# 大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動における重錘質量の影響に関する数値解析的検討

Numerical study of falling-weight effects on impact response behavior of prototype RC girders

寒地土木研究所	〇正 員	今野	久志	(Hisashi Konno)
三井住友建設(株)	フェロー	三上	浩	(Hiroshi Mikami)
寒地土木研究所	正 員	岡田	慎哉	(Shin-ya Okada)
室蘭工業大学	フェロー	岸	徳光	(Norimitsu Kishi)

# 1. はじめに

近年,様々な構造物の設計が許容応力度設計法から性 能照査型設計法へ移行してきており,落石防護施設等の 設計においても各性能規定に対する断面設計を可能とす る性能照査型の耐衝撃設計法の確立が望まれている.し かしながら,構造物の主要な構成要素である梁部材でさ えも,十分に合理的な耐衝撃設計法が確立されていない のが現状である<sup>1)</sup>.このことから,筆者らは構造物の性 能照査型耐衝撃設計法を確立するための基礎となる研究 として,RC部材の性能照査型耐衝撃設計法に関する研 究を進めてきており,過去に実施した室内衝撃載荷実験 結果を統一的に整理し,曲げ破壊が卓越するRC梁に限 定して耐衝撃設計法を提案している<sup>2)</sup>.RC梁の静的曲 げ耐力を Pu (kN),入力エネルギーを E (kN·m),残留変 位を  $\delta$  (m)とすると,提案式は以下のように示される.

# $Pu = 0.42 \, E \, / \, \delta$

上記提案式は、実験室レベルでの多様な RC 梁の比較 的広範囲な入力エネルギーに対応可能であり、性能照査 型耐衝撃設計法の確立に資する設計式と考えられる. 今 後は、実大規模の RC 梁への適用性を検討し、さらなる 適用範囲の拡大に努めることが肝要であると考えられる. ここで、上記算定式を誘導するために使用された室内衝 撃載荷実験は比較的広範囲な入力エネルギーに対して実 施されたものであるが、実験に使用された重錘の質量と 試験体 RC 梁の質量が比較的近い範囲でのものが多くな っている.実大規模の大型 RC 梁まで上記提案式の適用 範囲を拡大するためには、RC 梁の重錘落下挙動、特に 残留変位に対する重錘質量の影響について検討すること が必要である. そこで、本研究では、過去に筆者らが実 施した大型 RC 梁の衝撃載荷実験結果<sup>3</sup>を基に、その耐 衝撃挙動を精度よくシミュレート可能と判断された数値 解析手法<sup>4)</sup>を用いて,大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に おける重錘質量の影響について解析的に検討を行った.

#### 2. 数値解析の概要

#### 2. 1 大型 RC 梁の数値解析断面および解析ケース

数値解析を実施した大型 RC 梁の形状寸法および配筋 状況を図-1に示す.数値解析用大型 RC 梁の形状寸法 は、過去に重錘落下衝撃実験を実施した試験体を参考に 決定している. すなわち, 実 RC 製覆工頂版の設計断面 緒元を基に、梁幅を道路軸方向単位長さである 1m、梁 高を実覆工の頂版厚と同程度の 1m とする矩形断面とし, 純スパン長を実覆工の内空幅と同程度である 8m とした. 引張側の軸方向鉄筋として D25 を 7 本配置し(主鉄筋比 0.42%), 圧縮側の軸方向鉄筋は引張側鉄筋比の 50% を目 安に D25 を 4 本配置した. また, 実験用試験体では軸 方向鉄筋の定着は、定着長を節約するために梁両端面に 厚さ 12mm の鉄板を配置して溶接定着していることか ら,解析用 RC 梁においても同様の構造としている.コ ンクリート標準示方書に基づいて算定した解析用大型 RC 梁の静的曲げ耐力は Pusc = 613kN,静的せん断耐力 は Vusc = 2,002kN, せん断余裕度  $\alpha$  (= Vusc / Pusc )は, α = 3.27 > 1.0 であり、設計的には静載荷時に曲げ破壊 型で終局に至る断面設計となっている.

表-1には、解析ケースの一覧を示している.表中に は重錘質量 W,支点間の梁質量 B,質量比 W/B,落下 高さ H,入力エネルギー E を示している.重錘質量に 関しては過去に実施した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験 と同様に質量 2 ton の重錘を衝突させる解析ケース を基本とし、入力エネルギーについては実験時の大型



(1)

図-1 解析用大型RC梁の形状寸法および配筋状況

# 平成19年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第64号

表-1 解析ケース一覧

重錘 質量	梁質量	質量比	落下高	入力エネルギー
W(ton)	B(ton)	W/B	H(m)	E(kJ)
2		0.1	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5	49, 98, 147, 196, 245
5		0.25	1, 2, 3, 4, 5	49, 98, 147, 196, 245
10	20	0.5	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5	49, 98, 147, 196, 245
20		1.0	0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25	49, 98, 147, 196, 245
25		1.25	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1	49, 98, 147, 196, 245



図-2 有限要素モデルの要素分割状況

RC 梁の損傷状況等を考慮し 49kJ から 245kJ まで 49kJ ピッチで5段階を設定した.また,重錘質量の影響を検 討するために質量 2ton から 25ton (質量比 W/B では 0.1 から 1.25)までの5段階を設定した.解析ケース数は全 25 ケースである.

### 2.2 数値解析モデルおよび解析条件

本数値解析に用いた構造解析プログラムは,解析手法 に有限要素法を用いた非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA(ver.970)である.

図-2(a)には,解析用大型 RC 梁における要素分割 状況を示している.解析対象は,大型 RC 梁の対称性を 考慮してスパン方向および断面の梁幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとした.適用した要素タイプは,軸 方向鉄筋および帯鉄筋要素には剛性,断面積,重量を等 価とした梁要素を用い,その他の要素は全て 8 節点の 3 次元固体要素とした.また,図-2(b)には,軸方向鉄



 (a) コンクリート
 (b) 鉄筋

 図-3
 材料構成則モデル

表-2	コンクリー	トおよび鉄筋の物性値一	١
-----	-------	-------------	---

++ 伝		強度	弾性係数	ポアソン比
17	貝	(MPa)	(GPa)	
コンク	リート	31.2	20.8	0.167
建故	D25	400	206	0.3
或大用力	D13	390	206	0.3

筋および帯鉄筋に関する有限要素モデルを示している. なお,総節点数および総要素数はそれぞれ 32,978 および 29,333 である.

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には,面 と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義 している.ここで定義している接触面は,2 面間の接触 と分離に伴う解析が可能であり,ペナルティ法を適用し て接触反力が算定可能となっている.ただし,摩擦は考 慮していない.また,コンクリートと軸方向鉄筋要素間, コンクリートと帯鉄筋要素間には,完全付着を仮定して いる.衝撃荷重は,重錘要素を大型 RC 梁に接触する形 で配置し,その全節点に設定した衝突速度を初速度とし て付加することにより梁に衝突させ発生させることとし た.なお,全解析時間は,重錘が大型 RC 梁に衝突した 時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 400ms 間と している.

図-3(a),(b)には、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料構成則モデルを示している. コンクリート要素に用いた物性モデルは,LS-DYNA コードに組み込まれている弾塑性体モデルである. すなわち、圧縮側に対しては折線近似による相当応カー相当ひずみ関係、引張側に対しては線形の相当応カー相当ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルである. 表-2には、解析モデルのコンクリートおよび鉄筋の物性値一覧を示している.

重錘,支点治具および定着鋼板に関する全要素に関し ては、大型 RC 梁に対する衝撃載荷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.要素の弾性係数 Es,ポアソン比 vs,単位体積質量 ps には公称値を用いることとし、全部材で等しく、そ れぞれ Es = 206 GPa, vs = 0.3, ps =  $7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> と仮 定している.なお、重錘形状については、実験で使用し ている鋼製重錘の形状寸法を参考に、質量が 2ton およ び 5ton の場合には、直径 1m,高さ 97cm,底部 17.5cm が半径 80cm の球状であり、質量が 10ton 以上の場合に は、直径 1.25m,高さ 95cm,底部 30cm が半径 1.0 mの 球状として密度を調整することにより異なる質量の重錘 として数値解析を実施している.

# 平成19年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第64号



#### 3. 数值解析結果

# 3.1 各種応答波形

図-4には、入力エネルギーを E=245kJ とし、質量 比 W/B を 0.1 から 1.25 まで 5 段階に変化させた数値解 析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の各応答波 形を示している.

重錘衝撃力についてみると、いずれの質量比において も正弦半波状の波形性状を示しているものの、質量比が 大きくなるに従って振幅が小さくなるとともに、ピーク 値発生までの時間や波形の継続時間が長くなる傾向が示 されている.

支点反力波形は,重錘衝突初期の周期が短く振幅の大 きい正弦半波とその後に続く周期が長く振幅の小さい正 弦半波が合成されたような波形性状を示している.また, 質量比の増加とともに支点反力のピーク値が減少すると ともに波形の継続時間が長くなる傾向が示されている.

載荷点変位については質量比の増加とともに最大変位 と残留変位および周期が増加する傾向が示されている. つまり,入力エネルギーが同じ場合,質量の大きい重錘 が低い高さから衝突する場合の方が質量の小さい重錘が 高い高さから衝突する場合に比較して RC 梁の変形が大 きくなることを示している.これは,解析結果において 重錘衝突後の重錘と RC 梁との位置関係を調べたところ, 質量の小さい重錘が衝突した場合には,重錘は RC 梁に 衝突後,急激に減速し RC 梁は重錘から離れるように変 形が進行し,変位量が小さくなるのに対して,質量の大 きい重錘が衝突した場合には,衝突後の重錘が RC 梁か ら離れずに RC 梁を押し続けることにより変形量が大き くなるものと推察される.このような重錘衝突後の挙動 の違いが重錘衝撃力の差異となって現れているものと考 えられる.

# 3.2 最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係

図-5には、質量比 W/B を 0.1 から 1.25 まで変化さ せた場合の入力エネルギーと最大重錘衝撃力の関係を示 している.最大重錘衝撃力は、入力エネルギーが大きく なるに従って増加する傾向が示されている.また、同一 の入力エネルギーに対しては質量比が大きくなるに従っ て重錘衝撃力は減少する傾向が示されている.これは、 3.1で述べたように重錘衝突後の重錘の挙動の違いに よるものと推察される.入力エネルギーE=245kJ におけ る質量比 W/B が 0.1 と 1.25 の残留変位は、それぞれ 52.5mm と 172.5mm であり、後者が前者に対して約 3.3 倍大きな値となっている.

#### 3.3 最大支点反力と入力エネルギーの関係

図-6には、質量比 W/B を 0.1 から 1.25 まで変化さ せた場合の入力エネルギーと最大支点反力の関係を示し ている.各 RC 梁の入力エネルギーと最大支点反力の関 係は、全体的にはやや右肩上がりの傾向が見られるもの の各質量比毎にみると支点反力が最大となる入力エネル ギーは異なっており、明らかな相関関係は見られない. 以上のことから、多様な入力エネルギーや質量比の基で は、最大支点反力で RC 梁の耐衝撃性を統一的に評価 することはできないものと考えられる.

## 3.4 残留変位と入力エネルギーの関係

図-7には、質量比 W/B を 0.1 から 1.25 まで変化さ せた場合の入力エネルギーと残留変位の関係を示してい る.図より、残留変位は入力エネルギーに対応してほぼ 線形に増加している.また、同一の入力エネルギーに対 しては質量比が大きい方が残留変位が大きいことがわか る.さらに、残留変位に対する質量比の影響は質量比の 小さい領域ほど大きく示されており、質量比が 1.0 以 上では残留変位に対する質量比の影響は非常に小さいこ



図-5 入力エネルギーと最大重錘衝撃力の関係



図-7 入力エネルギーと残留変位の関係

とが分かる.

以上のように、入力エネルギーと残留変位の関係には 極めて高い相関があり、入力エネルギーの大小、言い換 えれば損傷の状況や損傷程度に関わらず、極めて普遍性 の高い関係であることが大型 RC 梁に関する数値解析 結果から明らかとなった.

# 4. 重錘質量の影響に関する検討

図-8には、質量比 W/B と各解析結果による残留変 位δに対して、質量比 W/B=1.25 の場合の残留変位を 1.0 としたときの相対残留変位との関係を示している. これらの値より近似曲線を求めると以下の式となる.

 $\beta = 0.288 \ln (W/B) + 0.9605$  (2)

- ここで, β:残留変位に関する補正係数
  - W/B:質量比
  - W:重錘質量(ton)
  - B: 支点間の梁質量(ton)

本補正係数は,質量比の異なる条件下における大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に資する設計式の確立 に際して非常に有用なものと考えられる.

# 5. まとめ

大型 RC 梁の耐衝撃性能におよぼす重錘質量の影響 を検討することを目的に,数値解析を実施した.本研究



図-6 入力エネルギーと最大支点反力の関係



により得られた結論を以下に要約する.

- 1)重錘質量 W と大型 RC 梁の支点間質量 B との比であ る質量比 W/B が重錘衝撃力や残留変位等に影響を及 ぼすことが数値解析結果により明らかとなった.
- 2)質量比が 1.25 の場合の残留変位を 1.0 としたときの質量比に対する残留変位の補正係数βは、重錘質量を W(ton)、支点間の梁質量を B(ton)とすると、以下のように示される.

 $\beta = 0.288 \ln (W/B) + 0.9605$  (3)

### 参考文献

- 1) 土木学会:構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の 基礎と応用, 2004.3.
- 2)岸 徳光,三上 浩:衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が 卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する 一提案,構造工学論文集,Vol.53A,pp.1251-1260, 2007.3.
- 今野 久志,岸 徳光,石川博之,三上 浩:敷砂 を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験,コンク リート工学年次論文集, Vol.28, No.2, 2006.7.
- 4)岸 徳光:三次元弾塑性有限要素法を用いた実規模 RC桁の重錘落下衝撃挙動解析に関する精度検討, 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文 集,pp.259-271,2006.11.