

論文 RC ラーメン構造の耐衝撃応答特性に関する数値解析的検討

岡田 慎哉^{*1}・岸 徳光^{*2}・今野 久志^{*3}・西 弘明^{*4}

要旨: 本研究は、RC ラーメン構造の衝撃応答特性の把握を目的として、梁模型とラーメン模型の衝撃応答解析を行い、これらの結果を比較することでRC ラーメン構造の耐衝撃応答特性について検討を行ったものである。検討の結果、RC ラーメン構造は単純梁の場合と比較して1) 最大変位は1/2程度に、残留変位は1/3程度に低減される、2) 断面力分布は載荷点に曲げモーメントが集中する傾向が見られ、より大きな曲げモーメントが発生する、3) ひび割れ分布より、載荷点近傍に損傷がより集中し、その損傷モードもせん断破壊型に移行する傾向があること、が明らかとなった。

キーワード: RC ラーメン, 衝撃応答解析, 衝撃応答特性

1. はじめに

我が国の国土、特に北海道は、急峻な地形を呈している。そのため、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている箇所が多い。このような地理条件の下に道路を整備する場合には、可能な限り安全となるルートを選定したうえで、斜面災害に対する対策を講じなければならない。

道路の斜面災害対策の1つとして落石防護覆道が挙げられる(写真-1参照)。落石防護覆道は比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であり、山岳道路や海岸道路などに多数設置されている。落石防護覆道の現在の耐衝撃設計法は、許容応力度法に基づいて行われている。すなわち、想定される落石の質量や落下高さなどの諸条件から評価した、衝撃荷重を静的荷重に置換し、静的な断面設計を行うことで実施される。

現在、土木構造物の設計は、許容応力度法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計へ移行しつつある。このような背景より、衝撃荷重を受ける落石防護覆道に関しても、より合理的な性能照査型耐衝撃設計法を確立することが急務である。

著者らの過去の研究により、落石防護覆道の耐衝撃性能は、構造の限界状態までを考慮した場合には、大きな安全率を有している¹⁾ことが明らかとなっている。これにより、限界状態設計法を適用して落石防護覆道の耐衝撃設計を実施することが可能になれば、新設設計の場合には断面のスリム化が可能となり、補強設計の場合には補強工を合理的かつ最低限に留めることができ、いずれの場合においても建設コストの縮減が見込まれる。

また、著者らは過去に衝撃荷重が作用するRC梁に関して、その残留変位と入力エネルギーから静的曲げ耐力を算定する式を提案しており²⁾、RC梁に関する性能照査



写真-1 落石防護覆道の例

型耐衝撃設計法の確立に向けた検討を進めているところである。

しかしながら、落石防護覆道は一般的に箱型の断面を有しており、左右には柱部と側壁部、上下には頂版と底版が配置されている。従って、おのおのの剛性がすべて異なるため、衝撃荷重作用時の挙動は複雑なものとなり、前述のような単純な梁とは異なる応答を示すことが予想される。そのため、落石防護覆道の性能照査型耐衝撃設計法を確立するためには、単純梁と箱型である落石防護覆道の衝撃応答特性の差異を把握し、検討を深める必要があるものと考えられる。

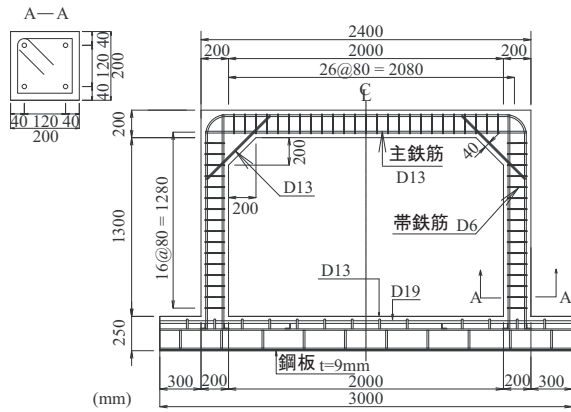
これらのことより、本研究では落石防護覆道の衝撃荷重載荷時における性能照査法の確立に寄与することを目的とし、落石防護覆道を模擬した小型RCラーメン模型(以降、ラーメン模型)および同一断面を有するRC梁(以降、梁模型)に対する重錘落下衝撃実験を模擬した数値解析を行い、その衝撃応答性状について検討を行うこととした。なお、ここでは構造形式が衝撃応答特性に与える影響に着目することとし、検討を簡便に行うために、柱

*1 国土交通省 北海道開発局 博(工) (正会員)

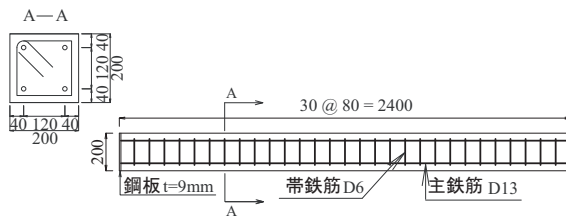
*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 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)



(a) RCラーメン模型



(b) RC梁模型

図-1 形状寸法および配筋状況

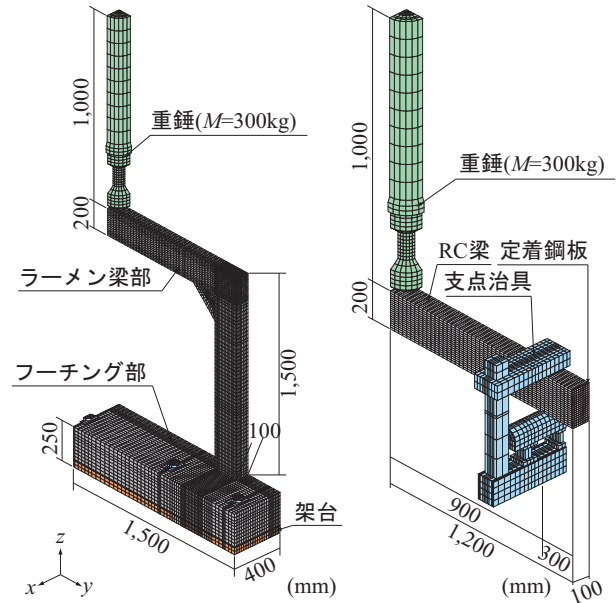
部剛性と梁部剛性がすべて同一なラーメン模型を用いることとした。また、本検討においては、実験的に得ること発生断面力を用いた検討を行うことを想定し、過去に実験結果との比較検証を行い、その数値解析精度が良好であることが確認されている小型試験体を用いて、数値解析の検討を行うこととした。検討は、重錘衝撃力、支点反力、変位、断面力、ひび割れ分布性状についてラーメン模型の梁部と梁模型との比較を行い、ラーメン構造と単純梁との衝撃応答の差異を明らかにすることで行っている。なお、本研究の弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver.971) ³⁾を用いている。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

図-1には、解析の対象とした小型 RC ラーメン模型および、ラーメン模型の梁部と同一断面を有する梁模型の形状寸法および配筋状況を示している。本研究では、実験的に得ることの難しい断面力を用いた検討を行うことを想定し、実験結果⁴⁾との比較検証を行いその解析精度が良好であることが確認されている小型試験体を用いて、解析的検討を行うこととする。

RC ラーメン模型は、衝撃挙動の把握が比較的容易である梁構造とし、実落石防護覆道断面形状の1/4程度の縮尺模型とした。すなわち、梁部の断面寸法は200×200 mmとし、梁部の純スパンを2,000 mm、柱部の高さは1,500 mmとしている。また、隅角部には200 mmのハンチを設



(a) RCラーメン模型

(b) RC梁模型

図-2 要素分割モデル

けている。

RC 梁模型はラーメン模型の梁部を取り出したイメージとし、同一断面を有する長さ2,400 mmの模型とした。支点位置は、道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編⁵⁾によるラーメン構造の隅角部における剛域の影響を考慮し、ラーメン構造頂版部と等価となるように設定することとした。すなわち、剛域を構造端部から300 mm考慮し、支点間距離を1,800 mmとした。

両模型の軸方向鉄筋には、実落石防護覆道と同程度の主鉄筋比(約1.2%)となるようにD13を4本用い、その芯かぶりは40 mmとしている。帯鉄筋には主鉄筋との径や鉄筋比のバランスに配慮し、D6を用いて断面有効高さの1/2である80 mm間隔で配筋している。なお、帯鉄筋比は約0.4%である。

ラーメン模型のフーチング断面は、可能なかぎり剛構造として柱基部の固定条件が保持されるようにするため、覆道断面方向長さ3,000 mm、覆道軸方向幅800 mm、高さ250 mmとする矩形体とした。

2.2 数値解析モデル

図-2には、本数値解析で用いたRC ラーメン模型およびRC 梁模型の要素分割モデルを示している。各部材要素において、コンクリート、重錘およびフーチング部には8節点の三次元固体要素を、鉄筋には梁要素を用いてモデル化している。積分点に関しては、解析時間を短縮するため三次元固体要素には1点積分を、鉄筋要素には要素単体で曲げを表現可能とするため、2×2 Gauss 積分を用いている。

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

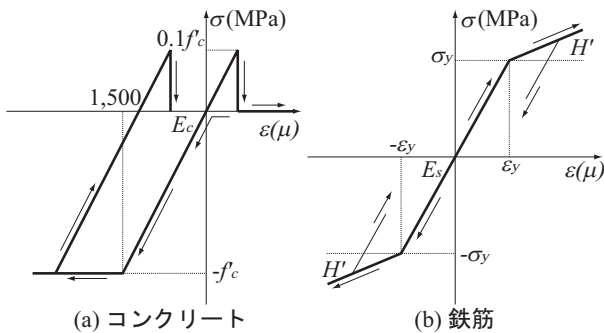


図-3 各材料の相当応力-相当ひずみ関係

モデルとした。解析モデルの総節点数、総要素数は、ラーメン模型モデルでそれぞれ 41,897, 37,828 であり、梁模型モデルで 13,556, 11,114 である。

境界条件として、ラーメン模型モデルでは架台底面を完全固定とし、梁模型モデルでは支点治具の回転を許容するように固定している。また、モデルの対称境界面は全て面対称を考慮している。

コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着を仮定し、重錘とコンクリート、フーチングと架台、フーチング固定用ボルト穴とボルト、コンクリートと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。

減衰定数は、質量比例項のみを考慮するものとし、既往の研究⁶⁾を参考に、鉛直方向最低次固有振動数に対してラーメン模型の場合は 1.0%、梁模型の場合は 0.5% を設定している。なお、ラーメン模型の固有振動数は約 93 Hz、梁模型の固有振動数は約 73 Hz である。

衝撃力は載荷位置に配置した質量 300 kg の重錘に初速度を入力することにより与えている。初速度は、梁模型およびラーメン模型それぞれの結果を比較することを考慮し、同一の衝突速度となるケースを 2 ケース設定し、さらに同程度の変位が生じる初速度をそれぞれ設定することとした。すなわち、梁模型においては衝突速度 $V = 2, 3, 4, 5$ m/s の 4 ケース、ラーメン模型においては衝突速度 $V = 4, 5, 6$ m/s の 3 ケースとした。

2.3 材料物性モデル

図-3(a)には、本数値解析で用いたコンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に対しては折線近似による応力-ひずみ関係、引張側に対しては線形の応力-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を適用している。圧縮側に関しては、ひずみが $1,500 \mu$ に達した状態で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。本研究では、圧縮試験から得られた圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とした。また、軸方向要素長は試験体寸法や配筋状況等を考慮し、20 mm としてモデル化する

ることとした。

コンクリート要素の物性値は、単位体積質量 $\rho_c = 2.4 \times 10^3$ kg/m³、ポアソン比 $\nu_c = 0.167$ 、圧縮強度 $f'_c = 24$ MPa を仮定した。引張強度は既往の研究⁵⁾より圧縮強度の 1/10 とし、 $f_t = 2.4$ MPa と設定している。なお、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。

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。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の 1% と仮定している。なお、降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。鉄筋要素の物性値は、弾性係数 $E_s = 206$ GPa、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ 、単位体積質量 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、降伏応力 $\sigma_y = 380$ MPa を仮定している。ここで、降伏応力は実際に製作したラーメン模型の鉄筋の試験結果⁴⁾を用いている。

なお、フーチング内部の鉄筋に関しては、応答最大応力が弾性範囲内であるものと推察されることより、弾性体として解析を行っている。また、本研究の範囲内では、ひずみ速度効果の影響はないものと判断し、これを考慮していない。

3. 数値解析結果

3.1 重錘衝撃力波形

図-4(a)には、重錘衝撃力波形を示している。図中、破線は梁模型の結果を、実線はラーメン模型の結果を示す。また、図は重錘衝突の時刻を 0 ms として整理している。なお、紙面の都合上、衝突速度 $V = 4, 5$ m/s についてのみ掲載している。図より、重錘衝撃力波形は、梁模型、ラーメン模型ともに重錘衝突により急激に励起される三角波状の 1 波目と、振幅の小さく継続時間の長い 2 波からなる性状を示している。その最大値は 1 波目で示され、ラーメン模型の場合は梁模型の場合に比較して若干小さい応答を示す傾向が見られる。2 波目についてはラーメン模型の応答が梁模型のそれよりも振幅が大きく、かつ波動継続時間が短い傾向を示している。

図-5(a)には、最大重錘衝撃力-衝突速度関係を示している。図より、最大重錘衝撃力は梁模型、ラーメン模型ともに衝突速度とほぼ比例の関係にあることが分かる。また、梁模型、ラーメン模型の差異は少ない。

これらのことは、重錘衝撃力は衝突点近傍の応答に支配され、構造全体の応答は大きく影響しないことを示唆しているものと考えられる。また、その波動継続時間は対象構造の固有振動周期と相関があるものと考えられる。

3.2 支点反力/軸力

図-4(b)には、支点反力/軸力波形を示している。ここでは、梁模型に関しては支点反力を、ラーメン模型に関しては柱部の軸力をラーメン梁部が伝達する支点反力と等価であるものと仮定して整理することとした。なお、柱

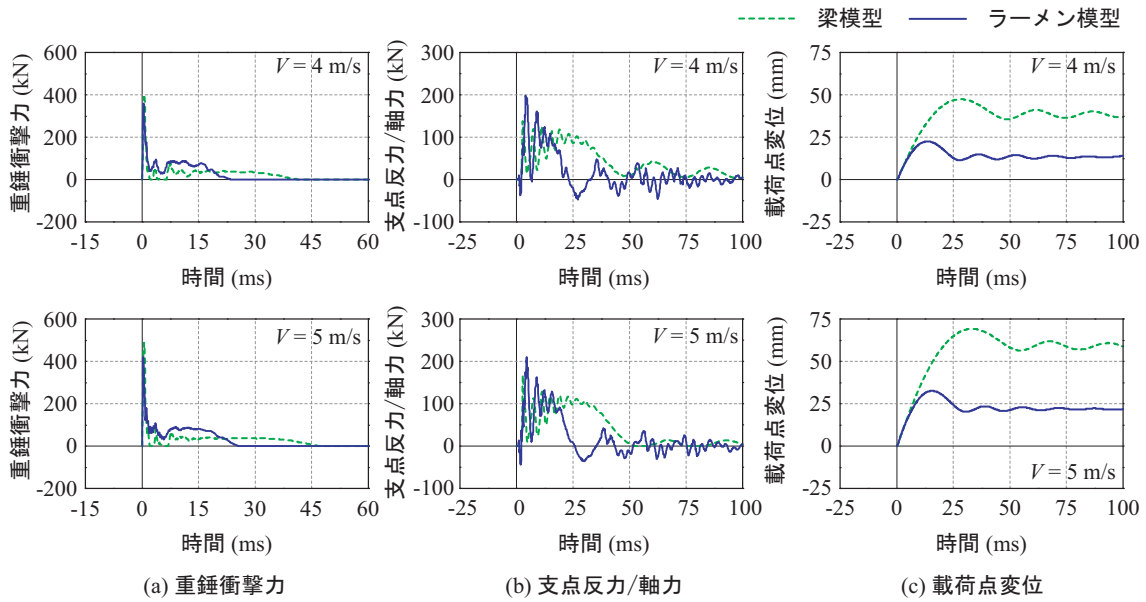


図-4 各種応答波形

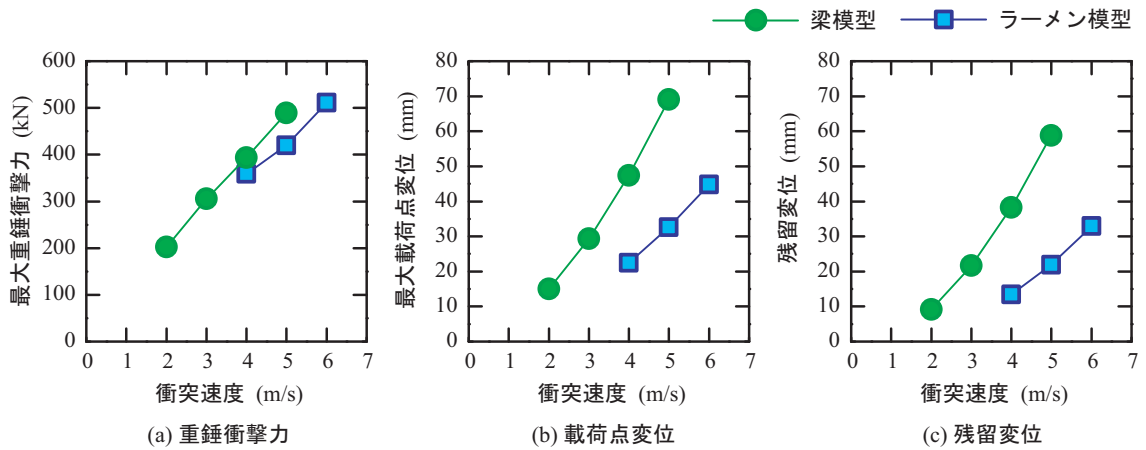


図-5 各最大応答値-衝突速度関係図

部の軸力は、柱部のハンチを有さない断面部の全軸方向力を合算したものである。図より、支点反力/軸力は重錘衝突から若干遅れて励起され、高周波成分を含む減衰自由振動状態を示していることが分かる。ラーメン模型と梁模型を比較すると、その振幅は同程度であり、また、梁模型の支点反力がラーメン模型の柱部軸力とほぼ等価であることが明らかとなった。ラーメン模型の場合には梁模型の場合に比較して波形の周期が1/2程度となっていることが分かる。これは、ラーメン模型の最低次固有周期が梁模型に比較して短いことに起因するものと考えられる。

3.3 荷点変位

図-4(c)には、荷点変位波形を示している。図より、梁模型、ラーメン模型の荷点変位波形は類似している。すなわち、重錘衝突と共に変位が励起し、最大値に到達後残留変位成分を含む減衰自由振動状態に移行している。

しかしながら、両模型間では振幅および周期が大きく異なる。すなわち、ラーメン模型の場合には、梁模型の場合に比較して振幅、周期ともに1/2程度となっている。これは、ラーメン模型の場合には梁端が柱と連続的に接合され、両端固定梁に近い応答となるのに対して、梁模型の場合には水平移動は許容されないものの、回転が許容されることからほぼ単純支持梁として挙動するためと考えられる。なお、ラーメン模型と梁模型で異なる減衰定数を設定しているが、事前解析により、その差異はこれらの特性値に影響するほどの大きさでないことを確認している。

図-5(b)には、最大荷点変位-衝突速度関係を示している。図より、最大荷点変位は梁模型、ラーメン模型ともに衝突速度とほぼ線形の関係にあることが分かる。また、その最大値はラーメン模型の場合が梁模型の場合のほぼ1/2の値となっている。これは、ラーメン模型の梁端部における柱の拘束効果によるものと考えられる。

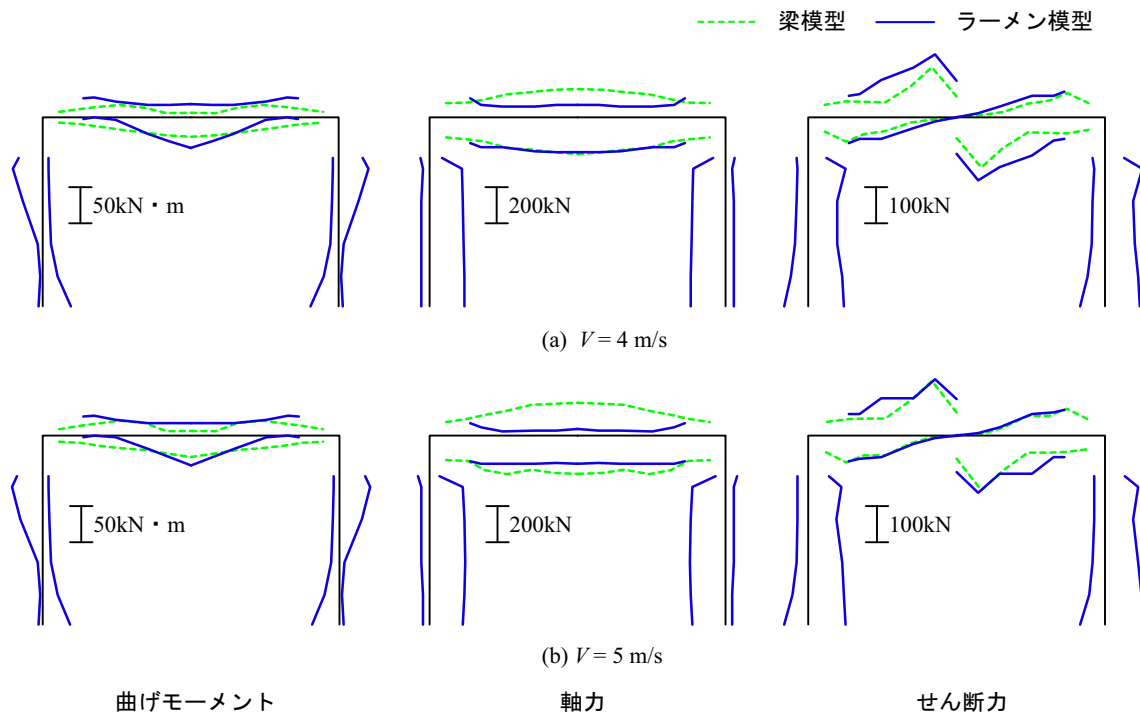


図-6 断面力包絡線

図-5(c)には、残留載荷点変位-衝突速度関係を示している。図より、残留変位についても最大変位値と同様の関係が見られる。その値に着目すると、ラーメン模型の残留変位は梁模型の1/3程度に低減しており、最大変位の場合よりも差異の程度が大きい。これは、ラーメン模型の場合には柱部によって梁端部が支持されているため、最大応答変位に関しては柱の水平方向への変形も考慮されるのに対して、残留変位の場合には柱部の損傷が顕在化せずかつ柱の拘束効果によって梁部の損傷の程度も軽減するためと推察される。

3.4 断面力

図-6には、断面力包絡線分布を示している。図は、ラーメン模型の梁部に梁模型の断面力包絡線を重ねる形で示している。図は軸線を断面力が零の場合とし、軸力に関してはラーメン構造の内側を圧縮軸力として表記している。また、衝撃応答時には断面力についても振動状態を呈するため、それぞれの場合において最大値と最小値を示している。

図より、ラーメン梁部の曲げモーメントに着目すると、載荷点部近傍においてはラーメン模型の場合に正負の曲げモーメントがより大きくなっている。ここで、単純梁とラーメン構造を静的に計算した場合にはラーメン構造の曲げモーメントが小さくなることは自明である。よって、衝撃応答時には静的の場合とは大きく異なる傾向を示していることが分かる。また、端部については静載荷時と同様にラーメン模型の場合には正の曲げモーメントはほとんど発生していない。

ラーメン梁部の軸力に着目すると、圧縮軸力に関してはラーメン模型の場合は梁模型の場合と同程度か若干小さな応答分布を示している。一方、リバウンド応答である引張軸力に関しては、ラーメン模型の場合が梁模型より小さい応答性状を示している。

これより、ラーメン模型と梁模型の場合で断面力分布に若干の差異が生じることが明らかとなり、ラーメン構造とすることで載荷点により曲げモーメントが集中する傾向が見られた。この傾向は、静的に計算した場合とは異なることが明らかとなった。

3.5 ひび割れ分布性状

図-7には、各解析ケースの載荷点最大変位時における第一主応力分布図を重ねて示している。なお、図-3(a)に示したコンクリートの応力-ひずみ関係に従うと、図中の濃灰色で示された領域（コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001$ MPaの範囲）はひび割れが発生しているか、もしくは応力がほとんど作用していない要素であることを示すこととなる。従って、変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生していることとして評価可能である。

図より、同一の衝突速度の場合のラーメン模型と梁模型とのひび割れ分布を比較すると、ラーメン模型の場合において、より損傷が少ない傾向が見られる。また、その損傷の分布性状に着目すると、ラーメン模型において、損傷が載荷点により集中し、その破壊モードもせん断破壊型に移行する傾向が見られる。これは、ラーメン構造の梁部が柱部による拘束を受けることで見かけ上の曲げ

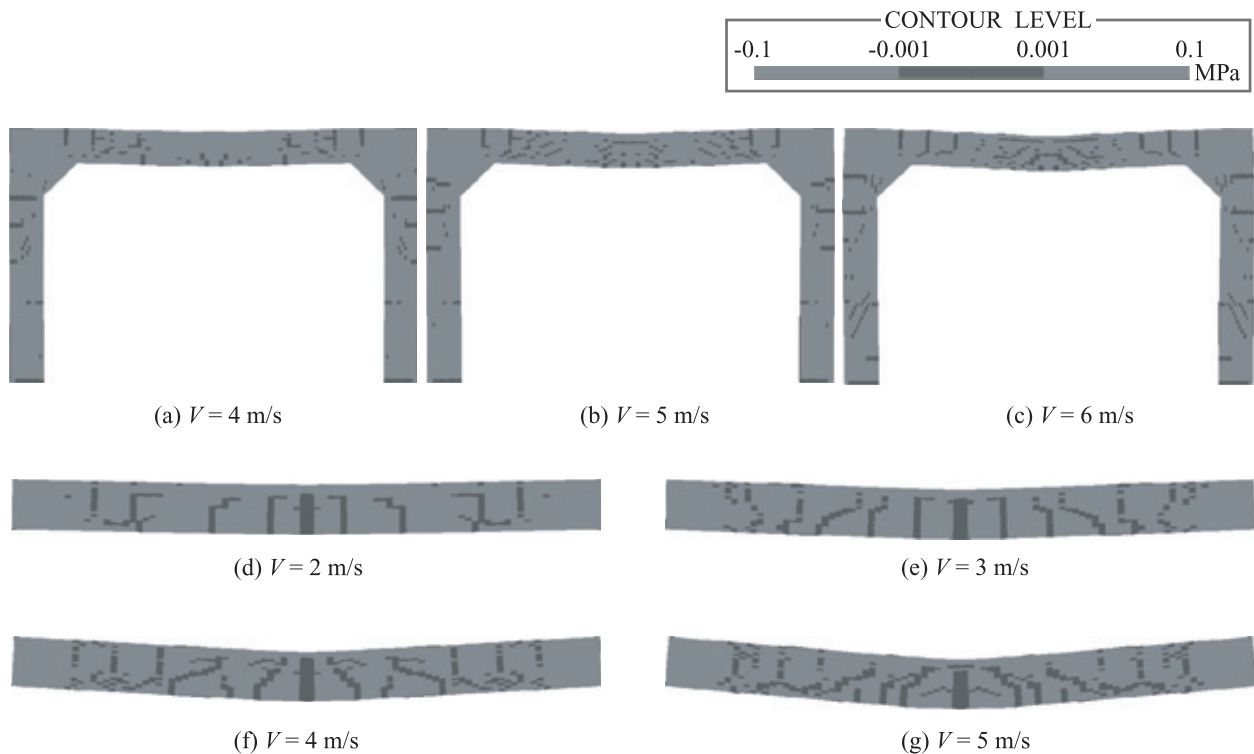


図-7 ひび割れ分布図

耐力が向上しているためと考えられる。また、衝撃荷重
 載荷時には曲げモーメントが載荷点で大きく評価される
 ことにより、損傷が載荷点に集中する傾向を示している
 のと考えられる。

4. まとめ

本研究は、RC ラーメン構造の衝撃応答特性の把握を目的として、梁模型とラーメン模型の衝撃応答解析を行い、これらの結果を比較することでRC ラーメン構造の耐衝撃応答特性について検討を行ったものである。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。すなわち、

- (1) 重錘衝撃力は、構造形式によらず、ほぼ同様の性状を示す。
- (2) 梁模型の支点反力とラーメン模型の柱部軸力とで同程度の力が発生する。
- (3) ラーメン構造の場合には梁構造の場合に比較して最大変位は 1/2 程度に、残留変位は 1/3 程度に低減される。
- (4) 断面力分布は、載荷点に曲げモーメントが集中する傾向が見られ、ラーメン模型の場合により大きな曲げモーメントが発生する。
- (5) ひび割れ分布より、ラーメン模型において載荷点近

傍に損傷がより集中し、その破壊モードもせん断破壊型に移行する傾向にある。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 岡田慎哉, 西 弘明, 三上 浩: ロックシェットの終局時入力エネルギー量探索に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1273-1283, 2006.3
- 2) 今野久志, 岸 徳光, 岡田慎哉, 三上 浩: 敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動における重錘質量の影響に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.871-876, 2008.6
- 3) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6
- 4) 岡田慎哉, 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明: RC ラーメン模型の重錘落下衝撃挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.865-870, 2008.6
- 5) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 2002.3
- 6) 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 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