

重錘落下衝撃荷重を受ける実規模 RC 桁に関する 弾塑性応答解析手法の妥当性検討

An applicability of elastic-plastic response analysis method for prototype RC girders under falling-weight impact loading

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
(独) 北海道開発土木研究所 正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 ○ 学生員 名雪 利典 (Toshinori Nayuki)

1. はじめに

我が国において、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、現在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、構造物の耐衝撃設計は依然として許容応力度設計法に基づいて実施されているのが実状である。一方、北海道開発土木研究所では RC 型ロックシェッドの合理的な耐衝撃設計法の確立に向けた研究の一環として、実規模 RC 桁を用いた重錘落下衝撃実験を実施している。しかしながら実規模試験体を用いる場合には、大型重機を用いなければならないこと等、経済的な面からそれほど容易ではない。これに対して、数値解析の手法の場合には、昨今のコンピュータ技術の進歩により、大学等の研究機関においても比較的容易になっている。RC 部材の衝撃挙動解析に関しては、小型部材を対象に各種解析手法の妥当性検討が実施されており、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が可能になっている。しかしながら、実規模 RC 部材に対する解析手法に関しては未だ確立されるに至っていない。

このような背景から、本研究では、実規模 RC 桁に関する衝撃応答解析手法を確立することを目的に、実規模 RC 桁に関する重錘落下衝撃実験結果を対象に、プレ解析とポスト解析を実施したので報告する。なお、プレ解析は小型 RC 梁に対して確立されている手法¹⁾に基づいて実施している。また、本数値解析には、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA²⁾を用いている。

体)について検討を行っている。A 試験体に関しては、実規模構造物として RC ロックシェッドを取り上げ、その頂板に関する設計断面を対象として実験を行うことより、断面形状(桁幅×桁高)を 1,000×1,000 mm の矩形断面、純スパン長をロックシェッドの幅と同程度である 8,000 mm とした。主鉄筋には D32 を用い、ピッチは 125 mm または 250 mm を標準としている。上側鉄筋は 4 本、下側鉄筋は 7 本配置し、桁両端面で厚さ 12 mm の定着鋼板に溶接定着している。またせん断補強筋には D16 を用い、スパン方向に 250 mm ピッチで中間配置している。鉄筋量は静載荷時に曲げ破壊が先行するように設定している。B 試験体に関しては、静的曲げ耐力が A 試験体の 0.7 倍程度、主鉄筋比が同程度となるように設定しており、桁高を 850 mm とし、主鉄筋には D29、帯鉄筋には D13 を用いている。

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に基づいて算定している。試験体は、せん断余裕度が $\alpha (=V_{usc}/P_{usc}) > 1.0$ であることより、静載荷時には設計的に曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。

表-2, 3 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。

重錘による入力エネルギー量は、RC 桁が曲げ破壊により終局に至ることを前提に、著者らによって提案されている耐衝撃設計用静的曲げ耐力評価式³⁾を基本に決定した。

2. 実験概要

図-1 には、本数値解析で対象とした実規模 RC 桁の形状寸法と配筋状況図および各応答値の測定項目を示している。本研究では、スパン長および帯鉄筋配置間隔が等しく、断面形状および鉄筋径が異なる 2 つの試験体 (A, B 試験

表-1 試験体の静的設計値一覧

試験体名	主鉄筋比 ρ_t	曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 α
A	0.0065	785	2671	3.40
B	0.0064	523	1700	3.25

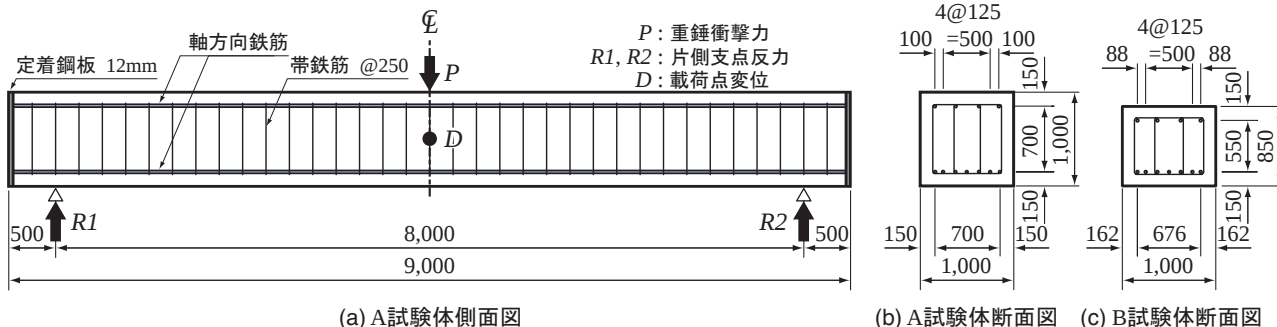


図-1 RC 桁の形状寸法および配筋状況図

表-2 コンクリートの力学的特性値

試験体名	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比 ν_c
A	22	33.3	26.0	0.192
B	43	31.2	25.4	0.177

表-3 鉄筋の力学的特性値一覧

試験体名	鉄筋名称	鋼材種	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
A	D16	SD345	403	206	0.3
	D32		382		
B	D13		390		
	D29		401		

すなわち、A 試験体の場合には質量 2,000 kg の重錘を 20 m の高さから、また、B 試験体の場合には 10 m の高さから落下させることとした。さらに、両試験体で同じ落下高さの 5 m についても同様に実施し、計 4 ケースで検討を行っている。

本実験では、2,000 kg 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、脱着装置を用いて RC 桁のスパン中央点に限定して自由落下させることにより行っている。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、かつ桁上面に跳ね上がり防止用治具を設けている。支点治具は軸を中心に回転できるように工夫されており、支点部の境界条件はピン支持に近い状態となっているものと推察される。

3. プレ解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

図-2(a)には、プレ解析で用いた有限要素モデルの要素分割状況を示している。RC 桁部のスパン方向の要素分割に関しては、小型 RC 梁の場合¹⁾と同様に荷重点から桁端部に向かって徐々に粗になるようにモデル化している。解析対象は、RC 桁の対称性を考慮してスパン方向および桁幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとし、面对称を設定している。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、その他の要素を全て 8 節点の 3 次元固体要素とした。図-2(b)には、軸方向鉄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 A 試験体で 12,083、10,698、B 試験体で 11,028、9,376 である。

各構成要素に関するモデル化について述べると、RC 桁部は、実験に用いた桁の形状寸法に基づいて忠実にモデル化している。ただし軸方向鉄筋および帯鉄筋のモデル化には梁要素を用いているため直線要素で表示される。また、重錘部は、実形状に即し、直径 1,000 mm、高さ 970 mm で底部が半径 800 mm の球体となるようにモデル化している。支点治具部は、ロードセルや跳ね上がり防止用治具も含め、実構造に即して忠実にモデル化することとした。なお、支点の底部には、実験時と同様に治具全体の x 軸周りの回転のみを許容するように境界条件を設定している。

要素の積分点数に関しては、固体要素に対して 1 点積分を、鉄筋のモデル化に用いている梁要素に対しては 4 点積分を行うこととしている。コンクリートと重錘および支点

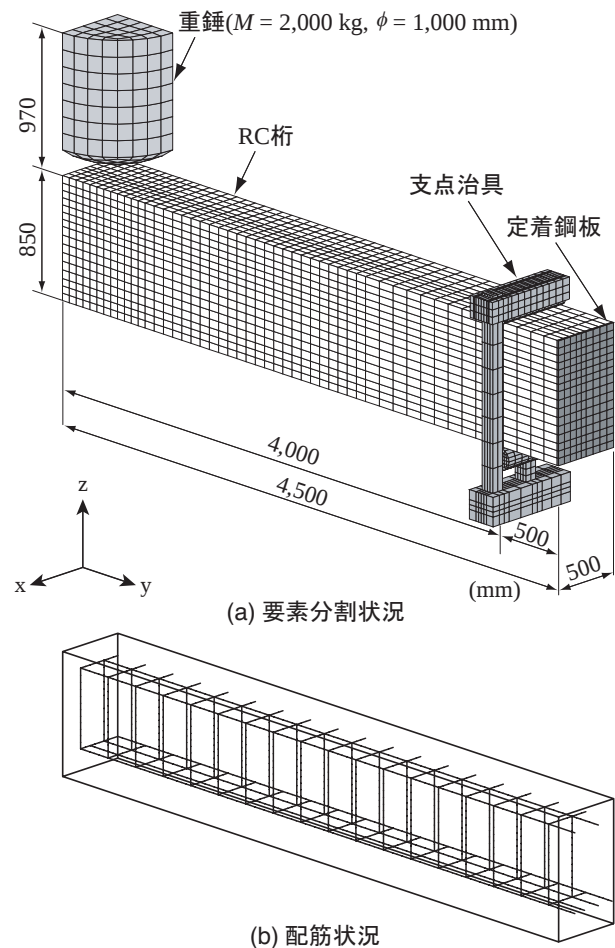


図-2 プレ解析モデル (例: B 試験体)

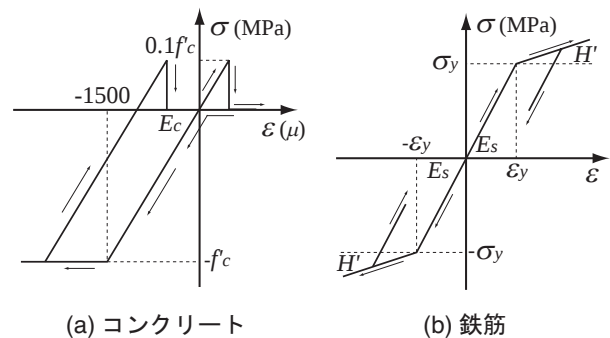
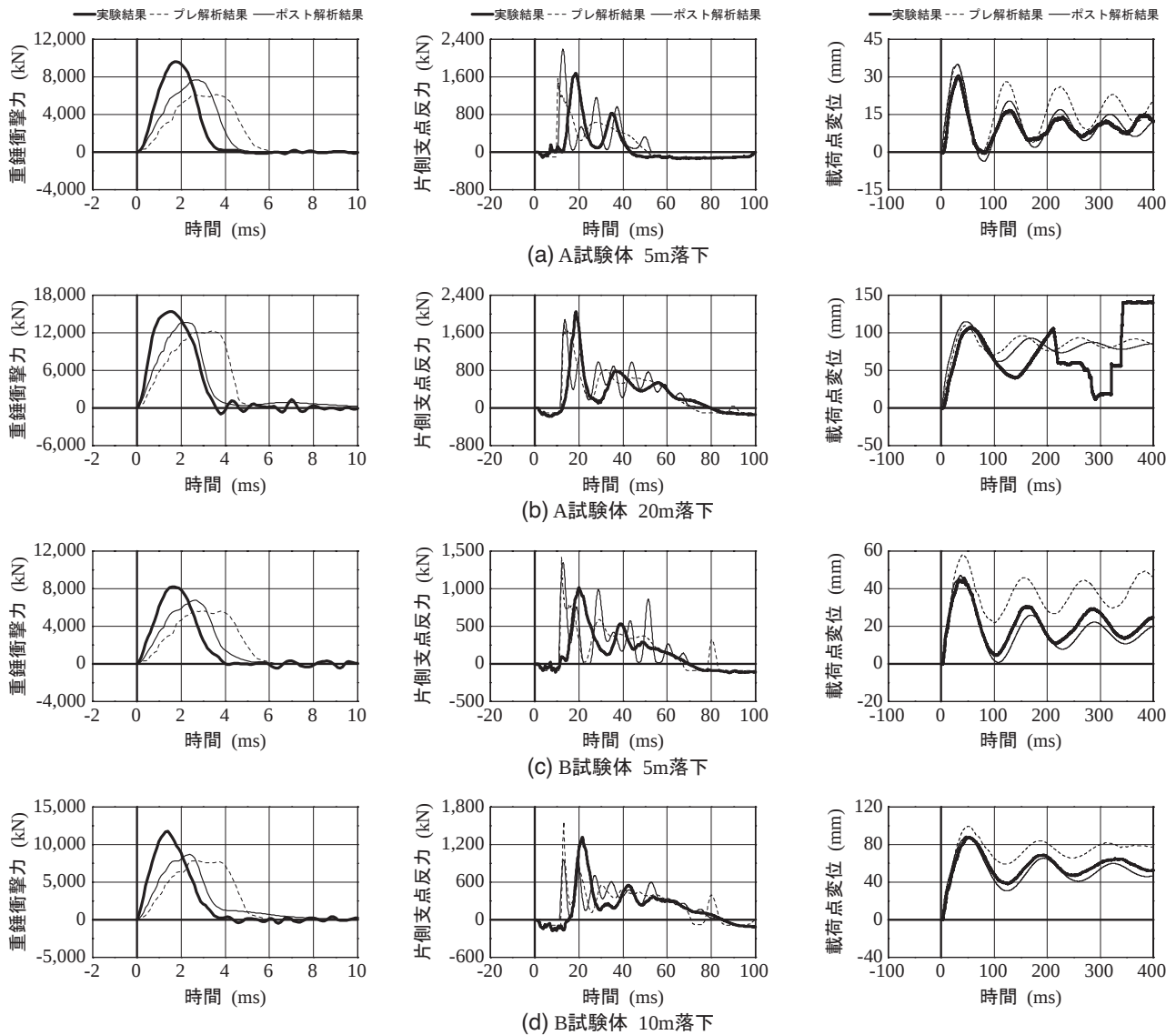


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

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。また、コンクリートと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 RC 桁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付加することにより発生させることとした。質量に比例する粘性減衰定数は、RC 桁の最低次固有振動数に対して、プレ解析においては 0.5% を設定している。全解析時間は、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の 400 ms としている。また、実規模部材の衝撃問題については、自重による死荷重の影響が大きいことが予想されるため、自重を考慮することとした。数値解析では、まず自重解析を行い、その後重錘を衝突させている。



図－4 各種応答波形比較図

3.2 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等価1軸応力－ひずみ特性を示している。以下に、コンクリートと鉄筋等に関する材料物性モデルの概要を述べる。

(1) コンクリート

コンクリート要素に用いた物性モデルは、LS-DYNAコード²⁾に組み込まれている弾塑性体モデルである。このモデルは、圧縮側に対しては折線近似による相当応力－相当ひずみ関係、引張側に対しては線形の相当応力－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。ここでは、圧縮側に関しては、図－3(a)のように相当ひずみが $1,500\mu$ に達した状態でコンクリートが降伏に至るものと仮定する完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。降伏の判定には、プレ解析においてはvon Misesの降伏条件式を採用している。なお、引張強度は過去の小型RC梁に関する数値解析¹⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。引張側の圧力は、要素内に生じる3方向の直応力の平均値として評価している。

(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等価1軸応力－ひずみ特性を示している。軸方向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 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表－3に示されている値を採用している。また、単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 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 、ポアソン比 ν 、単位体積質量 ρ には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。

4. ポスト解析の修正点

降伏条件式：コンクリート要素に対して、von Misesの降伏

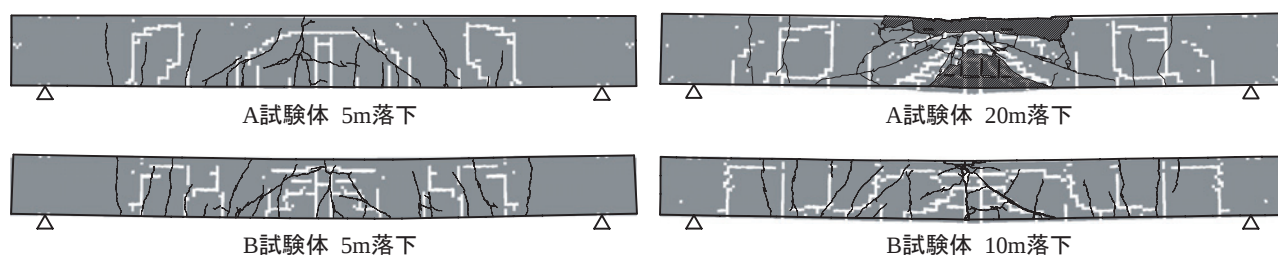


図-5 実験終了後のひび割れ分布と第一主応力分布図

条件式から Drucker-Prager の降伏条件式に変更している。

要素分割：全構成要素に対し、より細かい要素分割を行い、総節点数および総要素数はそれぞれ A 試験体で 41,236, 37,220, B 試験体で 33,961, 30,404 に増加させている。

自重：自重は考慮しないこととした。

減衰定数：0.5%から 1.5%に変更している。

5. 解析結果と実験結果の比較

5.1 各応答波形

図-4 には、重錘衝撃力、片側支点反力、荷点変位の各種応答波形に関するプレ解析結果およびポスト解析結果を、実験結果と比較して示している。

重錘衝撃力波形についてみると、ポスト解析結果はプレ解析結果と比較して立ち上がりの時間勾配が大きく、実験結果により近い挙動を示していることがわかる。これは Drucker-Prager の降伏条件式を用いることにより、衝突部の局所的な 3 次元拘束効果によってコンクリートの降伏強度が向上していることによるものと推察される。しかしながら、未だ実験結果の時間勾配程度には大きくならず、最大値も若干小さく示されている。

片側支点反力波形についてみると、数値解析結果は、実験結果と比較して時間勾配が重錘衝撃力波形の場合と異なり大きく示されているものの、主波の継続時間は実験結果と良く対応していることがわかる。また、両解析結果において互いに最大値にばらつきがあるものの、その波形性状に大きな差異はみられない。なお、プレ解析結果においては、自重解析終了後に応答値を初期化していることより、実験結果と同様に負反力の測定が可能となっている。

荷点変位波形についてみると、A 試験体 20 m 落下における実験結果は、他のケースとは異なっている。これは、図-5 から明らかなように重錘衝突により RC 桁の側面かぶりが剥落し、レーザ変位計の反射板も落下したことにより、荷点変位波形を正確に判定できなくなったことによるものである。その他のケースにおいては、ポスト解析結果は実験結果と非常に良く対応していることがわかる。ポスト解析における大きな変更点は自重を無視したことである。自重を無視することによって実験結果と対応することの力学的な根拠は現在のところ不明である。なお、小型 RC 梁に関する重錘落下衝撃解析においては、自重による影響は小さいことが明らかになっている。

5.2 第一主応力分布図

図-5 には、実験終了後のひび割れ分布性状とポスト解析によって得られた最大応答時における第一主応力分布図を併せて示している。図-5 の第一主応力分布について、コンクリートの材料物性モデルの考え方に基づくと、白色

の領域（コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001$ MPa の範囲）は引張破壊要素あるいは応力零近傍要素であることを意味しており、大きい応力が想定される領域ではひび割れが発生しているものとして評価することが可能である。

図-5 の数値解析によって得られた第一主応力分布図より、荷点付近の曲げひび割れとせん断ひび割れが混在した破壊性状やスパン中央下縁部から進展する曲げひび割れや支点近傍に分布する上下縁に進展する鉛直方向ひび割れ等、いずれのケースにおいても非常に良くその分布性状を再現している。RC 桁に対して細かい要素分割を施すことで、実験結果と良く対応したひび割れ性状の予測が可能であることが明らかになった。しかしながら、A 試験体落下高さ 20 m のケースの桁側面かぶり剥落を再現するには至っていない。

6. まとめ

本研究では、実規模 RC 桁に関する衝撃応答解析手法を確立することを目的に、実規模 RC 桁に関する重錘落下衝撃実験結果を対象に、プレ解析とポスト解析を実施、検討を行った。本研究で得られた事項を整理すると、

- (1) 重錘衝撃力波形について、コンクリート材料に対して Drucker-Prager の降伏条件式を用いることで局所的な拘束効果を考慮することができ、実験結果により近い挙動が得られる。
- (2) 片側支点反力波形について、本研究におけるポスト解析の修正点に対して顕著な差異はみられなかった。
- (3) 荷点変位波形について、自重を考慮しない場合の方が実験結果に非常に良く対応した数値解析結果が得られる。
- (4) RC 桁に対して、細かい要素分割を施し、最大変位時の第一主応力を用いることにより、実験結果と良く対応したひび割れ分布を再現することが可能である。

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, 1999.4
- 2) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤 智啓: 静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.171-190, 2000.4