

RC 桁の重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical analysis of RC beams under falling-weight impact loading

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

○学生会員 玉木 美帆 (Miho Tamaki)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
正会員 今野 久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

道路の安全対策用施設構造物の1つにロックシェッドを代表とする落石防護構造物がある。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、衝撃荷重載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、1)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、2)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や、3)破壊エネルギー等価の概念を導入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を示した。しかしながら、これらの事項は単一載荷に対する検討結果より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、単一載荷のみならず、繰り返し載荷も含めた総合的な検討が必要であるものと推察する。

このような観点から、本研究では、実規模RC桁を対象に単一載荷時の数値解析を基準にして、繰り返し載荷時についても比較検討を行い、より信頼性の高い耐衝撃設計法の確立に向け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1,000×1,000×850 mmである。軸方向鉄筋は主鉄筋比を0.64%としてD29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D29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、D13を250 mm間隔で配置している。なお、試験体は曲げ破壊先行型とするために、図-1に示すように中間帯鉄筋を配置してせん断耐力を向上させることとしている。軸方向鉄筋の定着は、試験体の定着長を節約するた

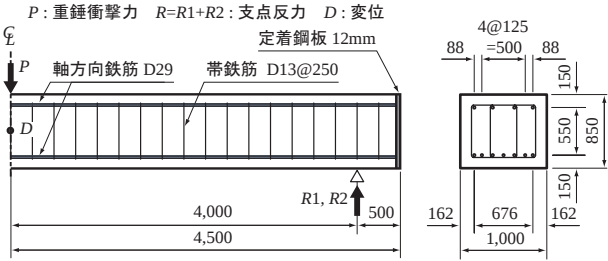


図-1 形状寸法および配筋状況

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
0.0064	5.71	621	1,794	2.89

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	密度 $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	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	31.2	20.8	0.167
軸方向鉄筋	7.85×10^3	401	206	0.3
スタースラップ		390		

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。支座位は上下方向への変位を抑え回転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、載荷点部の直径が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梁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、静載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。

本研究では、RC桁への衝撃荷重載荷に対する、降伏条件や破壊エネルギー等価の概念の導入についての相互関係を検討するため、表-3のような解析ケースを設定した。表中、記号“MS”に続く数字は、軸方向要素長(mm)の概略値を示し、降伏条件については、記号“VM”の場合は von Mises の降伏条件を適用し、記号“DP”の場合は Drucker-Prager の降伏条件を適用することとする。また、単一衝撃荷重載荷に関しては実験を行っており、重錘落下

表-3 解析ケース一覧

解析ケース	载荷方法	重錘落下高さ (m)	降伏条件	軸方向要素長 (mm)
S5/10-VM-MS35	単一 载荷	5/10	von Mises	35
S5/10-VM-MS83				83
S5/10-VM-MS250				250
S5/10-DP-MS35			Drucker- Prager	35
S5/10-DP-MS83				83
S5/10-DP-MS250				250
R-VM-MS35	繰り 返し 载荷	1 ~ 10	von Mises	35
R-VM-MS83				83
R-VM-MS250				250
R-DP-MS35			Drucker- Prager	35
R-DP-MS83				83
R-DP-MS250				250

高さが $H=5\text{ m}$ 、 $H=10\text{ m}$ の場合において実験を実施している。記号 "S" に続く数字は、重錘落下高さ (m) を示している。

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節点の梁要素を用い、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。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8点積分としている。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 繰り返し衝撃荷重载荷時の解析概要

本数値解析では、繰り返し衝撃荷重载荷実験時の状況を適切に再現するために、以下の手順で数値解析を実施している。

- 1) 重錘要素を繰り返し载荷回数分だけ、予め RC 桁上に重複して設置する。
- 2) 一次载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の 400 ms とする。なお、減衰定数は、前項で述べているように、鉛直方向最低次固有振動数に対して1.5%とする。
- 3) 一次载荷時の数値解析終了後、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 200 ms 間の数値解析を実施し、RC 桁を数値解析的に静止させる。同時に一次载荷時に使用した重錘要素を除去する。
- 4) 二次载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

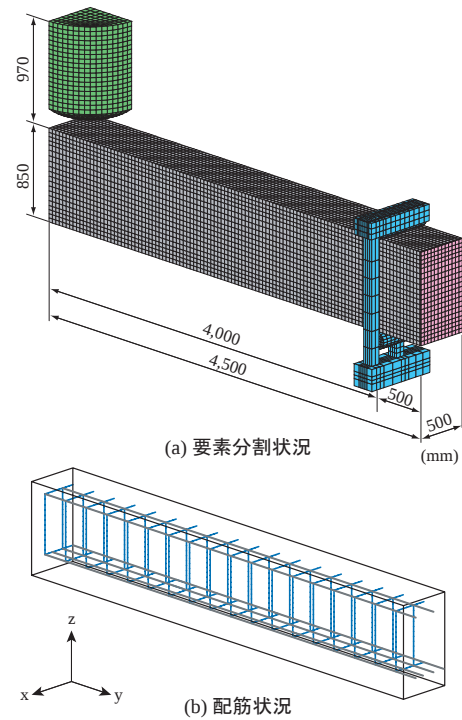


図-2 要素分割状況

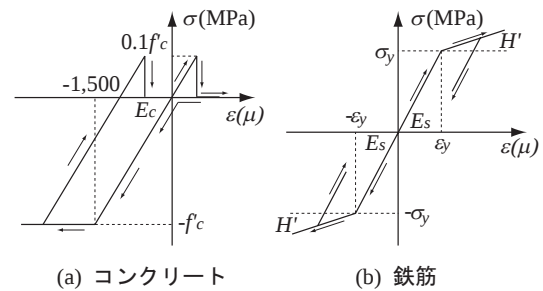


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

一次载荷時と同様に 400 ms とする。なお、減衰定数は、一次载荷時と同様の値を入力する。

- 5) 以降 n 次载荷終了まで 3), 4) の手順を繰り返す。

以上により、数値解析を実施している。

2.4 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 von Mises および 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便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、全部材で等しく、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。

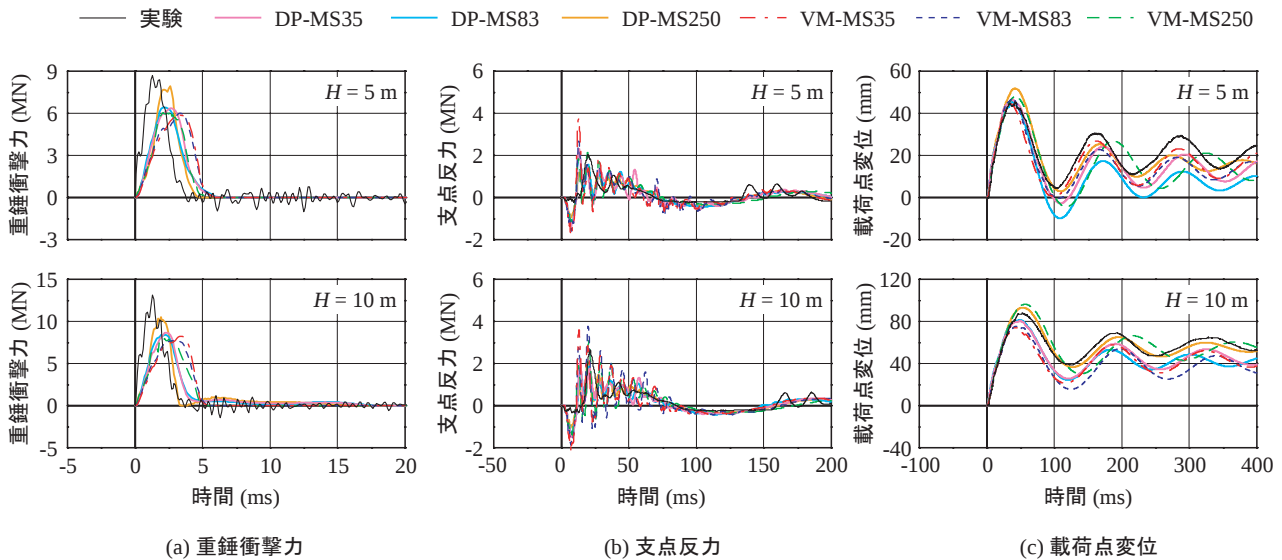


図-4 単一載荷における各応答波形

3. 数値解析結果

3.1 単一載荷の場合

(1) 重錘衝撃力

図-4には、単一載荷の場合の実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する各応答波形を示している。

図-4(a)より、実験結果と解析結果を比較すると、いずれの解析結果においても、重錘衝撃力の最大値は実験結果と比較して小さい値を示している。一方、降伏条件を変化させた場合の解析結果を比較すると、最大重錘衝撃力は落下高さに関わらず、Drucker-Prager の場合が von Mises を仮定する場合よりも大きくなる傾向を示し、より実験値に近い値を示している。また、von Mises の場合は要素長による差は小さい。一方、Drucker-Prager を仮定する場合には、要素長の大きさに対応して最大重錘衝撃力が大きくなる傾向を示し、DP-MS250 の場合には最も実験値と近似していることが分かる。

(2) 支点反力

図-4(b)より、支点反力の最大値について見ると、von Mises を仮定する場合には実験結果よりも大きな値を示しているが、Drucker-Prager の場合はいずれの要素長においても実験結果に近いの値を示していることが分かる。また、時刻歴の分布性状に関しては、von Mises の場合は要素長が長いほど周期が長くなる傾向にあり、Drucker-Prager の場合にはその逆の傾向を示しているが、その差は非常に小さい。いずれの場合も、要素長が短い場合は実験結果を適切に評価していることが分かる。

(3) 載荷点変位

図-4(c)より、実験結果は、いずれの落下高さの場合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。実験結果と解析結果を比較すると、最大変位はいずれの解析結果においても、実験結果とほぼ等しい値を示している。また、自由振動周期は要素長の大きさに対応し、実験結果との差が増加する傾向にあり、要素長の長い MS250 の場合

には、他の要素長に比べ実験結果との差が大きくなっている。しかしながら、要素長が短い場合には降伏条件にかかわらず、実験結果をよく再現していることが分かる。降伏条件に関して比較すると、落下高さ $H=5\text{ m}$ の場合には、Drucker-Prager の場合が von Mises の場合よりも要素長の変化に対するばらつきが少なく、実験結果と近似した値を示している。また、落下高さ $H=10\text{ m}$ の場合において、Drucker-Prager の場合は落下高さ $H=5\text{ m}$ の場合よりも要素長の影響が小さく、実験結果とよく対応している。一方、von Mises の場合には要素長によって振動周期が異なっていることが分かる。

3.2 繰り返し載荷の場合

(1) 重錘衝撃力

図-5には、繰り返し載荷の場合における重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する各応答波形を示している。図-5(a)より、最大重錘衝撃力に関しては、von Mises を仮定する場合には、落下高さの増加に対応し要素長による差異も大きくなる傾向にある。一方、Drucker-Prager を仮定する場合には、落下高さ $H=2.5\text{ m}$ および 5.0 m での MS250 の場合において他の要素長との差が大きい、その他の場合に関しては同程度の値を示している。

(2) 支点反力

図-5(b)より、支点反力について見ると、von Mises を仮定する場合には、要素長の増加に対応し振幅が減少する傾向を示しているが、落下高さの増加に伴い要素長による差異は小さくなる傾向にあることが分かる。落下高さ $H=10\text{ m}$ の場合には要素長に関わらずほぼ同じ値を示している。一方、Drucker-Prager を仮定する場合には、MS83において、他の要素長との差が見られるものの、MS35 および MS250 の場合には近似した値を示しており、von Mises の場合と比較すると、要素長による差異は小さい。また、時刻歴の分布性状に関しては、要素長に関わらず同程度の周期で自由振動を呈している。

(3) 載荷点変位

図-5(c)を見ると、最大載荷点変位に関しては、von

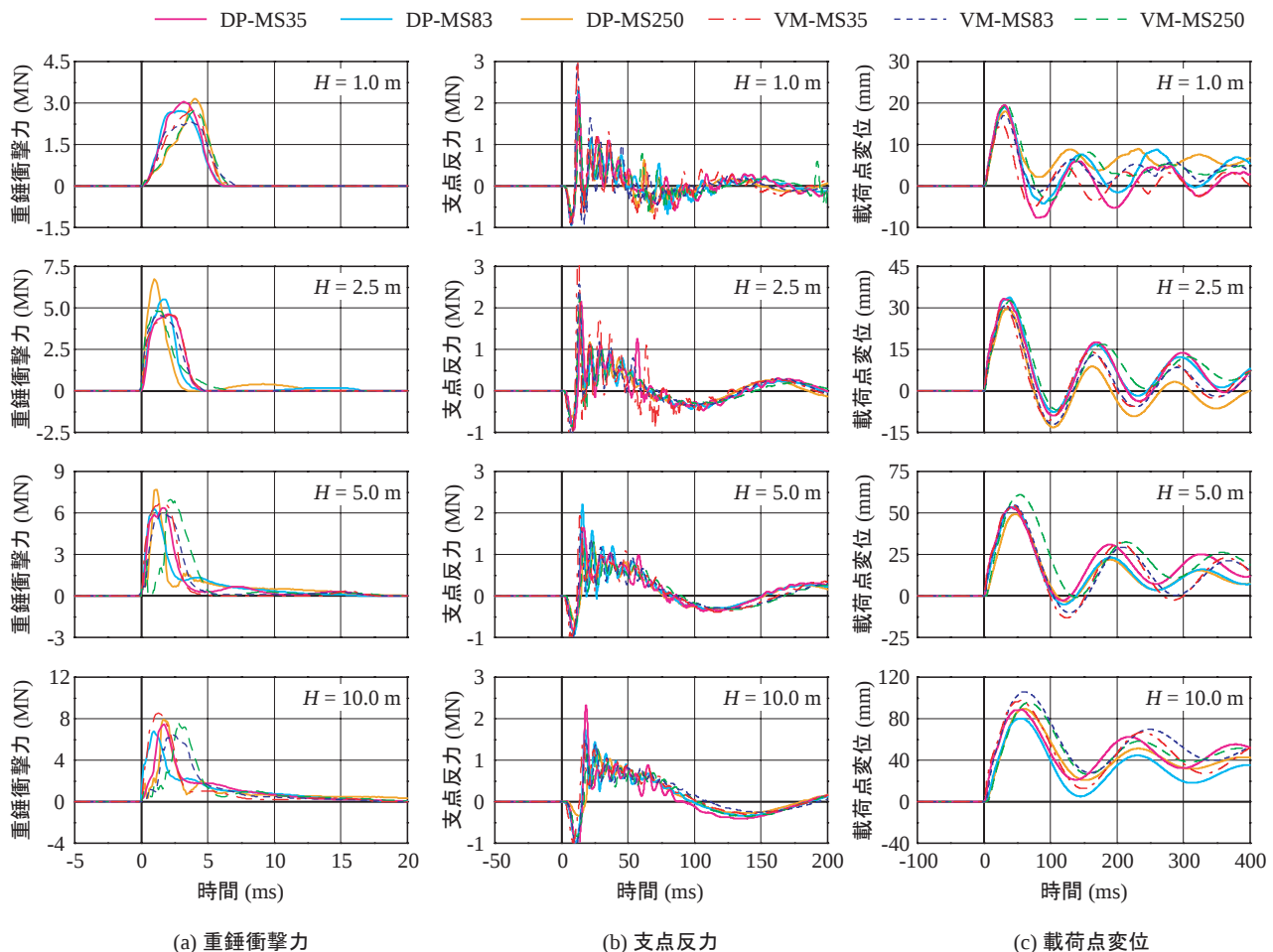


図-5 繰り返し载荷における各応答波形

Misesを仮定する場合には要素長が大きいほど大きく評価する傾向にある。一方、Drucker Pragerを仮定する場合には、いずれの落下高さにおいても要素長による影響の小さいことが分かる。また、時刻歴の分布性状に関しては、落下高さ $H = 1.0$ m の場合には、いずれの降伏条件においても要素長の影響が大きいことが分かる、しかしながら、落下高さの増加と共にその影響は小さくなる傾向を示している。von Misesを仮定する場合には、要素長の違いによって振動周期が異なっている。これに対してDrucker Pragerを仮定する場合には、要素長による周期および残留変位の差が小さいことが分かる。

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、単一載荷時の実験結果と比較の下繰り返し载荷に関しては数値解析のみを実施し、特に降伏条件やコンクリートの引張破壊エネルギー等価の考えを導入する場合の要素長の影響について検討を行った。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) 単一載荷時の結果より、いずれの降伏条件式を用いる場合においても、最大重錘衝撃力に関しては実験結果に対応しない。しかしながら、Drucker-Pragerの条件

式を適用することによって重錘衝撃力波形や支点反力波形、および最大支点反力は大略再現可能である。

- 2) また、載荷点変位波形や最大応答変位、および除荷後の減衰自由振動特性は、Drucker-Pragerの降伏条件を適用することにより、精度よく評価可能である。
- 3) 繰り返し衝撃載荷時においても、Drucker Pragerの降伏条件式を適用することによって、支点反力波形や載荷点変位波形、および各波形の最大値を精度良く再現できるものと判断される。

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, 2000.6.