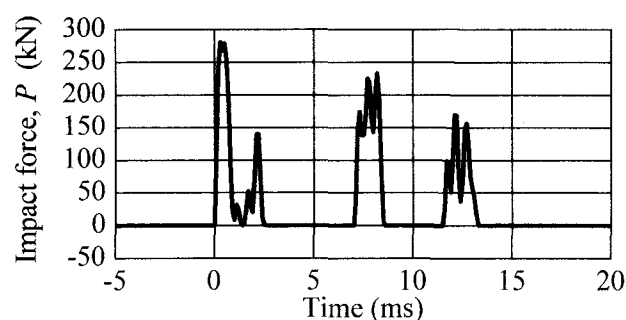
弾性解析 ($V=1\text{ m/s}$)	① 速度入力
	② 荷重入力
	(1) 重錘衝撃力波形全体を入力
	(2) 重錘衝撃力波形の第1波群のみ入力
弾塑性解析 ($V=7\text{ m/s}$)	(3) 重錘衝撃力波形の第2波群のみ入力
	③ 変位入力
	① 速度入力
	② 荷重入力
	(1) 重錘衝撃力波形全体を入力
	(2) 重錘衝撃力波形の第1波のみ入力
	(3) 重錘衝撃力波形の第2波群のみ入力
	③ 変位入力

に対しては折線近似による相当応力－相当歪関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルである。ここでは、相当歪が $1,500\ \mu$ に達した状態でコンクリートが降伏すると仮定して、完全弾塑性のバイリニア型にモデル化した。なお、降伏応力には圧縮強度 f_c を、また引張側の破壊圧力には降伏応力の $1/10$ を仮定した。降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

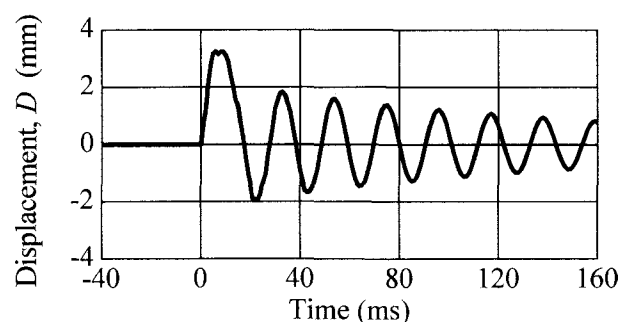
一方、軸方向鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、材料試験結果に基づき表－２に示す値を採用している。降伏の判定は、前述のコンクリートモデルと同様に von Mises の降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。その他の要素（せん断補強筋、重錘、支点治具および定着鋼板）に関しては弾性体モデルを適用し、弾性係数、ポアソン比にはそれぞれ $E=206\text{ GPa}$ 、 $\nu=0.3$ を用いている。

2.4 解析ケース

表－３には、本解析ケースの一覧を示している。表に示すように、本解析は弾性解析と弾塑性解析に対して、①速度入力による場合（衝突問題）、②荷重入力による場合（载荷方法を３種類設定）、③変位入力による場合の３種類を考慮した５ケースずつに対して実施している。荷重入力の場合には、(1) 励起される重錘衝撃力波形全体を载荷する場合、(2) 衝撃初期に励起される第1波のみを载荷する場合、および (3) 第1波後に励起される第2波のみを载荷する場合、の３種類を考慮している。



図－３ 重錘衝撃力波形



図－４ 载荷点変位波形

速度入力の場合には、重錘要素の全節点に設定衝突速度を付加する形で解析を行っている。付加する衝突速度 V は、弾性解析および弾塑性解析の場合でそれぞれ $V=1\text{ m/s}$ 、 $V=7\text{ m/s}$ である。また、荷重入力の場合には、速度入力の場合の解析結果を参考に図－２(b)の载荷点部近傍の黒色部分に等分布荷重を作用させて解析を行っている。さらに、変位入力の場合には、RC 梁のスパン中心点断面の高さ方向中央位置の全節点に強制変位を与えて解析を行っている。

3. 弾性解析の結果および考察

3.1 各種入力方法による同定解析

図－３および図－４には、速度入力による数値解析より得られる重錘衝撃力波形と変位波形を示している。ここでは、荷重入力および変位入力による数値解析に対して、これらの全波形を用いることとした。重錘衝撃力波形および後述する支点反力波形は、重錘と RC 梁および支点治具と RC 梁の要素間に定義した接触面に生じる鉛直方向接触反力を集積することにより算定した。なお、重錘衝撃力波形は、重錘が RC 梁に数回に渡って衝突する形で载荷するような正弦半波状の数波が連なった分布を示している。

図－５には、①速度入力、②荷重入力、および③

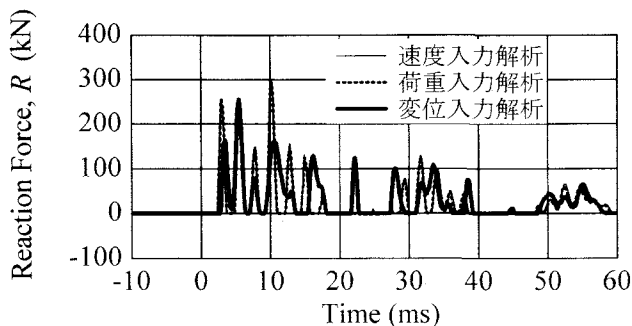


図-5 支点反力波形

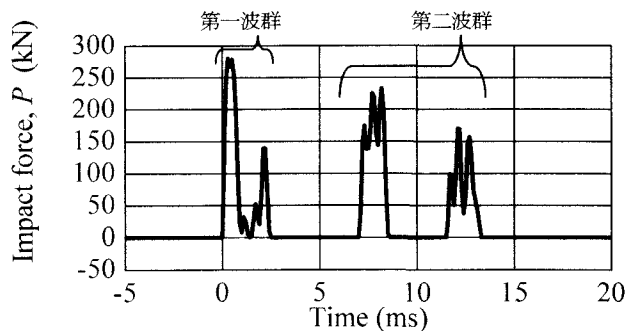


図-7 荷重入力のための波群

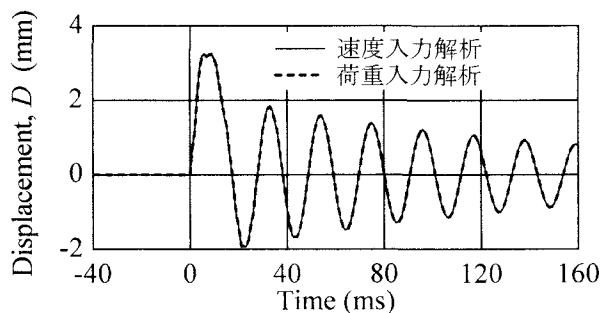


図-6 変位波形

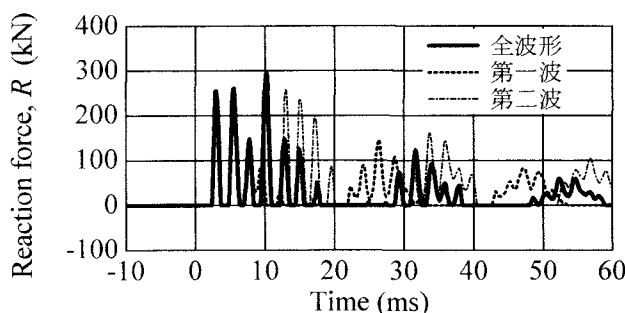


図-8 支点反力波形

変位入力による数値解析より得られる支点反力波形を示している。図より、速度入力と荷重入力による数値解析より得られる支点反力波形は、両者で非常に良く対応していることが分かる。すなわち、10～15 ms 程度の継続時間を有する低次の波形成分に、周期が約 2 ms 程度の高次の波形成分が励起された分布性状を示している。一方、変位入力の場合にも、波形の振幅の大きさは他の入力方法による場合と異なっているものの、低次の波形成分の継続時間や高次の波形成分の励起される時間はほぼ対応していることが分かる。

図-6には、①速度入力と②荷重入力による数値解析より得られる変位波形を示している。図より、速度入力と荷重入力の場合には、ここでも両者の波形はほぼ同様となっていることが分かる。すなわち、両波形は周期が 25 ms 程度の減衰自由振動状態を呈している。

以上より、RC 梁の支点反力や変位等の弾性衝撃挙動は、速度や荷重、変位の入力条件が適切である場合には、入力方法に拘わらず比較的精度良く同定可能であるものと判断される。

3.2 载荷方法の衝撃挙動に与える影響

図-7には、速度入力解析から得られた重錘衝撃力波形を荷重入力として用いるために、その波群を

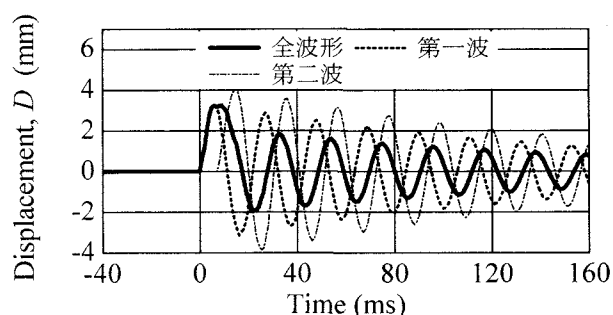


図-9 変位波形

分けて示している。なお、重錘衝撃力波形を全体として载荷する場合の波形は、図-3に示すとおりである。

図-8および図-9には、各荷重入力時における数値解析結果の支点反力波形と変位波形を示している。まず、図-8より、第1波群のみを载荷する場合には、初期の2波の振幅および継続時間は、全波形を载荷する場合と同様であることが分かる。しかしながら、それ以降の分布性状に関しては、低次波形成分の第2波と第3波の発生時間に位相差が生じている等、差異が見られる。一方、第2波群のみを载荷する場合にも、約 10 ms 時点で励起される最初の高次波形成分1波のみは全波形を载荷する場合と対応しているものの、それ以降の分布性状は異なっている。また、ここでも低次波形成分の発生時間に、全波形を载荷する場合との間で位相差が見られる。

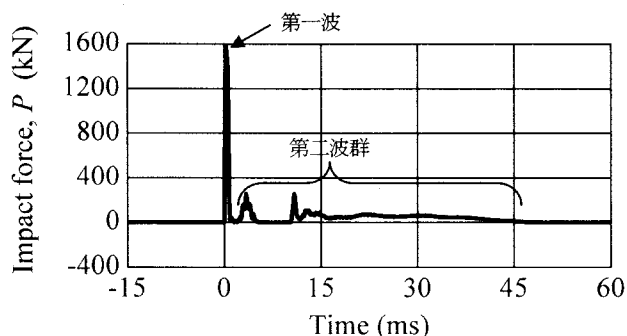


図-10 重錘衝撃力波形

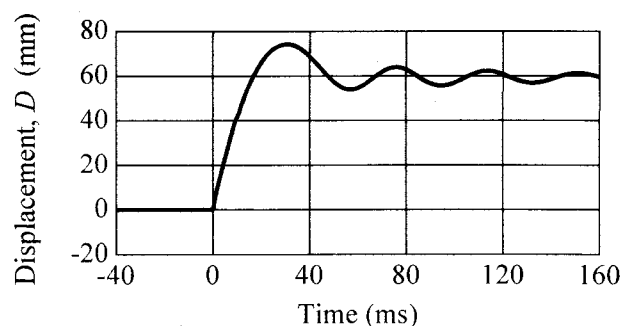


図-11 変位波形

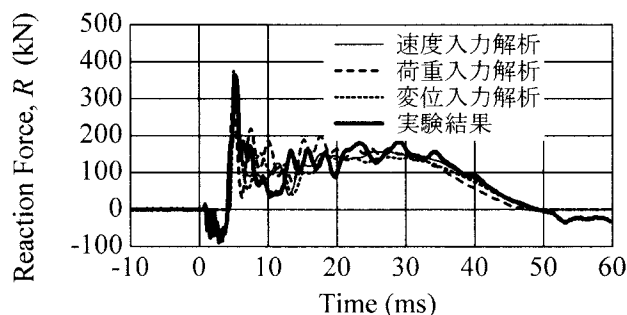


図-12 支点反力波形

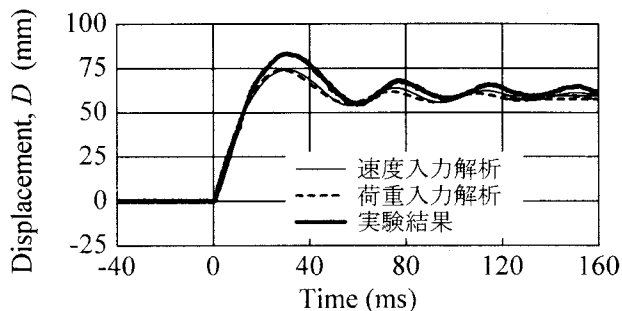


図-13 変位波形

図-9より、第1波群のみおよび第2波群のみを載荷する場合における変位波形の振幅は、全波形を載荷する場合の振幅に比べて大きく示されていることが分かる。さらに、第2波群のみを載荷する場合の振幅は、第1波群のみを載荷する場合より若干大きい。これは入力波形の周期と梁の固有振動とが相互に影響し合うことによるものと推察される。また、各波形の振動周期はほぼ同様であるものの、波形には載荷方法により位相差が生じている。

以上より、RC 梁の弾性衝撃挙動を精度良く同定する場合には、荷重入力に用いる重錘衝撃力波形を実際に即して忠実に RC 梁に作用させる必要のあることが明らかとなった。

4. 弾塑性解析の結果および考察

4.1 各種入力方法による同定解析

図-10および図-11には、速度入力による数値解析より得られる重錘衝撃力波形と変位波形を示している。ここでも、荷重入力および変位入力による数値解析には、これらの全波形を用いることとした。なお、重錘衝撃力波形は、衝撃初期の振幅が大きく継続時間が1 ms と非常に短い波形成分（第1波）とその後続の振幅が小さく全体の継続時間が40 ms 程度と長い波形成分（第2波）が連なった分布を示している。

図-12には、①速度入力、②荷重入力、③変位入力による数値解析および実験より得られる支点反力波形を示している。図より、各解析結果の波形は、立ち上がりから減衰に至るまで大略実験結果と対応していることが分かる。すなわち、支点反力は衝撃初期に最大値までほぼ線形に急激に増大し、一旦零近傍まで減少する。その後、再度第2ピークまで緩やかに増大し、ピーク値到達後徐々に減少している。

図-13には、①速度入力と②荷重入力による数値解析および実験結果より得られる変位波形を示している。図より、変位波形に関しても、各波動の立ち上がり勾配、最大応答値や振動周期等の特性が、実験結果と比較的良く対応していることが分かる。しかしながら、その挙動は弾性問題の場合と異なっている。すなわち、波動は荷重除荷後に正方向にシフトした状態で振動している。これは、RC 梁がひび割れの発生によって塑性化し、変位が残留していることを意味している。

以上より、RC 梁の支点反力や変位等の弾塑性衝撃挙動は、弾性衝撃挙動の場合と同様、速度や荷重、変位の入力条件が適切である場合には、入力方法に拘わらず精度良く同定できることが明らかになった。

4.2 載荷方法の衝撃挙動に与える影響

重錘衝撃力の全波形は、図-10に示すとおりで

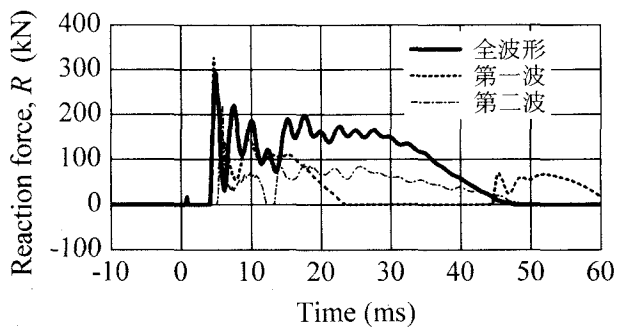


図-14 支点反力波形

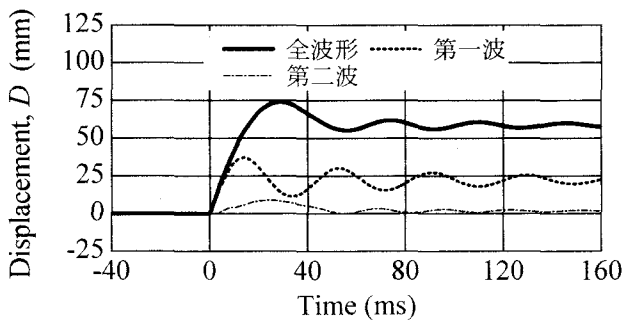


図-15 変位波形

あり、第一波、第二波群のみを考慮する場合について数値解析的に検討を行なった。

図-14および図-15には、各入力波形に対する数値解析結果の支点反力波形と変位波形を比較して示している。まず、図-14より、第1波のみを載荷する場合には、最大振幅は全波形を載荷する場合と同程度であることが分かる。しかしながら、波動の継続時間は全波形を載荷する場合や第2波群のみを載荷する場合に比べて1/2以下と小さい。一方、第2波群のみを載荷する場合には、波動の継続時間は全波形を載荷する場合とほぼ同様であるものの、最大振幅が全波形を載荷する場合や第1波のみを載荷する場合に比べて2/3程度と小さい。

図-15より、第1波のみを載荷する場合には、全波形を載荷する場合に比べて最大振幅は1/2程度と小さく、振動周期も若干短く示されていることが分かる。一方、第2波群のみを載荷する場合には、全波形を載荷する場合に比べて最大振幅は1/7程度と小さく、振動周期は若干長くなっている。

以上より、RC梁の弾塑性衝撃挙動を精度良く同定するためには、弾性挙動の場合と同様、荷重入力に用いる重錘衝撃力波形を実際に即して忠実に入力させる必要のあることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、速度入力、荷重入力および変位入力

による解析方法が、曲げ破壊型RC梁の衝撃挙動の同定精度に与える影響に関して検討を試みた。また、荷重入力の場合に限定して載荷方法を3種類設定し、載荷方法がRC梁の衝撃挙動に与える影響度合いも合わせて検討した。検討結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) RC梁の支点反力や変位等の弾性および弾塑性衝撃挙動は、速度や荷重、変位の入力条件が適切である場合には、入力方法に拘わらず精度良く同定できる。
- (2) 荷重入力による数値解析において、RC梁の弾性および弾塑性衝撃挙動を精度良く同定するためには、荷重入力に用いる重錘衝撃力波形を実際に即して忠実に作用させる必要がある。

参考文献

- 1) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木晃, 小暮幹太: 重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 1201-1212, 1995.
- 2) 中田吉彦, 榎谷 浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1761-1771, 1998.
- 3) 柴田俊文, 三上 隆, 須藤敦史, 蟹江俊仁: カルマンフィルタによる梁の衝撃力の同定, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1485-1491, 2002.
- 4) 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梁の弾塑性応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp. 215-233, 1999.