

I—39 落石衝撃に対するロックシェッドの形状効果について

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
 日大生産工学部 正員 能 町 純 雄

1. はじめに

道路交通網の安全施設の一つとして、雪崩、崩落土砂、落石等による交通障害を防止するためのスノウシェッドあるいはロックシェッドがある。このようなシェッドの設計は通常の土木建築構造物のそれと異なり落下重量の数十倍あるいは数百倍程度の衝突衝撃荷重を合理的に評価する必要がある。緩衝材としての敷砂厚の効果や衝撃力の算定に関する研究が種々行われているが、現在のところ現場の状況を判断して経験的に設計が行われているようである。シェッドへの衝突衝撃力はマクロ的には地層構造、気象条件、環境条件に、またミクロ的には落下物の重量、形状、物性値、落下高さあるいは落下の状況、敷砂材の特性に大きく影響されるなど不確定な要素を多く含むため、外力評価式の定式化が困難となっている。

これまでのロックシェッドに関する研究には、実験的には鋼材倶楽部¹⁾、金沢大学の吉田と栂谷の研究²⁾、北海道開発局土試の研究³⁾等があり、理論的には北大の芳村と三上の研究⁴⁾、大阪市立大学の園田等の研究⁵⁾や著者らの研究グループによる成果⁶⁾がある。上記研究成果は敷砂部の衝撃緩和に関するものと構造体として平屋根構造を想定し、波動の伝播性状について検討しているものがほとんどであり、構造体の形状が衝撃波動伝播特性に与える影響等について検討しているものは少ないようである。現在設置されている実構造もほぼ板厚1 m前後の鉄筋コンクリート平板構造となっているようであるが、ロックシェッドの断面形状によって衝撃力の分散効果や応力波動の伝播特性を把握することは工学的に意味のあるものと考えられる。

本文では、ロックシェッド構造を対象としてシェッドの断面形状が動的応答特性に与える影響を検討するために、平板構造を基本として道路幅員方向に一様で走行方向に連続なアーチ形を有する構造(図-1)を想定し、そのライズ比を種々変化させた場合について検討をおこなった。解析方法に関しては構造系が比較的単純であるため種々考えられるが、ここでは応答性状の概略を知るところに注目しているのでアーチを折線近似し有限帯板理論を適用して解析を行っている。

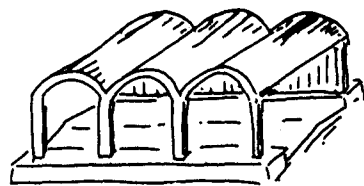


図-1 アーチ形ロックシェッド概形図

2. 解析理論

有限帯板要素法には面内変形と面外変形に関する微分方程式を忠実に解いて求められる理論と、各変位関数を仮定し有限要素法的な考え方に基いて求められる理論とがある。本研究では固有値を離散化した形で求めることができ、かつ位相速度や群速度分散曲線も精度よく求めることができる等、衝撃応答解析に有効な手法であるものと考えられる後者の理論を用いて解析を行うこととした。ここで扱う有限帯板要素法の理論的な考え方は、奥村等⁷⁾あるいは中村の研究⁸⁾に基づいており詳細については彼らの研究成果に譲るものとし、以下では弾性衝撃応答解析への応用についての概要を示す。

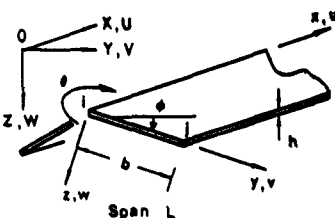


図-2 任意一薄板要素

図-2に示すような任意薄板要素において、局所座標系を $x-y-z$ 、

On Shape Effects for Dynamic Behavior of Rock-Shed under the Falling Rocks.

by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Osamu NAKANO and Sumio NOMACHI

対応する変位を u, v, w , 回転角を θ とする。要素内の y 方向の変位関数は、面内変形に関しては線形、面外変形に関しては三次放物線の関数を仮定して、次のようにおく。

$$u = (1 - \eta) u_i + \eta u_j \quad \dots(1) \quad v = (1 - \eta) v_i + \eta v_j \quad \dots(2)$$

$$w = (1 - 3\eta^2 + 2\eta^3) w_i + (3\eta^2 - 2\eta^3) w_j + b(\eta - 2\eta^2 + \eta^3) \theta_i + b(-\eta^2 + \eta^3) \theta_j \quad \dots(3)$$

ただし、 $\eta = y/b$ であり、サフィックス i, j はそれぞれ i 点、 j 点の境界物理量を意味するものとする。さらに面内変形に関しては平面応力問題を、面外変形に関しては薄板の曲げ問題を仮定して求められる動的基礎微分方程式に上式 (1)~(3) を用いてガラーキン法を適用すると、 x と時間 t に関する線形連立偏微分方程式が得られる。両端単純支持を仮定して x 方向に有限 Fourier 変換を施して像関数に関する要素の運動方程式を求めると、

$$[K] \overline{Sm}[\delta] + [M] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \overline{Sm}[\delta] = \overline{Sm}[F] + \overline{Sm}[P] \quad \dots(4)$$

ここで $[K], [M]$ はそれぞれ剛性マトリックスおよび質量マトリックスであり、 $\overline{Sm}[\delta], \overline{Sm}[F]$ は接線の変位および断面力の像関数ベクトルで次のように示される。

$$\{\overline{Sm}[\delta]\} = [Cm[u_i] \ Sm[v_i] \ Sm[w_i] \ Sm[\theta_i] \ Cm[u_j] \ Sm[v_j] \ Sm[w_j] \ Sm[\theta_j]]^T \quad \dots(5)$$

$$\{\overline{Sm}[F]\} = [Cm[T_i] \ Sm[S_i] \ Sm[Q_i] \ Sm[M_i] \ Cm[T_j] \ Sm[S_j] \ Sm[Q_j] \ Sm[M_j]]^T \quad \dots(6)$$

また、 $Cm[\]$, $Sm[\]$ は cosine, sine 型の有限 Fourier 変換を示すものである。ただし、 $\{\overline{Sm}[P]\}$ は $\{\overline{Sm}[F]\}$ に対応する接線外力の像関数ベクトルである。さらに、各断面力は次式に示されるように二次元応力問題と薄板理論から導かれるものを用いている。

$$T = h \cdot \tau_{xy}, \quad S = h \cdot \sigma_y, \quad Q = \frac{\partial M_y}{\partial y} + 2 \frac{\partial M_{yx}}{\partial x}, \quad M = M_y$$

運動方程式の解析は基準関数ベクトルを導入し、モーダルアナリシス法を用いて行っている。第 m 次、第 r 番目の基準関数 $Sm[\psi_r]$ に関する運動方程式は固有角速度を ω_r , 減衰定数を h_r とすると、

$$Sm[\ddot{\psi}_r] + 2 \cdot \omega_r \cdot h_r \cdot Sm[\dot{\psi}_r] + \omega_r^2 Sm[\psi_r] = P_r / M_r \quad \dots(7)$$

ただし、

$$M_r = \{\phi_r\}^T [M_{st}] \{\phi_r\}, \quad P_r = \{\phi_r\}^T \{\overline{Sm}[P_{st}]\}$$

である。

$Sm[\psi_r]$ は式 (7) を Duhamel 積分することにより求まり、 $\{\overline{Sm}[\delta_{st}]\}$ も容易に求めることができる。従って、 $\{\delta_{st}\}$ はこれを x 方向に逆変換すればよい。また、歪、断面力も基礎微分方程式にこれらを代入することにより得ることができる。なお、suffix st は構造全体のマトリックスあるいはベクトルを示すものとする。

3. 解析モデルおよび材料定数

ロックシェッドの形状効果を検討するために、ここでは一対辺単純支持矩形平板を基本にして連続アーチ構造のクラウン部の高さを変化させた場合について解析を行った。解析モデルは連続構造体から道路走行方向に 60m を取り上げ、幅 60m, スパン 10m, 板厚 50cm の R C 製の構造体を仮定した。また、衝撃荷重に関しては、吉田等が応答解析に用いた中間的な入力波分布モデルを用い、載荷幅を $1^m \times 1^m$ としてスパン中央部

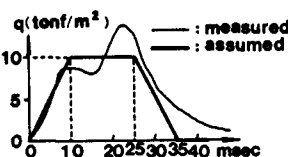


図-3 入力波形分布

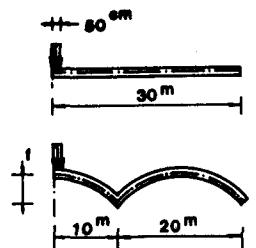


図-4 部材断面の概形図

に載荷するものと仮定した。図-3に入力波の時間方向分布図を示す。解析は基本構造としての矩形板の他、1アーチスパンを20mとしクラウン部の高さを $f=1\text{m}, 2\text{m}, 3\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}$ と変化させて行った。図-4に部材断面の概要を示している。なお、解析は断面を折線近似するために対称性を考慮して、矩形板の場合は20分割、アーチ形状の場合は最大25分割としている。

4. 数値解析結果

4.1. 等板厚を仮定する場合

形状効果に関する検討は、最大断面力（断面方向モーメント M_Y 、軸力 S_X ）および最大たわみについて、矩形板上に静的載荷した場合の応答に対する比を用いて行うこととした。表-1に断面方向モーメント M_Y に関する解析結果を静的載荷と動的載荷の場合について並列して整理している。表より静的および動的載荷いずれも f の増大とともに数値が減少していることがわかる。その程度は、 $f=10\text{m}$ の場合に、静的載荷が0.716、動的載荷が0.792となっている。表-2には、最大たわみについて示している。表よりアーチ作用によって f の増大と共に曲げモーメントに比べ応答値が著しく低減し、 $f=10\text{m}$ の場合には、静的で0.191、動的でも0.250となっている。一方、面内軸力 S_X に関しては表-3に示している。 $f=1\text{m}$ の静的載荷に対する比で示しているが、動的には $f=2\text{m}$ の場合に最も大きい値を示しているようである。しかしながら、その大きさも数十kg程度であるためRC製であることを考慮すると、設計的にはほとんど無視できる値であるものと考えられる。図-5にはそれぞれの応答値に関する最大応答発生時のスパン中央部断面方向分布図を示している。平板の場合は曲げモーメント、たわみ分布とも応答値も大きくその応答範囲も広いようであるが、アーチ構造の場合は載荷アーチ部のみの局所的な応答性状を示しているようである。その傾向はクラウン部の高さ f の増大と共に大きくなっている。軸力についても同様の傾向があるようである。

Table 1 Results of the max. moment M_Y .

	static load	dynamic load
plate	1.000	1.037
$f=1\text{m}$	0.902	1.011
$f=2\text{m}$	0.824	0.947
$f=3\text{m}$	0.787	0.887
$f=5\text{m}$	0.760	0.850
$f=10\text{m}$	0.716	0.792

Values are ratio to the max. M_Y of plate under the static load.

Table 2 Results of the max. displacement w .

	static load	dynamic load
plate	1.000	1.010
$f=1\text{m}$	0.645	0.813
$f=2\text{m}$	0.386	0.585
$f=3\text{m}$	0.288	0.439
$f=5\text{m}$	0.222	0.314
$f=10\text{m}$	0.191	0.250

Values are ratio to the max. w of plate under the static load.

Table 3 Results of the max. axial force S_X .

	static load	dynamic load
$f=1\text{m}$	1.000	1.320
$f=2\text{m}$	1.006	1.566
$f=3\text{m}$	0.936	1.468
$f=5\text{m}$	0.886	1.220
$f=10\text{m}$	0.928	1.120

Values are ratio to the max. S_X of the arch with $f=1\text{m}$ under the static load.

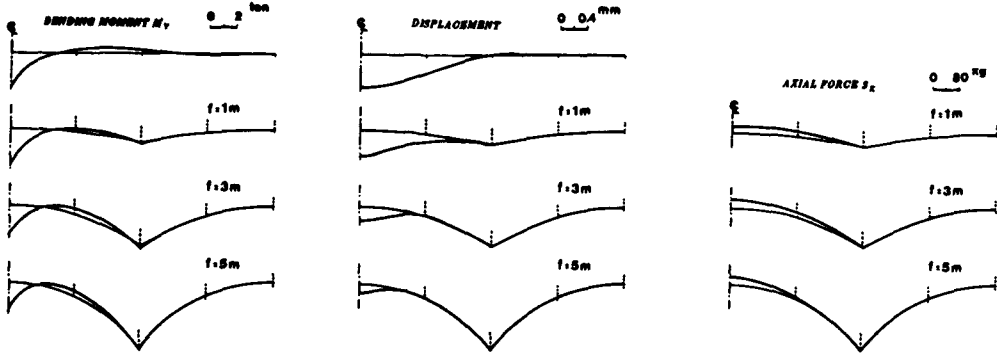


図-5 最大応答発生時の応答値のスパン中央部断面方向分布図

4.2 容積一定を仮定する場合の平板とアーチとの比較

4.1は板厚を50cmに固定して比較を行ったが、ここでは経済性を考慮して容積を一定と仮定する場合について

行った。解析は各アーチの板厚を50 cmとしfの高さに応じて平板の厚さを変化させて行った。解析結果を表-4に示している。表より、アーチを仮定する場合は平板を仮定する場合よりも小さい応答値を示すことが明らかになった。その傾向はfの増大と共に大きくなるようである。特に、 $f=1\text{ m}$ の場合は曲げモーメント比で0.721となっている。これより、等容積を仮定する場合はアーチ形状が、またアーチ形状でもクラウン部の高い場合が有利であることがわかった。

Table 4 Comparison of dynamic responses of arch and plate with the same volume.

$f\text{ (m)}$	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
$h\text{ (cm)}^*$	50.33	51.32	52.94	58.00	78.54
M_{Ya} / M_{Yp}	0.974	0.913	0.848	0.800	0.721
w_a / w_p	0.816	0.613	0.493	0.434	0.749

* : The values are the thickness of plate with the same volume with the arch.
Suffizes "a" and "p" mean the results of arch and plate respectively.

5. まとめ

ロックシェッド構造を対象としてシェッドの断面形状が動的応答特性に与える影響を検討するために、平板構造を基本として道路幅員方向に一樣で走行方向に連続なアーチ形を有する構造について検討をおこなった。解析はサンドクッションを介して同一な衝撃荷重が載荷されるものと仮定して行った。

施工性等種々問題があるものと考えられが、本数値解析結果よりアーチ形状を仮定する場合は平板に比し、かなり応答値を低減化できることが明らかになった。

6. 参考文献

- 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，鋼材倶楽部研究報告，1973.4.
- 吉田博，榎谷浩，鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，第352号，pp.61-70,1984.12.
- 岡田憲治，中松俊裕：覆道の衝撃実験について，第23回北海道開発局技術研究発表会，pp.112-123，1979.2.
- 芳村仁，三上隆，運上茂樹，若林学：ロックシェッドに作用する落石の衝撃力，土木学会北海道支部論文報告集，第42号，pp.103-108，1986.2.
- 園田恵一郎，小林治俊，鈴木輝男：ロックシェッドに対する落石荷重計算法（ヘルツ式の改良）について，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.25-35，1983.7.
- 岸徳光，吉田紘一，松岡健一，能町純雄：層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.34A，pp.817-826，1986.3.
- 奥村敏恵，坂井藤一：薄肉平板よりなる立体的構造物の静力学的解析に関する一方法とその応用，土木学会論文報告集，第176号，pp.43-59，1970.4.
- 中村秀治：断面変形を考慮した薄肉ばりの振動解析，土木学会論文報告集，第223，pp.11-22，1974.3.