

RC アーチ構造形式の耐衝撃設計に関する実規模実験および数値解析的検討

Field falling-weight impact test and numerical study for constituting impact resistant design of arch type RC structures

岡田 慎哉*, 岸 徳光**, 今野 久志***, 西 弘明****

Shin-ya Okada, Norimitsu Kishi, Hisashi Konno and Hiroaki Nishi

* 修 (工) 寒地土木研究所 研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

** 工博 室蘭工業大学 理事・教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*** 博 (工) 寒地土木研究所 主任研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

**** 博 (工) 寒地土木研究所 総括主任研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

In this paper, a falling-weight impact test using real arch type RC structures was conducted to verify a proposed impact response analysis method. An applicability of the numerical analysis method was confirmed comparing with the experimental results. And an applicability of the current impact resistant design procedure to the performance based design procedure was investigated using the proposed numerical analysis method. From this study, it is confirmed that applying the current impact resistant design procedure, performance based impact resistant design with enough safety margin may be performed for the arch type RC structures.

Key Words : arch-shape RC rock-shelter, sand cushion, impact design,
falling-weight impact test, impact response analysis

キーワード： トンネル坑口部, 敷砂緩衝材, 耐衝撃設計, 重錘落下衝撃実験,
衝撃応答解析

1. はじめに

我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈している。そのため、止むを得ず海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って道路および鉄道が計画・建設されている箇所が多い。また、こういった制約の中で交通の安全を確保するために、トンネルを用いた路線計画となる場合も多く、結果、トンネルが多く建設されている。

これらのトンネルの坑口部は写真-1に示すように、一般的に斜面を背負うこととなる。通常、トンネルの坑口部は、その路線計画の策定の際に安全性に関しても十分な検討がなされるため、落石等の斜面災害に関する危険性はほとんどない。しかしながら、これらの土木構造物は長期に渡り供用されるため、斜面の風化や凍害等による経年変化によって、当初には想定され得なかった新たな斜面災害の危険が生じる場合がある。その場合には、鉄筋コンクリート製（以後、RC製）のアーチ構造形式であるトンネル坑口部は、落石による衝撃力を受けることが想定される。従って、交通の安全を確保するためには、トンネル坑口部の耐衝撃性能を把握し、適切な対策を実施する必要がある。

しかしながら、RC製アーチ構造形式の耐衝撃性能に関する検討は、ほとんど実施されておらず、その耐衝撃性能は明らかとなっていないのが現状である。従って、現状の耐衝撃設計法ではRC製アーチ構造に



写真-1 トンネル坑口部の例

対して合理的な設計を行うことは難しく、適切な対策を計画することは難しい。

これらのことより、RC 製のアーチ構造形式に対して、その衝撃挙動および耐衝撃性能を明らかにし、性能照査型設計の思想に基づいた合理的な設計手法を開発することが急務であるといえる。

著者らは過去に小型の RC 製アーチ構造模型を用いて重錘落下式の衝撃実験¹⁾を実施し、RC 製アーチの衝撃挙動および耐衝撃性能に関する検討を実施している。その結果、版形状に近い構造の場合は、静載荷実験および衝撃載荷実験結果ともに押抜きせん断型の脆性的な破壊性状等を示すことを明らかとしている。さらに、小型 RC 製アーチ構造模型の衝撃実験に関する三次元弾塑性衝撃応答解析を実施して、アーチ構造の衝撃挙動²⁾を明らかとしている。

一方、我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から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。このような状況下において、耐衝撃設計に関しても性能照査型設計法に移行すべく、土木学会構造工学委員会では小委員会を設置し検討に着手している。その中で、著者らは、重錘落下実験を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析^{3),4)}を試み、その適用性に関する検討を行っている。また、小型 RC 梁に関する解析手法を踏襲した場合の実規模 RC 桁への適用性⁵⁾に関する検討も行っている。さらに、三次元弾塑性衝撃応答解析法に基づいた実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、曲げ破壊型 RC 桁を対象にコンクリート要素の軸方向要素が基準の要素長よりも大きい場合に対して破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を評価する手法を提案⁶⁾している。

本研究では、RC 製アーチ構造に関する衝撃応答解析手法の確立を目的として、実トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施し、併せて著者らが過去の研究において検討した実規模 RC 梁の衝撃応答解析手法を、RC 製アーチ構造に適用した場合の数値解析を行い、実験結果と比較することで、その解析手法の適用性について検証を行うこととした。

さらに、検討の解析手法を用いて、性能照査型設計の基礎検討として、従来の箱形の落石防護覆工の設計手法を RC 製アーチ構造に適用した場合の適用性について検討を行うこととした。

衝撃応答解析手法の検証に関しては、アーチ上部に 900 mm 厚の敷砂緩衝材を設置した場合の重錘落下衝撃実験を対象とし、実験結果と数値解析結果とを比較することにより実施した。検証項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、アーチ部の変位に着目して行うこととした。



写真-2 実験状況

また、従来の設計法の適用性の検討に関しては、検証に用いた実験ケースの1つを対象とし、従来の設計手法によって算定される軸力および曲げモーメントを、衝撃応答解析結果と比較することで行うこととした。

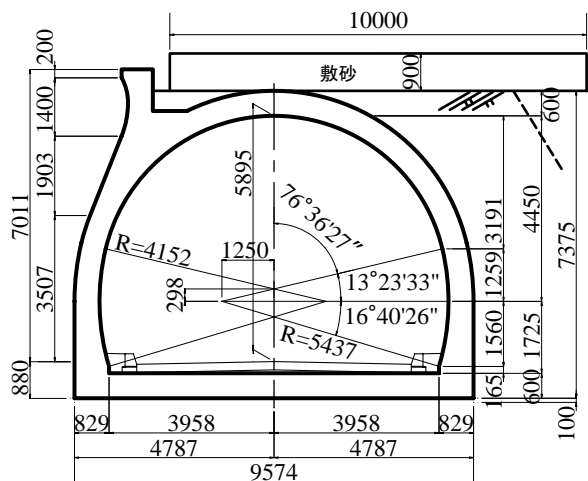
なお、本研究の弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver.970)⁷⁾を用いている。また、本実物実験を実施したトンネル坑口は、別線ルート完成に伴い平成14年度から廃道となっている259 m区間を使用している。

2. 実験概要

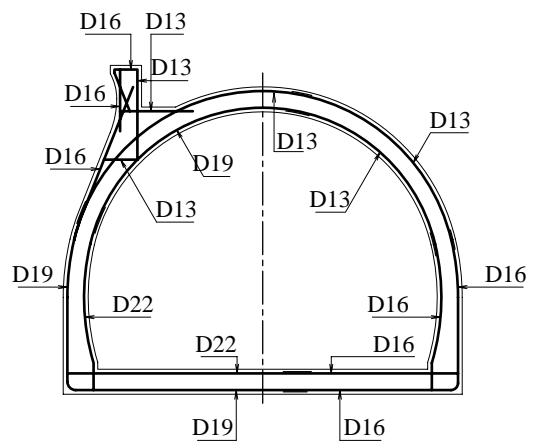
2.1 実験方法

写真-2には実験状況を示している。実験は、落石を模擬した重錘を、クローラクレーンにより脱着装置を介して吊り上げ、所定の高さから自由落下させ、アーチクラウン部中央点に衝突させることにより行っている。

本実験で用いた重錘は、落下高さに限界があることより、大きな衝突エネルギーを生じさせるため質量 10,000 kg の大型のものとし、直径 1,250 mm、高さ 950 mm で底部が半径 1,000 mm、高さ 300 mm の半球状のものをを用いることとした。敷砂緩衝材は、実験の便宜上、5,000 mm × 10,000 mm の範囲にのみ設置することとし、最も敷砂が薄くなるアーチクラウン部において、900 mm の敷厚が確保されるように敷き均した。



(a) 形状寸法



(b) 配筋状況

図－１ 実試験体の形状寸法および配筋状況

なお、敷砂緩衝材に用いられる敷砂材の平均湿潤密度および平均含水比は、 $1,610 \text{ kg/m}^3$ 、 13.8% である。

2.2 実トンネル坑口部概要

図－１(a)には、衝撃実験や数値解析に用いた試験体のトンネル坑口部の形状寸法、(b)にはその配筋状況をそれぞれ示している。試験体のトンネル坑口部の断面形状は、覆工部材厚 600 mm 、上半内空半径 $4,152 \text{ mm}$ 、側壁部高さ $1,725 \text{ mm}$ 、道路軸方向の１ブロック延長 $6,000 \text{ mm}$ である。覆工主鉄筋には $D13 \sim D22$ 、配力筋には $D13$ をそれぞれ 250 mm 間隔で配筋し、かぶりは 100 mm となっている。なお、鉄筋の材質は全て $SD295A$ である。

表－１には、実験および解析ケースの一覧を示している。本実験においては、重錘衝突位置に敷砂緩衝材を設置していることより、RC 製アーチ構造のコンクリートの損傷は軽微であると推測される。そのため、試験体ブロックの効率のよい利用を図るため、同一载荷ブロックにて落下高さを漸増させ実験を繰り返す、繰り返し载荷実験を行った。ただし、敷砂緩衝材については実験後にアーチ上面部までを掘り返し、再度敷き均しを行うことで繰り返しによる影響を排除することとした。数値解析については、実験ケースと同一の４ケースについて実施している。表中のケース名の内、第一項目は敷砂緩衝材の設置を示し、 S としている。第二項目は H の後に重錘の落下高さ (m) を付している。また、表中には試験体のトンネル坑口部の側壁部から採取したコンクリート供試体の一軸圧縮強度も併せて示している。

2.3 計測方法

図－２(a)には変位計測位置を、(b)には、伝達衝撃応

表－１ 実験および解析ケース一覧

実験 ケース	载荷 方法	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	コンクリート強度 (MPa)
S-H2.5	繰り返し	10,000	2.5	27.5
S-H5.0			5.0	
S-H10			10	
S-H20			20	

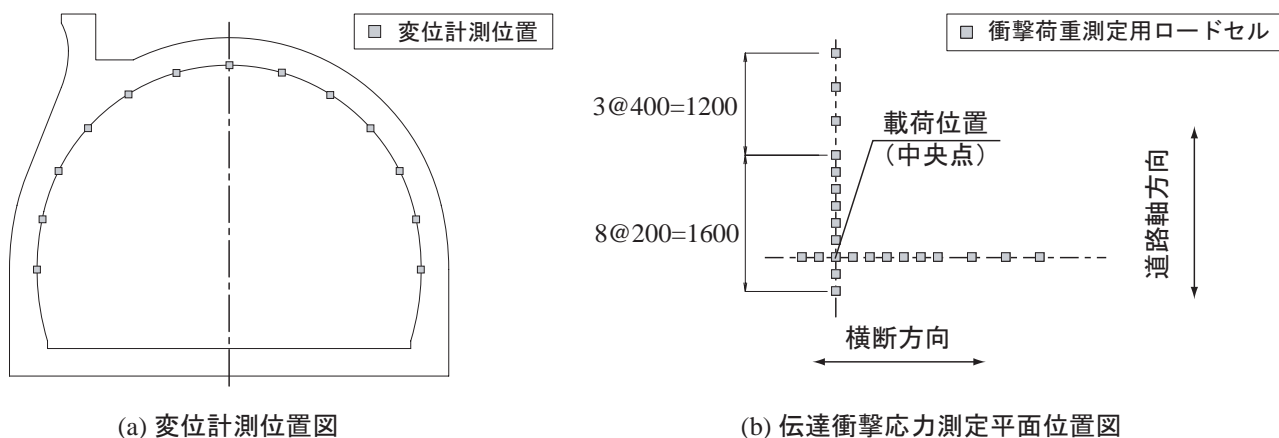
力測定位置をそれぞれ示している。本実験における測定項目は、重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式加速度計（容量 500 G 、応答周波数 $DC \sim 5 \text{ kHz}$ ）による重錘衝撃力、図－２(a)に示す位置の非接触式レーザ変位計（容量 500 mm 、応答周波数約 1 kHz ）による内空変位、図－２(b)に示す位置の衝撃応力測定用ロードセル（受圧径 32 mm 、容量 9.8 MPa 、応答周波数 $DC \sim 1 \text{ kHz}$ ）による伝達衝撃応力である。

内空変位を計測する非接触式レーザ変位計は、底盤上面の舗装上に組み立てられた架台に設置し、所定の位置の水平および鉛直方向の変位を計測している。伝達衝撃応力を計測するための衝撃応力測定用ロードセルは、覆工の表面部分に、周囲との凹凸が生じないように平滑に埋設し、敷砂緩衝材から覆工本体に伝達される応力を計測している。また、これらの計測項目は、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルレコーダにて一括収録を行っている。

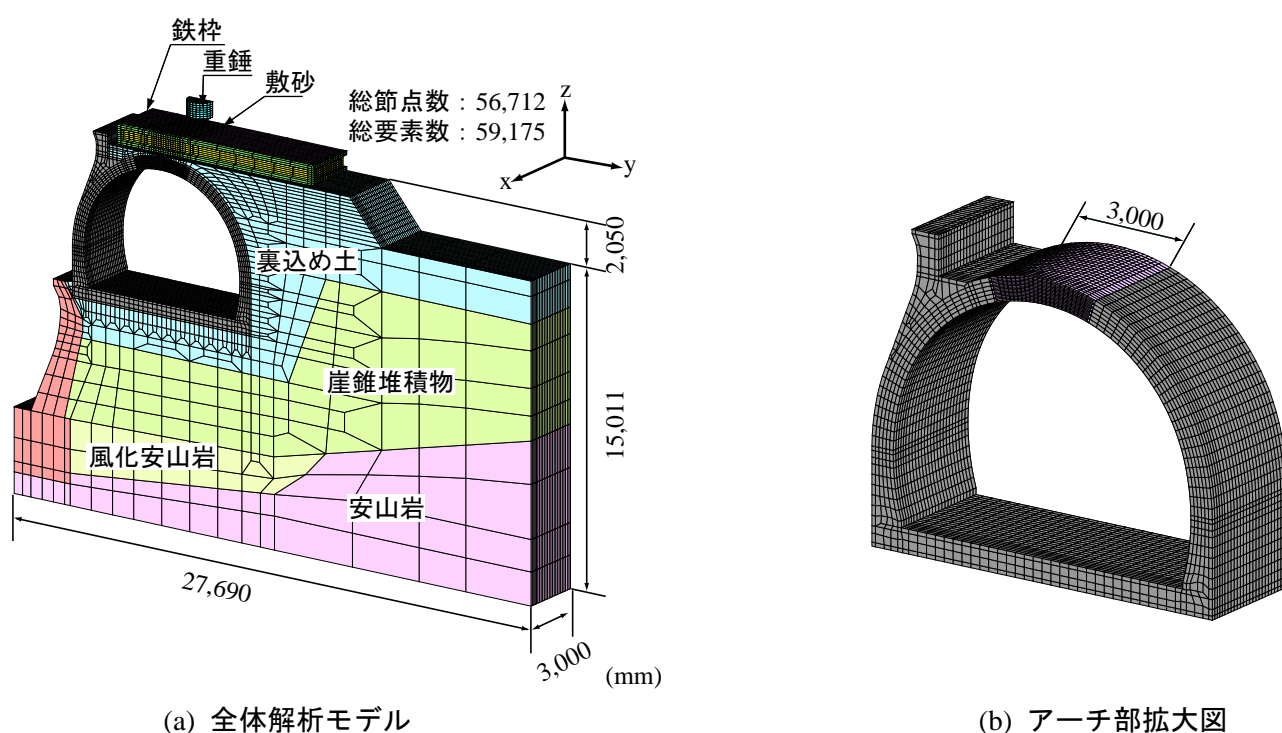
3. 解析仮定

3.1 数値解析モデル

図－３には、単一载荷ケースにおける数値解析モデルを示している。解析モデルは、要素分割状況が容易に把握できるように (a) には、全体の解析モデル、(b)



図－2 計測位置



図－3 解析モデル

には、RC アーチ構造部の解析モデルを拡大して示している。

解析のモデル化対象範囲は、著者らの従前の研究より衝撃応答解析においては、周辺地盤の影響が確認されているためこれらを考慮することとし、山側（図中右側）に対してはトンネル幅 10,000 mm 程度以上の範囲まで地盤を考慮し、海側に関しては、実際に現場に設置されている海岸擁壁までをモデル化することとした。さらに基礎地盤部に関しては、トンネルの高さ 8 m 程度以上の深さを考慮している。解析モデルは解析コスト削減のため、構造物の対称性を考慮し 1/2 モデルとしている。モデルの総節点数は 56,712 であり、

総要素数は 59,175 である。

各要素に関しては、鉄筋要素には梁要素を適用し、4 点積分を採用した。それ以外の要素には全て三次元固体要素を適用している。敷砂要素には 8 点積分を採用し、その他の要素には 1 点積分を採用している。コンクリートの要素長は、アーチ周方向に 250 mm 程度を基本としている。ただし、载荷点を中心とする 3,000 mm の範囲においては、その他の区間と比較してコンクリートの損傷がより多く発生するものと考えられることから、損傷状況の再現性の向上を図るため、その要素長さを、基本長さの 1/2 である 125 mm 程度のより小さな要素分割としている。なお、すべてのコンク

リート要素には破壊エネルギー等価の概念⁶⁾を適用している。また、敷砂緩衝材とトンネル覆工間、裏込土とトンネル覆工間には、接触と剥離を伴う接触面を定義している。

解析モデルの境界条件は、底面および山側と谷側の側面を完全拘束とし、さらに側面には応力波の反射が発生しないように無反射境界条件を定義している。また、トンネル断面に関しては、道路軸方向に自由境界を定義している。なお、敷砂緩衝材の側面の拘束に関しては、実験を忠実に再現するため、変形を許容している。コンクリート要素と鉄筋要素間の付着特性については、実験において剥離・剥落等がほとんど発生していないことから、鉄筋とコンクリートの間に剥離は発生していないものとし、完全付着状態としている。

解析モデルの減衰定数は、質量に比例する粘性減衰として定義し、最低次固有振動数に対して 5.0 % を設定した。

本数値解析は、重錘が敷砂緩衝材に衝突した時点から開始することとし、重錘に所定の初速度を与えることで重錘を衝突させている。また、解析対象時間は、重錘衝突から、アーチ構造の挙動が定常状態に至るまでの 300 ms 間について実施した。

3.2 材料物性モデル

表－2 には、解析に用いた物性値一覧を示している。地盤の物性値については、ボーリング調査や現場試験を行い決定している。

図－4 には、解析に用いた各材料の応力－ひずみモデルを示している。図－4 (a) 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モデルの応力－ひずみ関係⁸⁾は、次式のように示される。

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

ここで、 σ_{sand} は応力 (MPa)、 ε_{sand} は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ と仮定している。

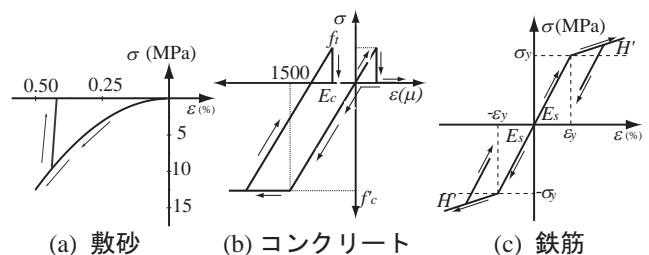
図－4(b) には、RC 製アーチ構造のコンクリート要素に用いた応力－ひずみ関係を示している。コンクリートの応力－ひずみ関係は、圧縮側に対しては 0.15 % ひずみ時に圧縮強度で降伏するバイリニア型とし、引張側は応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないカットオフを定義している。本研究では、圧縮試験から得られた圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とした。引張側の引張強度 f_t に関しては、一要素の周方向に一個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、周方向要素長が異なる場合においても等しいひずみエネルギーでひび割れが発生するように (引張破壊エネルギー等価の概念)、各コンクリート要素に対して仮定の引張強度を設定することとした。ここでは、断面方向要素長 250mm、125mm の仮想引張強度とし

表－2 解析に用いた物性値一覧

材料	密度 $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	弾性係数 $E \text{ (GPa)}$	ポアソン 比 ν
コンクリート *	2,350	25.0	0.167
敷砂	1,600	10.0**	0.060
鉄筋	7,850	206.0	0.300
裏込め土 (盛土)	2,000	0.68	0.450
崖錐堆積物	2,000	1.40	0.40
風化安山岩	2,000	1.80	0.40
安山岩	2,100	3.10	0.40
重錘	10,080	206.0	0.300

*コンクリートの密度および弾性係数は設計時の値

**除荷時の弾性係数



図－4 材料物性モデル

て、文献 8) と同様に基準要素長を 35mm と設定し、 $f_{t250}=0.545 \text{ MPa}$ 、 $f_{t125}=0.77 \text{ MPa}$ と設定した。

図－4(c) には、RC 製アーチ構造本体の異形鉄筋要素に用いた応力－ひずみ関係を示している。ここで採用したモデルは、降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。ここでは、 $H' = E_s / 100$ と仮定している。なお、 E_s は鉄筋の弾性係数である。

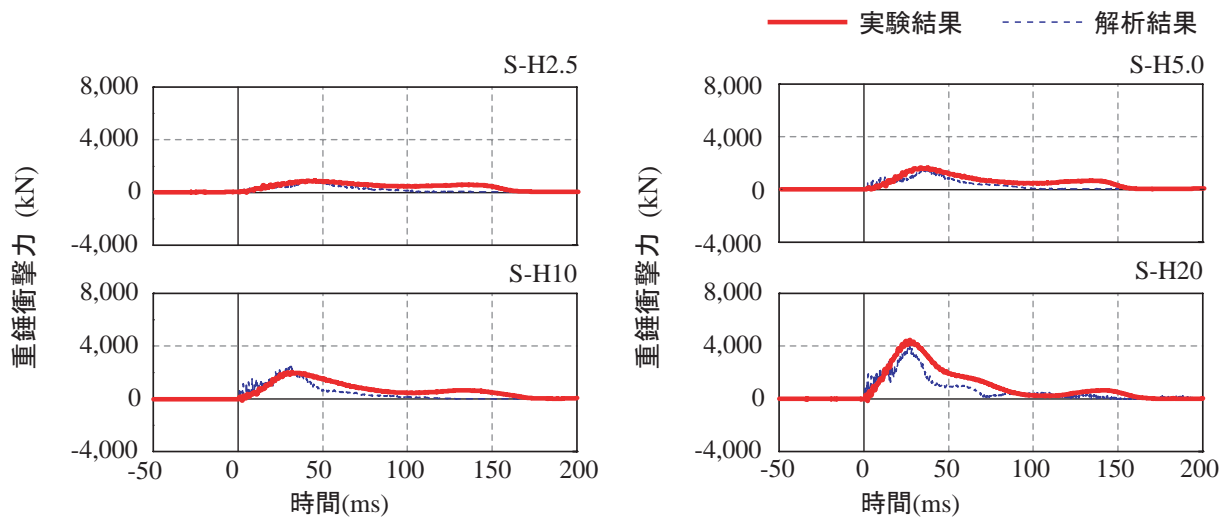
コンクリートおよび異形鉄筋の降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとし、ひずみ速度効果は考慮していない。また、海岸擁壁のコンクリート、裏込め土、重錘および地盤は弾性体として仮定している。

4. 数値解析の精度の検証

ここでは、実験結果と数値解析結果を比較することで、実施した数値解析手法の解析精度を検討し、その適用性について論ずる。なお、検討は実験により得られた各種データごとに順を追って行う。

4.1 重錘衝撃力による検証

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。縦軸には重錘衝撃力値を、横軸には時間を重錘衝突時点を零として整理している。図中、太い実線により実験結果を、細い破線に



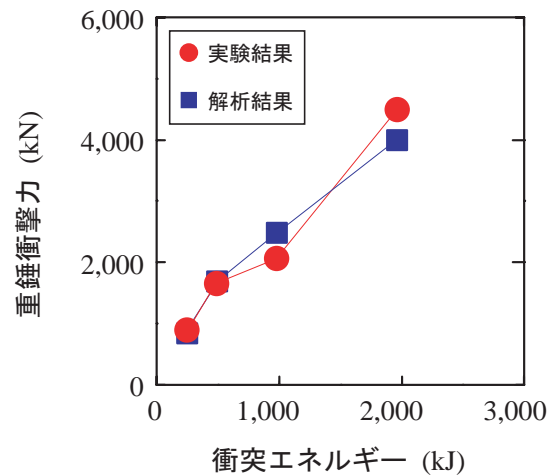
図－5 重錘衝撃力波形

より数値解析結果を示している。

図より、重錘衝撃力は重錘衝突とともに高周波成分を伴って励起し、衝突後 25 ～ 40 ms 程度で最大応答を迎え、その後 100 ms 程度で、零レベルまで減衰する。解析結果はこの傾向をよく再現しており、その最大値についてもよく再現されている。

図－6 には、最大重錘衝撃力と衝突エネルギーとの関係を示している。図より、最大重錘衝撃力は、衝突エネルギーに対してほぼ線形の関係にあることが分かる。また、解析結果はこれをよく再現している。

これより、本解析手法は重錘衝撃力に関して高精度の再現性を有していることが明らかとなった。



図－6 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーとの関係

これらのことより、本解析手法を用いることにより、敷砂緩衝材を介して RC アーチ構造に入力されるエネルギーは的確に評価できるものと判断される。

4.2 伝達衝撃力による検証

図－7 には、伝達衝撃力波形を示す。なお、図は重錘衝撃力波形の場合と同様の表示となっている。ここで、伝達衝撃力はアーチ上面に設置した衝撃荷重測定用ロードセルより得られた伝達衝撃応力を円周方向に積分し合算することで、アーチ上面全面に作用する伝達衝撃力として算定したものである。

図より、伝達衝撃力は重錘衝突より 20 ms ほど遅れて励起され、その後 10 ～ 20 ms で最大応答となる。その後、波形は徐々に減衰し、100 ms で零レベルとなる。解析結果はこれをよく再現し、最大応答値、応答時刻ともに良好な再現性を示している。

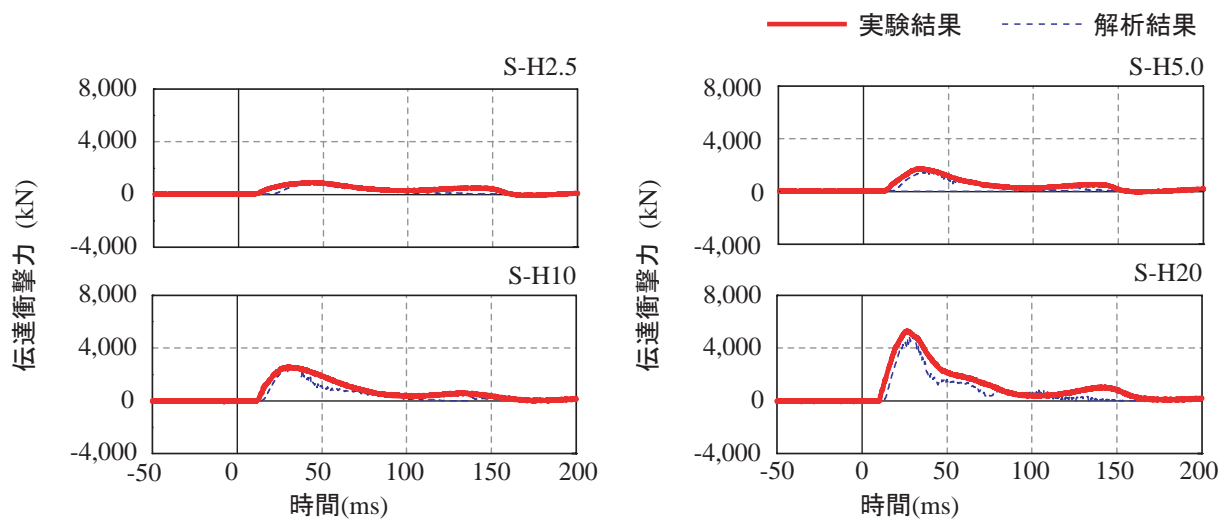
図－8 には、最大伝達衝撃力と衝突エネルギーとの関係を示している。図より、最大伝達衝撃力においても最大重錘衝撃力の場合と同様に、衝突エネルギーに対してほぼ線形の関係になっていることが分かる。解析結果はこの関係を非常によく再現している。

これより、本手法は伝達衝撃力に関して、その時間分布、応答値ともに精度よく評価できることが明らかとなった。

4.3 内空変位による検証

図－9 には、载荷点直下の鉛直方向内空変位波形を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、図はこれまでと同様の表示となっている。図より、载荷点変位は重錘衝突から 20 ms 程度遅れて生じ、およそ 50 ms で最大となる。その後、残留変位成分を含んだ減衰自由振動状態に移行する。解析結果は、落下高さの大きい場合に若干の差異が発生するものの、その傾向はよく再現されている。

図－10 には、最大载荷点変位と衝突エネルギーとの関係を示している。図より、最大载荷点変位は衝突エネルギーとほぼ比例の関係にあることが分かる。解析結果には若干の差異はあるものの、これをよく再現している。



図－7 伝達衝撃力波形

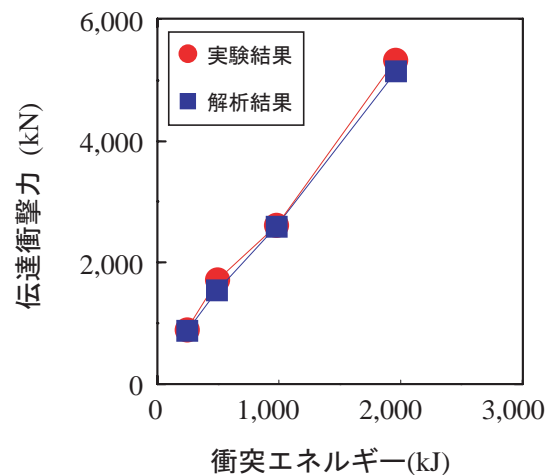
図－11には、载荷点残留変位と衝突エネルギーとの関係を示している。図より、残留変位はある程度の衝突エネルギーまではほぼ零レベルであり、それよりも大きな入力エネルギーとなる場合に急激に大きくなることが分かる。また、その場合にもほぼ線形の関係が成り立つことが分かる。解析結果は、衝突エネルギーが大きい場合に若干差異が大きいが、傾向は再現されているものと判断される。

図－12には、落下高さ 20 m の場合の内空変位分布を示している。図は、重錘衝突から 10 ms ごとの変位分布を示している。なお、図中の丸印は実験結果を、四角印は解析結果を示している。図より、変位は 30 ms に重錘衝突点近傍が鉛直下向きに変形し始め、50 ms で最大変位を迎えている。その後、変位は小さくなり、100 ms ほどで変形が収束している。解析結果は、水平方向の変位に実験との差異が見られるものの、この傾向を比較的良好に再現していることが分かる。

これらのことより、実規模 RC 梁の衝撃応答解析手法を RC 製アーチ構造の場合に適用することで、衝撃荷重載荷時における変形性状を比較的良好に再現できることが明らかとなった。

5. 数値解析による耐衝撃設計の検討

前章での検討により、本解析で用いた解析手法は精度よく実験を再現できることが明らかとなった。本解析結果より得られた軸力分布および曲げモーメント分布を、従来の設計に用いられるような静的解析結果と比較することで、RC 製アーチ構造の衝撃挙動について検討する。なお、比較するケースは重錘落下高さが 20 m のケースを対象とする。



図－8 最大伝達衝撃力と衝突エネルギーとの関係

5.1 静的解析

現行の落石防護構造物の設計においては、落石衝突による荷重を静的荷重に置換し、静的な構造解析を実施することで、構造内に発生する軸力および曲げモーメントを評価する。

落石対策便覧⁹⁾では、落石による衝撃力は静的荷重として以下の式で与えられる。

$$P = 2.108(m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha$$

ここに、

P ：落石の衝撃力 (kN)

m ：落石の質量 (t)

g ：重力加速度 (m/s^2)

λ ：ラーメの定数 (kN/m^2)

H ：落石の落下高 (m)

α ：砂層厚と落石直径の比から決定される
割り増し係数

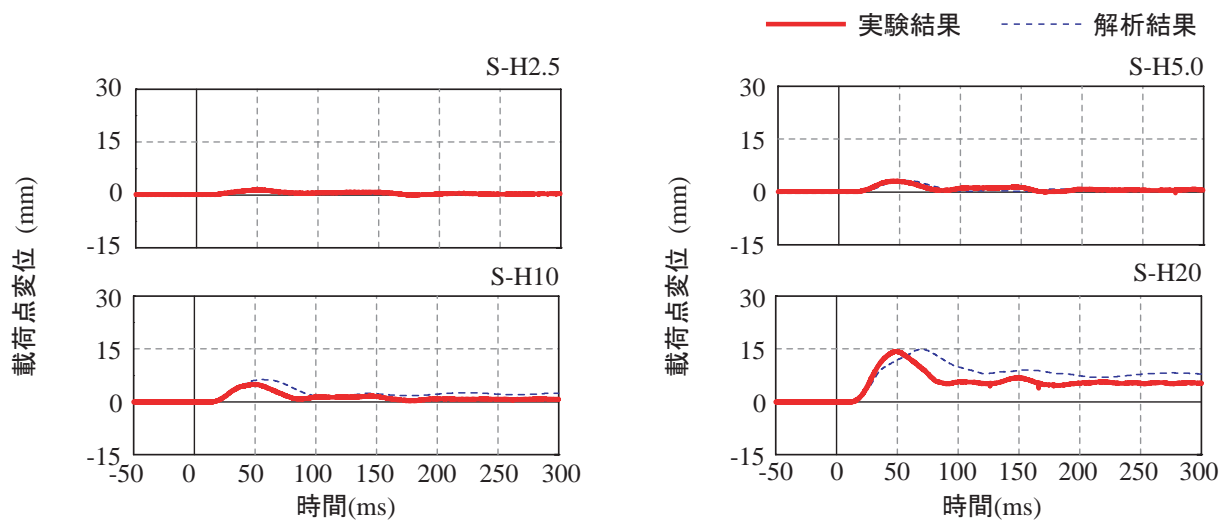


図-9 荷点変位波形

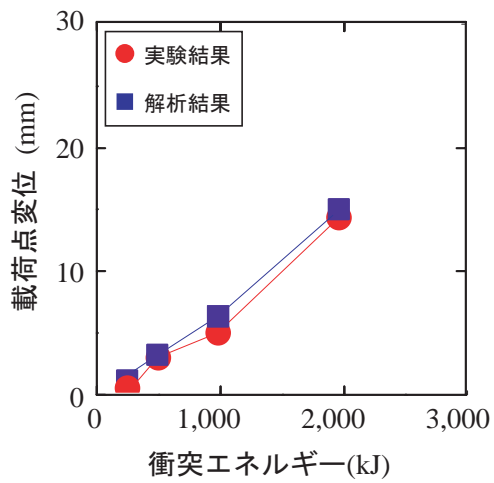


図-10 最大荷点変位と衝突エネルギーとの関係

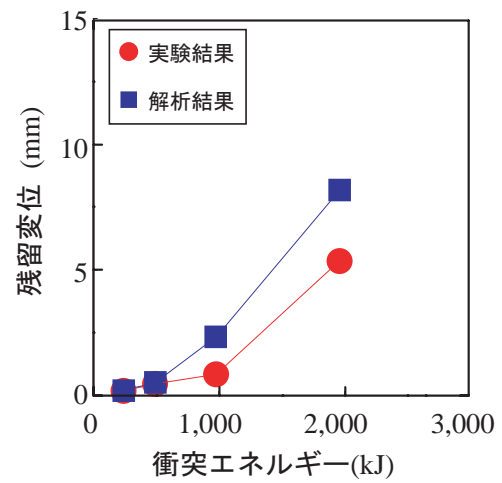


図-11 残留荷点変位と衝突エネルギーとの関係

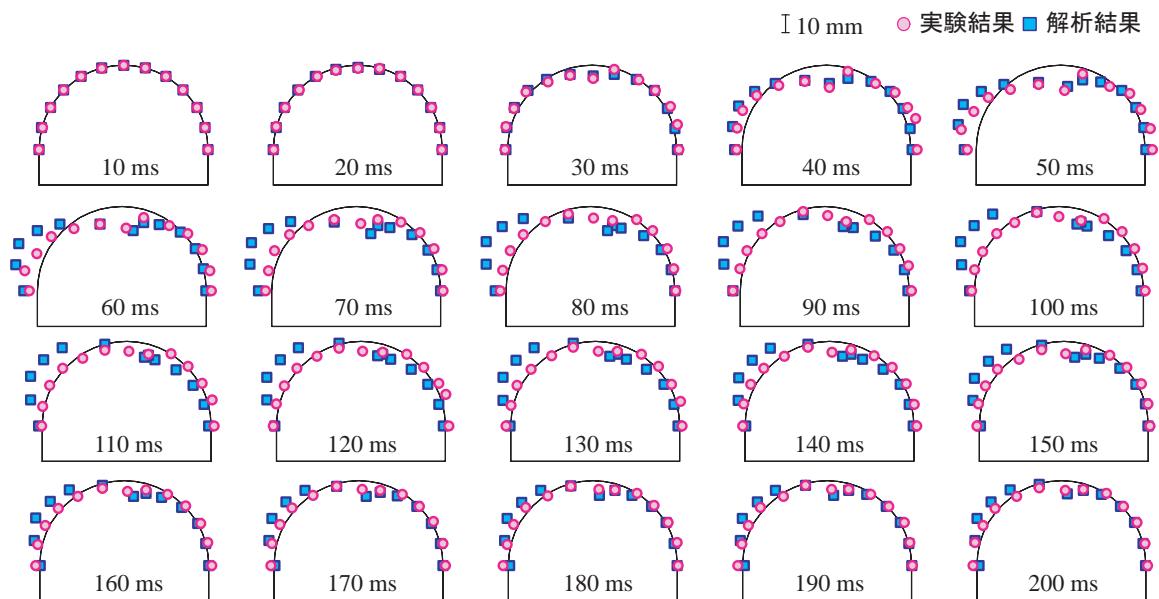


図-12 内空変位分布 (S-H20)

なお、割り増し係数 α は以下の式で与えられる。

$$\alpha = \sqrt{D/T}$$

(ただし、 $T \geq D$ の時 $\alpha = 1$)

ここに、 T : 砂層厚 (m) (ただし、 $T \geq 0.9$ m とする)

D : 落石直径 (m)

これより、落石対策便覧に基づいてラメ定数を $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ と仮定し、重錘落下高さ 20 m のケースを対象として静的落石荷重を算出すると、

$$P = 2.108 \times (10 \times 9.8)^{2/3} \times 1,000^{2/5} \times 20^{3/5} \times \sqrt{1.25/0.9} \\ \doteq 5,050 (\text{kN})$$

となる。これは、実験により得られた最大伝達衝撃力とほぼ同等となっており、精度よく静的落石荷重を評価できていることが分かる。

また、その荷重分散範囲については、同じく落石対策便覧より砂層厚に対して 1:0.5 の範囲に分散するものと仮定し、重錘衝突点を中心とした 900 mm × 900 mm の範囲に分散作用するものと仮定した。

このようにして得られた静的荷重が本検討で対象としている RC 製アーチ構造に作用した場合の軸力および曲げモーメントを、静的解析によって求めることとする。

図-13 には、静的解析に用いた解析モデルを示す。静的解析では、衝撃応答解析との解析手法の差異に起因する誤差を排除するため、衝撃応答解析に用いたモデルの本体構造部分をそのまま利用することとした。なお、従来の落石防護覆工の設計は許容応力度法による設計となっているため、静的解析では解析モデルはすべて弾性体とし、発生する断面力のみを評価することとする。

静的荷重は、重錘の衝突位置であるアーチクラウン部を中心とした 900 mm × 900 mm の範囲に、圧力荷重として作用させることとした。また、解析モデルの境界条件は、底面を完全固定とした。なお、その他の解析仮定については、衝撃応答解析の場合と同様である。

5.2 静的解析結果と衝撃解析結果の比較

図-14 には、アーチ断面力を静的解析結果と衝撃応答解析結果とを比較する形で示している。ここで、衝撃応答解析結果については、正負両側の応答に関して解析実施時間を通じて最大となる応答を包絡したものを示している。また、軸力に関しては内側が圧縮軸力、外側が引張軸力として図化し、曲げモーメントに関しては内側が正として図化している。なお、アーチクラウン部から右側 30 度付近の曲げモーメント急変部は、対象としたアーチが有する壁体の影響と考えられる。

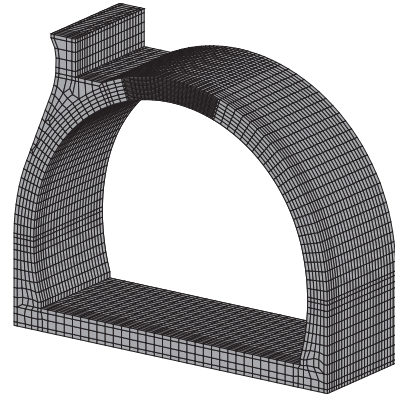


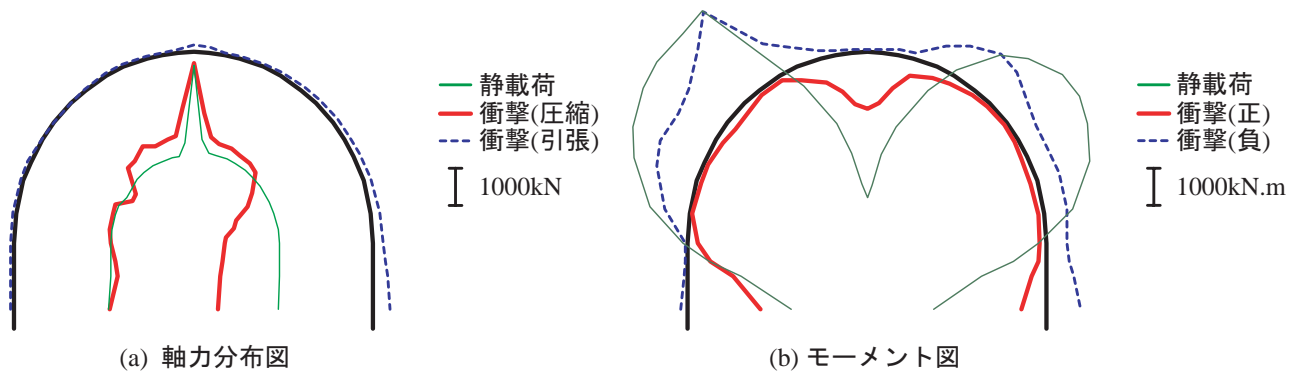
図-13 静的解析モデル

(a) より、軸力分布に関しては、静的解析結果ではアーチ全領域において 2000 kN 程度の圧縮側軸力が作用している。衝撃応答解析結果は、アーチ部に関しては全域においてほぼ同レベルの圧縮軸力が発生していることが分かる。側壁部に関しては、海側の側壁部はほぼ同レベルの圧縮軸力となっている。しかしながら、山側の側壁部については衝撃応答解析結果が静的解析結果よりも大きな応答を示している。また、リバウンド応答となる引張軸力に関してはアーチ部、側壁部ともにほとんど発生していない。

(b) より、曲げモーメント分布においては、衝撃応答解析結果は静的解析結果と比較して全体的に小さな応答となっていることが分かる。載荷点直下の正の曲げモーメントに関しては、衝撃応答解析結果がおおよそ 1/3 程度、アーチ側面部分に関してはおおよそ 1/2 程度の応答にとどまっている。ここで、対象の実規模アーチ構造の固有周期は、図-9 より 100 ms 程度であるものと考えられる。また、伝達衝撃力の最大応答継続時間は、図-7 より 20 ms 程度となっている。前述のように、静的落石荷重算定式は精度よく最大伝達衝撃力を評価しており、静的解析において入力した荷重は伝達衝撃力の最大応答値とほぼ等しい。これより、伝達衝撃力の最大応答継続時間が構造の固有周期よりも大幅に短いことから、アーチ構造が衝撃荷重に応答し、作用荷重に相当する曲げモーメントが生じるよりも早く衝撃荷重が除荷されたため、衝撃応答解析結果は静的解析結果よりも小さな応答となったものと推察される。

さらに、衝撃応答解析におけるリバウンド応答に関しても、全体的に小さな応答となっており、静的解析結果と正負反転した大きな応答は見られない。

これらのことより、軸力に関しては山側側壁部において若干の過小評価となるものの、従来の落石防護覆工に用いられている設計法をアーチ構造に適用した場合にも、設計が可能であることが明らかとなった。また、本検討のような実規模レベルの構造においては、敷砂緩衝材を用いた場合には衝撃応答解析結果は静的解析結果よりも小さな応答となるものと考えられる。



図－14 静的解析結果と衝撃応答解析結果との断面力の比較 (S-H20)

6. まとめ

本研究では、RC 製アーチ構造に関する衝撃応答解析手法の確立を目的として、実トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施し、併せて実規模 RC 梁の衝撃解析手法を RC 製アーチ構造の衝撃解析に適用した場合の数値解析を行い、実験結果と比較することでその解析手法の適用性の検証を行った。その結果、

- (1) 本検討で用いた実規模 RC 梁の衝撃解析手法は、RC 製アーチ形式の衝撃解析の場合においても、重錘衝撃力、伝達衝撃力ともに精度よく実験を再現できることが明らかとなった。
- (2) 変位応答性状に関しては、残留変位において若干の差異は発生するものの、大略良好に実験結果を再現可能であった。

また、検討の解析手法を用いて、性能照査型設計の基礎として、従来の落石防護覆工の設計手法を RC 製アーチ構造に適用した場合の適用性について検討を行った。その結果、

- (3) 従来の設計法を適用した静的解析結果と衝撃応答解析結果を比較すると、衝撃応答解析結果は静的解析結果と同等あるいは小さな応答を示すことが明らかとなった。また、実規模レベルの構造の場合には同様の傾向を示すものと考えられる。
- (4) 従来の設計法を RC 製アーチ構造に適用することで、耐衝撃設計が可能であることが明らかとなった。

今後は、RC 製アーチ構造に関するより合理的な設計法の確立を目指し、落石防護覆工の性能照査型設計手法の確立に向けた検討を進めたいと考えている。

謝辞：本検討を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学専攻 千葉 知子さんには多大なご協力をいた

だいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉, 鈴木健太郎: 小型 RC アーチ模型の耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1191-1202, 2007.4
- 2) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉: 小型 RC アーチ梁模型の衝撃応答特性に関する数値解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.847-852, 2006.6
- 3) 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
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.1
- 5) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 6) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 三上 浩, 今野久志, 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
- 7) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.3
- 8) 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
- 9) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6

(2007 年 9 月 18 日受付)