

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

ELASTIC IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF COLUMN TYPE RC ROCK-SHEDS
WITH SAND CUSHION AND/OR THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEM

岸 徳光* 佐藤昌志** 今野久志***

Norimitsu KISHI, Masashi SATO and Hisashi KONNO

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町 2 7 - 1)

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

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

In order to establish a rational impact design procedure of column type of RC rock-sheds, impact response analyses of the rock-sheds by means of LS-DYNA3D were compared with the results obtained from a demonstration impact test which was conducted by using Tateiwa Zuido near Matsumae in Hokkaido. The dynamic responses of the RC rock-shed using two types of absorbing system: 90 cm thick sand cushion and Three-Layered Absorbing System (TLAS), were considered.

The results obtained from this study are as follows:

- 1) the elastic impact behaviors of column type of RC rock-sheds can be predicted by using LS-DYNA3D code with some safety margin for both types of absorbing system;
- 2) the conventional design procedure for the type of RC rock-sheds may overestimates sectional forces the against falling rocks along the transverse direction, but underestimates the case of falling rocks near RC columns.

Key Words: column type RC rock-sheds, three-layered absorbing system, sand cushion, impact response analysis

1. はじめに

落石覆道の種類は、構成材料からみればコンクリート製と鋼製がある。コンクリート製の落石覆道は、さらに鉄筋コンクリート (RC) 製とプレストレストコンクリート (PC) 製に分けられる。これらは建設される地形、落石規模等に応じて選定され設置されている。敷砂を緩衝材とすれば、比較的小規模な落石が想定される場合には主として鋼製覆道が、想定される落石荷重が大きい場合に対しては RC 覆道が採用されており、PC 覆道はこれらの中間に位置するものとされている。また RC 覆道は、構造形式から大別すれば、開口部を有する箱型覆道と片側に柱構造を有する柱式覆道に分けられる。

一方、過去の著者等の研究から三層緩衝構造 (Three-Layered Absorbing System: 以下 TLAS と略称する) を用いる場合には、PC 覆道でも大きな落石荷重に対して十分な安全性を確保できることも明らかになっている¹⁾。

いずれの緩衝構造を用いる場合でも、RC 覆道は任意の断面形状に対する施工が可能であることより、大規模な落石に対する安全性を確保できるため、その耐衝撃安全性に関する研究が活発に行われている^{2),3)}。RC 覆道の安全性確保のためには、衝撃挙動を考慮した合理的な設計法を確立することが重要である。著者等もこれまで箱型 RC 覆道に対して、実験的及び解析的に詳細な検討を行い⁴⁾、落石衝撃による 3次元弾性衝突応答特性を考

慮した設計法を提案している⁵⁾。また、最近では柱式 RC 覆道に対しても、実証実験によりその衝撃挙動を明らかにしている⁶⁾。衝撃応答特性を考慮した RC 落石覆道の設計法確立のためには、柱式 RC 覆道に対してもその設計法を提示することが必要であると考えられる。

以上の観点から、本論文では重錘落下衝撃を受ける実柱式 RC 覆道の 3次元弾性衝突応答解析を行い、先に行った実証実験との比較により、その有用性を検討した。また、3次元弾性衝突応答解析及び実証実験と、現行設計基準による設計値との比較検討を行うことにより合理的な設計法確立の必要性を明らかにすることも目的としている。RC 覆道の衝撃挙動は、用いる緩衝構造の性能や、衝撃荷重載荷位置の影響を受けることから、本論文では、実証実験で用いた実覆道の 1ブロックをモデルとし、緩衝構造として敷砂及び TLAS を用い、載荷位置を変化させた場合について解析を行い検討を加えた。

2. 柱式 RC 覆道の実証実験概要

2.1 実験覆道

実証実験の対象となった覆道は、北海道松前町字白神にある一般国道 228 号に設置された立岩覆道である。立岩覆道に関する詳細は文献 6) に示されていることより、本文では要点のみ示す。設計に用いられた落石荷重は、落石対策便覧⁷⁾に基づき、重量 1.36 tf、落下高さ 22 m、

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝材	重錘重量	落下高	載荷位置
1	敷砂	3tf	10m	P1
2				P2
3				P3
4				P4
5				P5
6				P6
7				P13
8				P14
9				P15
10				P16
11				P17
12	三層緩衝構造	3tf	25m	P3
13			20m	P12
14			20m	P18

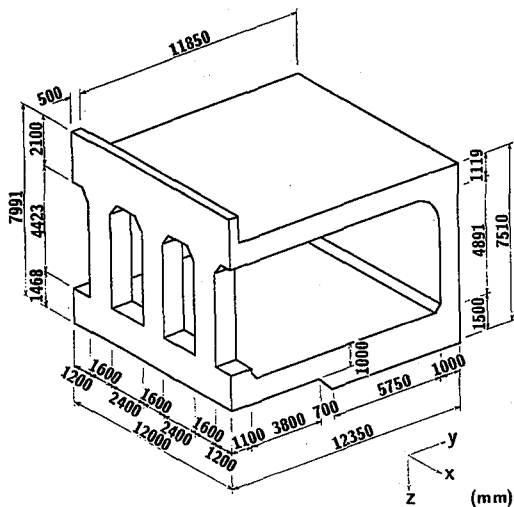


図-1 立岩覆道の概略形状

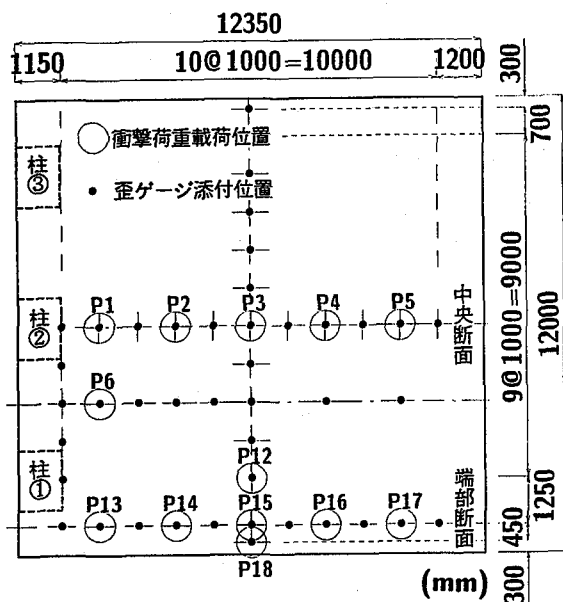


図-2 衝撃荷重載荷位置

敷砂のラーメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ として振動便覧式により算定される 121 tf の衝撃力である。本実験に用いた立岩覆道の1ブロックの概略形状を図-1に示す。覆道軸方向（以後、これを軸方向と呼ぶ）及び覆道軸直角方向（以後、これを断面方向と呼ぶ）の配筋図及び歪測定用の歪ゲージ添付位置についても、文献6)に示されていることより、ここでは省略する。なお、実験に用いた緩衝構造は、敷厚 90 cm の敷砂単層と表層に敷厚 50 cm の敷砂、芯材に厚さ 20 cm の RC 床版、裏層材に厚さ 50 cm の発泡スチロール（EPS）材を用いた三層緩衝構造（TLAS）である。

2.2 実験条件及び測定項目

本実験では、落石覆道の衝撃応答性状への緩衝構造や衝撃荷重載荷位置の影響を検討することとした。表-1に実験ケースの一覧を示す。実験の作用衝撃力は、本覆

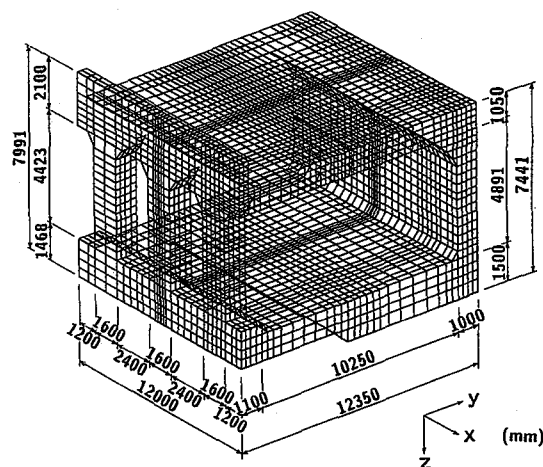
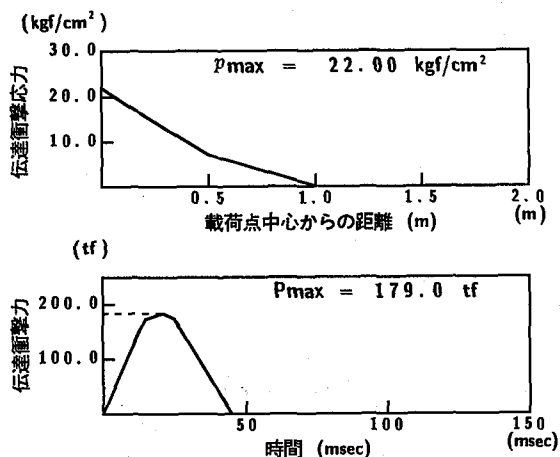


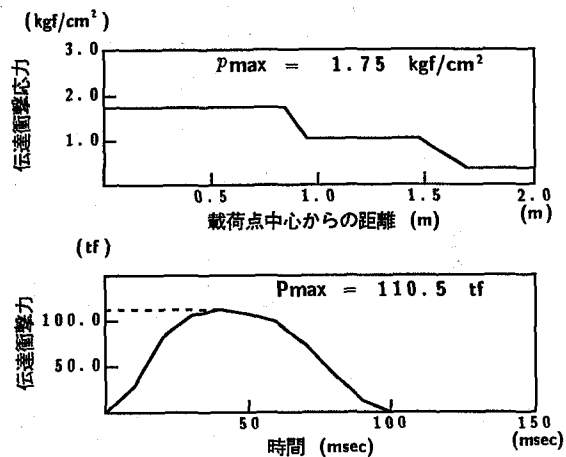
図-3 解析モデル及び要素分割図

道が供用中であることより、設計衝撃力の範囲内としなければならない。このため、作用衝撃力は、敷砂に対しては設計とほぼ等しい落下エネルギーとなる重量 3 tf の重錘を 10 m の高さから自由落下させることにより、また TLAS に対しては敷砂の場合とほぼ同じ衝撃力となるように重量 3 tf の重錘を高さ 20 m あるいは 25 m の高さから自由落下させることによって与えることとした。なお、用いた重錘は、直径 1 m、高さ約 1 m の円柱状で、底部 17 cm が球底（半径 80 cm）となっており、重錘底部には衝撃加速度測定用の加速度計を埋設している。

載荷位置に関しては、敷砂の場合には図-2、表-1に示されているように覆道中央断面及び端部断面に沿う線上の各点と、柱の応答が大きくなると予想される柱と柱の中間点（P6）とした。TLAS に関しては、芯材 RC 版が3体に限定されていたこと、及び TLAS が衝撃荷重の分散性に優れ、断面方向中央点載荷時に断面方向の応答値が最大になるものと考えられることより、芯材



(a) 敷砂を用いた場合



(b) TLASを用いた場合

図-4 衝撃荷重の空間及び時間分布

RC版の設置位置は、断面方向には覆道中心部に、軸方向には次の3点にその中心が一致するものとした。1) ブロック中心位置、2) 柱①の中心と等しい位置、3) 隣接するブロックとの接合点である。載荷点は1)、2)に関しては、芯材中心位置のP3、P12である。3)に関しては、最も厳しい位置として重錘が完全に当該ブロック内に落下するように端面から50cm内側の位置を載荷点とした。しかしながら、実験終了後の測定により、載荷点は端面より45cm内側であることが明らかになったことより、この点をP18とした。なお、測定項目は鉄筋に添付した歪ゲージによる歪及び重錘の加速度である。

3. 解析条件

3.1 解析モデル

解析は衝撃応答解析用汎用コードLS-DYNA3Dを用いて行った。解析の目的は柱式RC覆道の弾性衝撃挙動特性を明らかにすることであるが、実証実験と同様に緩衝構造の効果及び載荷位置の影響に注目して検討することから、実験と同様のケースで解析を行った。図-3に立岩覆道のモデル化及び要素分割の一例を示す。要素分割は、載荷点部を密にしているため、各解析ケースにより若干異なる。解析モデル底版の境界条件は箱型RC覆道の実証実験結果⁴⁾より基礎地盤の影響が少ないことが明らかになっていることより、本解析でもこれを無視し、底版の幅員方向両端辺を上下方向に拘束している。またブロック端部の境界条件は、ブロック間が目地材により縁切りされていることから自由境界としている。解析に用いた各材料定数は、鉄筋コンクリートの弾性係数 $E = 3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、単位体積重量 $w = 2.5 \text{ gf/cm}^3$ と仮定している。なお、減衰常数は質量に依存した減衰効果のみを考慮することとし、箱型RC覆道に関する数値解析⁴⁾と同様に、最低次固有振動

表-2 各断面力の定義

断面力	記号	頂版	側壁部	柱
断面方向曲げモーメント	M_y	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x y dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x y dA_3$
軸方向曲げモーメント	M_x	$\int_{A_1} \sigma_x z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x y dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x x dA_3$
断面方向軸力	N_y	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x dA_3$
軸方向軸力	N_x	$\int_{A_1} \sigma_x dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x dA_2$	

A_1 : 頂版の断面積 A_2 : 側壁の断面積 A_3 : 柱の断面積

に対して $h = 5\%$ となるように設定している。

3.2 衝撃荷重

衝撃応答解析に用いた衝撃荷重の空間分布及び時間分布を図-4に示す。(a)図が敷砂を用いた場合、(b)図がTLASを用いた場合である。なお、伝達衝撃力は図-4の伝達衝撃応力が載荷点部を中心に点対称に分布すると仮定していることから、端部載荷の場合にはブロック内に作用する荷重のみを考慮して解析を行っている。緩衝構造を介して覆道に直接作用する伝達衝撃力は、用いる敷砂の状態により微妙に変化することから、解析値と実験値との比較のためには、実験ケースごとに実測の伝達衝撃力を用いて解析することが望ましい。しかしながら、実証実験を行った覆道が供用中であること及び載荷点が広範囲に跨っていることより、覆道表面に伝達衝撃力測定用ロードセルを埋設しての測定は不可能であった。そのため、敷砂を用いた場合の伝達衝撃力としては、実験条件が比較的類似している美幌覆道(開口部を有する箱型RC構造)の実測値⁴⁾を採用し、TLASを用いた場合には、実覆道における同一条件の測定結果がない

M_y, M_x | 20 tfm/m (版, 壁部), 50 tfm (柱)
 N_y | 20 tf/m (版, 壁部), 50 tf (柱)
 ● 実験値 (正) ○ 実験値 (負)

— 解析値
 (包絡線分布)

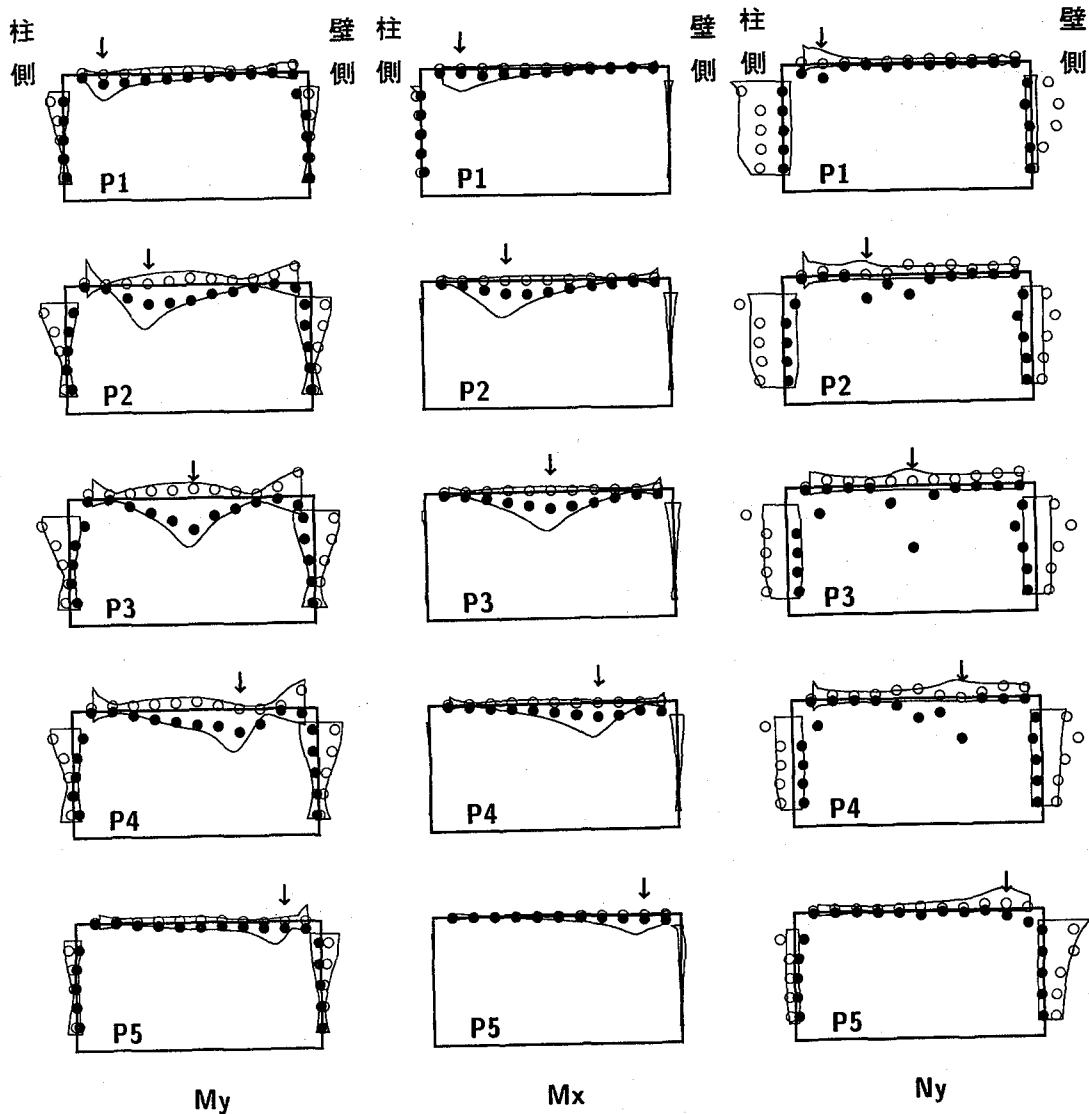


図-5 中央断面 (P1 ~ P5) 載荷時の断面力包絡線分布 (敷砂)

め剛基礎上の実験結果を採用している。本研究では、本実験で得られた重錘衝撃力が、剛基礎上で行った TLAS の緩衝性能に関する過去の実験結果と対応していることを確認している。敷砂を緩衝材とする場合についても、美幌覆道の実証実験における重錘衝撃力及び伝達衝撃力が、剛基礎上の場合とほぼ等しいことを確認している。

4. 解析結果及び考察

本解析による結果は、各要素の歪や応力として得られる。しかしながら、実証実験では実験より得られた鉄筋歪値を断面力に換算して評価していることより、本解析においても実証実験同様、各断面における断面力を算定

し評価することとした。各断面力は、得られた応力値と断面の平面保持を仮定し、表-2 に示されている算定式により評価している。断面力値は、頂版部及び側壁部に関しては単位幅当たり (1 m) の値とし、柱部に関しては柱全断面に対する物理量として評価している。従って、柱部とそれ以外の部分では表示の単位が異なっている。なお、底板部の断面力に関しては過去の実験結果からその値が小さいことが明らかとなっていることより、考察の対象から除いている。以下には設計との対応を考慮し、実験値及び解析値とも各点の正負の応答最大値を用いて整理している。各断面力の時刻歴応答等については、文献 8) に示していることより、ここでは省略する。

$M_y \uparrow 20 \text{ tfm/m}$ (版, 壁部), 50 tfm (柱) — 解析値
 $N_y \uparrow 20 \text{ tf/m}$ (版, 壁部), 30 tf (柱) (包絡線分布)
 ● 実験値 (正) ○ 実験値 (負)

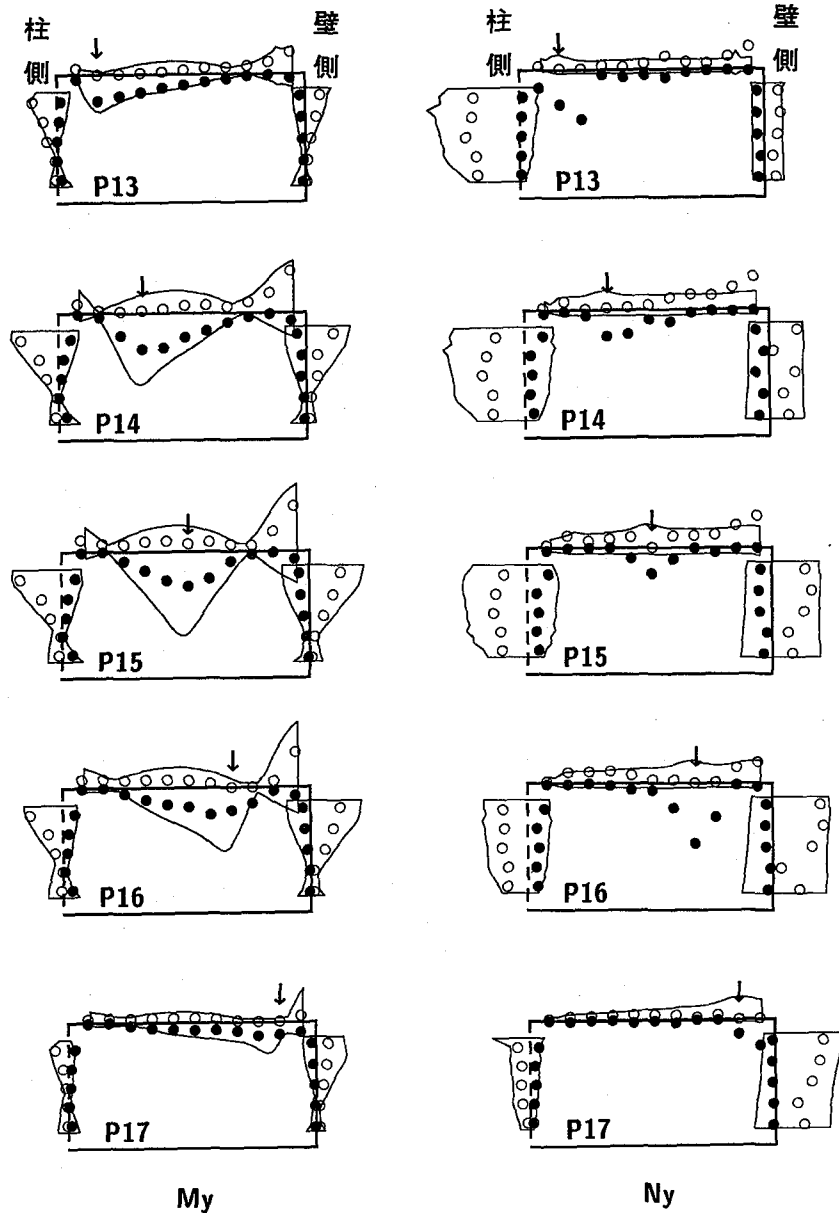


図-6 端部断面 (P13 ~ P17) 載荷時の断面力包絡線分布 (敷砂)

4.1 敷砂を用いる場合

(1) 中央断面 (P1 ~ P5) 載荷時

中央断面 (P1 ~ P5) 載荷時の断面力 (断面方向曲げモーメント M_y , 軸方向曲げモーメント M_x 及び断面方向軸力 N_y) の正負の絶対最大値による包絡線分布を図-5に示す。図には解析値を実線で、実験値を●印 (正) 及び○印 (負) で示した。なお、曲げモーメントに関しては、図の内側、外側が引張になる場合をそれぞれ正、負としている。軸力に関しては、図の内側を引張力 (正), 外側を圧縮力 (負) として整理している。

頂版部では、 M_y の分布は解析値、実験値とも P3 載荷時に載荷点部で正の最大値を示している。その値は解析値で 46.7 tfm/m , 実験値で 29.9 tfm/m である。また、 M_y は両端部に向かって減少し、柱部及び側壁部の接合部で負の最大値を示している。柱部及び側壁部では正負の曲げモーメントとも上部で大きく、下部で減少している。P3 以外の載荷位置では、P3 載荷時と比較していずれの場合も小さい値を示している。解析値は、頂版の載荷点部を除き実験値と良く対応しているものと判断される。

これに対して、 M_x は M_y に比べ全体的に小さな値を

示しており、特に P3 載荷時の実験値は M_y の 1/2 以下となっている。全体的に解析値が実験値より大きな値を示し、P3 載荷時には解析値が最大値として 37.1 tfm/m を示しているのに対し、実験値は 15.6 tfm/m となっている。

次に N_y の分布は、載荷点近傍の柱部あるいは側壁部で大きな値を示しており、P1 載荷時では柱部で大きく、P5 載荷時では側壁部で大きくなる分布を示している。これらの部分では、解析値と実験値は比較的良く一致している。頂版部に関しては、圧縮側の解析値は実験結果と比較的良く一致している。一方、引張側の解析値は小さな値を示しているが、実験結果は載荷点近傍で大きな値を示し、両者は異なっている。これは、軸力が測定歪値を応力に換算し、断面内応力を総和することによって算定されることより、歪の測定誤差が軸力値に直接影響しているものと推定される。

(2) 端部断面 (P13 ~ P17) 載荷時

端部断面 (P13 ~ P17) 載荷時の断面力包絡線分布を図-6 に示す。ただし、端部断面載荷時には断面方向の補強筋歪のみを測定していることより、断面力は M_y 及び N_y のみである。また、本断面には柱部が存在しないため、近接する柱①の結果を用いて考察する。

図に示すように、頂版部の M_y に関する解析値はいずれの載荷位置に対しても載荷点近傍で正の最大値を示しており、さらに側壁部に向かって減少し接合部で負の最大値を示す。正の最大値は P15 載荷時で 79.3 tfm/m となっている。実験値と比較すれば、P13 載荷時には良く一致しているが、それ以外の載荷位置では、載荷点近傍で実験値が小さな値を示している。また、全体としても実験値は解析値に比較して小さめの傾向にある。側壁部では、いずれの載荷位置でも上部で負の最大値を示し、下部に向かって絶対値が減少する分布を示している。側壁部でも、P13 以外の載荷位置では実験値は解析値より小さい。柱①の M_y は、解析値、実験値とも上部で大きく下部に向かって減少しており、両者は比較的良く一致している。

N_y の解析値は、いずれの載荷位置でも、頂版部では側壁側で大きく、柱側では減少する傾向を示している。一方、側壁部の分布形状は、上部でやや大きな分布を示すものの、ほぼ一様な分布形状を示している。しかしながら、大きさは載荷位置によって異なり、側壁部に近い P17 載荷時で最大圧縮力が発生している。その値は解析値で 65.8 tf/m、実験値で 45.5 tf/m である。実験値との比較では、中央断面載荷時と同様頂版部の載荷点近傍における引張側軸力は大きく異なり、側壁部でも実験値はやや小さい傾向にある。一方、柱①に関しても、解析値と実験値の分布傾向は一致しているものの、解析値は実験値に比べて全体的に 2 倍程度大きい値を示している。

(3) 載荷断面の影響

中央断面及び端部断面載荷時における断面力包絡線の

分布形状を比較すると (図-5, 6 参照), 頂版部の M_y の最大値は、いずれの断面でも断面方向の中央部載荷時 (P3, P15) に発生する。その値は解析値では P3 載荷時に 46.7 tfm/m, P15 載荷時に 79.3 tfm/m を示しており、P15 載荷時の値は P3 載荷時の約 1.7 倍となっている。この傾向は先に行った開口部を有する箱型 RC 覆道の解析結果と同様の傾向を示している。一方、実験値の最大値は P3 載荷時では 29.9 tfm/m, P15 載荷時には 31.7 tfm/m となっており、両載荷点とも大きな相違はない。従って、解析値は実験値とかなり異なる傾向にある。解析値は安全側のデータを与えるものの、実設計を前提にして考える場合にはその原因を明らかにする必要があり、ブロック端部の拘束条件を考慮したより詳細な検討が必要である。また、頂版部と側壁部の接合部の曲げモーメントに着目すれば、解析値では P3 載荷時に -25.0 tfm/m, P15 載荷時に -62.7 tfm/m となっており、ここでも端部断面載荷時には、中央断面載荷時の 2 倍以上となっている。一方、実験値は頂版側と側壁側では値が異なるが、大きい値を用いて比較すると、P3 載荷時に -22.5 tfm/m, P15 載荷時に -42.9 tfm/m となっている。実験値は解析値より小さいものの、端部断面載荷時が中央断面載荷時の 2 倍になる傾向は解析値と同様である。

側壁部の N_y は、解析値及び実験値とも最大圧縮力を示すのは P5 及び P17 載荷時である。すなわち、解析値は P5 載荷時に 45.5 tf/m, P17 載荷時に 65.8 tf/m であり、P17 載荷時の値は P5 載荷時の約 1.4 倍である。実験値はそれぞれ 33.2 tf/m 及び 45.5 tf/m となっており、いずれも解析値より小さいものの、P17 は P5 の約 1.4 倍であり、その傾向は解析値と一致している。

以上、断面力に関する載荷断面の影響を検討したが、頂版の中央部載荷時 (P3, P15) に M_y の実験値がほぼ等しくなることを除いて、各断面力は端部断面載荷の方が中央断面載荷の場合よりも大きく、その傾向は解析と実験とで一致している。

(4) 柱部側 (P1, P6, P13) 載荷の影響

柱式 RC 覆道では、柱部の断面力は、柱部側への載荷時に構造形式の影響が現れるものと考えられる。ここではこの点を考慮して、柱部側の P1, P6, P13 載荷時の柱部周辺の軸方向曲げモーメント (M_x) 及び軸力 (柱部は N_y , 頂版は N_x) の応答特性を考察する。

図-7 に各載荷位置に対する柱部周辺断面の曲げモーメント及び軸力の包絡線分布を示す。図には解析値を実線で、実験値を●印 (正) 及び○印 (負) で示している。

曲げモーメントに関する解析値は、P1 載荷時には覆道に対して対称載荷となることから、中央の柱②には曲げモーメントが発生せず、端部の柱①に比較的大きな負の曲げモーメントが発生している。その最大値は上部で 24.3 tfm である。P6 載荷時では、柱①、②の中間部への載荷となることから、両柱部に対称的な曲げモーメン

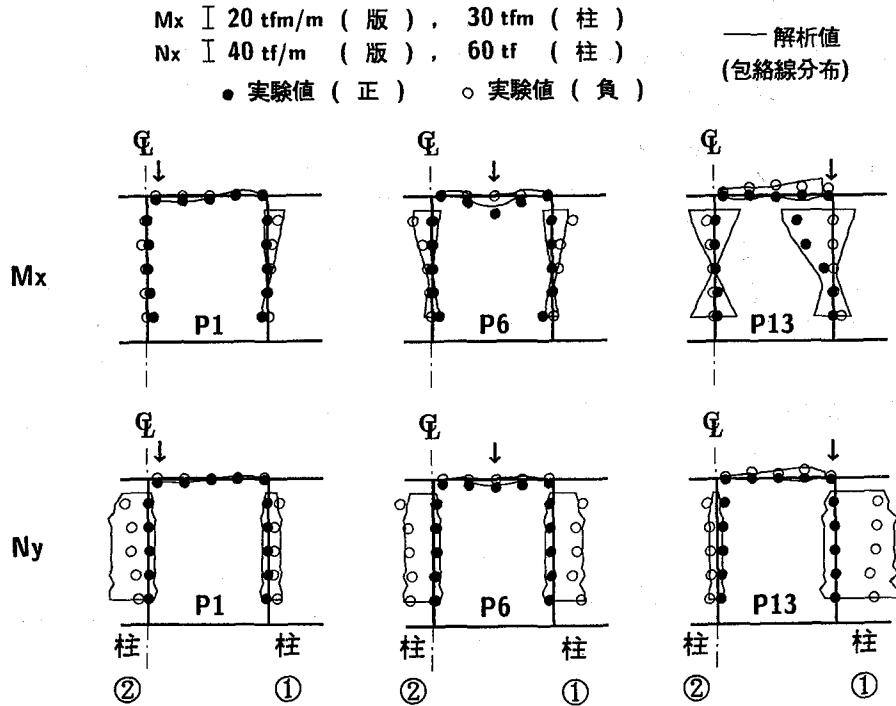


図-7 柱部側 (P1, P6, P13) 載荷時の断面力包絡線分布 (敷砂)

トが生じている。また頂版部にも載荷点部に多少大きめの曲げモーメントが生じている。P13 載荷時には、柱①に大きな曲げモーメントが作用しており、その最大値は正側の曲げモーメントで 66.2 tfm である。これより、柱①に対しては P13 載荷時の影響が最も大きいことが分かる。実験値は多少の変動があるもののほぼ解析値と同様の傾向を示しており、実験値と解析値は比較的良く対応している。

軸力に関しては、当然のことながら解析値、実験値とも柱部に集中しており、頂版部ではごく小さな値となっている。各載荷点に対する軸圧縮力は P1 載荷時には柱②、P6 載荷時には柱①、②、P13 載荷時には柱①で大きい。特に P13 載荷時の柱①の軸圧縮力は最も大きく、柱式 RC 覆道の特性が良く示されている。P13 載荷時の柱の軸圧縮力の最大値は解析値で 162.0 tf であり、実験値で 122.1 tf である。

以上、緩衝材として敷砂を用いる場合の結果から、解析値と実験値は個々の値には変動がみられるものの、全体的な傾向は比較的一致していると考えられる。なお、全ての場合に共通することであるが、解析値及び実験値の軸力は応力度に換算して、最大でも 7 kgf/cm^2 程度であり、曲げ応力度と比較してかなり小さな値となっている。

4.2 三層緩衝構造を用いる場合

三層緩衝構造 (TLAS) を用いた場合の実験は、芯材 RC 版製作の制約上載荷点が P3, P12, P18 の 3 点のみの場合である。ここではこの 3 点に載荷した場合について考察するが、各断面力の包絡線分布はまとめて図-8

に示している。図には敷砂を緩衝材とした場合と同様、解析値を実線で、実験値を●印 (正) 及び○印 (負) で示している。

(1) 中央断面中央部 (P3) 載荷時

中央断面中央部 (P3) 載荷時の断面力 (断面方向曲げモーメント M_y 、軸方向曲げモーメント M_x 及び断面方向軸力 N_y) の正負の最大値による包絡線分布を図-8 上段に示す。

M_y の分布形状は、解析値と実験値で載荷点部を除いてほぼ一致している。載荷点部の最大値は解析値で 30.2 tfm/m、実験値で 39.3 tfm/m となっており、実験値が解析値より約 30% 大きい。柱部及び側壁部では、上部で絶対値が大きく下部に向かって急激に減少している。上部における解析値はそれぞれ -49.6 tfm、-19.4 tfm/m であり、実験値はそれぞれ -69.3 tfm、-21.0 tfm/m である。

M_x の分布形状は、解析値と実験値で比較的良く一致しているが、最大値は解析値で 18.7 tfm/m、実験値で 11.6 tfm/m となり、解析値の方が約 50% 大きい。しかしながら、解析値、実験値ともに M_x は M_y に比較して小さく約 $1/2 \sim 1/3$ 程度の値となっている。

N_y の分布形状に関して、実験値の分布形状は載荷点部に最大 82.1 tf/m の軸引張力を示し、両端に向かって急激に減少している。柱部では上部で 95.6 tf と大きい。下部では 45.0 tf とほぼ一様な軸圧縮力が発生している。また、側壁部では上部で 40.5 tf/m と大きく、下部に向かって減少する軸圧縮力分布を示している。解析値は頂版部や、柱部、側壁部ともほぼ一様な分布を示し

M_y, M_x \bar{I} 20 tfm/m (版, 壁部), 50 tfm (柱)
 N_y \bar{I} 20 tf/m (版, 壁部), 50 tf (柱)
 ● 実験値 (正) ○ 実験値 (負)

— 解析値
 (包絡線分布)

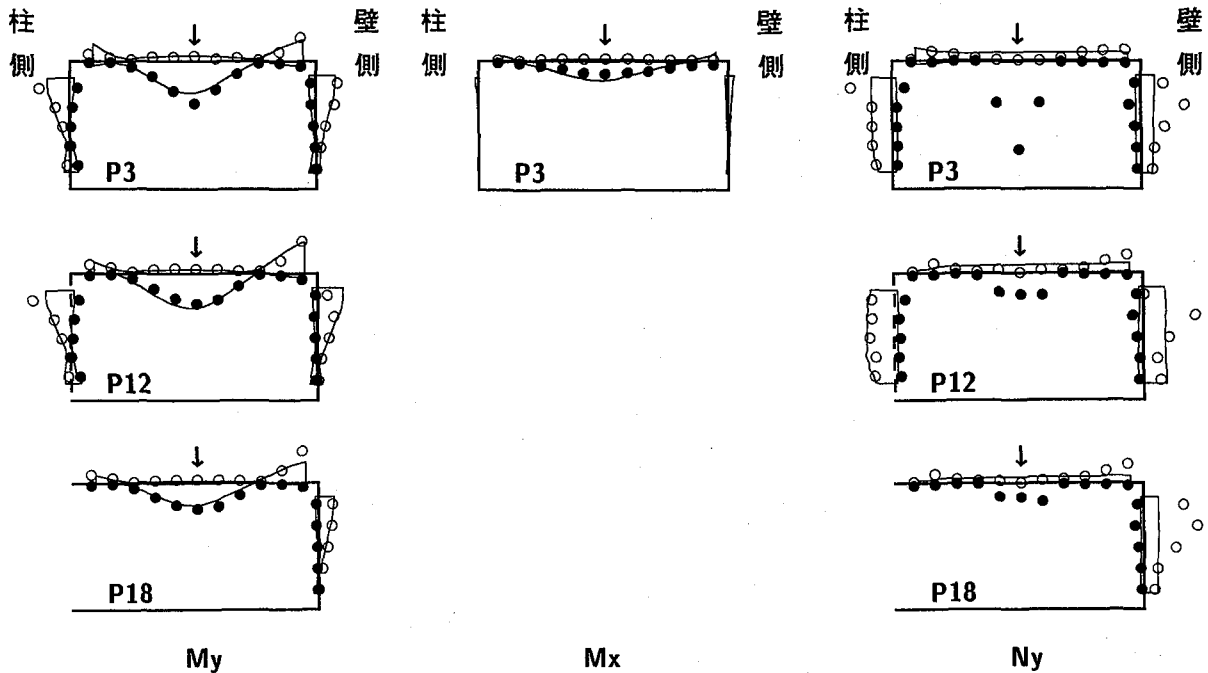


図-8 中央部 (P3, P12, P18) 載荷時の断面力包絡線分布 (TLAS)

ており、実験値のような集中はみられない。しかしながら、前述の敷砂の結果と同様に軸力による応力度は最大でも 8 kgf/cm^2 以下であり、設計上はさほど重要にはならないものと考えられる。

(2) 端部柱断面中央部 (P12) 載荷時

衝撃荷重を柱①を含む断面の中央部 (P12) に載荷した場合の端部断面の断面力及び柱①の断面力の最大包絡線分布を図-8中段に示す。この位置における測定歪は、断面方向のみであり、従って、断面方向曲げモーメント M_y 及び断面方向軸力 N_y に対してのみ検討する。

図から明らかなように、 M_y の分布は柱上部及び側壁上部を除き、解析値と実験値で良く一致している。 M_y は載荷点部、柱上部及び頂版部と側壁部の接合部で大きな値を示し、実験値でそれぞれ 28.3 tfm/m , -88.3 tfm , -30.0 tfm/m であり、解析値ではそれぞれ 33.0 tfm/m , -57.5 tfm , -29.1 tfm/m である。

断面方向軸力 N_y の分布を見れば、頂版の載荷点部及び側壁部の上部で解析値と実験値は異なるが、その他の部分は比較的良く一致している。解析値の分布形状はいずれの断面もほぼ様な分布を示し、最大値が頂版部では 11.6 tf/m 、側壁部で 20.2 tf/m 、柱部で 65.3 tf の軸圧縮力となっている。実験値に関しては、頂版部の載荷点部で 21.0 tf/m と大きな軸引張力が発生し、両端部へ向かって減少している。柱部及び側壁部の上部では、それぞれ 52.7 tf , 48.8 tf/m の大きな軸圧縮力が発生して

おり、中央断面中央部載荷 (P3) と同様の分布形状を示している。

(3) 最端部断面中央部 (P18) 載荷時

図-8下段に示した包絡線分布は、衝撃力をブロック最端部断面の中央部 (P18) に載荷した場合の端部断面における断面力の最大包絡線分布である。

M_y の分布は、頂版部、側壁部ともに解析値と実験値はかなり良く一致している。分布形状は P12 載荷時と同様であるが、その大きさは P12 載荷時に比較して約 20% 程度小さい。

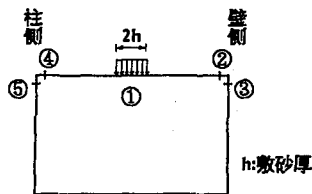
N_y の分布において、実験値は P12 載荷時と同様、頂版載荷点部及び側壁上部で大きく変化している。しかしながら、数値的には実験値、解析値とも P12 載荷時より小さい。

以上より、TLAS を用いた場合、端部載荷時の曲げモーメント及び軸力値は緩衝材として敷砂を用いる場合と異なり、中央断面載荷時と同程度であることがわかる。これは、TLAS を用いることにより落石によって作用する衝撃荷重が集中化せず、効率よく分散しているためと考えられる。特に P18 載荷は芯材 RC 版の中心が隣接する覆道ブロックとの接合部と一致している場合である。このように、ブロック間の接合部に芯材を設置することにより、端部に発生する断面力は、中央部載荷時と同程度に低減することが可能であり、設計的に有利になることがわかる。また、TLAS を用いた場合の重錘落下エネ

表-3 設計値と解析値及び実験値の比較
(断面方向中央部載荷時)

着目点		①	②	③	④	⑤
My (①~④: tfm/m, ⑤: tfm)						
設計値	条件 A	151.4	-78.5	-90.0	-78.0	-293.8
	条件 B	212.9	-110.4	-126.6	-109.6	-413.0
解析値	中央断面	46.7	-25.0	-24.9	-19.0	-59.1
	端部断面	83.0	-65.9	-53.5	-20.3	
実験値	中央断面	29.9	-22.5	-19.6	-5.1	-63.4
	端部断面	31.7	-42.9	-30.0	-10.5	
Ny (①~④: tf/m, ⑤: tf)						
設計値	条件 A	-17.6	-17.6	-46.3	-17.6	-177.1
	条件 B	-24.8	-24.8	-65.1	-24.8	-249.0
解析値	中央断面	-14.4	-8.9	-16.4	-14.1	-50.3
	端部断面	-21.9	-16.0	-50.6	-2.9	
実験値	中央断面	(58.1)	-11.4	-18.8	-2.2	-92.4
	端部断面	(24.3)	-29.5	-32.2	-3.3	
Qy (①~④: tf/m, ⑤: tf)						
設計値	条件 A	1.0	46.3	-17.8	-44.3	70.4
	条件 B	1.4	65.1	-24.8	-62.3	99.0
解析値	中央断面	8.0	13.6	-11.0	-26.0	11.6
	端部断面	7.6	36.8	-34.9	-17.4	

条件 A: 振動便覧式により P=128tf とした場合
条件 B: 実験結果に基づき P=180tf とした場合



ルギーは、敷砂を用いた場合の約2倍以上であるにもかかわらず、各断面力の実験値は、両者ほぼ同等であることから、TLAS は、敷砂に比較して2倍程度の緩衝能力を有することが明らかである。

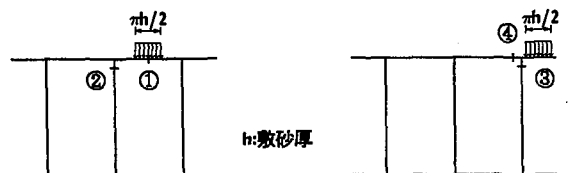
5. 現行設計要領を用いた場合の設計と実験値及び解析値の比較

ここでは、緩衝構造として敷砂を用いた場合に対して軸方向中央及び端部断面載荷時、柱側断面載荷時に対して、現行設計要領による設計値と実験値及び解析値との比較を行い、現行設計要領の妥当性を検討する。現行の設計要領としては、北海道開発局が提案している方法⁹⁾を用いることとした。本要領では、頂版部、側壁部、底版部、柱部の断面方向の断面力算定に関しては、柱間隔を単位幅とする剛接箱型構造として、また、柱部の軸方向断面力に関しては、柱部のハンチ部を考慮し、かつ頂版及び底版の有効幅を定めて、頂版の一部・柱・底版の

表-4 設計値と解析値及び実験値の比較
(柱側断面載荷時)

着目点		①	②	③	④
Mx (①, ④: tfm/m, ②, ③: tfm)					
設計値	条件 A	25.6	-13.3	29.4	-22.9
	条件 B	35.8	-19.0	42.0	-32.0
解析値		9.9	-24.3	72.8	-11.7
実験値		16.9	-25.7	51.8	-7.7
Nx (①, ④: tf/m) Ny (②, ③: tf)					
設計値	条件 A	1.7	-53.9	-102.8	2.5
	条件 B	2.3	-77.0	-144.0	3.5
解析値		13.1	-61.7	-139.9	18.4
実験値		15.7	-89.6	-122.1	15.8
Qx (①, ④: tf/m) Qy (②, ③: tf)					
設計値	条件 A	0.3	2.8	6.3	5.2
	条件 B	0.4	4.0	9.0	7.3
解析値		4.4	4.9	13.9	19.4

条件 A: 振動便覧式により P=128tf とした場合
条件 B: 実験結果に基づき P=180tf とした場合



一部で構成される表-4 付図のような剛接骨組構造として解析することとしている。入力荷重は、頂版・側壁及び底版・柱の断面方向の断面力算定に関する荷重強度は、それぞれ $q = P/\pi h^2$ (P : 衝撃力, h : 敷砂厚), $q = P/2hl$ (l : 柱間隔) とし、断面方向に $2h$ の幅で柱間隔に等分布するものとしている。柱部の軸方向断面力の計算に関しては衝撃力 P を道路方向に $\pi h/2$ の長さ distributes させるものとしている。衝撃力 P を振動便覧式による 128 tf とした場合を条件 A、著者らの実験により得られた伝達衝撃力の平均値 180 tf とした場合を条件 B とした。

以上の手法により得られた設計値を実験値、解析値と比較して表-3, 4に示す。また、実験値は求められていないが参考としてせん断力 Q_x , Q_y の設計値と解析値も示している。なお、着目した点及び載荷状況をそれぞれの表の付図として示している。

表-3には、断面方向中央部載荷時の各断面力を比較して示している。My について設計値と実験値及び解析値を比較すると、全ての着目点において設計値が実験値及び解析値よりも大きな値を示しており、頂版中央部の着目点①では、条件 A, B ともに実験値に対して数倍の安全余裕度を有している。Ny については、実験結果の発生軸力が小さく、設計上問題にならないものと判断さ

れるが、着目点②では条件 A, B ともに設計値が端部断面載荷時の実験値より小さくなっている。

表一 4 は、柱側断面載荷時の断面力を比較して示している。表から、着目点①と④の M_x については設計値の方が解析値及び実験値より大きく示されている。一方、柱部について見ると、着目点②、③に対してはいずれの断面力も設計値より解析値あるいは実験値の方がやや大きい。即ち、柱部の断面力評価に関しては柱側断面載荷時に注意が必要である。特に端部の柱に関しては端部載荷時の挙動に十分な配慮が必要なが分かる。

以上、断面方向と軸方向の代表的な断面について設計値と解析値及び実験値との比較を試みたが、現行設計要領は、断面方向載荷時の断面力に関しては落石荷重が軸方向に連続して載荷するものと仮定して算定しているため、安全側の設計となっている。一方、柱側断面載荷時に関しては、柱の軸方向断面に関する設計において危険側になること等が明らかとなった。これより、柱式 RC 覆道に関しても、より合理的な設計を行うためには、3次元弾性衝撃応答特性を考慮した設計法の確立が必要であるものと考えられる。

6. まとめ

RC 覆道の一つである柱式覆道の衝撃応答特性を検討する目的で、実覆道の1ブロックを対象として3次元弾性衝撃応答解析を行い、実証実験結果との比較によりその有用性を検討した。また、北海道開発局が作成した設計要領に基づいた設計値と本解析値及び実験値との比較検討も行い、3次元弾性衝撃応答特性を考慮した実務設計法の必要性についても検討した。具体的には実証実験と同様に、柱式 RC 覆道の衝撃応答特性に及ぼす緩衝構造の効果及び載荷位置の影響を検討することを目的として、緩衝構造としては敷砂及び三層緩衝構造 (TLAS) を用いた場合の解析を行うとともに、それぞれに対して載荷位置を変化させた解析を行った。

本論文で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

(1) 敷砂を用いる場合：

- 1) 各部の曲げモーメントは断面中央部載荷時に最大となる。解析では覆道軸方向中央断面載荷時に比べて端部載荷時の場合が約 1.7 倍大きいですが、実験値は僅かに (5% 程度) 大きいのみであった。
- 2) 軸力は柱部及び側壁部については当然のことながらそれぞれの近傍部に載荷された場合に大きな値となっている。しかしながら、応力度としてはいずれの値も 10 kgf/cm^2 以下で大きくはない。
- 3) 特に端部の柱に関しては、柱側端部断面載荷時に大きな断面力が発生することより、注意が必要である。

(2) 三層緩衝構造 (TLAS) を用いる場合：

- 4) 断面中央部載荷時の各断面力の分布特性は敷砂を用

いた場合と変わらないが、TLAS は落石エネルギー的には、敷砂に比較して約 2 倍の緩衝効果がある。

- 5) 端部断面載荷時においても中央断面載荷時に比べ、断面力の増加がみられず、TLAS の荷重分散性により、載荷荷重の減少効果が期待される。
- (3) 敷砂を用いた場合の現行設計との比較：
 - 6) 現行設計基準は断面方向載荷時にはかなり安全側の評価となる。一方、柱部側載荷時にはやや危険側の評価となることから、衝撃応答特性を考慮した設計法の提示が必要である。
 - (4) 解析値と実験値の比較：
 - 7) 以上における解析値と実験値の比較から、LS-DYN-A3D を用いて解析した結果は、頂版部の軸力分布に関して実験値と若干異なるものの、全体としてはほぼ妥当な評価を与えることが示された。

本論文のとりまとめに当たっては、室蘭工業大学大学院の上坊寺実、池田泰博両君をはじめ多数の院生、学生の協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一: 三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 1347 ~ 1356, 1996.3.
- 2) 鋼材倶楽部: 新しい落石覆いの開発に関する研究, 鋼材倶楽部研究報告, 1973.4.
- 3) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 松浦幹佳: RC 門型落石覆工の衝撃破壊解析, 第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp. 224 ~ 229, 1993.6.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 佐藤昌志, 岸 徳光, 今野久志: 柱式 RC 製落石覆工の衝撃応答特性に関する実証実験, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1527 ~ 1536, 1997.3.
- 7) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp. 16 ~ 17, 1983.
- 8) 岸 徳光, 佐藤昌志, 今野久志, 上坊寺実: 重錘落下衝撃を受ける柱式実 RC 覆道の挙動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 53 号 (A), pp. 8 ~ 13, 1997.2.
- 9) 北海道開発局建設部道路建設課: 道路防災工調査設計要領 (案) (落石覆道編), pp. 61 ~ 63, 1990.3.

(1997年9月26日受付)