

表-1 解析ケース一覧

解析ケース名	载荷方法		重錘質量 W (t)	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
	実験	解析			
W10H1.0	繰り返し	単一	10	1.0	98
W10H2.5				2.5	245
W10H5.0				5.0	490
W10H10.0				10.0	980
W10H15.0				15.0	1,470
W10H20.0				20.0	1,960

表-2 物性値一覧

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	28.3	20	0.167
D22,D19, D16,D13	7.85	391,402, 389,389	206	0.3
敷砂	1.531	-	10 (除荷時)	0.06
基礎コンクリート	2.5	-	30	0.2

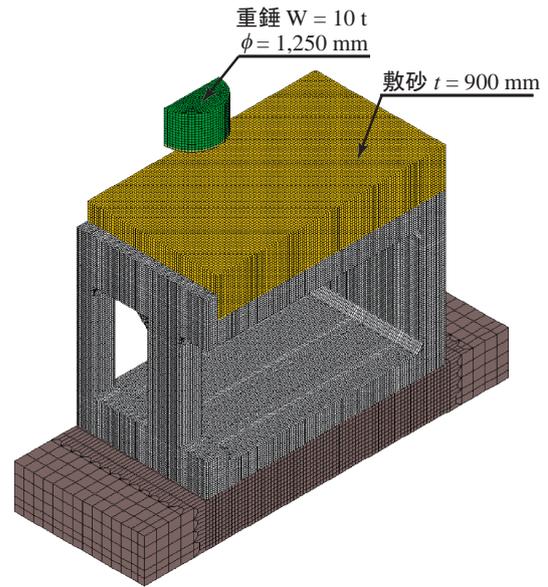


図-2 要素分割状況

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ー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、敷砂には8点積分、その他固体要素には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。また、本解析モデルの総節点数および総要素数は、661,766、658,504である。

2.3 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、鉄筋および敷砂の応力-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 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-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、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。

図-3(c)には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂の材料構成則モデルは、筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃载荷実験結果(W = 3 t, H = 5 ~ 30 m)と数値

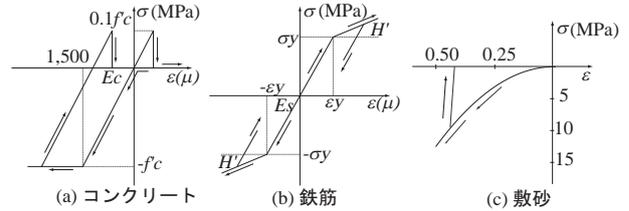


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

解析結果の比較検討により適用の妥当性を検証したものであり⁴⁾、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50 \epsilon_{sand}^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_{sand} は相当応力(MPa)、 ϵ_{sand} は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は $E_{ul} = 10$ GPaと仮定した。

式(1)は、敷砂緩衝材(敷砂厚90 cm)に対する衝撃载荷実験結果と数値解析結果の比較検討により得られたものであり、大型RC梁への適用は精度よく評価可能なことが明らかとなっている⁵⁾。本解析では、敷砂緩衝材を有する覆道模型においても式(1)が適用可能と仮定し、解析を行った。

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

図-4には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、载荷点変位に関する各応答波形を比較して示している。

図-4(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、その後第1波より振幅が小さく、周期が同程度の第2波で構成されている。また、落下高さが增大するにつれて、第1波と第2波の振幅の差が大きくなる事が分かる。解析結果を見ると、重錘衝撃力波形は実験結果よりも若干緩やかに第1波が励起し、その後実験結果よりも周期

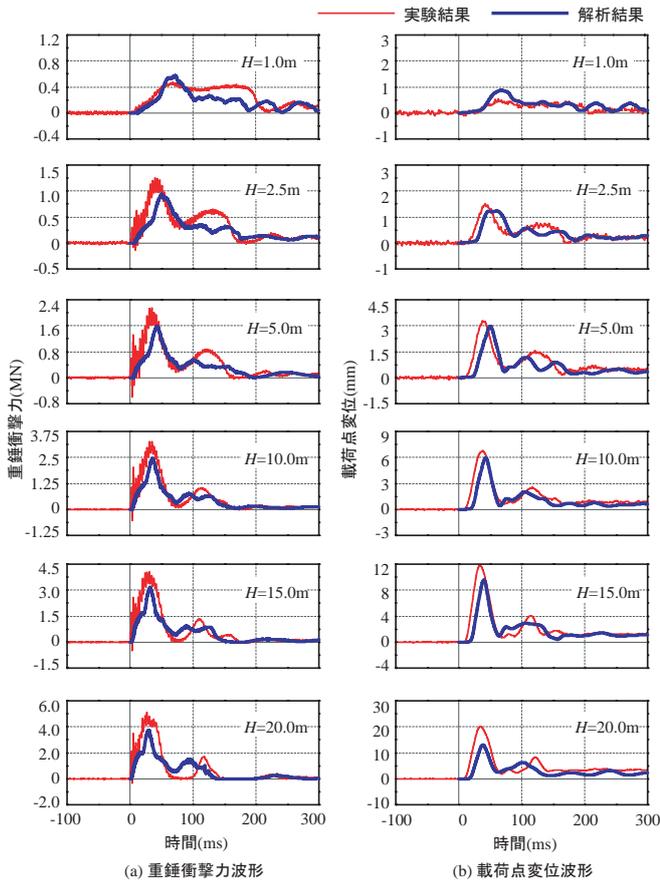


図-4 各種応答波形

の長い第2波で構成されている。しかしながら、第1波の最大値及び波形性状は実験結果をよく再現していることが分かる。

図-4 (b) は、載荷点変位波形に関する比較図を示している。図より、実験結果の波形性状は重錘衝突より若干遅れて緩やかに最大値を示す第1波が励起した後、残留変位成分を含む振幅の小さい第2波で構成されている。また、落下高さが増大するにつれて、第1波と第2波の振幅の差が大きくなる事が分かる。解析結果は、実験結果よりも第1波が若干遅れて励起し、その後振幅が小さく、周期の長い第2波で構成されている。最大値及び残留変位が実験結果と良く対応し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-5 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-5 (a) より、最大重錘衝撃力は、実験結果、解析結果共に入力エネルギーに対してほぼ1/2乗に比例して増加する傾向を示している。

図-5 (b), (c) に着目すると、実験結果の最大載荷点変位、残留変位共に E が 1.0 MJ 以下の場合には線形に、それ以上の場合には放物線状に増加する傾向を示している。特に、 $E \geq 1.5\text{ MJ}$ の場合には、繰り返し荷重によって損傷が蓄積され、両者共に著しい増加の傾向を示したものと推察される。これに対して、数値解析結果は最大載荷点変位の場合には、 $E = 2.0\text{ MJ}$ まで、残留変位も $E = 1.5\text{ MJ}$ までにはほぼ線形に増加していることが分かる。

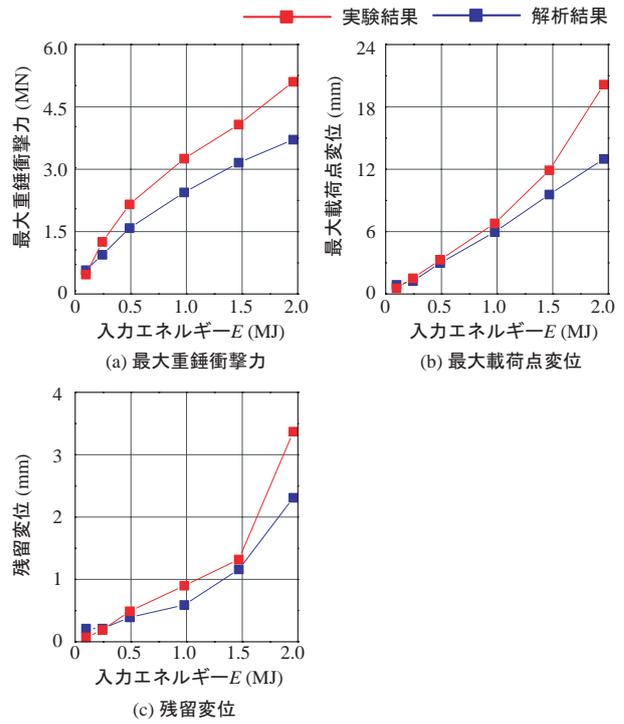


図-5 各応答値と入力エネルギーの関係

3.3 ひび割れ分布性状

図-6 には、落下高さ $H = 5.0\text{ m}$ から $H = 20.0\text{ m}$ 載荷終了時まで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、落下高さ $H = 1.0\text{ m}$ および $H = 2.5\text{ m}$ についてはほぼ弾性域内であり、ひび割れが生じていないことから割愛している。なお、数値解析結果において、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-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 $-0.001 \sim 0.001\text{ MPa}$ 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除荷状態にあるものとして評価可能である。

図より、頂版上面では実験結果、解析結果共にひび割れはほとんど生じていないことが分かる。一方、頂版下面では、実験結果は落下高さ $H = 5.0\text{ m}$ の時点から曲げひび割れが進行し、その後落下高きの増大と共に斜めひび割れを伴い、放射状にひび割れが分布していることが分かる。解析結果は実験結果の傾向とよく対応していることが分かる。

次に、柱部のひび割れに着目すると、落下高さ $H = 5.0\text{ m}$ では実験結果はひび割れが生じていないが、解析結果ではひび割れが発生している。また、落下高さが増大するにつれ、解析結果のひび割れは実験結果よりも顕著になっていることが分かる。これは、解析モデルでは柱部の形状の再現性を高めるため、他部材よりも要素長を小さくしていることより、剛性が過小評価されたものと推察される。

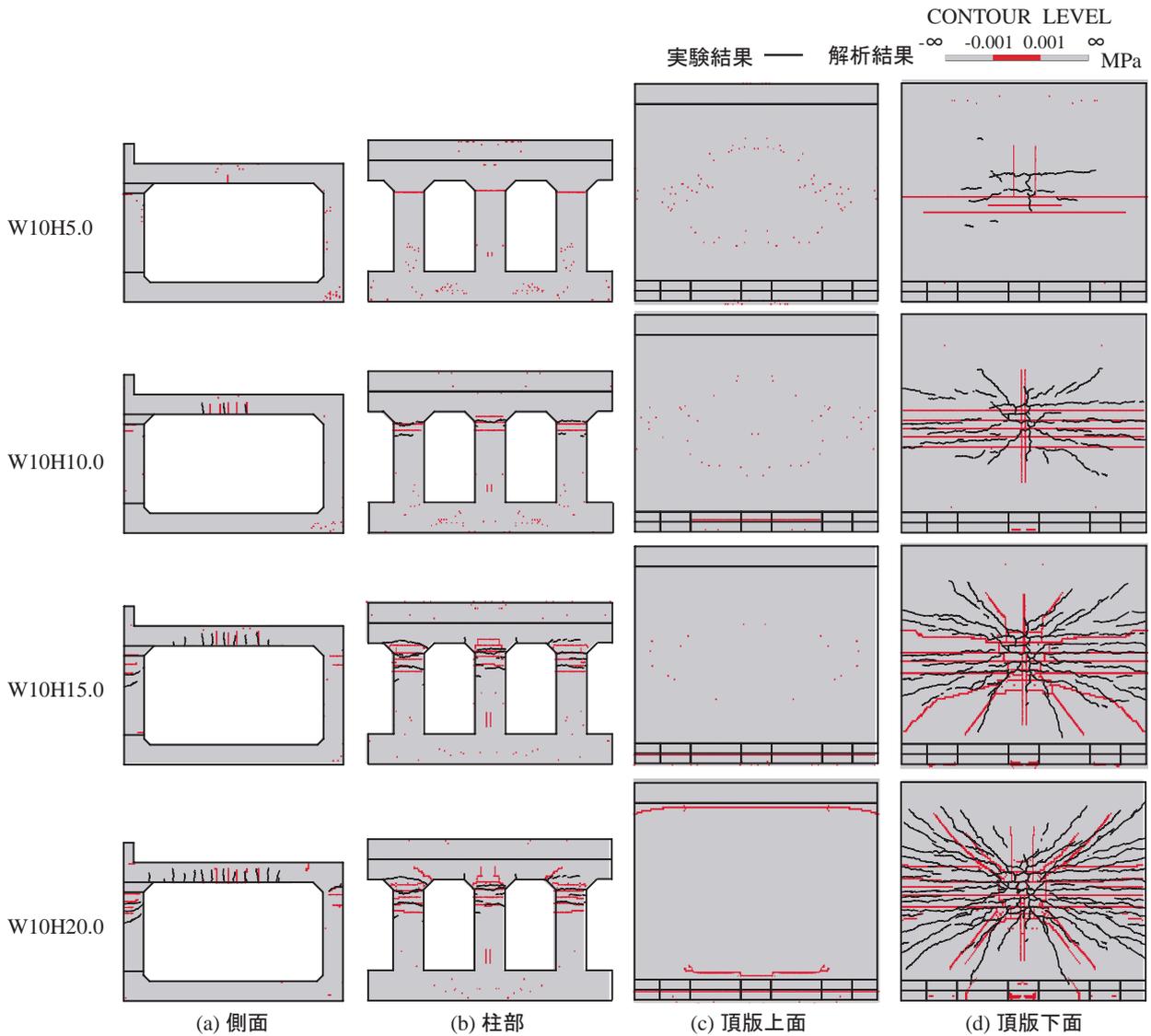


図-6 ひび割れ分布図

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最終目的に、1/2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、かつ、数値解析手法の確立に向けた検討を行った。特に、本研究では90 cm厚の敷砂緩衝材が設置されている場合について、検討を行っている。本研究では、入力エネルギーが小さい場合を除き、単一載荷状態においてもひび割れを伴う弾塑性挙動を示すことから、数値解析時間を節約するために、繰り返し載荷実験の各ケースに対して単一載荷を仮定し、数値解析を行った。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) 重錘衝撃力波形および載荷点変位波形の最大値及び波形性状は、入力エネルギーが $E \leq 1.0$ MJにおいては実験結果と概ね対応する
- (2) 数値解析結果のひび割れ分布性状は実験結果とほぼ対応している
- (3) 以上のことより、90 cm厚の敷砂を設置した落石覆

道の耐衝撃性状は、提案の敷砂に関する材料構成則を用いることにより、大略評価可能である。

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，岡田慎哉，今野久志，池田憲二：敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1323-1332，2003.3
- 5) N. Kishi，S. Okada，H. Konno：Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries，Structural Engineering International，Vol.37，No.1 pp.103-113，2009