

破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁の 繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討

An applicability of impact response analysis method for prototype RC girders under consecutive falling-weight impact loading
by using an equivalent fracture energy concept for concrete elements

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
寒地土木研究所
寒地土木研究所

○ 学生員 玉木 美帆 (Miho Tamaki)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正 員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)

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、実験結果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⁾や、コンクリート要素に関しては、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で、より合理的に評価可能であること³⁾を明らかにしている。しかしながら、上記の引張破壊エネルギー等価の概念の適用は、単一载荷に対する検討結果に基づき得られたものであり、より合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、単一载荷のみならず、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判断される。

このような観点から、本研究では、繰り返し载荷および単一载荷を受ける実規模 RC 桁に関するコンクリート要素に対して、張破壊エネルギー等価の概念を適用した場合の妥当性について検討を行ったので報告する。

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厚は 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

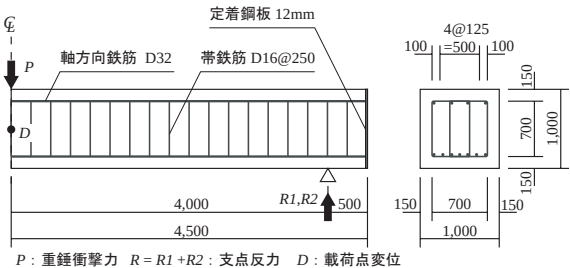


図-1 形状寸法および配筋状況

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} (kN)	V_{usc} (kN)	α
0.0065	4.71	881	2,828	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 ρ (kg/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (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		

置している。軸方向鉄筋の定着は、試験体の定着長を節約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 ton、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。表中、記号 "H" に続く数字は、重錘落下高さを示している。落下高さは 4 m、6 m、12 m の 3 種類とし、载荷終了時の合入力エネルギーが 235 kJ と等価となるよう、载荷回数をそれぞれ 3 回、2 回、1 回と設定した。なお、ハイフンで繋がれる "I" は繰り返し载荷の場合を示し、付随する数

表－3 試験体一覧

試験体	重錘落下高さ (m)	载荷回数 (回)
H4-I3	4	3
H6-I2	6	2
H12-S	12	1

表－4 換算引張強度一覧

解析ケース	軸方向要素長 (mm)	換算引張強度 (MPa)	備考
MS250-N	250.0	2.68	破壊エネルギー等価の概念を考慮せず
MS83-N	83.3		
MS50-N	50.0		
MSmix-N	250.0		
MS250-G _f	250.0	1.01	破壊エネルギー等価の概念を考慮する
MS83-G _f	83.3	1.75	
MS50-G _f	50.0	2.26	
MSmix-G _f	250.0	1.01	
MS35	35.7	2.68	基準要素長

字は载荷回数を示している，記号“S”の場合は単一载荷であることを示している。

本研究では，引張破壊エネルギー等価の概念（以後，単に「G_f」）の導入について検討するため，コンクリート要素の軸方向要素長（以後，単に「要素長」）を 250.0 mm，83.3 mm，50.0 mm，35.7 mm と変化させ解析を行った．表－4 には，各解析ケースの要素長および換算引張強度を示している．解析ケースにおいて，記号“MS”に続く数字はコンクリート要素長の概略値を示している．また，ハイフンで繋がれる“N”は，正規のコンクリートとして処理し，G_fを適用しない場合であり，“G_f”は G_fを適用し換算引張強度を考慮する場合である．なお，支点治具近傍は要素長を基準要素長である 35.7 mm とし，“MSmix”の場合は重錘落下部近傍に関しても要素長を 35.7 mm としている．

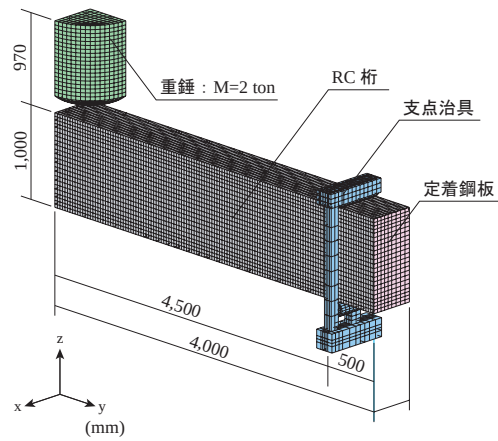
2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図－2 には，本数値解析で用いた RC 桁の要素分割状況の一例として MS35 の場合を示している．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，面対称を設定している．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．

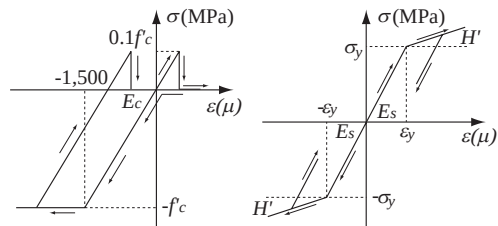
2.3 材料物性モデル

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



図－2 要素分割状況 (MS35)



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図－3 各材料の応力－ひずみ関係

係を示している．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．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 $E_s = 206$ GPa， $\nu_s = 0.3$ ， $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³ と仮定している．また，重錘の単位体積質量は，重錘質量が 2ton となるよう，質量を体積で除した値を入力している．

3. 数値解析結果

3.1 各応答波形

図－4，図－5 には，実験結果および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の一例として，H4-I3 試験体の場合を示している．前者は G_f を考慮する場合，後者は G_f を考慮しない場合である．

(1) G_f を考慮する場合

図－4 (a) には，重錘衝撃力波形を示している．実験結果について見ると，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，これらの波形の最大値，継続時間はいずれの場合も同程度の値を示していることが分かる．実験結果と数値解析結果を比較すると，最大値については，一次载荷および二次载荷時には，数値解析結果は実験結果と概ね対応していることが分かる．三次载荷時に着目すると，要素長の長い MS83，MS250 の場合，

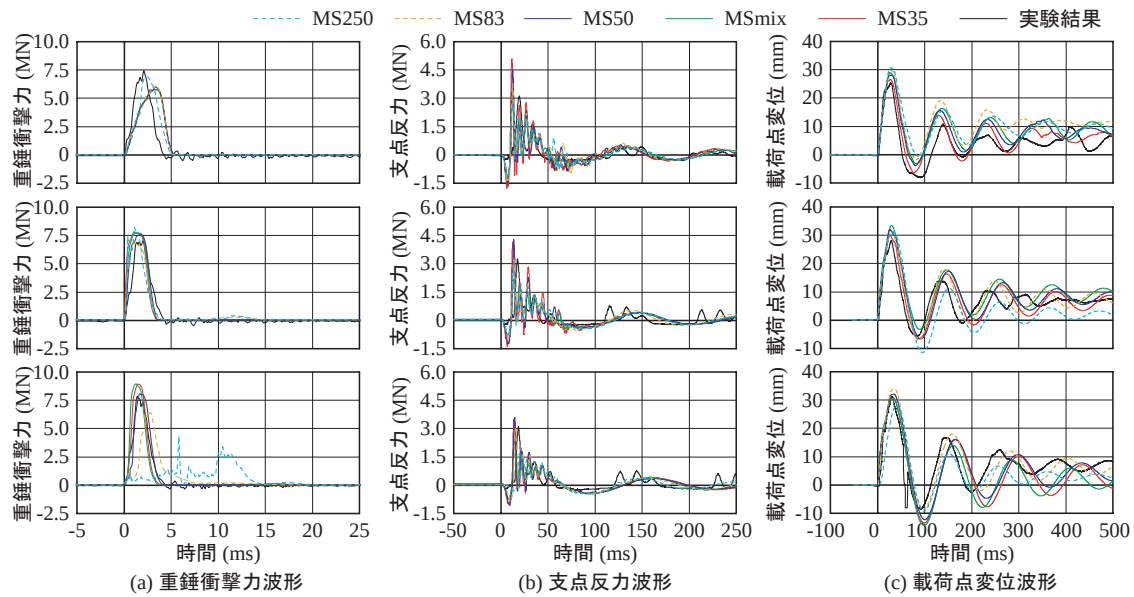


図-4 G_f を考慮した場合の各応答波形 (H4-I3)

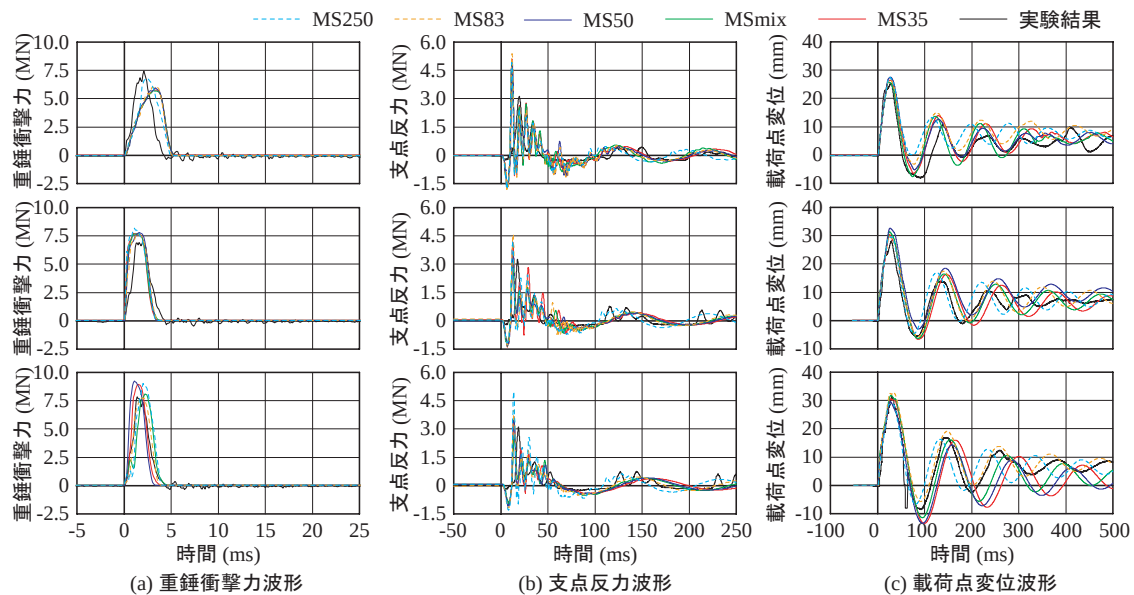


図-5 G_f を無視した場合の各応答波形 (H4-I3)

数値解析結果と実験結果の差が大きい。一方、MSmix 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いることより、衝撃荷重を受ける重錘落下部近傍の要素長を細かくすることで、要素長が長い場合でも衝撃力を再現できるものと推察される。

図-4 (b) より、支点反力波形の実験結果は、重錘衝突時点より遅れて励起し、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構成されている。実験結果と数値解析結果を比較すると、最大値は要素長による差が見られるが、その他の波形性状については実験結果を良く再現していることが分かる。

図-4 (c) には載荷点変位波形を示している。実験結果、数値解析結果ともに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。詳細に見ると、最大値に関して、数値解析結果は要素長に関わらず実験結果と同程度の値を示している。振動周期および残留変位成分に関しては、一次載荷時には

要素長に関わらず概ね実験結果と対応している。しかし、載荷回数の増加に伴い、要素長による差が大きくなる傾向にあることが分かる。

(2) G_f を考慮しない場合

図-5 (a) には、最大重錘衝撃力波形を示している。いずれの要素長の場合も最大値および継続時間に関して、要素長による差が見られるが、その差は小さく、要素長の影響は少ないものと判断される。

図-5 (b) より、支点反力について見ると、最大値は要素長による差が見られ、 G_f を考慮する場合と比較すると、 G_f を考慮しない場合が考慮する場合より、要素長による影響が現れている。また、周期に関しては、要素長による差が見られるものの、その影響は小さい。

図-5 (c) には載荷点変位波形を示している。最大値に関しては、要素長に対する差は少なく数値解析結果が実験結果と対応していることが分かる。周期を見ると、 G_f を考慮する場合よりも要素長による差が大きく、 G_f を考

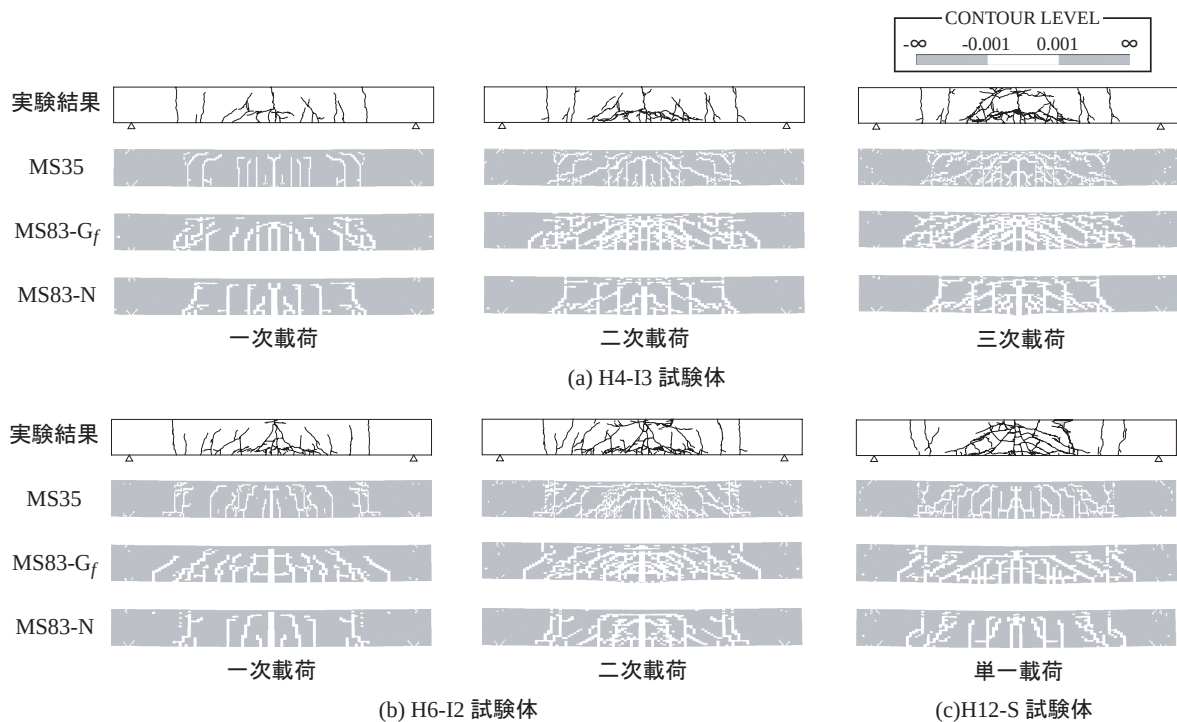


図-6 ひび割れ分布性状

慮しないことによる影響が現れていることが分かる。

なお、H6-I2 および H12-S 試験体の応答波形においても、同様の傾向があることを確認した。

3.2 ひび割れ分布性状

図-6 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。数値解析結果においては、ひび割れ発生位置を特定するため、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。なお、 G_f の影響について検討をするため、数値解析結果の一例として MS35 と MS83-N/ G_f の場合を示している。

実験結果について見ると、H4-I3 試験体の場合は、一次载荷時に曲げひび割れが発生し、载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。H6-I2 試験体の場合は、载荷回数の増加に伴う曲げひび割れの進展に加えて斜めひび割れの発生が確認できる。H12-S 試験体の場合も同様、曲げひび割れおよび斜めひび割れが現れている。

実験結果と数値解析結果を比較すると、MS35 の場合は曲げひび割れおよび斜めひび割れ分布が良く再現されていることが分かる。MS83 に関しては、 G_f を考慮する場合には、数値解析結果の方が実験結果よりもひび割れが多く発生しているものの、概ね実験結果と対応していることが分かる。一方、 G_f を考慮しない場合を見ると、数値解析結果は実験結果よりもひび割れの発生が少なく、 $H = 12$ m の場合はその差が顕著に現れている。

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繰り返し衝撃荷重載荷時の簡易な数値解析手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数値解析の検討を行った。本研究では、特にコ

ンクリート要素長に対し引張破壊エネルギー等価の概念を考慮する場合の妥当性について、合入力エネルギーが等しい場合の繰り返し载荷実験や単一载荷実験結果に着目して検討を行った。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) 重錘衝撃力波形、支点反力波形に関して、引張破壊エネルギー等価の概念を導入することにより、概ね実験結果を再現可能である。また、引張破壊エネルギー等価の概念を考慮することの有無、要素長による影響は少ない。
- 2) 载荷点変位の最大値に関しては、精度良く実験結果を再現可能であり、除荷後の減衰自由振動特性は、引張破壊エネルギー等価の概念を導入することで大略実験結果が再現可能である。
- 3) ひび割れ分布性状に関しては、引張破壊エネルギー等価の概念を考慮することで、曲げひび割れおよび斜めひび割れ分布を精度良く再現可能である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静载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.