論文 繰り返し重錘落下を受ける実規模 RC 桁の耐衝撃挙動に関する数値 解析手法の適用性について

玉木 美帆*1・岸 徳光*2・今野 久志*3・三上 浩*4

要旨:本研究では,繰り返し衝撃荷重を受ける実規模 RC 桁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法 を確立することを目的に,合入力エネルギーが等しい条件下で重錘落下高さおよび載荷回数の異なる3体の RC 桁を対象に数値解析を行い,実験結果と比較することによりその妥当性を検討した。検討の結果,提案の 解析手法を用いることにより,1)繰り返し載荷を受ける実規模 RC 桁の重錘衝撃力,支点反力波形およびひ び割れ分布性状は概ね再現可能であること,2)載荷点変位は精度よく再現可能であること,3)繰り返し載荷 時の残留変位等損傷程度を適切に評価可能であることが明らかとなった。

キーワード: RC 桁,繰り返し衝撃載荷,入力エネルギー,最大変位,残留変位,累積残留変位

1. はじめに

近年,耐衝撃用構造物の設計法は,許容応力度設計法か ら構造物の性能を基本とするいわゆる性能照査型設計法 への移行が世界的な趨勢となっている。我が国において も,性能照査型設計法の考え方に基づいた設計への移行 が要望され,土木学会構造工学委員会では小委員会を設 置して,衝撃荷重を受ける構造物に対する同設計法に則 した耐衝撃設計法の確立に向けた検討¹⁾を行っている。

このような状況下,著者らは最も単純な構造部材であ る RC 梁に着目して,数多くの RC 梁を対象に重錘落下衝 撃実験²⁾を行ってきた。また,これらの実験結果を基に して数値解析手法の確立に向けた検討³⁾も行い,実規模 の RC 桁に関しては,一回のみの衝撃荷重載荷(以後,単 一載荷)に対する残留変位と入力エネルギーおよび静的 耐力の関係,桁本体と重錘の質量の比がこれらの関係に 与える影響について定式化するに至っている⁴⁾。

また、衝撃荷重載荷によって使用限界状態に至らずと も鉄筋の降伏やひび割れの発生によって残留変位が生ず る場合には、繰り返し衝撃荷重載荷時における損傷の累 積および残存耐力も評価しなければならない。著者らは、 既往の研究において、各種の繰り返し衝撃荷重載荷を受 ける小型 RC 梁を対象に数値解析的検討を行った。その 結果、各応答の波形性状や最大応答変位、ひび割れ分布 等の種々の特性を精度よく評価可能であることを明らか にしている⁵⁾。一方、大型の RC 桁に関しては、数値解析 的検討は行っているものの⁶⁾、実挙動との比較検討は実 施されておらず、その信頼性の確認はなされていない。

このような観点から、本研究では、繰り返し衝撃荷重 載荷時における実規模 RC 桁の耐衝撃挙動を適切に評価 可能な数値解析手法を確立することを目的に、三次元弾



図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

塑性有限要素法に基づいて数値解析を実施し,実験結果 と比較検討を行うことによって,その妥当性を検討した。 本研究では,3体の大型 RC 桁を用いた,最終的に終局に 至る程度の合入力エネルギーを一定とする繰り返し衝撃 荷重載荷実験結果と比較する形で行うこととした。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-DYNA⁷⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では、実規模構造物として現在の設計法に基づいて設計する場合のRC製ロックシェッドを取り上げ、その頂版部に関する設計断面を対象として実験を行った。 RC桁の形状(桁幅×桁高×純スパン長)は1×1×8m としている。図-1には、RC桁の形状寸法と配筋状況お よび各応答波形の測定番号を示している。また、軸方向 鉄筋およびかぶり厚に関しては、比較的小さい落石荷重 を想定して主鉄筋比を0.4%とし、D25を7本配置してい る。圧縮側の軸方向鉄筋は主鉄筋量の50%を目安にD25 を4本配置した。なお、コンクリートのかぶりは実ロッ クシェッドと同様に150mmとしている。

*1	札幌市役所 (正会員)
*2	室蘭工業大学大学	院 くらし環境系領域 教授 工博 (正会員)
*3	(独)土木研究所	寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)
*4	三井住友建設(株)技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

せん断 計算 計算 計算 主鉄筋比 スパン比 曲げ耐力 せん断耐力 せん断余裕度 a/d P_{usc} (kN) V_{usc} (kN) α p_t 4.71 2.28 0.0042 600 1,369

表-1 静的設計值一覧

表-2 試験体一覧

	試験体名	重錘落下高さ	重錘落下	合入力エネルギー			
		<i>H</i> (m)	回数	E (kJ)			
	H3.3	3.33	3				
	H5	5	2	196			
	H10	10	1				

表-1には, RC 桁の静的設計値一覧を示している。表中,静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は,コン クリート標準示方書⁸⁾に基づき算定している。RC 桁は, せん断余裕度 α (= V_{usc}/P_{usc}) > 1.0 であることより,静載 荷時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。な お,実験時のコンクリートの圧縮強度は 26.2 MPa であっ た。また,鉄筋は全て SD345 であり,降伏強度は D25 と D13 で,それぞれ 404 MPa, 389 MPa である。

2.2 実験方法

本実験では、2 ton の重錘をトラッククレーンを用いて 所定の高さまで吊り上げ, RC 桁のスパン中央部に自由落 下させている。なお、重錘は直径 1 m,高さ 97 cm で底 部が半径 80 cm の球状である鋼製円筒の内部に鋼塊とコ ンクリートを充填して質量を調節している。

RC 桁は支点反力測定用ロードセル付きの支点治具上に 設置し、かつ重錘落下衝突時における桁端部の跳ね上がり を防止するために、鋼製の跳ね上がり防止用治具を用いて 固定している。なお、跳ね上がり防止用治具は支点と共 に軸を中心に回転できるように工夫されている。従って、 支点部の境界条件はピン支持に近い状態となっている。

実験は, **表**-2に示すように, 重錘落下衝撃エネルギー の合計(以降,単に合入力エネルギー)を等しく196 kJ と設定し,H3.3桁は落下高さを3.33mとする3回の繰り 返し載荷,H5桁は落下高さを5mとする2回の繰り返し 載荷,H10桁は落下高さを10mとする単一載荷を行うこ とにより実施した。各実験ケースは,落下回数をハイフ ンで結んで整理することとした。

本実験における測定項目は,重錘衝撃力*P*,両支点の 反力の合計*R*(以降,単に支点反力)および各点の鉛直方 向変位(以降,単に変位)*D*である。なお,変位はスパ ン中央を*D*-1とし,支点に向かって75 cm ピッチに*D*-2~ *D*-6としている。

これらの測定において,重錘衝撃力に関しては,重錘 頂部に設置したひずみゲージ型加速度計(容量:1,000 G, 応答周波数特性:1~5 kHz)から得られる加速度に重錘



図-2 要素分割状況および配筋状況

質量を乗じて評価している。また,支点反力は支点治具 に組み込まれている衝撃荷重測定用ロードセル(容量: 1,500kN,周波数特性:1kHz),各点の変位は非接触式レー ザ変位計(最大ストローク:200 mm,周波数特性:915 Hz)を用いて測定した。各センサーからの出力波形は, サンプリングタイム0.1 msでデジタルデータレコーダに て一括収録を行っている。また,各実験終了後には桁側 面に生じたひび割れ分布をスケッチしている。

3. 数值解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2には、本数値解析に用いた解析モデルの要素分割 状況を示している。本数値解析では、RC桁、重錘および 支点治具も実形状を極力再現する形で詳細にモデル化し ている。解析モデルは、RC桁の対称性を考慮して桁幅方 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。適用した要素タイプは、鉄筋には2節点梁要素を 用い、その他の要素には全て8節点の三次元固体要素を 用いている。なお、支点治具底部には、実験時と同様に 治具全体のx軸回りの回転を許容するように境界条件を 設定している。

三次元固体要素の積分点数は1点積分を基本としてい るが,鉄筋に用いた梁要素に関しては4点積分とした。 また,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。さらに,コンクリートと軸方向鉄筋要素間 には,完全付着を仮定している。

衝撃荷重は,重錘モデルの全節点に落下高さから換算 した衝突速度を初速度として付加することにより作用さ せることとした。また,減衰定数は質量比例分のみを考 慮するものとし,鉛直方向最低次固有振動数に対して1.5 %と設定している。なお,本数値解析で用いた数値解析 モデルの総節点数および総要素数は39,174 および33,965 である。

3.2 繰り返し衝撃荷重載荷時の解析概要

繰り返し衝撃荷重載荷に対する数値解析手法は、以下 のとおりである。

- 1) 重錘要素を繰り返し載荷回数分だけ,予めRC桁上 に仮想的に重複して設置する。
- 2) 1次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の 衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時 間は,重錘がRC桁に衝突した時点からRC桁がほ ぼ定常状態に至るまでとする。本研究の場合には予 備解析を実施し500msとした。なお,減衰定数は, 3.1節に述べているように1.5%とする。
- 3) 1次載荷時の数値解析終了後,計算を一度停止させて、使用した重錘要素を除去し、かつ鉛直方向最低次固有振動数に対する臨界減衰定数を入力して計算を再開させ、RC桁を数値解析的に静止させる。
- 4) 2次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の 衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時 間は一次載荷時と同様に 500 ms とする。なお、減衰 定数は、一次載荷時と同様の値を入力する。
- 5) 以降 n 次載荷終了まで 3), 4) の手順を繰り返す。

3.3 材料物性モデル

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートおよび 鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。なお、高速度載 荷時には材料のひずみ速度効果が発揮されることが知ら れている。しかしながら、本研究で対象としている問題 は中速度載荷問題であることより、以下に述べる簡略化 した物性モデルを適用する条件下で、ひずみ速度効果は 考慮しないこととした。

(1) コンクリート

図-3(a) に示すように, 圧縮側に関しては, 相当ひず みが1,500 µ に達した状態でコンクリートが降伏するもの と仮定し, 完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。 圧縮強度は材料試験結果の値を採用することとし, 引張強 度は圧縮強度の 1/10 と仮定している。なお, 降伏の判定 には, コンクリートの内部摩擦角を 30° と仮定し, 静水 圧成分が零の場合には von Mises の降伏条件式に対応する ように仮定した Drucker-Prager の条件式を採用している。 (2) 鉄筋

図-3(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関す る応力-ひずみ関係を示している。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、弾性係数 E_s およびポア ソン比 v_s には、材料試験結果の値を採用している。また、 単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³ を用いることとした。降伏の判定は、von Mises の降伏条 件に従うこととした。塑性硬化係数H'は、弾性係数 E_s の1%と仮定している。



(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の全要素に関しては,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。要素の弾性係数 E_s ,ポアソン比 v_s には鋼材の公称値を用いることとし,それぞれ $E_s = 206$ 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を仮定し,重錘には重錘質量を重錘モデルの体積 で除した値としている。

4. 実験結果および数値解析結果

ここでは,実験結果と数値解析結果を比較し,数値解 析手法の妥当性を検討する。検討項目は,最大値を含む 重錘衝撃力波形,支点反力波形,載荷点変位波形および ひび割れ分布状況である。なお,繰り返し載荷の載荷点 変位波形に関しては,解析精度を詳細に論じるために,1 次載荷からの累積変位波形ではなく,各載荷時点におけ る応答変位波形について検討を行うこととした。

4.1 重錘衝撃力

図-4には,各試験体における実験結果および数値解析 結果の重錘衝撃力,支点反力,載荷点変位に関する応答 波形を重ねて示している。

図-4(a)より,実験結果の重錘衝撃力波形は衝突速度 によらず,衝撃荷重載荷初期に振幅の大きい波が生じて いることが分かる。これらの波形の継続時間は,衝突速 度に関わらず同程度であり,最大重錘衝撃力はおよそ6 ~12 MN 程度となっている。実験結果と数値解析結果を 比較すると,いずれの桁においても,1次載荷時におけ る数値解析結果は,実験結果よりも波動の立ち上がり勾 配が小さく,かつ最大振幅も小さく示されている。この ような誤差の一因には,ひずみ速度効果を考慮していな いことの可能性も示唆される。一方,数値解析結果には, 落下高さの増加に伴い波形の立ち上がりおよび最大振幅 が大きくなる傾向が見られ,2次,3次載荷時には実験結 果とほぼ対応していることが分かる。

4.2 支点反力

図-4(b)より,支点反力波形は,実験結果と数値解析 結果がともに重錘衝突時点より遅れて励起し,かつ低周 波の正弦減衰振動成分と高周波成分が合成された応答波



形を示している。詳細に見ると,実験結果の最大支点反 力は,重錘の落下高さや繰り返し載荷回数にかかわらず 同程度の値を示しており,後続する振幅および周期等の 波形性状も類似した性状を示している。一方,数値解析 結果の場合には,1次載荷時の最大支点反力は重錘落下高 さにかかわらず同程度の値を示している。また,2次載荷 以降は,載荷回数に対応して減少する傾向を示している。

実験結果と数値解析結果を比較すると、いずれの桁に おいても数値解析結果は、高周波成分が卓越しており、最 大支点反力を過大に評価していることが分かる。しかし ながら、2次載荷以降は大略実験値と同程度の値を示し ていることが分かる。

4.3 載荷点変位

図-4(c)には、実験結果および数値解析結果の変位波 形を示している。原則として載荷点である D-1 点の変位 波形を示しているが、H5桁の場合における 2次載荷時 (H5-2)のD-1点の波形は、かぶりコンクリート塊が変位 計を直撃したことにより測定不可能になったため、D-2点 に関する応答波形を示している。実験結果は、いずれの 試験体においても衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の第1 波が励起した後,減衰自由振動を呈していることが分か る。詳しく見ると,各落下高さにおける1次載荷時の最 大載荷点変位,残留変位は落下高さに対応して増加して いる。また,減衰自由振動の周期に関しても,重錘落下 高さの増加に対応して長くなる傾向が示されている。

合入力エネルギーが等しくなる各桁の最終載荷時(H3.3-3, H5-2, H10-1)について見ると,減衰自由振動の周期が同 程度であり,固有振動周期から評価した曲げ剛性に関す る劣化の程度は,合入力エネルギーが等しい場合には大 略類似することが推察される。

数値解析結果も,実験結果と同様に正弦半波状の第1 波およびその後の減衰自由振動により構成されている。 実験結果と比較すると,最大変位および残留変位は実験 結果と同程度の値を示している。また,減衰自由振動の 周期に関しても,実験結果と対応しており,数値解析結果 は実験結果を概ね再現可能であることが明らかになった。 4.4 各応答値に関する数値解析結果と実験結果の比較

図-5には、各応答値の数値解析結果と実験結果をそれ



図-5 各応答値に関する実験結果と数値解析結果の関係

ぞれ縦軸および横軸に取って整理している。図中の45° 勾配を有する実直線は,数値解析結果と実験結果が一致 していることを,破線はそれに対する誤差幅である。

図-5(a)の最大重錘衝撃力に関する数値解析結果と実 験結果の関係を見ると,誤差が30%領域に分布しており, 数値解析結果は実験結果を再現するには至っていない。

図-5(b)の最大支点反力に関する数値解析結果と実験 結果の関係を見ると,数値解析結果が実験結果よりも大 きくなる傾向にある。また,各桁の1次載荷時の誤差が30 %を上回っている。その要因としては,支点治具による 影響などが考えられるが,詳細は今後の検討課題である。

図-5(c)には、最大変位に関する実験結果と数値解析 結果の関係が示されている。ここでも、4.3 節で述べた ように、H5桁の場合の2次載荷時(H5-2)におけるD-1 点の波形は、かぶりコンクリート塊が変位計を直撃した ことにより測定不可能になったため、ここでは示してい ない。数値解析結果の妥当性を検討すると、全ての実験 ケースで誤差は10%以内であり、両者の値がよく対応し ていることが分かる。また、入力エネルギーの増加に伴 い最大変位が増加していることが分かる。

図-5(d) は累積残留変位に関する比較である。図中, H5-2 は D-1 点の波形が測定不能であったため,目視計測 した値を用いて評価している。なお,累積残留変位は,第 1 次載荷時から累積した残留変位を意味しており,桁の 損傷程度を評価するための物理量の一つである。

図より,H3.3-1を除く実験ケースで数値解析結果との 誤差が10%以内であり,実直線周辺に分布していること から,実験結果と数値解析結果がよく対応していること が分かる。これより各載荷時の残留変位に関しても,数 値解析結果は実験結果をよく再現しているものと判断さ れる。なお,実験終了後における累積残留変位は,H3.3, H5,H10桁でそれぞれ37.8 mm,39 mm,45.9 mm であり,1 次載荷時の入力エネルギーが大きい場合ほど大きいこと が分かる。

4.5 ひび割れ分布性状

図-6には、各載荷終了後の桁側面におけるひび割れ分 布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応 力図を示している。なお、数値解析結果は、図-3(a)で 仮定したコンクリートの材料構成則に基づいてひび割れ 発生位置を特定できるようにするために、第一主応力が零 近傍応力(±0.001 MPa)を示す要素を白色で示している。

まず,実験結果について見ると,図より,H3.3桁の場合には,1次載荷時にはスパン方向に曲げひび割れが広く 分布している。2次載荷以降では,載荷点近傍下縁部の斜 めひび割れおよび上縁の水平ひび割れの進展が見られる。

H5桁の場合には、H3.3桁の場合より曲げひび割れの本 数は少ないものの、載荷点直下近傍部に斜めひび割れが 顕在化していることが分かる。2次載荷時には載荷点近 傍上縁部に水平方向のひび割れが大きく進展している。

H10桁の場合には、載荷点部から広範囲にわたって斜 めひび割れが複雑に形成され、一部の斜めひび割れは上 縁から下縁にまで到達している。また、落下高さの低い H3.3桁やH5桁に見られた曲げひび割れは少ない。従っ て、合入力エネルギーが等しい場合においても、1次載 荷時における入力エネルギーの大きさに対応してひび割 れ分布性状が異なるものと判断される。

次に,実験結果と数値解析結果を比較すると,H3.3 桁 の場合には,1次載荷時の曲げひび割れ性状を,数値解 析結果によりよく再現できていることが分かる。以降,3 次載荷に至るまで,載荷点近傍下縁部の斜めひび割れお よび上縁の水平ひび割れ等,数値解析によって良好に再 現できているものと判断される。

H5 桁の場合には,数値解析結果は1次載荷時には曲げ ひび割れが発生しているものの,載荷点近傍に斜めひび 割れは発生していない。しかしながら,2次載荷時には 曲げひび割れと共に斜めひび割れも発生しており,実験 結果と比較的よく対応しているものと判断される。

H10桁の場合は、実験結果は曲げひび割れと共に大き な斜めひび割れが発生しており、上縁部は圧壊の傾向を





示している。一方,数値解析結果も大略類似したひび割 れ分布性状を示しており,損傷の程度は概ね再現されて いるものと判断される。

5. まとめ

本研究では,耐衝撃用途 RC 構造部材の性能照査型耐 衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として,実規模 RC 桁に関して,単一載荷時と合入力エネルギーが等しい場 合の繰り返し載荷時における数値解析手法の妥当性を検 討することを目的として,重錘落下衝撃実験および数値 解析的検討を行った。なお,合入力エネルギーを 196 kJ とし,重錘の落下高さおよび繰り返し載荷回数の異なる 3 体の試験体に対し実施した。本研究の範囲内で得られ た結果を整理すると,以下のとおりである。

- 提案の数値解析手法を用いることにより、重錘衝撃 力や支点反力波形は、概ね実験結果を再現可能であ る。また、載荷点変位波形は減衰自由振動周期が多 少異なるものの、良好に再現可能である。
- 2) 最大重錘衝撃力および最大支点反力は実験結果を精 度よく再現するには至っていない。しかしながら, 最大変位および累積残留変位に関しては,実験結果 を精度よく再現可能である。
- ひび割れの分布は、斜めひび割れや水平ひび割れの 発生および進展は数値解析で大略再現可能である。

今後は、RC桁のみならず各種RC部材の繰り返し衝撃

荷重載荷実験結果との比較検討を行い,実務への適用性も 含め本数値解析手法の妥当性を検証したいと考えている。

参考文献

- 構造工学技術シリーズ 52 性能照査設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法,土木学会,2007.
- 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,土木学会, Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007.
- 第 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/I-47, pp.215-233, 1999.
- 岸 徳光,今野久志,三上 浩,岡田慎哉:大型 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,土木学会, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.
- 5)岸 徳光,今野久志,三上 浩:RC梁の繰り返し重
 錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション,構造
 工学論文集,土木学会, Vol. 55A, pp. 1225-1238, 2009.
- 6)岸 徳光,今野 久志,三上 浩:実規模 RC 桁の 繰り返し重錘落下衝撃挙動解析に関する破壊エネル ギー等価の概念の適用性検討構造工学論文集,土木 学会, Vol. 56A, pp. 1137-1148, 2010.
- John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2009.3.
- 3) コンクリート標準示方書(2007年制定)設計編,土 木学会,2007.