

(6) RC 覆工の三次元弾性衝撃挙動解析

THREE-DIMENSIONAL ELASTIC IMPACT ANALYSIS OF RC ROCK-SHEDS

岸 徳光*, 佐藤昌志**, 角掛久雄***

Norimitsu KISHI, Masashi SATO and Hisao TSUNOKAKE

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 北海道室蘭市水元町 27-1)

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

*** 工修 日本建設コンサルタント(株)大阪支店 (〒530 大阪府大阪市北区天神橋 2 丁目北 2-6)

キーワード: RC 覆工, 落石, 三次元解析

(RC rock-sheds, rock-falling, three-dimensional analysis)

1. はじめに

著者等はこれまで落石による衝撃荷重載荷時の RC 製覆工の動特性に関する検討¹⁾や, 設計のための断面力分布の決定に関する検討を有限帯板要素法を用いた簡易な立体解析²⁾によって行ってきた. ここでは, 特にスパン中央部に限定して解析を行っている. しかしながら, 実 RC 覆工は軸方向の長さが 12m (北海道地域) で端部が自由境界の互いに独立なブロック構造となっている. 安全かつ合理的な RC 覆工を設計するためには, 衝撃荷重の中央部載荷のみならず, 道路軸方向の任意点, 特に自由端部載荷時の動的挙動をも考慮した断面力評価法を確立しなければならないものと考えられる.

このような観点から, 著者らは覆工の 1 ブロックの任意点に落石による衝撃荷重が載荷した場合の動的挙動を明らかにするために, 衝撃解析用汎用プログラムである DYNA3D³⁾ を用いた弾性衝撃応答解析を行い, 有限帯板要素法による解析結果と比較し, その適用性を検討している⁴⁾.

本論文では, RC 覆工の三次元挙動を考慮した合理的な設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として, DYNA3D による三次元解析を行い, その衝撃挙動を詳細に検討した. なお, 実設計における断面力評価を前提としていることにより, DYNA3D による解析結果の要素応力は全て断面力に換算し評価している. また, 落石による衝撃力は弾性解析であることより, 特にことわらない限り $P_0 = 50\text{tf}$ と仮定している.

2. 解析仮定

2.1 解析モデル

数値解析は北海道開発局が覆工の落石荷重に対する合理的設計手法の検討の一つとして重錘落下による実証実験を実施した国道 336 号線に建設中の美幌覆道の 1 ブロックを用いて行った²⁾. 美幌覆道はその 1 ブロックの主形状寸法が図-1 に示すようにスパン長, 幅, 高さがそれぞれ 12 m, 11.75 m, 7.4 m で, 海側中央部に 4.25 m × 5 m の開口部を有する箱型構造である. 解析は軸方向の任意点に衝撃荷重を載荷することにしており, 1 ブロック全てを要素分割している. 要素分割は荷重載荷点位置によって多少異なるが, その総数は全ての解析ケースにおいて 6000 程度である. その一例として図-2 に中央部載荷時の要素分割状態を示している. 底版底部の境界条件に関しては重錘落下による実証実験結果より, 衝撃荷重載荷時には基礎地盤の影響が少ないことが明かになっていることより, ここでは基礎地盤を無視し底版の端辺を上下方向に拘束している. また, 覆工の材料定数はヤング率 $E = 3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比 $\nu = 0.2$, 単位体積重量 $\omega = 2.5 \text{ gf/cm}^3$, と仮定している. なお, 減衰定数は 5% としている.

2.2 衝撃荷重分布

本研究では最大衝撃力 $P_0 = 50 \text{ tf}$ の衝撃荷重が緩衝材によって分散し、部分分布の状態が覆工頂版上に作用するものとして解析を行うこととした。落石による実衝撃荷重は同心円上に分散分布すると考えられる。しかしながら、解析を容易にするため、ここではこれを断面方向分布幅 C 、軸方向分布幅 $B = \pi C/4$ とする等価な矩形分布に換算して入力することとした（図-3(a)）。

また覆工頂版上への載荷状態が緩衝構造によって異なることから、本研究では3つの異なる衝撃荷重を対象として検討を行うこととした。以下に設定した衝撃荷重ケースの概要を述べる。

ケース1：敷厚 $h = 90 \text{ cm}$ とした敷砂単層の緩衝性能実験結果^{5),6)}に基づいて、衝撃荷重の分散幅を $C = 1 \text{ m}$ 、荷重載荷時間を図-3(b)のように $T = 35 \text{ msec}$ の台形状分布と仮定する場合。

ケース2：敷厚 $h = 90 \text{ cm}$ の敷砂単層を仮定し、衝撃荷重を落石対策便覧⁷⁾に則して分散幅を $C = 1.8 \text{ m}$ ($2h$) に分散分布するとし、荷重載荷時間をケース1と同様に $T = 35 \text{ msec}$ と仮定する場合。

ケース3：三層緩衝構造（表層材：敷厚 50 cm の敷砂、芯材： 20 cm 厚のRC版、裏層材： 50 cm 厚のEPS材）の緩衝性能実験結果⁸⁾に基づいて、衝撃荷重分散幅を $C = 3 \text{ m}$ 、荷重載荷時間を図-3(b)のように $T = 35 \text{ msec}$ の時と同様な台形状分布とし $T = 70 \text{ msec}$ と仮定する場合。

以上の各荷重ケースを一覧にすると表-1のようになる。

3. 解析結果

3.1. 覆工中心部載荷時の最大断面力分布

まず、覆工中心部に各ケースの衝撃荷重が載荷した場合の断面力の応答分布性状について検討を行った。図-4に各ケースの正負方向の最大断面力を包絡線分布で示している。なお、 Q_x を除いた各断面力は載荷荷重の中心部の断面の分布であり、 Q_x は荷重の軸方向端部における断面の分布である。図より、いずれの断面力も荷重の分布幅 C が小さくなるほど局所的に大きな分布となっており、荷重載荷点部以外は各断面力とも類似した分布を示していることがわかる。ケース3では荷重の分布

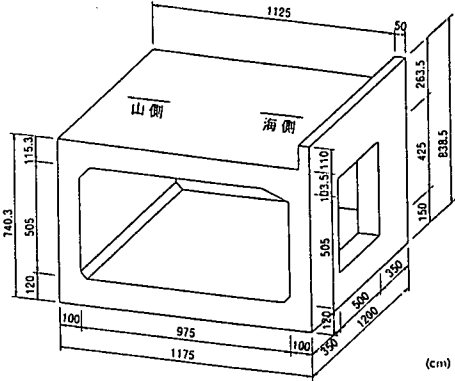


図-1 美幌覆道の1ブロック

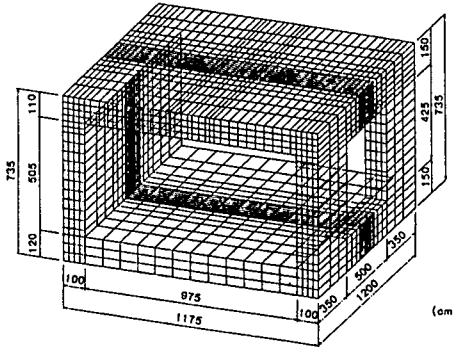
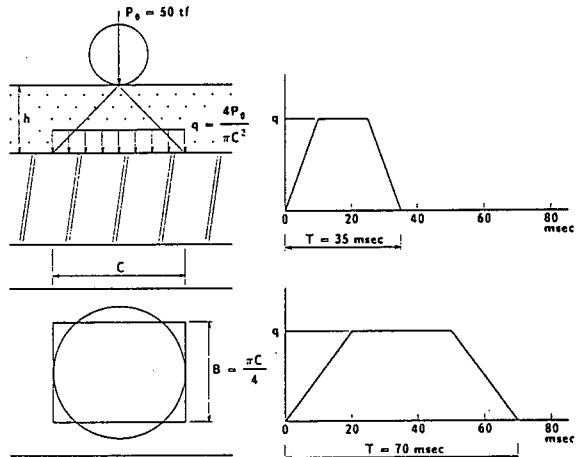


図-2 中央載荷時の要素分割



(a) 荷重の緩衝材による分散 (b) 荷重の時間分布

図-3 基本衝撃荷重

表-1 荷重ケース

荷重ケース	断面方向分布幅	軸方向分布幅	載荷時間
ケース1	$C = 1 \text{ m}$	$B = 0.785 \text{ m}$	$T = 35 \text{ msec}$
ケース2	$C = 1.8 \text{ m}$	$B = 1.414 \text{ m}$	$T = 35 \text{ msec}$
ケース3	$C = 3 \text{ m}$	$B = 2.356 \text{ m}$	$T = 70 \text{ msec}$

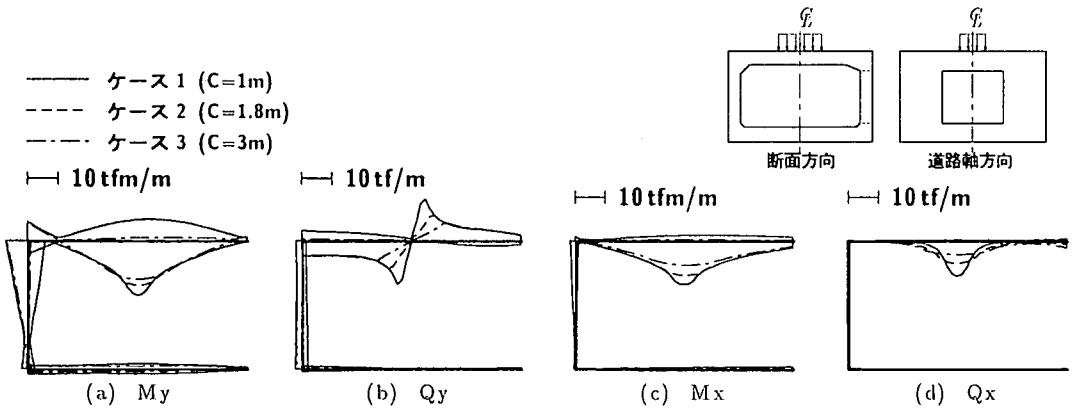


図-4 覆工中心部載荷時の最大断面力分布

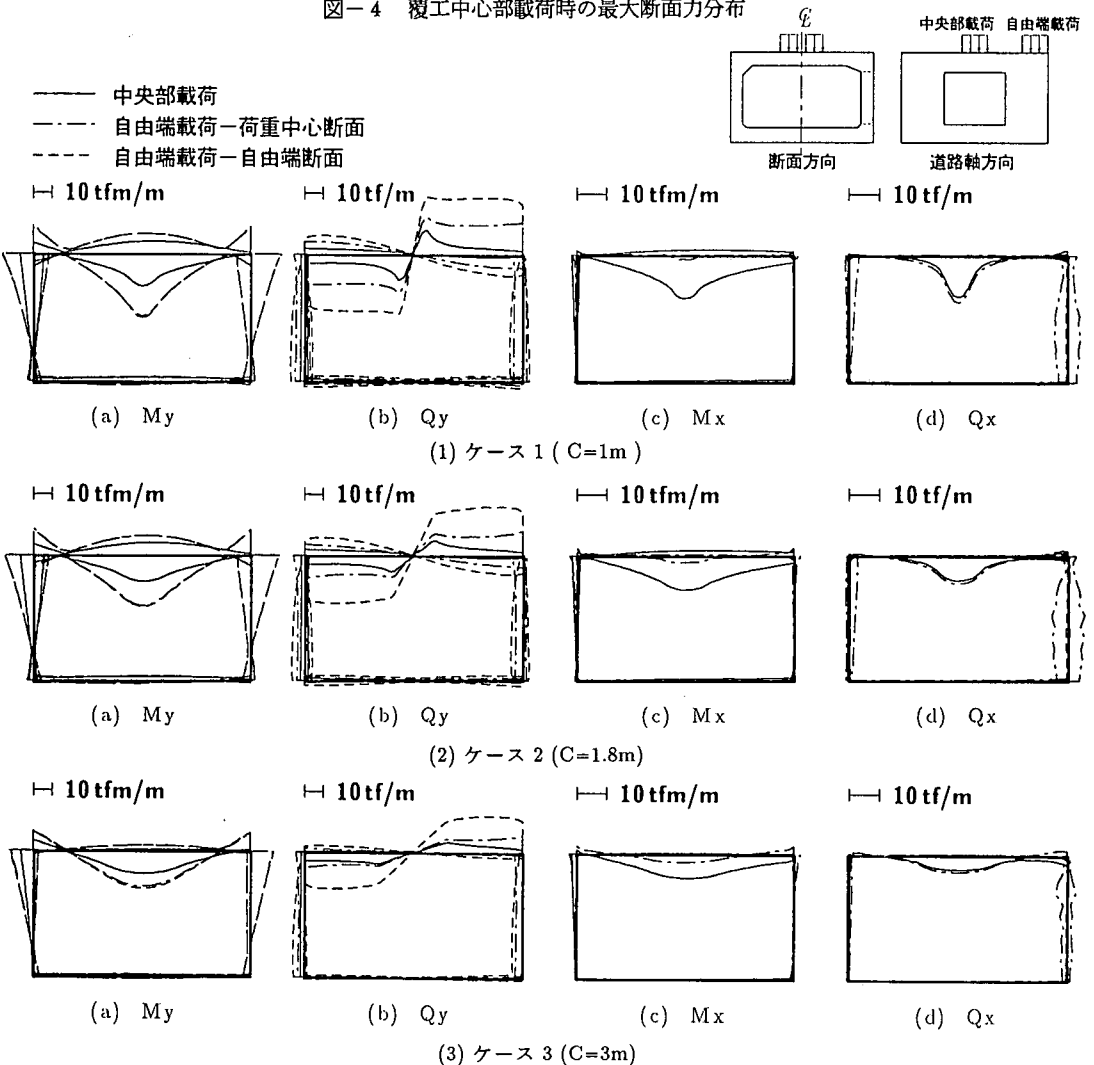


図-5 覆工中心部載荷時と覆工自由端部載荷時の最大断面力分布

幅が大きいため局所的な応答が示されず、いずれの断面力もなめらかな分布性状を示している。またこの解析ケースでは負載荷状態の断面力がほとんど発生しないようである。

3.2 覆工中心部載荷時と覆工自由端部載荷時の最大断面力分布

ここでは、荷重が断面方向中央部で、荷重の軸方向端部が覆工の自由端と一致する様に載荷する場合（以後、この載荷状態を「自由端載荷」と呼ぶ。）の応答結果を覆工中心部載荷時の場合と比較する形で検討を行った。図-5には自由端載荷時の荷重中心における断面、および覆工の自由端断面、覆工中心部載荷時の中心部断面における各最大断面力分布を各ケースごとに比較して示している。なお、 Q_x は自由端断面では零故、自由端と反対側の載荷端断面の断面力を示している。いずれのケースにおいても、 M_x を除く他の断面力は自由端載荷時の方が中央部載荷の場合より大きな値を示しているのがわかる。 M_y の頂版部、壁部の分布性状に関しては、自由端載荷の2ケースは同様な分布性状を示し、中央部載荷の場合はその1/2程度で類似な分布形状を示している。しかしながら、海側壁部の分布は中央部載荷の場合には開口部が存在するため零モーメントとなるが、自由端載荷時には山側壁部と類似の分布となっている。 Q_y に関しては M_y と異なり、自由端断面が最も大きな分布となり、次いで自由端載荷の荷重中心断面、中央部載荷の順となっている。その程度は自由端断面の応答が中央部載荷時の2倍以上の大きさととなっている。

3.3 断面方向中央部軸方向任意点載荷時の各断面の最大断面力分布

図-6には、衝撃荷重を断面方向中央線に沿って軸方向に移動させた場合の各最大断面力を荷重載荷中心点を横軸にとって整理している。なお、覆工が軸方向中央点に関し対称な構造となっていることにより、スパンの1/2のみを示している。図より荷重載荷幅が小さいほど断面力が大きくなっているが、分布形状はどのケースとも類似であることがわかる。また各断面力についてみると、 M_x は自由端方向に減少傾向にあるのに対し、他の断面力は増加傾向にあり自由端載荷時に最大応答を示している。特に、 Q_y においてケース2、ケース3は開口部付近から荷重端部が自由端に達するまで増加しており、その後減少している。ケース1は中央部より4mまで一様な分布となり、その後ケース2,3と同様な傾向を示している。いずれのケースも自由端載荷時の応答値は中心部載荷の場合の2倍以上の値となっていることがわかる。正載荷状態の応答分布をみると、分布幅の広いケース3 ($C=3m$) の場合は、狭いケース1 ($C=1m$) の場合と比べて、 M_y で25%程度、他 Q_y, M_x, Q_x とも45%以上の低減となっており、荷重の分布幅を広くすることにより自由端が存在する場合でも覆工断面力を効果的に低減することが可能であることがわかる。

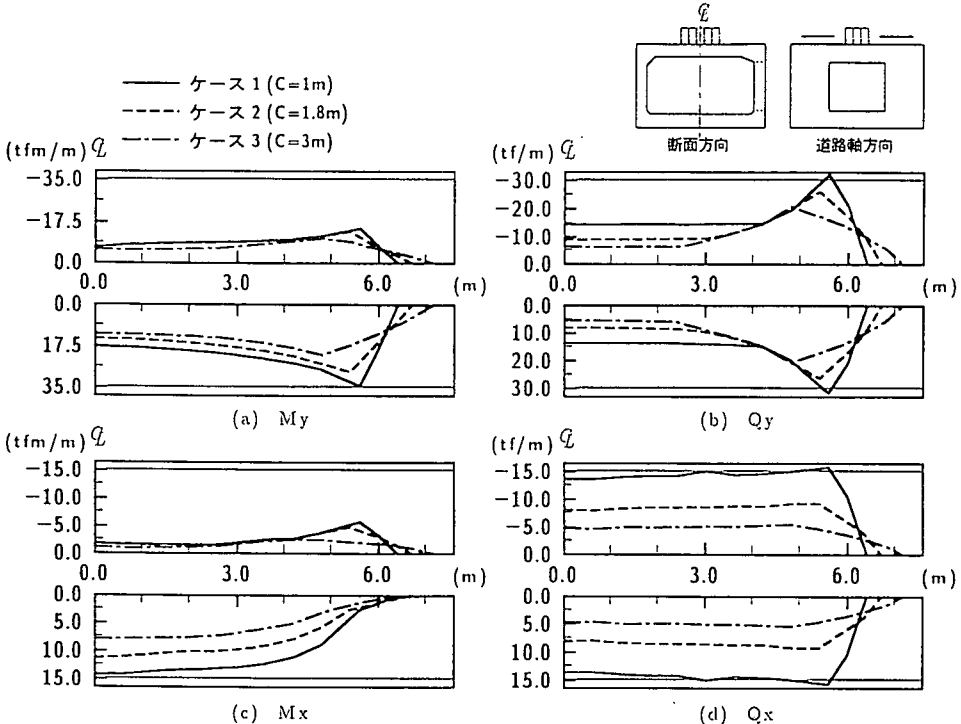


図-6 断面方向中央部軸方向任意点載荷時の最大断面力分布

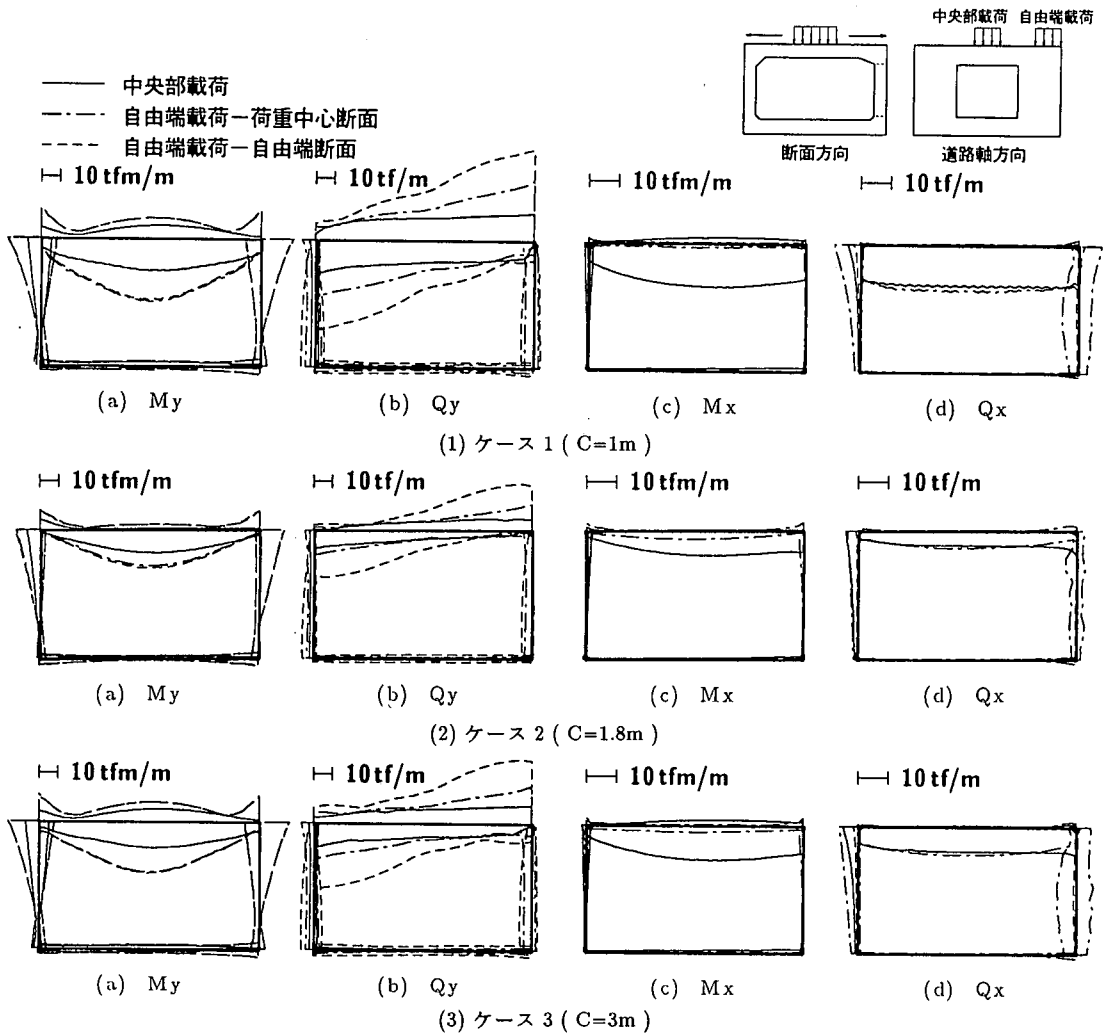


図-7 軸方向中央部と覆工自由端部の移動荷重載荷時の最大包絡線分布

3.4 断面方向任意点載荷時の最大包絡線

図-7には覆工中央部載荷および自由端載荷における断面方向任意点載荷時の最大包絡線を各ケースごとに示している。図-5と同様に自由端載荷時には荷重中心断面と自由端断面について図示している。いずれのケースにおいても M_x は自由端載荷時にほとんど発生しないことがわかる。また、 M_y 、 Q_x に関する中央部載荷時と自由端載荷時の分布形状はともに類似している。頂版部における Q_y の分布は正負とも頂版中心付近から端部に向かって急激に増加している。その傾向は荷重幅の増大とともに顕著になっており、頂版端部の最大断面力は中央部載荷の場合の2倍以上になっている。3.2の結果と同様、 Q_y を除く他の断面力分布はいずれも類似の分布性状を示している。

4. 衝撃荷重載荷に対する断面力評価法の提案

菅田等は有効幅の概念を用いたRC落石覆工の断面力評価法を提案している²⁾。そこではあらかじめ、覆工の頂版厚、荷重分布幅、荷重継続時間に対応した各断面力に対する有効幅、応答倍率に関するノモグラフを作成し、静的平面骨組解析のみで立体的かつ動的断面力の算定を可能としている。しかしながら、断面力算定のためには1)有効幅の決定、2)平面骨組解析、3)動的応答倍率の決定、4)断面力の最大包絡線分布の決定、と4ステップの過程が必要

である。またノモグラフも各パラメータに対して 1 対 1 対応に作成しなければならない。ここでは設計のための落石による断面力算定をさらに簡易なものとするために、設定衝撃荷重および荷重分散幅、荷重時間方向分布に対して覆工各断面力の主応答値をあらかじめ数表化し、その数表により直接断面力分布を決定する方法を提案するものである。本方法によれば、覆工中央断面部のみならず、自由端部載荷を含んだ立体的な断面力分布が即座に決定可能である。ここでは煩雑さを避けるため、最大衝撃力を $P_0 = 100\text{tf}$ に設定し、数表化を試みた。その一例として本解析モデルを対象とした数表を表-2 に示す。ただし表-2 には載荷点断面における最大値のみを示している。この方法によれば、設計者は別途算定された最大衝撃力に対し、表-2 のような数表値を案分することによって、衝撃荷重に対する設計のための断面力分布を容易に決定することが可能である。

表-2 最大衝撃荷重を $P_0 = 100\text{tf}$ とした場合の最大断面力値一覧

荷重ケース	載荷点	My (tfm/m)		Qy (tf/m)		Mx* (tfm/m)		Qx** (tf/m)	
		正	負	正	負	正	負	正	負
ケース 1	中央部	36.38	-13.50	31.50	-38.93	28.20	-3.43	28.48	-28.48
	自由端部	69.56	-32.92	101.77	-102.44	2.60	-3.00	30.62	-30.62
ケース 2	中央部	28.94	-13.40	19.68	-27.2	22.25	-3.45	18.47	-18.47
	自由端部	56.13	-29.47	70.57	-71.37	4.30	-5.11	18.25	-18.25
ケース 3	中央部	25.01	-11.54	12.66	-20.15	15.72	-2.36	13.87	-13.87
	自由端部	41.34	-21.63	49.99	-50.70	5.11	-5.58	11.12	-11.12

(* 自由端載荷の場合は載荷中心断面に注目している)

(** 荷重載荷端断面に注目している)

5 まとめ

本研究では、開口部を持つ RC 箱型覆工構造に対して、中央部載荷のみならず、覆工任意点特に自由端載荷時の動的挙動をも考慮した合理的な断面力評価法を確立することを目的として、緩衝材として敷砂厚 $h = 90\text{cm}$ とする場合や、三層緩衝構造を用いる場合に限定して衝撃解析用汎用プログラム DYNA3D を用いた弾性衝撃解析を行い、各断面力の応答特性や最大包絡線分布特性を明らかにした。また、現実に即した断面を用いた動的応答値を基本にして、簡易な設計のための断面力評価法を提案した。本手法を用いることにより、設計者は構造解析を行わずして設計のための立体的な断面力分布の算定が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 中野 修, 今野久志, 金子 学, 岸 徳光: 美幌覆道における重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 48 号, pp.271~276, 1992
- 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) John O.Hallquist: LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.
- 4) 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.1185~1192, 1995.3.
- 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) 吉田 博, 榎谷 浩, 岡 衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文報告集, 第 362 号/I-4, pp.461~470, 1985.
- 7) 日本道路協会: 落石対策便覧, 日本道路協会, 1983.
- 8) 田村富雄, 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修, 渡辺明: AFRP ロッドを補強筋とした RC スラブをを芯材とする三層緩衝構造の緩衝特性, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1631~1638, 1994.3.