

2/5 RC 製覆道模型の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical analysis of 2/5 scale model of RC type rock-shed under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院	○ 学生会員	花岡 健治 (Kenji Hanaoka)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
寒地土木研究所	正会員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
寒地土木研究所	正会員	今野 久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が大部分を占め、急峻な地形を呈していることから、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要である。

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。落石覆道は現在、一般に以下の要領¹⁾で設計が行われている。すなわち、1) 対策対象となる落石の比高や斜面の状態から、落石衝突エネルギーを決定する。2) 決定された落石衝突エネルギーに対して、落石対策便覧で規定している衝撃力算定式を用いることにより最大衝撃力を決定する。3) この最大衝撃力を静的荷重に置き換えて、骨組解析により断面力を算定する。4) 求められた断面力に対して、許容応力度法を適用し、断面設計を行う、である。しかしながら、過去の被災事例の検証や数値解析的検討から、許容応力度法により設計された落石覆道は、設計入力エネルギーに対して、大きな安全余裕度を有していることが明らかとなっている²⁾。これより、落石覆道に対する限界状態設計法を確立し、その設計法の下で耐衝撃設計を実施することが可能になれば、大幅な建設コストの削減を実現することができる。すなわち、新設の場合には設計の合理化によって構造のスリム化が可能となる。また、既設の場合には限界状態時における最大入力エネルギー評価が可能になり、構造物の信頼性が向上するものと判断される。

このような観点から、落石覆道の合理的な性能照査型耐衝撃設計法を確立することを最終目的に、実物大の2/5覆道模型を作製し、重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では、敷砂を設置しない場合における数値解析手法の妥当性を検討することを目的に、繰り返し载荷実験結果に対する数値解析を実施し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。なお、本数値解析では、効率よく要素分割を行うために、領域ごとに要素長が異なっている。本研究では、このような要素に対するコンクリートの引張破壊エネルギー等価の概念の信用性に関しても検討を行うこととしている。なお、数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA³⁾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、本実験で用いた覆道模型の形状寸法およ

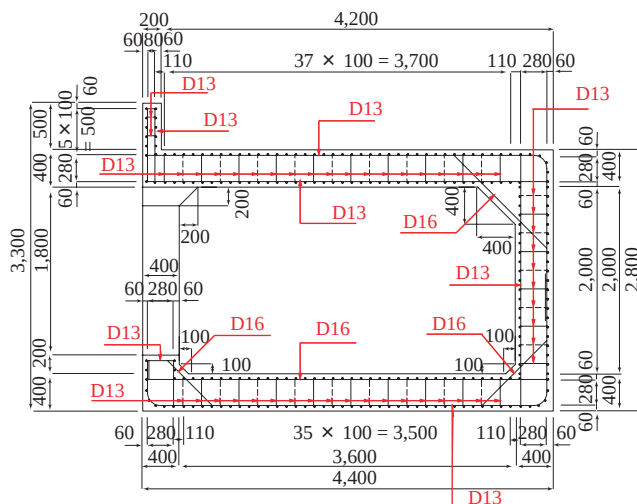


図-1 形状寸法および配筋状況

び配筋状況を示している。覆道模型の断面寸法は、4,400×2,800 mmで、道路軸方向に4,800 mm、柱部の高さは1,800 mmとしている。また、覆道模型の内空幅を3,600 mm、内空高さを2,000 mmとしている。覆道模型の配筋は、底版下面道路軸方向、各ハンチ部の帯鉄筋にはD16、それ以外の主鉄筋、帯鉄筋、軸方向鉄筋にはD13が配筋されている。また、軸方向鉄筋は側壁内側、頂版、底版上面には50 mm間隔、その他軸方向鉄筋は100 mm間隔で、芯かぶりを60 mmとしている。

本実験では、質量が2 tonの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、脱着装置を用いて覆道模型のスパン中央部に自由落下させることにより行っている。なお、重錘は直径1 m、高さ97 cmで底部が半径80 cmの球状になっている。

実験は初期の落下高さを25 cmとし増分落下高さを25 cmとして終局に至るまで(落下高さ125 cm)実験を実施した。

表-1には、本実験で用いたコンクリート、鉄筋および基礎コンクリートの物性値を示している。また、図-2には、変位計設置位置を示している。

2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-3には、本数値解析で用いた覆道模型の要素分割状況を示している。本数値解析では鉄筋を梁要素でモデル化していることより、鉄筋配置位置で要素を分割しなければならない。そのため、全てに渡って等しく要素分割することは不可能である。これより、要素長は16～42 mmに変化している。このような状況下、コンクリート要素の要素長が異なる場合には、対応して各要素のひび割れ発生も異

表-1 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	密度 ρ (t/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	29.7	20	0.167
鉄筋	7.85	413	206	0.3
基礎コンクリート	2.5	-	30	0.2

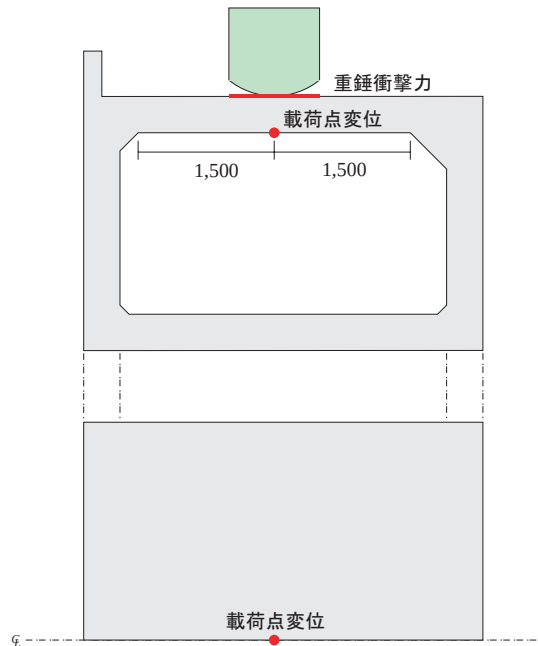


図-2 変位計測位置

なってくることが想定される。このため、本研究では引張破壊エネルギー等価の概念を導入して、各要素長に対して換算の引張強度を設定することとした。なお、本研究では同概念を適用する場合と適用しない場合について数値解析を行い、実験結果と比較することによって妥当性を検討することとしている。

解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して、道路軸方向の中心線位置で2等分した1/2モデルとしている。境界条件として、各接触面には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮している。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。数値解析モデルの底面は完全固定とし、モデルの対称境界面にはシムメトリ条件を入力している。また、試験体底面-基礎コンクリート間は連続と仮定している。要素のモデル化に関しては、上述のように、鉄筋には2節点の梁要素を用い、その他の要素には8節点の固体要素を用いている。要素の積分点に関しては、要素変形量と計算精度を考慮して、固体要素には1点積分を用い、梁要素には精度を向上させるため2×2 Gauss 積分を用いている。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5.0%と設定している。

2.3 繰返し衝撃荷重載荷時の解析概要

本数値解析では、繰返し衝撃荷重載荷実験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。

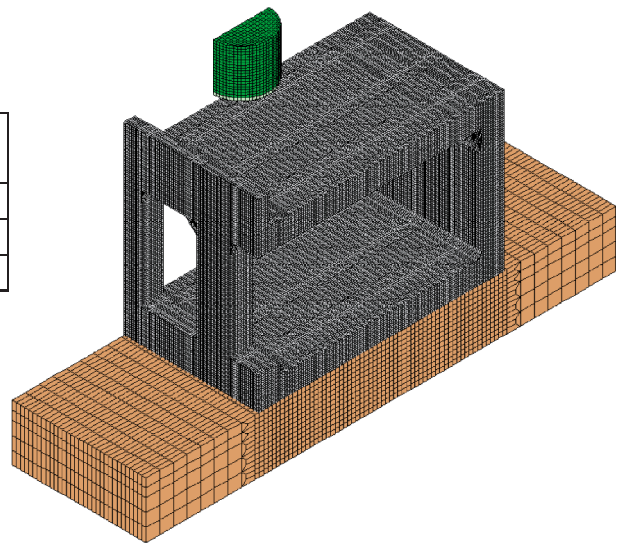


図-3 要素分割状況

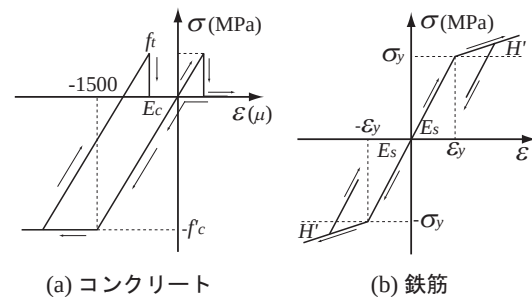


図-4 各材料の応力-ひずみ関係

- 1) 重錘要素を繰返し載荷回数分だけ、予め覆道模型上に重複して設置する。
- 2) 一次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に、落下高さに対応した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、重錘が覆道模型に衝突した時点から覆道模型がほぼ定常状態に至るまでの200 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5.0%とする。
- 3) 一次載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、覆道模型を数値解析的に静止させる。同時に一次載荷時に使用した重錘要素を除去する。
- 4) 二次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に、一次載荷時と同様に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は一次載荷時と同様に200 msとする。なお、減衰定数は、一次載荷時と同様の値を入力する。
- 5) 以降n次載荷終了まで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-4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-4(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 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

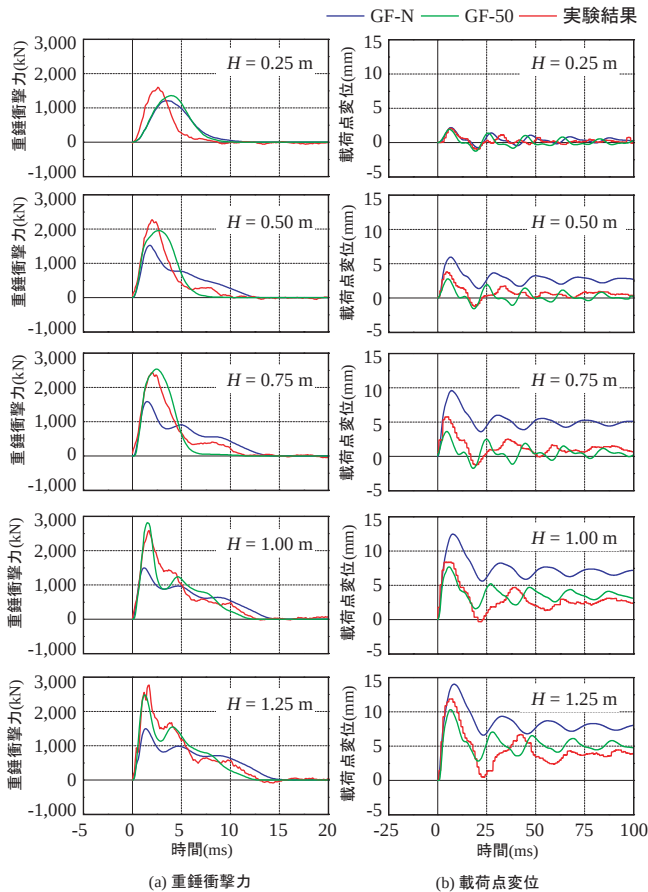


図-5 各種応答波形

定している。降伏の判定には 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、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硬化則を適用している。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

図-5 には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、載荷点変位に関する各応答波形を示している。なお、破壊エネルギー等価の概念を導入していない解析モデルを GF-N、基準長を 50 mm とし破壊エネルギー等価の概念を導入した解析モデルを GF-50 としている。

図-5 (a) には、重錘衝撃力波形に関する比較図を示している。図より、実験結果の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て最大値に至り、その後 $H = 0.50$ m, 0.75 m では振幅の小さい第 2 波、 $H = 1.00$ m, 1.25 m では振幅が最大値の半分程度の第 2 波と振幅が小さく周期の長い第 3 波で構成されていることが分かる。解析結果を見ると、GF-N の場合には全ケースにおいて、最大重錘衝撃力は実験結果より小さく示されている。その傾向は落下高さの増加と共に大きく示されている。このことから、GF-N の場合には前述のように要素長が小さいことにより、ひび割れが早期に発生すること等、剛性が小さく評価されたことによるものと推察される。一方、GF-50 の場合には実験結果と比較して最大値を示す第 1 波および

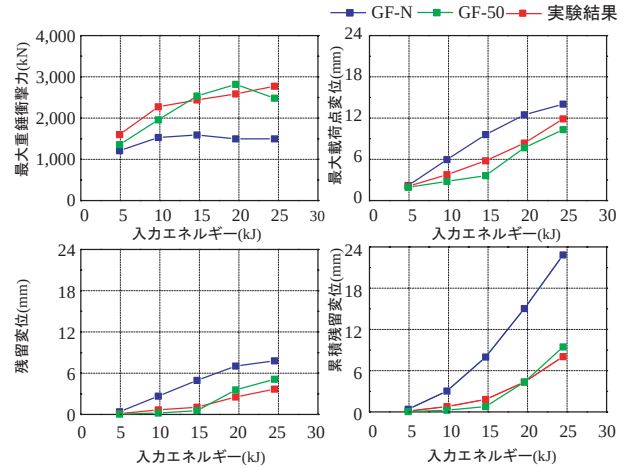


図-6 各応答値と入力エネルギーの関係

後続する第 2 波、第 3 波の波形性状が類似しており、実験結果を概ね再現しているものと考えられる。

図-5 (b) は、変位波形に着目して、解析結果を実験結果と比較する形で示している。図より、実験結果の波形性状は重錘衝突より若干遅れて励起し緩やかに最大応答に至った後、残留変位成分を含む減衰自由振動状態に移行していることが分かる。最大応答変位は、衝突速度の増加に対応して増加している。数値解析結果に関しては、GF-N の場合は、全ケースにおいて実験結果より最大値および残留変位が過大評価となっていることが分かる。これは要素長が主に柱部などで 25 mm 前後となって基準長の 1/2 となっていることより、柱部の剛性が過小評価されたことによるものと推察される。一方、GF-50 では実験結果と周期等に若干の誤差はあるものの、最大値、残留変位共に実験結果を概ね再現できていることが分かる。

3.2 各応答値と入力エネルギーの関係

図-6 には、横軸に入力エネルギー、縦軸に各応答値を取って整理した結果を示している。図より、最大重錘衝撃力は、GF-N では 15 kJ、GF-50 では 20 kJ で最大値を示しているのに対し、実験結果は入力エネルギーの増加と共に単調な増加の傾向を示している。これは、実験結果の場合には繰り返し載荷によって載荷面が密実となり、見かけ上剛性が増加する傾向を示すことによるものと推察される。また、累積残留変位は、全ケースで共通して二次関数的に増加していることが分かる。解析結果を実験結果と比較すると、前述のようにコンクリートの破壊エネルギー等価の概念を考慮することによって実験結果とほぼ対応していることが分かる。

3.3 ひび割れ分布性状

図-7 には、5 回目 ($H = 1.25$ m) 載荷終了時のひび割れ分布性状を実験結果と数値解析結果とを重ねて示している。なお、数値解析結果は、図中赤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-4 (a) に示したコンクリートの応力-ひずみ関係に従うと、図中の赤色で示された領域（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除荷状態に至っているか、もしくは載荷状態で発生応力が小さ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

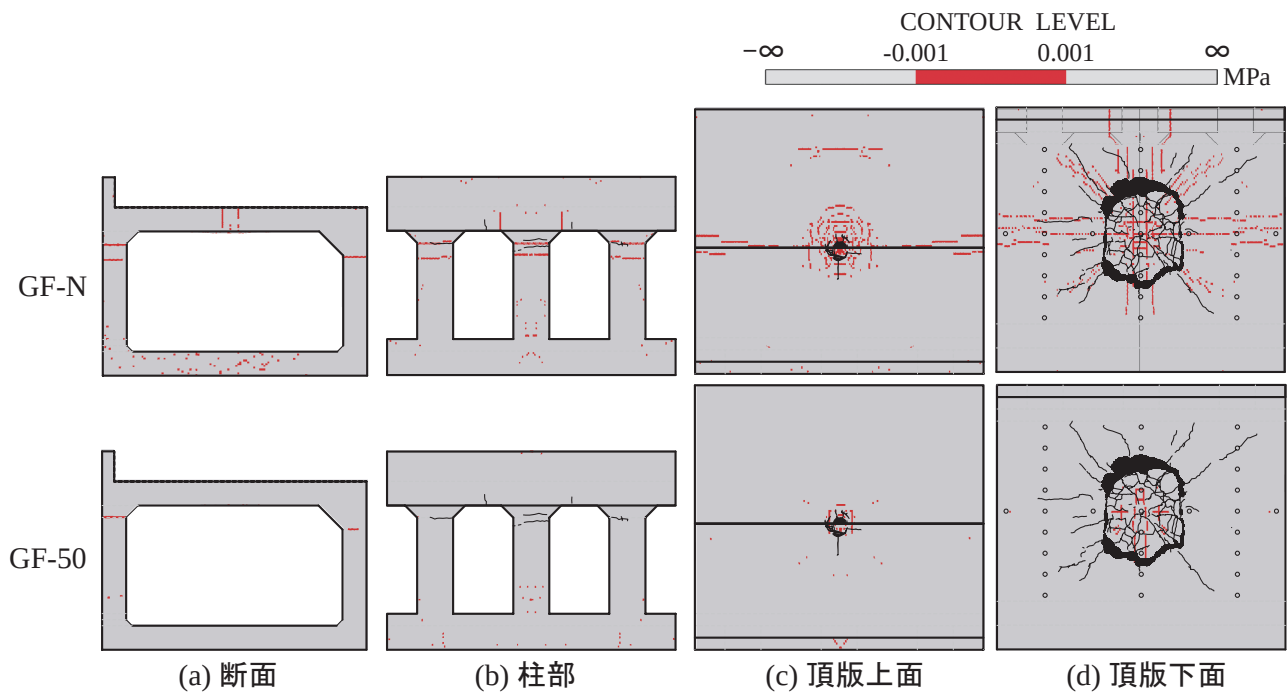


図-7 ひび割れ分布図

除荷状態にいたるものとして評価可能である。

図より、実験結果では、頂版上面の重錘衝突部分に局所的なひび割れが生じている。頂版下面では、放射状にひび割れが発生し、荷点近傍には押し抜きせん断破壊が生じ、一部コンクリートが剥落し終局に至っていることが分かる。さらに、柱部ではハンチ部近傍に曲げひび割れが発生しており、中央部の柱部の損傷が顕著なことが分かる。

次に、解析結果を見ると、GF-N の場合には全体的に実験結果と比較してひび割れが広く分布している傾向にあることが分かる。また、頂版上面では、重錘衝突部分の局所的なひび割れの他に、道路軸方向に曲げひび割れが発生している。一方、頂版下面では、道路軸方向に発生している曲げひび割れは実験結果よりも顕著に示されている。一方、荷点近傍におけるひび割れの発生傾向は類似している。また、柱部における曲げひび割れの分布傾向は実験結果と類似している。実験結果と比較して、全体的にひび割れが広く分布したのは、柱部などの要素長が他の部分と比較して小さいことにより本来より剛性が過小評価され、実験結果より早く降伏したためだと推察される。

次に、GF-50 の場合における、ひび割れの分布は実験結果と比較して小さい傾向がある。特に、頂版下面ではせん断ひび割れは出現していない。また、柱部での曲げひび割れも確認できない。しかしながら、残留変位等は実験結果と類似していることより、頂版内部にはせん断コーンの形成が、また、柱内部にも曲げひび割れ分布が形成されていることを確認している。

4. まとめ

本研究では、落石防護覆道の性能照査法の確立に寄与することを目的に、2/5スケール覆道を対象として繰り返し荷重載荷実験を行い、その耐衝撃挙動について検討を行った。また、大型構造部材に関する実験的検討は試験体

製作、実験装置、実験手法のいずれの観点からも容易ではないことより、より合理的な数値解析手法を確立し数値実験的に検討を行うことが得策であるものと判断される。

このような観点より、本論文ではコンクリート要素の要素長が異なる場合における破壊エネルギー等価の概念導入の妥当性等を実験結果との比較により確認することとした。本研究によって以下の事項が明らかになった。すなわち、

- (1) コンクリート要素に対して引張破壊エネルギー等価の概念を適用することにより、要素長の違いによって生じるひび割れの発生に起因した剛性低下を適切に評価可能であることが明らかになった
- (2) したがって、コンクリート要素に引張破壊エネルギー等価の概念を活用することにより、重錘衝撃力と荷点変位波形に関する波形性状や最大値、および残留変位等を大概評価可能であることが明らかになった

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) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 熊谷守晃：ランベツ覆道における落石災害に関する報告，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.286-290，1993.6
- 3) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation,2000.6
- 4) 岸 徳光，A.Q.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.53A，pp.1227-1238，2007.3