

I - 8 敷砂緩衝材を用いた柱式実 RC 覆道の重錘落下衝撃実験

開発土木研究所	正 員	今 野 久 志
開発土木研究所	正 員	佐 藤 昌 志
室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
室蘭工業大学	正 員	松 岡 健 一

1. はじめに

落石覆道は、山岳部や海岸線の急峻な地形にある道路等を落石災害等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勢力的に行われている。落石覆道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、落石覆道構造物の耐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⁾の研究をはじめ種々行われている。特に、北海道開発局開発土木研究所及び室蘭工業大学²⁾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^{3),4)}。

一方、落石覆道本体の耐衝撃特性に関しても、RC 落石覆道に対する岸らの研究⁵⁾や園田らの研究⁶⁾、鋼製覆道に対する鴨野らの研究⁷⁾、PC 落石覆道に対する園田らの研究⁸⁾、佐藤らの研究⁹⁾により弾性及び一部弾塑性領域における耐衝撃挙動が明らかにされている。しかしながら、RC/PC 落石覆道の場合には、施工における自由度が大ききことより、種々の構造形式あるいは断面形状が考えられる。また、落石覆道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耐衝撃挙動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 落石覆道⁵⁾や柱式 PC 落石覆道の実証実験⁹⁾を行い、その耐衝撃特性を明らかにしてきた。ここでは、RC 落石覆道のもう一つの構造形式である柱式 RC 覆道の実証実験を行い、弾性範囲における耐衝撃特性を検討するものである。

著者等が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 落石覆道の解析によれば、覆道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¹⁰⁾。特に、柱式 RC 落石覆道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各上下縁あるいは内外縁補強筋歪を測定することによって曲げモーメントおよび軸力を評価し、それらの分布特性について検討を行うこととした。

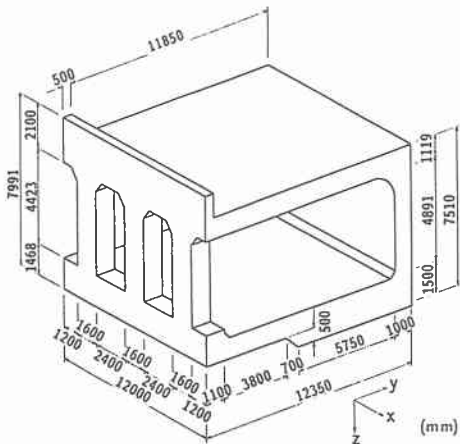
2. 実験概要

2.1 立岩覆道

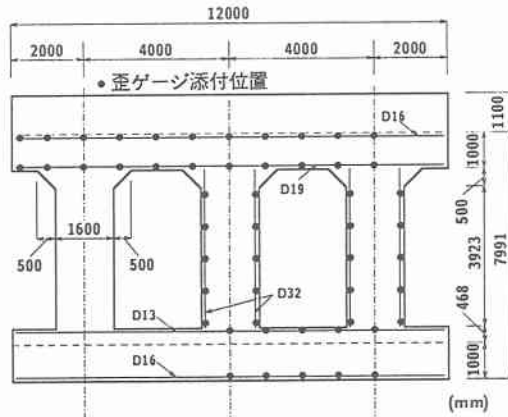
本実験の対象となった覆道は、北海道松前郡松前町字白神にある一般国道 228 号に設置された立岩覆道である。立岩覆道に関する詳細は文献 11) に述べていることより、ここでは省略し、要点のみ述べる。設計に用いられた落石荷重は、重量 1.36 tf、落下高さ 22 m として落石対策便覧の振動便覧式¹²⁾から与えられる 121 tf の衝撃力である。また、本実験に用いた立岩覆道の 1 ブロックの概略形状を図-1 に示す。断面方向の配筋図及び、歪測定用の歪ゲージ添付位置については、文献 11) に述べていることより、ここでは省略し、軸方向配筋図及びゲージ位置図のみを図-2 に示す。

2.2 実験条件および測定項目

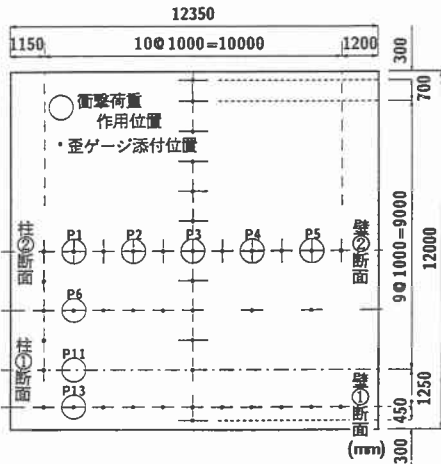
実験は立岩覆道の 1 ブロックを用いて行った。作用衝撃力は、本覆道が供用中であることより、設計衝



図－１ 立岩覆道 1 ブロックの概略形状



図－２ 軸方向配筋及び歪ゲージ添付位置図



図－３ 衝撃荷重載荷位置図

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)
S90-1	P1	73.25
S90-2	P2	106.23
S90-3	P3	109.89
S90-4	P4	132.05
S90-5	P5	96.24
S90-6	P6	118.79
S90-11	P11	91.39
S90-13	P13	116.19
平均		105.50

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、落石覆道の衝撃応答に及ぼす衝撃荷重作用位置の影響を検討するために、図－３に示すような合計 8 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。なお、測定項目についても文献 11) に詳しく示されていることより、ここでは省略する。

2.3 重錘落下による衝撃力

重錘落下によって覆道に直接作用する衝撃力を測定するためには、覆道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およ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、覆道への伝達衝撃力は、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、剛基礎上で行った数秒の緩衝性能に関する過去の実験結果と対応を取る

ことによって、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。表より、測定値は重錘の落下角度や実験時の気象条件の相違による敷砂の状態（主として含水比）等の影響により多少変動しているが、作用位置による傾向は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 105.5 tf である。この値は、落石重量 3 tf、落下高さ 10 m、ラーメの定数 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ 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、過去の剛基礎上における実験結果²⁾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、上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、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、各点の最大時刻歴応答値を用いて整理している。従って、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（m）の値であり、柱部は柱全断面に対する値である。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。

3.1 断面方向載荷位置の影響

中央断面（柱②を含む断面）の断面方向（P1 ～ P5）載荷時における、中央断面部の断面力の最大応答値に関する分布を図－ 4 に示す。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（○印）及び軸方向曲げモーメント Mx（●印）の最大応答値に関する分布である。断面方向曲げモーメント My に関して頂版部では中央部（P3）載荷時に最大となる。その時の最大値は載荷点で約 30 tfm/m となっている。また、柱部や側壁部に向か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。側壁部及び柱部の分布も頂版部と同様中央部（P3）載荷時に最大分布を示している。側壁部の最大値は上部で約 16.5 tfm/m と静載荷時と同様中央部の 1/2 程度となっている。これに対して柱上部の値は中央部（P3）載荷時に約 60 tfm となり、中央部の値の 2 m 幅に相当する値となっている。また、柱の断面方向曲げモーメント My は載荷点が P2 ～ P4 と中央部近傍載荷時に比較的大きな応答値を示していることがわかる。

頂版の軸方向曲げモーメント Mx も P3 載荷時に最大となり、載荷点で約 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 My 値の 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分かる。柱の軸方向曲げモーメント Mx に関しては P1 の載荷点のみについて測定している。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、軸方向曲げモーメント Mx は断面方向のその約 1/2 程度であることがわかる。

図－ 4 (b) は各載荷位置における断面方向軸力 Ny（○印）及び軸方向軸力 Nx（●印）の最大応答値の分布を示す。頂版部軸力は中央部（P3）載荷時の断面方向軸力 Ny の載荷点における値を除いて、両軸力とも類似の分布性状を示している。また、頂版の軸力は P3 載荷時の載荷点の値（約 60 tf/m）を除けば、20 tf/m 程度であり大きくはない。柱の軸力はいずれの載荷位置に対しても最上部を除いて高さ方向にほぼ一様な分布を示している。最上部は載荷位置が柱部に近いほど大きな値となっている。最大軸力は約 90 tf である。しかしながら、この値は応力に換算すると約 5.1 kgf/cm² とそれほど大きなものでないことが分かる。

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	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z y dA_2$	$\int_{A_3} \sigma_z y dA_3$
軸方向曲げモーメント	Mx	$\int_{A_1} \sigma_x z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z x dA_2$	$\int_{A_2} \sigma_z x dA_2$
断面方向軸力	Ny	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_z dA_2$	$\int_{A_2} \sigma_z dA_2$
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

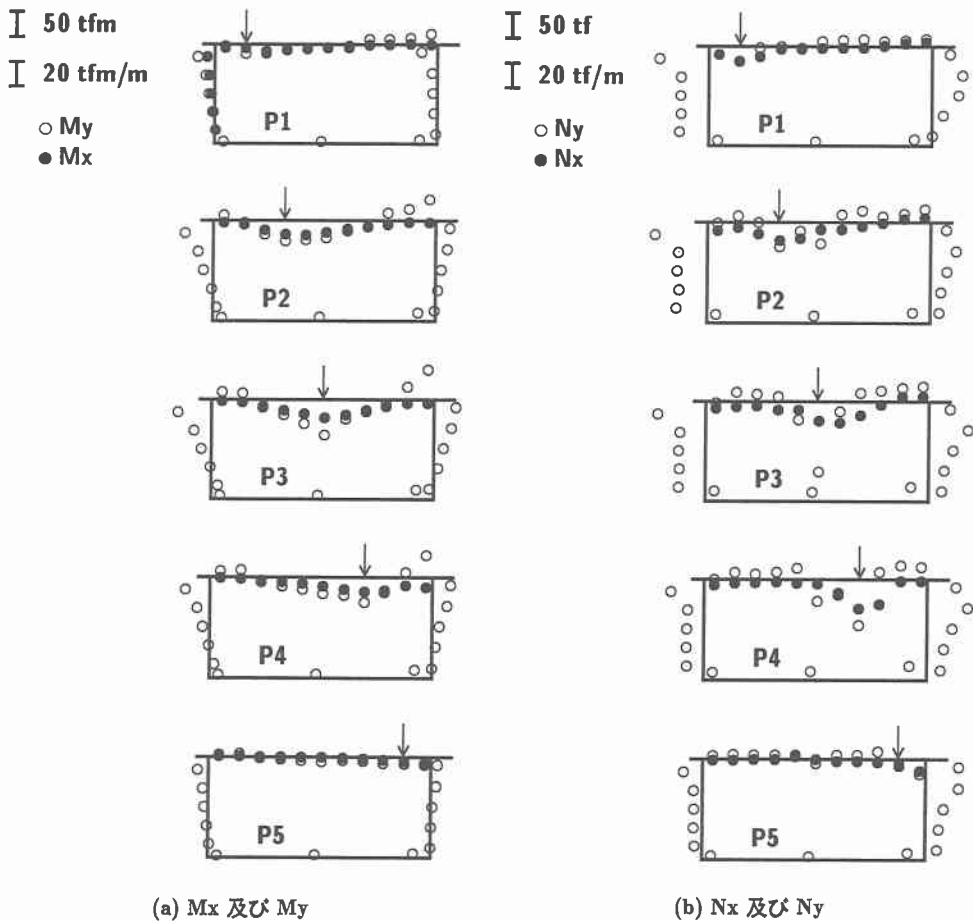


図-4 P1～P5 載荷時の中央断面の断面力最大応答分布

P3 載荷時の、断面方向曲げモーメント M_y に関する箱型 RC 落石覆道 (美幌覆道)⁵⁾における実証実験結果 (▲印) と本実験結果 (○印) との比較を図-5 に示す。美幌覆道は海側側壁に開口部を有する箱型 RC 落石覆道であるが、開口部側以外の断面形状は、立岩覆道とほぼ同様である。開口部の存在により当然美幌覆道では柱部に相当する部分の断面力はない。図から頂版の断面方向曲げモーメント M_y は、両者類似の分布をしており、中央点載荷時には柱部の構造形式による影響は小さいものと判断される。

3.2 柱近傍載荷時の柱部の応答性状

柱式の落石覆道の場合には、柱およ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した。従って、柱部および頂版部の断面力は、それぞれ全断面及び単位幅 (m) 当たりの値である。

軸方向曲げモーメント M_x 及び軸力 N_x に関する各点の最大応答値の分布を図-6 に示す。図-6 (a) は

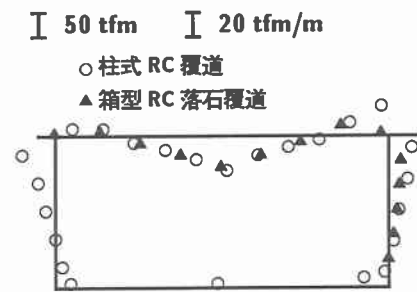
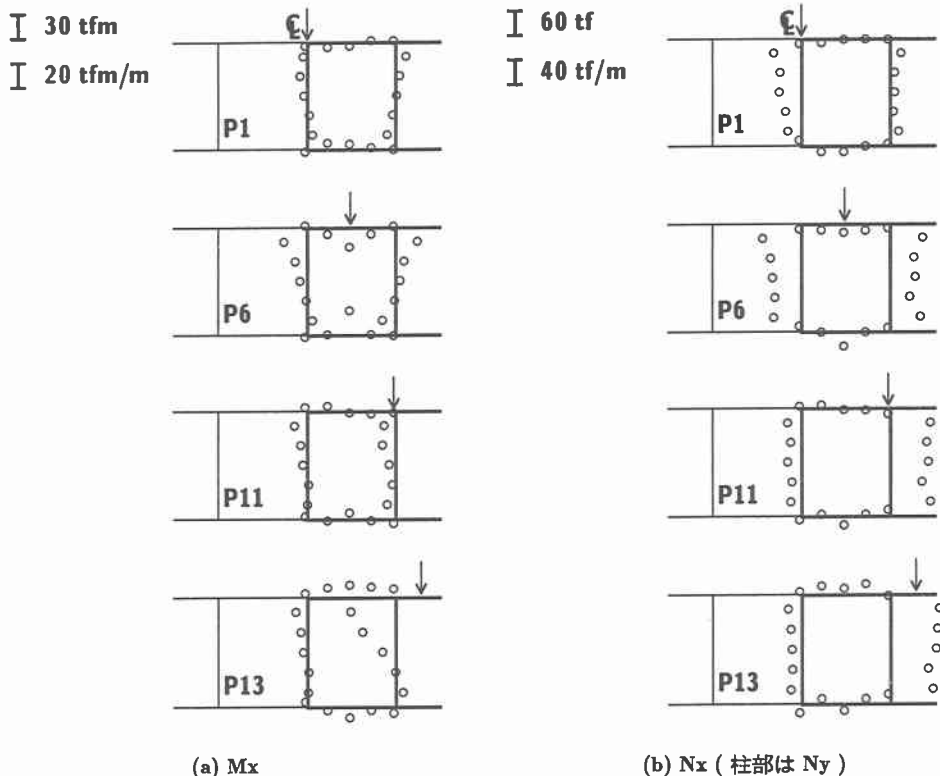


図-5 柱式 RC 覆道と箱型 RC 覆道の断面力分布の比較



図－6 P1、P6、P11、P13 載荷時の柱側断面の断面力最大応答分布

軸方向曲げモーメント M_x 分布であるが、柱と柱の中間 (P6) 及び覆道端部 (P13) 載荷時に大きな応答値になっていることが分かる。特に、柱①に関しては覆道端部 (P13) 載荷時に上部で約 51.6 tfm となっている。また、頂版及び底版に対しては柱間 (P6) 載荷時で大きく、最大値はそれぞれ約 16.9 tfm/m 及び 19.0 tfm/m を示している。この大きさは頂版中央 (P3) 載荷時の最大曲げモーメントより大きく、軸方向曲げモーメント M_x としては最大のものである。従って、頂版及び底版軸方向曲げモーメント M_x に対しては、柱部側載荷に対する注意が必要なことを示している。また、端部 (P13) 載荷時には (P6) 載荷時と逆向きの曲げモーメントとなり、それぞれ最大約 9.5 tfm/m 及び 8.7 tfm/m となっている。

図－6 (b) は軸方向軸力分布 N_x であるが、頂版及び底版の軸力は P6 載荷時にやや大きく頂版で最大約 15 tf/m、底版で約 -25 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分かる。これに対して柱の軸力は柱間 (P6) 及び端部 (P13) 載荷時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 50 tf 程度、(P13) 載荷では柱①の軸力が約 120 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、2.8 kgf/cm²、6.8 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 落石覆道の耐衝撃特性を実証実験により検討した。本研究では特に耐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。また、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域における応答値である。

本実験で得られた結果を要約すると、

- 1) 頂版の断面力は断面中央部載荷時に最大となる。
- 2) 側壁部の断面力は、載荷位置によって大きな影響を受けない。
- 3) この程度の落石衝撃力（重量 3 tf、落下高さ 10 m）に対しては、底版部にはほとんど断面力を生じないが、柱側の柱間載荷時の柱側断面にはやや大きな軸方向曲げモーメントを生じている。
- 4) 中央点載荷時の頂版及び側壁の断面方向曲げモーメント分布は、箱型 RC 落石覆道とほぼ同様である。
- 5) 柱近傍載荷時の柱部の軸方向曲げモーメントは、柱側の柱間または端部載荷時に最大となり、曲げの方向はそれぞれ逆向きとなる。
- 6) 柱の軸力も柱側載荷時に大きな値となるが、いずれの場合も応力度としては無視できる程度である。

以上、柱式 RC 落石覆道は、柱及び柱付近の頂版と底版の断面力分布が特異であり、設計上これに対する十分な配慮が必要ながことが明らかとなった。

本研究をまとめるに当たり、実験の計測に対しては計測技販（株）の皆様の、また、計測データの処理に対しては、前山順宏、池田泰博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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 園田佳巨、佐藤絃志、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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 佐藤昌志、岸 徳光、今野久志、前山順宏：三層緩衝構造を用いた柱式実 RC 覆道の重錘落下衝撃実験、土木学会支部論文報告集、第 53 号, 1997
- 12) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983.