

論文

[2159] PC多主桁上に設置した新素材を用いたRC版を有する緩衝構造の緩衝特性

菅田 紀之^{*1}・中野 修^{*2}・岸 徳光^{*3}・三上 浩^{*4}

1. はじめに

近年、道路の落石防護施設や原子力発電所の諸施設ならびに危険物貯蔵施設等の衝撃的な荷重載荷に対する安全性を高めるための研究が盛んに行われている。著者等も、コンクリート部材の耐衝撃性に関する研究として、衝撃荷重が部材に直接作用する場合の衝撃応答性状に関する研究 [1] や衝撃荷重載荷による構造物の応答を低減させるための緩衝構造の開発 [2], [3] を行ってきた。土木構造物に対する緩衝構造に関しては、従来より敷砂が用いられてきた。しかしながら、著者等の実験によれば、敷砂を通して構造物に直接作用する荷重が、衝突物の加速度より算出される衝撃力の 2 倍程度になることや分散性が悪いことが明らかになっている [4]。このような敷砂緩衝材の欠点を克服するために、敷砂材および EPS 材 (Expanded Poly-Styrol) をそれぞれ表・裏層材、RC版を芯材とする三層緩衝構造を開発し、剛基礎上での実験によりその緩衝特性について検討してきた。芯材RC版に関しては、補強筋として鉄筋を用いた場合とアラミド繊維製 FRP (AFRP) ロッドを用いた場合について検討を行っている。いずれの場合も敷砂に比べ緩衝性能、荷重分散効果とも著しく向上することが明らかになっている。特に AFRP ロッドは軽量で非帯磁性の新素材であるが、その他鉄筋と比較して弾性伸びが約 10 倍、引張耐力が 2.5~3.4 倍であり降伏点もないため、衝撃荷重の作用時間が延びることが明らかになっている。この特性は構造物との相互作用により、鉄筋を用いる場合に比較して構造物の応答値を低減する方向に作用するものと考えられる。

本論文では、AFRP ロッドを補強材とする芯材RC版を用いた三層緩衝構造の構造物に対する適用への信頼度を高める目的で、これを横締めした単純支持PC多主桁上に設置し、重錘落下による衝撃実験を行って、重錘衝撃力 (重錘加速度に重錘質量を乗じて得られる衝撃力) と PC多主桁の応答歪波形を用いて緩衝特性に関する検討を行った。

2. 実験の概要

実験の概要を図-1に示す。実験は、純スパン5m、幅6mのPC多主桁上に、AFRPロッドを補強筋とするRC版を芯材とし、表・裏層材として敷砂およびEPS材から構成される三層緩衝構造を設置し、重量3tfの重錘を高さ30mから自由落下させて行っている。載荷実験は3桁上に処女載荷を行い、芯材および裏層材は取り替えずに表層の敷砂のみを整地し直して、順次2桁、4桁上に載荷させている。測定項目は、重錘の加速度およびPC桁の補強筋の84点における歪応答波形である。各応答波形は直流増幅器を用いて増幅

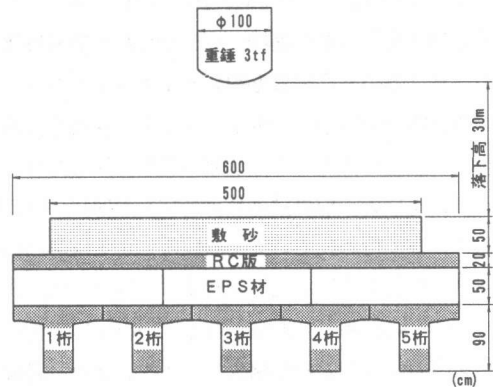


図-1 実験の概略図

*1 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科、工修 (正会員)
 *2 北海道開発局開発土木研究所構造研究室室長、工博 (正会員)
 *3 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)
 *4 三井建設 (株) 技術研究所主任研究員、工博 (正会員)

し、データレコーダに一括集録している。集録された波形は、実験終了後にデジタルメモリを用いて A/D 変換し、ワークステーションによって処理されている。

2.1 PC多主桁

図-2に示す本実験で用いたPC桁は、次の条件の下に設計されている。すなわち、1) 重量 3 tf の落石が高さ 10m から桁上の敷砂に自由落下する。2) 緩衝材として 90cm 厚の敷砂 (単位重量は $1.8\text{tf}/\text{m}^3$) を用いる。3) 敷砂材のラーメ定数を $\lambda = 100\text{tf}/\text{m}^2$ と仮定して振動便覧式 (1)

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

ここで、 W は重錘重量 (tf)、 H は落下高さ (m)

[5] によって算定された 128.3 tf の衝撃荷重が桁中央部に作用する。3) 落石対策便覧 [5] に従い、荷重は敷砂厚の 2 倍の領域に分散する。また、桁の製作に用いられている材料は、設計基準強度 $750\text{kgf}/\text{cm}^2$ のコンクリート、SBPR 930/1080 $\phi 26$ (丸棒B種1号) のPC鋼棒、SD295A の異形棒鋼である。主桁のプレストレスは9本のPC鋼棒を用いたポストテンション方式によって導入されている。桁内の有効プレストレスおよび各荷重段階における応力度を表-1に示す。プレストレスは鋼棒の有効引張応力を $53.76\text{kgf}/\text{mm}^2$ として導入されている。桁の横締めはフランジ部に 1 m 間隔に配置されたPC鋼棒によって行われている。横締めによる床版内の有効プレストレスは、鋼棒の有効引張応力を主桁と同様に $53.76\text{kgf}/\text{mm}^2$ として、フランジ上縁で $18.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ の圧縮応力 (52μ の圧縮歪)、下縁で $3.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ の圧縮応力 (9.4μ の圧縮歪) である。なお、実験開始時における現場養生のコンクリート円柱供試体の圧縮強度は $777\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、弾性係数は約 $3.8 \times 10^5\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。

2.2 三層緩衝構造

本実験に用いた緩衝構造は図-1に示すように、表層より 50 cm 厚の敷砂、20 cm 厚のRC版、50 cm 厚のEPSから成る三層緩衝構造である。芯材に用いたRC版の形状寸法は $6\text{m} \times 4\text{m} \times 20\text{cm}$ であり、コンクリートの呼び強度 $225\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、補強筋比 1% の複筋断面とし、補強筋をかぶり 3 cm で 8 cm 間

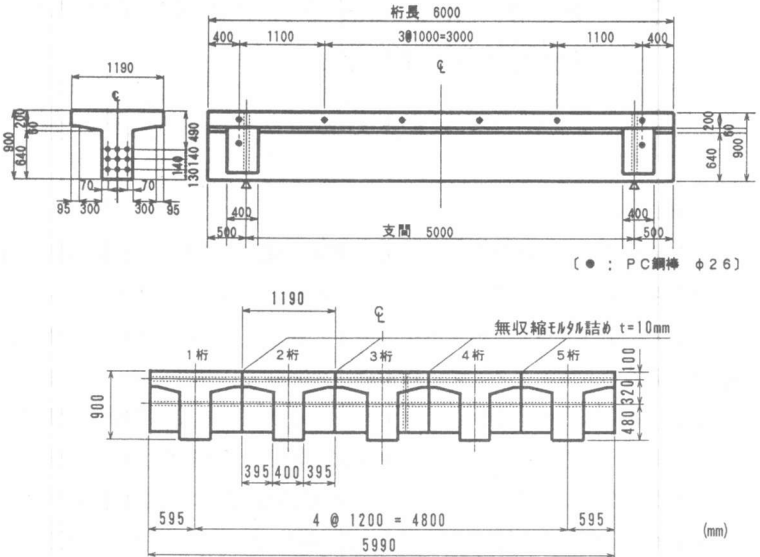


図-2 PC多主桁

表-1 桁の有効プレストレスおよび各荷重段階における応力度

	桁上縁	上端筋位置 (上縁から 5 cm)	下端筋位置 (下縁から 5.5 cm)	桁下縁
有効プレストレス (kgf/cm^2)	17.4 (49.7 μ)	7.9 (22.6 μ)	-142.7 (-407.7 μ)	-153.1 (-437.4 μ)
死荷重による 応力(kgf/cm^2)	-8.0 (-22.9 μ)	-6.8 (-19.4 μ)	11.9 (34.0 μ)	13.2 (37.7 μ)
合成応力 (kgf/cm^2)	9.4 (26.8 μ)	1.1 (3.2 μ)	-130.8 (-373.7 μ)	-139.9 (-399.7 μ)
設計衝撃力による 応力(kgf/cm^2)	-97.9 (-279.7 μ)	-83.4 (-238.2 μ)	146.4 (418.3 μ)	162.3 (463.7 μ)
合成応力 (kgf/cm^2)	-88.5 (-252.9 μ)	-82.3 (-235.0 μ)	15.6 (44.6 μ)	22.4 (64.0 μ)

()内は $E = 3.5 \times 10^5\text{kgf}/\text{cm}^2$ としたときの歪を示している

表-2 AFRP ロッドの
材料特性

	AFRP ロッド
材質	アラミド繊維
公称直径 (mm)	12.7
公称断面積 (mm^2)	127
引張耐力 (tf)	19.2
弾性係数 (kgf/cm^2)	7.0×10^5
弾性伸び (%)	2.0

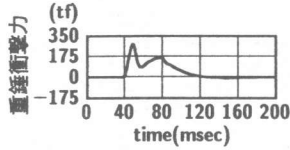


図-3 剛基礎における重錘衝撃力

隔で配置している。芯材RC版の補強筋である AFRP ロッドの材料特性は表-2に示すとおりである。本実験で用いた AFRP ロッドはアラミド繊維を組紐機で編み上げた後、樹脂を含まし表面に5号珪砂を接着し硬化成形したものである。実験時のコンクリートの材令は12日であり、材令8日の圧縮強度は 238 kgf/cm^2 であった。表層材に使用した敷砂材は、単位体積重量 1.61 tf/m^3 、表乾比重 2.62、粗粒率 2.74、均等係数 5.72、曲率係数 0.86 の栗丘産細骨材である。敷砂材は 20 cm 毎に平均的に踏み固めを行い、所定の厚さに整地されている。実験時の含水比および相対密度はそれぞれ 5.2%、49.6% であった。裏層材

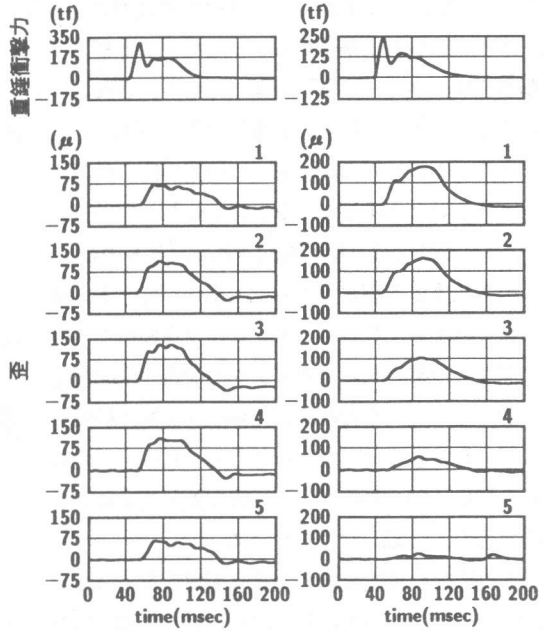
として用いられている EPS 材は、型内発泡法で製造された単位体積重量 20 kgf/m^3 のものを採用している。また、本実験では、寸法 $200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ のブロックを組み合わせて用いている。

3. 実験結果および考察

本実験に用いている PC 桁は、前記のように重量 3 tf の落石が 10 m の高さから自由落下する場合に対して設計されている。しかしながら、緩衝材に関する剛基礎上での予備実験より、三層緩衝構造を用いる場合は、敷砂を用いる場合に比較して約 4 倍程度の緩衝能力があることが明らかになっているため、本実験では重量 3 tf の重錘を 30 m の高さより落下させることとした。また芯材 RC 版を有効に利用するため、重錘を 3 桁に落下させた後、連続して 2 桁および 4 桁上に落下させ実験を行っている。4 桁上に落下させた場合は、芯材 RC 版の損傷が蓄積されているため剛性が低下しているものと考えられるが、PC 桁の応答性状は 2 桁上に落下させた場合とほぼ対称の分布を示している。これより、ここでは主に重錘を 3 桁および 2 桁上に落下させた場合の結果について示している。実験ケースを簡略して示すために、3 桁、2 桁および 4 桁上に重錘を落下させる場合をそれぞれ P-As-3, P-As-2, P-As-4 として表すものとする。

3.1 重錘衝撃力および主桁下端筋歪波形

図-3には本実験と同一の三層緩衝構造を剛基礎上に設置した場合の重錘衝撃力波形を、図-4には P-As-3, P-As-2 における重錘衝撃力および桁中央の下端筋歪波形を示している。主桁番号は各波形の右肩に示している。両図の比較より、重錘衝撃力は剛基礎における実験結果と類似の結果となっていることがわかる。最大衝撃力の大きさは、P-As-3 で 301.7 tf 、P-As-2 で 237.8 tf 、P-As-4 で 267.2 tf となっており、設計衝撃荷重の 1.8~2.4 倍になっている。また、処女載荷よりも 2 回目および 3 回目載荷の方の最大衝撃力が小さくなっている。これは繰返し落下衝突によって芯材 RC 版の剛性が低下したためと考えられる。各桁の下端筋歪を見ると P-As-3 の場合は、3 桁を中心にして対称な波形分布



(a) P-As-3 (b) P-As-2

図-4 重錘衝撃力および桁中央の下端筋歪波形

を示していることがわかる。3桁の最大歪は 129μ であり、設計衝撃荷重によって発生する桁下端筋歪 418μ の $1/3$ 以下となっている。また、1桁あるいは5桁の最大歪は3桁のその約 $1/2$ であり、これは緩衝材によって荷重が広く分散されていることを示していると考えられる。一方、P-As-2 の場合は2桁に載荷されているものの、1桁で発生する歪が大きく、1桁から離れるに従い徐々に小さくなっている。これは緩衝構造の幅が多主桁の幅と同じであり、かつ荷重が偏心荷重状態となっているため、芯材が載荷点側に線形的に傾いた状態になったためと考えられる。1桁の最大歪は 178μ であり、この値も設計荷重による発生歪の $1/2$ 以下になっている。

本実験での重錘衝撃力が設計衝撃荷重の $1.8 \sim 2.4$ 倍になっているにもかかわらず、桁の応答歪は設計荷重による歪の $1/2$ 以下になっており、三層緩衝構造の荷重低減、分散効果が大きいことがわかる。

3.2 荷重分担の経時変化

三層緩衝構造の荷重分散効果を各桁の荷重分担率を用いて検討する。荷重分担率は、スパン中央部に発生する曲げモーメントの総和に対する各桁で分担する曲げモーメントの比として評価することとした。分担率は各時間毎に評価しなければならないと考えられる。しかしながら、最も重要な値は最大応答発生時であとと考えられる。ここでは最大曲げモーメント発生時の値で各桁に発生する曲げモーメントを除す形で整理している。なお、各桁に発生する曲げモーメントの算定は、測定された歪の最大値が 178μ であることより、コンクリート内にひび割れが発生していないものと仮定し、全断面有効として行っている。なお、曲げモーメント算定時には、測定された上下端筋歪を基本にして、歪分布を桁高方向に線形と仮定し、配筋筋、PC鋼棒の軸剛性も考慮している。図-5に P-As-3 および P-As-2 における桁中央部に発生する曲げモーメントの総和および各桁の荷重分担率を示す。各図の上に最大応答時の荷重分担率を示している。P-As-3 における結果を見ると、耳桁すなわち1、5桁で 13% 程度の分担率を、その他2、3、4桁は $23 \sim 27\%$ 程度の類似の分担性状を示している。特に2、3、4桁の性状は、載荷点が特定できないほど各桁の荷重分担率、その分布性状とも酷似している。これは三層緩衝構造により衝撃荷重が等分布的に分散された結果と考えられる。これより荷重が自由端から離れている桁上に載荷される場合には 30% 程度の荷重分担を考慮するだけで十分であることがわかる。一方、P-As-2 の場合には、前項の下端筋軸歪波形同様、1桁で最も大きく 33% となり1桁から離れるにしたがい徐々に小さくなっている。荷重が自由端近傍に載荷される場合においても、三層緩衝構造の荷重分散効果が期待できるものと考えられる。また、自由端近傍に載荷される場合でも 35% 程度の荷重分担となることが明らかになった。

3.3 桁中央部曲げモーメントの断面方向分布の経時変化

図-6に前項で求められた桁中央部曲げモーメント分布について重錘加速度の立上がりからの経時変化を示している。(a)は、P-As-3、(b)はP-As-2 の場合である。桁番号を対応する桁の左に示している。

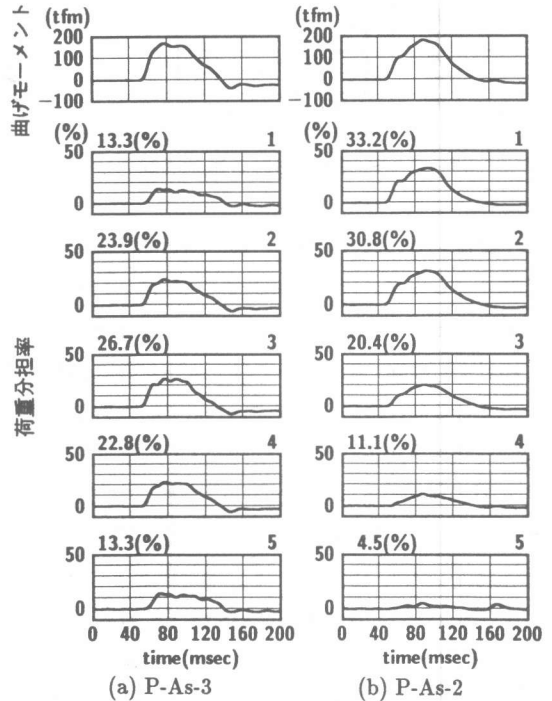
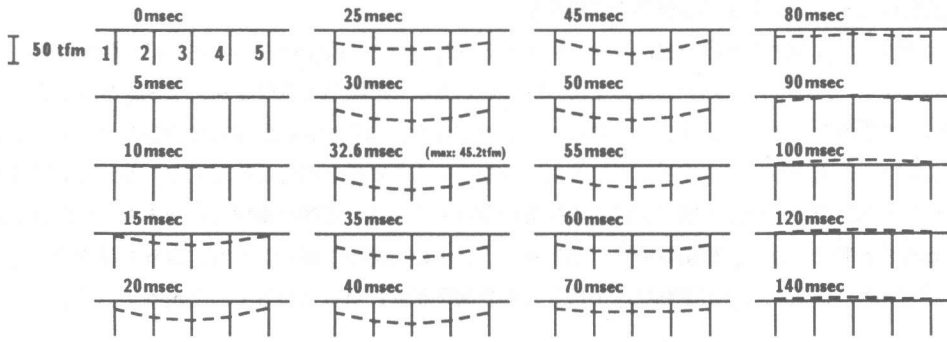
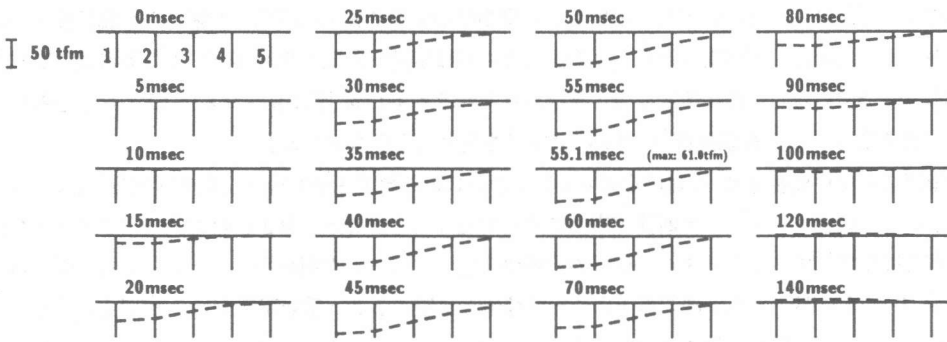


図-5 桁中央部の曲げモーメントの総和および各桁の荷重分担率



(a) P-As-3



(b) P-As-2

図-6 桁中央部の曲げモーメントの断面方向分布

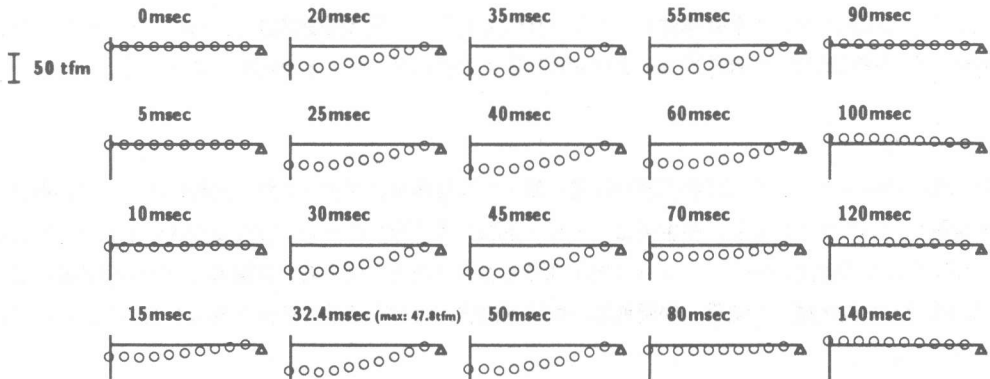


図-7 3桁の曲げモーメントの軸方向分布 (P-As-3)

前項でも述べたように P-As-3 では中央部が若干大きい緩やかな分布性状を示しており、各桁の荷重分担がより均等化されている状態が示されている。P-As-2 の場合には、1桁と2桁の曲げモーメントはほぼ等しいが、3、4、5桁ではほぼ直線的にモーメントが減少しているようである。両図とも負の曲げモーメントは正の応答値に比べ無視できるほど小さく、衝撃荷重除荷時の上方への跳ね返りが非常に小さいことがわかる。桁の最大曲げモーメントに注目すると P-As-3、P-As-2 ではそれぞれ 45.2、61.0 tfm であり、設計計算より求められる落石荷重による曲げモーメント 111.6 tfm と比較すると、P-As-3 の場合はその 1/2.5、P-As-2 の場合には 1/1.8 となっている。この結果からも三層緩衝構造の荷重低減効果および分散効果が大きいことがわかる。

3.4 3桁曲げモーメントの軸方向分布の経時変化

図-7は P-As-3 における3桁の曲げモーメントの軸方向分布の経時変化を示している。曲げモーメントの軸方向分布は、スパン中央点から支点まで 25 cm 間隔に上下端筋に添付されている歪ゲージからの出力を基にして求められている。図より、曲げモーメントが軸方向にほぼ放物線状に分布していることがわかる。これは、荷重が集中的に作用しているのではなく軸方向に等分布的に作用していることを示唆するものであり、本研究に用いた三層緩衝構造の荷重分散効果により、重錘の衝撃力が桁上面では等分布的に作用した結果と考えられる。荷重除荷後、曲げモーメントの応答がほぼ0となり、減衰の程度が大きいことから主応答時には低次の自由振動状態ではなく強制振動状態になっているものと推察される。

4. まとめ

著者等によって開発された、新素材を用いた三層緩衝構造を構造物上へ設置した場合の緩衝性能を実証的に明らかにするために、単純支持PC多主桁上にその緩衝構造を設置し重錘落下による衝撃載荷実験を行った。本実験で用いた三層緩衝構造の表・裏層材はそれぞれ 50 cm 厚の敷砂および EPS 材、芯材は厚さ 20 cm、補強筋比 1% の複筋配置の AFRP ロッドを用いた RC 版である。

三層緩衝構造を用い重量 3 tf の重錘を高さ 30 m から3桁に落下させた場合、桁の荷重分担率が 30% 以下になること、曲げモーメントの断面方向分布が均等化していること、および軸方向分布が等分布荷重を受ける場合に類似していることより、荷重の分散効果が大きいことが明らかになった。また、敷砂材を用いて高さ 10 m から落下する条件で算出された計算値と比較すると、重錘衝撃力は 2 倍以上の大きな値を示すにもかかわらず、桁の応答歪および曲げモーメントは 1/2 以下になり、大きな荷重低減効果を持つことが明らかになった。2桁に重錘を落下させた場合には、3桁に落下させた場合の結果には劣るものの十分な荷重の低減、分散効果を持つことが明らかになった。

以上より、AFRP ロッドを補強材とした芯材 RC 版を用いた三層緩衝構造は、剛基礎における実験結果同様、敷砂材に比較して緩衝性能および荷重分散性に優れていることが明らかになった。

謝 辞

室蘭工業大学建設システム工学科教授松岡健一博士には実験およびデータ整理全般に渡ってご指導戴いた。本実験に用いられている PC 多主桁はドービー建設工業（株）において設計製作されたものである。また、EPS 材は三菱油化パーディッシュ（株）より提供されたものである。実験およびデータ処理には、室蘭工業大学大学院生尾山靖史君、松岡篤君、佐竹利治君、竹村瑞元君に多大な協力を戴いた。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 三上浩・岸徳光・松岡健一・能町純雄：組紐状 AFRP ロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1591-1602、1991.3
- 2) 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
- 3) Nakano, O., Kishi, N., Matsuoka, K. G. and Yoshimura, J. : Development of 3-Layered Shock-Absorbing System for Rock Sheds, Proceedings of the International Symposium on Impact Engineering, Vol.2, pp.725-729, Nov. 1992
- 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.-、1993.3
- 5) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983