

RC ラーメン構造形式に関する衝撃応答解析手法に関する検討

Impact response analysis of RC frame model under falling-weight impact loading

(株) 構研エンジニアリング	○ 正会員	高橋 浩司 (Koji Takahashi)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	保木 和弘 (Kazuhiro Hoki)

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ることが必然である。

道路の斜面災害対策の1つとして落石防護覆道が上げられる。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。

通常、これらの覆道は斜面に想定される落石要因に応じて個別に設計されるため、想定される落石が発生しても問題はない。しかしながら、これらの土木構造物は長期に渡って供用されることとなるため、対象の斜面の経時変化により、設計当初には想定され得なかった新たな落石要因が生じる場合がある。こういった場合には、現状の覆道に補強を実施し、要求される性能を満たす、あるいは道路のルートを変更し危険箇所をかわすなどの対応が必要となる。しかしながら、これらの対応には多大な費用が必要となり、建設コストの縮減が叫ばれる中で大きな負担となっている。

ここで、現状の落石防護覆道の耐衝撃設計は、許容応力度法に基づいて行われる。その設計は、想定される落石の質量や落下高さなどの諸条件から、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。

著者らの過去の研究より、RC製の落石防護覆道の耐衝撃性能に関して、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ことが明らかとなっている。これより、限界状態設計法で落石防護覆道の耐衝撃設計を実施することが可能となれば、新設設計の場合には、合理化によって構造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、どちらの場合においても建設コストの大幅な縮減が見込まれる。

また、現在の土木構造物の設計思想は、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。これらのことより、落石防護覆道においても性能照査型設計法の導入が急がれる。

しかしながら、現状において落石防護覆道の設計に性能照査型設計法を適用するには、限界状態の規定や、性能の照査方法の確立など、課題も多い。さらに、落石防護覆道は一般的に箱型のラーメン構造となる断面を有しており、左

右には柱部と側壁部、上下には頂版と底版が配され、各々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、簡易に性能を照査することは難しい。そのため、落石防護覆道の耐衝撃性能を適切に評価するためには、動的な解析手法に寄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性能照査型設計法の確立に寄与するため、RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を的確に再現できる数値解析手法を確立することを目的とし、小型の RC ラーメン模型(以降ラーメン)に対する重錘落下衝撃実験を行い、併せて再現解析を実施し、実験結果と比較検討することで解析手法の照査を行った。なお、数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA¹⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 には、ラーメンの形状寸法を示している。ラーメンの形状は、落石防護覆道断面形状の 1/4 程度の大きさとしている。衝撃拳動の把握が比較的容易である梁構造とし、梁材の断面寸法は $200 \times 200 \text{ mm}$ の正方形断面、梁部の純スパンを $2,000 \text{ mm}$ 、柱部の高さは $1,500 \text{ mm}$ としている。ラーメンの軸方向鉄筋には、落石防護覆道と同程度の主鉄筋比となるように D13 を用い、芯かぶりを 40 mm としている。帯鉄筋には D6 を用い、有効高さの $1/2$ である 80

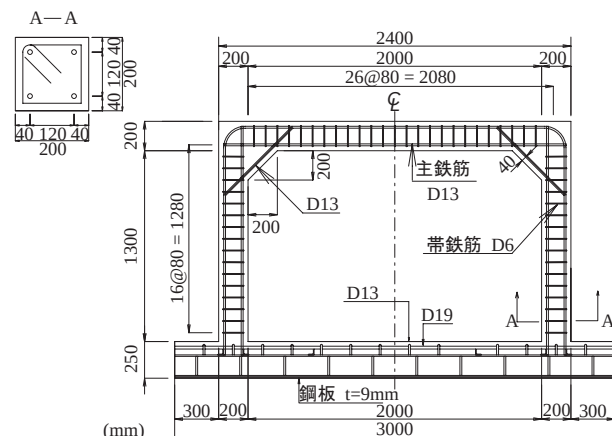


図-1 形状寸法および配筋状況

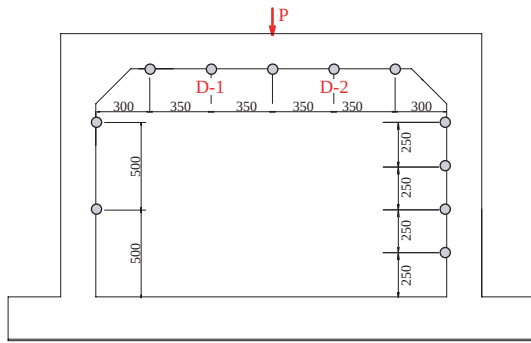


図-2 変位計測位置

mm 間隔で配筋している。また、柱基部の挙動が適切に把握できるようにするため、フーチング形状については、可能なかぎり剛構造とし、柱基部の固定条件が保持されるように、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、鋼製のアングルを埋設している。なお、フーチング下面には厚さ 9 mm の鋼板を配置している。

2.2 衝撃実験概要

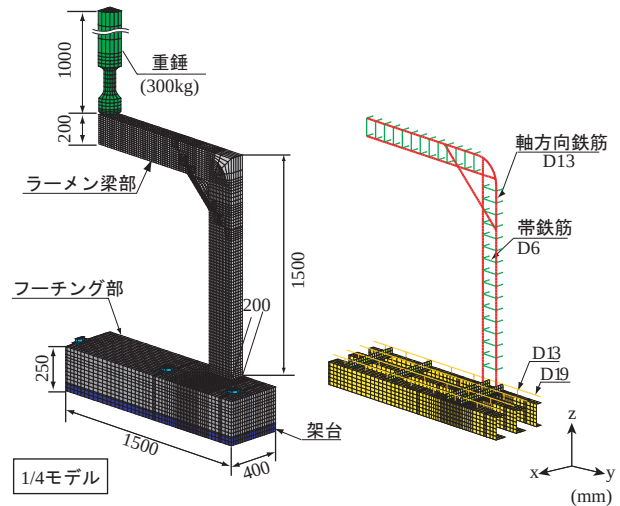
本実験は、跳ね上がり防止治具によりフーチング部を固定し、梁部中央位置に所定の高さから鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。载荷方法は、所定の衝突速度で一度だけ载荷する単一载荷とした。本実験では、重錘衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$, 5 m/s , 6 m/s の 3 ケースについて実施した。以降、これらをそれぞれ V-4, V-5, V-6 と表記する。実験に用いた重錘は、質量が 300 kg、衝突部直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘で、その底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ 2 mm のテーパを施している。

計測項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、非接触式レーザ変位計による各測定位置の変位とした。変位計測位置については、図-2 に示す。衝撃実験終了後には試験体側面のひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

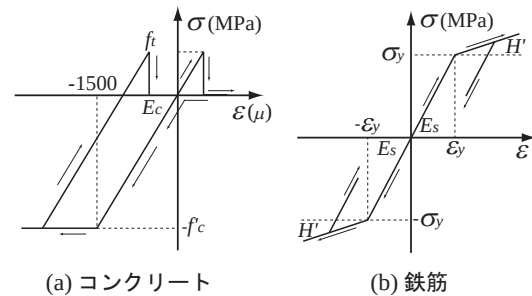
図-3 には、本数値解析で用いた要素分割モデルを示している。また、配筋モデルも併せて示している。解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮してスパン方向および断面幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとし、面対称を設定している。境界条件は実験と同様に、架台底面を完全固定、重錘-コンクリート間、フーチング-架台間、フーチング固定用ボルト穴-ボルト間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリート-鉄筋要素間は、完全付着を仮定している。各要素において、鉄筋要素には梁要素を適用し 4 点積分、コンクリート要素、重錘要素、フーチング要素には三次元固体要素を適用し 1 点積分としている。なお、重錘質量は実験と同様に 300 kg として、衝撃力は重錘に初速度を入力することにより与えている。解析モデルの総節点数、総要素数は、それぞれ 34,127, 30,784 である。減衰定数は、質量比例分のみを考慮するものとし、既往の研究²⁾



(a) 要素分割モデル

(b) 配筋モデル

図-3 要素分割モデルおよび配筋モデル



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図-4 各材料の応力-ひずみ関係

と同様に、鉛直方向最低次固有振動数に対して 0.5 % と設定している。

3.2 材料物性モデル

図-4 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。図-4(a) には、コンクリートに関する等価 1 軸応力-ひずみ特性を示している。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を適用している。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。本研究では、圧縮試験による圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とし、引張側の引張強度 f_t に関しては、一要素に一個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、軸方向要素長が異なる場合においても等しいひずみエネルギーでひび割れが発生するようにコンクリート要素によって仮定の引張強度を設定することとした。本研究では、直線の RC 梁に関する過去の数値解析結果を参考に、軸方向の基準要素長を 35 mm と設定した。本数値解析においては、軸方向要素長を 20 mm としてモデル化している。コンクリート要素の物性値は、単位体積質量 $\rho = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.167$ 、圧縮強度 $f'_c = 24 \text{ MPa}$ を仮定し、換算引張強度は $f_{t20} = 3.17 \text{ MPa}$ と設定している。なお、降伏の

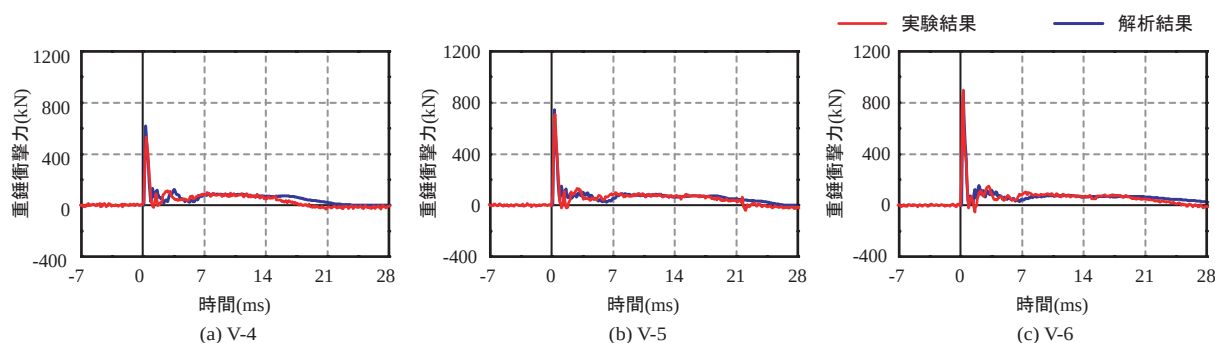


図-5 重錘衝撃力波形

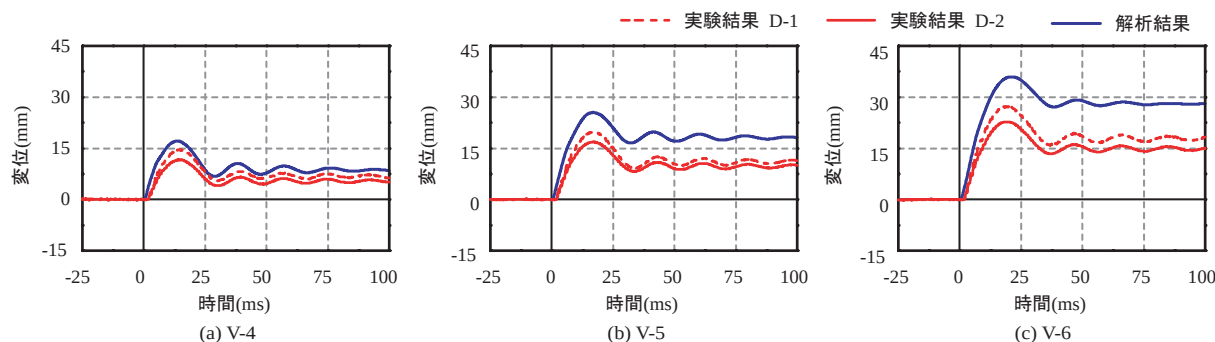


図-6 D-1・D-2変位波形

判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。

図-4(b)には、鉄筋に関する等価1軸応力-ひずみ特性を示している。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。鉄筋要素の弾性係数 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、単位体積質量 $\rho = 7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 、 $\sigma_y = 380 \text{ MPa}$ を仮定している。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。

4. 数値解析結果

4.1 重錘衝撃力波形

図-5には、重錘衝撃力波形を実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、図は重錘の衝突した時刻を0 msとして整理している。図より、重錘衝撃力は全てのケースにおいて重錘衝突時から急激に励起し、すぐに最大値となる。その後、急激に除荷され、20 ms～30 msの間、100 kN程度の衝撃力を持続する。なお、その衝撃力の継続時間は、衝突速度が速いほど長い傾向が見られる。解析結果は最大値に若干の差があるものの、この傾向をよく再現している。

4.2 変位波形

図-6には、変位波形を実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、載荷点直下における変位については、実験時に載荷点において発生した損傷により、その計測精度に問題が生じたため、本検討からは除外することとし、その近傍で得られた変位波形(D-1、D-2使用)を用い

て検討することとする。

図より、変位波形は全てのケースにおいて重錘衝突とほぼ同時に励起し、15 ms～20 ms程度で最大値となる。その後、残留変位成分を含む自由減衰振動に移行する。なお、最大変位発生時刻は、衝突速度が大きいくほど遅くなる傾向が見られる。また、残留変位成分についても衝突速度が大きいくほど大きくなる傾向を示している。解析結果は、最大値および残留変位成分について若干の過大評価となっている。また、この傾向は衝突速度が大きくなるほど顕著に現れている。しかしながら、その全体の傾向は、最大変位発生時刻、自由減衰振動の状態など非常によく再現しているものと判断される。

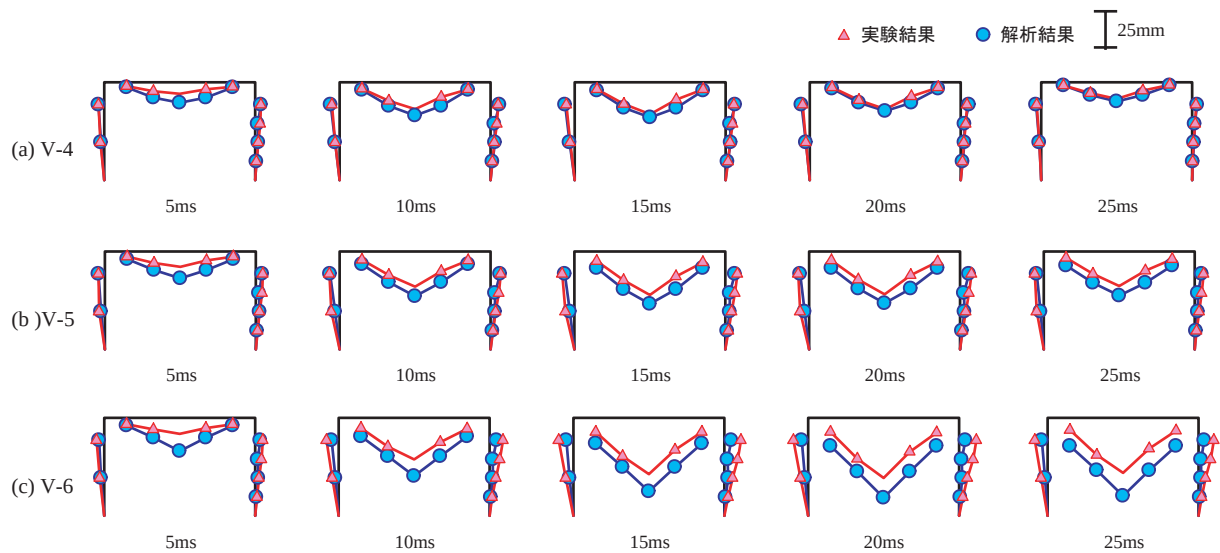
4.3 変形状

図-7には、変位分布性状を各時刻ごとに実験結果と解析結果を比較する形で示している。載荷点変位については、図-6と同様に除外しD-1およびD-2の計測値を用いて直線補間により推定値を算定し、示している。

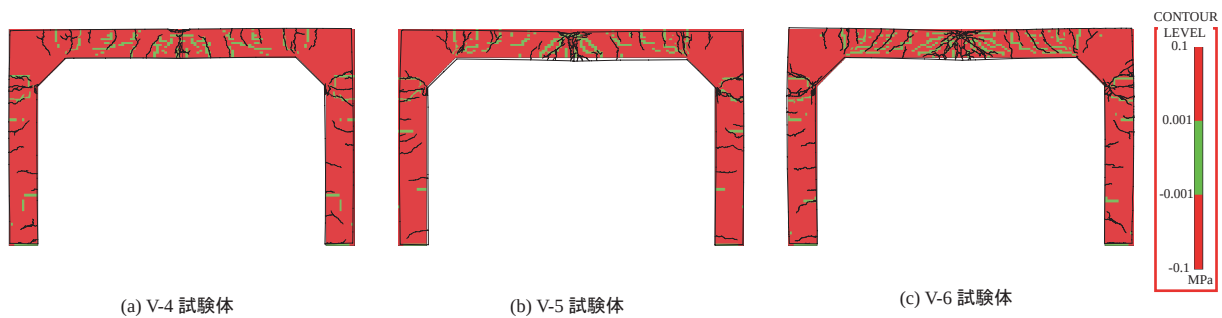
図より、実験結果においては、衝突速度が大きくなると載荷点部、柱部の変形は共に大きくなる傾向を示している。V-4およびV-5に関して実験結果と比較すると、いずれの時刻においても解析結果は実験結果とよく対応した変形状を示していることがわかる。V-6について比較すると、解析結果において載荷点部の変位を過大評価し、柱部の変位に関しては過小に評価する傾向がみられる。これは、後述するV-6の損傷状態の再現性が影響しているものと考えられる。

4.4 ひび割れ分布性状

図-8には、実験終了時のひび割れ分布性状を数値解析結果と重ねて示している。なお、数値解析結果は、図中緑



図－7 変形状



図－8 ひび割れ分布図

色で示された要素がひび割れと等価と判断される要素である。

図より、実験結果では、頂版部では荷点近傍において正の曲げによる曲げひび割れが、隅角部近傍においては負の曲げによる曲げひび割れが確認できる。また、衝突速度が大きいケースでは、荷点近傍にせん断によると思われる斜めひび割れも見られる。隅角部自体には特に損傷は見られない。柱部では、隅角部近傍では外側に、基部近傍では内側にそれぞれ曲げによるひび割れが確認できる。また、ひび割れは、荷点および隅角部のハンチ下部に集中する傾向を示している。解析結果は、このひび割れ状況についてもよく再現しており、V-4、V-5 のケースに関しては非常に再現性が高いものと判断される。しかしながら、V-6 の場合には、柱部の損傷状況が過小評価となる傾向を示している。これは、実験においてハンチ下部の損傷の領域に明瞭な圧壊が確認されたが、数値解析においてはこの圧壊が再現されず、実験結果と差異が生じたものと推察される。

5. まとめ

本研究では、RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を的確に再現できる数値解析手法を確立すること

を目的とし、小型の RC ラーメン模型に対する重錘落下衝撃実験を行い、併せて再現解析を実施し、実験結果と比較検討することで解析手法の照査を行ったものである。結果をまとめると以下のようである。

- (1) 本検討において行った解析手法は、RC ラーメン構造の衝撃応答特性および損傷状況を精度よく再現可能である。
- (2) 衝突速度が大きく損傷が大きい場合には頂版部の変位を過大評価し、側壁部の損傷が過小評価される傾向がある。

今後は今回用いた解析手法に改良を加え、更なる精度向上に努めるとともに、数値解析を用いた性能照査型耐衝撃設計手法の確立に向け検討を進める予定である。

参考文献

- 1) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation,2000.6
- 2) 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