

I-51

美幌覆道における重錘落下衝撃実験

開発土木研究所	正員	中野 修
同	同	今野久志
同	同	金子 学
室蘭工業大学	同	岸 徳光

1. はじめに

従来、落石覆道の緩衝材には砂が用いられてきたが、緩衝性能に限界があること、経年変化が大きいこと等、大規模な落石荷重を想定した場合には特に問題が多いことが知られている。

当研究室ではEPSの緩衝材としての有効性に着目し、EPSを用いた落石覆道用緩衝システム（以後三層緩衝構造と呼ぶ）を開発し、一昨年度より模型実験による緩衝効果の検討を進めてきた。これらの実験により、三層緩衝構造が優れた緩衝性能をもっていることが確かめられたため、今回は実際の覆道で実物規模の実験を行い、実用化への手がかりとすることとした（写真-1参照）。



写真-1 実験風景

2. 実験概要

2-1 美幌覆道

今回、実験を行った美幌覆道は、北海道開発局帯広開発建設部が落石対策のため、一般国道336号広尾町に現在建設を進めている覆道である（図-1参照）。

本覆道は道路防災工調査設計要領¹⁾に従って設計されたRC箱型構造の覆道である（写真-2参照）。主要な諸元は覆道本体に作用する落石荷重50tonf、頂版厚1.1m、壁厚1.0m、スパン長さ12mで緩衝材には90cm厚の砂層を用いる事となっている。

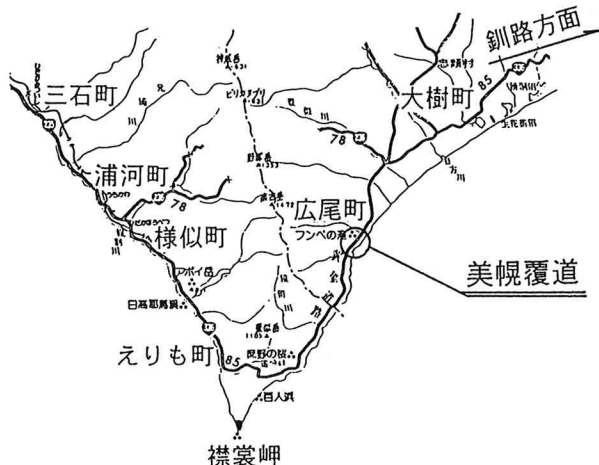


図-1 美幌覆道（実験現場）位置図

Impact Test of 3-Layered Shock-Absorbing System Provided on Real Rock Shed Structure in Bihoro.
by Osamu NAKANO, Hisashi KON-NO, Manabu KANEKO and Norimitsu KISHI.

2-2 実 験

三層緩衝構造（構造については図-2右上○内を参照のこと）を覆道頂版上に設置し、球底半径50cm、重量3tonfの重錘をトラッククレーンにより20mの高さに吊り上げ、緩衝構造上に自由落下させる実験を行った（図-2参照）。

この実験では、同一箇所に繰り返して落石が発生した場合を想定して、同一箇所に3回反復して重錘を落下させ、芯材RC版（荷重分散材として使用）の耐久性について評価することとした。

また、三層緩衝構造との性能比較のために、現在標準的に用いられている敷砂についても実験を行った。本実験では敷砂厚を90cmとしている。

特に敷砂を緩衝材として用いた場合には、過去の屋外大型模型実験結果²⁾より、実構造への伝達衝撃力分布の集中度が大きいこと等が明らかになっている。そのため、本実験では重錘重量2tonf、3tonfに対する落下高さをそれぞれ10m、5mとし、覆道コンクリートが状態Ⅰ（弾性範囲）であることを確認かつ推定しながら落下高さを上げていった。なお、本実験に用いた緩衝材料の材料特性は表-1に示すとおりである。



写真-2 美幌覆道

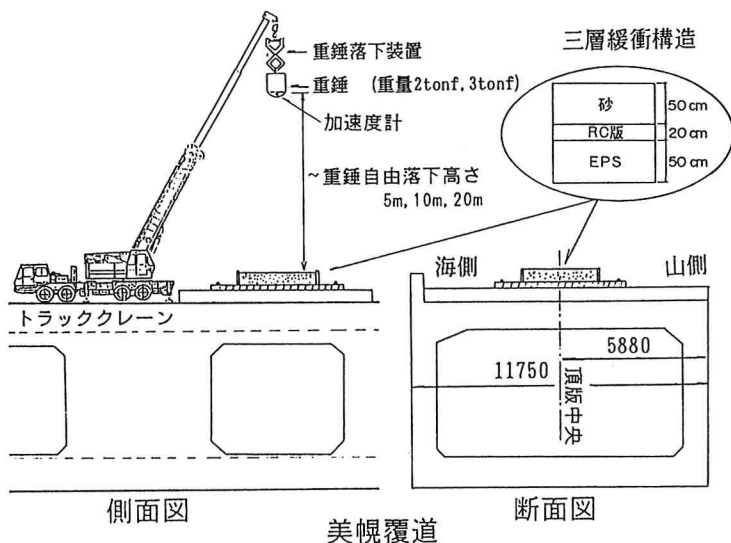


図-2 実験状況概念図

2-3 計測項目

実験の計測を行うにあたり、重錘には加速度計（4点）を、覆道頂版にはロードセル（31点）、加速度計（7点）、ひずみゲージ（11点）を設置し、実験時に重錘が緩衝材に与える衝撃力（以後重錘衝撃力と呼ぶ）、緩衝材から覆道本体に伝わる衝撃力の強度（以後伝達衝撃力強度と呼ぶ）と、これに分布面積をかけた伝達衝撃力、覆道頂版の応答加速度、覆道本体の鉄筋に生じるひずみ応力をとらえることとした。

測定する振動現象が高速であるため、測定器からの出力は直流増幅器を介してアナログデータレコーダーに収録し、ウェーブメモリーでA-D変換の上、パソコンにより図化処理した。なお測定方法の詳細については「衝撃実験の計測方法とデータ処理に関する一考察」³⁾を参照されたい。

表－１ 緩衝材材料特性表

材料	適 用	寸 法	そ の 他 の 諸 元
砂	三層緩衝構造の上部緩衝材及び砂単独	—————	湿潤密度 $\approx 1.25\text{kg/cm}^3$ 含水比 $\approx 16.7\%$
R C 版	三層緩衝構造の芯材 (荷重分散材)	5200 $\times$ 5200 $\times$ 200mm	単鉄筋 R C 版 (D13, 100mm-ctc) 設計基準強度: 210kg/cm^2 $\sigma^{28} \approx 310\text{kg/cm}^2$
E P S	三層緩衝構造の 下部緩衝材	2000 $\times$ 1000 $\times$ 500mm	製法: 型内発泡法 密度: 20kg/m^3

3. 実験結果及び考察

実験ケースと実験結果の概要について表－２に示す。実験条件は三層緩衝構造の場合重錘重量3tonf、落下高 20mであるが、敷砂の場合には最大でも重錘重量3tonf、重錘落下高さは 10mと異なっている。

表－２ 実験ケース、実験結果一覧表

実験 番号	緩衝材	重 錘 重 量	落下高	最 大 重 錘 衝撃力	最 大 伝 達 衝撃力	備 考
1-1	三 層	3tonf	20m	81tonf	81tonf	同一箇所への反復重錘落下試験の 1 回目
1-2	緩 衝			70tonf	52tonf	// 2 回目
1-3	構 造			59tonf	61tonf	// 3 回目
2-1	敷 砂	3tonf	5m	23tonf	53tonf	重錘落下高さは三層緩衝構造の場合の1/2
2-2			10m	49tonf	87tonf	
3-1	敷 砂	2tonf	5m	17tonf	33tonf	
3-2			10m	37tonf	56tonf	

3－１ 衝撃力の評価

重錘衝撃力は重錘重量に重錘の最大加速度 (G) をかけたものであるが、この評価方法は衝撃実験の際に從來から用いられてきたものである。

一方、伝達衝撃力は緩衝材の下に覆道頂版に設置したロードセルにより測定した単位面積当りの荷重強度 (伝達衝撃力強度) から、その応力分布を台形近似して算定した伝達応力の総量である。

覆道構造物の側から見て、伝達衝撃力は構造物が受けた力を直接的に算定した値であるため、荷重の分布形状を正確に把握する事により、間接的に計測した重錘衝撃力よりも正しく衝撃力を評価することができるものと考えられる。なお、今回は荷重の分布形状を正確に把握するため、ロードセルを20cm間隔に配置している。

三層緩衝構造の場合、同一箇所への反復落下では繰り返し回数の増加に伴い、重錘衝撃力が低下する傾向にある。これは、R C 版の破壊が進行し、変形しやすくなる事により重錘に発生する加速度が低下したためと考えられる。3回の重錘落下実験後の R C 版の状態を写真－３に示す。コンクリートに剥離が見られるものの、鉄筋は破断せず、3回目の時点でもなお機能を有していた事がわかる。反復落下により衝撃力が低下する傾向は、伝達衝撃力では明確には見られなかったが、重錘衝撃力と伝達衝撃力は比較的に近い値を示していた。これらの結果から、三層緩衝構造の場合 3tonf、20mの落石の条件で覆道に作用する衝撃力は 50～80tonf程度であるものと考えられる。

敷砂を緩衝材として行った実験では、重錘衝撃力は伝達衝撃力と比べ、1/2程度の小さい値を示している。これは、砂層の慣性力の影響⁴⁾によるものと考えられるが、砂は含水比、締固め度、粒度等により特性が大きく変化するため、減衰の程度については定量的に明らかになっていない。敷砂を用いた場合の衝撃力と振動便覧式⁵⁾による衝撃力を比較すると表-3のようになる。表より、便覧式による衝撃力は実験結果より1.5~2.0倍程度大きい値を与えていることがわかる。これより設計的には便覧式は安全側の値を与えているようである。

一方、三層緩衝構造を用いた場合と敷砂を用いた場合の伝達衝撃力に関する実験結果を比較すると(表-2)、三層緩衝構造を用いた重錘重量3tonf、落下高20mの場合には敷砂を用いた重錘重量3tonf、落下高5~10mの場合とほぼ同程度の衝撃力を与えている事がわかる。

これより、本三層緩衝構造のエネルギー吸収能力は、落下エネルギーに換算すると、敷砂90cmの場合より1.5~2.0倍程度優れていると考えられる。



写真-3 実験後の芯材RC版

3-2 伝達衝撃力分布

図-3に三層緩衝構造を用いた場合と、敷砂を用いた場合の覆道頂版上での伝達衝撃力分布を示す。一方、三層緩衝構造を用いた場合と同一条件(重錘重量3tonf、落下高20m)で敷砂厚90cmにおける伝達衝撃力分布半径、強度を便覧式より求めると、それぞれ0.9m、7.6kgf/cm²となる。

これに対して、三層緩衝構造を用いた場合の実験結果は、図より分布半径が1.8m、強度が第1回目

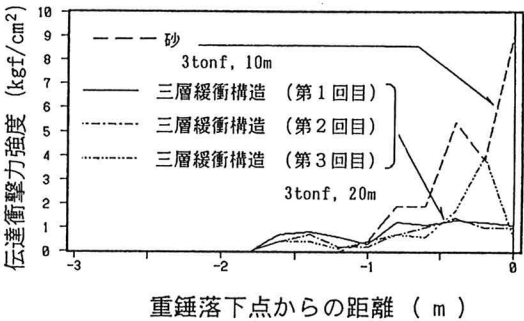
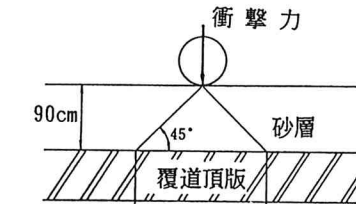


図-3 伝達衝撃力分布

表-3 振動便覧式による衝撃力と敷砂を用いた場合の衝撃力の比較



振動便覧式：

$$\text{衝撃力} = 15.49 \times \text{重錘重量}^{2/3} \times \text{落下高さ}^{3/5}$$

重錘重量	落下高さ	衝撃力	実験結果*
3tonf	5m	85tonf	53tonf
	10m	128tonf	87tonf
	20m	194tonf	—
2tonf	5m	65tonf	33tonf
	10m	98tonf	56tonf

*敷砂を用いた場合の伝達衝撃力

落下の場合で 2.0kgf/cm^2 前後の値となっており、便覧式より応力分散域が半径で2倍程度向上し、衝撃強度も分散面積に対応して低減しているようである。反復落下実験においても、第2回目までは第1回目と同様の性状を示しており、第3回目は多少中央部に衝撃力が集中しているようであるが、伝達衝撃力の分布には顕著な差が現れていない。

これにより、本緩衝構造システムは、重錘重量3tonf、落下高さ 20mで3回程度の同一位置への繰り返し落下に対して、効率的に衝撃力を吸収し、かつ十分な耐久性を備えていることが明らかとなった。

なお、敷砂を緩衝材として用いた場合、伝達衝撃力はほぼ重錘半径に等しい半径50cm程度の範囲に集中しており、荷重分散効果はほとんど見られなかった。

3-3 三層緩衝構造における伝達衝撃力の強度と衝撃力の時刻歴変化について

図-4に伝達衝撃力の強度に関する三次元的な時系列分布と重錘衝撃力、伝達衝撃力の時刻歴波形を示す。

まず、衝撃力波形について言及すると、図より重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形の立ち上がりに約15msec程度の時間差があることがわかる。これは、重錘衝突後、衝撃波が敷砂および芯材RC版、EPS材を相互に干渉しながら進行するためであると考えられる。

最大重錘衝撃力は、立上りより10~15msec経過後に発生している。また、最大重錘衝撃力に関しては、波形立上り後第1回目は20msec、第3回目は35msecと反復回数の増加とともに若干おくれて発生しているようである。

波動の時刻歴分布形状につ

いて見ると、重錘衝撃力の場合、第1回目には最大応答を示す第1のピークが最初に発生し、その後ゆるやかな第2ピークの山が発生して徐々に減衰していく。また、反復回数が増えるに従い第1と第2ピーク間の谷部の深さが大きくなり、第2ピークの値も大きくなっていく傾向にある。第3回目落下においては第1と第2ピーク値はほぼ同じ値となっている。これは、繰り返し落下により、芯材RC版の落下点近傍部の塑性域が広がり、剛性低下が進行していくためと考えられる。

一方、伝達衝撃力分布は、反復落下によって最大値が低下してくるものの、時間的な分布形状に大きな変化はみられない。

伝達衝撃力の三次元的な強度分布波形を見ると、第1回目落下の場合には芯材RC版の大きさ一杯に、ほぼ一様に衝撃力が分散しているが、落下回数を重ねるごとに落下点から離れた周辺部の衝撃力の分担性能が

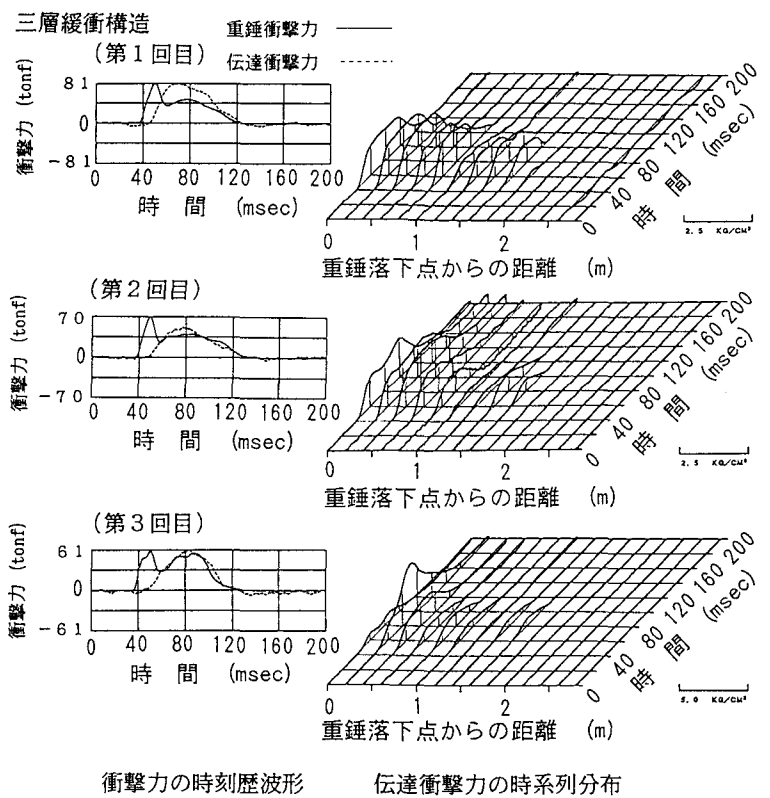


図-4 時刻歴波形図

低下してくるようである。これは前記のように芯材ＲＣ版の塑性化が進行しているためと考えられる。

しかしながら、第３回目落下時点でも芯材ＲＣ版の鉄筋破断や、重錘の貫通現象は見られず、この程度の衝撃荷重載荷に対しては緩衝材としての機能を十分果たすことが可能であるものと考えられる。

4. まとめ

実験の結果、以下に示す事柄が明らかとなった。

1. 敷砂を緩衝材とした場合

- 1) 重錘衝撃力は、伝達衝撃力の約半分の値を示しており、重錘の加速度で衝撃力を評価することに問題があることがわかった。
- 2) 伝達衝撃力は、便覧式による計算値より小さかった。便覧式で算出する衝撃力は設計値としては安全側であることがわかった。
- 3) 荷重分布範囲は、ほぼ重錘の直径に等しく、荷重分散効果は期待できない。このこともあり、伝達衝撃力分布は非常にシャープな形になり、ピーク値は便覧で考えている等分布荷重強度より大きなものとなっていた。

2. 三層緩衝構造の場合

- 1) エネルギー吸収能力は落下エネルギーに換算すると敷砂90cmの場合より1.5～2.0倍優れている。
- 2) 荷重分布範囲は半径2m程度で、敷砂90cmを緩衝材とした場合の計算値の約2倍となっている。この結果、荷重強度は計算値の1/4程度に低減できた。
- 3) 同一箇所に繰り返し重錘落下を行った場合でも、緩衝性能の低下はほとんど見られなかった。実際の覆道で、落石が同一箇所に生じる可能性は低く、実用上は保守の必要はほとんど無い。

5. 謝辞

本実験は三菱油化（株）との共同研究の一環として、北海道開発局帯広開発建設部のご協力を得て実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

<<参考文献>>

- 1) 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），平成2年3月
- 2) 中野，松岡ほか：敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力，土木学会北海道支部論文報告集，第48号
- 3) 中野，岸ほか：衝撃実験の計測方法とデータ処理に関する一考察，土木学会北海道支部論文報告集，第48号
- 4) 建設省土木研究所動土質研究室：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
- 5) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月