

論文

[2158] AFRP ロッドで補強した RC スラブを用いた緩衝構造に関する実証実験

坂田博史・西村大輔

岸 徳光*1・中野 修*2・西 弘明*3・田村富雄*4

1. はじめに

従来まで道路上に設置されている落石覆工等の構造物には落石によって生じる衝撃力を緩和させる目的で敷砂が用いられている。しかしながら敷砂を緩衝材として用いる場合には、緩衝効果に限度があること、敷厚を増すと死荷重が増大し構造物本体がトップヘビー構造となり耐震上好ましくないこと等の問題点あげられている。著者等はこれらの点を改善すべく、衝撃緩衝作用と荷重分散作用に優れた材料を組み合わせた複層緩衝構造の開発を行ない、室内実験や屋外実験を行ってその性能について検討を行ってきた[1],[2]。それは、表層材として敷砂、芯材として RC 版、裏層材として EPS (Expanded Poly-Styrol) 材を用いる三層緩衝構造である。検討の結果、本緩衝構造は敷砂と比較して緩衝性、荷重分散性に優れ、敷砂の欠点を克服できる可能性が明らかになった。特に芯材 RC 版に関しては補強筋として異形鉄筋を用いる場合と、高強度、高弾性伸び率を有する AFRP ロッドを用いる場合の緩衝性能に関する検討も行なっている。昨年度の実績より、後者の RC 版を用いる場合には、緩衝効果に関しては異形鉄筋を用いる場合と同程度であり、特に繰返し載荷時には荷重継続時間を延ばす作用があることが明らかになっている。

本論文では、芯材に補強筋として AFRP ロッドを用いた RC 版を用いる場合の実構造物への適用の信頼度を高めることを目的として、北海道開発局帯広開発建設部が建設中の美幌覆道 (一般国道 336 号広尾町) を用いた実証実験を行ない、衝撃力や覆工内の応答性状についての検討を行なったので報告する。本実証実験では共用開始前の美幌覆道頂版上に、AFRP ロッドや、異形鉄筋を補強筋とする芯材 RC 版を用いた三層緩衝構造を設置し、重量 3tf の重錘を最大高さ 30m から自由落下させて実験を行なっている。

2. 実験方法

2.1 実験概要

美幌覆道は図-1 に示すような 1 プロック 12 m、頂版厚 1.1 m、壁厚 1.0 m で海側に 5 m × 4.25 m の開口部を有する箱型構造の覆

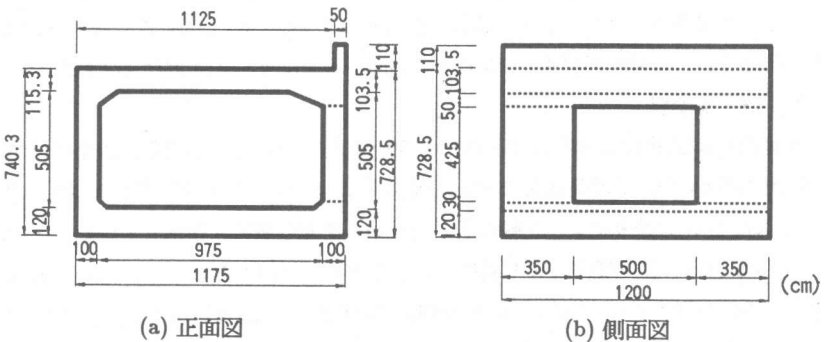


図-1 美幌覆道の形状寸法

工である。設計は、常時荷重の他、設計震度として水平震度 $K_h = 0.16$ 、鉛直震度 $K_v = 0.0$ を採用し、さらに、緩衝材として 90 cm 厚の敷砂を用い、斜面勾配 $\alpha = 60^\circ$ で 0.5 tf の落石によって平均 50 tf の衝撃力が覆工頂版上に作用する場合に対して行なわれている。なお、美幌覆道のコンクリートの物性値は

*1 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)
 *2 北海道開発局開発土木研究所室長、工博 (正会員)
 *3 北海道開発局開発土木研究所研究員、工修 (正会員)
 *4 三井建設 (株) 技術研究所副所長、工修 (正会員)

材令 68 日における圧縮強度が 350 kgf/cm^2 、弾性係数 $E=2.67 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.21$ であり、築後約一年が経過している。実験時の材料定数を得ることが不可能であったため、断面力の算

定は材令 68 日における各定数を採用することとした。実験はブロックの中央部に $520 \text{ cm} \times 520 \text{ cm}$ の三層緩衝構造を設置し、この中央点に重量 3tf の重錘（直径 100 cm、高さ 17.5 cm の球底）を最大 30 m の高さから自由落下させることにより行なっている。また、三層緩衝構造の性能比較として 90 cm 厚の敷砂を緩衝材として用い、落下高 10 m とした場合の実験も行なっている。表-1 に本実証実験で行った実験ケースの一覧を示す。以後、各実験ケース名は表-1 中の呼称を用いることとする。

2.2 芯材RC版

本実験では芯材 RC スラブの補強筋として組紐状 AFRP ロッドの表面に 5号珪砂を接着させた場合 (As-) を 2 体、異形鉄筋を用いた場合 (D-) を 1 体製作している。各 RC 版の形状寸法はいずれも $520 \text{ cm} \times 520 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ であり、かぶり 3 cm 配筋比 1 % の複筋配置としている。補強筋は As-20, 30 の場合は K192S を、D-30 の場合には D13 を用いておりそれぞれ 10 cm 間隔に配置している。補強筋の材料特性は表-2 に示すとおりである。コンクリートは設計強度を 210 kgf/cm^2 として配合設計を行ない、現場にて打設、養生を行なった。実験時の材令は 35 日でその時のコンクリート強度は 221 kgf/cm^2 であった。

2.3 表・裏層材

本研究では表層、裏層材としてそれぞれ 50 cm 厚の敷砂および EPS 材を用いている。敷砂は単位体積重量が 1.571 tf/m^3 、絶乾比重 2.528、吸水率 2.196 %、均等係数 $U_c = 4.89$ の楽古川産砂である。敷砂は 20 cm 毎に足踏みによって締め固めを行い、所定の敷厚に整地している。一方、裏層材として用いている EPS 材は、型内発泡により製造され、1 ブロックが $200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ のものである。物性値は公称値で密度が 20 kg/m^3 、5 % 圧縮歪時の圧縮強度が 1.1 kgf/cm^2 、ポアソン比が 0.05 である。また、弾性挙動を示す領域は圧縮歪が 1 % 以下であり、その時の強度は 5 % 圧縮歪時における圧縮強度の約 1/2 である。

2.4 測定項目および測定方法

本実験における測定項目は重錘衝突衝撃力算定のための重錘加速度 (4 ch)、緩衝材を通過して覆工頂版上に伝達される衝撃応力および衝撃力を検討するための伝達衝撃応力 (31 ch) および覆工本体中の鉄筋歪 (58 ch) である。重錘加速度測定用の加速度計は歪ゲージ型で応答周波数範囲が DC ~ 3.5 kHz のものを使用し、重錘の底部中央点に設置されている。伝達衝撃応力は、受圧部直径 32 mm、容量 100 kgf/cm^2 で、応答周波数範囲が DC ~ 600 Hz の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて測定している。ロードセルは、覆工頂版の曲げ剛性への影響を小さくするために蝶番で連結された鋼製治具上に 20 cm 間隔

表-1 実験ケース

| 実験ケースの呼称 | 芯材RCスラブの補強筋種類 | 重錘落下高さ(m) |
|----------|---------------|-----------|
| As-20 | 砂付きロッド K192S | 20 |
| As-30 | 砂付きロッド K192S | 30 |
| D-30 | 異形鉄筋 D13 | 30 |
| S90-10 | 敷砂単層90cm厚 | 10 |

表層：砂50cm厚、裏層：EPS材50cm厚、芯材：20cm厚のRC版、重錘重量3tf

表-2 補強筋の材料特性

| 補強筋名 | K192S | D13 |
|--|------------|---------|
| 材質 | アラミド 繊維 | SD30A |
| (公称)直径 (mm) | 15.5 | 12.7 |
| (公称)断面積 (cm^2) | 1.50 | 1.267 |
| 密度 (g/cm^3) | 1.30 | 7.85 |
| 降伏耐力 (tf) | — | 3.8 |
| 引張耐力 (tf) | 19.2 | 5.7~7.7 |
| 弾性係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$) | 0.65 | 2.10 |
| 弾性伸び (%) | 1.97 | 0.20 |
| ポアソン比 | 0.62 | 0.30 |

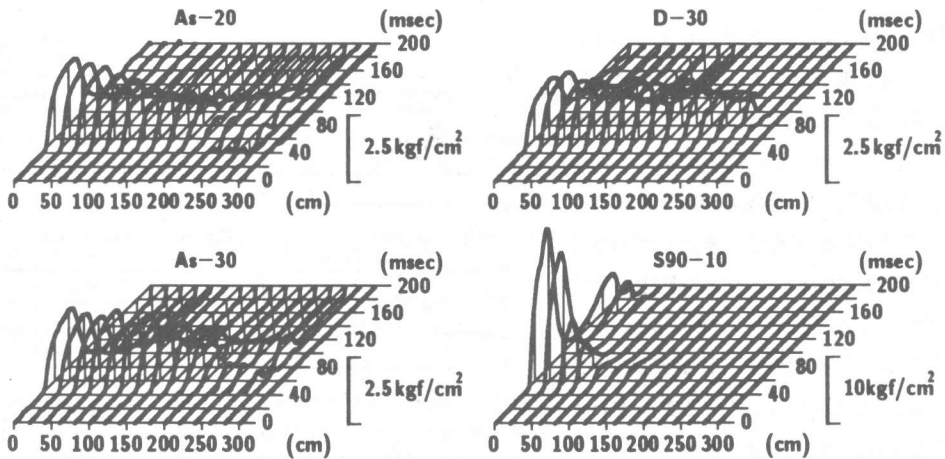


図-2 伝達衝撃応力分布

に設置され、載荷点中央部の横断方向に頂版と面一になるよう埋設されている。

3. 実験結果および考察

3.1 伝達衝撃応力分布の比較

図-2に各ケースの伝達衝撃応力の分布を示している。図は、横軸に載荷点中央部を原点にとり載荷点より山側方向への距離を、奥行方向には時間、高さ方向には伝達衝撃応力値をとって整理している。なお、As-, D- は芯材 RC 版の大きさが 520 cm 四方であるため、260 cm 以遠の波形は裏層材 EPS 材のみが設置されている部分の応答である。図より As-20, 30 は原点より 180 cm 程度までは 2 kgf/cm^2 程度のほぼ均等な分布を示していることがわかる。D-30 の場合は原点より 240 cm 程度までほぼ均等な分布を示し、As- よりも若干応力の分散性が改善されているようである。一方 S90-10 の場合は、前記三層緩衝構造の場合と異なり、応力の分布領域が原点から 60 ~ 80 cm 程度に限定されており、その分布状況も載荷点中央部が大きい円錐状分布になっていることがわかる。また中央部の最大応力は 20 kgf/cm^2 以上で、三層緩衝構造の 10 倍以上の値となっている。応力の波動継続時間に関しては、三層緩衝構造の場合には As-, D- とほぼ 75 msec 程度であるのに対し、S90-10 の場合には載荷点中央部で継続時間が 45 msec 程度の正弦半波の主波動が発生した後、再び 5 kgf/cm^2 程度まで徐々に振幅が増大し、やがて零レベルに戻っている。全波動継続時間は 150 msec 程度である。

3.2 各応答波形の比較

図-3に各実験ケースに関する重錘加速度、載荷点中央部における伝達応力、覆工頂版の上下端筋歪に関する応答波形を比較して示している。(a)図は As-20, 30 の比較を、(b)図は As-30, D-30 および S90-10 の比較を示している。(a) 図より、As-20, 30 では最大重錘加速度がそれぞれ 73 G, 106 G で、As-30 が As-20 の約 1.45 倍となっている。この倍率は重錘の衝突速度比 (1.22) より大きい。それに比較して伝達応力や頂版上下端筋歪の最大値は、ほぼ類似の値を示しているようである。これは、重錘落下エネルギーあるいは衝突速度の大小によって、重錘が緩衝構造と衝突する際に発生する加速度に差が生ずるものの、芯材 RC 版および裏材の荷重分散および衝撃吸収作用によって、同程度の荷重が覆工本体に入力されていることを示しているものと考えられる。(b) 図より、As-30 と D-30 の各最大値はほぼ類似の値を示しており、芯材 RC 版の補強筋材料の違いによる顕著な差は示されていないことがわかる。剛体基礎における処女載荷時の予備実験結果と同様に S90-10 の場合は、最大重錘加速度が As-30, D-30 の約 1/3 程度であるが、伝達衝撃応力が 20 kgf/cm^2 以上の値を示しており、前述のように、三層緩衝構造の 10 倍以

上の値となっていることがわかる。また、頂版上下端筋歪波形より、歪波動の継続時間は伝達衝撃応力の主波動部の荷重継続時間約 60 ~ 70 msec と同程度であり、伝達衝撃応力波の第 1 半周期が覆工の応答波形に大きな影響を与えていることがわかる。最大応答歪値に関しては、上端筋歪の場合には S90-10 の場合が As-30, D-30 の場合より若干小さな値を示し、下端筋歪の場合には三者類似の値を示していることがわかる。詳細に関しては後述するが、S90-10 における頂版の上下端筋歪の最大応答値が As-30, D-30 の場合と同程度であることは、重錘の落下エネルギーの立場から考えると、As-30, D-30 の場合は S90-10 の 3 倍の緩衝能力があることを意味している。

3.3 衝撃力波形の比較

ここでは重錘衝撃力と、伝達衝撃応力を総和して得られる伝達衝撃力の経時変化についての検討を行なう。重錘衝撃力は重錘質量に衝撃加速度を乗じた値である。従って、その波形は重錘衝撃力と相似である。また、伝達衝撃力は伝達衝撃応力が落下点を中心として軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いてその応力を集積し評価することとしている。図-4 には重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形を前項と同様に比較して示している。(a) 図より、正載荷状態における両衝撃力波動の継続時間は As-20, 30 とほぼ等しいことがわかる。最大値に関しては、重錘衝撃力に関しては As-30 が As-20 より約 100 tf 程度大きい。伝達衝撃力に関しては図-3 (a) の伝達衝撃応力波同様大差はなく、20 tf 程度の差となっている。(b) 図より、As-30 と

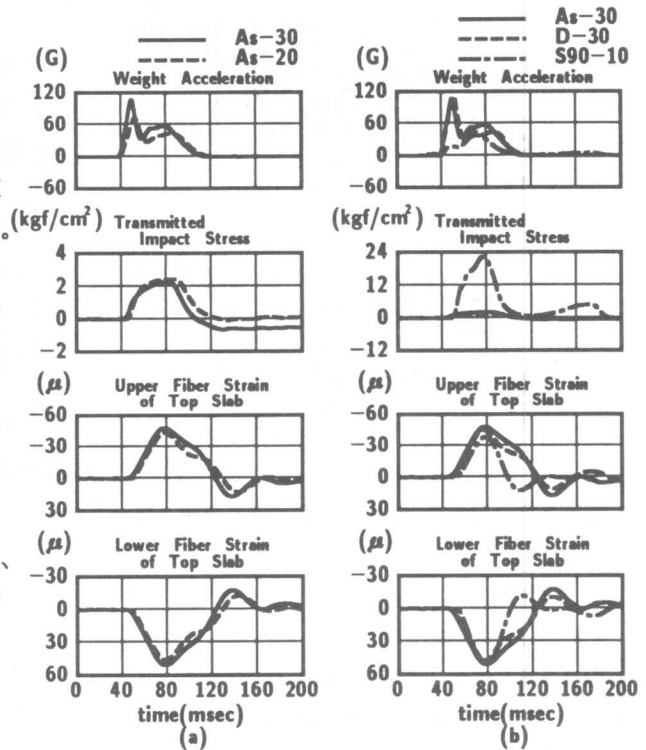


図-3 各応答波形の分布図

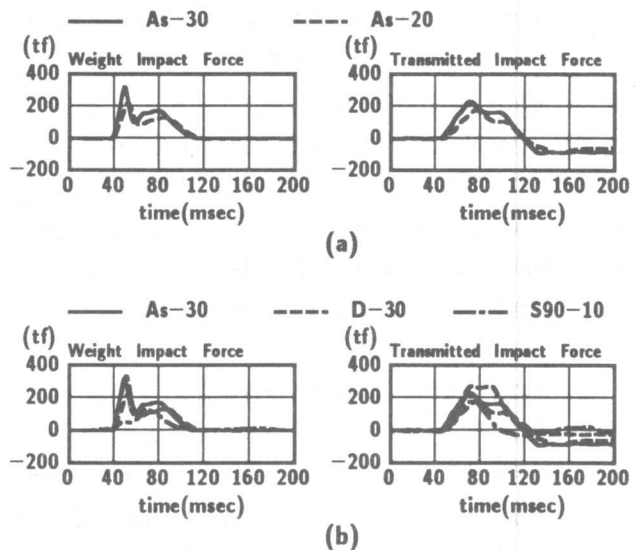


図-4 重錘衝撃力と伝達衝撃力の経時変化

D-30 は重錘衝撃力に関しては、両者ともほぼ等しい波形となっているが、伝達衝撃力に関しては主波動継続時間は両者ほぼ等しいが、衝撃力の最大値は As-30 が D-30 に比べて 44 tf 程度小さいようである。重錘衝撃力と伝達衝撃力の最大値について比較すると、As-30 の場合にはそれぞれ 319 tf, 231 tf、D-30 の場合には 334 tf, 276 tf であり、いずれも伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも小さくなっている。一方、S90-10 の場合には、最大重錘衝撃力が 112 tf で As-30, D-30 の場合の 1/3 程度であることは重錘加速度

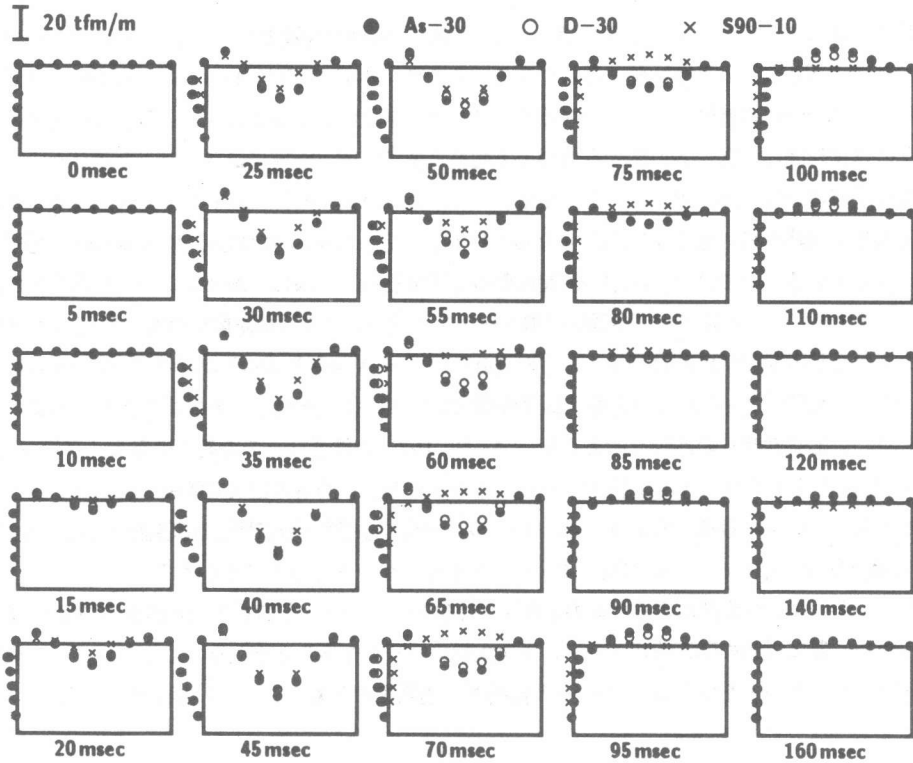


図-5 曲げモーメント分布の経時変化

の場合と同様である。最大伝達衝撃力は 179 tf となっており、As-30, D-30 の場合の 65 ~ 75 % 程度の値となっている。伝達衝撃力の主波動の継続時間を調べると、S90-10 の場合が 45 msec 程度、As-30, D-30 の場合が 65 msec 程度であり、前者が後者よりも 20 msec 程度短いことがわかる。一般に、正弦半波強制外力に対する減衰性の大きい構造物の応答倍率は、外力の波動継続時間が構造物の最低時固有振動の半周期に近づく場合には、最低次の固有振動モードが助長されるため大きくなり、固有振動周期に近い場合にはそれが固有振動モードを打ち消す方向に作用するため小さくなるものと考えられる。本覆工の最低次固有振動周期は簡易立体解析により略算すると 70 msec 程度である。これより、伝達衝撃力の波動継続時間は、As-30, D-30 の場合には覆工の応答倍率を低減する方向に、S90-10 の場合には増大する方向に作用するものと推察される。

なお、剛基礎上での緩衝性能に関する繰返し実験 [2] より、AFRP ロッドを補強筋として用いる場合には、AFRP ロッドの高弾性伸び率等の特性によって、AS- は D- に比較して衝撃荷重載荷時間が長くなることが明らかになっている。しかしながら、本実験では全て処女載荷で芯材 RC スラブの損傷が小さいため、補強筋の違いによる効果が顕著に表れず、両者が類似の荷重継続時間になったものと考えられる。

3.4 曲げモーメント分布の比較

ここでは、頂版及び山側壁部の上下端筋歪波形を用いて算出した曲げモーメント分布に関する比較検討を行なう。断面各点の曲げモーメントは、重錘落下による最大応答歪の出力が 50μ 程度であることを考慮して全断面有効と仮定して算出している。図-5 に重錘加速度の立ち上がり時間を起点とした場合の各経過時刻における As-30, D-30, S90-10 の場合の曲げモーメント分布を比較して示している。分布図には、曲げモーメントが衝撃初期に載荷点部のみに発生し、その後時間の経過とともに徐々に周辺部に広がっていく状態が示されている。また、山側壁の下端部は、曲げモーメントが常にほぼ零であり、ピン支持に酷

似た状態となっていることがわかる。As-30 と D-30 の場合の比較を行なうと、経過時間が 45 msec 前後までは両者同じような分布性状を示している。その後、D-30 の方が As-30 より若干小さな分布を示しているが、85 msec 経過後には両ケースとも零モーメント状態となっており、正荷重載荷状態の曲げモーメントの継続時間は、図-3 の載荷点部の上下端筋歪波形同様、両者ほぼ等しいことがわかる。また、負荷重載荷状態における曲げモーメント分布は、As-30 の方が D-30 より若干大きく示されているが、その値は正荷重載荷時の最大値の 1/2 以下となっている。一方、S90-10 の場合は 40 ~ 45 msec 経過後に最大応答になっている。その値は、前述の載荷点部の上下端筋歪と同様に、As-30, D-30 と同程度の値になっている。その後、60 ~ 65 msec 経過後に零モーメント状態となり負荷重載荷状態へ移行している。これより、正荷重載荷状態の継続時間は、前述の歪波形同様に As-30 と D-30 の場合が S90-10 の場合より約 20 msec 程度長いことが確認できる。伝達衝撃力の分布形状を無視し、その最大衝撃力およびその主波動継続時間の応答性状への影響を考えると、As-30, D-30 の場合は、その最大衝撃力（平均 250 tf）が S90-10 の場合（179 tf）の 1.4 倍であるにもかかわらず、両者の最大応答曲げモーメントが同程度であることより、前項で推察したように As-30, D-30 の場合の主波動継続時間は応答値を低減する方向に、S90-10 の場合は大きくする方向に作用していることを示しているものと考えられる。

以上より、As-, D- は重錘による衝撃力を効率よく低減し、かつ、伝達衝撃力の作用時間を延ばすことができるため、覆工頂版の応答曲げモーメントを大幅に低減できることが明らかになった。その緩衝能力は重錘落下エネルギーより考えると S90 の 3 倍程度、運動量から考えると $\sqrt{3}$ 倍程度となる。

4. まとめ

芯材 RC 床版の補強筋として高強度、高弾性伸び率を有する AFRP ロッドを用い、表・裏層材としてそれぞれ敷砂、および EPS 材を用いた三層緩衝構造 (As-) の実構造への適用に関する信頼度を高めることを目的として、供用開始前の実覆工を用いた実証実験を行なった。実験は、芯材 RC 床版が 20 cm、表・裏層材が 50 cm の緩衝構造を覆工頂版上に設置し、重量 3 tf の重錘を最大高さ 30 m より落下させて行なった。なお、性能比較のために芯材 RC 床版の補強筋として異形鉄筋を用いた場合 (D-) や 90 cm 厚の敷砂を用いた場合 (S90-) についての実験を行なっている。本実験より得られた結果を要約すると、

- 1) As-, D- 等の三層緩衝構造の場合は伝達衝撃応力が 2 kgf/m^2 程度の均等な分布となる。一方、S90- の場合には載荷点部が大きい円錐状分布となり、その最大値は As-, D- の 10 倍以上である。
- 2) As-, D- の場合は伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも 20 ~ 30 % 小さくなるが、S90 の場合は逆に 50 % 大きくなる。
- 3) As-, D- の場合は、S90- に比較して伝達衝撃力、主波動継続時間も覆工の曲げモーメントを低減する方向に作用する。覆工の最大応答値に注目した場合の As-, D- の緩衝性能は、重錘落下エネルギーより考えると S90- の 3 倍程度、運動量から考えると $\sqrt{3}$ 倍程度となる。

以上より、AFRP ロッドを補強筋とする芯材 RC 床版を用いる三層緩衝構造は、異形鉄筋を用いる場合と同様、十分に実務に適用可能であることが実証された。

参考文献

- 1) 岸徳光・中野修・今野久志・松岡健一：三層緩衝構造の緩衝構造に関する屋内実験、土木学会構造工学論文集、Vol.38A、pp. 1577-1586、1992.3.
- 2) 岸徳光・中野修・三上浩・松岡健一：組み紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブを用いた大型緩衝構造の衝撃吸収性能、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.655-660、1992.6.