

I-50 北海道開発局における落石覆道の現行設計法

開発土木研究所	正員	中野 修
〃	〃	山内敏夫
〃	〃	今野久志
〃	〃	金子 学

1. はじめに

国土開発の進展に伴い、主要都市間を結ぶ道路網や観光道路などは、急峻で地形の険しい地帯を通過する場合が多くなり、道路の安全な交通を確保する上からも、道路を落石などから保護する必要性はますます増大している。

他方、これらの落石覆道を設計するに際し、道路橋の場合では“道路橋示方書”、カルバートでは“道路土工”があるのに対し、設計の基本となるものとしては、基本的な考え方を述べた“落石対策便覧”¹⁾（以下、“便覧”という）しか現在のところない。

このため、各道路管理者は設計の統一化を図るため、各機関毎にマニュアルを作成しており、北海道開発局でも委員会を作り“道路防災工調査設計要領（案）落石覆道編”²⁾（以下、“マニュアル”という）を制定している。

今回は、平成3年9月に、当研究室が、一般国道336号の美幌覆道で衝撃実験を実施したこともあり、この覆道をケーススタディーとして、北海道開発局の現行設計法の特徴および今後検討が必要な点について記述する。

2. 北海道の国道に建設された落石覆道の特徴

北海道の国道は、平成2年4月1日現在、実延長5843.4km³⁾であり、全国比では約12.5%の延長を占めている。国道網は、ほとんどの海岸線を網羅していることもあり、地形が急峻な地点を通過している箇所も多い。

このこともあり、落石が頻発もしくはその恐れが多い区間に落石覆道を設けているが、覆道の建設は昭和44年度より落石覆道の建設が始まり平成3年4月1日現在、全道で115箇所（総延長：18859m）の覆道が建設されている⁴⁾。

参考文献5)によれば、北海道の落石覆道の特徴は、以下のように要約される。

- 1) 落石覆道の構造形式別では、箇所数で約9割が現場打ちコンクリート構造（RC構造）である。
- 2) 地域の特徴では、美幌覆道が建設された広尾、えりも等の海岸線に建設されているケースが約9割を占めている。

3. “マニュアル”の特徴

3-1 衝撃力

“マニュアル”では、落石覆道の衝撃力の推定に、“便覧”でも推奨している、Hertzの衝突理論から導かれた、以下の式を採用している。

$$P_0 = 2.455W^{\frac{2}{3}} \lambda^{\frac{2}{3}} h_r^{\frac{3}{5}} i \dots\dots\dots (1) \quad P_0: \text{落石の衝撃力}$$

$$= 15.49W^{\frac{2}{3}} h_r^{\frac{3}{5}} i \dots\dots\dots (2) \quad W: \text{落石の重量}$$

λ : ラーメ定数

i : 衝撃材厚さによる割り増し率（表-1参照）

h_r : 落石の落下高さ（自由落下の場合）、または落石の換算落下高さ（斜面転落の場合）

ただし、上記の(2)式は(1)式の λ に100を代入して求めたものである。

このラーメ定数の100は、“便覧”によると、落石による衝撃力の算出式としては、まだ確立されたものではなく、種々の実験結果を経合的に判断すれば、適当な厚さの緩衝材のある場合には衝撃力は(1)式に $\lambda = 100 \text{ t/m}^2$ を代入して求めたPを超えることがないとの報告があり、これが根拠になっている。

ただし、上記は緩衝材として良質な山砂等を用い、落石荷重が2 t程度までについてのものであることなど、実験条件が限られたものであるので、この点を十分認識しておく必要がある。

3-2 落石による衝撃荷重の作用面積と頂版の設計

“マニュアル”では、落石による衝撃力は、着目している断面に最も不利に作用するよう载荷させ、図-1に示すように緩衝材による荷重の分散は45°の範囲を考慮し、その範囲に等分布荷重が作用するものと仮定して設計をすることとしている。

その際、道路軸直角方向の計算は、頂版の一部、柱、底版の一部を構成する単位奥行きを有する平面ラーメンとしての骨組解析で行うこととしている。

しかしながら、このことは、覆道延長方向に単位幅毎に1ケの落石が同時に落下したしたと同じ(図-2)であり、このような現象が確立論的に生じるケースはほぼゼロであるので、ここで用いている解析方法については、今後検討する必要がある。

3-3 緩衝材

“マニュアル”では、緩衝材は原則として砂を使用し90cmの一定厚とし、その上部に飛散防止材20cmを敷き均すこととしている。ただし、飛散防止材は、落石による衝撃荷重の分散効果は期待していない。

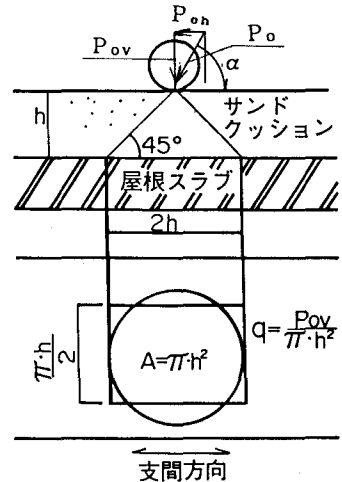


図-1 荷重分布

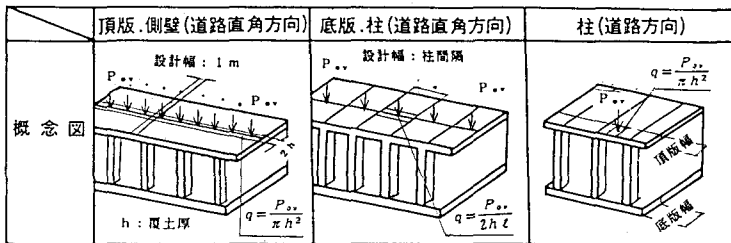


図-2 荷重概念図

この砂厚は、砂の緩衝効果を重錘加速度の値で評価した場合に、砂層厚を90cmとしたときにほぼ最大となり、それ以上砂層厚が増加してもその効果はほとんど変わらないとの鋼材倶楽部および金沢大学で行われた実験結果^{7) 8)}が根拠になっている。ただし、これらの落石衝撃力の割増係数を決めた実験条件は、鋼材倶楽部での実験⁸⁾の場合、落下高1~7m、重錘重量0.3~0.5 t o nの範囲で良質な山砂等を緩衝材として用いて行った実験結果に基づいていることを忘れてはならない。(図-3、表-1参照)

3-4 覆道頂版の落石による作用水平分力

作用水平分力は、図-1に示すように入射角 α に応じ、次式により算出する。

$$\alpha \geq 70^\circ \quad P_{oh} = P_o \cos \alpha \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\alpha < 70^\circ \quad P_{oh} = P_o \sin \alpha \times \mu \quad \dots \dots \dots (4)$$

(ただし、摩擦係数 $\mu = 0.35$)

3-5 覆道背面上の落石による断面計算用の土圧

覆道背面上の落下による地下壁への作用土圧については、現在までのところ確立されたものがないので、

“マニュアル”では、“建築基礎構造設計基準・同解説（日本建築学会）”で採用しているブーシネスクの考え方をもとに提案されている式を変形して、以下の式で計算することとしている。（図－４参照）

$$\Delta P_{oc} = \frac{3P_{ov}X^2z}{\pi(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \dots\dots\dots (5)$$

- Δ P_{oc}：地下壁の任意点に作用する単位面積の土圧
- P_{ov}：地表面に載荷される鉛直分力
- r：荷重の作用点から土圧を求めようとする位置までの水平距離
- z：荷重の作用点から土圧を求めようとする位置までの鉛直距離
- x：荷重の作用点から地下壁までの最短距離

（５）式で、壁面への荷重分布を等分布荷重と見なし x = r と置き換え p の作用位置を土圧の分布限界である覆土厚 90 cm に合わせ r = 1.0 と見なし差し支えないものとし、r = 1.0m、x = 1.0m を代入すると（６）式となり Δ P_{oc} が求められる。

（図－５参照）

$$\Delta P_{oc} = \frac{3P_{ov}z}{\pi(1+z^2)^{\frac{5}{2}}} \dots\dots\dots (6)$$

- Δ P_{oc}：地下壁の任意点に作用する単位面積の土圧
- P_{ov}：落石による衝撃力の鉛直分力
- z：荷重の作用点から土圧を求めようとする位置までの鉛直距離

3－6 覆道背面上の落石による安定計算用の土圧

これについても“マニュアル”では、ブーシネスクの考え方を展開して以下のように定めている。

（図－５参照）

$$\Delta P_{oi} = \frac{4P_{ov}z}{\pi(1+z^2)^2} \dots\dots\dots (7)$$

- Δ P_{oi}：覆道全長に作用する 深度方向単位長さ当たり土圧
- z：3－５の Z と同じ
- P_{ov}：落石による衝撃力の鉛直分力

3－7 衝撃力の作用位置

落石の形態は、自由落下型と斜面転落型の２種類が考えられるが、落石覆道の建設箇所で落石の軌跡を考えた場合に、何通りかのケースが考えられるので、“マニュアル”では落石による衝撃力は、着目している断面に不利になるように載荷することとしている。

しかしながら、その場合には多数の組み合わせが考えられるので、設計の簡素化のため、斜面転落型については、図－６、で L (m) を求め、これより作用位置については図－６、の３ケースに分類し、その時の落石衝撃力は表－２の値を使うこととしている。

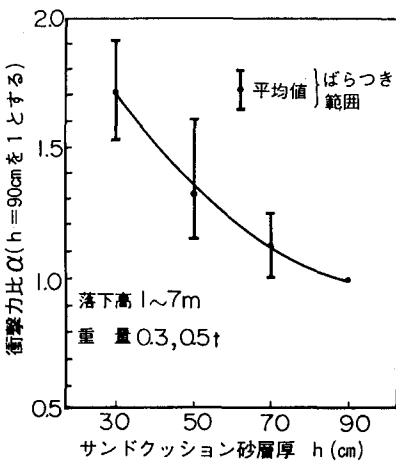
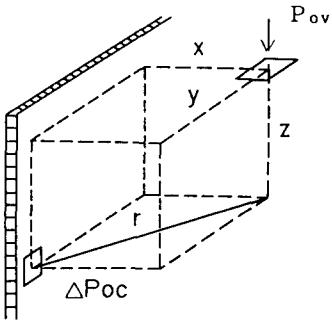


図 3 サンドクッション厚の影響

表－1 緩衝材厚さによる落石衝撃力の割増係数

緩衝材厚さ (cm)	割増係数
90	1.00
80	1.05
70	1.12
60	1.22
50	1.32
40	1.52
30	1.71



図－４ 落石による土圧

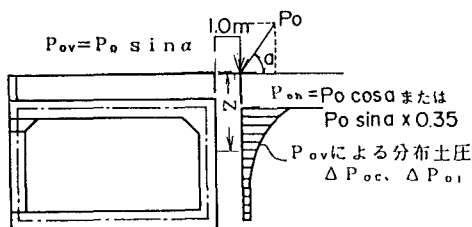


図-5 落石衝撃力による水平力の載荷方法

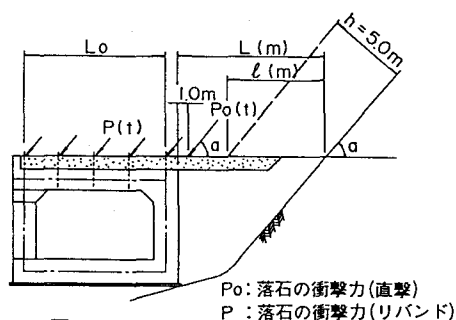


図-6a

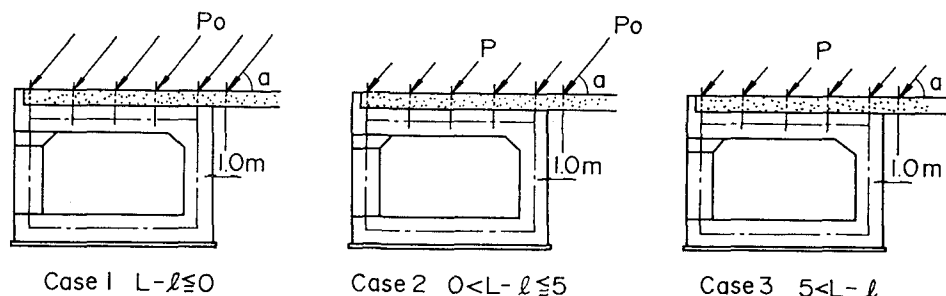


図-6b 落石衝撃力と作用位置

4. 美幌覆道の地形概要

4-1 斜面の状況

現地の山側地形は、平均傾斜角度 $50^\circ \sim 60^\circ$ 、その比高は $80 \sim 120\text{m}$ と急峻な地形であり、山肌は上部は疎林、下部は露岩している。斜面の破壊状況は亀裂が多く入っており、 0.5m 程度の浮き石が見られるが、落石の落下形態は斜面の法長、斜面の勾配、落石の最大跳躍量などの現場条件より斜面転落型となっている。

現地での落石の堆積状況は、 $\phi 0.1 \sim 0.3\text{m}$ 程度の転石が、現在のところ、斜面直下のポケット部に留まっているが、経年的には、その量は増加している。

また、既設の対策工として擁壁工および簡易土盛マウンド工を施工済みである。

4-2 設計に採用した落石形態

落石覆道を設計施工する前の調査で、設計の対象とする石の形状は、 $0.7\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ であり、落石重量は 0.46ton と決めた。落石の落下形態は、先にも述べたが、斜面転落型であるので、このタイプで衝撃力の推定を行っている。代表的な断面として3断面での計算をし、その場合に使用した換算落下高は $50\text{m} \sim 73\text{m}$ であった。

なお参考文献5)によると、設計時に用いている落石の高さおよび落石の直径に関し、高さでは国道の全道統計で $20 \sim 30\text{m}$ にピークがあり最高落下高は 123m であった。また、直径では、 $0.8 \sim 1.2\text{m}$ が多く占め最大で 3.0m のものもあった。

5. 美幌覆道の落石衝撃力の計算例

表-2 落石衝撃力と作用方向力

覆土の種類	落石衝撃力	作用方向
崖	$P = 0.8 P_0$	斜面方向
緩衝材	$P = 0.4 P_0$	斜面方向

※ P_0 は第一落下地点における直接衝撃力であり、式(2)より算出する。

覆土の種類は第一落下点における緩衝材を指す。

L : 覆道背面から斜面までの水平距離 (m)

l : 落石の水平到達距離 (m) ($= \frac{h}{\sin \alpha}$)

L_0 : 頂版軸線スパン (m)

5-1 衝撃力

美幌覆道の緩衝構造は、“マニュアル”通りであるので、緩衝材厚さの割り増し係数を1.0として式(2)で衝撃力を計算している。ただし今回の場合には4-1で述べたように落石形態は斜面転落型であるので、4-2で述べた換算落下高さを使用している。この結果、 $P_0=121\text{ t}$ となるが、図-6の $L-l$ が5mより大きいので、落石衝撃力は表-2の緩衝材のケースを使い $P=0.4P_0=48\text{ t}$ が斜面方向に作用することになるが、設計では丸めて50 t としている。

5-2 設計荷重

落石覆道の設計荷重は、死荷重(本体+緩衝材+飛散防止材)、落石荷重、地震時の影響および土圧が主たるものであり、これらの組み合わせで設計することになる。

本覆道の頂版の断面設計では、落石荷重として3-2で述べたように斜面方向の落石衝撃力50 t ンの鉛直分力である約43 t ンが緩衝材表面に作用することになる。このことは、緩衝材による荷重分散を考慮すると、 17 t/m^2 の等分布荷重(図-1のq)が覆道本体にかかるものとして設計することになる。この等分布荷重は、頂版スパンの両支点、スパンの1/4点、2/4点および3/4点に2hの幅(図-1参照)で作用するものとし、それに死荷重分を合算して断面力を求めている。

また、側壁の断面設計では、落石に関する荷重としては、覆道背面1mに落下した時の落石による集中荷重の水平成分と、3-5で述べたように落石を起因とする土圧、背面の埋戻土による土圧および死荷重が作用しており、これらを外力として断面力を求めている。

頂版および側壁の断面設計では、単位奥行きを有する平面ラーメンとして計算しているが、どちらも曲げモーメントにより断面が決定され、その際、図-7に示してあるように頂版厚は1.1m、側壁厚は1.0mとなった。なお、頂版の設計曲げモーメントの中で、落石荷重により発生するモーメントは、全体の55%を占めていた。

覆道の滑動に対する安定計算では、常時土圧、落石に関する水平力および地震時の水平力等が外力として作用するものとする。その許容安全率としては、通常道路橋示方書に示される基礎底面における滑動の許容安全率を採用し、常時で1.5、地震時では1.2とする。なお、落石時の値は地震時と同様に1.2を用いることとしている。本覆道では常時での安定計算結果は3.5となり十分な安全率が得られ、地震時および落石時に関してもそれぞれ1.43、3.2となり共に許容安全率1.2に対して安全の領域となった。

表-3 代表断面計算結果

落石重量 W (t)	水平距離 L-l (m)	斜面の 摩擦係数 μ	緩衝材のラ ーメ定数 $\lambda\text{ (t/m}^2\text{)}$	緩衝材厚 の割増 係数 i	落石衝撃 荷重 P. (t)	落 石 衝撃力 P(t)	作用位置 (図-6参照)
0.46	25.7	0.15	100	1.0	121	48	3

6. まとめ

美幌覆道を例にとり、北海道開発局で行っている落石覆道の設計手法を簡単に示したが、“マニュアル”の特徴を要約すると以下のとおりである。

- 1) 基本的な衝撃力の推定式、衝撃荷重の作用面積、緩衝材および緩衝材厚は“便覧”に準拠している。
- 2) 落石形態を、2パターン化し、斜面落下型の場合には、ポケット幅により落石衝撃力の作用位置をさらに3ケースに分け、その場合には覆土の種類により設計に使う落石衝撃力を低減している。
- 3) 斜面からの落石を考慮しその場合の作用水平力の規定を設けてある。

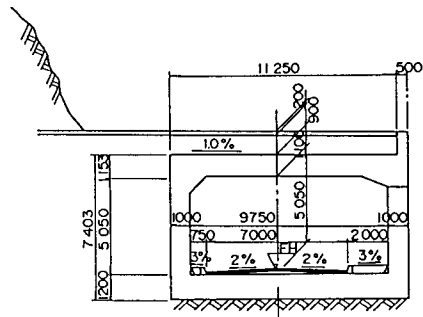


図-7 美幌覆道断面図

- 4) 覆道背面上の落石による土圧も設計で考慮している。
- 5) R C 構造の覆道でも特に頂版の計算は、単位奥行き幅を有する平面ラーメンとして骨組解析で行うこととしている。

7. 落石覆道の構造面に関する今後の検討課題

以上、北海道開発局で採用している落石覆道の設計手法について、基本的な考え方およびその特徴を述べたが、落石覆道に関する研究成果が少ないこともあり、“マニュアル”は現在までに得られた知見をもとに作成されたものである。したがって、これから解明すべき問題点も多いが、構造研究室としては、以下の課題に今後取り組む予定である。

- 1) 実際の設計では、落石覆道を道路軸方向には単位長さしかないラーメン構造と仮定して計算しているが、北海道の場合には、本論文の2章でも述べたようにR C 構造の落石覆道が多く、このケースでは、実構造物は12mを1ブロックの標準延長²⁾として建設された立体構造物である。このため、落石覆道を折板理論等により3次元の解析を行えば、固有振動周期も平面ラーメン構造と違うことや、落石覆道の頂版を版として取り扱えるので、荷重分担を期待することができる。最近まで、この面に関する既往の研究⁹⁾は少ないので、今後の重点課題として取り組む予定である。
- 2) 従来の研究成果では、各種の実験で重錘に生じた加速度に重錘質量を乗じた重錘衝撃力と振動便覧の式の対比により、それぞれの衝撃力に関する実験式が提案されてきた。この場合の衝撃力はあくまでクッション材に衝突した際の入力値であり、精度良く計測できる土圧計もその当時はなかったこともあり、クッション材下面に生じる土圧衝撃力(=覆道本体への入力値)の研究は余り行われていなかった。このこともあり、落石による衝撃荷重は45度に分布する円形の等分布荷重(総量は重錘衝撃力と同じ)として静的にかかるものとして扱っている。しかしながら、最近の構造研究室による一連の実験の結果、緩衝システムに砂を使った場合には動的応答倍率(土圧衝撃力/重錘衝撃力)が1以上になるとの報告¹⁰⁾もあるので、この点に関する研究も今後行う必要がある。
- 3) 動的応答倍率の問題も重要であるが、衝撃荷重の載荷時間の影響も大きいので、静的には問題とならないような部材でも、動的には大きな応答を示すことが予想されており、この問題の解明も必要である。
- 4) 緩衝材として、砂が標準となっているが、上記2)、3)でも述べたように、緩衝材としての砂にはいろいろな問題点があるので、構造研究室では、室蘭工業大学建設システム工学科の松岡教授を始めとして同研究室の力強いサポートを受け、新たな緩衝システムの開発を行っており、今後、早急にこの緩衝システム設計手法を確立させる予定である。

<参考文献>

- 1) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧，昭和58年7月
- 2) 北海道開発局建設部道路建設課監修：道路防災工調査設計要領(案)落石覆道編，平成2年3月
- 3) 建設省道路局：道路ポケットブック1991，平成3年10月
- 4) 北海道開発局：道路現況調書，平成3年4月1日
- 5) 東紀夫・山内敏夫・城野忠幸：北海道の国道における落石覆道の現状について，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム，土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会，1991年3月
- 6) 土木学会：振動便覧，昭和60年10月
- 7) 建設省土木研究所：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，昭和57年3月
- 8) 社団法人 鋼材倶楽部：新しい落石覆の開発に関する研究，昭和48年4月
- 9) 菅田紀之・岸徳光・中野修・松岡健一：剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析，構造工学論文集、V o 1 . 3 8 A、1992
- 10) 中野修・今野久志・金子学・小野裕二：E P S の落石覆工緩衝材への適用について，建設省技術研究会、平成3年11月