

RC 落石覆道の動的挙動におよぼす基礎地盤の影響に関する数値解析的検討

ELASTIC IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF COLUMN TYPE RC ROCK-SHEDS WITH BASE FOUNDATION

塩野 康浩*, 池田 憲二**, 今野 久志***, 岸 徳光****, 松岡 健一****

Yasuhiro SHIONO, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO, Norimitsu KISHI, Ken-ichi G. MATSUOKA

* (株)構研エンジニアリング (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

** 北海道開発局 開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*** 北海道開発局 開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

**** 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード: RC 落石覆道, 衝撃挙動, 弾性解析
(RC rock-shed, impact response, elastic analysis)

1. はじめに

著者らは、これまで落石防護構造物としての落石覆工に関する実験的解析的検討を種々行ってきた。特に RC 落石覆工については、谷側が柱である構造型式を対象として、実証実験結果に基づき衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いた解析手法の検証を行っている¹⁾。また、この結果より衝撃応答特性を考慮した実務設計への適用のための設計手法の提案も行ってきた^{2),3),4)}。しかしながら、基礎地盤の頂版部の動的応答性状に与える影響が小さいとする実証実験結果に基づき、これらの解析においては覆工底版の支持条件を山谷側両端部が道路軸方向に単純支持されていると仮定している⁵⁾。一般に、覆工の底版は基礎地盤上に設置されており、設計的には弾性基礎上の構造物として処理していることより、底版部の設計等に供する詳細な設計資料の蓄積のためには、基礎地盤を考慮したモデル化による応答解析を行い、落石覆工の挙動を検討することが肝要である。

以上の観点から、本論文では柱式 RC 覆工に関するより詳細な実設計のための基礎資料を得ることを目的として、覆工基礎地盤、及び物性を変化させた場合の三次元弾性衝撃応答解析を行った。また、併せてこれら基礎地盤を考慮した落石覆工の衝撃挙動

に対する緩衝構造の影響についても検討を行っている。なお、本数値解析には衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いている。

2. 解析仮定

2.1. 解析モデル

本研究で解析に用いた RC 覆工のモデルは、国道 228 号に設置されている立岩覆道の 1 ブロックを基本としている。図-1 に本覆工の概略形状図を示す。ここでは同覆道を一部簡素化して解析に用いることとした。図-2 に解析に用いた要素分割図を示す。

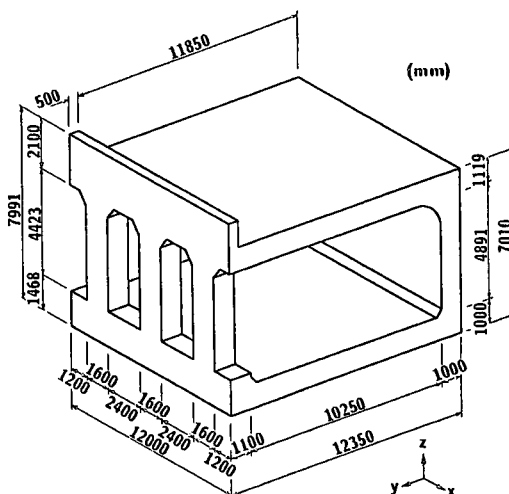


図-1 立岩覆道の1ブロック

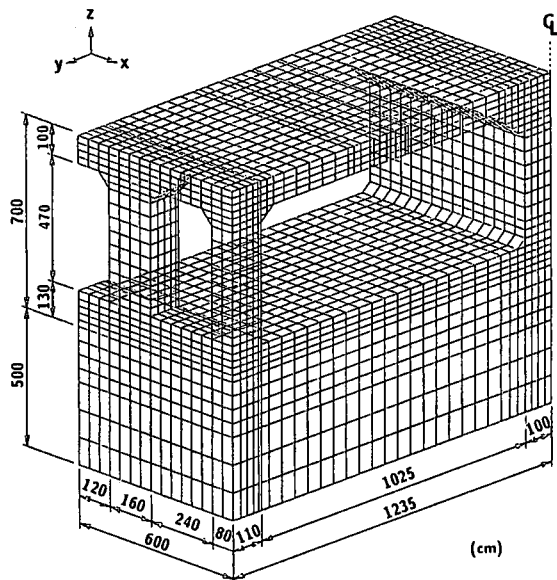


図-2 要素分割状態

図に示す通り、座標軸は覆工道路軸方向をx軸、幅員方向をy軸、鉛直方向をz軸とした。また、本覆工の1ブロックは道路軸方向に構造対称であるため、対称軸を基準にして覆工の1/2をモデル化し、全て三次元固体要素を用い弾性解析を行った。覆工部の材料定数は、弾性係数 $E = 29 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、密度 $\rho = 2.5 \text{ ton/m}^3$ としている。また、基礎地盤は、物性、及び状態別にケースを分け、地盤を1) 砂質土、2) 岩盤、3) 砂質土中に $\phi 120 \text{ cm}$ の場所打杭を幅員方向に3列、1ブロックに12本打設した場合の3ケースについてモデル化し、従来の単純支持の場合と比較する形で検討を行っている。地盤部の各材料定数を表-1にまとめて示す。

2.2. 衝撃荷重分布

本研究では、衝撃荷重が緩衝材により分散され部分分布の状態での覆工頂版上に作用するものとして解析を行った。落石による実衝撃荷重は同心円状に分散分布するものと考えられるが、ここではこれを幅員方向分布幅 C 、道路軸方向分布幅 $B = \pi C/4$ とする円形分布と等価な矩形分布に換算して入力することとした。また、覆工頂版上への載荷分布幅は緩衝構造により異なることから、ここでは敷砂緩衝材、及び三層緩衝構造を用いた著者らの実証実験から得られた衝撃荷重分布を対象として検討を行うこととした。図-3に衝撃荷重の空間分布及び時間分布を示す。衝撃荷重の最大値は、便宜的に 490 kN とした。各荷重ケースの一覧を表-2に示す。

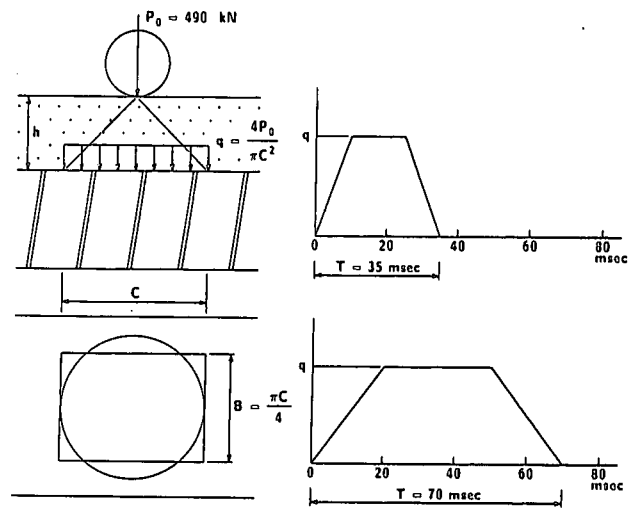


図-3 荷重の分布状況

表-1 地盤の材料定数一覧

地盤分類	弾性係数 $E(\text{GPa})$	ポアソン比 ν	密度 $\rho(\text{ton/m}^3)$
砂質土	0.098	0.45	1.8
岩盤	0.98	0.3	2.5
杭基礎*	29	0.2	2.5

*杭部のみ。他の部分は砂質土と同。

表-2 入力衝撃荷重ケース一覧

緩衝材	幅員方向分布幅	軸方向分布幅	載荷時間
敷砂	$C = 1.0 \text{ m}$	$B = 0.785 \text{ m}$	$T = 35 \text{ msec}$
三層	$C = 3.0 \text{ m}$	$B = 2.356 \text{ m}$	$T = 70 \text{ msec}$

3. 解析結果及び考察

前述のように、本研究では地盤の状態、物性別に砂質土、岩盤、砂質土中に杭基礎による改良を行った場合(以降単に杭基礎)の3条件を設定し、それらを従来の単純支持条件による解析結果と比較する形で検討を行った。なお、本研究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-DYNAによって得られた各要素積分点における応力を断面力に換算して評価を行っている。表-3に断面力の定義一覧を示す。また、覆工頂版部、側壁部及び底版部においては各断面道路軸方向単位幅に対して評価を行なっているが、柱部については全断面に関する物理量として評価している。

3.1. 覆工幅員方向中央部載荷時における各地盤条件の影響

ここでは、各地盤条件の違いによる影響を検討す

表-3 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	$\int_{A_1} \sigma_{yz} dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_{zy} dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_{zy} dA_3$
幅員方向せん断力	Q_y	$\int_{A_1} \tau_{yz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{zy} dA_2$	$\int_{A_3} \tau_{zy} dA_3$
幅員方向軸力	N_y	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_z dA_3$

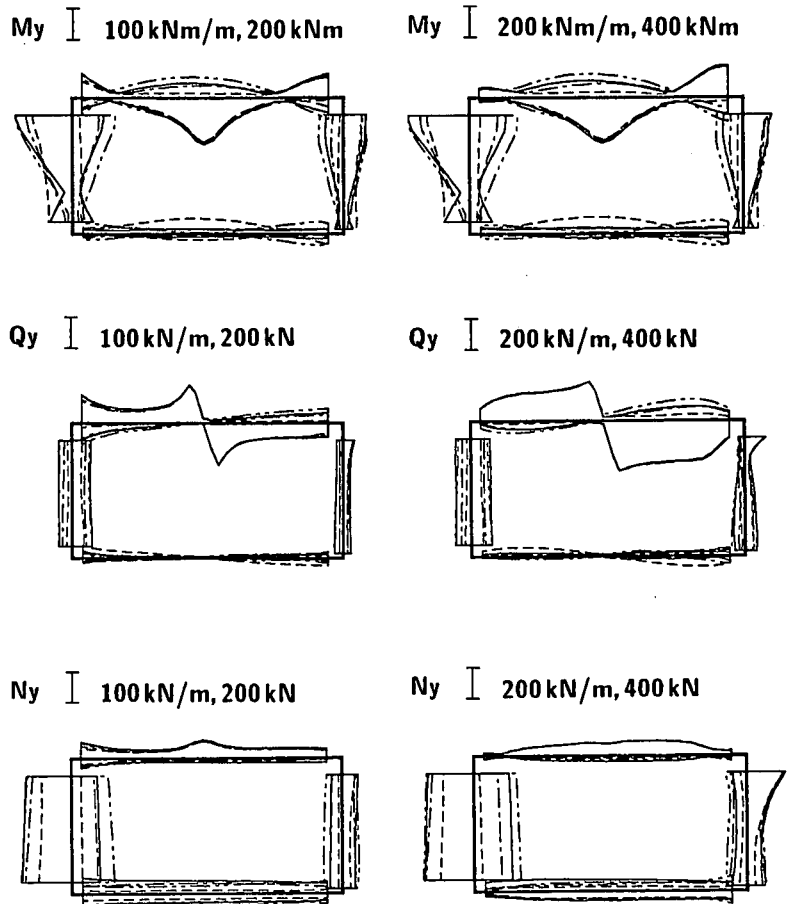
A_1 : 頂版, 底版の断面積 A_2 : 側壁の断面積 A_3 : 柱の断面積

るため、荷重分布幅を敷砂緩衝材を用いる場合と三層緩衝構造を用いる場合に分けて考察することとした。また、それぞれの分布図は衝撃荷重が覆工断面の幅員方向中央部に載荷した場合の応答を示しており、地盤条件の違いを線の種類によって区別して示している。

3.1.1. 敷砂緩衝材の場合

図-4 (a) は覆工道路軸方向の中央部断面に対して幅員方向中央部載荷時の各断面力を示したものである。図では、断面内側に正值を、外側に負値を取って整理している。曲げモーメント M_y は、頂版では正負の最大値ともに地盤条件の違いによる影響はほとんど見られず、頂版載荷点近傍のリバウンドによる応答がわずかに異なる程度である。砂質土の場合にはリバウンドによる応答が最も小さい。これは、砂質土の弾性係数が小さいことより、衝撃荷重の荷重継続時間に比較して地盤部の固有振動周期が長いことによるものと推察される。柱部における曲げモーメントは上部で大きく、下部に向かって減少していく傾向を示している。特に従来の単純支持による挙動では明瞭な鼓型を示すのに対し、地盤が岩盤及び杭基礎の場合には逆三角形、砂質土では矩型に近い形状となっており、それぞれの地盤条件による柱の応答の違いが明瞭なものとなっている。また底版においては、地盤が砂質土の場合に底版中央に他と比較して若干大きな負の曲げモーメントが発生する傾向が確認できる。せん断力 Q_y の分布については、頂版部では地盤条件によって明瞭な相違点は見られないが、柱部に関しては単純支持の場合には値が大きく、砂質土の場合には小さくなる傾向を示している。軸力 N_y については、鉛直力を柱で受け持つ柱式覆工の性質より、柱部の上部から下部までほぼ一定の応答を示していることがわかる。軸力の地盤条件による影響は、曲げモーメン

—— 単純支持
 - - - - 砂質土
 - - - - 岩盤
 - - - - 杭基礎



(a) 中央部断面 (b) 端部断面

図-4 敷砂緩衝材における覆工幅員方向中央部載荷時の各断面力図

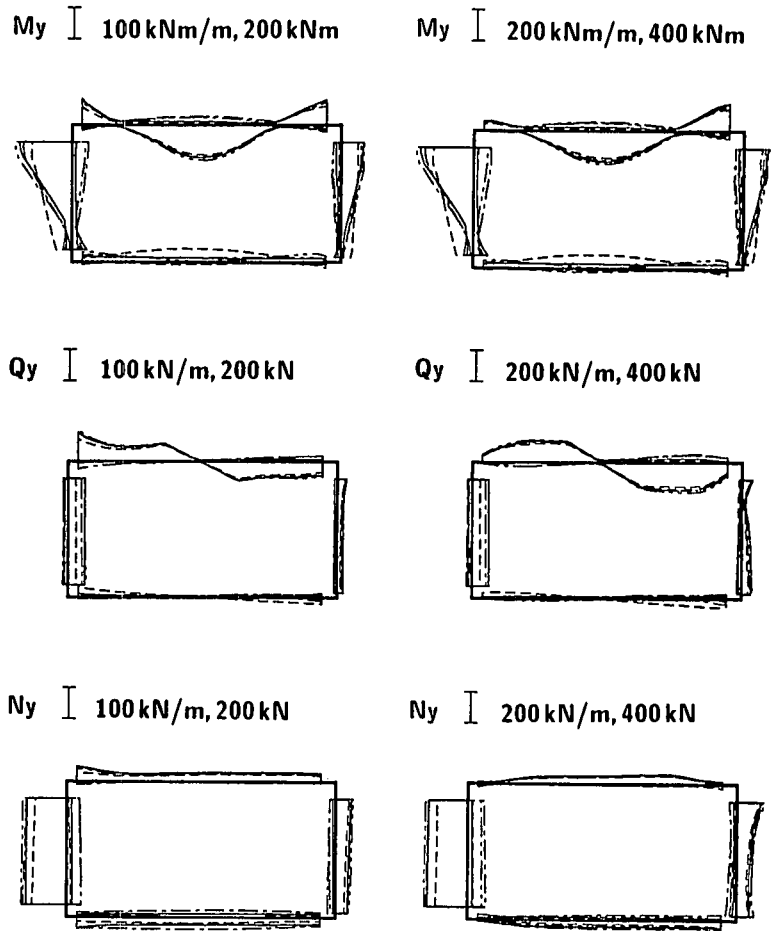
ト同様柱部において顕著なものとなっている。
 図-4 (b) は覆工道路軸方向の端部自由端に対して、幅員方向中央部載荷時の各断面力を示したものである。なお、この断面に柱は存在しないが、端部自由端に最も近い柱の挙動を示すこととした。全体的な応答性状は中央部断面と大きく異なることはな

いが覆工端部が自由端であることより、数値的にその応答が中央部断面の2倍程度を示していることがわかる。

3.1.2. 三層緩衝構造の場合

前項に引き続き、図-5に緩衝材として三層緩衝構造を用いた場合の幅員方向中央部載荷時の各断面内力を示す。正負の表示は3.1.1と同様である。また、図中(a)、(b)も前項と同様、覆工道路軸方向中央部断面を(a)、同端部断面を(b)として示している。三層緩衝構造を用いる場合には、全体の分布性状が敷砂単層に比べなだらかで、かつ図中の各線が諸処重なり合っていることから、地盤条件による衝撃応答の差異は敷砂単層の場合よりも小さいことがわかる。柱部の曲げモーメントは地盤が砂質土の場合以外はいずれの場合も逆三角形形状の分布性状を示している。底版部の曲げモーメントに関しては砂質土の場合の負曲げモーメントが若干大きく示されているが、全体的に見れば大きな値ではない。

—— 単純支持
 - - - - 砂質土
 - · - · 岩盤
 - · - · 杭基礎



3.2. 各地盤条件における最大断面力包絡線分布

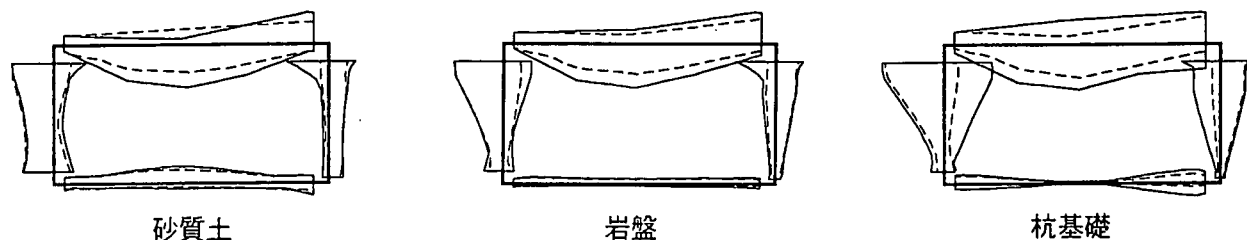
ここでは、砂質土、岩盤、杭基礎の各地盤条件における幅員方向の最大断面力包絡線分布について考察する。具体的解析手法としては、覆工頂版上に作用させる衝撃荷重の位置を幅員方向海側から山側まで変化させ、その各解析結果を断面力に換算し、全載荷位置、全応答時間中の最大値を取る形で包絡線を作成した。各断面力の最大包絡線分布を図-6に示す。正負の表示は図-4と同様に、断面内側に正値を、外側に負値を取り、緩衝材が敷砂である場合を実線、三層緩衝構造である場合を破線で表している。なお表-4には、設計のために各断面分布を簡略にした場合の数値を一覧にして示している。

(a) 中央部断面 (b) 端部断面
 図-5 三層緩衝構造における覆工幅員方向中央部
 載荷時の各断面内力図

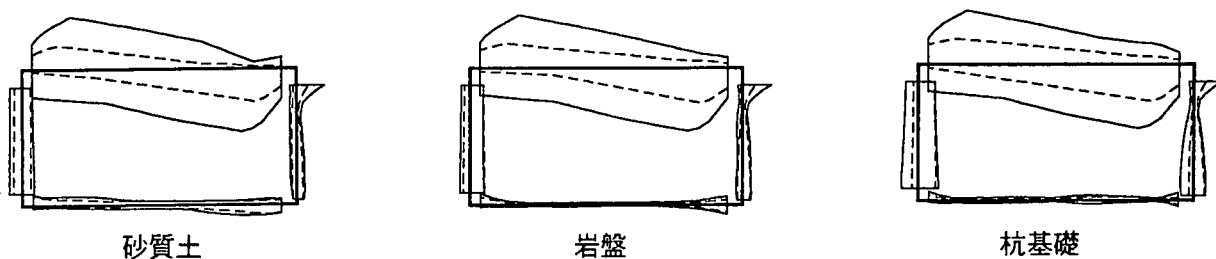
3.2.1. My の最大包絡線分布

図-6(a)の最大断面力包絡線におけるMyの分布は、いずれの地盤条件においても頂版部の分布性状に大きな差異はなく、頂版に及ぼす各地盤条件の影響は大きくないことがわかる。その傾向は図中破線で示した三層緩衝構造の場合に顕著であり、頂版の最大値は280 kNm/m程度の値を示している。一方、柱部では各地盤条件による応答の違いが比較的明瞭となり、敷砂緩衝材の場合には杭基礎の場合における最大モーメントが484 kNm、砂質土の場合には335 kNmとなっており、数値的にもその差は大きい。

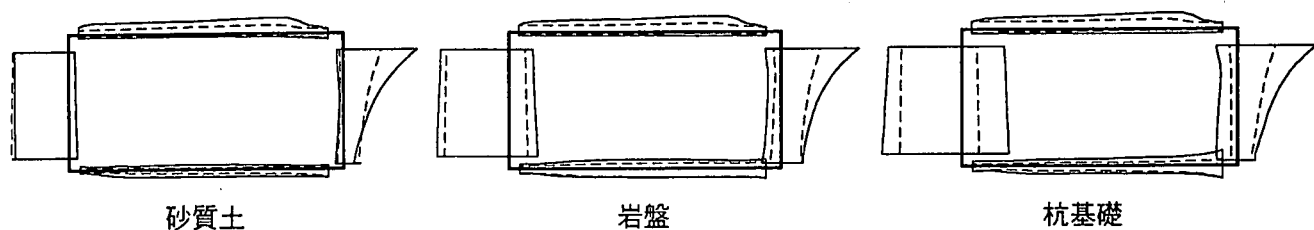
—— 敷砂緩衝材 - - - - 三層緩衝構造 I 200 kN(m)/m, 400 kN(m)



(a) 曲げモーメント M_y の最大断面力包絡線分布



(b) せん断力 Q_y の最大断面力包絡線分布



(c) 軸力 N_y の最大断面力包絡線分布

図-6 各地盤条件における各断面力の最大値に関する包絡線分布

表-4 覆工各部の最大断面力値一覧

M_y (kNm/m, kNm)		a1	a2	b1	b2	c1	c2	d1	d2	e1	e2	f1	f2
敷砂	砂質土	275	193	83	102	258	335	159	238	176	263	99	38
	岩盤	281	194	35	37	231	386	94	146	178	251	78	50
	杭基礎	291	199	85	79	392	484	155	148	182	245	88	84
三層	砂質土	179	133	63	81	146	328	135	247	129	49	97	38
	岩盤	194	151	19	33	146	392	78	131	149	58	75	38
	杭基礎	217	171	26	52	115	461	105	109	171	52	77	23

Q_y (kN/m, kN)		a1	a2	b1	b2	c1	c2	d1	d2
敷砂	砂質土	332	411	75	66	101	98	40	185
	岩盤	335	413	64	67	120	76	37	187
	杭基礎	342	418	44	55	169	127	83	189
三層	砂質土	147	214	67	62	72	62	28	83
	岩盤	155	229	53	46	121	47	28	86
	杭基礎	159	242	34	32	148	41	26	86

N_y (kN/m, kN)		a1	a2	b1	b2	c1	c2	d1	d2
敷砂	砂質土	41	97	59	26	68	428	51	485
	岩盤	30	99	72	52	236	567	123	504
	杭基礎	33	100	91	90	380	621	130	510
三層	砂質土	35	50	59	14	62	458	40	247
	岩盤	22	52	72	32	155	508	70	254
	杭基礎	25	59	85	29	142	483	47	245

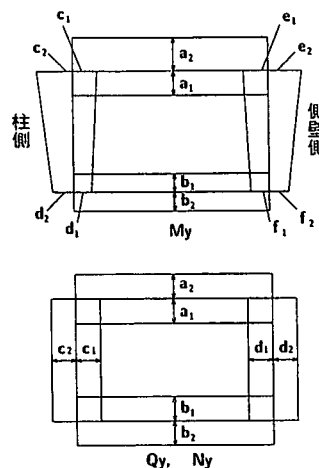


図-7 断面力モデル

また、底版部における応答では、前述の幅員方向中央部載荷の場合と同様、砂質土の場合における応答が中央部において大きくなる傾向があり、その値は 83 kNm/m を示している。一方杭基礎の場合には中央部での値が微小であるものの、両端部において 85 kNm/m と大きな値となっており、底版部全体の最大値としては砂質土と大差のないことがわかる。これは、杭基礎の場合には杭の配置箇所による影響が大きいためであると考えられる。

3.2.2. Q_y の最大包絡線分布

図-6 (b) の Q_y の分布については、各地盤条件による応答の違いに顕著なものは見られない。数値的に見ても柱部、側壁部で比較的大きな差異があるものの、覆工全体として見れば微小な値であるといえる。

3.2.3. N_y の最大包絡線分布

図-6 (c) より、軸力は最大包絡線においても柱部で上端から下端までほぼ一定の値を示していることがわかる。この圧縮力は当然のことながら荷重を幅員方向海側端に載荷した場合の値であり、その値は緩衝材が敷砂である杭基礎の場合に 621 kN となり、各地盤条件中最も大きい値を示している。リバウンドによる引張側の数値を見ても、杭基礎の場合には 380 kN を示しており、砂質土の 68 kN と比べ、その差は顕著である。また、側壁部における軸力分布は上方において大きな値を示し、基部近傍では小さな値を示している。これは、軸力が下方のみならず道路軸方向にも分散されているためと考えられる。

4. まとめ

柱式 RC 覆工の基礎地盤を考慮したより詳細な実設計のための基礎資料を得ることを目的として、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いた三次元弾性衝撃応答解析を行った。本研究では、覆工の地盤条件の違いに注目し、衝撃荷重の載荷位置、及び分布幅等のパラメータを基に数種の解析ケースを設定し、数値解析を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のようなものである。

1) 各地盤条件において、各断面力は道路軸中央断

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 2 倍程度となる

- 2) 杭基礎の場合、柱上部の曲げモーメントが他地盤条件に比べ正負ともに大きな値となるため、設計に当たっては十分な検討が必要である。
- 3) 地盤が砂質土の場合には、底版部幅員方向中央の負の曲げモーメントが他地盤条件に比べ大きくなるが、この値は覆工全体から見ると微小な値である。
- 4) せん断力に関しては、各地盤条件の違いによる影響がほとんど見られない。
- 5) 杭基礎を用いる場合には、リバウンドによる引張軸力についても十分な検討が必要である。

なお、設計のための簡易で合理的な RC 覆工の断面力算定を実現するためには、さらに多様なパラメータを設定、変化させた解析を行うとともに、地盤条件のみならず、覆工裏込め部を考慮に入れた側壁部の検討も必要であると考えている。

参考文献

- 1) 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 覆工の衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1773 ~ 1782, 1998.3.
- 2) 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 3次元挙動を考慮した RC ロックシェッドの設計断面力評価, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 52 号 (A), pp.278 ~ 283, 1996.2.
- 3) 岸 徳光, 松岡健一, 佐藤昌志, 今野久志, 上坊寺実: 柱式 RC 覆道の弾性衝撃挙動, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム公演論文集, pp.71 ~ 78, 1998.6.
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの対衝撃設計, 1998.11.
- 5) 岸 徳光, 中野 修, 松岡健一, 菅田紀之: RC 覆工の衝撃応答解析手法の適用性に関する実証的検討, 土木学会論文集, No.483/I-26, pp.97 ~ 106, 1994.1.