

I-34 箱型落石覆工の落石荷重に対する断面力算定法

室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

室蘭工業大学 正 員 岸 徳光

北海道開発局 正 員 中野 修

北海道大学 正 員 三上 隆

1. はじめに

現在、落石覆工の設計は落石対策便覧¹⁾に基づき、死荷重、土圧、地震時荷重、落石による衝撃荷重等を考慮して行われている。落石対策便覧では、落石覆工の設計は許容応力度設計法によるのが適当としているが、落石によって発生する衝撃荷重や敷砂緩衝材による荷重の分散に関する規定があるものの、部材断面力の算定法に関する規定は特に明記されていない。実務では、同便覧に従って作用荷重を算出し、覆工を単位奥行きを有する平面骨組構造にモデル化し静的骨組解析により断面力を算定しているようである。しかしながら、覆工を平面骨組構造にモデル化した場合の動的応答解析結果²⁾から、頂版部の最大曲げモーメントが静的解析結果の約1.6倍になること、構造全体に振動が励起し各部材に大きな交番応力が発生すること等、静的解析結果と異なる挙動を示すことが明らかになっている。また、重錘落下を受けるRC覆工の実証実験結果を用いて解析法の適用性について検討した結果³⁾から、覆工を単位奥行きを仮定する平面骨組構造にモデル化して解析する方法は適切ではなく、有限帯板法等の板作用を考慮できる解析法が適当であることが明らかになっている。これより、覆工の合理的な耐衝撃設計手法を確立するためには、覆工の動特性の把握と実挙動に則した断面力の算定が重要であるものと考えられる。

本論文では、落石によって発生する衝撃荷重に対する覆工の断面設計を行うために必要となる断面力の最大分布について検討を行い、断面力算定に関する一方法を提案している。覆工の断面力の最大分布に関しては、覆工頂版の板厚および荷重の載荷幅、荷重継続時間を変え、有限帯板法を用いた弾性衝撃応答解析により検討を行った。本論文において提案する断面力算定法は、静的二次元骨組解析法を用いて衝撃荷重を受ける覆工の動特性と板作用を考慮した断面力を算定するために、有効幅の概念を導入するというものである。

2. 衝撃荷重載荷を受けるRC覆工の断面力算定法の提案

本論文では、現在、実務において採用されている静的二次元骨組解析法を基本として、動的三次元効果を考慮した断面力を評価するために、以下のような断面力算定法を考えた。すなわち、

- 1) 動的立体解析法を用いて、落石荷重が作用すると予想される任意点に衝撃荷重を載荷させ、断面力の最大値に関する包絡線分布を求め、静的立体解析結果の最大値(中央点載荷時の最大値とする)に対する応答倍率で整理する。この分布図を覆工の規模、荷重載荷幅、荷重継続時間ごとに作成しておく。
- 2) 静的立体解析による最大値を静的二次元骨組解析法を用いて評価するために、コンクリート標準示方書⁴⁾に準じた有効幅の概念を導入し、その値を覆工の規模および荷重載荷幅に応じて決定しておく。
- 3) 実務者は、与えられた覆工に対して2)より得られる有効幅を用いた静的二次元骨組解析を行い、基準となる最大断面力を決定する。この値を1)より与えられる断面力の無次元包絡線分布に乗じて、動的立体解析と等価な最大断面力分布を算定する。
- 4) 指定された設計法に従い、3)で得られた断面力を用いて断面設計を行う。

上述のような考え方に基づいた覆工の断面力算定法について数値的に検討を行うために、ここでは落石に対する安全性向上のために実証実験を行った美幌覆道の断面を基準にして数値解析を行った。最大断面力の

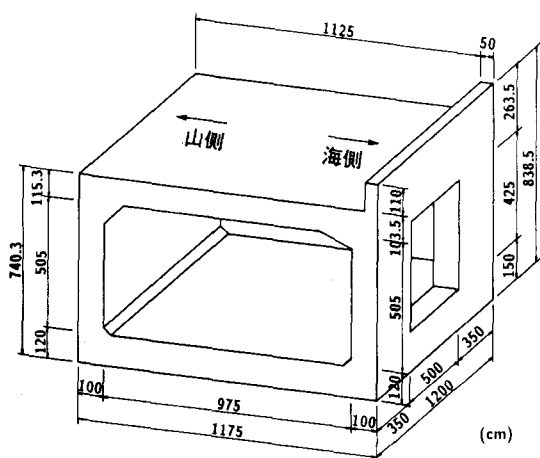
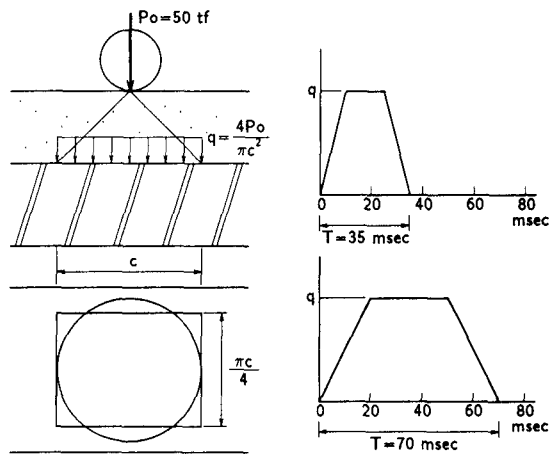


図-1 美幌覆道の1ブロックの形状寸法



(a) 荷重の緩衝材による分散

(a) 荷重の時間分布

図-2 載荷衝撃荷重

包絡線分布は、構造全体について検討しなければならないものと考えられるが、膨大な計算量になるため、ここでは荷重載荷位置および検討断面をスパン中央点に限定している。

3. 解析モデル

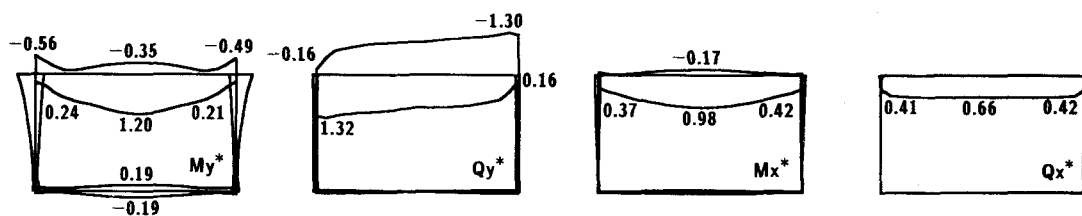
解析モデルは、北海道開発局帯広開発建設部が一般国道 336 号広尾町に建設中の美幌覆道を参考にして決定した。美幌覆道は図-1 に示すような頂版の平均厚が約 1.1 m、側壁厚が 1.0 m、底版厚が 1.2 m で海側側壁の中央部に幅 5 m、高さ 4.25 m の開口部を有する箱型構造の RC 覆工である。一般に落石対策用の RC 覆工の頂版厚は、0.8 ~ 1.4 m 程度であることより、解析モデルにおける各部材厚は、側壁厚および底版厚に関してはそれぞれ 1.0 m、1.2 m と一定とし、頂版厚は 0.7 m から 1.3 m まで 0.2 m 間隔で変化させた四種類とした。なお、RC 部材の弾性係数、ポアソン比、単位重量は、それぞれ $E_c = 3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.2$, $\omega_c = 2.5 \text{ tf/m}^3$ と仮定している。有限帯板法によって解析を行うための開口部のモデル化、支持条件および解析スパン長に関しては文献 3) を参考にして、開口部要素の板厚を 1 m とし、剛性および単位重量を 7/12 に低減した。支持条件は地盤反力を無視し、底版の両端を単純支持とした。また、解析スパン長は、最低次固有振動周期が実構造の実測結果とほぼ等しくなるように 30 m とした。

衝撃荷重に関しては、弾性解析であることより美幌覆道の設計衝撃荷重である $P_o = 50 \text{ tf}$ の集中衝撃荷重が緩衝材表面に鉛直に作用する状態を想定した。衝撃荷重の緩衝材による分散および時間分布に関しては、落石対策便覧¹⁾ および敷砂緩衝材や三層緩衝構造を用いた野外実験^{5),6)} を参考にして決定した。荷重の分散に関しては図-2 (a) に示すように、落石対策便覧と同様に円形の等分布荷重になるものと仮定し、等価な矩形分布に置換して解析を行っている。本論文では荷重分布幅 c を 1.0 m、1.8 m および 3.0 m の三種類としている。また、荷重の時間分布は、図-2 (b) に示すような台形分布とし、荷重継続時間 T を 35 msec および 70 msec の二種類としている。

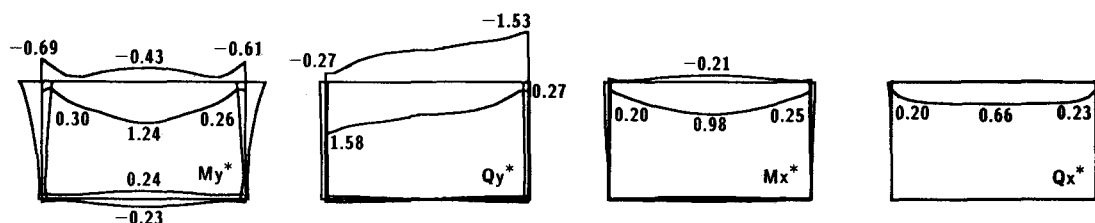
本解析では Fourier 逆変換の項数を文献 3) と同様に 51 項とし、全固有値を考慮するモード解析を採用している。また、減衰定数は全固有値に対して 5 % とした。

4. 最大断面力の包絡線分布

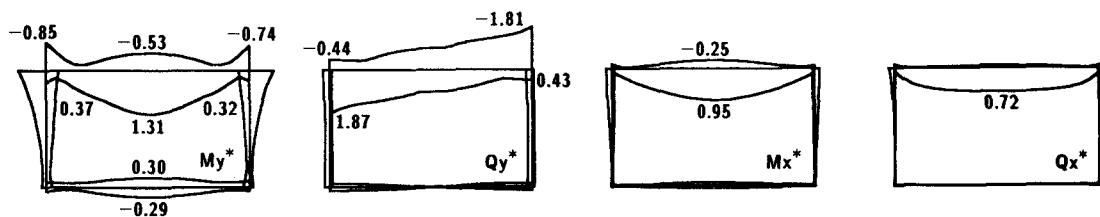
図-3 は、頂版部を 23 ~ 25 点に分割し、スパン中央部の頂版各点に衝撃荷重を載荷させて断面力の最大



(a) $c = 1.0 \text{ m}$ ($M_{ys} = 13.8 \text{ tfm/m}$, $Q_{ys} = 18.8 \text{ tf/m}$)



(b) $c = 1.8 \text{ m}$ ($M_{ys} = 11.2 \text{ tfm/m}$, $Q_{ys} = 11.1 \text{ tf/m}$)



(c) $c = 3.0 \text{ m}$ ($M_{ys} = 8.7 \text{ tfm/m}$, $Q_{ys} = 6.6 \text{ tf/m}$)

図一 3 頂版厚 $h = 1.1 \text{ m}$, 荷重継続時間 $T = 35 \text{ msec}$ における最大断面力の無次元包絡線分布

$$(My^* = My/M_{ys}, Qy^* = Qy/Q_{ys}, Mx^* = Mx/M_{ys}, Qx^* = Qx/Q_{ys})$$

応答値を求め、その包絡線分布を無次元化して示している。ここでは、頂版厚 $h = 1.1 \text{ m}$, 荷重継続時間 $T = 35 \text{ msec}$ の場合について検討を行うこととする。各無次元量は、断面方向曲げモーメント My , 道路軸方向曲げモーメント Mx に関しては頂版中央部に静的に荷重を鉛直載荷した場合の My の最大値 (M_{ys} 頂版中央部の曲げモーメント), 断面方向せん断力 Qy , 道路軸方向せん断力 Qx に関しては同じく静的な Qy の最大値 (Q_{ys} 荷重載荷端部のせん断力) を基準値として用いて算出している。以後、各無次元量を単に応答倍率と呼ぶこととし、それぞれを My^* , Mx^* , Qy^* , Qx^* として示すこととする。なお、 My , Qy , Mx に関してはスパン中央部断面、 Qx に関しては軸方向の荷重載荷端部断面での断面力である。 My^* に関しては、頂版中央部で最大値 $1.20 \sim 1.31$ を示し、 c が大きいほど大きくなっている。頂版両端部においては、頂版中央部の $1/2 \sim 2/3$ 程度の負の応答値を示していることがわかる。また、頂版および側壁部の静的載荷時とは異符号の応答 (負載荷状態の応答) は、静的載荷時と同符号の応答 (正載荷状態の応答) の $1/3 \sim 1/2$ 程度の値になっている。底版部では、正載荷状態と負載荷状態の応答が同程度になっている。応答倍率に基準値を乗じて得られる My の実応答値に関しては、頂版中央部の正載荷状態の応答値は、 c が大きいほど小さくなっているが、頂版中央部の負載荷状態の応答値および頂版端部の応答値は c によらずほぼ等しい値になっている。 Qy^* に関しては、山側頂版端部で最大値 $1.32 \sim 1.87$ を示し、 c が大きいほど大きくなっている。海側頂版端部では山側端部と同程度の負の応答を示している。 Qy の実応答値に関しては、山側頂版端部の正の応答値および海側頂版端部の負の応答値は、 c が大きいほど小さくなり、 $c = 3 \text{ m}$ では $c = 1 \text{ m}$ の約 $1/2$ になっている。山側頂版端部の負の応答値および海側頂版端部の正の応答値は、 c によらず

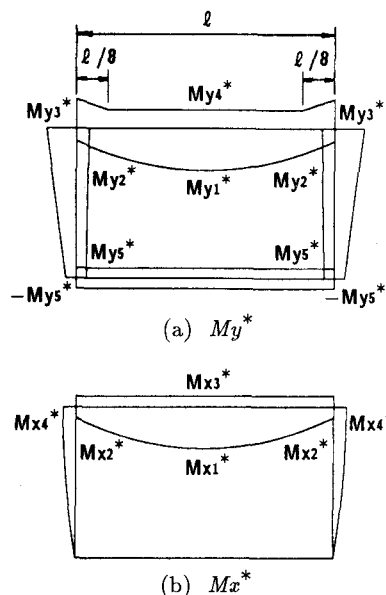


図-4 簡略化した無次元包絡線分布

ほぼ等しくなっている。 Mx^* に関しては、頂版中央部で最大値を示し c によらず応答倍率が 1 程度になっている。しかしながら、頂版両端部の応答は c が大きいほど小さく、負載荷状態の応答倍率は c が大きいほど大きくなっている。 Qx^* に関しては、頂版両端部を除き頂版のほぼ全幅において応答倍率は一定値を示している。その値は $c = 1\text{ m}$ および 1.8 m では 0.66 と等しくなっているが、 $c = 3\text{ m}$ の場合には若干大きく 0.72 となっている。頂版端部の正の応答倍率は、 c が大きくなるに従い小さくなっている。

図-4は、以上の結果をもとにして直線および二次放物線を用いて簡略化した包絡線分布図である。なお、ここでは紙面の都合により曲げモーメント My , Mx についてのみ示すこととする。曲げモーメントの解析結果は、ほぼ左右対称分布になっているため、簡略化した分布図では左右対称分布と仮定している。図-4の各断面における曲げモーメントの基準値に対する応答倍率は、図-5および6に示すようになる。

図-5の My の応答倍率に関しては、

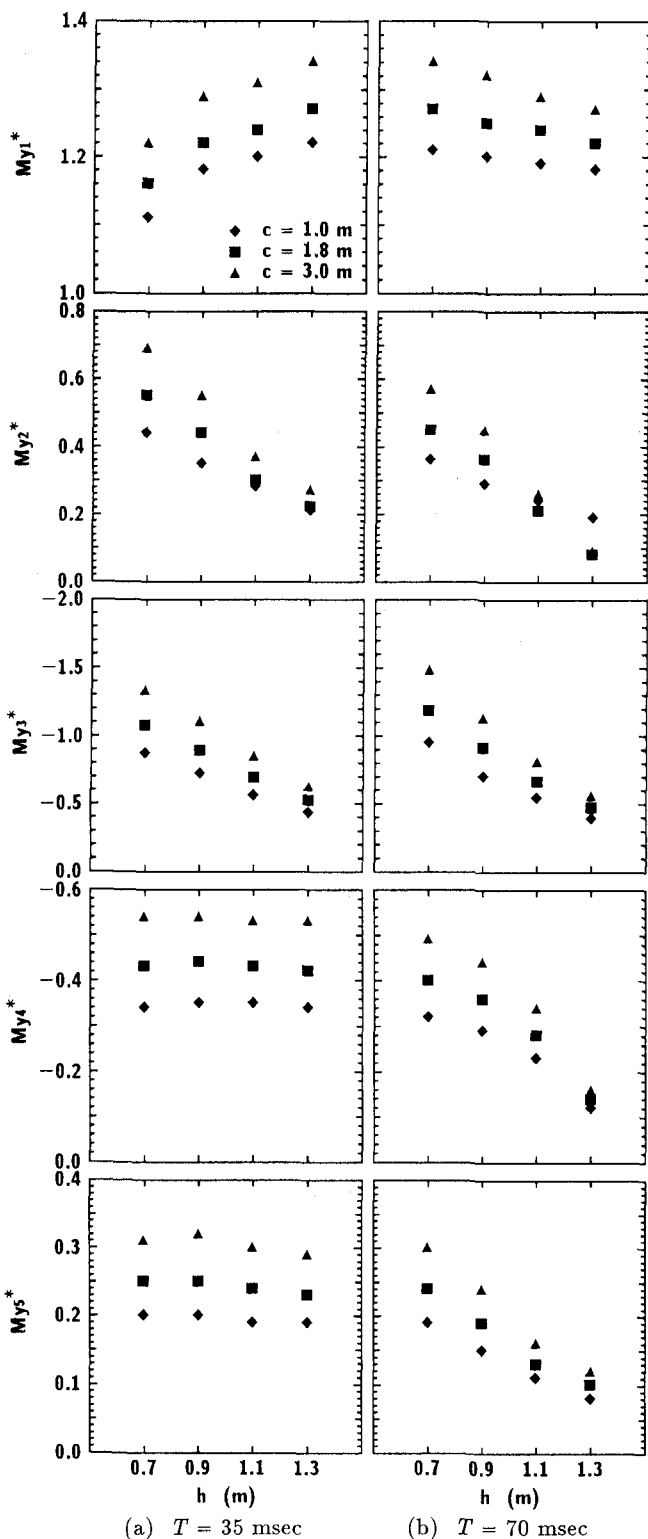


図-5 各断面における My の応答倍率

頂版中央点における正の応答倍率 My_1^* は $T = 35$ msec の場合、頂版厚 h が大きくなるに従い大きくなっているが、 $T = 70$ msec の場合には小さくなっている。頂版端部における応答倍率 My_2^*, My_3^* は、 h が大きくなるに従い小さくなっている。頂版中央部における負の応答倍率 My_4^* および側壁下端部の応答倍率 My_5^* は、 $T = 35$ msec の場合、 h によらずほぼ一定の値を示しているが、 $T = 70$ msec の場合には h が大きくなるに従い小さくなっている。荷重載荷幅 c と My の応答倍率の関係は、 c が大きいほど応答倍率が大きくなる傾向にある。なお、図-5の応答倍率を用いた簡略化した包絡線分布において、 $c = 1$ m, $h = 1.3$ m の場合、 My_1^* および My_2^* を用いた二次放物線による包絡線分布には、実際の包絡線分布より最大で 0.06 小さな分布領域が頂版端部近傍に存在している。

図-6の Mx の応答倍率に関しては、頂版中央点における正の応答倍率 Mx_1^* は、 h によらずほぼ 1 の一定値になっている。頂版端部における正の応答倍率 Mx_2^* は、 $c = 3$ m の $h = 0.7$ m の点を除くと、 h が大きくなるに従い大きくなっている。頂版部の負の応答倍率 Mx_3^* は、 $T = 35$ msec の場合、 $h = 0.9$ m で最大となる分布を示しているが、 $T = 70$ msec の場合には、 h が大きくなるに従い全体として小さくなっている。側壁上端部の負の応答倍率 Mx_4^* は、 h が大きくなるに従い小さくなっている。荷重載荷幅 c と Mx の応答倍率の関係は、頂版端部の正の応答倍率では c が大きくなるほど小さく、頂版部および側壁上端部の負の応答倍率は c が大きくなるほど大きくなっている。

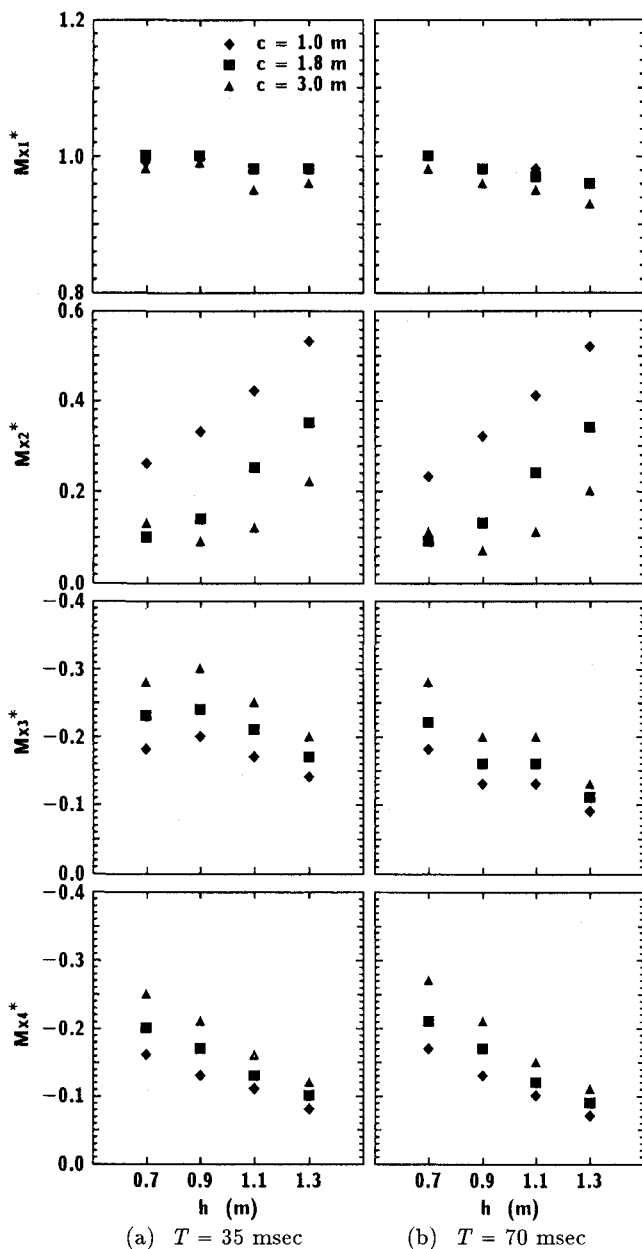


図-6 各断面における Mx の応答倍率

5. 二次元骨組解析法を用いる場合の有効幅

図-7には、静的二次元骨組解析により曲げモーメントの基準値を求めるための有効幅を示している。有効幅は、頂版中央点に荷重を静的に載荷した場合の曲げモーメントの最大値 Mys が、覆工を有効幅を有する平面骨組構造にモデル化した場合の静的解析時の最大曲げモーメントと等価であると仮定して算出した。なお、平面骨組解析時の荷重は、全荷重が有限帯板法による解析時と同一の断面方向分布領域に均等に載荷

するものとしている。図-7 (a) は横軸に頂版厚 h , (b) は横軸に荷重載荷幅 c をとり、有効幅 Be を図示している。本解析の範囲内における有効幅 Be は 5.3 ~ 8.8 m である。有効幅 Be は h および c が大きくなるに従い大きくなり、その分布は、ほぼ直線によって近似できるようである。

6. ま と め

落石による衝撃荷重載荷を受ける箱型落石覆工の断面力の最大分布に関する検討を行った。また、二次元骨組解析法を用いて

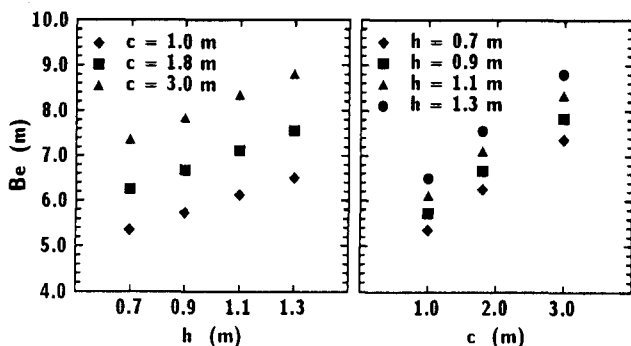
断面力算定を行うために、有効幅の概念を導入する方法を提案し数値解析的検討を行った。数値解析は北海道開発局が覆工の落石に対する安全性向上を目的として実証実験を実施した美幌覆道の断面を基準にし、荷重載荷点をスパン中央点に限定して行った。頂版厚 $h = 1.1$ m, 荷重継続時間 $T = 35$ msec の場合における数値解析結果を要約すると、以下ようになる。

- 1) My の頂版中央部における正載荷状態の応答倍率は、荷重載荷幅 $c = 3$ m で最大となるが、実応答値は荷重載荷幅 $c = 1$ m で最大となる。
- 2) My の頂版端部および負載荷状態における実応答値は、荷重載荷幅によらずほぼ等しい。
- 3) My の負載荷状態の応答は正載荷状態の $1/3 \sim 1/2$ 程度になる。
- 4) Qy の山側頂版端部におけるの正の応答倍率は荷重載荷幅 $c = 3$ m で最大となるが、実応答値は荷重載荷幅 $c = 1$ m で最大となる。
- 5) Qy の山側頂版端部における負の実応答値および海側頂版端部における正の実応答値は、荷重載荷幅によらずほぼ等しい。
- 6) Mx および Qx の応答倍率の最大値は、荷重載荷幅によらずほぼ等しい。

本論文で提案している断面力算定法に従い、美幌覆道を基準断面として頂版厚を変化させ数値的検討を行ったが、最大断面力の無次元包絡線分布、有効幅はともに限られた断面のものである。実際の設計に応用するためには、考えられる覆工の規模に対して、最大断面力の無次元包絡線分布および有効幅を事前に決定しておくことが必要であるものと考えられる。また本法により、実設計レベルにおいて二次元骨組解析法を用いた合理的な断面力算定を行うことが可能になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.7.
- 2) 中野修・岸徳光・松岡健一・菅田紀之：剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1597~1606，1992.3.
- 3) 岸徳光・中野修・松岡健一・菅田紀之：RC覆工の衝撃応答解析法の適用性に関する実証的検討，土木学会論文報告集，No.483/I-26，1994.1.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成3年版〕設計編，pp.148~149，1991.9.
- 5) 岸徳光・中野修・松岡健一・西弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1587~1597，1993.3.
- 6) 岸徳光・中野修・西弘明・田村富雄：AFRP ロッドで補強したRCスラブを用いた緩衝構造に関する実証実験，コンクリート工学年次論文報告集，第15巻，第2号，pp.935~940，1993.6.



(a) h と有効幅の関係 (b) c と有効幅の関係

図-7 My^* を求めるための有効幅