

三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化

AN EVALUATION METHOD ON TRANSMITTED IMPACT FORCE OF
THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEM

佐藤昌志* 岸 徳光** 松岡健一***

Masashi SATO, Norimitsu KISHI and Ken-ichi G. MATSUOKA

* 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒050 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)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

To ensure the safety of rock-shed structures against rock falling, it is important to study the issues of: ① establishment of evaluation method of impact force due to rock falling, ② making clear the dynamic behavior of rock-shed under impact loading and ③ development of high performance absorbing system.

In this study, an evaluation method on the transmitted impact force of three-layered absorbing system is proposed. This absorbing system is developed by authors and composed of three layers (sand top layer, RC core slab and EPS(Expanded Poly-Styrol) bottom layer). This method was derived based on ① the conservation rule of momentum among falling rock, sand layer and RC core slab, and ② the relationships between the transmitted impact energy to the bottom layer and the plastic strain energy of the bottom EPS layer.

Comparing the results obtained by this method with experimental ones, it was clear that the proposed method can be practically applied to evaluate an impact force for three-layered absorbing system.

Key Words: impact problem, transmitted impact force, three-layered absorbing system

1. はじめに

平成元年に起きた福井県越前海岸での大規模な落石災害を契機として、落石覆工構造物の安全性に関する研究が盛んに行われるようになった。落石覆工の安全性確保のためには、1) 落石等によって本体構造物に作用する衝撃力の正確な算定、2) 落石覆工構造物の耐衝撃特性の解明、3) 緩衝性能や荷重の分散性に優れた緩衝構造の開発、などが必要であり、この種の問題に関しても精力的な研究が続けられている^{1)~5)}。いずれの問題も落石覆工の安全性に対して重要な課題であるが、特に落石等によって発生する衝撃力の算定は設計の基本的条件の設定として重要と考えられる。

この衝撃力は緩衝構造と密接な関係がある。これまでの研究により、従来からの敷砂材を緩衝構造として用いる場合には、落石等の衝突によって発生する敷砂への衝撃力と本体構造へ伝達される衝撃力(以後、本文ではこれを伝達衝撃力と呼ぶ)は大きく異なることが明らかとなっている⁴⁾。しかしながら、敷砂材を用いる場合には適正なラウメの定数 λ の設定により振動便覧式⁶⁾等で伝達衝撃力も評価できることが明らかにされている⁴⁾。

一方、著者らは敷砂材より優れた緩衝性能を有する緩衝構造として三層緩衝構造を開発し、種々研究を行って

きた^{7)~11)}。三層緩衝構造は表層に敷砂、芯材として鉄筋や新素材繊維製ロッドを補強筋とするコンクリート(RC)床版、裏層に発泡スチロール(以後、本文ではこれをEPSと呼ぶ)材を用いたものである。本構造は三種類の異なる波動伝播特性を有する材料の組み合わせにより、優れた緩衝性能を得ようとするものであり、その効果は実規模の実験によって確認されている^{9)~11)}。これまでの実験的研究によれば、三層緩衝構造によって覆工本体構造へ伝えられる伝達衝撃力は重錘や緩衝構造表面が受ける衝突衝撃力より小さいことが明らかとなっている。しかしながら、未だ三層緩衝構造を用いた場合の伝達衝撃力算定に関する理論的な取扱いがなされていない。

三層緩衝構造は物理的、力学的特性が大きく異なる3つの材料から構成される構造であることから、この緩衝性能を各材料の動特性を考慮して理論的に定式化することはかなりの困難を伴うものと考えられる。しかしながら、三層緩衝構造を落石覆工の実設計に適用するためには、衝撃力評価式の定式化を行う必要がある。本論文では、実証実験結果に基づいた三層緩衝構造の各層の動特性を考慮し、エネルギー論的観点から三層緩衝構造の伝達衝撃力評価式の定式化を試みた。

2. 伝達衝撃力算定のための基本的な考え方

本論文で対象とする三層緩衝構造は、表層に 50 cm 厚の敷砂、芯材として 20 ~ 30 cm 厚の RC 床版、裏層に 50 ~ 100 cm 厚の EPS 材を用いた標準的な構成を基本とし、大きさは 4×4 (m) とする。著者らは、これまでこの種の緩衝構造に関する詳細な重錘落下衝撃実験を行い、重錘衝突時の減速加速度から得られる重錘衝撃力（加速度に重錘質量を乗じて算定）及び裏層底面から覆工本体構造へ伝達すると考えられる伝達衝撃力（裏層底面に設置した衝撃応力測定用ロードセルによる応力分布の総和として算定）を測定し検討を行ってきた。本緩衝構造は落石等による衝撃力を主に表層材及び裏層材で吸収する構造であり、特に裏層 EPS 材による吸収量が大きいものと判断される。なお、伝達衝撃応力の測定法に関しては、文献 10) に詳細に示されていることより本文では省略することとする。

一方、芯材 RC 床版の機能は、表層の敷砂で受けた落石等の衝撃力を広く分散させて裏層 EPS 材へ伝播させるものである。従って、芯材 RC 床版は衝撃力による多少の塑性変形は許容するものの、落石等の衝突物が貫通することを防止する能力をもつことが必要である。すなわち三層緩衝構造は芯材 RC 床版の上述の機能が確保されることにより、初めて表裏層材の緩衝性能を期待することの出来る構造となる。

表裏層材の緩衝特性を検討する場合において、表層材の敷砂は粒状体であり、これを理論的に取扱うことは困難である。一方、裏層材の EPS 材は材料の力学的特性が明らかであることより、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を論ずることは比較的容易である。吉田等は重錘衝撃を受ける EPS 材単層の伝達衝撃力を理論的に推定している¹²⁾。

本論文では、これまで著者等によって実施された実証実験結果^{10), 11)}を基に芯材 RC 床版の機能維持のための床版厚の確保を前提として、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮した三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法を検討する。伝達衝撃力の算定を裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮して行うためには、裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーを推定しなければならない。三層緩衝構造では裏層 EPS 材の上に表層である敷砂及び芯材 RC 床版があり、敷砂上に落石等が衝突するため衝突によって敷砂の飛散や RC 床版に損傷が起こる。このため落石等がもつ位置エネルギーの全てが裏層 EPS 材に作用することにはならない。これらの吸収エネルギーを算定することは非常に困難であるが、落石等の衝突によって表層敷砂材、芯材 RC 床版が一体となって運動する時の速度を知ることが出来れば、裏層 EPS 材に作用するエネルギーを算定することができる。

今、衝突初期において、裏層 EPS 材の存在を無視出来るものとするれば、落石、敷砂、RC 床版に関する衝突前後の運動量は等しくならなければならない。この算式

を利用して衝突後の運動エネルギーを求めることが出来る。この場合でも衝突後の落石の跳ね返り等の挙動を把握する必要がある。しかしながら、これらの挙動把握を行うことも容易ではない。従って、ここでは設計的に安全側になるように、衝突後の落石は敷砂、RC 床版と一体となって運動するものと仮定する（以下、この一体とした系を合質点と呼び、その質量を合質量と呼ぶこととする）。

落石等の衝突によって合質点に与えられる運動量としては、1) 落石等がもつ運動量、あるいは、2) 衝突衝撃力として与えられる力積、を用いて評価する方法が考えられる。1) の場合は合質点が完全に自由に運動できることが必要である。しかしながら、落石の落下高さが小さい場合には、衝撃力も小さくなり裏層 EPS 材による反力の影響が相対的に大きくなるため、この条件が十分に満足されないものと考えられる。これに対して、2) の場合は衝撃力の値に裏面の影響が含まれているため、1) の場合より実際に近い状態で合質点に与えられる運動量が評価できるものと考えられる。これより、ここでは衝突時の合質点の運動量として、2) の落石によって発生する衝突衝撃力による力積を用いて評価するものとする。

以上の考え方に基づいた伝達衝撃力算定のための基本的な考え方を整理すれば、

a) 芯材 RC 床版に作用する衝撃力の推定：

- 1) 図-1 には、剛基礎上に設置されている三層緩衝構造（表層が 50 cm 厚の敷砂、芯材が 20 cm 厚の RC 床版、裏層が 50 cm 厚の EPS 材）に、重量 3 tf の重錘を高さ 30 m から自由落下させた場合の重錘衝撃力と伝達衝撃力波形を比較して示している¹⁰⁾。図より、重錘衝撃力の第一ピーク発生以降の波形と伝達衝撃力が類似の波形分布を示していることにより、重錘衝撃力の第一ピークは重錘が表層の敷砂材を介して芯材 RC 床版に衝突したことによって発生したものと推察される。
- 2) この落石等が表層敷砂材を介して芯材 RC 床版に衝突する状態は、芯材 RC 床版の剛性が比較的高く作用時間が短いことより、剛基礎上に設置された敷砂単層上に衝突する状態と類似なものであるものと考えられる。
- 3) また、表層敷砂厚が 50 cm と比較的薄く、かつ芯材 RC 床版が裏層 EPS 材に支持された状態になっていることより、表層敷砂材は主に芯材 RC 床版に対する緩衝材として機能していると考えられる。これより、RC 床版に作用する衝撃力は重錘衝撃力に等しいと仮定するものとする。
- 4) 三層緩衝構造に関する実証実験結果より、その最大値はラーメの定数 λ が $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式を用いて近似出来るものとする¹⁰⁾。

b) 裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーの推定：

- 5) 大きな衝撃力が芯材 RC 床版に作用する場合には、芯材 RC 床版の大変形や貫入あるいは貫通

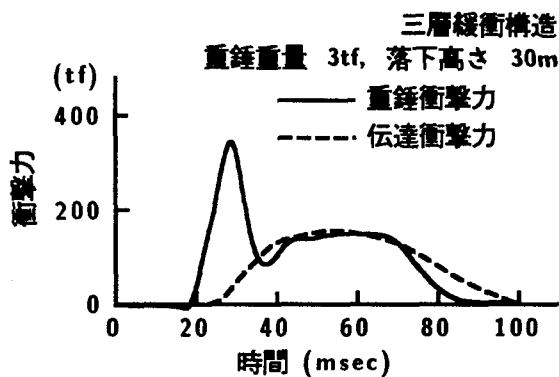


図-1 衝撃実験による衝撃力波形

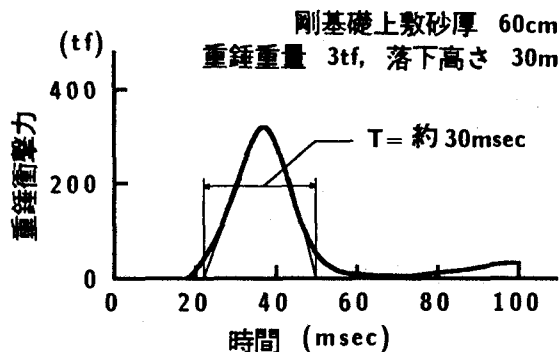


図-2 衝撃実験による重錘衝撃力波形

によってエネルギー吸収があるものと考えられるが、設計的に安全側で衝撃エネルギーを評価することとし、これを無視する。

- 6) 従って、衝突によって発生した重錘衝撃力は全て裏層材である EPS 材に伝達されるものと仮定する。
- 7) また、重錘衝撃力の最大値は 4) で与えられ、その波形は図-1 や剛基礎上の敷厚 60 cm の敷砂緩衝材への重錘重量 3 tf、落下高さ 30 m での実験結果 (図-2) を参考に、作用時間が 30 msec の正弦半波であると仮定する。
- 8) ただし、その衝撃力は芯材 RC 床版によって均等に分散するものとし、裏層 EPS 材のエネルギー吸収も一次元的に評価できるものと仮定する。本研究では、実証実験と同様、衝撃力の芯材 RC 床版への分散および裏層 EPS 材のエネルギー吸収領域を 4×4 (m) の矩形領域と仮定した。
- c) 伝達衝撃力の算定：
 - 9) b) で推定した衝撃エネルギーは、全て裏層材である EPS 材の塑性変形によって吸収されるものとする。その時に発生する EPS 材の塑性応力が伝達衝撃応力に等しいとして評価するものとする。
 - d) 最小裏層 EPS 材厚の算定：
 - 10) b) に示されるように、衝撃エネルギーは芯材 RC 床版の大変形や貫通等の著しい損傷がなく剛体であるものと仮定して評価している。しかしながら、現実には設計条件よりも大きな衝撃力が

作用し、落石等が芯材 RC 床版を貫通し裏層 EPS 材中に貫入する場合に対しても、緩衝構造はその機能を果たす程度の安全余裕度が必要である。本文では、このような条件を満足するための最小裏層 EPS 材厚を規定することとする。

- 11) その最小裏層 EPS 材厚は、落石等による芯材 RC 床版裏面の押し抜きせん断領域にある裏層 EPS 材のみが b) で推定した衝撃エネルギーを吸収するものとして算定する。

3. 芯材 RC 床版厚の決定

2. で述べたように、三層緩衝構造において RC 床版が芯材としての機能を維持するためには、芯材 RC 床版が落石等の貫通を防止するための耐力を有することが必要である。すなわち芯材 RC 床版のせん断耐力は落石等による衝突衝撃力より大きくなければならない。

ここで、落石等による衝突衝撃力 (重錘衝撃力) P_a は 2.4) の仮定より次のように示される。

$$P_a = 2.455 W_w^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

ただし、 W_w : 落石等の重量 (tf)、 H : 落石の落下高さ (m)、 λ : 敷砂のラーメの定数 (tf/m²)、ここでは前述の仮定より $\lambda = 200$ tf/m² とする。

次に芯材 RC 床版のせん断耐力の評価を試みる。三層緩衝構造の緩衝性能に関する実規模の実験結果¹¹⁾ によれば、重錘落下による衝撃力が芯材 RC 床版のせん断耐力より大きい場合には、重錘は芯材 RC 床版を貫通し、裏層 EPS 材中に貫入することが明らかになっている。これより、本研究では RC 床版が重錘径と同一な形状にせん断破壊するものと仮定してそのせん断耐力を算定評価するものとした。その値はコンクリートのせん断強度に基づくせん断耐力と、補強鉄筋のせん断強度に基づくせん断耐力の合計として与えられるものとする。

今、RC 床版の有効高さを d 、鉄筋比を p 、落石等の衝突による載荷面の直径を D 、コンクリートのせん断強度を τ_{cu} 、鉄筋のせん断強度を τ_{su} とする。このとき RC 床版のせん断破壊耐力は図-3 を参考に、次のように評価算定できるものと仮定する。すなわち、コンクリートが抵抗するせん断力 (S_c) は、

$$S_c = \pi D d \tau_{cu} \quad (2)$$

と与えられる。また、この載荷面によってせん断力が作用する鉄筋量は、図-3 の x 方向の配筋に対して複鉄筋を考慮すれば $2Ddp \times 2$ となる。 y 方向鉄筋に対しても同様であることより、鉄筋が抵抗するせん断力 (S_s) は

$$S_s = 4Ddp\tau_{su} \times 2 = 8Ddp\tau_{su} \quad (3)$$

となる。従って、せん断耐力の合計 (S) は、

$$\begin{aligned} S &= S_c + S_s = \pi D d \tau_{cu} + 8Ddp\tau_{su} \\ &= Dd (\pi \tau_{cu} + 8p\tau_{su}) \end{aligned} \quad (4)$$

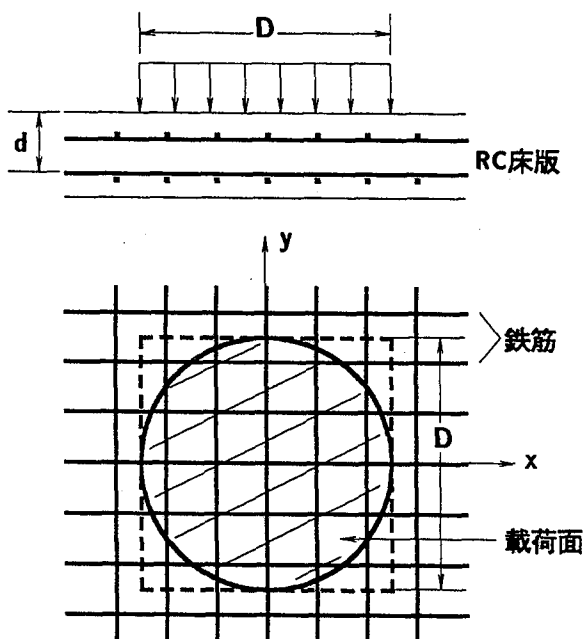


図-3 RC床版の衝撃力載荷状況

表-1 各落石重量に対する設計基準床版厚の例

落石重量	W_w (tf)	2	3	5
衝撃力	P_a (tf)	250	327	460
有効高さ	d (cm)	11	14	20
設計基準床版厚	h_c (cm)	約15	約20	約25

ただし, $\tau_{cu} = 21 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{su} = 2.367 \text{ kg/cm}^2$,
 $p = 0.01$, $D = 1 \text{ m}$, $H = 30 \text{ m}$, $\gamma = 1.1$

必要な RC 床版厚 (設計基準床版厚とする) は, 安全係数を γ として, 式 (1), (4) から

$$d = \frac{P_a}{D (\pi \tau_{cu} + 8 p \tau_{su}) \gamma} \quad (5)$$

と決定される。なお, 鉄筋のせん断強度 τ_{su} は, 鉄筋の引張強度を σ_{su} として, Von Mises の降伏条件を準用し, 純せん断状態を仮定すると, $\tau_{su} = \sigma_{su} / \sqrt{3}$ となる。また, コンクリートのせん断強度 τ_{cu} は, 文献 13) を参考にコンクリートの圧縮強度 σ_{cu} の 1/10 と仮定する。

ここで, $\tau_{cu} = 21 \text{ kgf/cm}^2$ ($\sigma_{cu} = 210 \text{ kgf/cm}^2$), $\tau_{su} = \sigma_{su} / \sqrt{3} = 2.367 \text{ kgf/cm}^2$ ($\sigma_{su} = 4.100 \text{ kgf/cm}^2$), $p = 0.01$, $D = 1.0 \text{ m}$, $H = 30 \text{ m}$, 安全係数 $\gamma = 1.1$ とし, 落石重量 $W_w = 2 \text{ tf}$, 3 tf , 5 tf に対する RC 床版の有効高さ d 及び設計基準床版厚 h_c を算定すると, 表-1 に示すような値が得られる。

4. 伝達衝撃力算定式の定式化

2. に述べた基本的な考え方にに基づき, 以下のような流れに従って伝達衝撃力算定式を定式化するものとする。すなわち, 1) 落石等の衝突によって発生する衝撃力波

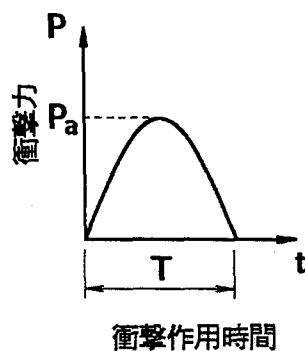


図-4 衝撃力波形の仮定

形を決定する。2) 得られた衝撃力波形を用いて落石衝突後に裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーを算定する。3) この衝撃エネルギーが全て裏層 EPS 材の塑性変形によって吸収されるものと仮定し, その時の裏層 EPS 材の塑性応力を算定する。これが伝達衝撃応力となる。4) 最大伝達衝撃力は, この裏層 EPS 材の塑性応力を集積することにより算定可能となる。

4.1. 落石等の衝突によって発生する最大衝撃力及び衝撃力波形の決定

2.7) の仮定より, 落石の衝突によって芯材 RC 床版上に発生する衝撃力の最大値は式 (1) で与えられ, その波形は次式のように示されるものと仮定する。

$$P = P_a \sin \frac{\pi}{T} t \quad (6)$$

ただし,

T : 衝撃力の作用時間。本研究では実験結果に基づいて, $T = 30 \text{ msec}$ と仮定する。

P_a : 芯材 RC 床版に作用する最大衝撃力。

である。

4.2. 合質点に作用する衝撃エネルギーの推定

落石等の衝突によって, 表層敷砂材・芯材 RC 床版に力積荷重が作用するものと仮定すると, これらの合質点を得る速度は, 力積が運動量の変化に等しいことより, 次のように示される。いま,

m : 合質点 (落石・表層敷砂材・芯材 RC 床版) の質量

W : 合質点の重量

v : 合質点 得る速度

とすると,

$$mv = \int_0^T P dt \quad \therefore \quad v = \frac{1}{m} \int_0^T P dt \quad (7)$$

一方, 衝撃力波形 P は上の仮定に基づき図-4 のように示されることより,

$$\int_0^T P dt = \int_0^T P_a \sin \frac{\pi}{T} t dt = \frac{2T}{\pi} P_a \quad (8)$$

以上より、合質点の速度 v は、

$$v = \frac{2T}{m\pi} P_a = \frac{2Tg}{W\pi} P_a \quad (9)$$

となる。ただし、 g は重力加速度で 9.8 m/sec^2 である。
従って、合質点の衝撃エネルギー E_w は、

$$E_w = \frac{mv^2}{2} = \frac{2gT^2}{\pi^2 W} P_a^2 \quad (10)$$

ここで、表層敷砂材、芯材 RC 床版の単位体積重量を
実験結果に基づいて、 1.6 tf/m^3 、 2.5 tf/m^3 とし、RC
床版厚を h_c (m) として合質点の重量 W を算定する。
2.8) の仮定より、衝撃荷重の分散領域を 4×4 (m) の
矩形領域としてその領域の表層敷砂材、芯材 RC 床版
の重量をそれぞれ W_s 、 W_c とし、重錘重量を W_w とす
ると、合質点の重量 W は、

$$\begin{aligned} W &= W_s + W_c + W_w \\ &= (1.6 \times 0.5 + 2.5 h_c) \times 16 + W_w \\ &= (12.8 + 40 h_c + W_w) \quad (\text{tf}) \end{aligned} \quad (11)$$

従って、合質点に作用する衝撃エネルギー E_w は、

$$\begin{aligned} E_w &= \frac{2 \times 9.8 \times 0.03^2}{\pi^2 (12.8 + 40 h_c + W_w)} P_a^2 \\ &= \frac{P_a^2}{559.5 (12.8 + 40 h_c + W_w)} \quad (\text{tfm}) \end{aligned} \quad (12)$$

4.3. エネルギー吸収時の裏層 EPS 材の塑性応力 (伝達衝撃応力) の算定

式 (10) によって与えられる衝撃エネルギーが 4×4 (m) の裏層 EPS 材によって全て吸収されるものとして、そのエネルギー吸収時の裏層 EPS 材の塑性応力を算定する。なお、実験結果^{10), 11)} より、裏層 EPS 材の残留変形は上層部が下層部に比較して大きいことが明らかになっている。これより、伝達衝撃力は裏層 EPS 材が一樣に塑性変形して衝撃エネルギーを吸収すると仮定することによって安全側で評価できるものと考えられる。

本研究では、EPS 材の応力-歪曲線を載荷速度 10 mm/min における静的載荷試験結果を用いて次のような多折線に近似することとする (図-5 参照)。すなわち、添え数字を EPS 材の歪値 (%) として、

$$\begin{aligned} \sigma_5 &= 11 \text{ tf/m}^2 \quad (\text{弾性範囲内}), \\ \sigma_{55} &= 22 \text{ tf/m}^2, \quad \sigma_{70} = 38 \text{ tf/m}^2 \end{aligned}$$

とし、対応する歪をそれぞれ ε_5 、 ε_{55} 、 ε_{70} とする。なお、十分な緩衝効果と安全余裕度が必要であることを考慮して、EPS 材の歪は 55 % 以内にあることを前提とする。後の解析のために、衝撃荷重が分散される領域の裏層 EPS 材の全面積を A ($= 4 \times 4 \text{ m}^2$) として、各歪値に

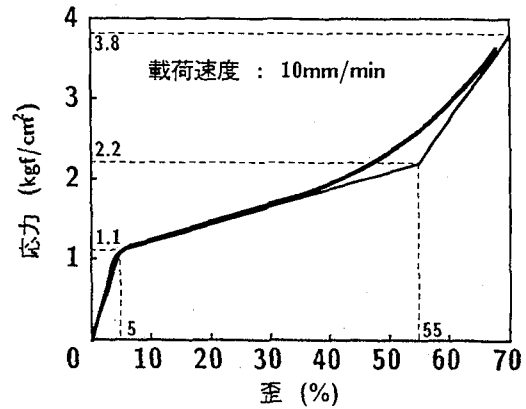


図-5 EPS 材の応力-歪関係

対する衝撃力を示すと、

$$P_5 = \sigma_5 A = 176 \quad (\text{tf}) \quad (13)$$

$$P_t = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} \varepsilon A = P_5 \frac{100\varepsilon}{5} \quad 0 < \varepsilon < 0.05 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_t &= P_5 + \frac{P_{55} - P_5}{\varepsilon_{55} - \varepsilon_5} (\varepsilon - \varepsilon_5) \\ &= P_5 + (P_{55} - P_5) \left(\frac{100\varepsilon}{50} - \frac{5}{50} \right) \end{aligned} \quad 0.05 < \varepsilon < 0.55 \quad (15)$$

$$P_{55} = \sigma_{55} A = 352 \quad (\text{tf}) \quad (16)$$

また、式 (15) を ε に関して解くと、

$$\varepsilon = \frac{50}{100} \frac{(P_t - P_5)}{(P_{55} - P_5)} + \frac{5}{100} \quad (17)$$

いま、歪エネルギーの総和を求めると、裏層 EPS 材厚を h_e として、

$$E_w = \begin{cases} \frac{\sigma \varepsilon}{2} A h_e & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ \left[\frac{\sigma_5 \varepsilon_5}{2} + \frac{(\sigma_5 + \sigma)(\varepsilon - \varepsilon_5)}{2} \right] A h_e & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) に式 (13) ~ (17) を考慮して整理すると、伝達衝撃力 P_t は

$$P_t^2 = \begin{cases} 40 P_5 \frac{E_w}{h_e} & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ P_5^2 + \frac{100}{25} (P_{55} - P_5) \left(\frac{E_w}{h_e} - \frac{0.05}{2} P_5 \right) & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (19)$$

となる。 $P_5 = 11 \times 16 = 176$ (tf)、 $P_{55} = 22 \times 16 = 352$ (tf) を代入すると、最終的に伝達衝撃力 P_t は次式のようにして決定される。

表一2 各落石重量に対する最小裏層 EPS 材厚の算定例

落石重量	W_w (tf)	2	3	5	
衝擊力	P_a (tf)	250	327	460	
芯材 RC 床版厚	h_c (cm)	20	20	20	30
最小 EPS 材厚	h_e (cm)	29	48	88	58

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{7040 \frac{E_w}{h_e}} & (tf) \quad 0 < \varepsilon < 0.05 \\ 176 \sqrt{(0.9 + \frac{E_w}{44h_e})} & (tf) \quad 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (20)$$

5. 最小裏層 EPS 材厚の決定

2. d) に述べた基本的な考え方にに基づき、裏層 EPS 材の最小厚さを決定する。今、芯材 RC 床版が押し抜きせん断破壊を起こした時の裏層 EPS 材の最大歪量を仮定より $\varepsilon < 0.55$ とし、このときの裏層 EPS 材の受圧面積を A' とする。衝撃エネルギーがこの部分の EPS 材によって吸収されるものと仮定すれば、必要裏層 EPS 材厚 h_e は、式 (18) の第2式より、

$$h_e \geq \frac{40 E_w}{341 A'} \quad (21)$$

ただし、受圧面積 A' は基本的に落石等による芯材 RC 床版裏面の押し抜きせん断破壊領域とし、ここでは、以下のように矩形領域に簡略化した。すなわち、

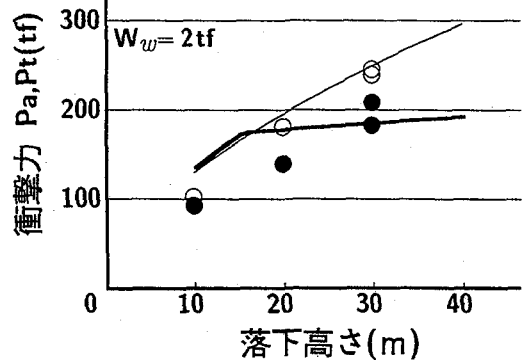
$$A' = (\text{落石等の直径} + \text{芯材 RC 床版厚の2倍})^2 \quad (22)$$

ここで、実験結果^{10),11)} に基づき重錘径を 1 m として表一1 に対する最小裏層 EPS 材厚を算定すると、表一2 のように示される。表より、重錘重量 $W_w = 3$ tf の場合には、芯材 RC 床版厚が $h_c = 20$ cm に対して裏層 EPS 材厚が $h_e = 50$ cm 程度で十分であることがわかる。また、重錘重量 $W_w = 5$ tf の場合、芯材 RC 床版厚が $h_c = 20$ cm に対して、裏層 EPS 材厚 h_e は 50 cm では不十分で 100 cm 程度必要であること、 $h_c = 30$ cm の場合には h_e が 75 cm 程度で十分であることがわかる。

6. 算定値と実験値の比較

これまでの三層緩衝構造に関する著者らの大型重錘落下衝撃実験^{10),11)} より種々の実験ケースに関する重錘衝撃力と伝達衝撃力が得られている。ここではこれらの実験結果から、算定式との比較が可能な実験ケースについて検討を加えることとする。ここで検討する三層緩衝構造の構造条件は表層を厚さ 50 cm の敷砂、芯材は厚さ 20 cm 又は 30 cm の RC 床版とし、裏層の EPS 材の厚

床版厚 $h_c = 20$ cm
 — 重錘衝撃力 (計算値)
 EPS 厚 $h_e = 50$ cm
 — 伝達衝撃力 (計算値)
 ○ 重錘衝撃力 (実験値)
 ● 伝達衝撃力 (実験値)



図一6 重錘重量 $W_w = 2$ tf に対する衝撃力

さを変化させたものである。裏層 EPS 材の厚さは重錘重量に対応して変化させている。

結果を図一6～9に示す。図は各図とも縦軸に衝撃力 (重錘衝撃力及び伝達衝撃力)、横軸に重錘の落下高さを取り、振動便覧式による重錘衝撃力の計算値を細線で、式 (20) による伝達衝撃力の計算値を太い実線または破線で示している。また実験値は、重錘衝撃力を○または△で、伝達衝撃力を●または▲で示した。

重錘重量 $W_w = 2$ tf、芯材 RC 床版厚 $h_c = 20$ cm、裏層 EPS 材厚 $h_e = 50$ cm の結果を図一6に示した。表一1に示すように、重錘重量 $W_w = 2$ tf、落石の落下高さ $H = 30$ m に対する芯材 RC 床版厚 h_c は約 15 cm で十分と考えられる。しかしながら、 $h_c = 20$ cm 以外の床版厚に対する実験が行われていないことより、ここでは $h_c = 20$ cm に対する実験結果との比較を行うものとする。また、この場合の最小裏層 EPS 材厚 h_e が表一2より 29 cm であり、実験に用いた裏層 EPS 材厚はこれより十分厚いことがわかる。まず重錘衝撃力と伝達衝撃力の算定式を比較すると、落下高さが $H = 20$ m 以下の場合には重錘による衝撃エネルギーが小さいため、裏層 EPS 材はまだ弾性範囲にある。このため、伝達衝撃力は重錘衝撃力に比べて僅かであるが大きくなり、裏層 EPS 材による緩衝効果は示されていない。一方、落下高さが $H = 20$ m 以上の場合には、裏層 EPS 材の変形状態が塑性域に入るために大きな緩衝効果が発揮され、伝達衝撃力は落下高さに対してほぼ一様な大きさとなる。その結果、落下高さ $H = 30$ m に対する伝達衝撃力は重錘衝撃力の約 75 % 程度となっている。算定式と実験値を比較すると、重錘衝撃力は振動便覧式に比較的良く一致しているのがわかる。しかしながら、伝達衝撃力は算定式に対して多少ばらついているようである。落下高さが小さく裏層 EPS 材が弾性範囲以内にある場合には、

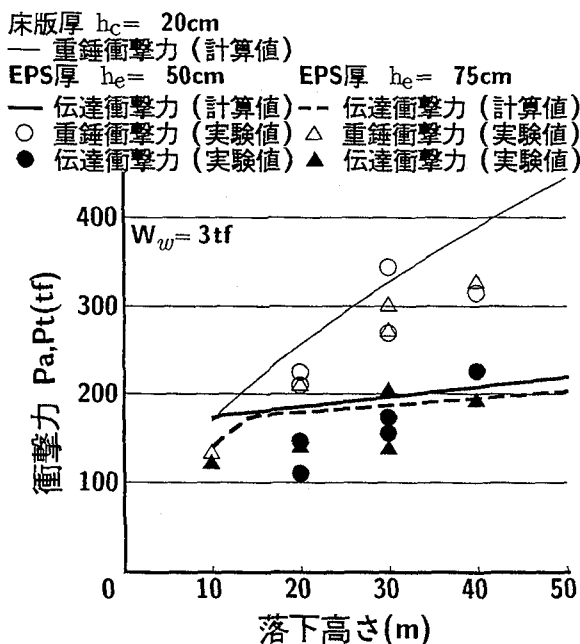


図-7 重錘重量 $W_w = 3\text{tf}$ に対する衝撃力

計算値は実験結果より大きい値を示しているが、裏層 EPS 材が塑性状態となる落下高さの高い場合には、計算結果より若干大きな実験結果も示されている。

図-7に重錘重量 $W_w = 3\text{tf}$ 、芯材 RC 床版厚 $h_c = 20\text{cm}$ で裏層 EPS 材厚が $h_e = 50\text{cm}$ 及び 75cm の結果を合わせて示している。この場合には、芯材 RC 床版の設計基準厚 h_c が約 20cm 、最小裏層 EPS 材厚 h_e が 48cm であり、いずれも基準量を満足している。計算値の重錘衝撃力は両 EPS 材厚に対しても同一である。重錘衝撃力と伝達衝撃力の算定式を比較すると、前述のように落下高さの小さい場合には両者に大きな差はないが、落下高さが大きくなるに従い裏層 EPS 材の緩衝効果が大きくなっていることが示されている。伝達衝撃力の計算値は落下高さが小さく裏層 EPS 材が厚い場合には、 $W_w = 2\text{tf}$ の場合と同様、裏層 EPS 材が未だ弾性域にあるため緩衝効果が小さく示されている。裏層 EPS 材が弾性域の限度となる落下高さ H は、EPS 材厚が $h_e = 50, 75\text{cm}$ の場合にはそれぞれ $H \approx 10\text{m}$ 以下、 $\approx 14\text{m}$ 以下となっている。裏層 EPS 材が塑性状態になる場合には、伝達衝撃力 P_t はほとんど変化せず、落下高さが $H = 40\text{m}$ でも 200tf 程度となっている。従って、落下高さ H の大きい場合ほど裏層 EPS 材のエネルギー吸収が大きく、重錘衝撃力と伝達衝撃力の差が大きくなることがわかる。重錘衝撃力に関して実験値と振動便覧式による値を比較すると、振動便覧式による値は、1 データを除いて実験結果より大きい値を示している。一方、伝達衝撃力に関する計算値は、2 データを除いて実験結果の上限値を与えており、設計的にほぼ安全側であることがわかる。

次に重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ の場合について検討を行う

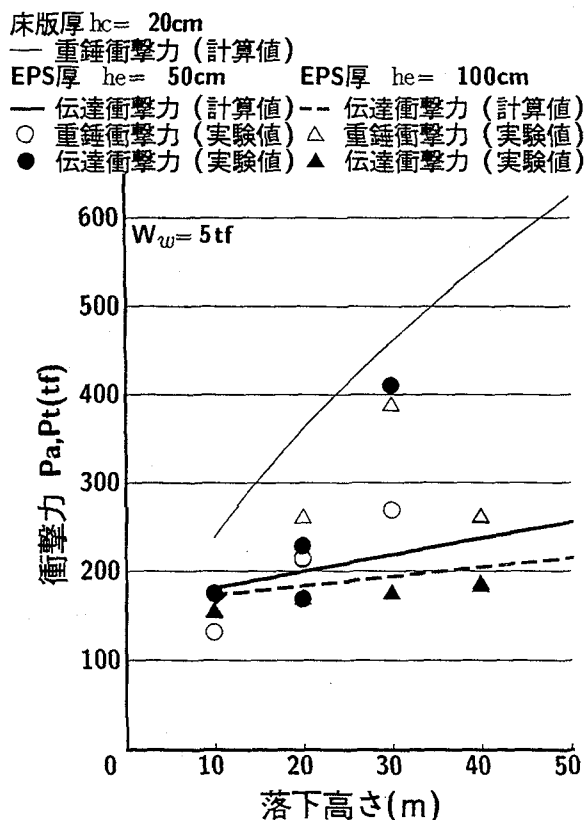


図-8 重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ に対する衝撃力
 (芯材 RC 床版厚 $h_c = 20\text{cm}$ の場合)

こととする。表-1に示すように、重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ 、落石の落下高さ $H = 30\text{m}$ に対する芯材 RC 床版の設計基準厚 h_c は、約 25cm である。しかしながら、これまでの重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ に対する実験結果は芯材 RC 床版厚が $h_c = 20\text{cm}$ および 30cm の場合である。本文では、数少ない実験結果を有効に利用するために、 $h_c = 20\text{cm}$ の場合に対する実験結果も考慮して、伝達衝撃力に関する計算値の妥当性を検討することとする。

重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ に対して芯材 RC 床版厚 $h_c = 20\text{cm}$ で裏層 EPS 材の厚さを $h_e = 50\text{cm}$ 、 100cm とした場合の結果を図-8に示した。なお、この場合の最小裏層 EPS 材厚が $h_e = 88\text{cm}$ であることより、裏層 EPS 材厚が $h_e = 50\text{cm}$ の場合には規定量より薄い厚さとなっているが、 $h_e = 100\text{cm}$ の場合には重錘が芯材 RC 床版を貫入する場合でも衝撃エネルギーを吸収できる厚さとなっている。計算値と比較すると、衝撃エネルギーが大きく裏層 EPS 材が大きく塑性変形するため、伝達衝撃力は重錘衝撃力に比べて小さく示されている。その傾向は落下高さが高い場合に顕著であり、落下高さが $H > 30\text{m}$ で伝達衝撃力は重錘衝撃力の $1/2$ 以下になっている。また、裏層 EPS 材が弾性範囲で挙動する場合は、EPS 材厚が $h_e = 100\text{cm}$ で落下高さが $H \approx 11\text{m}$ 以下のみである。

実験値と計算値を比較すると、重錘衝撃力に関する計

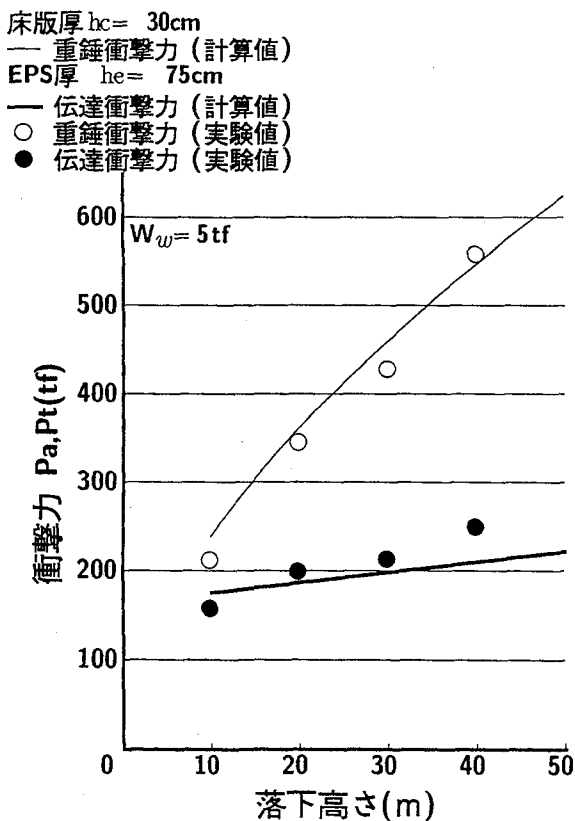
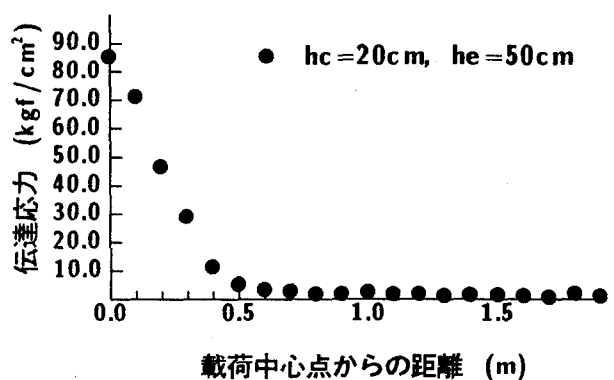


図-9 重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$ に対する衝撃力
 (芯材 RC 床版厚 $h_c = 30\text{cm}$ の場合)

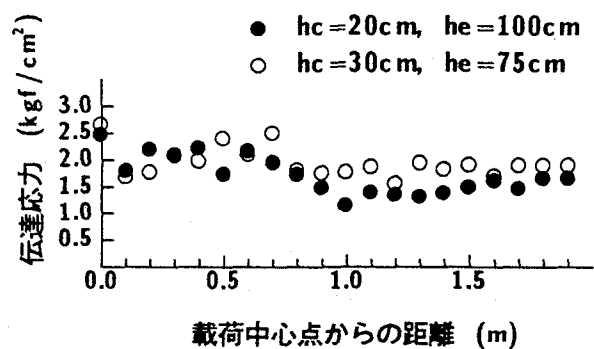
算値は実験値に比較して著しく過大に評価されている。これは実験に用いられている芯材 RC 床版厚が $h_c = 20\text{cm}$ で設計基準厚より薄いことより、重錘落下によって芯材 RC 床版が著しい損傷を受け剛性が低下したためと考えられる。裏層 EPS 材厚が $h_e = 50\text{cm}$ の場合の伝達衝撃力に関する実験結果は、計算結果より大きな値となっている。特に、落下高さが $H = 30\text{m}$ の場合には実験結果の重錘衝撃力よりも大きく示されている。これは、芯材 RC 床版厚が設計基準厚よりも薄く裏層 EPS 材も規定量より小さいため、重錘落下位置の芯材 RC 床版が貫通等局部的に著しい損傷を受け、さらにこの部分の裏層 EPS 材が大変形して ϵ_{55} を越えたためと考えられる。

一方、裏層 EPS 材厚が $h_e = 100\text{cm}$ の場合には、落下高さ $H = 10\text{m}$ において、実験結果は計算値よりやや大きいものの、 $H > 20\text{m}$ では両者がよく一致していることがわかる。これは重錘が芯材 RC 床版を貫通し、裏層 EPS 材に貫入するものの規定量以上の EPS 材厚があることより、当初の緩衝能力が発揮されていることを意味している。

以上より、芯材である RC 床版厚が設計基準厚以下の場合には、RC 床版の損傷が激しく裏層 EPS 材厚 $h_e = 50\text{cm}$ では三層緩衝構造の設計が不可能であるものと考えられる。しかしながら、この場合でも規定量以上の裏層 EPS 材厚を確保することにより (例えば、 $h_e =$



(a) RC 床版厚 $h_c = 20\text{cm}$, EPS 材厚 $h_e = 50\text{cm}$



(b) RC 床版厚 $h_c = 20\text{cm}$, EPS 材厚 $h_e = 100\text{cm}$
 及び RC 床版厚 $h_c = 30\text{cm}$, EPS 材厚 $h_e = 50\text{cm}$

図-10 重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$, 落下高さ $H = 30\text{m}$ の場合の最大伝達衝撃力発生時の伝達衝撃力分布

100 cm), 伝達衝撃力を抑制することができることも明らかになった。

図-9に重錘重量 $W_w = 5\text{tf}$, 芯材 RC 床版厚 $h_c = 30\text{cm}$, 裏層 EPS 材厚 $h_e = 75\text{cm}$ とした場合の結果を示している。この場合の両計算値の傾向は図-8の場合と同様である。実験値の重錘衝撃力は、芯材 RC 床版の厚さが $h_c = 30\text{cm}$ と設計基準厚より厚いことより、計算値とよく一致している。実験値の伝達衝撃力も落下高さの増加とともに大きくなっているが、その増加の割合は重錘衝撃力に比較して緩やかである。伝達衝撃力の計算値を実験値と比較すると、実験値が多少計算値を上回っているものの、裏層 EPS 材厚も十分であることより、計算値は実験値を比較的よく評価しているものと考えられる。

これより、芯材 RC 床版厚 h_c が設計基準厚より大きく、かつ裏層 EPS 材厚が最小厚以上である場合には、本算定式は妥当な伝達衝撃力を与えるものと考えられる。一方、設計衝撃力よりも大きな落石荷重が作用し、落石が芯材 RC 床版を貫通するような場合でも、裏層 EPS 材を規定厚以上とすることにより、伝達衝撃力を低減することが可能である。

以上の結果を確認するために、実証実験結果の重錘重

量 $W_w = 5 \text{ tf}$, 落下高さ $H = 30 \text{ m}$ の場合の 3 ケース (芯材 RC 床版厚 $h_c = 20 \text{ cm}$ で裏層 EPS 材厚 $h_e = 50 \text{ cm}$, 100 cm 及び芯材 RC 床版厚 $h_c = 30 \text{ cm}$ で裏層 EPS 材厚 $h_e = 75 \text{ cm}$) に関する伝達衝撃応力分布を用いて検討する。

図-10には、これらの実験ケースに対する最大伝達衝撃力発生時の伝達衝撃応力分布を示している。図から明らかなように、RC 床版厚 $h_c = 20 \text{ cm}$, EPS 材厚 $h_e = 50 \text{ cm}$ の場合には、落下中心部近傍に非常に大きな応力が発生している。これは、重錘の衝突により載荷点部の芯材 RC 床版が貫通等著しく損傷し、かつ裏層 EPS 材が局所的に極度に圧縮されたことによるものと考えられる。

芯材の RC 床版厚が $h_c = 20 \text{ cm}$, 裏層 EPS 材厚が $h_e = 100 \text{ cm}$ の場合には、伝達応力の分布は中心部でも応力の集中は見られず、周辺部で僅かに小さくなっている程度である。これは、RC 床版の損傷状況が $h_e = 50 \text{ cm}$ の場合と同様であるのに関わらず、裏層 EPS 材が規定厚よりも大きく貫入する重錘の衝撃エネルギーを完全に吸収できる程度に厚いため、重錘貫入部の EPS 材の厚さ方向の平均歪もそれほど大きくなっていないことを意味している。結果的に、伝達衝撃応力分布が伝達衝撃力に関する算定式の誘導仮定と同様に緩衝構造全体でほぼ均等な分布となり、実験結果と計算結果が類似の値になったものと考えられる。

一方、芯材 RC 床版厚が $h_c = 30 \text{ cm}$, 裏層 EPS 材厚が $h_e = 75 \text{ cm}$ の場合には、芯材 RC 床版厚が設計基準厚よりも大きいことより、床版の損傷の程度も小さく荷重分散性が良好であるため、伝達応力の分布はほぼ均等なものとなっていることがわかる。芯材 RC 床版厚が $h_c = 20 \text{ cm}$, 裏層 EPS 材厚が $h_e = 100 \text{ cm}$ の場合と比較すると、重錘載荷中心部では両者同程度の伝達衝撃応力分布を示しているが、周辺部では $h_c = 30 \text{ cm}$, $h_e = 75 \text{ cm}$ の場合が若干大きい値となっている。そのため、伝達衝撃応力の総和である伝達衝撃力もそれに対応してやや大きくなっている。しかしながら、伝達衝撃応力分布性状より、両者はほぼ同程度の緩衝性能を有しているものと考えられる。

このように、芯材 RC 床版厚 h_c が設計基準厚よりも薄い場合、あるいは設計荷重よりも大きな落石が発生して RC 床版厚が不足し、落石が芯材 RC 床版を貫通するような場合には、裏層 EPS 材厚を規定厚以上とすることにより、伝達衝撃応力分布を均等にすることが可能であることが実験結果からも明らかになった。

7. まとめ

三層緩衝構造の伝達衝撃力の算定法として、芯材 RC 床版の機能保持を前提として、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮して算定する方法を示した。伝達衝撃力は、緩衝構造の構造条件、落石重量、落下高さ等によ

って変化する。各ケース毎の実験データは十分ではないが、ここでの検討の結果をまとめると以下のようなものである。

- 1) 芯材 RC 床版の機能を維持するために必要な設計基準床版厚は 3. に示したせん断耐力評価式により決定できることが示された。
- 2) 芯材 RC 床版厚が設計基準床版厚以上の場合、伝達衝撃力は、衝撃エネルギーの大きさにより多少の変動はあるものの、本算定式により実用的に評価可能であるものと判断される。
- 3) 芯材 RC 床版厚が設計基準床版厚より小さい場合でも、裏層 EPS 材厚が規定厚よりも大きい場合には伝達衝撃力を本算定式による値程度に減少させることが可能である。
- 4) 従って、芯材 RC 床版厚を設計基準床版厚以上とし、かつ裏層 EPS 材厚を規定厚以上にすることによって十分な緩衝効果と安全余裕度を保持した三層緩衝構造の設計が可能になるものと考えられる。

なお、算定の精度をより向上させるためには、落石等の衝突に伴うエネルギーの逸散や、RC 床版の変形に伴う EPS 材の局部変形の影響等を考慮する必要があるものと考えられる。

また、著者等は本三層緩衝構造を開発し実用化するに際し、覆工の耐震安定性を確保して基礎工をできるだけ小型化するために、緩衝構造の重量を従来まで用いられている 90 cm 厚の敷砂単層と同程度あるいはそれ以下とし、緩衝性能および衝撃荷重の分散性能が敷砂単層よりも優れていることを前提として考えた。表層敷砂厚を大きくして衝撃エネルギーを低減する方法も考えられるが、①この場合には、敷砂単層とする場合よりも緩衝構造の重量が大きくなり、耐震安定上好ましくないこと、② 90 cm 厚の敷砂単層に関する野外実験結果⁴⁾ から類推すると、表層敷砂厚の増厚による緩衝効果は裏層 EPS 材厚の増厚による効果より劣るものと考えられること等より、衝撃エネルギーを低減させるためには、芯材 RC 床版厚が設計基準厚よりも大きいことを前提として裏層 EPS 材厚を増厚する法が得策であるものと判断される。

本論文をまとめるに当たり、室蘭工業大学大学院生高沢昌憲君を始めとする構造力学講座の諸君に多大なる協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉田 博, 榎谷 浩, 岡 衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文報告集, 第 362 号/I-4, pp. 461 ~ 470, 1985.10
- 2) 中野 修, 岸 徳光, 松岡健一, 菅田紀之: 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, Vol. 38A, pp. 1597 ~ 1608, 1992.3
- 3) 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

- 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) 中野 修, 今野久志, 岸 徳光, 三上 浩, 遠藤 紘: 各種緩衝構造を用いた落石覆工の実証実験, 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. 230 ~ 235, 1993.6
- 6) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.18 ~ 27, p177, 1983.
- 7) 岸 徳光, 中野 修, 今野久志, 松岡健一: 三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験, 構造工学論文集, Vol.38A, pp. 1577 ~ 1586, 1992.3
- 8) 中野 修, 岸 徳光, 後藤雪夫, 遠藤 紘: 落石覆道における三層緩衝システムの開発, 土木学会誌, pp. 20 ~ 22, 1992.3
- 9) 三上 浩, 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修, 松岡健一: AFRP 補強 RC 版を芯材とする三層緩衝構造体が緩衝性能に及ぼす表, 裏面材の影響, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1639 ~ 1646, 1994.3
- 10) 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. 1257 ~ 1265, 1995.3
- 11) 中野 修, 佐藤昌志, 岸 徳光: 三層緩衝構造の緩衝性能, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 51 号 (A), pp. 162 ~ 167, 1995.2
- 12) 吉田 博, 松葉美晴, 法貴貫志郎, 久保田努: 発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 427 号/VI-14, pp. 143 ~ 152, 1991.3
- 13) 近藤泰夫, 坂 静雄監修: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 313 ~ 315, 1967

(1995年9月18日受付)