

I-18

柱式 RC 覆道の弾性衝撃挙動解析

室蘭工業大学	正員	松岡健一
開発土木研究所	正員	佐藤昌志
開発土木研究所	正員	今野久志
室蘭工業大学	学生員	上坊寺実

1. はじめに

RC 覆道の設計は従来、落石対策便覧¹⁾に従って行われている。すなわち落石対策便覧では、衝撃荷重は落石による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たうえで、静荷重として取り扱われている。また、設計のための断面力の評価は、落石覆道を単位奥行きを有する骨組構造にモデル化し静的問題として解析することにより行われている。しかしながら落石覆道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、落石覆道の衝撃特性を考慮した断面力の評価が必要である。著者らはこのような考えから、これまで RC 覆道の一つの形式である箱型 RC 覆道に対して実験のおよび解析的に詳細な検討を行い、落石衝撃による三次元衝撃応答特性を考慮した設計法を提案している^{2),3)}。また RC 覆道のもう一つの形式である柱式 RC 覆道においても詳細な実証実験を行い、その衝撃特性を検討するとともに三次元衝撃応答解析法等との比較検討を行っている⁴⁾。この結果、柱式 RC 覆道においても、三次元衝撃応答解析法を用いた解析によって落石覆道の応答特性の評価が可能であることを明らかにしている。以上の観点から本論文では、柱式 RC 落石覆道に対して実設計のための基礎資料を得ることを目的として、覆道の断面寸法および衝撃荷重載荷位置を変化させた場合の衝撃応答解析を LS-DYNA3D を用い検討した。なお、緩衝構造の影響も検討するため荷重分布状態も考慮して解析を行った。

2. 解析仮定

2.1. 解析モデル

本論文で解析に用いた覆道モデルは、国道 228 号に設置されている立岩覆道の 1 ブロック (図-1) を基本とした。立岩覆道は北海道開発局が覆道に対する合理的設計手法を検討するための一環として、重錘落下による実証実験を実施した覆道である。ここではこれを一部簡素化したモデルを要素分割し解析に用いることとした。なおここで用いる座標軸は図-1 に示すとおり、覆道軸方向を X 軸、幅員方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とした。また要素分割は、解析の精度を確保するために載荷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。図-2 では緩衝材を敷砂とした場合の覆道軸方向の中央部断面に対して幅員方向任意点載荷時に対する解析に用いた要素分割状態を示す。

覆道の底板は、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、これまでの実験結果より基礎地盤の影響は大きくないことが明らかになっている²⁾。これをもとに本解析モデルにおいても弾性基礎を無視

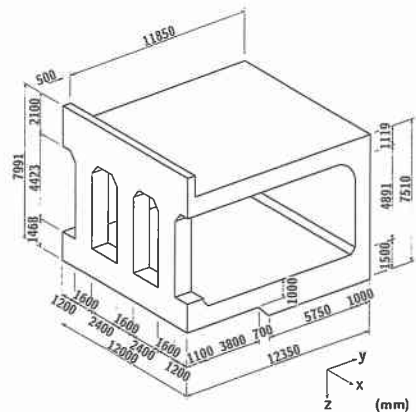


図-1 立岩覆道の1ブロック

Study on Elastic impact response analysis of column-type RC rock-shed.
by Ken-ichi MATSUOKA, Masasi SATO, Hisasi KONNO, Minoru JOUBOUJI

以上のことより、ここでは覆道の断面寸法として覆道頂版部の厚さにのみに着目して解析を行った。具体的には、頂版厚として実設計で用いられることの多い厚さ 70 ～ 130 cm を参考に $h = 100$ cm を基準とし、 $h = 70$ cm と $h = 130$ cm の三種類を頂版厚として採用した。なお本論文では実設計における断面力評価を前提としているため、LS-DYNA3D によって得られた要素応力を断面力に換算して評価を行っている。表-2 にここで用いている断面力の定義の一覧を示す。なお、本論文では柱部においても他の部材と同様に単位幅をとり評価を行っている。

3.1. 最大断面力分布に及ぼす頂版厚の影響

ここでは頂版厚の影響を検討するため、荷重分布幅はケース 1 に限定する。また、それぞれの図では頂版厚は線の種類によって区別して示している。

3.1.1. 覆道幅員方向載荷時

(a) 覆道軸方向中央部断面載荷時の中央断面の最大断面力包絡線分布

覆道軸方向の中央部断面に対して、幅員方向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。図では断面内側に正値を、外側に負値を示している。なお軸方向曲げモーメント M_x 、軸方向軸力 N_x および軸方向せん断力 Q_x の値は全体として小さいので紙面の都合上ここでは省略する。幅員方向曲げモーメント M_y の分布は、頂版では中央部および両端部で大きく、柱および側壁部では上部で大きな分布を示している。頂版部の曲げモーメントは頂版厚による影響は少ないが、柱部および側壁部では頂版厚の影響が現れている。幅員方向せん断力 Q_y は、頂版両端部で大きく柱部および側壁部では小さい。また、頂版厚の影響は少ない。幅員方向の軸力 N_y は柱部および側壁部で大きく、頂版厚の増加に従って大きくなっている。

頂版厚の影響を数値的に検討するために断面の

代表的な点 (図-4 の付図に示す) の断面力を表-3 に示した。表から明らかなように M_y は、頂版部での着目点① (頂版中央部) における正の値が $h = 70$ cm で 12.5 tfm/m、 $h = 130$ cm で 14.5 tfm/m と頂版厚の厚い場合が 15 % 程度大きな値を示している。これに対して、着目点② (頂版・柱接合部頂版側部材) での負の値は、 $h = 70$ cm で 13.4 tfm/m、 $h = 130$ cm で 8.9 tfm/m と $h = 70$ cm の場合が 50 % 大きく、着目点③ (頂版・側壁接合部頂版側部材) においても頂版厚の薄い $h = 70$ cm の場合が約 75 % 大きい値

表-1 断面力定義一覧

断面力	記号	頂版、底版	側壁部	柱
幅員方向曲げモーメント	M_y	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_{yz} dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_{yz} dA_3$
軸方向曲げモーメント	M_x	$\int_{A_1} \sigma_x z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_{xz} dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_{xz} dA_3$
幅員方向軸力	N_y	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_z dA_3$
軸方向軸力	N_x	$\int_{A_1} \sigma_x dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x dA_3$
幅員方向せん断力	Q_y	$\int_{A_1} \tau_{yz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{zy} dA_2$	$\int_{A_3} \tau_{zy} dA_3$
軸方向せん断力	Q_x	$\int_{A_1} \tau_{xz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{xy} dA_2$	$\int_{A_3} \tau_{zx} dA_3$

A_1 : 頂版、底版の断面積 A_2 : 側壁の断面積 A_3 : 柱の断面積

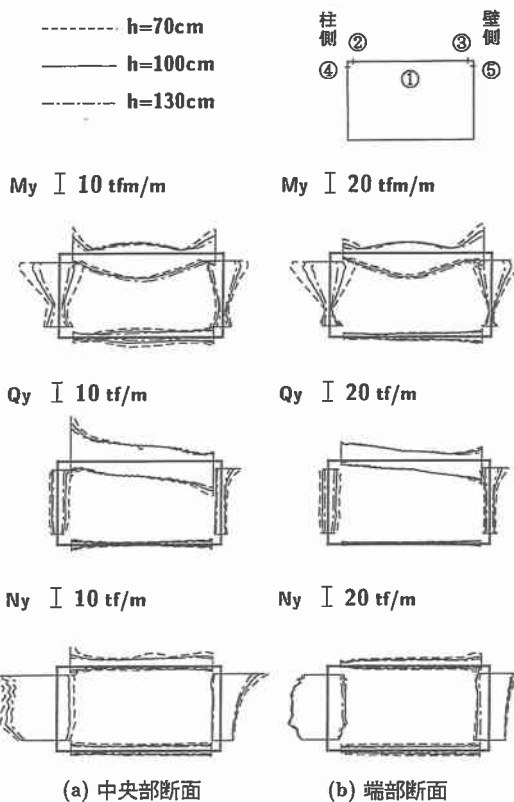


図-4 覆道幅員方向載荷時の断面力の最大包絡線分布

を示している。また、他の部材においても $h = 70 \text{ cm}$ の値は $h = 130 \text{ cm}$ の値に対して着目点④で約 2.0 倍、着目点⑤で 1.8 倍となり、ともに頂版厚の薄い場合に大きな値を示している。このように頂版部は、中央で頂版厚の厚い場合が大きな値を示すものの、断面寸法も大きくなるため安全側と考えられるが、両端部では頂版厚の薄い場合が大きな値となっているため十分な検討が必要である。柱部および側壁部においても頂版厚の薄い場合が大きな値を示すため同様に考慮すべきである。

Q_y は頂版部両端の着目点②の負の値、着目点③の正の値および柱部の着目点④の正の値において頂版厚による大きな差がみられるものの、その他の着目点では大きな差は見られず、同様の値を示している。また、軸力 N_y おいても頂版厚の薄いものほど大きい値を示しているものの、その差はそれほど大きくはない。

(b) 覆道軸方向端部断面載荷時の端部断面の最大断面力包絡線分布

覆道軸方向の端部断面に対して、幅員方向任意点載荷時の M_y 、 Q_y 、 N_y の最大包絡線分布を図-4 (b) に示す。正負の表示は (a) と同じである。なお、この断面には柱は存在しないが、ここでは端部柱の中央断面での値を柱部断面として示している。この場合も頂版厚の影響を比較検討するために代表的な点の断面力を表-3 に示している。(a) と同様に M_y に対して頂版厚の影響を断面の代表的な点について検討すると、着目点①での正の値は、 $h = 70 \text{ cm}$ で 23.1 tfm/m、 $h = 130 \text{ cm}$ で 26.6 tfm/m と頂版厚の厚い方が 15 % 程度大きな値を示している。また両端部では、負の値で頂版厚の影響が現れている。着目点②では $h = 70 \text{ cm}$ で 14.0 tfm/m を示し、 $h = 130 \text{ cm}$ で 5.8 tfm/m を示す。着目点③では $h = 70 \text{ cm}$ で 28.6 tfm/m、 $h = 130 \text{ cm}$ で 16.6 tfm/m を示している。柱部および側壁部の上端でも同様に負の値でより顕著な応答を示し、着目点④では $h = 70 \text{ cm}$ で 38.0 tfm/m、 $h = 130 \text{ cm}$ で 15.7 tfm/m、着目点⑤では $h = 70 \text{ cm}$ で 26.6 tfm/m、 $h = 130 \text{ cm}$ で 10.7 tfm/m の応答を示している。

このように、 $h = 70 \text{ cm}$ の値は 130 cm の値に対して着目点③以外の接合部近傍の着目点では 2.0 倍以上の応答値を示し、端部断面において中央部断面よりも頂版厚の影響が大きく現れている。また各断面力を中央部断面の応答と比較すると、全体として分布の傾向および頂版厚の影響は中央部断面とほぼ同様であるが、端部断面の値は中央部断面の約 2.0 倍の応答値を示している。このことより設計時には、中央部断面よりも端部断面において注意する必要がある。

3.1.2. 覆道軸方向載荷時

(a) 覆道幅員中央部断面載荷時の幅員中央断面の最大断面力包絡線分布

前節では覆道軸中央断面および覆道軸端部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。ここでは断面力の覆道軸方向分布に着目して、幅員の中央部断面において覆道軸方向の任意点に載荷した場合の頂版の最大断面力分布について検討を行う。 M_y 、 Q_y 、 N_y および M_x の包絡線分布を図-5 (a) に示す。図では下側に正の値、上側に負の値を示している。

表-3 代表的な点における各断面力の比較

断面力	断 面	頂版厚 (cm)	着 目 点				
			①	②	③	④	⑤
M_y (tfm/m)	中央部 断 面	70	12.5	-13.4	-11.7	19.0	-12.8
		100	13.0	-8.8	-8.7	-13.1	-9.1
		130	14.5	-8.9	-6.6	-8.9	-7.2
	端部断面	70	23.1	-14.0	-28.6	-38.0	-26.6
		100	25.0	-9.5	-22.2	-27.3	-20.6
		130	26.6	-5.8	-16.6	-15.7	-10.7
Q_y (tf/m)	中央部 断 面	70	-8.1	-22.5	18.2	9.6	-10.8
		100	-8.2	-18.8	15.9	6.0	-6.9
		130	-8.3	-15.9	14.4	4.0	-4.6
	端部断面	70	-9.3	-18.4	25.7	13.4	-18.6
		100	-9.9	-16.7	23.0	9.7	-13.0
		130	-10.3	-15.7	21.5	6.0	-9.4
N_y (tf/m)	中央部 断 面	70	-5.4	-9.5	-6.2	-31.3	-24.7
		100	-3.8	-6.1	-4.4	-27.2	-19.5
		130	-3.4	-4.4	-3.4	-23.2	-15.7
	端部断面	70	-8.0	-5.3	-11.3	-25.4	-28.8
		100	-4.4	-3.9	-8.6	-23.2	-25.6
		130	-5.3	-2.9	-6.6	-23.0	-23.0

幅員中央断面における各断面力は N_y を除いて各頂版厚に対して分布性状および最大値ともにほぼ同様であり、頂版厚の影響は僅かである。 M_y の分布をみると正の値は端部境界に向かって増加して、端部境界で中央部の約 2.0 倍となっているが、負の値ではそのような傾向は見られずほぼ一定である。 M_x では正負の値とも端部境界に向かって減少して零となっている。せん断力値は正負ともに端部までほぼ一定の値を示し、端部柱の自由端側で Q_y は急激に増加し、自由端部境界では中央部における値の 2.0 倍以上となっている。

(b) 覆道軸方向柱側載荷時の柱側断面の最大断面力包絡線分布

柱式落石覆道では柱側の断面力が特徴的である。ここでは、覆道軸方向柱側の任意点に載荷した場合の柱側断面の断面力を検討する。断面力 M_x , Q_x , N_x の包絡線分布を図-5 (b) に示す。図では内側に正の値、外側に負の値を示している。 M_x は頂版部では柱中間部で正の最大値を示し、負の曲げモーメントは端部を除きほぼ一定である。いずれも頂版厚の影響は小さい。柱部では正負の値とも上部で大きく、下部に向かって反転するような分布を示している。全体的には端部柱の曲げモーメントが最大である。頂版厚の影響は柱部で顕著であり、端部柱上部の最大値で $h = 70 \text{ cm}$ のとき 34.9 tfm/m であり $h = 130 \text{ cm}$ のとき 23.8 tfm/m である。全体的に頂版厚の薄い $h = 70 \text{ cm}$ が頂版厚の厚い $h = 130 \text{ cm}$ の 1.7 ~ 2.0 倍となっている。

Q_x は頂版部では正負ともほぼ一定であり、柱部でも下部でやや大きいもののほぼ一定である。 N_x は頂版部では小さく、柱部では特に端部柱の圧縮力が大きい。しかしいずれも頂版厚の影響は小さい。

3.2. 最大断面力分布に及ぼす荷重分布幅の影響

ここでは頂版厚を $h = 100 \text{ cm}$ に限定して、異なる 2 種類の荷重分布幅が最大断面力分布に及ぼす影響に着目して比較検討を行うこととした。図-6 に覆道軸中央部断面および柱側断面における各断面力の最大包絡線分布を示している。図中ではケース 1 を点線、ケース 2 を実線で示している。また正負の表示は前の図-4, 5 と同様である。各断面力の包絡線分布を見ると、どの断面においても分布幅の狭いケース 1 の方が分布幅の広いケース 2 より大きい分布性状を示している。

覆道軸方向中央部断面における M_y に着目して検討すると、頂版部での正の最大値は、ケース 1 に比べてケース 2 の方が約 20 % 小さい。また、頂版部での負の値は中央部近傍ではケース 1 と比べてケース 2 は微小な値をとっているのに対し、両端部近傍では両ケースともほぼ同一の値を示している。柱部の性状は最小値を示す中央部近傍から上方においての負の値ではケース 1 とケース 2 とほぼ同等の値を示すが、正の値ではケース 1 に対してケース 2 が非常に小さい値へと低減されている。下方においては、その逆となっている。側壁部においては底版部との接合部近傍でケース 2 の方が小さな値を示し、頂版部との接合部では柱

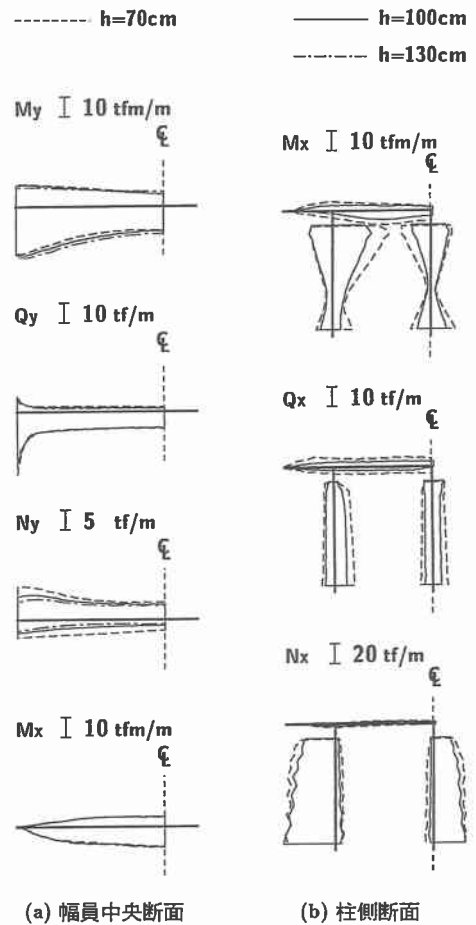


図-5 覆道軸方向載荷時の断面力の最大包絡線分布

部と頂版部との接合部の性状と同様である。
 このような傾向はせん断力 Q_y および軸力 N_y においても見られる。

覆道軸方向載荷時の柱側断面においても各断面力ともケース1よりケース2の方が全体として小さな値であり、特に M_x の柱部の値に荷重分布幅の影響が大きいことが分かる。

4. まとめ

柱式 RC 落石覆道の実設計のための基礎資料を得ることを目的として、衝撃解析用汎用コード LS-DYNA3D を用いた解析を行った。本研究では衝撃荷重の分布幅、載荷位置および頂版厚の影響を検討するため、これらのパラメータを基に数種の解析ケースを設定して解析を行った。

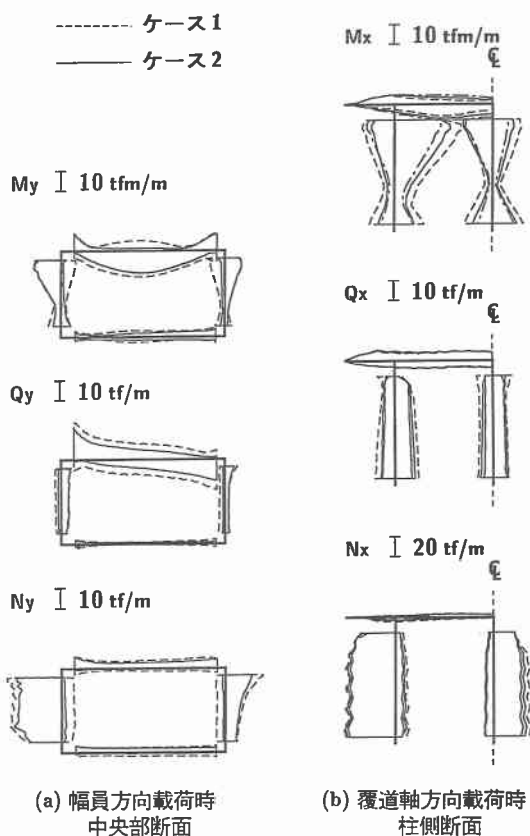
本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 覆道軸中央断面、端部断面ともに同様の分布性状を示すものの、端部断面における断面力は中央断面の1.5~2.0倍となっている。
- 2) 頂版両端部および柱、側壁において幅員方向曲げモーメント M_y は、頂版厚の薄い方が大きな値となるため、十分な検討が必要である。
- 3) 幅員方向断面においては M_y 以外の断面力は、頂版厚の影響をあまり受けない。
- 4) 柱側断面載荷において、柱部の軸方向曲げモーメント M_x は頂版厚の変化による影響が顕著であり、頂版厚の薄い方が M_x は大きくなる。
- 5) 荷重分布幅の影響は、当然のことながら分布幅の広い方が小さな断面力を示している。

本論文をとりまとめるに当たり、室蘭工業大学の岸徳光助教授をはじめ、構造力学研究室の大学院生、学部生に多大の協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，pp16 ~ 17, 1983
- 2) 岸 徳光，中野 修，松岡健一，菅田紀之：RC 覆工の衝撃力応答解析手法の適用性に関する実証的検討，Vol.483/I-26, pp.97 ~ 106, 1994.1.
- 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, pp.1185 ~ 1191, 1995.3.
- 4) 岸 徳光，佐藤昌志，今野久志：敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式 RC 覆道の衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A, 1998.3



図一6 荷重分布幅の断面力に及ぼす影響