

I -19

実柱式RC覆道の重錘落下衝撃実験と数値シミュレーション

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 フェロー 松岡健一
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光

1. はじめに

落石による災害を防止するために山岳部や海岸線の急崖地には落石防護施設として落石覆道が建設されている。落石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。著者等はこれまでに箱型RC覆道に対して、実験的及び解析的に詳細な検討を行い¹⁾、落石衝撃による3次元衝撃応答特性を考慮した設計法を提案している²⁾。また、最近では柱式RC覆道に対しても実証実験により、衝撃挙動を明らかにしており³⁾、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柱式RC覆道の3次元弾性衝撃応答解析を行い、先に行った実証実験結果との比較により、その有用性を検討するとともに、現行設計法による設計値との比較検討を行い合理的な設計法確立の必要性を明らかにすることを目的としている。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、実証実験を実施した実覆道の1ブロックを対象とし、緩衝構造として、敷砂及び三層緩衝構造を用い、載荷位置を変化させた実験に対して解析を行った。

2. 柱式RC覆道の实証実験概要

実証実験を行った覆道は、一般国道 228 号松前町字白神に設置されている立岩覆道である³⁾。立岩覆道の設計落石荷重は、落石対策便覧⁴⁾に基づき重量 1.36tf、落下高さ 22m、敷砂のラメ定数を $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ として振動便覧式により算定される 121tf の衝撃力である。立岩覆道の1ブロックの概略形状を図-1に示す。

実証実験では、本覆道が供用中であることから、弾性範囲内の衝撃応答特性を検討することとした。実験に用いた緩衝構造は、厚さ 90cm の敷砂及び表層に厚さ 50cm の敷砂、芯材に厚さ 20cm の RC 版、裏層に厚さ 50cm の発泡スチロール (EPS) 材を用いた三層緩衝構造 (Three Layered Absorbing System : 以後 TLAS と略称する) である。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 3tf の重錘を 10m の高さから、また TLAS に対しては敷砂の場合とほぼ等しい衝撃力となるように重量 3tf の重錘を高さ 25m から自由落下させて与えている。用いた重錘の形状は、直径 1m、高さ約 1m で、底部 17cm が球底 (半径 80cm) であり、重錘底部には加速度測定用の加速度計を埋設している。

本論文において、実証実験結果と解析結果との比較検討を行った実験ケース及び衝撃荷重載荷位置を表-1及び図-2に示す。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。

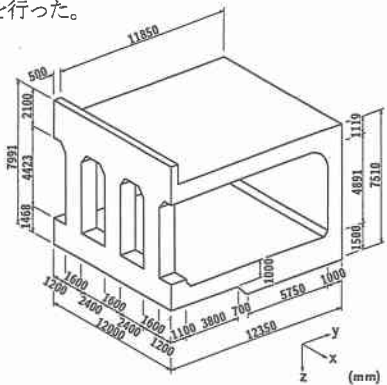


図-1 立岩覆道の概略形状

表-1 実験ケース一覧

No.	緩衝材	重錘重量 (tf)	落下高 (m)	載荷位置
1	敷砂	3	10	P 1
2				P 2
3				P 3
4				P 4
5				P 5
6				P 6
7				P 13
8	三層緩衝構造	3	25	P 3

Study on Demonstrating Impact Test and Simulation of Column-Type RC Rock-Shed.

by Hisashi KONNO, Masashi SATO, Ken-ichi MATSUOKA and Norimitsu KISHI

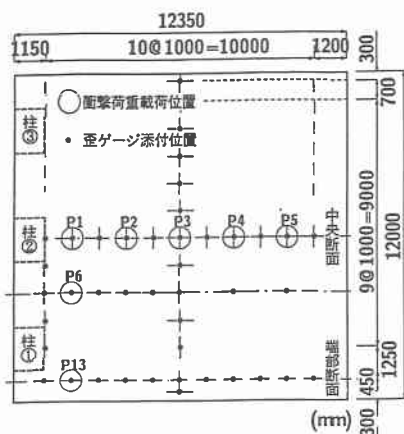
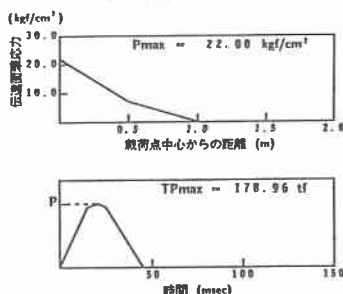


図-2 衝撃荷重載荷位置



(a)敷砂を用いた場合

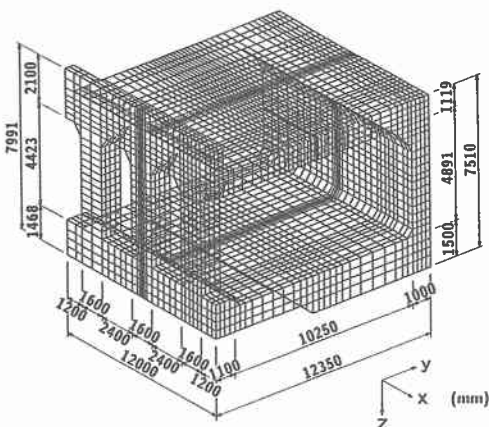
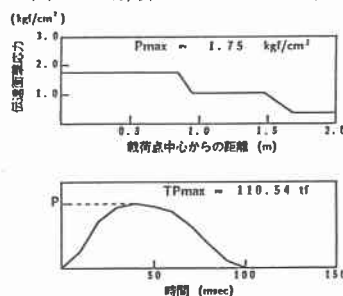


図-3 解析モデル及び要素分割



(b)三層緩衝構造を用いた場合

図-4 衝撃荷重の空間分布及び時間分布

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。立岩覆道の解析モデル及び要素分割の一例を図-3に示す。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⁹⁾より基礎地盤の影響が少ないことが明かであることから、本解析でも基礎地盤を無視し、底版の端辺を単純支持としている。またブロック端部の境界条件については、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、コンクリートの弾性係数 $E=3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、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。

3. 2. 衝撃荷重

解析に用いた衝撃力の空間分布及び時間分布を図-4(a)、(b)に示す。なお、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。解析結果と実験結果との比較を行う場合には、実験ケースごとに実測された伝達衝撃力を解析に用いることが望ましいが、実証実験を行った覆道が供用中であり、また載荷点が広範囲にわたることから、伝達衝撃力の測定が不可能であった。そのため、敷砂を用いた場合の伝達衝撃力としては、実験条件が比較的等しい美幌覆道(開口部を有する箱型 RC 構造)の実測値⁹⁾を採用し、TLASを用

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

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ため剛基礎上の実験結果を採用している。

4. 解析結果及び考察

本論文では、解析によって得られた要素応力を断面の平面保持の仮定から表一・二に示されている算定式により断面力に換算し評価している。ここで、表中の断面方向とは道路軸直角方向を示し、また軸方向とは道路軸方向を示している。断面力は、頂版部、側壁部では単位幅当たり(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。なお、底板部の断面力については過去の実験結果から、その値が小さいため考察の対象から除いている。

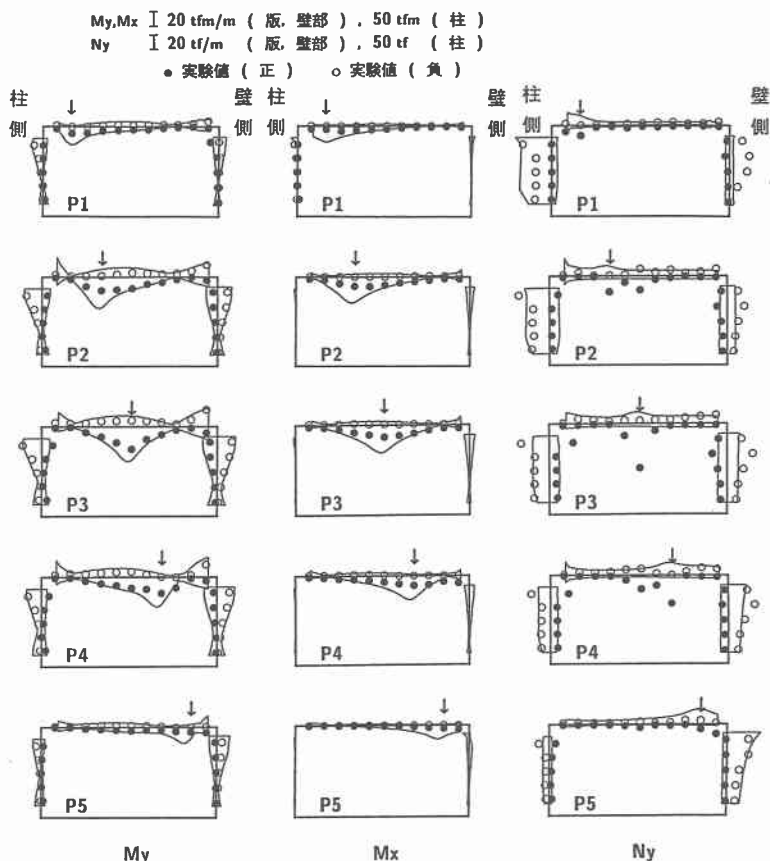


図-5 中央断面(P1～P5)載荷時の断面力包絡線分布(敷砂)

4. 1. 敷砂を用いる場合

4. 1. 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 My 、軸方向曲げモーメント Mx 及び断面方向軸力 Ny)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、曲げモーメントについては図の内側が引張りとなる場合を正、外側が引張りとなる場合を負とし、軸力については、引張力を正、圧縮力を負として整理している。

My の分布は、頂版部では解析値、実験値とも P3 載荷時に載荷点部で正の最大値を示しており、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 My 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。解析値と実験値の比較では、頂版の載荷点部を除けば、両者はかなり良く一致している。

これに対して Mx の分布は、 My に比べ全体的に小さな値を示しており、特に P3 載荷時の実験値では My の $1/2$ 以下となっている。解析値と実験値を比較すれば、全体的に解析値の方が大きく、P3 載荷時の最大値では解析値が 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 Ny 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 載荷時には柱部で大きく、P5 載荷時に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。頂版部では解析値、実験値とも載荷点部で大きくなるが、実験値では引張力が非常に大きく、逆

に解析値では圧縮力が大きくなり両者の傾向はかなり異なっている。しかし全般的には解析値と実験値の分布形状は、頂版部の載荷点直下や柱上端部を除いて比較的良く一致している。

4. 1. 2. 柱部側断面 (P1, P6, P13) 載荷時

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 、頂版及び底版は N_x) の応答特性を考察する。

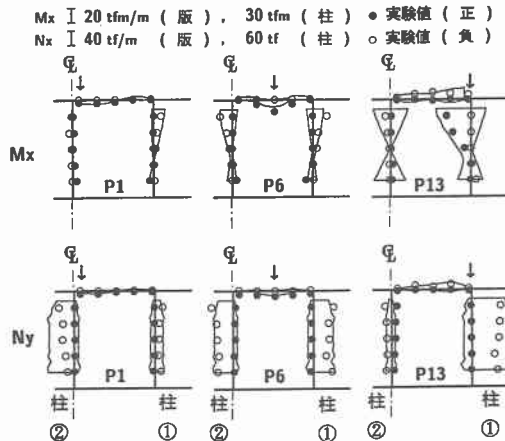


図-6 柱部側断面載荷時の断面力包絡線分布(敷砂)

図-6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。

M_x の解析値については、P1 載荷時で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に比較的大きな曲げモーメントが生じている。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トが生じている。また頂版部にも載荷点に多少大さめの曲げモーメントが生じている。P13 載荷時では、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 66.2tfm である。柱①に対しては、P13 載荷時の影響が一番大きいことが分かる。実験値は値に多少の変動は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一致している。

軸力については解析値、実験値とも当然のことながら柱部に集中しており、頂版部及び底版部ではごく小さな値となっている。柱部の軸力 N_y 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の軸力は最も大きく柱式 RC 覆道の特性がよく示されている。P13 載荷時の N_y の最大値は解析値で-162.0tf であり、実験値で-122.1tf である。

以上、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多少ばらつきがみられるものの、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すると最大でも 7kgf/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

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) の正負の絶対最大値による包絡線分布を図-7に示す。図には解析値を実線で、実験値を●印(正)及び○印(負)で示している。

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 30.2tfm/m、実験値で 39.3tfm/m となっており実験値は解析値より約 30%大きい。柱部及び側壁部では、上部

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)

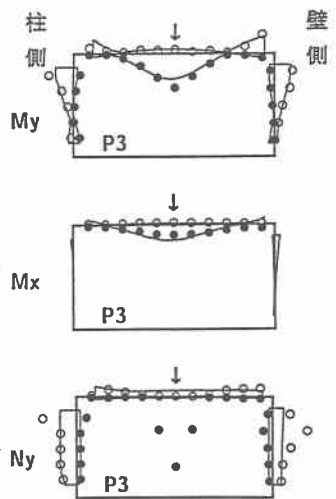
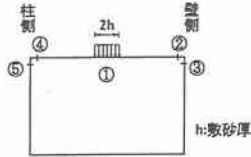


図-7 断面力包絡線分布 (TLAS : P3 載荷時)

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)

荷目点		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	tfm	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	



表－4 設計値と解析値及び実験値の比較
(柱側断面載荷時)

荷目点		①	②	③	④
Mx	①④	tfm/m	②③	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					
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



で大きく下部に向かって急激に減少している。上部では解析値はそれぞれ-49.6tfm、-19.4tfm/m であり実験値はそれぞれ-69.3tfm、-21.0tfm/m である。

Mx の分布形状は、解析値と実験値で良く一致しているが最大値は、解析値で 18.7tfm/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 Mx は My に比較して小さく約 1/2 ～ 1/3 程度の値となっている。

Ny では、実験値の分布形状は、頂版部では荷重点部に 82.1tf/m と大きな軸力の集中が見られるが、両端に向かって急激に減少している。柱部では上端部で-95.6tf と大きく、下端部では-45.0tf とほぼ様な軸力が発生している。また、側壁部では上部で-40.5tf/m と大きく、下部に向かって減少する分布を示している。解析値は頂版部や、柱部、側壁部ともほぼ様な分布を示しており、実験値のような集中はみられない。しかし、先に述べた敷砂の結果と同様に軸力による応力度は最大でも 8kgf/cm² 以下であり、設計上はさほど重要とはならないものと考えられる。

また、TLAS を用いた場合の重錘落下エネルギーは、敷砂を用いた場合の2.5 倍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倍以上の緩衝能力を有することが明かである。

5. 現行設計要領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部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、現行設計要領の適用性を検討する。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、柱部の断面方向の計算に対しては、柱間幅を単位幅とする箱型ラーメンとして、また、柱部の軸方向の計算に対しては、柱部のハンチ部を考慮して、頂版及び底版の有効幅を定めて、頂版の一部・柱・底版の一部で構成される骨組ラーメン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・柱の断面方向の計算に対しては、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)で断面方向に 2h の幅で柱間隔に等分布するものとしており、柱部の軸方向の計算に対しては衝撃力 P を

道路方向に $\pi h/2$ の長さに分布させるものとしている。衝撃力 P を振動便覧式による 128tf としたものを条件 A、著者らの実験により得られた伝達衝撃力の平均値 180tf としたものを条件 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。なお、着目点及び載荷状況をそれぞれの表の下段に示している。

表-3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。 M_y について解析値と実験値を比較すると、柱部⑤を除けば解析値の方が実験値よりも大きめの値を示している。また、設計値と実験値を比較すると、全ての着目点において設計値が実験値よりも大きな値を示し、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。 N_y については、実験結果から発生応力度が小さく、設計上問題とは思わないと思われるが、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-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が、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。即ち柱部については柱側断面載荷時に注意が必要であり、特に端部の柱については端部載荷時の挙動に十分な注意が必要なが分かる。

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では、落石荷重を軸方向に連続載荷するような計算となっているため、かなり安全側の設計となっている。柱側断面載荷時では、軸方向の柱部の設計で危険側となることなどが明かとなった。このことから柱式 RC 覆道についても、より合理的な設計を行うためには3次元衝撃応答特性を考慮した設計法確立の必要性が示された。

6. まとめ

柱式 RC 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、現行設計要領による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。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解析値と実験値の比較から、LS-DYNA3D を用いて解析した結果は、頂版部の載荷点直下や柱上端部の軸力で実験値と異なるものの、全体としてはほぼ実験値と同様な断面力分布を与えることが示された。
- ② TLAS は、落石エネルギー的には、敷砂材に比較して2倍以上の緩衝能力を有している。
- ③現行設計要領は、断面方向載荷時にはかなり安全側の評価となり、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。

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)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.
- 3)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.
- 4)日本道路協会：落石対策便覧、pp.16～17、1983.7.
- 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)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.