

繰り返し重錘落下を受ける実規模 RC 桁に関する数値解析的検討

Numerical analysis of RC girders under consecutive falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院
寒地土木研究所
寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院

○フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)
学生員 玉木 美帆 (Miho Tamaki)

1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下において、耐衝撃構造物の設計に関しても性能照査型設計に移行していくことが肝要であると考えられる。合理的な性能照査型耐衝撃設計法を確立するためには、実験的検討は勿論のこと精度の高い数値解析結果も併用して効率的に検討する必要があるものと考えられる。著者らは、過去に RC 部材の衝撃挙動解析に関して、衝撃荷重载荷に対する各種解析手法の妥当性の検討等を実施し、以下の事項を明らかにしている。すなわち、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であること¹⁾、コンクリートの圧縮領域における降伏条件は von Mises の降伏条件より Drucker-Prager の降伏条件が適切であること²⁾を示した。また、引張破壊エネルギー等価の概念を考慮して任意要素の換算引張強度を設定すること³⁾で、より合理的に評価可能であることを示した。しかしながら、これらは小型の RC 梁や単一载荷に対する検討結果から得られたものである。より合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、実規模の桁に対し、単一载荷および繰り返し载荷も含めた総合的な検討が必要であるものと考えられる。

このような観点から、本研究では、実規模 RC 桁に対する繰り返し衝撃荷重载荷に関する実験結果を対象に数値解析を行い、実験結果との比較により数値解析手法の妥当性を検討した。本研究では、特に合入力エネルギーを等しくした場合の耐衝撃挙動に関する検討に重点をおくこととした。

なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 971)⁴⁾を用いている。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要および解析ケース

図-1 には、本実験に用いた RC 桁の断面寸法および配筋状況を示している。RC 桁の形状寸法（桁幅×桁高×純スパン長）は 1,000×1,000×8,000 mm である。引張側の軸方向鉄筋は主鉄筋比を 0.65 % として D32 を 7 本配置し、圧縮側の軸方向鉄筋は引張側鉄筋比の 50 % を目安に D32 を 4 本配置した。また、コンクリートのかぶりは 150 mm としている。帯鉄筋の配置間隔は、桁の有効高さの 1/2 以下とすることとし、D16 を 250 mm 間隔で配置している。軸方向鉄筋の定着は、試験体の定着長を節約

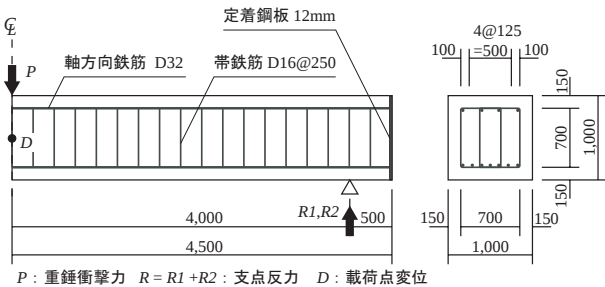


図-1 形状寸法および配筋状況

表-1 静的設計値

主鉄筋比	せん断 スパン比	計算曲げ 耐力	計算せん断 耐力	計算せん断 余裕度
p_t	a/d	$P_{usc}(\text{kN})$	$V_{usc}(\text{kN})$	α
0.0065	4.71	881	2,882	3.27

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	強度 (MPa)	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35×10^3	26.8	22.8	0.206
軸方向鉄筋	7.85×10^3	387.1	210	0.3
帯鉄筋		397.8		

するために桁両端面に厚さ 12 mm の定着鋼板を配置して溶接定着している。支点部は上下方向への変位を抑え回転のみを許容する単純支持に近い支持状態となっている。重錘落下衝撃実験は、質量が 2,000 kg、载荷点部の直径が 1,000 mm の円柱状鋼製重錘を RC 桁のスパン中央部に所定の高さから自由落下させることにより行っている。

表-1 には、RC 桁の静的設計値を示している。表中の静的曲げ耐力 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に基づき算定している。RC 桁は、せん断余裕度が $\alpha > 1.0$ であることより、静载荷時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。表-2 には、コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

表-3 には、本研究の試験体一覧を示している。本研究では、重錘落下高さが 4 m、6 m の繰り返し载荷および落下高さが 12 m の単一载荷実験を行った。表中、記号“H”に続く数字は、落下高さを示している。H = 12 m の場合の入力エネルギーは 235.2 kJ であり、繰り返し载荷終了時の合入力エネルギーも 235.2 kJ と等価となるように、重錘落下高さ 4 m、6 m の場合の载荷回数をそれぞれ 3 回、2 回と設定した。表中の記号“E235”は、合入力エネルギーの概略値を示したものである。

表-3 試験体一覧

解析ケース	重錘落下 高さ (m)	载荷 回数 (回)	入力 エネルギー (kJ)	合入力 エネルギー (kJ)
E235-H4	4	3	78.4	235.2
E235-H6	6	2	117.6	
E235-H12	12	1	235.2	

2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-2には、本数値解析で用いたRC桁の要素分割状況を示している。解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮してスパン方向および断面幅方向にそれぞれ2等分した1/4モデルとし、面对称を設定している。境界条件として、重錘-コンクリート間、支点治具-コンクリート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。また、コンクリート-鉄筋要素間は、完全付着を仮定している。適用した要素タイプは、鉄筋要素に関しては、剛性、断面積、質量を等価とした2節点梁要素を用い、その他の要素には全て8節点固体要素を用いている。要素の積分点は1点積分を基本とし、鉄筋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 2×2 Gauss 積分としている。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。

2.3 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。

図-3(a)には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500 \mu$ 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。引張強度は圧縮強度の1/10と仮定している。また、コンクリートの降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件を適用している。

図-3(b)には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素には、塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の1%とするバイリニア型の等方硬化則を適用している。

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、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 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。なお、重錘に関しては質量が2tonとなるよう、単位体積質量には質量を体積で除した値を入力している。

3. 実験結果と数値解析結果の比較

3.1 重錘衝撃力

図-4には、各試験体の実験結果および数値解析結果の重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位に関する各応答波形を示している。

図-4(a)より、実験結果の重錘衝撃力波形は、いずれの試験体においても衝撃荷重载荷初期に励起する振幅の大きい1波で構成されており、これらの波形の継続時間はいずれの試験体においても4ms程度と同程度であることが分かる。また、最大値については、落下高さが増加す

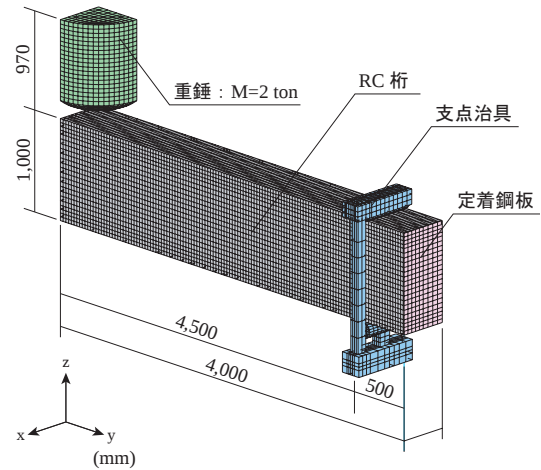


図-2 要素分割状況

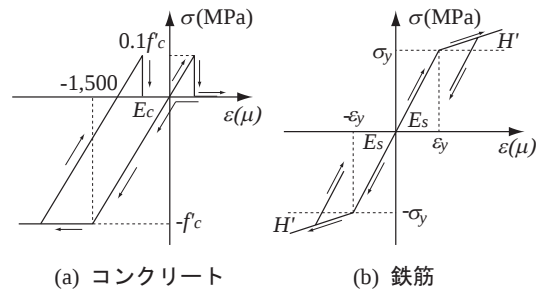


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

るほど大きくなる傾向が見られ、落下高さが等しい場合には载荷回数に関わらず同程度の値を示していることが分かる。数値解析結果について見ると、実験結果と同様に衝撃荷重载荷初期の振幅の大きい1波で示されている。また、重錘落下高さおよび载荷回数の増加に伴い最大値および立ち上がり勾配が増加する傾向が見られる。実験結果と数値解析結果を比較すると、各試験体の一次载荷時に関して、最大値および立ち上がりは、数値解析結果が実験結果よりも小さく示されている。一方、二次载荷および三次载荷の場合は数値解析結果が実験結果と類似した波形を示しており、実験結果と対応していることが分かる。

3.2 支点反力

図-4(b)より、支点反力波形は実験結果、数値解析結果ともに重錘衝突時点より遅れて励起しており、振幅が大きく周期の短い正弦半波とその後の振幅の小さい振動波形からなっている。また、解析結果に関しては高周波成分が卓越しているが、実験結果には顕著には現れていない。詳細に見ると、数値解析結果は実験結果に比較して、一次载荷の段階では最大値は数値解析結果が実験結果よりも大きく示される傾向にある。しかし、二次载荷および三次载荷の場合は、両者同程度の傾向を示している。周期に関しては、落下高さ、载荷回数に関わらず類似した形状を示しており、数値解析結果は実験結果と良く対応していることが分かる。

3.3 载荷点変位

図-4(c)より、実験結果は、いずれの試験体の場合も衝撃荷重载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。また、重錘落下高さの増加に伴って最大振幅、残留変位成分が増加する傾

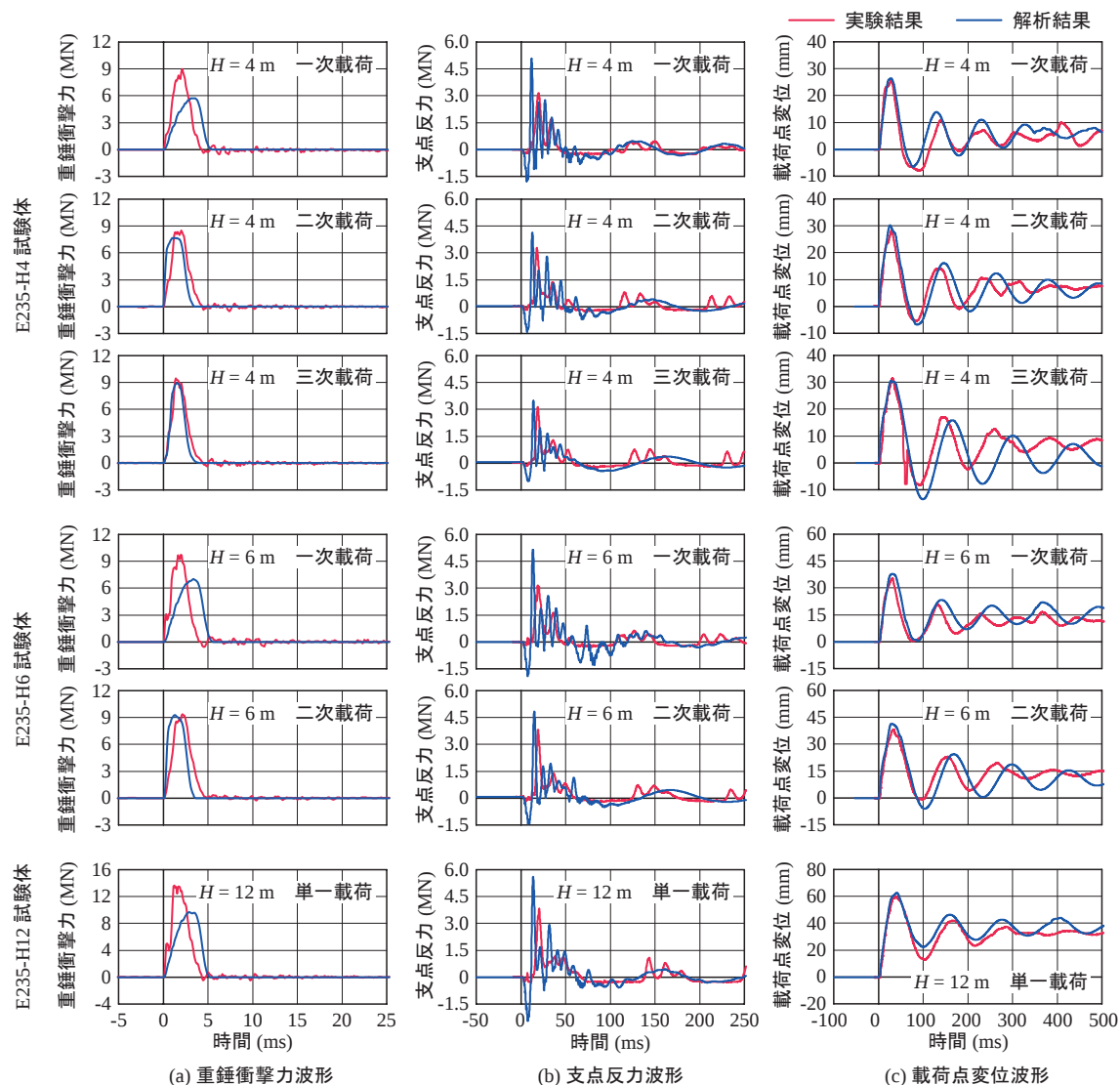


図-4 各応答波形

向を示している。実験結果と数値解析結果を比較すると、最大値に関しては、いずれの試験体においても実験結果と数値解析結果が良く対応していることが分かる。また、載荷回数の増加に伴い、数値解析結果は実験結果よりも、残留変位成分は小さく、周期は長く示される傾向にある。

3.4 ひび割れ分布性状

図-5には、実験終了後の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、数値解析結果においては、ひび割れ発生位置を特定できるようにするため、第一主応力が零近傍応力($-0.001 \sim 0.001$ MPa)状態を示す要素を白色で示している。

実験結果を見ると、 $H=4$ m の場合は、一次載荷時に曲げひび割れが発生し、載荷回数の増加とともに下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、上下縁かぶりに水平ひび割れが発生していることが分かる。 $H=6$ m の場合は、 $H=4$ m の場合と同様、載荷回数の増加に伴う曲げひび割れの進展に加えて載荷点部から下縁に約 45° の斜めひび割れの発生も確認できる。 $H=12$ m の場合には、曲げひび割れに加え、斜めひび割れが顕著に現れており、載荷終了時の合入力エネルギーが同じ場合においても、載荷回数の減少に伴い、破壊性状が曲げ破壊型からせん断

破壊型へと変化していることが分かる。

数値解析結果と実験結果を比較すると、いずれの試験体においても数値解析結果の方が、実験結果より曲げひび割れが多く発生する傾向にあるものの、載荷回数の増加によるひび割れの進展やひび割れの発生密度は概ね対応していることが分かる。

3.5 入力エネルギーと載荷点変位関係

図-6には、横軸に入力エネルギーを取り、縦軸に最大変位、残留変位および累積残留変位を取って整理している。図-4(a)より、最大変位については、載荷ごとの入力エネルギーが等価であれば、損傷の有無に関係なくほぼ同じ値を示している。また、各試験体の一次載荷について比較すると、入力エネルギーと最大変位は比例関係にあることが分かる。図-4(b)の残留変位について見ると、落下高さ $H=4$ m および $H=6$ m の場合、実験結果と数値解析結果の差が見られる。入力エネルギーに関する傾向について見ると、載荷ごとの入力エネルギーが同じであれば、残留変位は同程度の値を示すことが分かる。また、各試験体の一次載荷に着目すると、入力エネルギーと残留変位は比例関係にあることが分かる。図-4(c)の累積残留変位について見ると、入力エネルギーの増加に伴

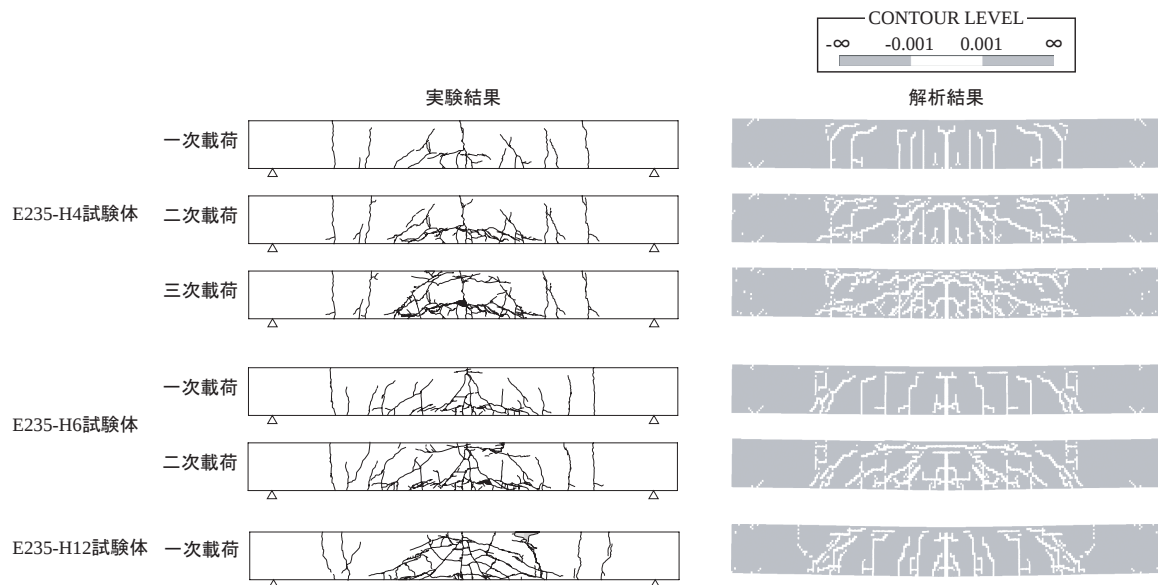


図-5 ひび割れ分布性状

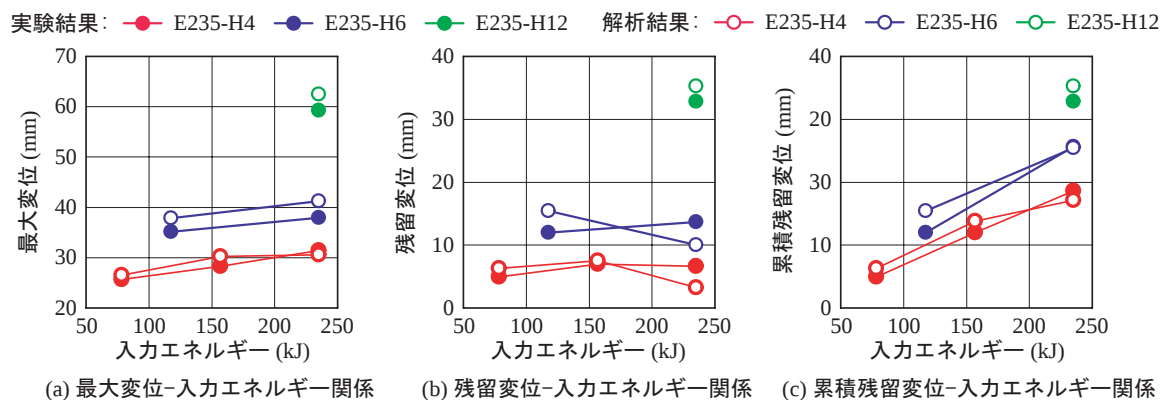


図-6 各応答値-入力エネルギー関係

い累積残留変位に増加が見られ、入力エネルギーと累積残留変位にはほぼは比例関係があることが分かる。また、落下高さが高くなると、入力エネルギーが等価であっても累積残留変位が増加する傾向にあることが分かる。これは、3.5で述べた、落下高さの増加に伴い、破壊性状が曲げ破壊型からせん断破壊型へと移行することに起因しているものと考えられる。

4. 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、桁部材を対象として衝撃荷重載荷時の評価法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析手法を提案し、繰り返し載荷および単一載荷時の実験結果と比較することにより、数値解析の妥当性および入力エネルギーとの関係について比較検討を行った。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。

- 1) 単一載荷および繰り返し載荷いずれの場合も、重錘衝撃力波形、支点反力波形および載荷点変位波形は、大略再現可能である。
- 2) ひび割れ分布性状に関しても、実験結果をほぼ再現可能である。

- 3) 最大変位、残留変位は入力エネルギーと比例関係にあり、入力エネルギーが等価の場合は累積損傷の有無に関係なく同じ値を示す。
- 4) 同一入力エネルギーの場合において各載荷時の入力エネルギーが少ない場合には曲げ破壊型を、大きい場合にはせん断破壊型の傾向を示す。また、それに対応して累積残留変位は大きくなる傾向を示す。

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 桁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619 / I-47, pp.215-233, 1999.4
- 2) 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答下解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.53, pp.1227-1238, 2007.3
- 3) 岸 徳光, Abdul Qadir Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉: 破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.52, pp.1261-1272, 2007.3
- 4) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2009.4.