重錘落下衝撃を受ける扁平RC梁の耐衝撃挙動に関する数値解析

Numerical analysis on impact resistant behavior of flat RC beam under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院	○ 学生員	鄭	丹丹 (Dandan Zheng)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室	雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	学生員	瓦井	智貴 (Tomoki Kawarai)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸	徳光 (Norimitsu Kishi)

1. **はじめに**

本研究ではロックシェッド頂版部等の面部材を模擬・想 定した扁平 RC 梁を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を 実施し、別途実施した衝撃荷重載荷実験結果¹⁾と比較する ことにより、既往の解析手法²⁾の妥当性を検討した.ここ では、扁平 RC 梁の衝撃応答性状に及ぼす減衰係数の影響 を検討した上で、落下高さの異なるケースについて検討 を行った.なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線 形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA³⁾を用いている.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に使用した扁平RC梁の形状寸法および配筋状況を示している.試験体の断面寸法(梁幅×梁高さ)が450×150mmの扁平断面を有する複鉄筋RC梁であり、純スパン長はL=2mとなっている.試験体の配筋は、一般的なロックシェッドの頂版部を模擬しているため、引張側鉄筋比は0.75%程度であり、圧縮側鉄筋比はその半分程度とした.軸方向鉄筋はD10およびD13を4本ずつ上端および下端に複鉄筋配置とし、せん断補強鉄筋にはD6を125mm間隔で配筋している.かぶり厚は高さ方向40mm、幅方向45mmとしている.また、軸方向鉄筋は梁端部に設置した厚さ9mmの定着鋼鈑に溶接している.

表-1, **表-2**には実験時におけるコンクリートおよび 鉄筋の力学的特性値を示している.なお,コンクリート の圧縮強度および鉄筋の降伏強度は別途実施した材料試 験から得られた値である.

2.2 実験方法

写真-1には、衝撃荷重載荷実験状況を示している。実 験は、質量 300 kg, 先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定高



図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの材料物性値						
材料	圧縮	引張	弾性	ポア		
	強度	強度	係数	ソン比		
	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	V_{c}		
コンクリート	25.2	2.52	16.8	0.167		

さからガイドレールを介して RC 梁のスパン中央部に一 回だけ自由落下させる単一載荷法に基づいて行っている. 重錘底部は, 2 mm のテーパを有する球面状となっている. また,試験体は浮き上がり防止治具付きの支点上に設置 しており,治具全体が回転を許容するピン支持に近い状 態になっている.本実験における測定項目は重錘衝撃力 P, 合支点反力R (以後,支点反力),および載荷点直下 の鉛直変位 δ (以後,載荷点変位)である.なお,重錘 衝撃力と支点反力の測定は衝撃荷重測定用ロードセルを, 載荷点変位は非接触式レーザ変位計を用いて計測してい る.実験終了後には,扁平 RC 梁の側面を撮影し,ひび割 れ性状を観察している.

3. 数值解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

図-2は本数値解析に用いた扁平RC梁の要素分割状況 を示している.対称性を考慮し,梁幅方向およびスパン 方向にそれぞれ2等分した1/4モデルとした.総節点数お よび総要素数はそれぞれ69,877,63,394である.せん断補 強鉄筋は2節点梁要素,その他の要素は全て8節点固体 要素を用いてモデル化している.なお,軸方向鉄筋は公 称断面積と等価な断面積になるよう正方形断面に簡略化 している.要素の積分点数に関しては,固体要素は1点

	表一2 武肋の内科物性値			
呼び径	降伏	引張	弾性	ポア
	強度	強度	係数	ソン比
	f_y (MPa)	f_u (MPa)	$E_s(GPa)$	V_{S}
D6	363.1	541.5		
D10	378.5	551.4	200	0.3
D13	382.8	571.6		

表-2 鉄筋の材料物性値



写真-1 衝撃載荷実験の状況



図-2 数値解析モデル



図-3 断面方向の要素分割状況

積分,梁要素は4点積分とした.

境界条件は, RC 梁の対称切断面において法線方向変位 成分を拘束している.また,支点部においては鋼製支点治 具底面を y 軸まわりの回転のみ許容し,実験時と同様の ピン支持状態としている.なお,コンクリートと鉄筋お よび定着鋼板間には完全付着を,コンクリートと重錘お よび支点治具間には面と面の接触・剥離を伴う滑りを考 慮した接触面を定義し,摩擦係数を 0.25 と仮定した.衝 撃荷重は,重錘の全節点に各落下高さ H に対応した実測 衝突速度を付加することにより作用させている.

図-3には,断面方向の要素分割を示している.なお, 梁軸方向の要素長は 25 mm 程度とした.

3.2 材料構成則

図-4には、本数値解析で用いたコンクリートと鉄筋の 応力---ひずみ関係を示している.以下に、各材料物性モデ ルの概要を述べる.

(1) コンクリート

図-4(a)には、コンクリート要素の応力一ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当塑性ひずみが 0.15%に達した状態でコンクリートが降伏する完全弾塑性体のバイリニア型モデルを用いた。圧縮強度は材料試験結果の値を採用し、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。引張強度は圧縮強度の 1/10 を仮定し、引張応力がその値に到達した時点でカットオフされるものとしている。なお、圧縮強度 ƒ/, 引張強度 ƒ, 弾性係数



図-4 材料構成則

表-3 解析ケース一覧				
設定落下高さ <i>H</i> (m)	実測衝突速度 (m/s)			
0.25	2.06			
0.5	2.98			
1.0	4.20			
1.5	5.13			



図-5 減衰係数の影響

E_c およびポアソン比 v_c に関しては**表-1**に示している. (2) 鉄筋

図-4(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋要素 に用いた応力--ひずみ関係を示している.鉄筋要素には、 降伏後の塑性硬化を考慮した等方弾塑性体モデルを採用 し、塑性硬化係数Hには弾性係数 E_s の1%を用いている. また、降伏判定は von Mises の降伏条件に従うこととした. なお、降伏強度 f_y ,引張強度 f_u 、弾性係数 E_s およびポア ソン比 v_s に関しては**表**-2に示している.

(3) 重錘,支点治具および定着鋼板

重錘,支点治具および定着鋼板に関しては,実験時に塑 性変形が確認されていないことより,弾性体モデルを適用 している.弾性係数 E_s 及びポアソン比 v_s については鋼材 の公称値を用いることとし,それぞれ $E_s = 200$ GPa, v_s = 0.3 と仮定している.また,単位体積質量 ρ_s は支点治 具および定着鋼板には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³ を用いることとし,重錘には質量 300 kg を解析モデルの 体積で除した値を用いた.

4. 数値解析結果および考察

ここでは,(1) 落下高さ H=1.5 m の場合を対象に減衰 係数 h による影響を検討した後に,(2) 落下高さを 4 種 類に変化させたケースについて解析を行った.

4.1 減衰係数の決定

図-5には減衰係数 h = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0%と変 化させ場合について, 載荷点変位の実験結果と解析結果



を比較して示している.図より,減衰係数が大きくなる ほど,載荷点変位は小さくなる傾向にあることが分かる. また,減衰係数h = 1.5%の場合が,実験結果の最大変位 や振動性状とよく対応していることより,以後,解析で は減衰係数をh = 1.5%と設定した.

4.2 各種応答波形

図-6には、落下高さH=0.25, 0.5, 1.0, 1.5mにおけ る各種時刻歴応答波形を実験結果と比較して示している。 なお、横軸は重錘がコンクリートに衝突した時刻を零と している。

まず,(a)図の重錘衝撃力波形に着目すると,実験結果 では振幅が大きく継続時間が2ms程度の第1波に振幅が 小さい第2波,第3波と後続する性状を示していることが 分かる.解析結果も同様の性状を示しているが,第1波 の最大応答値は落下高さHが大きくなるにつれ,実験結 果よりも小さくなる.また,第2波の立ち上がり時刻も 落下高さHが大きくなるにつれ,実験結果よりも遅く励 起されていることが分かる.

(b) 図の支点反力に着目すると、いずれの落下高さ H に おいても、最大支点反力や減衰自由振動時の振幅・周期 が実験結果と解析結果で概ね一致していることが分かる.

(c) 図の載荷点変位を見ると,解析結果と実験結果の最 大変位はよく一致していることが分かる.また,波形性状 も概ね一致している.

図-7は各種時刻歴応答波形の最大値と残留変位につい て、横軸に実験結果を、縦軸に解析結果を取り整理した ものである。



図-7 最大値応答値の比較

(a) 図の最大重錘衝撃力に着目すると,解析結果の誤差 は 20%以内であり,解析結果は実験結果よりも過小に評 価していることが分かる.また,落下高さHが小さい場 合は誤差も小さい傾向にある.

(b) 図の最大支点反力に着目すると,実験結果と解析結 果の誤差が落下高さ H = 0.5, 1.5m の場合には 10%程度, 落下高さ H = 0.25, 1.0 m の場合には 20 % 程度あり,落 下高さ H によりばらつきがあることが分かる.



図-8 ひび割れ分布の比較

(c) 図の最大載荷点変位と(d) 図の残留変位に関しては, いずれの落下高さ H においても解析結果と実験結果の誤 差は10%以内に収まっており,解析結果は実験結果をほ ぼ適切に再現可能であることが分かる.

4.3 ひび割れ分布

図-8には、各載荷試験終了後の試験体側面、上面および底面のひび割れ分布状況と各解析ケースの第一主応力 コンター図を比較して示している.なお、図-4で示し たようにコンクリート要素には、ひび割れ発生荷重に到 達した時点ではカットオフされる設定としている.その ため第一主応力が零近傍の要素を赤色で示し、ひび割れ に相当するものとしている.

まず,実験結果に着目すると,(a)図の側面のひび割れ 分布性状は,いずれの落下高さHにおいても梁下縁から 鉛直方向に進展する曲げひび割れが,同等の間隔で入っ ていることが分かる.また,落下高さHが大きくなるに つれ,載荷点部近傍梁下縁から約45度の角度で進展する 斜めひび割れの発生が多くなっている.

(b) 図の上面のひび割れ分布に着目すると,落下高さ H の増加に伴い,梁軸直角方向に進展するひび割れも増加 し,上縁コンクリートの圧縮破壊が卓越することが分か る.支点部近傍のひび割れは重錘衝突時に支点部が固定 端のような挙動をすることで生じたものと考えられる.

(c) 図の底面のひび割れ分布に着目すると,上面と同様 に落下高さ H に比例しひび割れが多くなることが分かる. また,版に見られる載荷点直下から放射状に広がるよう なひび割れも進展していることが確認できる.

数値解析結果に着目すると,(a)図の側面のひび割れ分 布は実験結果をよく再現している.また,(b)図の上面の ひび割れ分布は実験よりも損傷程度を若干大きく評価し ており,実験では確認されていない支点部のひび割れも 確認できる.最後に,(c)図の底面のひび割れ分布の場合 には,いずれの落下高さHにおいても損傷を過大に評価 しているものの,放射状に進展する版特有のひび割れ性 状は再現可能であることが分かる.

5. まとめ

本研究では扁平 RC 梁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な 解析手法の確立を目的とし,三次元弾塑性衝撃応答解析 を実施した.本研究で得られたことは以下の通りである.

- 提案の有限要素モデルを用いることにより、実験結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位を概ね再現可能である。
- 2) 最大重錘衝撃力や最大支点反力は20%以内,最大載 荷点変位や残留変位は10%以内の誤差で再現可能で ある。
- 3) ひび割れ分布は全体的に損傷を若干過大に評価する 傾向にあるものの、曲げひび割れや斜めひび割れ、底 面に放射状に広がるひび割れを再現可能である。

今後は,緩衝材が設置された扁平 RC 梁を対象に数値解 析を実施する予定である.

参考文献

- 酒井啓介, 栗橋祐介, 今野久志, 岸徳光: 扁平 RC 梁の 耐衝撃挙動に及ぼす敷砂緩衝材の影響, コンクリート 工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.787-792, 2016.7.
- 2) 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 梁の耐衝撃設計法に関す る一提案,土木学会論文集,No. 647/I-51, pp. 177-190, 2000.
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.