

I-33 三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法

開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 室蘭工業大学 同 岸 徳光
 室蘭工業大学 同 松岡 健一

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へ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) 高性能な緩衝構造の開発などが必要であり、これら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、特に落石等の衝撃力の算定は基本的設計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。これまでの研究から、緩衝構造として従来からの敷砂材を用いる場合、落石等の衝突による敷砂への衝撃力と本体構造へ伝達される衝撃力（以下、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、敷砂材に対しては適正なラーメ定数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高い緩衝力を有する緩衝構造として三層緩衝構造を開発し、種々研究を行っている^{7)~9)}。三層緩衝構造は表層に敷砂、芯材として補強コンクリート(RC)版、裏層に発泡スチロール(EPS)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、高い緩衝力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⁷⁾。これまでの実験的研究によれば、三層緩衝構造によって本体構造へ伝えられる衝撃力は緩衝構造表面が受ける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、いまだ三層緩衝構造を用いた場合の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、この緩衝構造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ともな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、衝撃力評価式を定式化しなければならない。本論文では、このような観点から、実験結果に基づいて各層の動特性を考慮し、エネルギー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50cm厚の敷砂、芯材として20cm厚のRC版、裏層に50~100cm厚のEPS材を用いた標準的な構成とし、大きさは4m×4mとする。著者らは、これまでこの種の緩衝構造に関して詳細な実験を行い、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の総和として算定）を測定し検討を行ってきた。本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、特に裏層材による吸収量が大いものと判断される。表層材の敷砂は粒状体でありこの緩衝特性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、このエネルギー吸収特性を論ずることは可能である。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¹⁰⁾。

本論文では、これまでの著者らの実験結果を参考にEPS材のエネルギー吸収特性を考慮して三層緩衝構造の伝達衝撃力を算定する方法を検討するが、その基本的な考え方を以下に示す。

a) 重錘落下による衝撃力の推定：

- 1) 重錘が表層材に衝突する状態は、芯材 RC 版の剛性が比較的高いために作用時間が短く剛基礎と類似の作用をするものと仮定する。
- 2) また、表層材厚が 50 cm と比較的薄く、波動伝播の効果が小さいものと考えられることより、RC 版に作用する衝撃力は重錘衝撃力に等しいものと仮定する。
- 3) 実験結果より、その波形は最大値がラーメ定数 $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ の振動便覧式による結果に近似出来るものとし⁵⁾、作用時間が 25 msec の正弦半波であると仮定する。

b) 裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーの推定：

- 4) 芯材 RC 版に大きな衝撃力が作用する場合には、侵徹や貫通作用が発生して RC 版において大きなエネルギー吸収があるものと考えられるがここではこれを無視することとする。
- 5) 従って、RC 版上で発生した衝撃力は全て裏層材である EPS 材に伝搬されるものと仮定する。
- 6) ただし、その衝撃力は芯材 RC 版に均等に分布するものとし、EPS 材のエネルギー吸収も一次的に評価できるものとする。

c) 伝達衝撃力の算定：

- 7) 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ものと仮定する。

3. 算定式の定式化

2.で述べた基本的な考え方により、まず落石等の衝突によって芯材 RC 版に作用する衝撃力の算定を行い、次に衝突後に裏層 EPS 材に作用する衝突エネルギーの推定を行う。最後にこのエネルギーによる EPS 材の変形を EPS 材の吸収エネルギーを考慮して求め、EPS 材が伝える応力の算定を行う。

3.1. 芯材 RC 版に作用する衝撃力波形の決定

芯材 RC 版に作用する衝撃力波形は、仮定より次式のように示される。

$$P = P_a \sin \frac{\pi}{T} t \quad (1)$$

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、 $T = 25 \text{ msec}$ と仮定する。

P_a : 最大衝撃力。実験結果より敷砂のラーメ定数 $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式により算定可能とする。なお、振動便覧式は以下に示すとおりである。

$$P_a = 2.455 W^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5}$$

ただし、 W : 重錘重量 (tf)、 H : 落下高さ (m)

である。

3.2. 衝突後の合質点（重錘・敷砂・RC 版）の運動エネルギーの決定

重錘の衝突によって、敷砂・RC 版に力積が作用するものと仮定すると、これらの質量が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。

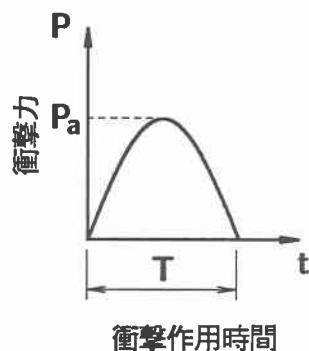
いま、

m : 重錘・敷砂・RC 版の合質量、

W : 重錘・敷砂・RC 版の合重量、

v : 合質量 m が得る速度

とすると、



図－1 衝撃力波形

$$mv = \int_0^T P dt \quad \therefore v = \frac{1}{m} \int_0^T P dt \quad (2)$$

一方、衝撃力波形は上の仮定より図-1のように示されるので

$$\int_0^T P dt = \int_0^T P_a \sin \frac{\pi}{T} t dt = \frac{2T}{\pi} P_a \quad (3)$$

以上より、速度 v は、

$$v = \frac{2T}{m\pi} P_a = \frac{2Tg}{W\pi} P_a \quad (4)$$

従って、全質量 m の運動エネルギー E_w は、

$$E_w = \frac{mv^2}{2} = \frac{2gT^2}{\pi^2 W} P_a^2 \quad (5)$$

いま、敷砂、RC 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、重錘重量を W_w とすると、

$$W = W_s + W_c + W_w = (1.6 \times 0.5 + 2.5 \times 0.2) \times 16 + W_w = (20.8 + W_w) \quad (\text{tf}) \quad (6)$$

従って、総エネルギー E_w は、

$$E_w = \frac{2 \times 9.8 \times 0.025^2}{\pi^2 (20.8 + W_w)} P_a^2 = \frac{P_a^2}{805.68 (20.8 + W_w)} \quad (\text{tfm}) \quad (7)$$

3.3. EPS 材のエネルギー吸収時の塑性応力（伝達衝撃応力）の算定

式 (5) によって与えられる衝撃エネルギーが $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ の 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 EPS 材の塑性応力を算定する。

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-2 参照）。すなわち、添え数字を EPS 材の歪値（%）として、

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

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を考えると、EPS 材の歪は 55 % 以内にあることが望ましい。従って、EPS 材の厚さの設計は歪がこの範囲内におさまるように試算を繰り返すものとする。これより、EPS 材の塑性応力は常に $\sigma < \sigma_{55}$ であるものと仮定する。この値を衝撃力に換算すると、 $P_t < 22 \times 16 = 352 \text{ tf}$ となる。後の解析のために、EPS 材の全面積を $A (= 4 \times 4 \text{ m}^2)$ として、各歪値に対する衝撃力を示すと、

$$P_5 = \sigma_5 A = 176 \quad (\text{tf}) \quad (8)$$

$$P_t = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} \varepsilon A = P_5 \frac{100\varepsilon}{5} \quad 0 < \varepsilon < 0.05 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_t &= P_5 + \frac{P_{55} - P_5}{\varepsilon_{55} - \varepsilon_5} (\varepsilon - \varepsilon_5) \\ &= P_5 + (P_{55} - P_5) \left(\frac{100\varepsilon}{50} - \frac{5}{50} \right) \\ &\quad 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{aligned} \quad (10)$$

$$P_{55} = \sigma_{55} A = 352 \quad (\text{tf}) \quad (11)$$

また、式 (10) を ε に関して解くと、

$$\varepsilon = \frac{50}{100} \frac{(P_t - P_5)}{(P_{55} - P_5)} + \frac{5}{100} \quad (12)$$

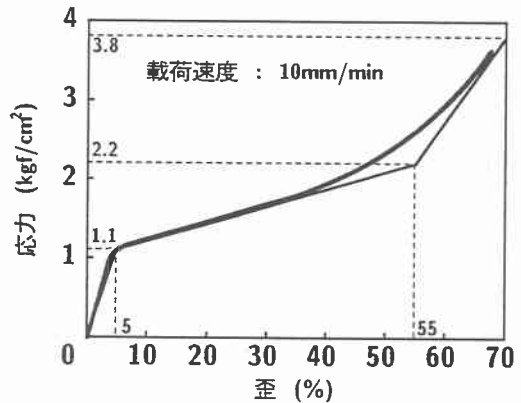


図-2 EPS 材の応力-歪関係

いま、歪エネルギーの総和を求めると、EPS 材厚を h として、

$$E_w = \begin{cases} \frac{\sigma \varepsilon}{2} A h & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ \left[\frac{\sigma_s \varepsilon_s}{2} + \frac{(\sigma_s + \sigma)(\varepsilon - \varepsilon_s)}{2} \right] A h & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (13)$$

上式に式 (8) ~ (12) を考慮して整理すると、伝達衝撃力 P_t は

$$P_t^2 = \begin{cases} 40 P_s \frac{E_w}{h} & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ P_s^2 + \frac{100}{25} (P_{ss} - P_s) \left(\frac{E_w}{h} - \frac{0.05}{2} P_s \right) & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (14)$$

となる。 $P_s = 11 \times 16 = 176$ tf, $P_{ss} = 22 \times 16 = 352$ tf を代入すると、上式は、

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{7040 \frac{E_w}{h}} & (\text{tf}) \quad 0 < \varepsilon < 0.05 \\ 176 \sqrt{\left(0.9 + \frac{E_w}{44h}\right)} & (\text{tf}) \quad 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (15)$$

として与えられる。

4. 算定値と実験値の比較

三層緩衝構造に関する著者らのこれまでの大型実験では種々のケースについての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 50cm の敷砂、芯材は厚さ 20cm の RC 板とし、裏層の EPS 材の厚さを変化させたものである。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-3 ~ 5 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い実線で、(15) 式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、EPS 材厚 $h = 50$ cm の結果を図-3 に示した。まず重錘衝撃力と伝達衝撃力の算定式についてみると落下高さの低い 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 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に小さくなるのみで EPS 材による緩衝効果は少ない。落下高さが 20 m 以上の場合には EPS 材の変形状態が塑性域に入るため、大きな緩衝効果が発揮され伝達衝撃力は重錘衝撃力よりかなり小さくなる。伝達衝撃力は落下高さ 30 m でも重錘衝撃力の約 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。しかし伝達衝撃力は算定式に対

- 重錘衝撃力 (計算値)
- 伝達衝撃力 (計算値)
- 重錘衝撃力 (実験値)
- 伝達衝撃力 (実験値)

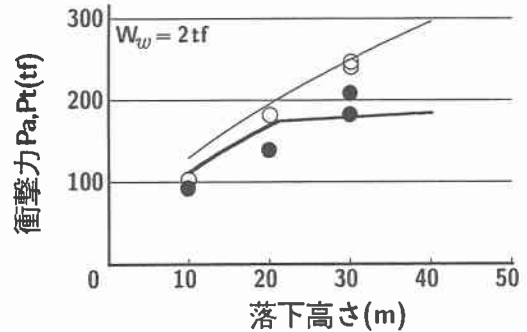


図-3 重錘衝撃力 $W_w = 2$ tf に対する衝撃力

して多少ばらついているようである。落下高さが小さく EPS 材が弾性範囲の場合は、計算値は実験結果より多少大きい、EPS が塑性状態となる落下高さの高い場合には、計算結果より大きな実験結果も示されている。

図-4 に重錘重量 $W_w = 3 \text{ tf}$ で EPS 材厚 $h = 50 \text{ cm}$ 及び 75 cm の結果を合わせて示した。重錘衝撃力は両 EPS 材厚に対しても同一である。落下高さが低い場合には、 $W_w = 2 \text{ tf}$ の場合と同様伝達衝撃力の計算値は EPS 材がまだ弾性域にあるため緩衝効果が小さく示されている。弾性域の限度となる落下高さは、EPS 材厚 $h = 50 \text{ cm}$ では $H \simeq 14 \text{ m}$ 以下、 $h = 75 \text{ cm}$ では $H \simeq 20 \text{ m}$ 以下となっている。EPS 材が塑性域になれば伝達衝撃力はほとんど変化せず、 $H = 40 \text{ m}$ でも 200 tf 以下である。従って落下高さの高い場合ほど、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分かる。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実験値は計算値より小さく示されている。この原因は、先に述べたように振動便覧式による値は剛基礎上に 90 cm 厚の敷砂を設置した場合の実験結果から $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ として算定しているが、重錘重量が大きな場合のように落下エネルギーの大きな衝撃に対して、芯材 RC 版はかなりの損傷を受け、剛性が低下し剛基礎の仮定と異なるためと考えられる。伝達衝撃力に関しては両者の差の変動が大きい。 $h = 50 \text{ cm}$ で、落下高さが低い場合、実験値の方がかなり小さいが、落下高さが高くなるに従い実験値の方が大きくなっている。 $h = 75 \text{ cm}$ の場合、実験値は全体として計算値より小さいものの $H = 30 \text{ m}$ で 200 tf を越える値がみられる。

重錘重量 $W_w = 5 \text{ tf}$ に対しては EPS 材の厚さを $h = 50 \text{ cm}$, 100 cm とした場合の結果を図-5 に示した。衝撃エネルギーが大きいため計算値の伝達衝撃力は重錘衝撃力に比べてかなり小さくなる。この傾向は特に落下高さが大きい場合に著しくなる。また、EPS 材が弾性範囲にあるのは $h = 100 \text{ cm}$ で $H \simeq 16 \text{ m}$ 以下の場合のみである。実験値と計算値を比較すると、重錘衝撃力の実験値は計算値に比べかなり小さい。この原因も重錘重量 3 tf の場合と同様であるが、さらに大きな落下エネルギーを受けることより芯材 RC 版の損傷が大きくなり、その差が一層大きく示されている。 $h = 50 \text{ cm}$ の場合、伝達衝撃力の実験値は計算値に比べ大きい値となっており、重錘衝撃力の実験値と比べても大きい。特に

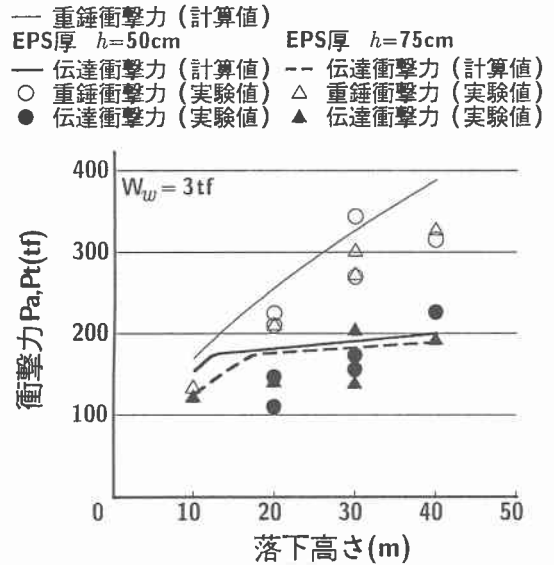


図-4 重錘重量 $W_w = 3 \text{ tf}$ に対する衝撃力

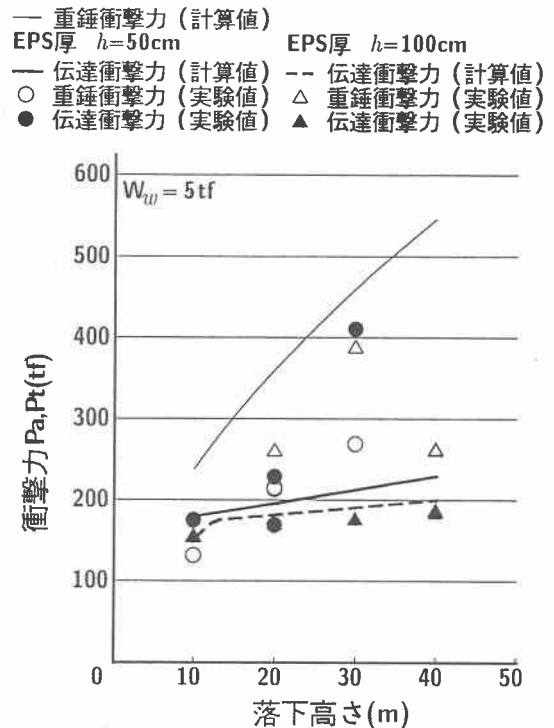


図-5 重錘重量 $W_w = 5 \text{ tf}$ に対する衝撃力

$H = 30 \text{ m}$ では極端に大きい。このように全体として大きな伝達衝撃力となっているのは、重錘の衝突により落下位置の RC 版が局部的な破壊を生じ、この部分の EPS 材が大変形して、 ϵ_{ss} を越えたためではないかと考えられるが、詳細については今後検討したい。 $h = 100 \text{ cm}$ の場合は $H = 10 \text{ m}$ で、計算値よりやや大きいものの $H > 20 \text{ m}$ では、かなり良い一致を示している。

以上の比較から、衝撃エネルギーが小さい範囲ではいずれのケースも計算値で伝達衝撃力を評価できると考えられる。大きな衝撃エネルギーを受け EPS 材厚が薄い場合には計算値を越える値を示していることから、大きな衝撃エネルギーが作用する場合には、十分な裏層厚が必要なことを示していると考えられる。

5. まとめ

三層緩衝構造の伝達衝撃力の算定法として、裏材 EPS 層のエネルギー吸収特性を考慮した方法を示した。伝達衝撃力は、緩衝構造の構造条件、重錘重量、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、以下のようである。

- 1) 重錘重量が小さな場合や落下高さの低い場合のように作用する衝撃エネルギーが小さなケースでは、算定式による値がほぼ伝達衝撃力の上限を与える。
- 2) 重錘重量が大きな場合や落下高さの高い場合のように作用する衝撃エネルギーが大きなケースでは EPS 材厚が十分であれば本算定式で伝達衝撃力を比較的良好な精度で評価できる。しかし、EPS 材厚が十分でない場合は計算値より大きな実測値を示すものがあり、本算定式はこのような場合を十分説明できない。

なお、より算定の精度を上げるためには落石の衝突に伴うエネルギーの逸散や、RC 版の変形に伴う EPS 材の局部変形の影響を考慮する必要があると考えられる。

本論文のまとめに当たり、室蘭工業大学建設システム工学科構造力学研究室の諸氏に多大の協力をいただいた。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) 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