

## I-59 3次元挙動を考慮した RC ロックシェッドの設計断面力の評価

開発土木研究所 正 員 佐藤昌志  
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳光  
 室蘭工業大学 正 員 松岡健一

## 1. はじめに

RC 製落石覆工の設計は従来、落石対策便覧に従って行われている。すなわち落石対策便覧では、衝撃力を振動便覧式により算出し、緩衝材による分散効果を考慮して静荷重として作用させている。また、落石覆工は単位奥行を有する骨組構造にモデル化し静的問題として断面力を評価することにより設計を行っている。しかしながら、落石覆工は衝撃的な外力を受ける立体構造であることから、設計に当たっては荷重に対する適切な評価とともに弾性的な衝撃応答解析を行い落石覆工の衝撃特性を考慮した断面力の評価が必要である。

著者は、このような視点からRC製覆工の衝撃応答解析手法として有限帯板法に基づく簡易な立体解析法を提案し、実証実験との比較により、その適用性を検討した<sup>1)</sup>。また本手法の設計への応用として、有効幅の概念を導入した設計手法の提案も行ってきた<sup>2)</sup>。しかしながら本手法は有限帯板法に基づくことから一般的に 12 m を一ブロックとする覆工を 30 m の仮想スパンを仮定することにより解析を行っているもので、その仮定より外力の載荷位置を中央部付近に限定する制約があった。

実際の落石覆工は、図-1 に示すように一ブロック約 12 m で海側に開口部を有するか、柱部を有する構造であり、断面設計において支配的な外力の載荷位置はブロック中央部よりブロック自由端部や開口部付近と考えられる。

著者は既にこのことを考慮し実覆工モデルに対して三次元衝撃解析汎用コード DYNA3Dを用いた応答解析を行い、覆工の衝撃特性に及ぼす衝撃荷重の分布幅や作用位置の影響を検討している<sup>3)</sup>。これによれば衝撃荷重が覆工自由端部に作用する場合には中央部載荷と比較して 1.5 ~ 3.0 倍の断面力となることが示されている。このことから自由端部載荷時の衝撃応答特性を考慮することにより、先に示した有効幅の概念を応用した設計手法を用いることも可能であることが分かる。

本研究では、これらの成果を基に落石覆工の実設計のための資料を得ることを目的に、覆工の断面寸法、衝撃荷重分布特性、衝撃荷重載荷位置を変化させた場合の衝撃解析をDYNA3Dを用いて行い落石覆工の衝撃応答特性を検討した。具体的には文献 3) で対象としている解析モデル(図-1)に対して荷重分布特性を3ケース設定し、頂板厚を変化させた場合の衝撃応答解析を行い、各断面力の覆工断面方向及び軸方向の最大包絡線分布を求めた。これをもとに落石覆工の3次元衝撃挙動を考慮した設計断面力の評価について検討する。

## 2. 解析概要

ここで用いる衝撃応答解析汎用コード DYNA3D は、1976年に米国ローレンスリバモア国立研究所で開発された衝撃応答解析のための非線形 3次元構造解析プログラムである。1976年に開発後、種々の改良が加えられ現在広く用いられるようになっている。本研究では 1991年版の LS-DYNA3D を用いている。ここではプログラムの詳細は他の文献 4) に譲る。

本論文では、落石覆工の実設計に利用するための資料を提示する事を目的としている。落石覆工の設計にあたっては、覆工の形状寸法、特に覆工幅員、長さ、覆工の形式(開口部を有する壁式か、柱形式か等)等を設定する必要がある。これらの9パラメーターは覆工の耐衝撃特性に大きく影響するものと考えられるが、ここでは覆工幅員、長さ、覆工形式を固定することとし、文献 3) と同様北海道開発局が落石対策のために一般国道 336 号広尾町に建設されている美幌

覆道の1ブロックを基本とした。ここではこれを図-1に示すように一部簡素化したモデルを用いた。すなわち覆工幅員9.75 m、内高5.05 m、長さ12 mであり、

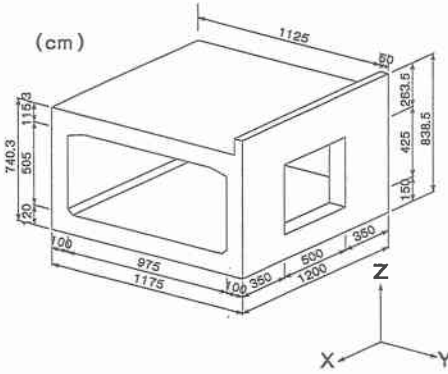


図-1 美幌覆道の1ブロック

山側壁厚 1.0 m、海側壁厚 1.0 m で、海側側壁中央部に 4.25 × 5.0 m の開口部を有する。また頂版厚は 1.1 m を基本とし、さらに 0.7 m、0.9 m、1.3 m と変化させたモデルを用いた。解析のための要素分割は、精度を確保するために荷重条件により変化させているが、特に応力の変化が大きいと思われる部分で分割数を増加させている。緩衝材を敷砂材とした場合の断面分割状況を図-2 に示す。

解析モデルの両端面の境界条件は完全自由としている。また底版は一般に基礎地盤上におかれており弾性基礎上の扱いとなる。しかしながら、実験結果よりその影響が大きいことが明らかになっていることより、底版の境界条件は弾性基礎を無視し覆工両側線を単純支持することとした。また覆工材料は弾性係数  $E = 3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.2$ 、単位体積重量  $\omega_c = 2.5 \text{ gf/cm}^3$  とした。座標系は図-1 に示すように道路軸方向を x、直角方向を y、上下方向を z 軸としている。なお、本文では、x 軸方向を軸方向またはスパン方向、y 軸方向及び z 軸方向を断面方向と呼んでいる。

本研究では許容応力度法に基づく設計を行うための資料を得ることを目的としていることから衝撃荷重の最大値は任意に設定できるが、便宜的に 50 tf

とした。また衝撃荷重の空間分布、時間分布とも文献 3) と同様の条件を採用した。これらの条件を選定した意義についても文献 3) に詳しいので、ここでは省略し、分布状況及び荷重ケースをまとめて、図-3 及び表-1 に示す。

### 3. 数値解析及び考察

#### 3.1. 最大断面力分布に及ぼす頂版厚の影響

これまでの研究より DYNA3D を用いた解析により覆工の衝撃挙動を評価できることが分かった。しかしながら、これまでの解析は基本としたモデルに対してのみの結果である。実設計に応用するためには、部材寸法をパラメータとした多量の解析を行い、基礎資料を得ることが必要であると考えられる。実際の落石覆工の部材寸

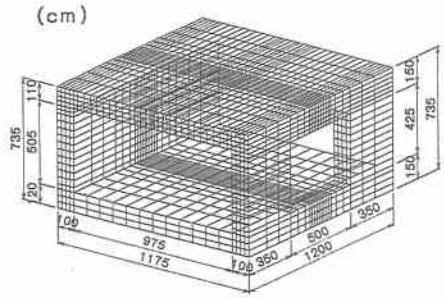


図-2 メッシュ分割図

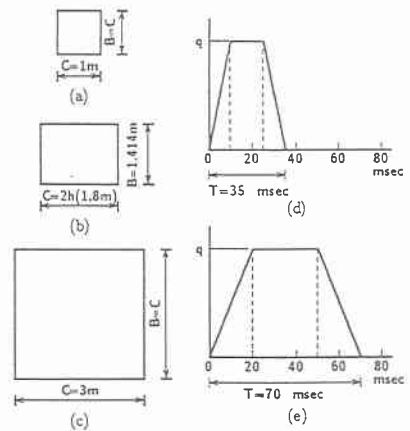


図-3 荷重の分布状況

表-1 荷重ケース

	断面方向分布幅	軸方向分布幅	荷重時間
ケース 1	C = 1 m	B = 1 m	T = 35 msec
ケース 2	C = 1.8 m	B = 1.414 m	T = 35 msec
ケース 3	C = 3 m	B = 3 m	T = 70 msec

表-2 各断面力の定義

断面力	頂版及び底版	側壁部
My	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z y dA_2$
Mx	$\int_{A_1} \sigma_x z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x y dA_2$
Qy	$\int_{A_1} \tau_{yz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{zx} dA_2$
Qx	$\int_{A_1} \tau_{xz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{xy} dA_2$
N	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z dA_2$

A<sub>1</sub>: 頂版又は底版の断面積  
A<sub>2</sub>: 側壁の断面積

実際の落石覆工の部材寸

法を考察してみると、スパン長は施工上の条件から決定されることが多く(12 m 程度が一般的)、また覆工幅は道路の規格から決定される(山岳部や海岸部の一般国道では 10 cm 前後が多い)。側壁部や底版も土圧や地震力等で定まるため、ここで用いた基本モデルと同程度のものでよい。一方、頂版厚は落石衝撃力を受けるため落石の設計条件によって変動する。以上の理由から、ここでは、覆工部材寸法のうち、頂版厚のみを変化させた場合の解析を行い、これが各断面力分布に与える影響を検討する。解析は各ケースについて行ったが、ここでは紙面の都合によりケース 2 の結果についてのみ示す。なおここで用いている断面力の定義を表-2 にまとめて示す。

(A) スパン中央部断面： スパン中央部断面任意点載荷時の各断面力の最大包絡線分布を図-4(a) に示す。図中頂版厚は線の種別で示している。頂版厚の影響を  $M_y$  について考察すると、頂版の正の値は頂版厚の厚いものほど大きくなっており  $h = 130$  cm の値は  $h = 70$  cm に比べ 20% 程度大きい。負の値は、頂版中央部では版厚の厚い方が大きく、両端部では版厚の薄い方が大きくなっている。特に両端部の分布に版厚の影響が大きい。山側側壁部では正負の値とも版厚の薄いもの程大きくなっている。このように頂版中央部の値は、版厚の厚い方が大きい、このときは断面も大きくなることから、設計的には問題は少ない。しかし、頂版両端部では、版厚の薄い方が大きい値となっており、応力的には十分な検討が必要であることを示している。また底版の値は正負ともそれ程大きくはない。 $Q_y$ 、 $Q_x$  は、底版の両端部及び側壁上部で版厚の影響がみられるがその影響は大きくない。 $M_x$  についても頂版両端部の正の値に差がみられる。特に開口部側では  $h = 130$  cm のものは  $h = 70$  cm のものの 2 倍程度の値となっており  $h = 130$  cm では頂版全断面にわたりかなり均等比した分布となっている。山側側壁部では、側壁の影響により中央部に比較して小さな値となっているが、海側開口部では側壁の影響がなく、頂版部で軸方向曲げに抵抗することから、その大きさが頂版の剛性に大きく影響されることとなっている。軸力  $N$  の値は、頂版厚の薄いものほど大きいものの、その差はそれほど大きくはない。

(B) 自由端断面： 自由端断面、任意点載荷時の各断面力の最大包絡線分布を図-4(b) に示す。いずれの断面力も頂版両端部の側壁接合部付近で頂版厚の影響が現れている。 $M_y$  は頂版の正の値には大きな差はないが頂版の負の値及び両側壁部の値に大きな影響が現れており、接合部では頂版厚  $h = 70$  cm のときの値は  $h = 130$  cm の値と比べて 2 倍

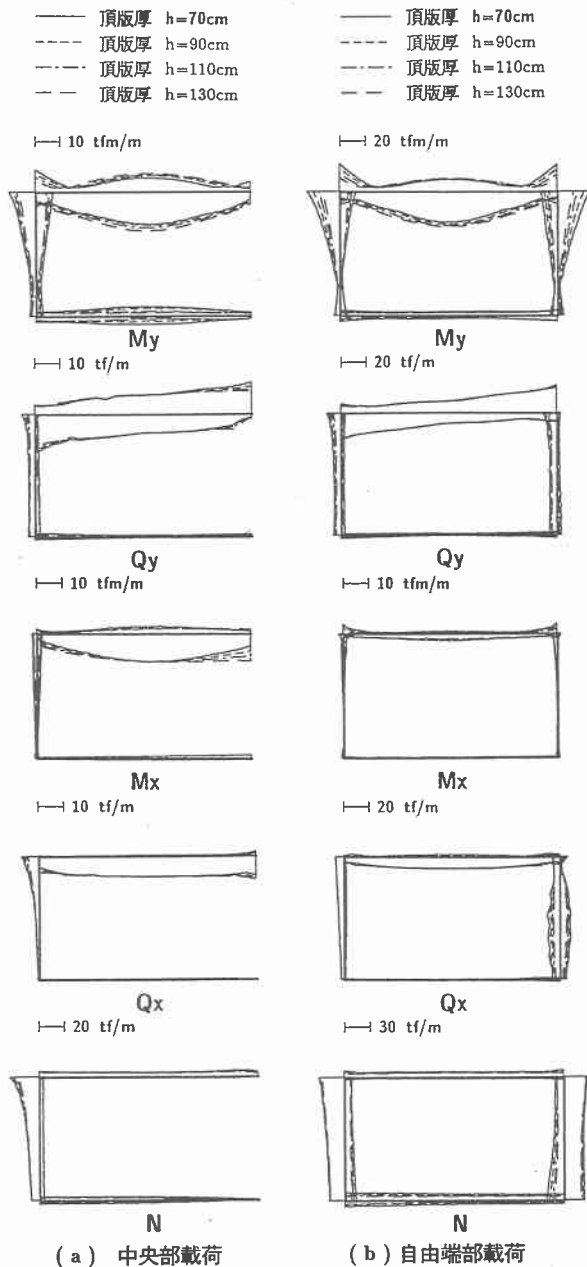


図-4 断面力分布に及ぼす頂版厚の影響 (ケース 2)

以上となっている。この傾向はスパン中央断面と同様であるが、数値的には自由端断面の変動の方がかなり大きい。Qy, Qx および N に対しては全体として頂版厚の影響は小さい。

以上両断面について、頂版厚の影響を検討した。頂版厚の影響はいづれの断面においても My に対して顕著である。特に頂版と側壁の接合部付近の My の評価には頂版厚の影響を考慮する必要があることを示している。

### 3.2. 覆工中心線における断面力の最大包絡線分布

前節では覆工中央断面及び自由端断面における断面力の最大包絡線分布に及ぼす頂版厚の影響を検討したが、ここでは断面力の覆工軸方向の分布に注目し、覆工中心線上任意点に載荷した場合の最大断面力の分布について、頂版厚を  $h = 110 \text{ cm}$  とした場合に限定して考察する。頂版厚の異なる場合も分布の傾向は同様であった。各断面の最大包絡線分布を図-5 に示す。覆工はスパン中央に対し対称構造であることより、図にはスパンの半分のみを示している。また荷重ケースの種別は線の種類を変えて示した。各断面力ともいづれの断面でも荷重分布面積の小さいものほど大きな応答を示していることがわかる。

My の正の最大値は自由端に向かって増加しているが、負の値はそれ程大きな変化はなくほぼ一定である。Qy の値も正負とも自由端に向かって大きくなっているが、特に自由端で急激に大きくなっている。また Qy の正の最大値は山側荷重端部に発生し、負の最小値は海側荷重端部に発生している。図ではこれを太線(山側)と細線(海側)で示した。Mx の正の値は自由端部に向かって減少しているが、これも特に自由端付近で急激に減少している。負の値は正の値の 1/4 程度であり、これも当然自由端部で減少し零となっている。一方、Qx は正負とも全断面ほぼ一定であり、自由端では急激に減少している。荷重分布面積の相異による Qx の分布傾向は、スパン全長にわたってほぼ一定である。側壁部の軸力 N は開口部側と山側で異なるため図は別々に示した。開口部側では開口部端で大きく自由端部の 2 倍以上となっている。山側では自由端部で大きいですが、開口部側に比較すると、約 1/2 程度である。

### 3.3. 開口部の断面力

箱型断面 RC 覆工では、片側に開口部を有する構造が一般的であり、このため開口部の設計断面力は、開口部を持たない側壁部とは異なる評価が必要となる。

すなわち、開口部の

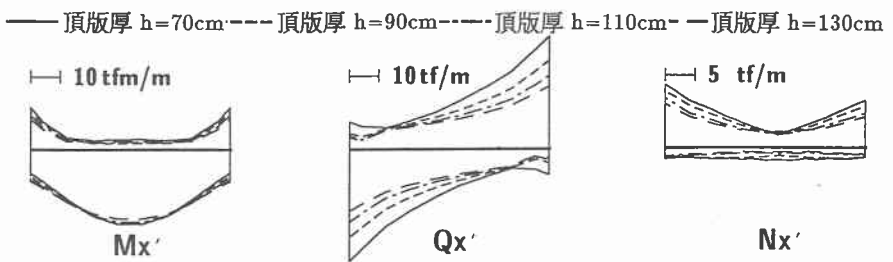


図-7 開口部断面力  $M_x'$ ,  $Q_x'$ ,  $N_x'$  の軸方向包絡線分布 (ケース2)

ある断面は開口部端が自由境界となることから、いわゆる断面方向の断面力は小さくなるのが予想される。しかし、軸方向断面力に対しては、特に開口部上部の側壁部分に対して梁としての断面力評価が必要と考えられる。この断面力は荷重が開口部側壁上に作用する場合に最大になるものと考えられる。従って、ここでは図-6 に示す各断面力に対して、開口部側壁上を荷重が移動する場合の最大包絡線分布を求め、断面力の評価を行う。解析結果を

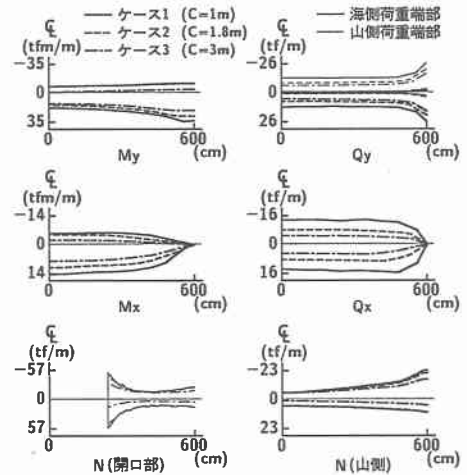


図-5 断面力の軸方向包絡線分布

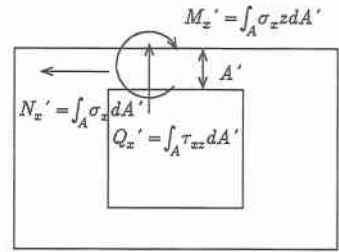
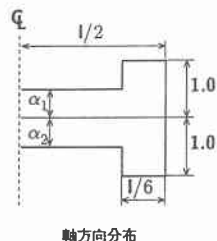
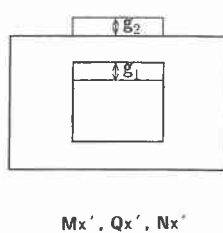
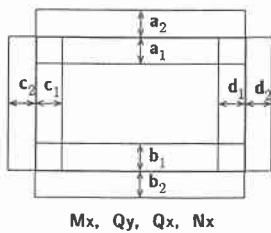
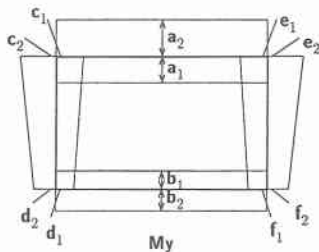


図-6 開口部の断面力



図一七に示す。この場合も荷重条件はケース 2 ののみを示す。 $M_x$  について考察すれば、最大約 25 tfm/m の曲げモーメントとなっており、梁としての断面設計が必要なものと考えられる。せん断力  $Q_x$  は、開口部端で大きな値を示しているが、他の断面における値と同程度大きさである。軸方向軸力  $N_x$  は、値が小さく開口部についての配慮は必要がないものと考えられる。

図一八 各断面力の分布モデル

表一三  $M_y$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$d_1$	$d_2$	$e_1$	$e_2$	$f_1$	$f_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.7	26.08	22.67	4.11	5.02	12.84	26.29	5.98	4.40	13.03	26.69	5.90	5.48	0.60	0.40
0.9	27.30	18.64	4.06	4.54	10.17	21.46	4.90	3.89	10.25	21.85	4.82	4.46	0.60	0.40
1.1	28.06	14.73	3.62	4.47	8.55	16.87	4.44	3.40	8.21	16.78	4.15	3.58	0.65	0.50
1.3	28.47	11.23	3.42	4.46	6.62	13.09	4.42	3.13	6.20	12.77	3.81	2.69	0.70	0.65

単位: [ $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e_1, e_2, f_1, f_2$ ] は (tfm/m) [ $\alpha_1, \alpha_2$ ] は無次元

表一四  $M_x$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$d_1$	$d_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.7	11.18	3.94	1.26	0.91	3.52	2.64	1.57	3.43	1.00	1.00
0.9	11.21	3.20	1.11	0.87	1.60	2.98	1.34	2.89	1.00	1.00
1.1	11.26	2.55	1.21	0.75	1.30	2.47	1.11	2.34	1.00	1.00
1.3	11.54	2.22	1.02	0.66	1.05	2.05	0.87	1.96	1.00	1.00

単位: [ $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ ] は (tfm/m) [ $\alpha_1, \alpha_2$ ] は無次元

表一五  $Q_y$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$d_1$	$d_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.7	40.33	40.02	5.27	4.92	6.03	10.88	10.65	5.63	0.40	0.50
0.9	38.14	37.70	3.71	4.20	5.10	8.79	8.71	4.27	0.40	0.50
1.1	35.69	35.28	2.97	3.61	4.76	6.97	6.76	3.63	0.40	0.50
1.3	33.38	33.07	2.86	2.90	3.54	5.64	5.66	2.94	0.40	0.50

単位: [ $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ ] は (tf/m) [ $\alpha_1, \alpha_2$ ] は無次元

#### 4. 設計断面力評価図表

本論文では、これまで落石覆工に対して衝撃荷重載荷位置、載荷面積、頂版厚を変化させた場合の三次元弾性衝撃応答解析を行い、断面力特性を検討した。ここで得られた資料は落石覆工の設計条件を網羅したものではないが、ここで示した条件に対しては実設計に十分取り入れることが可能と考えられる。ここで得られた資料を実設計に取り入れる方法としては先の論文で示したように、有効幅を考慮した静的骨組解析の影響値とすることも可能である。しかしながら、文献 2) に示した方法は、有効幅の決定と合わせて、静的骨組解析を行い、その断面力の

最大値に影響値を考慮することにより設計断面力を決定しようとするものであり、実設計の場合複雑さをまぬがれない。一方、落石による衝撃力の算定に当たっては、落石の大きさ、落下高さを決定しなければならない。現状ではこれに大きな不確かさがあり、設計断面力分布を解析値に基づいて複雑に規定することは、必ずしも合理的ではないとも考えられる。ここでは得られた結果を実設計へ利用可能なように、より簡単に図表化することを試み、それを紹介する。

落石覆工の実設計に当たっては、先に示した各断面力の最大包絡線分布を基本とすべきであるが、実設計への応用に当たっては、これをより簡単な形にモデル化することとする。断面力分布特性は、全て直線分布とした。それぞれの分布を決定する値を、断面方向、軸方向及び開口部に分け、図一八中に記号で示している。また、軸方向分布は自由端部を基準とし、中央部 2/3 の区間を係数  $\alpha_1, \alpha_2$  により修正することを試みた。

上のように断面力分布をモデル化したとき、荷重 50 tf に対して断面力を決定する断面力分布特性を断面力分布係数と呼ぶこととする。各頂版厚に対してケース 2 に限定して、この断面力分布係数の一覧表を表 3～8 に示す。任意の頂版厚  $h$  に対する係数はこの表から内挿して求めることができる。ただし、 $N$  は図 5 に示すように海側開口部付近の分布の傾向が、他の部分と異なるため、軸方向修正係数  $\alpha_1, \alpha_2$  を  $a_1 \sim c_2$  と  $d_1, d_2$  に対して別の係数を設定した。

### 5. まとめ

落石覆工の実設計のための資料を得る目的で、DYNA3D を用いた 3 次元応答解析を行った。ここでは衝撃荷重の分布幅、載荷位置、頂版厚の影響を検討するため、これらのパラメータを数種設定して解析を行った。

また、これらの解析結果をもとに、実用的な設計図表を作成しその一部を示した。これらの解析で得られた成果を以下に示す。

- 1) 自由端載荷の場合の各断面力は中央部載荷の場合に対して、1.5～3.0 倍大きな値となっている。
- 2) 各断面力値への頂版厚の影響はそれ程大きくはない。
- 3) 落石覆工の断面寸法、荷重分布幅、載荷位置等のパラメータを設定し、実設計のための設計図表を設定することができた。
- 4) より詳細な設計図表を作成することより、3 次元特性を考慮した落石覆工の設計が可能となることを示した。

なお、本文をまとめるに当たり室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻の山内昌昭君はじめ、構造力学研究室の諸君に多大の協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 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, pp. 97~106, 1994.1.
- 2) 菅田紀之, 岸 徳光, 中野 修: RC 落石覆工の衝撃応答解析と断面力算定に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 495/I-28, pp. 73~82, 1994.7.
- 3) 岸 徳光, 佐藤昌志, 西 弘明, 安藤智啓: 弾性衝撃応答解析による RC 落石覆工の断面力分布特性、構造工学論文集, vol. 41A, pp1185-1192, 1995.3
- 4) Hallquist.J.O.: Dyna3D User's Manual, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-19592, Rev.4, 1988.4.

表-6  $Q_x$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$d_1$	$d_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.7	9.60	3.04	2.25	1.40	2.46	6.46	9.86	8.88	1.00	1.00
0.9	9.38	2.23	1.85	0.88	1.79	6.11	7.73	7.15	1.00	1.00
1.1	9.13	1.69	1.60	0.78	1.16	5.79	5.83	6.26	1.00	1.00
1.3	9.07	1.49	1.94	0.81	0.96	5.48	4.72	5.28	1.00	1.00

単位: [ $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ ] は (tf/m) [ $\alpha_1, \alpha_2$ ] は無次元

表-7  $N$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$d_1$	$d_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0.7	3.43	7.59	9.11	7.38	14.83	37.35	1.00	1.00	24.77	37.52	2.00	2.00
0.9	2.62	6.52	7.21	5.87	12.45	36.50	1.00	1.00	19.47	37.01	2.00	2.00
1.1	2.27	5.77	5.75	6.10	10.91	35.04	1.00	1.00	14.66	35.88	2.00	2.00
1.3	1.85	5.37	5.44	6.22	9.17	33.39	1.00	1.00	11.47	34.54	2.00	2.00

単位: [ $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ ] は (tf/m) [ $\alpha_1, \alpha_2$ ] は無次元

表-8  $M_x', Q_x', N_x'$  の断面力分布係数 (荷重 50 tf)

頂版厚 (m)	$M_x'$		$Q_x'$		$N_x'$	
	g1	g2	g1	g2	g1	g2
0.7	26.14	13.73	36.93	36.93	2.30	10.40
0.9	25.86	12.40	29.18	29.18	1.95	9.29
1.1	25.19	11.18	24.03	24.03	1.55	8.09
1.3	24.15	9.83	20.66	20.66	1.84	7.13

単位 (tf/m)