実構造 RC 製覆道の重錘落下衝撃挙動のシミュレーションに関する基礎的研究

九州大学大学院　○学生会員　玉井　宏樹　九州大学工学部　学生会員　大曲　正紘
九州大学大学院　正会員　園田　佳巨

1. 緒言

我が国には，海岸線や山岳部の急傾斜面下や急崖下を通る道路が数多く存在することから，トンネルやロックシェッドが数多く建設されている．そのような構造物には，落石等の衝撃力が作用することが想定されるが，トンネル坑口部などに対しては耐衝撃性能の検討が行われていないのが現状である．そこで，本研究では実規模覆道を対象とした衝撃実験のシミュレーションを目的に，有限要素法を用いた 3 次元弾塑性衝撃応答解析による基礎的考察を行った．

2. 実構造 RC 製覆道の実規模衝撃実験の概要

本解析が対象とする覆道は，2006 年 10 月に寒地土木研究所によって実施された「二ツ岩覆道実規模衝撃実験」の対象構造である．二ツ岩覆道は，北海道浜益村の一般国道 231 号の廃道区間にあるＲＣ製覆道で，耐衝撃性能を明確にするために，重錘重量，重錘落下高さ，緩衝材の有無，本体補強の有無などを項目として，各ケースで衝撃挙動が調査された．実験状況を**写真-1** に示す．

3. 数値解析の概要

3.1　解析手法の概要

解析には，汎用非線形有限要素解析ソフトウェア MARC2005r3 を用いて行った．衝撃解析には，陰解法の一種であるシングルステップフーボルト法を採用し，時間ステップは 1.0×10^{-6}(sec)から 1.0×10^{-3}(sec)の範囲内で自動的に決定した．

表-1　解析ケース

	重錘重量(tf)	落下高さ(m)
ケース１	3	1
ケース２		5

3.2　解析対象および解析モデル

現実に行われた実験は，各種条件下で行われているが，本解析では敷砂緩衝材を用いずに直撃させた場合の**表-1** に示す場合を対象とした．解析モデルは，計算時間短縮のために**図-1** に示す断面を有する覆道の道路軸方向 3m 部分のみを対象とした．**図-2** に解析モデルを示すが，総節点数は 18,764，総要素数は 24,152 であり，コンクリートは 8 節点ソリッド要素，鉄筋は 2 節点トラス要素により離散化し，重錘に関しては剛体を仮定した．厳密には,覆道の基礎地盤等の影響を考慮すべきであるが，本解析では覆道底面の節点の全自由度を完全固定とする境界条件を設定した．

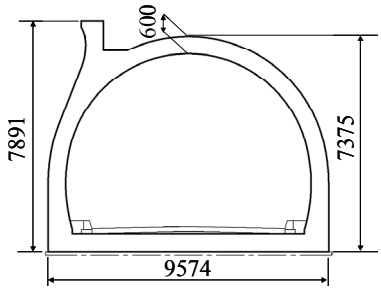


図-1　二ツ岩覆道断面図(mm)

3.3　材料特性および材料モデル

表-2 に解析に用いた各材料の物性値を示す．コンクリートの弾性係数はコア抜き試験値を用い，引張強度を圧縮強度の 1/10 を仮定した．また，**図-3** に本解析で仮定した鉄筋およびコンクリートの単軸換算応力-ひずみ関係をそれぞれ示す．鉄筋要素には，ミーゼスの降伏条件を仮定したバイリニア型の等方硬化則を適用した弾塑性体としてモデル化した上で，硬化係数は初期剛性の 1/100 の値を，除荷時の剛性には初期剛性で弾性復帰するものとした．コンクリート要素は，圧縮側に

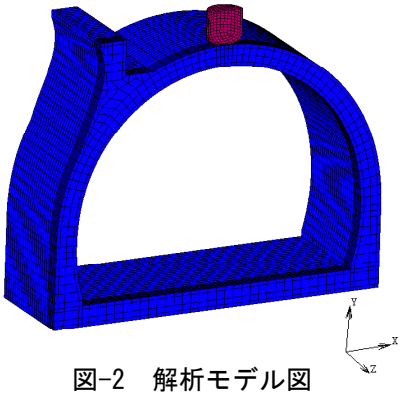


図-2　解析モデル図

は鉄筋と同様なバイリニア型を用い，引張側では引張強度以降はコンクリート標準示方書に基づく引張軟化を仮定した．なお，コンクリート材料には，一般に圧力依存型の降伏条件を用いるべきであると考えられているが，本解析では簡易なミーゼスの降伏条件を適用した．

3.4　解析結果および考察

図-4 に衝突位置におけるアーチ天端の鉛直方向変位応答を示す．ケース１，ケース２ともに残留変位が生じており，重錘落下高さが高くなるほど残留変位が大きくなり，変位の振幅と振動周期が大きくなることが確認できた．これは，衝突速度が大きくなるほどコンクリートのひび割れ箇所が多くなり，覆道の剛性が小さくなることで周期が大きくなったものと考えられる．

次に，**図-5** に重錘衝撃力波形を示す．今回は重錘加速度に重錘質量を乗じることで算出した値を重錘衝撃力として整理した．この図より，ケース１の最大衝撃力は 6000kN，ケース２の最大衝撃力は 14000kN に達することが確認できた．また，衝突速度が大きいほど最大重錘衝撃力が大きくなり，最大重錘衝撃力に達するまでの時間が短くなることが確認できた．今回の解析で得られた衝撃力波形は，比較的に高周波成分が少ないが，これは重錘を剛体としてモデル化したために重錘側の振動の影響が含まれていないためであると考えられる

また，ケース１，ケース２の最大変位時における最大主ひずみ分布を**図-6** に示す．図中の灰色で示した領域は，コンクリートの引張ひずみが**図-3**(b) で示した ε_f に達した要素に該当し，顕著なひび割れが生じる箇所であるとみなされる．この図から，アーチ基部ではひび割れが発生していないが，衝突部および衝突部背面に放射状にひび割れが生じることが確認できた．

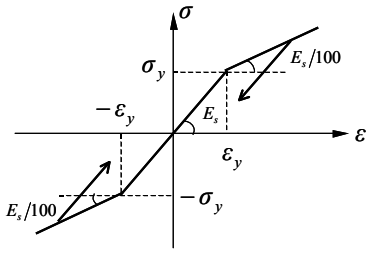
4.　結論

本研究では，トンネル坑口部のアーチ型実規模覆道を対象にした 3 次元弾塑性衝撃応答解析を実施した．その結果，重錘の衝突速度の違いが及ぼす変位応答特性および重錘衝撃力波形への影響を確認できた．また，**図-6** の最大主ひずみ分布より，アーチ構造物のひび割れ発生部分は放射状に広がるという解析結果が得られた．

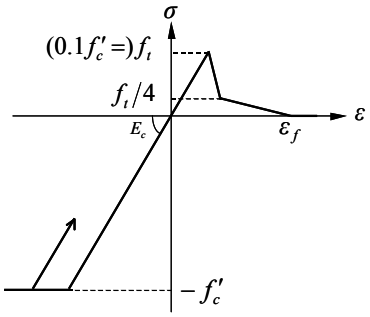
今後，現実の覆道が敷砂緩衝材等を敷設されていることを踏まえ，敷砂の緩衝効果を考慮した衝撃応答解析を実施し，覆道の耐衝撃挙動や終局耐力について実験結果との比較検討を行いながら，耐衝撃性能を正確に把握できる解析方法を検討していく予定である．

表-2　各材料の物性値

	鉄筋	コンクリート
弾性係数(N/mm²)	2.00×10^5	2.33×10^4
ポアソン比	0.30	0.17
密度(g/cm³)	7.85	2.40
圧縮強度(N/mm²)	295	32.0
引張強度(N/mm²)	(降伏強度)	3.20



(a)　鉄筋要素



(b)　コンクリート要素

図-3　各材料の応力-ひずみ関係

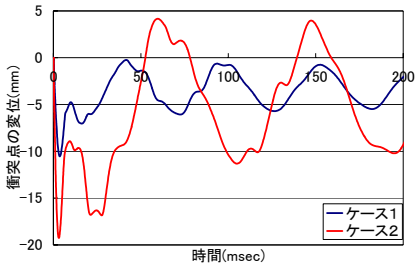


図-4　鉛直変位応答（アーチ天端）

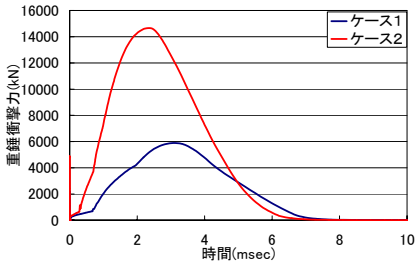
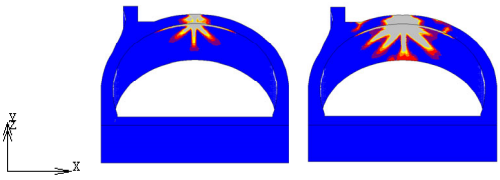


図-5　重錘衝撃力波形



(a)　ケース１　(b)　ケース２

図-6　最大変位時の最大主ひずみ分布