

(3) 緩衝構造の緩衝特性に関する数値解析的検討

北海道開発局 中野 修
室蘭工業大学 岸 徳光
室蘭工業大学 菅田 紀之
北海道大学 三上 隆
防衛庁 ○安藤 智啓

1. はじめに

落石や崩落の危険を有する場所に建設される道路網には、道路の保護、強いては人命を守るための安全施設として落石覆工構造物が設けられている。覆工上には通常、落石によって発生する衝撃力を緩和することを目的として緩衝構造が設置されている。現在、従来まで用いられている敷砂や新しく開発された緩衝構造の実規模に対応した緩衝性能を検討するために重量が 3tf あるいは 5tf の重錘を用いた大型実験が盛んに行われている。著者等も平成 2 年度より各種緩衝構造の緩衝性能に関する実験を、また平成 3 年度より実覆工を用いた実証実験を継続して行っている。これらの実験結果より、重錘が緩衝構造と衝突する際に発生する衝撃力（以下これを重錘衝撃力と呼ぶ）と緩衝材底部に伝達される衝撃力（以下これを伝達衝撃力と呼ぶ）の最大値が互いに異なることが明らかになっている^{1),2)}。また、力学的には真に覆工本体に作用する荷重は伝達衝撃力分布であるものと考えられるが、現在落石覆工の衝撃応答解析および設計計算は、一般に重錘衝撃力分布を覆工本体に作用させることにより行われている。この種の構造物のより合理的な設計計算手法を確立するためには、覆工の実挙動を基本にした解析モデルと入力荷重の決定が重要であるものと考えられる。

本研究では、非線形衝撃解析用汎用コード DYN3D³⁾を用いて、重錘落下による緩衝材と覆工を一体構造とした場合の動的挙動に関する数値解析を行い、実証実験結果と比較することにより本数値解析の妥当性について検討を行った。ここでは緩衝材として 90cm 厚の敷砂を用いた場合について検討を行っている。数値解析は 1)最初に重錘衝撃力および伝達衝撃力の波動特性について実験結果と比較する形で敷砂の材料定数の同定を行う。2)次に決定した材料定数を用いて応答解析を行い、頂版の変位および歪波形や各経過時間ごとの曲げモーメント分布に関して、数値解析結果と実験結果との比較検討を行った。

2. 解析の概要

2.1 解析モデル

北海道開発局は平成 4 年 9 月に一般国道336号広尾町に建設中の美幌覆道において実証実験を行っている。本研究ではこの実証実験が行われた覆工の 1 ブロックを取り上げ要素分割を行った。解析に用いた道路進行方向の対称半分の要素分割の概要を図-1 に示す。美幌覆道は、図に示されているように、1 ブロック 12m で海側側壁に 4.25 × 5m の開口部を有している。図-2 には実験結果との比較に用いた歪ゲージの添付位置および変位計の取付け位置を示している。

2.2 物性モデル

本解析に用いた重錘及び敷砂材の物性モデル、パラメータは平成 3 年 2 月に建設省土木研究所で解析に用いられたも

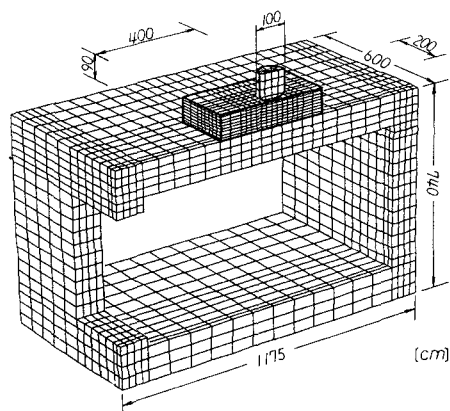


図-1 美幌覆道のメッシュ図

のに準拠している⁴⁾。表-1に今回の解析に用いた物性モデルおよびパラメータを示す。敷砂材に用いている土質モデルには、表に示しているように、砂の圧力依存型剛性とモール・クーロンの降伏条件式を用いている。

2.3 体積歪-圧力の関係

敷砂材のせん断弾性係数式中の圧力 p は体積歪 e の関数として折線近似で与えなければならない。ここでは静水圧状態と同様に仮定し、以下のような体積歪と圧力の関係を適用している。

$$p = -\frac{E}{3(1-2\nu)} e$$

ここで E は敷砂材の弾性係数、 ν はポアソン比である。本研究では、 $\nu = 0.45$ と仮定し、 E は解析結果と実験結果を比較することにより、ラーメ定数に換算して決定している。

2.4 境界条件及び初速度条件

覆工は基礎地盤上に設置され、かつ山側側壁部には土砂が裏込めされている。しかしながら、実測結果より、側壁の底部の歪応答がほとんど零であることが明らかになっている。これより本研究では底板部の裏面を上下方向に拘束することにした。また、山側側壁部の裏込めに関しては、応答時間が 1msec 以下であることより、その影響が小さいものと判断し、ここでは考慮していない。実験では、敷砂材はEPS

材（発泡スチロール材）に囲まれた空間に設置されている。ここでは、EPS 材が横方向に移動しないものと仮定し、敷砂材の側面は横方向への移動を拘束している。また、接触が予想される敷砂材上面と重錘底面および敷砂材底面と覆工上面にはスライディング・インターフェースを定義している。これにより、指定した 2 表面間の位置関係から接触、分離を判定し、ペナルティ法を用いて接触条件を満足させ、その処理を高速に行うことができる。さらに、数値解析は重錘と敷砂材が接触した時点から行っているため、重錘には衝突速度（重錘と敷砂材が接触する時点の重錘の速度）として落下高から換算した速度を与えている。本研究では、10m 落下に対する実験結果との比較を行っているため、 $v = 14\text{m/sec}$ を入力している。

3. 数値解析結果と実験結果との比較

3.1 重錘衝撃力および伝達衝撃力の時刻歴波形による比較

図-3には重錘衝撃力と敷砂材底部の伝達衝撃力の時刻歴波形

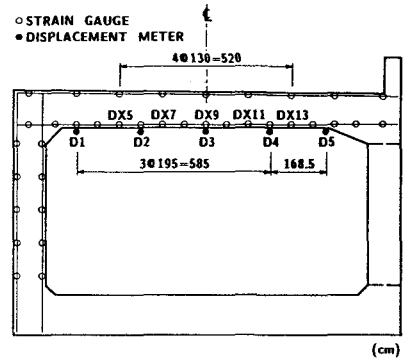


図-2 歪ゲージ添付位置および変位計取り付け位置図

表-1 物性モデル及びパラメータ

	敷砂材	重錘	覆工
物性モデル名	土質モデル	剛体	弾性体
特徴	圧力依存型剛性 Mohr-Coulomb降伏条件	非変形	線形
縦弾性係数 (kgf/cm ²)	-----	---	3.0×10^5
ポアソン比	0.45	---	0.2
せん断弾性係数 (kgf/cm ²)	$G = ap^b + c$ $a = 510 \text{ (kgf/cm}^2)^{1/2}$ $b = 0.5$ $c = 0.051 \text{ (kgf/cm}^2)$	---	1.875×10^5
降伏条件	$\tau = C + \sigma \tan \phi$ $C = 1.02 \text{ (kgf/cm}^2)$ $\phi = 30^\circ$	降伏せず	降伏せず
比重量 (kgf/cm ³)	0.0018	0.00452	0.0025

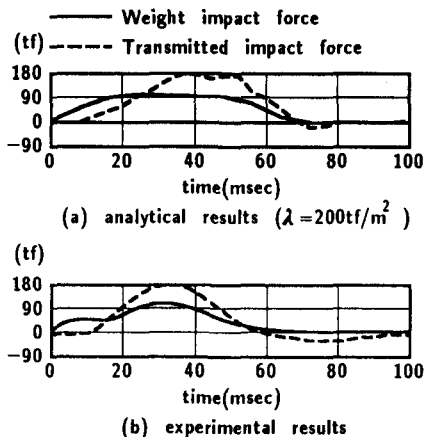


図-3 重錘衝撃力と伝達衝撃力の時刻歴波形

を示している。(a)には数値解析結果、(b)には実験結果の波形分布を示している。ここでは、数値計算の入力データのうち、ラーメ定数のみをパラメータとして扱い、実験結果との照合を行うことによって同定している。今回は、伝達衝撃力の最大応答値に注目して実験結果と照合を行っている。図に示しているように各衝撃力の最大応答値に関しては、 $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ を適用した場合の数値解析結果が実験結果をよく近似することが明らかとなった。しかし各衝撃力の最大応答時の時刻や波動継続時間に多少差が生じているようである。また図より、解析結果及び実験結果とも、最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力の約 1.8 倍程度の応答を示していることがわかる。これより以後の解析は $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ を仮定して行うこととする。

3. 2 頂版の鉛直方向変位による比較

図-4は図-2に示している覆道頂版の5点(D1~D5)に着目した鉛直変位波形の解析結果と実験結果の比較図である。D1~D5のいずれの解析結果および実験結果とも低次の振動状態となっている。第1波目の主応答部分に注目すると、D1~D5のいずれの場合も、多少解析結果の最大応答値が実験結果のそれに比べて小さいものの、解析結果は実験結果をよく近似しているものと思われる。また、その周期は、解析結果の方が実験結果と比較すると多少長く示されている。これは図-3で示されている伝達衝撃力の載荷時間が解析結果の方が実験結果に比べると若干長くなっていることと符合する。第2波目以降に注目すると、D2, D3, D4に関しては波形の減衰の程度が解析結果に比べ、実験結果の方が大きく示されているのがわかる。数値解析結果のみに注目すると、山側部のD1, D2の波形の減衰の程度が海側部のD4, D5のそれに比べ多少大きく示されていることがわかる。

3. 3 頂版下端筋の歪波形による比較

図-5は図-2に示している覆道頂版の5点(DX5~DX9)に着目した下端筋の歪波形の解析結果と実験結果の比較図である。DX5~DX9のいずれの解析結果及び実験結果とも低次の振動状態となっている。主応答部分に注目してみると、変位による比較の場合と異なり最大応答値は、解析結果の方が多少大きい値を示しているが、ここでも解析結果は実験結果をよく近似していると思われる。また、その周期は、変位と同様に解析結果の方が実験結果に比べると多少長く示されている。第2波目以降に注目すると、DX5~DX13のいずれの場合も波形の減衰の程度が解析結果に比べ、実験結果の方が大きく示されている。

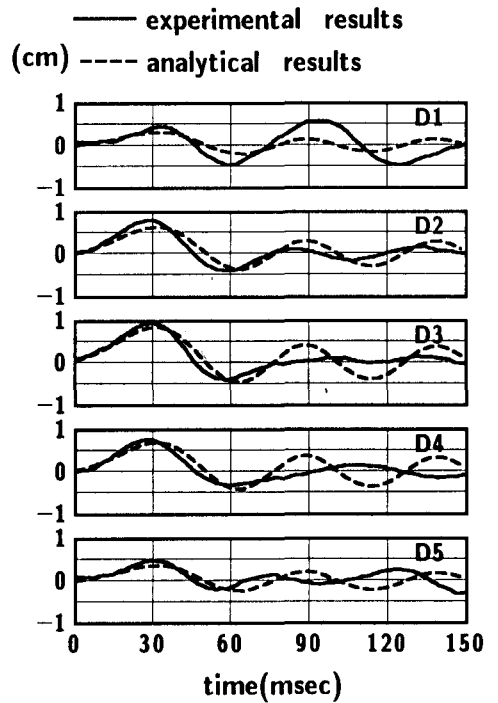


図-4 頂版の鉛直方向変位

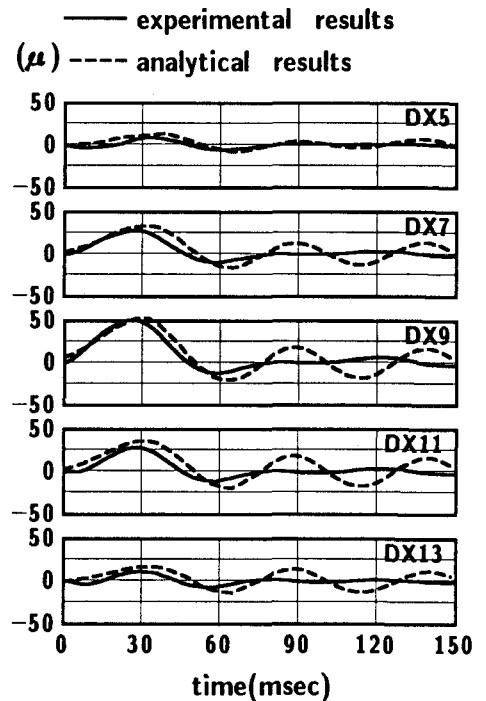


図-5 頂版下端筋の歪波形

ここでも数値解析結果のみに注目してみても、山側部の DX5, DX7 の波形の減衰の程度が海側部の DX11, DX13 のそれに比べ大きく示されている。

3. 4 曲げモーメント分布による比較

次に覆工断面の曲げモーメント分布の経時変化について比較検討を行うこととする。図-6には解析結果と実験結果を合わせて示したものである。最大応答値発生時刻に注目してみると、解析結果および実験結果とも応答開始後ほぼ $t = 25\text{msec}$ に発生していることがわかる。また最大応答値は解析より得られた値が約 36 tfm/m 、実験より得られた値が約 31 tfm/m と解析値の曲げモーメントの応答の方が若干大きな値を示しているが、解析結果は実験結果をよく近似していると思われる。周期に注目してみても、応答開始から約 70msec 程度までは解析結果は実験結果の応答過程をよく近似しているようである。しかしながら、 75msec 以降では解析結果には依然として顕著な自由振動状態を示しているのに対し、実験結果にはその状態がほとんど現れていない。

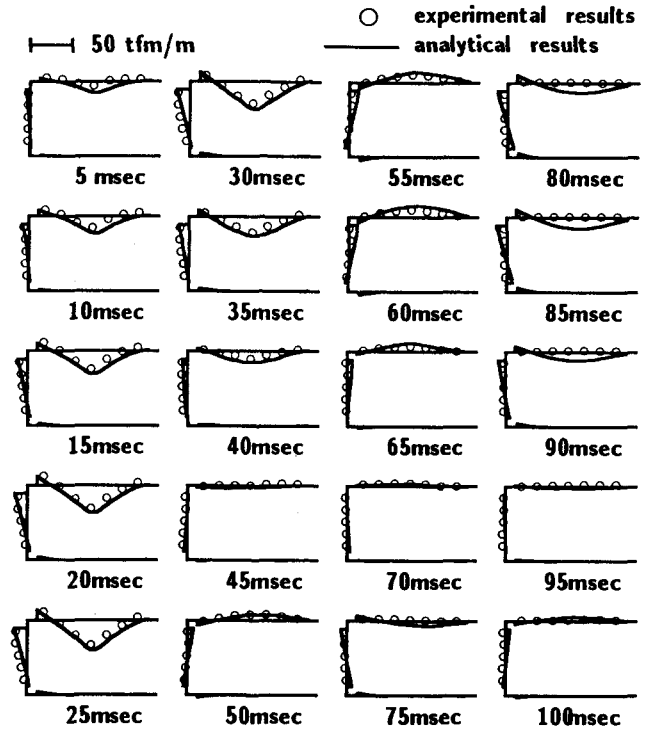


図-6 曲げモーメント分布

4. まとめ

非線形動的応答解析プログラム DYNA3D を用いて敷砂と覆工を一体構造とした場合の数値解析を行い、重錘衝撃力及び敷砂材底部の伝達衝撃力、覆工頂版の変位及び歪、覆工の断面力等に関して実験結果と比較検討を行った。本研究より得られた結果を整理すると、

- 1) 解析結果及び実験結果とも敷砂材底部の最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力の約 1.8 倍程度の応答を示す。
- 2) 重錘衝撃力及び敷砂材底部の伝達衝撃力を実験結果のそれと照合させ、材料定数を的確に同定することにより、覆工の変位、歪、曲げモーメント分布とも実験結果をよく近似することが明らかとなった。

以上より、敷砂材を緩衝材として用いた場合には、敷砂の材料定数を同定することにより、DYNA3D は覆工本体の衝撃応答性状に十分適用可能であることが明らかになった。

5. 参考文献

- 1) 中野修、松岡健一、岸徳光、金子学、尾山靖史：敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力，土木学会北海道支部論文報告集，第48号
- 2) 三上敬司、能町純雄、松岡健一、岸徳光：落石による落石覆工への衝撃力に関する評価，構造工学論文集，Vol.33A, 1987.3
- 3) J.O.Hallquist: Dyna3D User's Manual, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-19592, Rev.4, 1988-4
- 4) 建設省土木研究所動土質研究室：落石による衝撃力の解析業務，平成3年2月