

I-33

緩衝構造を有する覆工の二次元有限要素解析

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 室蘭工業大学 正員 松 岡 健 一
 開発土木研究所 正員 中 野 修
 室蘭工業大学 正員 菅 田 紀 之
 室蘭工業大学 学生員 安 藤 智 啓

1. はじめに

山岳地帯や海岸線近くの急峻な地形に建設される道路では、落石や崩落に対する安全施設として覆工構造物を設ける必要があり、この覆工構造物には落石などの衝撃外力を緩和させるための緩衝構造を置くことが通常行われている。現在、衝撃外力を受ける覆工構造物の合理的な設計を行うための研究^{1)~3)}が精力的に行われているが、合理的な設計のためには、構造物の耐衝撃挙動を明らかにするとともに衝撃外力の算定も重要な課題である。落石による衝撃力の算定は実験に基づいた各種の式が提案されているが、理論的に衝撃力を算定する研究は弾性接触論などに基づくものの以外はないようである。しかも、弾性接触論に基づく理論では緩衝構造を有する場合に適用することは困難である。また、これまで覆工構造物の衝撃挙動解析や設計においては、緩衝構造と覆工構造物を一体として考慮せず、主として実験等で緩衝構造から得られる衝撃力を外力として覆工構造物に作用させ、動的または静的に解析する方法によっている。しかし、緩衝構造を通して与えられる衝撃力を常に実験により得ることは不可能であり、この種のシステムの理論的な検討が望まれている。

本論文では、落石等による緩衝構造表面での衝撃力は明らかなものとして、緩衝構造と覆工構造物を二次元有限要素を用いてモデル化し一体として解析することにより覆工構造物に及ぼす衝撃外力および覆工構造物の断面力等を検討したものである。ここでは、覆工構造物本体に対して有限要素法による解析と梁要素による解析との比較および各種緩衝構造を持つ覆工構造物の有限要素法解析を行い、解析方法の適用性や緩衝構造の特性などを検討した。

2. 解析モデル

解析に用いた覆工構造物は、一般国道 236 号線広尾にある美幌覆道を参考とし、図-1 のようにモデル化した。実物の美幌覆道は現在建設中であり、完成すれば全長 228m で 1ブロック 12m として設計されている。解析ではこれを奥行き方向に単位長さを取り断面方向にモデル化し、衝撃による断面方向応力に注目し解析することとした。

また解析はこの覆工構造物に対して、覆工構造物のみ (TYPE-1)、緩衝構造として層厚 90cm の砂層を用いたもの (TYPE-2)、および

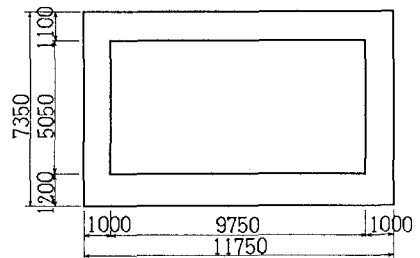


図-1 解析モデル (単位: mm)

緩衝構造として表層に層厚 50cm の砂層、芯材に 20cm 厚の RC 床板、裏層に層厚 50cm の発泡スチロール材 (EPS) とした三層構造を用いたもの (TYPE-3) の 3 ケースに対して行った。各ケースのメッシュは図-2 に示すとおりであり、メッシュの分割は、各タイプとも応力評価を正確に行うために境界部の分割を小さくしている。

衝撃力は、図-3 に示すように緩衝構造の表面でピーク時に 50tf の集中荷重が作用すると考え、文献 4) に従い緩衝構造による分散効果を考慮して載荷面積を決定した。この方法は TYPE-2, 3 では必ずしも合理的な方法ではないが、比較のため同じ載荷面積を用いた。また、衝撃力の時間分布は文献 3) を参考に図-4 のように仮定した。

解析に用いた各部材の物性値は表-1 に示すとおりである。実際の覆工構造物は谷側の壁面に明りとりがあり、そ

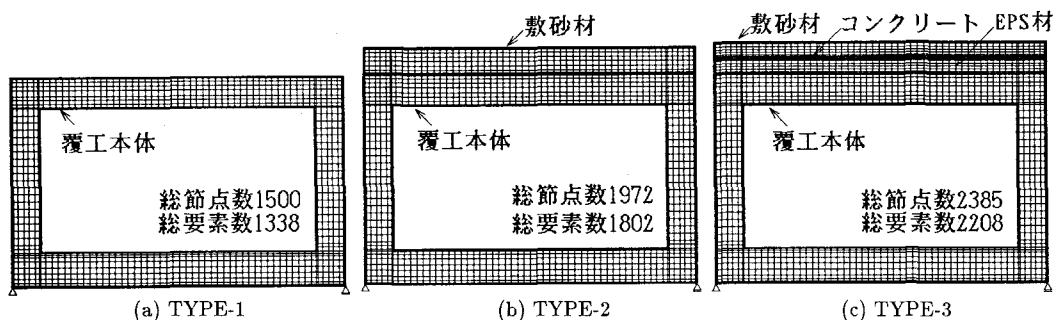


図-2 メッシュ図

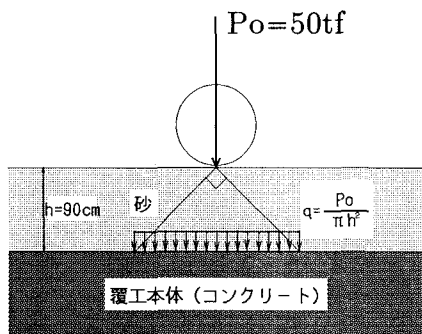


図-3 荷重の緩衝材による分散

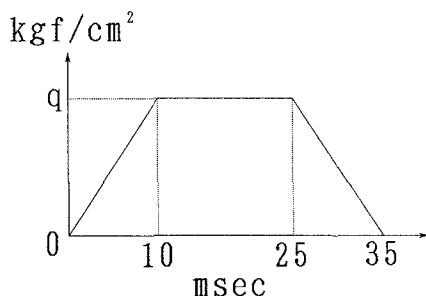


図-4 荷重の時間分布

の部分の剛性は山側と異なるが差は大きくないのでここでは無視し、山側断面と同一にした。

砂層に関しては、砂の粒度分布、含水率、締固め度などにより剛性がかなり異なることが予想される。落石対策便覧では、砂の剛性を評価する λ （ラーメ定数）を非常に軟らかい土で $\lambda=100\text{tf}/\text{m}^2$ 、軟らかいもので $\lambda=300\sim 500\text{tf}/\text{m}^2$ 、硬いもので $\lambda=1000\text{tf}/\text{m}^2$ として算定することを薦めているので、本論文でも表に示すような3通りを設定した。またポアソン比は 0.45、密度は $0.018\text{ kg}/\text{cm}^3$ で一定とした。モード法を用いた二次元有限要素法による解析に考慮した固有値は各タイプとも 45 個とし、減衰定数は 5% とした。衝撃応答解析における二次元有限要素法の定式化は、文献 5) を参考にして行ったが詳細は省略する。

表-1 部材の材料特性

部材		弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	密度 (kg/cm^3)
コンクリート		300000.0	0.2	0.0025
EPS		50.0	0.05	0.00002
砂	λ (tf/m^2)	100	0.45	0.0018
		500	0.45	0.0018
		1000	0.45	0.0018

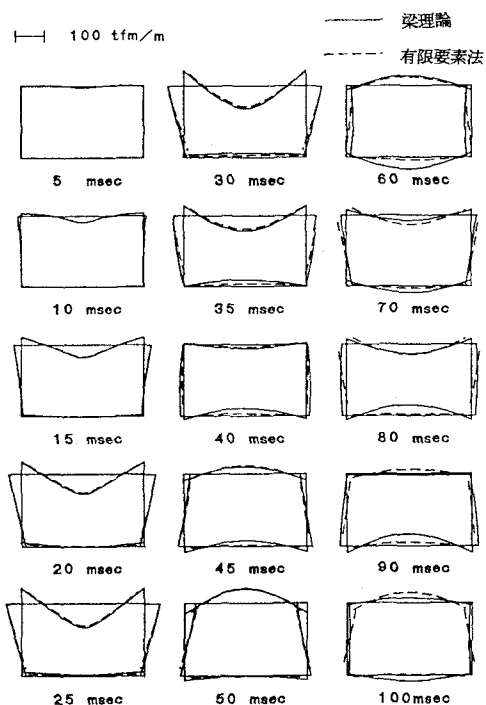
3. 数値解析

本論文では、先に述べたように数値解析により次の二点について検討を加えた。すなわち、まず最初に TYPE-1 および 2 に対して解析理論による比較を行うため、設計に多く用いられている剛性マトリックス法⁶⁾による応答解析と二次元有限要素法による解析との比較を行った。

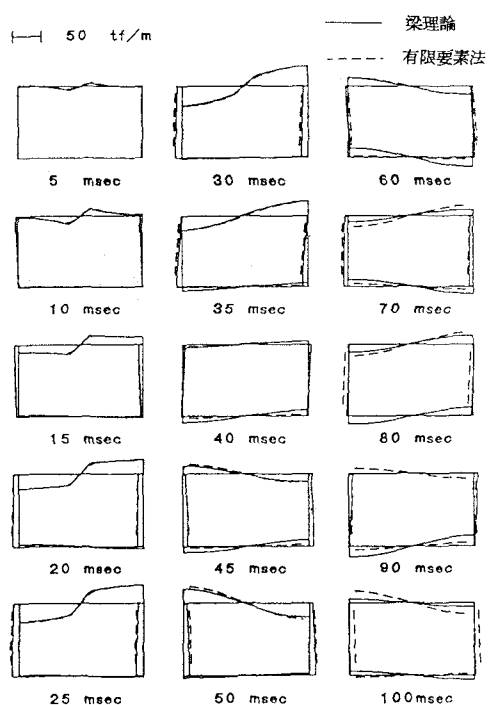
次に、緩衝構造の緩衝機構を明らかにするため TYPE-2 および 3 に対して有限要素法による解析を行い、覆工構造物に及ぼす衝撃土圧や構造物の断面力の比較を行った。

3.1. 有限要素法と剛性マトリックス法の比較

比較に用いた剛性マトリックス法による解析では、覆工構造物を 78 要素に分割し動的解析にはやはりモード法を

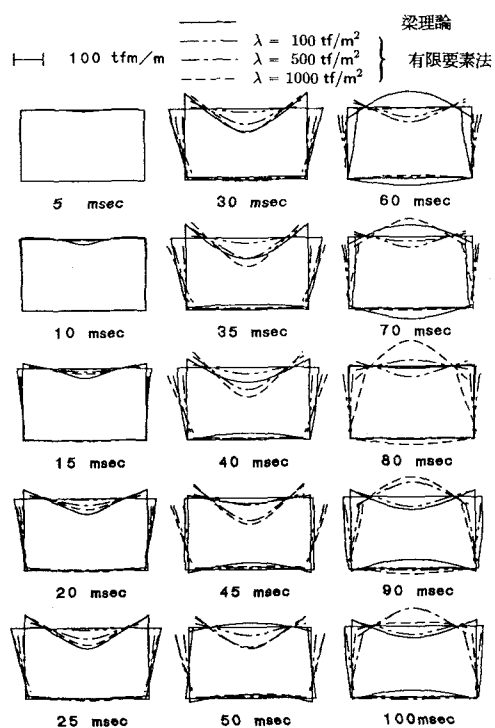


(a) 曲げモーメント図

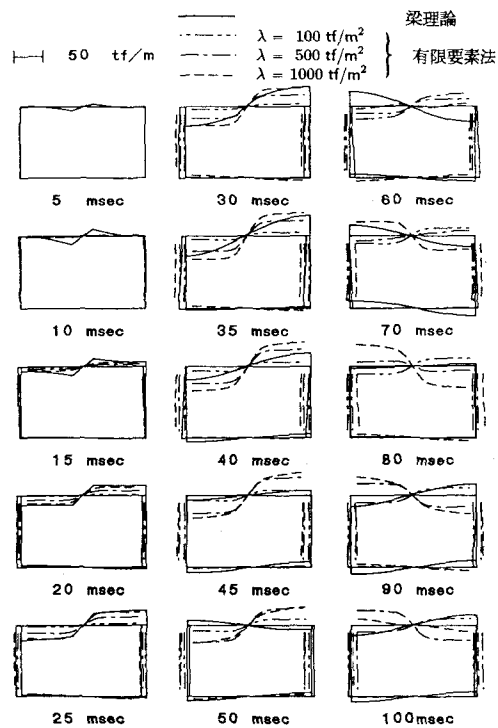


(b) せん断力図

図-5 断面力の比較 (TYPE-1)



(a) 曲げモーメント図

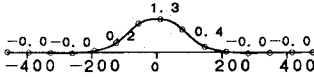


(b) せん断力図

図-6 断面力の比較 (TYPE-2)

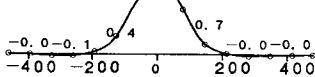
UNIT: kgf/cm

T=75 msec



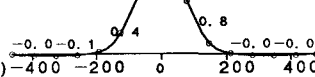
(a) $\lambda = 100$ (tf/m²)

T=45 msec



(b) $\lambda = 500$ (tf/m²)

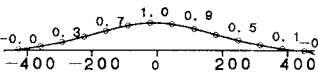
T=40 msec



(c) $\lambda = 1000$ (tf/m²)

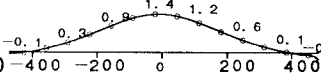
図-7 覆工表面における伝達衝撃圧力の分布(TYPE-2)

T=50 msec



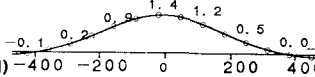
(a) $\lambda = 100$ (tf/m²)

T=40 msec



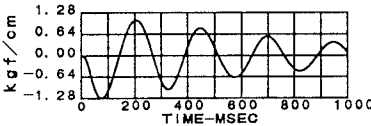
(b) $\lambda = 500$ (tf/m²)

T=35 msec

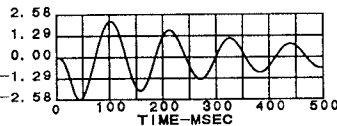


(c) $\lambda = 1000$ (tf/m²)

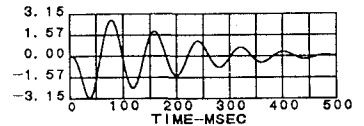
図-8 覆工表面における伝達衝撃圧力の分布(TYPE-3)



(a) $\lambda = 100$ (tf/m²)

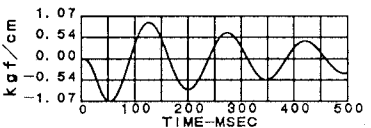


(b) $\lambda = 500$ (tf/m²)

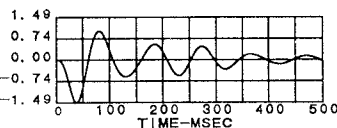


(c) $\lambda = 1000$ (tf/m²)

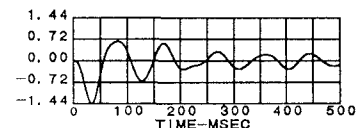
図-9 覆工表面中央部の伝達衝撃圧力形波(TYPE-2)



(a) $\lambda = 100$ (tf/m²)



(b) $\lambda = 500$ (tf/m²)



(c) $\lambda = 1000$ (tf/m²)

図-10 覆工表面中央部の伝達衝撃圧力波形(TYPE-3)

用い固有値は全固有値を考慮している。また TYPE-2 では、砂層は剛性を考慮せず質量のみを考慮して解析している。解析結果を図-5および6に示す。(a), (b) はそれぞれ覆工構造物の曲げモーメントおよびせん断力図である。

図-5 は TYPE-1、すなわち覆工構造物本体のみの場合である。曲げモーメント、せん断力とも下側床板部で多少違いがみられるものの全体として両者の解析結果はかなり一致しており、断面方向の解析を考慮する場合、覆工構造物本体に対しては剛性マトリックス法でも十分解析できることを示していると思われる。TYPE-2 の解析結果を図-6に示したが、この場合砂層の剛性を三種変化させているので合わせて示している。有限要素法の場合、砂層の剛性により応答にかなりの相違がみられる。剛性マトリックス法の解析結果は、衝撃初期では砂の剛性の大きなものに近い値となっているが、時間の経過とともに一致せず、梁要素で評価することが困難なことを示している。従って、梁要素で解析する場合には、本体構造物に合理的な伝達衝撃圧力を仮定し解析することが望ましいと思われる。

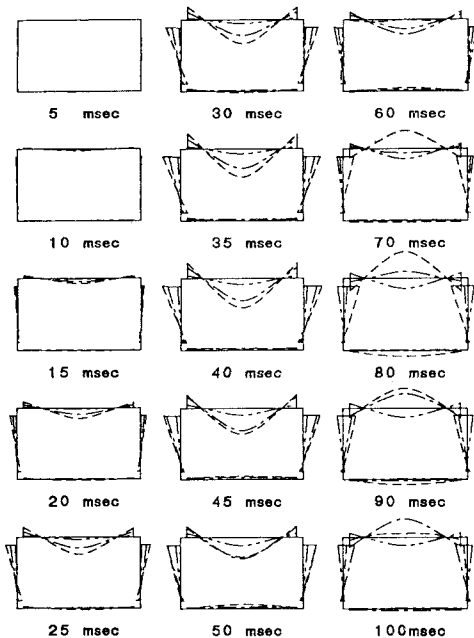
3.2. 緩衝構造の影響

緩衝構造の相違が本体構造に及ぼす影響を検討するため、緩衝構造として砂層を用いた TYPE-2 と、三層緩衝構造を用いた TYPE-3 の解析を行った。解析結果を図-7～12に示す。

図-7および8は覆工構造物本体表面の伝達衝撃圧力分布をそれぞれの解析ケースごとに、最大圧力を示す時間に対するものを示した。TYPE-2 では、砂層の剛性の増大とともに圧力の最大値も大きくなり、分布形状も集中してくる。また、最大値に達する時間は砂層の剛性の増大とともに早くなっている。これに対し TYPE-3 では、砂層の剛性による影響は小さく、伝達圧力の最大値は $\lambda=500$ tf/m² のとき最大となっているが、砂層のみの場合のような差はない。また、圧力の分布は比較的なだらかで、圧力が分散していることがわかる。これは表層で受けた衝撃力が、

$\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 100 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 500 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$

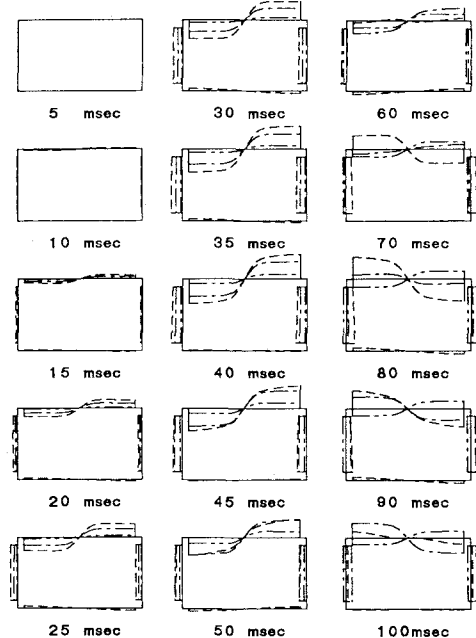
有限要素法



(a) 曲げモーメント図

$\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 100 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 500 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$

有限要素法

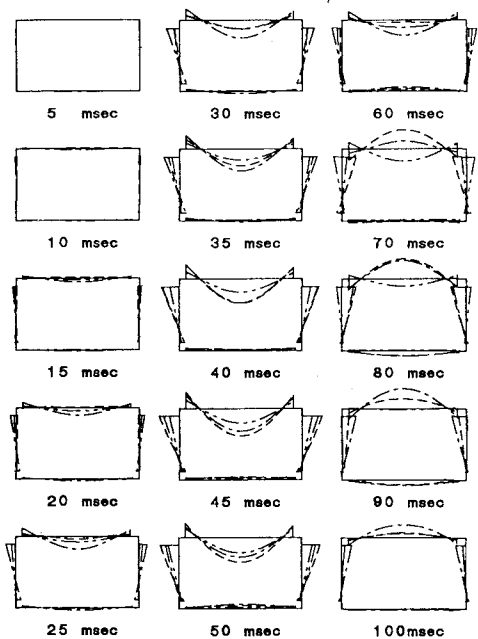


(b) せん断力図

図-1 1 断面力の比較 (TYPE-2)

$\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 100 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 500 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$

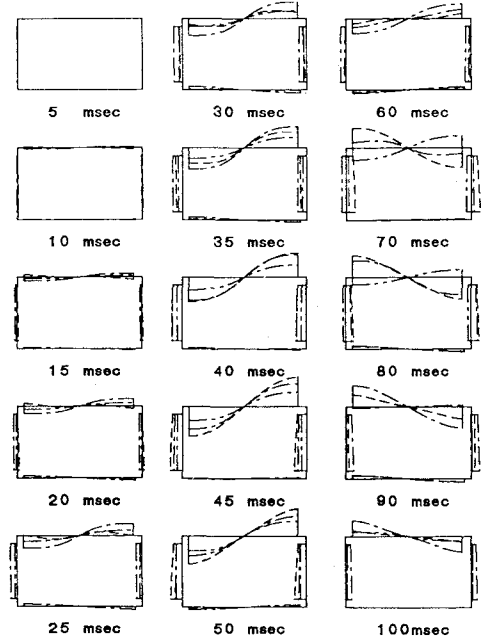
有限要素法



(a) 曲げモーメント図

$\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 100 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 500 \text{ tf/m}^2$
 $\text{---} \text{---} \text{---} \lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$

有限要素法



(b) せん断力図

図-1 2 断面力の比較 (TYPE-3)

中間層の RC 床板で支持され広く下層の EPS 材に伝達されるからである。

伝達衝撃圧力の時間変化を示すため、載荷点中央直下の圧力波形を図-9 および 10 に示した。いずれも衝撃力の載荷とともに圧力は増加し、最大値は荷重の除荷時に生じている。これは、衝撃載荷時間が解析モデルの最低次固有周期に比べて短いためであり、時間の経過とともに減衰自由振動に移行している。また、図からこれら解析モデルの最低次固有周期は、砂の $\lambda=100, 500, 1000\text{tf/m}^2$ に対してそれぞれ TYPE-2 では約 240, 110, 75msec であり、TYPE-3 では約 150, 95, 75msec である。砂層の剛性が增大するとともに周期は短くなっており、それに対応して伝達圧力の減衰も大きくなっているが、これは最低次固有周期に比べ衝撃載荷時間が比較的長くなり、静的な載荷状態に近づくためである。

覆工構造物本体の断面力を図-11 および 12 に示した。図-11 は TYPE-2 の解析結果であり、図-6 と同じものである。曲げモーメントおよびせん断力分布の時間的変化は、上で述べたように各ケースで固有周期が異なるためかなりの相違がみられるが、曲げモーメントの最大値は $\lambda=1000\text{tf/m}^2$ のとき TYPE-2 で 100.7tfm/m 、TYPE-3 で 96.1tfm/m である。三層緩衝構造の方が砂層より多少小さく荷重分散効果が現れているようであるが、三層緩衝構造に関する各種実験結果と比べると本解析結果は三層構造の特性を十分説明しているとはいえない。この原因は、これまでの解析では明らかではないが、砂の剛性の決定方法や固有値の取りかたが影響していると考えられる。せん断力の最大値もそれぞれ $\lambda=1000\text{tf/m}^2$ のとき生じ、TYPE-2 で 42.3tf/m 、TYPE-3 で 51.5tf/m と三層構造の方が大きくなっている。

4. まとめ

緩衝構造を有する覆工構造物の耐衝撃挙動を明らかにするため、二次元有限要素法により緩衝構造と本体構造とを一体としたモデル化を行い、構造条件、荷重条件を一定とし緩衝構造を変えて解析を行った。また、解析理論の相違による影響も検討するため、剛性マトリックス法との比較も行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 覆工構造物本体のみの場合では、二次元有限要素法による解析も剛性マトリックス法による解析もほとんど差はなく、梁要素で十分解析可能である。
- 2) 緩衝構造と本体構造を一体とした場合は、剛性マトリックス法では砂層の評価が難しく、実用的な解析は困難である。
- 3) 三層緩衝構造は、衝撃荷重を効果的に分散させる。

しかし、他の実験結果などと比較して、本解析では砂層と三層緩衝構造が覆工構造本体に及ぼす影響を十分明らかにできなかった点もあり、構造のモデル化も含め今後さらに検討を重ねる予定である。

参考文献

- 1) Ohnuma, H., C. Ito, N. Kishi and S. G. Nomachi : On the Impact Behavior of Reinforced Slab, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.6, pp.575~580, 1984.
- 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、pp.559~569、1987.
- 3) 吉田 博・榎谷 浩・岡 衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について、土木学会論文報告集、第362号／I-4、pp.461~470、1985.
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983.
- 5) 岸 徳光・松岡健一・能町純雄・天沼宇雄：リング要素を用いた厚肉円盤の衝撃応答解析、土木学会北海道支部論文報告集、第45号、pp.193~198、1989.
- 6) 菅田紀之・岸 徳光・松岡健一・尾崎 諒：剛性マトリックス法の衝撃応答解析への適用性、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1519~1527、1991.