

柱式 RC 製落石覆工の衝撃応答特性に関する実証実験

DEMONSTRATING IMPACT TEST OF COLUMN-TYPE RC ROCK-SHED

佐藤昌志* 岸 徳光** 今野久志***

Masashi SATO, Norimitsu KISHI and Hisashi KONNO

* 北海道開発局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27-1)

*** 工修 北海道開発局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 this paper, to confirm the dynamic behavior of column-type RC rock-shed under rock falling, demonstrating impact test was conducted by using Tateiwa rock-shed which is located in Matsumae area of Hokkaido, Japan. The rock-shed was designed under the condition that the impact generated with rock falling is absorbed by a 90 cm thick sand cushion. To consider the influence of columns on dynamic behavior of rock-shed, a 3 tf steel weight was freely dropped at 17 points on sand cushion set on the roof from 10 m height and 141 chs of dynamic rebar strain waves were recorded by using wide-band data recorders. Converting rebar strains into sectional forces, distributions of biaxial bending moments and axial forces were discussed comparing with those of box-type RC rock-shed. From this experiment, it was shown that: 1) the maximum bending moment diagrams for Rahmen action of both types of RC rock-sheds are almost the same to each other, and 2) all axial forces measured are small comparing with bending moments.

Key Words: field impact test, impact behavior, column type RC rock-shed

1. はじめに

落石覆工は、山岳部や海岸線の急峻な地形にある道路等を落石災害から防護するための重要な施設であり、その安全性に関する研究が精力的に行われている。落石覆工の安全性の確保のためには、緩衝性に優れた緩衝構造の開発を行うとともに、落石覆工構造物の衝撃特性を明らかにし、これを考慮した設計を行うことが重要である。

緩衝構造に関する研究では、敷砂緩衝材に対する鋼材倶楽部¹⁾、建設省土木研究所²⁾、金沢大学³⁾、北海道開発局開発土木研究所及び室蘭工業大学⁴⁾等の研究により、その特性がかなり明らかにされている。また開発土木研究所と室蘭工業大学は、新しい緩衝構造の開発を行い、実証実験等によりその実用性を確認するとともに、実用化に向けた検討を続けている^{5)~7)}。

一方、落石覆工本体の衝撃特性に関しても、RC 製覆工に対する岸らの研究⁸⁾や園田らの研究⁹⁾、鋼製覆工に対する鴨野らの研究¹⁰⁾、PC 製覆工に対する松葉らの研究¹¹⁾、園田らの研究¹²⁾、佐藤らの研究^{13)~15)}により弾性及び一部弾塑性領域における衝撃挙動が明らかにされている。しかしながら、RC/PC 製覆工の場合には、施工における自由度が大きいことより、種々の構造形式あるいは断面形状が考えられる。また、落石覆工は構造形式によってその動的応答性状が異なることより、合理的な設計手法を確立するためには、各構造形式に対する衝撃応答特性を明らかにしなければならない。

著者等は、これまで側壁に開口部を有する箱型 RC 製

覆工⁹⁾や柱式 PC 製覆工の重錘落下による実証実験¹⁵⁾を行い、その衝撃特性を明らかにしてきた。

本研究は、RC 製覆工のもう一つの構造形式である柱式 RC 製覆工の敷砂緩衝材を用いた重錘落下による実証実験を行い、弾性範囲における衝撃特性を検討するものである。

著者等が先に行った衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA 3D を用いた箱型 RC 製覆工の解析によれば、覆工の断面力は衝撃荷重作用位置によって大きく変化することが示されている¹⁶⁾。特に、柱式 RC 製覆工は柱側の構造が不連続であるため、この部分への衝撃荷重載荷によって大きな断面力が発生することが想定される。これより、本実証実験では衝撃荷重作用位置を広範囲に移動させ、各載荷位置に対する頂版や底版上下端あるいは側壁や柱内外端の主鉄筋や配力鉄筋歪を測定することによって曲げモーメント及び軸力を評価し、それらの分布特性について検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 立岩覆道

本実験の対象となった覆道は、北海道松前郡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。立岩覆道は柱式の RC 製覆工であり、路面幅員約 10 m、覆工内高さ約 5 m、1 ブロックの覆工軸方向長さ 12 m で、合計 25 ブロック、全長 300 m の覆道である。1 ブロックの概略形状は、図-1 に示すように、全幅

表-1 設計条件

コンクリート	設計強度	$\sigma_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$
	許容応力度	$\sigma_{ca} = 70 \text{ kgf/cm}^2$
使用鉄筋	鉄筋種別	SD30A
	許容応力度	$\sigma_{sa} = 1800 \text{ kgf/cm}^2$
落石荷重	重量 1.36 tf 落下高 22 m 衝撃力 121.5 tf	
土圧	クーロン土圧 $\phi=35^\circ$ $\delta=$ (常時) 20° , (地震) 0°	
	常時	520 kgf/m^2
雪荷重	雪崩時	鉛直 1.50 tf/m^2 , 水平 0.45 tf/m^2
設計震度	水平 0.17, 鉛直 0.0	

12.35 m, 全高 7.99 m, 長さ 12 m であり, 頂版厚約 1.1 m, 底版厚 (一部で変化している) 1 ~ 1.5 m, 側壁厚 1 m となっている。また, 柱側は断面 $1.6 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$, 高さ 4.42 m の柱がブロック中心から中心間隔 4 m で, 3 本の柱で支える構造となっている。さらに, 覆工頂版上には緩衝材として厚さ 90 cm の砂が敷かれている。

本覆道の設計条件は表-1 に示されているとおりである¹⁷⁾。落石荷重は, 一般に覆道の施工現場周辺の崩落の可能性のある石の大きさ, 落下高さを調査することによって決定される。本覆道で想定された落石は, 重量が 1.36 tf, 落下高さが 22.0 m の規模である。落石によって発生する衝撃荷重は, 落石対策便覧に基づき敷砂のラ-メの定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ として振動便覧式により算定される 121.5 tf となっている。最終的に決定された配筋は, 頂版断面方向の上下端筋がそれぞれ D22, D25 でピッチがいずれも 12.5 cm, 上下端の配力筋がそれぞれ D16, D19, ピッチが 25 cm となっている。また, 柱部の配筋は D32 が合計 40 本, 側壁部の内外端筋はそれぞれ D19, D32 でピッチがいずれも 25 cm, 底版の上下端筋はそれぞれ D25, D32 でピッチが同じく 25 cm となっている。主要断面の配筋図を図-2 に示す。

2.2 実験条件および測定項目

実験は立岩覆道の 1 ブロックを用いて行った。作用衝撃力は, 本覆道が供用中であることより, 設計衝撃力の範囲としなければならない。本実験では弾性範囲内の衝撃応答特性を検討することとし, 作用衝撃力は, 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って与えることとした。なお, 用いた重錘の形状は, 直径 1 m, 高さ約 1 m で, 底部 17 cm が球底 (半径 80 cm) である。

本実験では, 落石覆工の衝撃応答に及ぼす衝撃荷重用位置の影響を検討するために, 図-3 に示すような合計 17 箇所の荷重載荷点を設定した。各載荷位置は, 図に示されているように P1 ~ P17 と記号化し, 以下の説明に用いている。実験ケースの一覧を表-2 に示す。

測定は重錘衝撃力測定用歪ゲージ型加速度計 3 ch (200 G が 2 ch, 500 G が 1 ch), 及び覆工内断面力算定

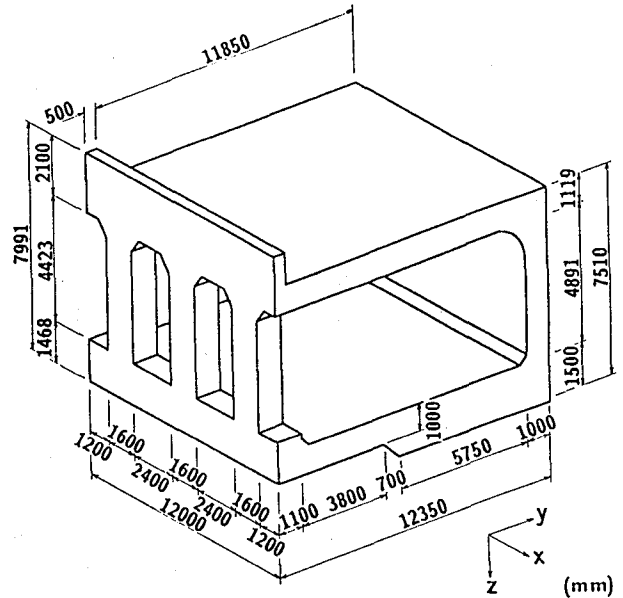
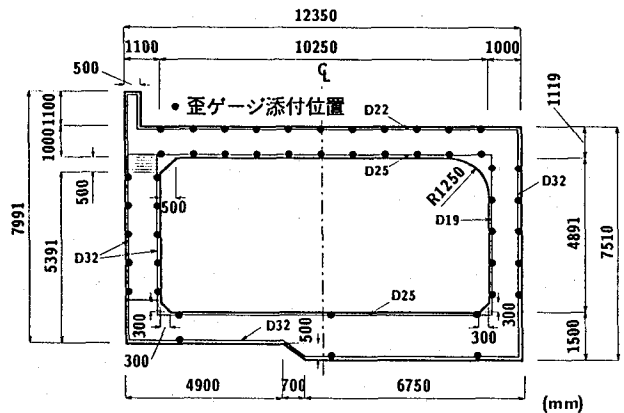
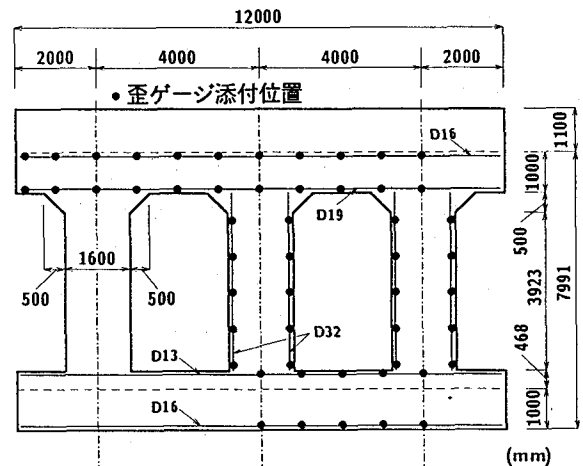


図-1 立岩覆道1ブロックの概略形状



(a) 断面方向配筋及びゲージ位置



(b) 軸方向配筋及びゲージ位置

図-2 立岩覆道の配筋図及びゲージ添付位置図

表-2 実験ケース一覧

実験 ケース	荷重作 用位置	重錘衝撃 力 (tf)	実験 ケース	荷重作 用位置	重錘衝撃 力 (tf)	実験 ケース	荷重作 用位置	重錘衝撃 力 (tf)
S90-1	P1	73.25	S90-7	P7	104.58	S90-13	P13	116.19
S90-2	P2	106.23	S90-8	P8	121.47	S90-14	P14	131.81
S90-3	P3	109.89	S90-9	P9	154.17	S90-15	P15	111.11
S90-4	P4	132.05	S90-10	P10	95.34	S90-16	P16	127.82
S90-5	P5	96.24	S90-11	P11	91.39	S90-17	P17	110.56
S90-6	P6	118.79	S90-12	P12	141.06	平均		114.23

用の歪ゲージ 206 ch について行った。加速度計は重錘底部に埋設している。歪ゲージは各断面の頂版や底版上下端あるいは側壁や柱内外端の主鉄筋や配力鉄筋に添付している。図-2には歪ゲージの添付位置を・印で示している。また、図-3に示しているように、頂版の軸方向中央及び幅員方向（以後、これを断面方向と呼ぶ）中央の各断面部には、断面方向及び軸方向の断面力を評価するために直交する上下端の主筋と配力筋に歪ゲージを添付している。歪ゲージは、鉄筋に発生する軸歪成分のみを測定するために、全て鉄筋の腹部に添付している。なお、記録器の制約から全ての歪ゲージ出力波形を同時記録することが不可能であるため、各検討項目に対応して測定位置を選定し記録している。最大の同時測定点数は 144 ch である。なお、本覆道が供用中で変位計の設置が不可能であることより、変位波形の測定は行っていない。

2.3 重錘落下による衝撃力

重錘落下によって覆工に直接作用する衝撃力を測定するためには、覆工表面に衝撃力測定用ロードセルを埋設して測定しなければならない。しかしながら、本覆道は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、その設置は不可能であった。そのため、覆工への伝達衝撃力は、前述のように重錘底部に埋設した加速度計を用いて重錘衝撃力を算定し、著者等が剛基礎で行った過去の実験結果と対応を取ることで、評価することとした。表-2には、各実験ケースの重錘衝撃力の値を一覧にして示している。なお、実験は実覆工を用いて行っていることより、3日間（平成7年11月14日～16日）という限られた日程のもとで行われた。緩衝材として用いた敷砂は現場近くの海砂を用いている。その3日間の実験開始時における平均材料定数は、単位体積重量が $\omega = 1.70 \text{ tf/m}^3$ 、含水比 6.9%，相対密度 55.8% であった。しかしながら、実験ケース S90-1、S90-5 実験時には天候が急変し降雨があったため含水比が大きくなったものと推定される。表より、測定値は多少変動していることがわかる。特に、S90-1 における重錘衝撃力は、S90-9 の場合の 1/2 以下の値となっている。これは、S90-1 における値が、上述のように実験時の降雨によって敷砂の含水比が上昇したことによ

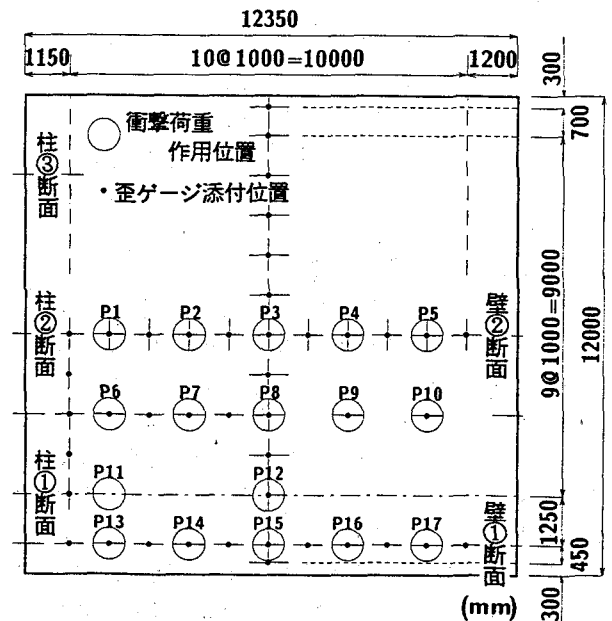


図-3 衝撃荷重載荷位置図

り低下したためと推定される。また、重錘衝撃力は、作用位置による明確な傾向が見られないことより、柱部、側壁部、端部等の構造条件による影響は少ないものと考えられる。その平均値は約 114 tf である。この値は、落石重量 3 tf、落下高さ 10 m、ラメの定数 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ として振動便覧式より算定される 128 tf よりやや小さな値となっている。また、過去の剛基礎における実験結果⁴⁾は、重錘衝撃力が 106 tf、伝達衝撃力が 237 tf である。本実験結果の重錘衝撃力がこれらの実験結果と同程度であることより、本実験において覆道本体に作用する伝達衝撃力はほぼ 230 ～ 240 tf 程度であるものと推察される。

3. 実験結果及び考察

本実験では、前述のように断面力評価のために上下端あるいは内外端筋歪を測定している。各断面力は、得られた歪波形から算定される応力度と、断面の平面保持を仮定し、表-3に示される算定式を用いて評価した。以下に、各検討項目に対応して実験結果を整理している。なお、各断面力は設計工学的な見地より、各点の時刻歴

表-3 各断面力の定義

断面力	記号	頂版, 底版	側壁部	柱
断面方向曲げモーメント	My	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x y dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x y dA_3$
軸方向曲げモーメント	Mx	$\int_{A_1} \sigma_x z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x y dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x z dA_3$
断面方向軸力	Ny	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_x dA_3$
軸方向軸力	Nx	$\int_{A_1} \sigma_x dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_x dA_2$	

A₁: 頂版又は底版の断面積 A₂: 側壁の断面積 A₃: 柱の断面積

の最大応答値を用いて整理している。したがって、各点の断面力値の発生時刻は必ずしも同一ではない。また、図の断面力値は、頂版、側壁及び底版では単位幅当たり(1m)の値であり、柱部は柱全断面に対する値である。したがって、柱部とそれ以外の部分では表示の単位が異なっている。

3.1 断面方向載荷位置の影響

図-4には、軸方向中央点の断面方向載荷時(P1～P5)における、同断面内における断面力の最大応答値に関する分布を示している。図-4(a)は各載荷位置における断面方向曲げモーメント My 及び軸方向曲げモーメント Mx の最大応答値に関する分布を示している。また、表-4には、設計上重要と考えられる各点の断面方向曲げモーメント値を一覧にして示している。なお、これらの応答値は全て衝撃荷重載荷時に発生したものであり、リバウンド状態における応答値は含まれていない。

断面方向曲げモーメント My の分布に関して、頂版部の曲げモーメントは中央点載荷時(P3)に載荷点及び側壁側端部で最大となり、その時の最大値はそれぞれ 29.9 tfm/m、-22.5 tfm/m となっている。また、柱部や側壁部に向って負の曲げモーメントが大きくなっており、ラーメン構造の静的な応答分布と類似の性状を示していることがわかる。しかしながら、頂版側壁側端部の曲げモーメントは中央部の 75 % 程度で静的解析結果(約 60 %)や箱型 RC 覆工の動的解析結果¹⁸⁾(約 50 %)より大きな値となっている。

P3 載荷時の断面方向曲げモーメント My に関しては、文献 8) に箱型 RC 製覆工(北海道広尾郡広尾町美幌覆道)の同じ重錘落下条件に対する実証実験結果が示されている。美幌覆道は海側側壁に開口部を有する箱型 RC 製覆工であるが、開口部側側壁以外の断面形状は、立岩覆道とほぼ同様である。図-5には、同一重錘重量、落下高さに対する両者の実験結果を比較して示している。図中、美幌覆道の柱側が開口部となっていることよりその断面力は示されていない。図より、頂版の曲げモーメントが両者類似の分布を示していることより、中央点載荷時の頂版の断面方向曲げモーメント分布に対する柱部の構造形式の影響は小さいものと判断される。

図-4(a)において、側壁及び柱部の断面方向曲げモーメント My も頂版部と同様、中央部載荷時(P3)に最大分布を示している。側壁部の曲げモーメントの最大値は上端部で -19.6 tfm/m で頂版中央部の 65 % 程度と静載荷時(60 %)より若干大きいものとなっている。これに対して、柱上端部の値は中央部載荷時(P3)に -63.4 tfm となり、中央部の値の 2.1 m 幅に相当する値となっている。これより、柱上端部の断面方向曲げモーメントに関する荷重分担率は、設計時の仮定よりも向上していることがわかる。また、中央近傍部載荷時(P2～P4)に比較的大きな応答値を示していることもわかる。

軸方向曲げモーメント Mx に関して、頂版部では断面方向曲げモーメント My 同様 P3 載荷時に最大となり、載荷点で 15.6 tfm/m となっている。その値は断面方向曲げモーメント値の約 1/2 であり、頂版部では断面方向曲げモーメント My が支配的であることがわかる。柱の軸方向曲げモーメント Mx 算定のための鉄筋歪は P1 載荷時のみ測定している。その場合に限定して断面方向曲げモーメント My と比較すると、柱上端部の軸方向曲げモーメント Mx は -2.5 tfm であることより、断面方向 My に比べて 1/10 以下と無視できるほど小さいことがわかる。

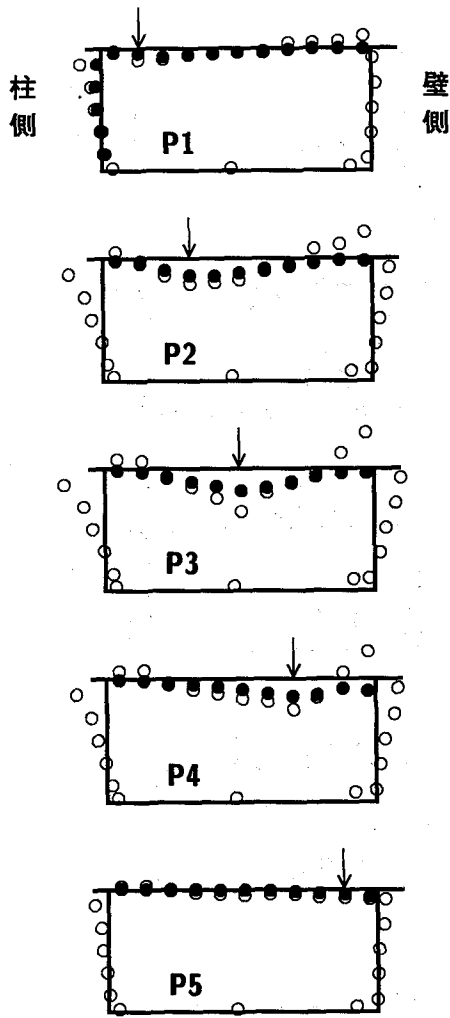
図-4(b)は各載荷位置における断面方向軸力 Ny 及び軸方向軸力 Nx の最大応答値の分布を示したものである。図は内側を引張力、外側を圧縮力として整理している。頂版部軸力は中央点載荷時(P3)の断面方向軸力 Ny の載荷点における値を除いて、両軸力成分とも類似の分布性状を示している。また、頂版の軸力は P3 載荷時の断面方向軸力 Ny に関する載荷点の値(58.2 tf/m)を除けば、最大値が 38.1 tf/m と大きくはない。柱の軸力はいずれの載荷位置に対しても上端部を除いて高さ方向にほぼ一様な分布を示している。上端部は載荷位置が柱部に近いほど大きな値となっている。最大軸力は -101.4 tf である。しかしながら、この値は応力に換算すると約 5.8 kgf/cm² とそれほど大きなものでないことがわかる。

図-6には、端部断面(覆工軸方向端部から 75 cm の位置)の断面方向載荷時(P13～P17)の端部断面における断面方向曲げモーメント My 及び断面方向軸力 Ny に関する最大応答値の分布を、図-4と同様に載荷位置毎に示している。ただし、この断面には柱が存在しないことより、参考のために柱①の応答値と P12 載荷時(柱①と同一断面)の柱①の応答値を、それぞれ△、▲印で示している。また、表-5には図-6(a)に示されている各載荷点の断面方向曲げモーメント My についての工学的に重要と考えられる各点の値を一覧にして示している。

(a) 図はそれぞれ断面方向曲げモーメント My の分布図である。図より、頂版の曲げモーメントはいずれの載

I 20 tfm/m (版、側壁), 50 tfm (柱)

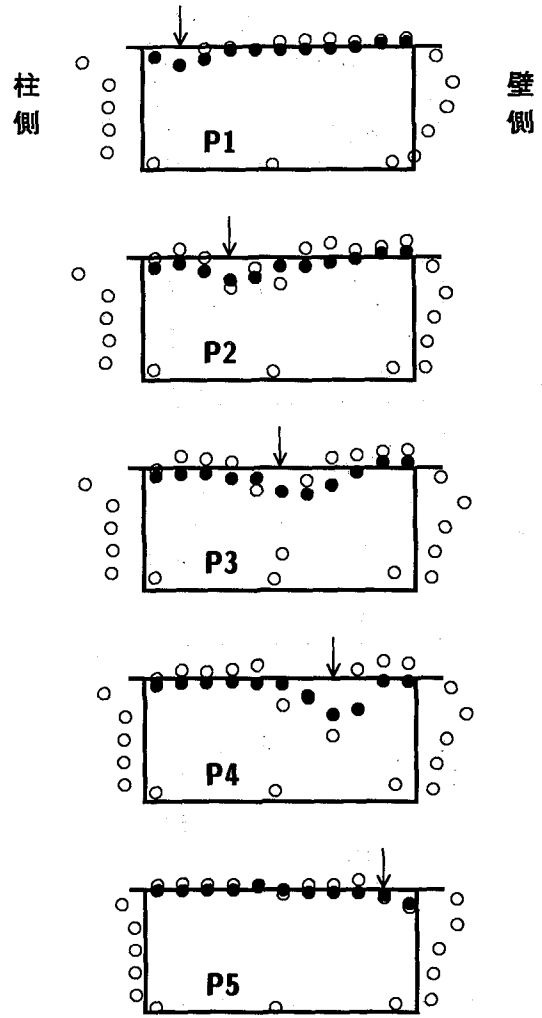
○: My ●: Mx



(a) Mx 及び My 分布

I 20 tf/m (版、側壁), 50 tf (柱)

○: Ny ●: Nx



(b) Nx 及び Ny 分布
(内側: 引張力, 外側: 圧縮力)

図-4 P1 ~ P5 載荷時の中央断面の断面力最大応答分布

表-4 P1 ~ P5 載荷時の中央断面における断面方向
曲げモーメント My 値の一覧

載荷点	柱② 上端部 (tfm)	頂版 最大値 (tfm/m)	頂版 側壁側端部 (tfm/m)	側壁 上端部 (tfm/m)
P1	-30.0	8.6	-7.1	-3.2
P2	-51.6	17.9	-16.4	-13.1
P3	-63.4	29.9	-22.5	-19.6
P4	-45.1	21.5	-16.7	-16.6
P5	-17.0	7.4	7.4	-7.2

I 20 tfm/m (版、側壁), 50 tfm (柱)

○: 柱式RC製覆工 ▲: 箱型RC製覆工

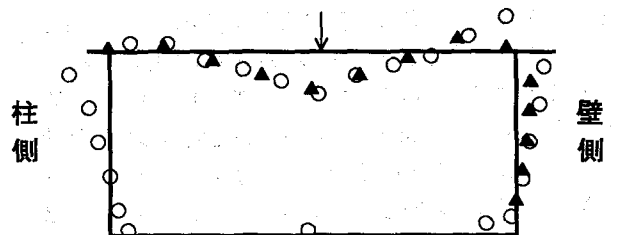
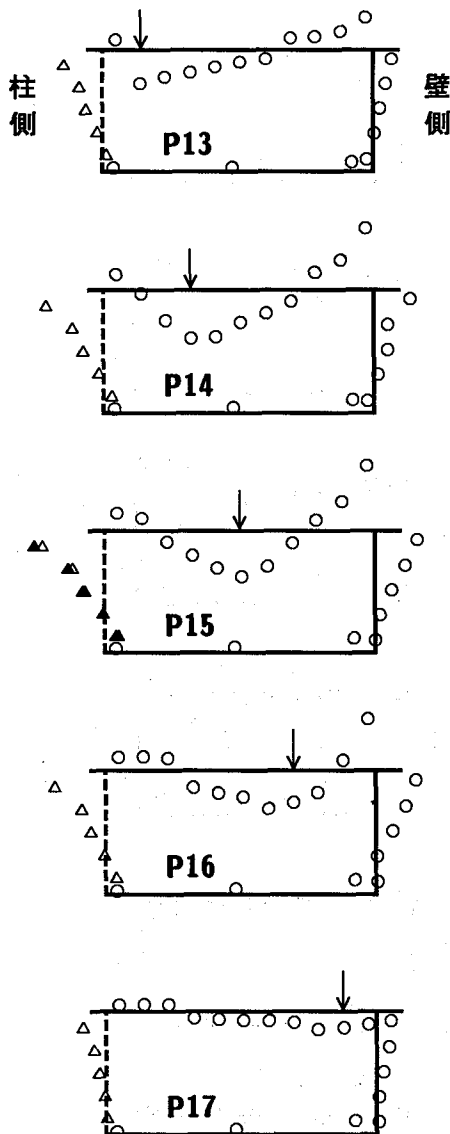


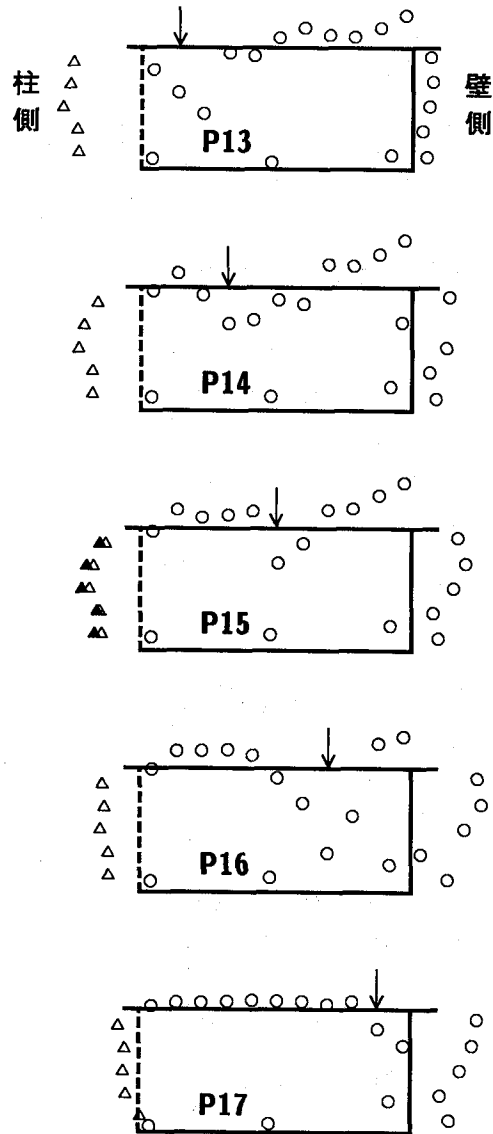
図-5 中央断面中央部載荷時の柱式 RC 製覆工と箱型
RC 製覆工における断面方向曲げモーメント My の比較

I 20 tfm/m (版、側壁), 50 tfm (柱)
○: 版、側壁 △: 柱① ▲: 柱① (P12載荷時)

I 20 tf/m (版、側壁), 50 tf (柱)
○: 版、側壁 △: 柱① ▲: 柱① (P12載荷時)



(a) My 分布



(b) Ny 分布

(内側: 引張力, 外側: 圧縮力)

図-6 P13 ~ P17 載荷時の端部断面の断面力最大応答分布

荷位置においても載荷点近傍で大きな値を示していることがわかる。最大応答値は P14 載荷時に発生しており、その時の値は 33.6 tfm/m である。曲げモーメントは載荷点から側壁部及び柱部に向かって負方向への分布性状を示しているが、この断面では柱が存在しないことより柱側端部は零近傍の値となっている。また、頂版の側壁側端部近傍の負の曲げモーメントは、軸方向中央断面載荷時と同様、中央部載荷時 (P14 ~ P16) に大きな応答値を示している。最大値は P15 載荷時で -42.9 tfm/m となっており、載荷点の値よりも 35 % 程度大きい。こ

れは、軸方向端部の頂版が一边固定、一边弾性、二辺自由支持に近い状態になっていることによるものと推察される。これより、頂版軸方向端部近傍の断面力は頂版の境界条件に留意して算定しなければならないものと考えられる。

一方、側壁部のモーメント分布において、上端部の値は、頂版端部の曲げモーメントが静解析時と同様に側壁部に完全に伝達されず、P15 載荷時には 13 tfm/m 程度小さな値を示している。また、下端部の曲げモーメントがほぼ零となっていることより、覆工側壁の下端部は落

表－5 P13～P17 載荷時の端部断面における
断面方向曲げモーメント M_y 値の一覧

載荷点	柱① 上端部 (tfm)	頂版 最大値 (tfm/m)	頂版 側壁側端部 (tfm/m)	側壁 上端部 (tfm/m)
P13	-58.9	24.3	-20.9	-14.1
P14	-89.2	33.6	-39.5	-25.9
P15	-97.5	31.7	-42.9	-30.0
P16	-77.9	25.8	-33.2	-28.8
P17	-32.3	12.8	9.2	-11.4

石荷重載荷時にほとんど応答しないものと考えられる。

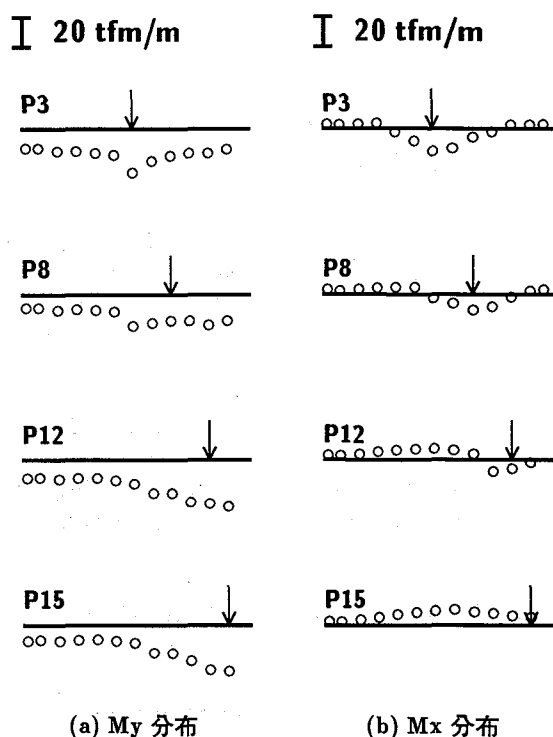
柱①の断面方向曲げモーメントは P15 載荷時に最大となり、上端部で -97.5 tfm となっている。その値は頂版中央部の値の 3.2 m 幅に相当しており、軸方向中央部載荷時 (P3) の柱②の曲げモーメントより大きいものとなっている。しかしながら、各柱の分担する頂版長さを 4 m と仮定し、平面骨組構造として断面力を評価する場合には、柱の曲げモーメントは設計的に安全側の値を与えるものと考えられる。

図中には、柱①中心と同一断面頂版中央部載荷時 (P12) の分布 (▲印) を示している。上端部の値は -110.6 tfm である。これより、上端部では P12 載荷時が P15 載荷時より 13 tfm 程度大きい値を示しているものの、他は両者類似の分布を示しており、柱①の曲げモーメント分布は端部断面側の載荷位置によって著しい影響を受けないことがわかる。また、柱下端部は、いずれの載荷点に対しても固定端としての挙動を示しており、側壁下端部の場合と異なり、柱下端部境界条件は応答性状に大きく影響を与えることがわかる。

(b) 図は断面方向軸力 N_y の分布図である。頂版の軸力は曲げモーメントと同様載荷点で大きな値を示しているが、その大きさは載荷位置により変動しており一般的な傾向は示されていない。最大値は P16 載荷時に 57.0 tf/m となっている。この値は応力に換算すると 5.7 kgf/cm² 程度であり、無視できるほどの大きさである。また、P17 載荷時以外では、側壁部に向かって圧縮側に増加する軸力が生じている。側壁部でも分布の性状は変動しているが、その値は載荷位置が側壁に近いほど大きくなる傾向を示している。柱の軸力は上部で大きく下端部に向かって減少する傾向にあるが、ほぼ一定の分布をしている。大きさは載荷位置が柱に近いほど大きく、P13 載荷時に最大 126.2 tf、応力に換算すると約 7.2 kgf/cm² となっている。

3.2 断面方向中央点曲げモーメントへの軸方向載荷位置の影響

図－7 には、断面方向中央部の軸方向載荷時 (P3, P8, P12, P15) における、頂版曲げモーメント M_y , M_x の断面中央部における各測点最大応答値の軸方向分布を



図－7 P3, P8, P12, P15 載荷時の断面中央部における
頂版曲げモーメント M_y , M_x の最大応答分布

示している。(a) 図は、断面方向曲げモーメント M_y の分布である。いずれの載荷状態においても載荷位置近傍で大きな値を示しているが、P12 及び P15 等の自由端近傍部における載荷時には、自由端部で最大応答値を示している。中央点載荷と端部載荷における曲げモーメントの分布を比較すると、最大値は端部載荷が 6 % 程度大きいのみである。箱型 RC 覆工に関する数値解析結果¹⁶⁾では、この大きさが 2 倍程度の値を示している。これより、端部断面の応答性状は柱側の構造形式によって大きく影響されることがわかる。

(b) 図は軸方向曲げモーメント M_x の分布を示している。端部測点はほぼ自由端に近いことから、その点には曲げモーメントが発生しない。測定値もほぼこの条件を満たしている。したがって、最大値は中央載荷時に発生している。その時の値は前述のように 15.6 tfm/m である。端部載荷時 (P15) には軸方向全体にわたって負の曲げモーメントが発生している。この時の最大値は中央点に発生し -8.9 tfm/m である。その値は P3 載荷時の曲げモーメント M_y の最大値の 30 % 程度である。

3.3 断面方向曲げモーメントへの載荷位置の影響

ここでは、軸方向中央断面と端部断面の断面方向曲げモーメント M_y に関し、各断面上載荷時 (P1～P5 載荷と P13～P17 載荷) における最大包絡線分布について比較検討することとする。

図－8 には、それらの比較図を示している。なお、図中の応答値は、図－4, 6 の結果とともにリバウンドに

I 20 tfm/m (版、側壁), 50 tfm (柱)

- : 中央断面載荷時
- : 端部断面載荷時
- ▲: 端部断面載荷時 (柱①)

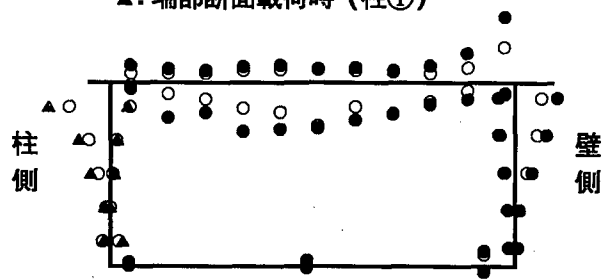
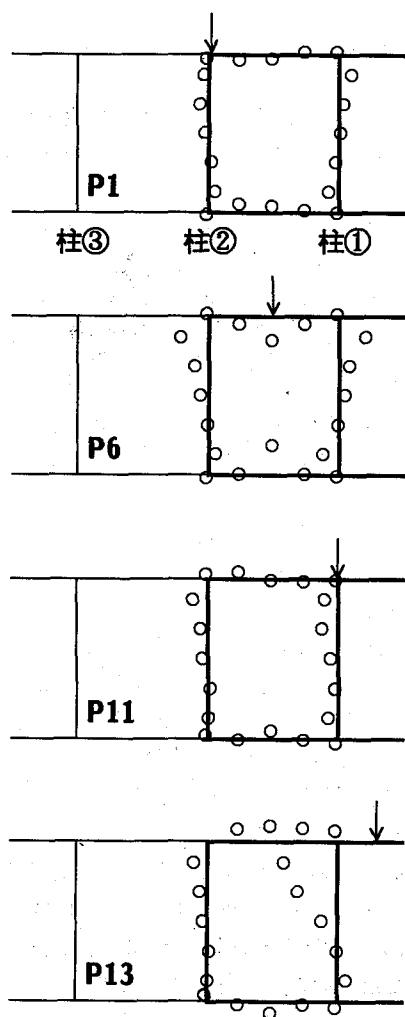


図-8 軸方向中央断面と端部断面における断面方向曲げモーメント M_y の最大包絡線分布

表-6 P6, P13 載荷時の柱及び柱近傍部断面における軸方向曲げモーメント M_x 値の一覧

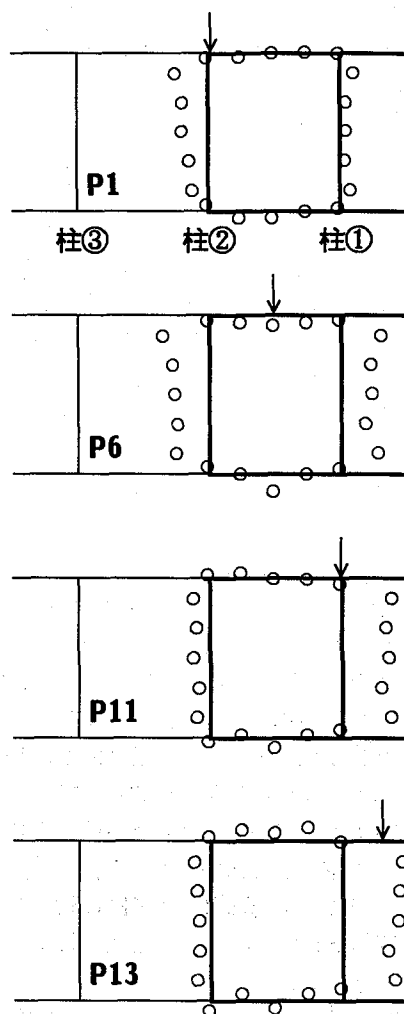
着目点	P6 載荷時	P13 載荷時
柱①上端部 (tfm)	-29.2	51.8
柱①下端部 (tfm)	13.9	-11.2
頂版の柱①②の中間部 (tfm/m)	16.9	-9.5
底版の柱①②の中間部 (tfm/m)	-19.0	8.7
柱②上端部 (tfm)	-25.7	-11.4
柱②下端部 (tfm)	9.0	3.1

I 20 tfm/m (版), 30 tfm (柱)



(a) M_x 分布

I 40 tfm/m (版), 60 tf (柱)



(b) N_x 分布

(内側: 引張力, 外側: 圧縮力)

図-9 P1, P6, P11, P13 載荷時の柱側断面の断面力最大応答分布

よる負荷荷状態における応答値も考慮している。したがって、同一測点に正負の曲げモーメントが示されている。

また、衝撃荷重載荷時（以後、これを正載荷時と呼ぶ）の主要な点の曲げモーメント値は表-4、5に示されている。これらの図、表より、正載荷時の頂版断面方向中央部の最大応答値は、前述のように箱型 RC 覆工の場合と異なり、中央断面と端部断面載荷時で大差のないことがわかる。最大値について比較すると、端部断面の P14 載荷時（33.6 tfm/m）が、中央断面の P3 載荷時（29.9 tfm/m）の 12% 程度大きいのみである。

また、正載荷時の頂版側壁側端部、側壁上端部、柱上端部の応答値はいずれも断面方向中央点載荷時（P3, P15）に最大値を示していることがわかる。それらの応答値は端部断面載荷時が軸方向中央断面載荷時のそれぞれ 1.9, 1.5, 1.5 倍程度となっている。これより、端部断面における設計のための断面力は、軸方向中央部断面における断面力を用い、頂版中央部は 1.2, その他頂版側壁側端部、側壁上端部、柱上端部は 2.0 の割増し係数を乗ずることによって安全側に評価可能であるものと考えられる。

一方、負荷荷状態の頂版中央部の応答値は、端部断面載荷時（最大値が -10.4 tfm/m）が軸方向中央断面載荷時（最大値 -8.0 tfm/m）より若干大きい。その値は軸方向中央断面載荷の正載荷時における最大値の 1/2.8 程度であることがわかる。

また、頂版側壁側端部、側壁上端部、柱上端部の負荷荷状態における値は中央断面と端部断面載荷時で類似の値を示しており、最大値がそれぞれ 9.2 tfm/m, 9.5 tfm/m, 36.6 tfm である。それらの値は中央断面載荷で正載荷状態における値の約 1/2.4, 1/2.0, 1/1.7 程度となっている。これより、負荷荷状態における設計断面力は、中央断面載荷の正載荷時の断面力を用い、頂版中央部は 1/2.5, その他頂版側壁側端部、側壁上端部に対して 1/2, 柱上端部で 1/1.5 の係数を乗ずることにより、安全側に評価可能であるものと考えられる。

3.4 柱近傍載荷時の柱部の応答性状

柱式 RC 製覆工の場合には、柱及び柱近傍部の断面力分布が特徴的になるものと考えられることより、この部分の応答特性を明確にすることが肝要である。ここでは、柱部の断面力が大きくなると考えられる、柱側に沿った載荷位置（P1, P6, P11, P13）に対して、柱①、②を含み頂底版部を考慮したラーメン構造と仮定して断面力の分布性状を検討することとする。したがって、柱部及び頂底版部の断面力は、それぞれ全断面及び単位幅（1 m）当たりの値として評価している。

図-9 には、曲げモーメント M_x 及び軸力 N_x に関する各点の最大応答値の分布を示している。(a) 図は曲げモーメント M_x 分布であるが、柱の中間部及び軸方向端部載荷時（P6 及び P13）に大きな応答値になっていることがわかる。表-6 には、これら P6, P13 載荷時

の主要な点における曲げモーメント値を一覧にして示している。特に、柱①に関しては軸方向端部載荷時（P13）に上端部で 51.8 tfm となっている。また、頂版及び底版に対しては柱間載荷時（P6）で大きく、最大値はそれぞれ 16.9 tfm/m, -19.0 tfm/m を示している。この大きさは頂版中央載荷時（P3）の最大軸方向曲げモーメント（載荷点において 15.6 tfm/m）より大きく、軸方向曲げモーメントとしては最大のものとなっている。これは、柱に沿う頂版部及び底版部軸方向曲げモーメント評価は、柱側載荷状態に留意しなければならないことを示している。また、端部載荷時（P13）の頂底版曲げモーメントは柱間載荷時（P6）と逆向きとなり、最大それぞれ -9.5 tfm/m, 8.7 tfm/m となっている。

(b) 図は軸力 N_x 分布である。頂版部及び底版部の軸力は、P6 載荷時にやや大きく、頂版部で最大 15.7 tf/m, 底版部で -24.9 tf/m となるが、他の載荷位置ではいずれも無視できるほど小さな値となっていることがわかる。

一方、柱の軸力は曲げモーメント M_x 同様柱間及び端部載荷時（P6 及び P13）に大きな値を示している。それらの値は、P6 載荷では柱①②とも最大約 65 tf 程度、P13 載荷では柱①が約 110 tf となっている。しかしながら、応力に換算するとそれぞれ 3.7 kgf/cm², 6.3 kgf/cm² であり、発生軸力がそれほど大きな値でないことがわかる。

4. まとめ

柱式 RC 製落石覆工の衝撃特性を実証実験により検討した。本研究では、特に衝撃特性に及ぼす衝撃荷重作用位置の影響について検討した。実証実験に用いた覆道は現在供用中の実覆道であることより、重錘落下エネルギーを設計時のそれと同程度とした。従って、得られた結果は全て弾性範囲における応答値である。

本実験で得られた衝撃荷重載荷時（正載荷状態）における結果を要約すると、

(A) 軸方向中央断面載荷時：

- 1) 頂版中央部の断面方向曲げモーメントは中央部載荷時に最大値を示す。応答値は箱型 RC 覆工の場合と同程度であり、柱部の構造形式の影響は小さい。
- 2) 頂版側壁側端部の断面方向曲げモーメントは中央部載荷時に最大となる。その時の値は載荷点の値の 75% 程度で静解析結果（60%）より大きい。
- 3) 側壁部の断面方向曲げモーメントは上端部で大きく、下端部で上端部の 1/10 以下と無視できるほど小さい。上端部の値は頂版側壁側端部より若干小さい値を示している。
- 4) 柱部の断面方向曲げモーメント分布性状は静解析結果と類似なものとなる。上端部の値は中央部載荷時頂版中央部の値の 2.1 m 幅に相当する。

(B) 端部断面載荷時：

- 5) 頂版中央部の断面方向曲げモーメントは軸方向中央

断面載荷時より大きい値を示すが、その程度は5%程度と小さい。この結果は箱型RC覆工の場合の2倍と著しく異なり、柱側の構造形式が大きく影響しているものと判断される。

- 6) 頂版側壁側端部の断面方向曲げモーメントは、中央部載荷時に最大となる、この値は載荷点部の値より大きく、かつ軸方向中央断面載荷時の同位置の値の2倍弱の値となっている。
- 7) 端部断面に近い柱上端部の断面方向曲げモーメントは軸方向中央断面載荷時の頂版中央部の値の3.2m幅に相当し、中央断面柱の値よりも大きい。

(c) 柱近傍載荷時：

- 8) 軸方向曲げモーメントは、柱の中間部または端部載荷時に最大となり、符号が互いに逆向きとなる。その時の頂版柱側部の軸方向曲げモーメントは頂版中央部載荷時の載荷点の軸方向曲げモーメント値より10%程度大きい値を示している。

- 9) 柱の軸力は応力度に換算すると全て10 kgf/cm²以下である。

以上、柱式RC製落石覆工は、端断面部において頂版が二辺自由支持状態になるため、箱型の場合とは異なった挙動を示すこと、また、柱及び柱付近の頂版と底版の断面力分布が特異であることより、設計上これらに対する十分な配慮が必要ながことが明かとなった。

本研究を纏めるに当たり、室蘭工業大学松岡健一教授には実験及びデータ処理全般に渡って御指導戴いた。また、実験の計測に対しては計測技販(株)の皆様、計測データの処理に対しては、前山順宏君をはじめ室蘭工業大学大学院工学研究科建設システム工学専攻構造力学研究室の院生諸君に多大のご協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石による衝撃力の推定に関する実験報告書，土木研究所資料，1822号，1982.3.
- 3) 吉田 博，榎谷 浩，鈴木哲治：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，第352号，pp. 61～70，1984.12.
- 4) 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.
- 5) 岸 徳光，佐藤昌志，中野 修：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験，構造工学論文集，Vol.

41A，pp. 230～235，1993.6.

- 6) 佐藤昌志，岸 徳光，西 弘明，松岡健一：三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす芯材 RC スラブの継手部の影響，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 1249～1256，1995.3.
- 7) 佐藤昌志，岸 徳光，松岡健一：三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1337～1346，1996.3.
- 8) 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，土木学会論文集，No. 483/I-26，pp. 97～106，1994.1.
- 9) 園田恵一郎，鬼頭宏明，松浦幹佳：RC門形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.
- 10) 鴨野一夫，小幡喜芳，武田敏雄，吉田 博：エネルギー基準による落石覆工の資設計，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，1991.3.
- 11) 松葉美晴，後藤吉晴，佐藤 彰，音田 奨，岡畑博子，井上理恵：実物PC製シェッドの落石による破壊実験について(1)，(2)，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. 241～253，1993.6.
- 12) 園田佳巨，佐藤紘志，石川信隆：PC落石覆工の衝撃応答解析，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. 264～269，1993.6.
- 13) 佐藤昌志，西 弘明，岸 徳光，菅田紀之：敷砂を緩衝材とする重錘落下によるPC多主桁の弾性衝撃挙動，構造工学論文集，Vol. 40A，No.3，pp. 1593～1603，1993.3.
- 14) 佐藤昌志，岸 徳光，三上 隆，西 弘明：落石覆工用実大PC桁の衝撃破壊実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No.2，pp. 943～948，1994.6.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 北海道開発局函館開発建設部：一般国道228号松前町立岩覆道設計計算書，1991.
- 18) 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. 73～81，1994.7

(1996年9月6日受付)