

論文

[2113] 組紐状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

正会員○岸 徳光 (室蘭工業大学建設システム工学科)

中野 修 (北海道開発局開発土木研究所)

正会員 三上 浩 (三井建設土木設計部)

正会員 松岡健一 (室蘭工業大学建設システム工学科)

1. はじめに

近年、原子力発電所の諸施設や道路の落石防護施設等を対象として、衝撃的な荷重に対しより一層の安全性を確保するために盛んに研究が行われるようになってきた。構造物の耐衝撃性を確保するための研究には次のような2通りの方向性が考えられる。一つは直接的に衝撃荷重が作用する場合を想定した構造物本体の挙動検討であり、他は衝撃力を低減させるための緩衝構造に関する検討である。前者に関する研究として、著者等は重錘落下衝撃による弾性から弾塑性領域でのRC,PCスラブおよび組紐状AFRPロッドで補強したRCスラブの衝撃挙動に関する研究を行ってきた[1]。後者に関しては、緩衝材として敷砂やEPS(Expanded Poly- Styrol)材を単体で用いた場合や、芯材としてRCスラブを用いその表裏材にEPS材等を用いた場合の三層緩衝構造体の性能に関する研究を数値計算および室内実験を中心に行ってきた[2]。

本論文は芯材として組紐状AFRPロッドを補強筋とする約4m×4mのRCスラブを用い、表層および裏層材としてそれぞれ敷砂、EPS材を用いた三層緩衝構造の緩衝性能を検討することを目的として大型重錘落下衝撃実験を行い、芯材として異形鉄筋を補強筋とするRCスラブを用いた場合や敷砂単層のみを用いた場合の実験結果と比較検討を行った。本実験では表層材厚、裏層材厚とも50cmとし、芯材RCスラブの補強筋の剛性や伸び性能およびコンクリートとの付着性能が緩衝性能等に与える影響を検討するため、補強筋はロッド表面に珪砂を接着させたものと無処理のものおよび異形鉄筋の三種類とした。なお、衝撃荷重は同一構造体の中央部に3tfの重錘を10m, 20m, 30mと徐々に高度を上げ自由落下させて載荷している。

2. 実験概要

2.1 実験方法

図-1に本実験に用いた緩衝構造の横断面形状寸法を示す。実験は680cm×680cm×50cmのコンクリート基礎上に、400cm×400cmの三層緩衝構造を設置し、その中央部に重量3tfの重錘(直径1m高さ97cmの円柱体で底部が高さ17.5cmの球状)を所定の高さより自由落下させることによって行っている。重錘には歪ゲージ型加速度計を取り付け、その加速度波形を測定でき

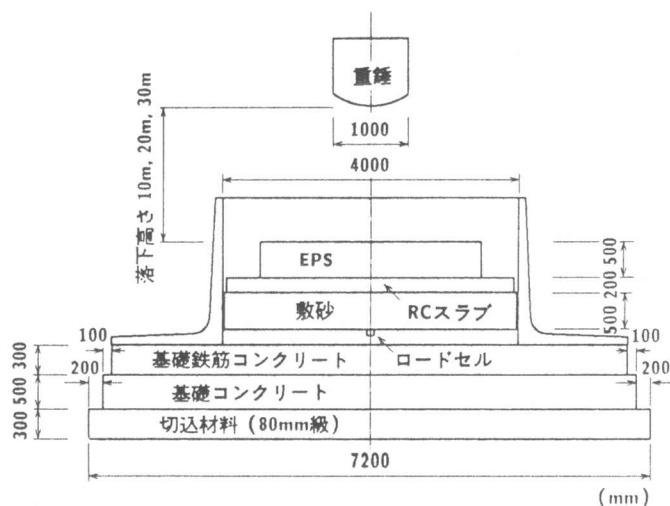


図-1 緩衝構造の横断面形状寸法

るようにしている。表-1に本実験の実験ケースを示している。

2.2 RCスラブ

本研究では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(AsC), 無処理の場合(AC), 異形鉄筋を用いた場合(RC)のスラブを各一体ずつ製作し、芯材として利用している。各スラブの形状寸法はいずれも395cm×395cm×20cmであり、配筋比1%の単筋配置とし、AFRPロッドの場合はK192S, K192を、異形鉄筋の場合はD13をそれぞれ10cm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210kgf/cm²として配合設計を行い現場にて打設、養生を行った。材令28日の圧縮強度は239kgf/cm²で、実験時の材令は30日であった。

2.3 表・裏層材

本研究では表層, 裏層材として50cm厚の敷砂, EPS材を用いている。敷砂は単位体積重量が1.618tf/m³, 比重2.57, 吸水率1.86%の北海道栗丘産砂である。敷砂は20cm毎に平均的に踏み固めを行い、所定の敷厚としている。また20m, 30m落下時には重錘衝突部の貫入部分を掘り返し再度前記と同様の要領で所定の高さまで整地している。裏層材に用いたEPS材は密度が20kgf/m³, 50%圧縮強度が1.1kgf/cm², ポアソン比0.05である。弾性挙動を示す領域は圧縮歪が1%以下であり、その応力は5%圧縮強度の約1/2である。本実験では寸法200cm×100cm×50cmのEPSブロックを組み合わせて所定の寸法(400cm×400cm×50cm)としている。

2.4 測定項目

本実験では、重錘衝突衝撃力算定のための重錘加速度(4ch)、コンクリート基礎上への伝達衝撃力を検討するためのロードセル応力(25ch)について測定を行っている。ロードセルは受圧部直径25mm, 容量300kgf/cm²の衝撃荷重測定用のものである。その波形は各設置点の直径25mmの円内に作用する荷重として出力されるが、本実験では伝達衝撃応力を測定することを目的としているため応力に換算して評価することとした。なお、各センサーからの出力はデータレコーダに記録しA/D変換の後、ワークステーションを用いて処理している。

3. 実験結果および考察

3.1 伝達応力の経時変化および分散性状

図-2に基部ロードセルから得られた伝達応力の経時変化を、横軸に載荷点中央部を原点としてロードセルの位置、縦軸に応力をとって整理している。ここでは応力波形の対称性を確認して載荷中心点から一方向の応力についてのみ整理している。全測定時間はいずれも200 msec

表-1 実験ケース

芯材スラブ	補強筋種類	重錘落下高さ(m)		
AsC	砂付きロッド K192S	10	20	30
AC	砂無しロッド K192			
RC	異形鉄筋 D13			
敷砂単層 90cm厚				

但し、表層：砂50cm, 裏層：EPS材50cm, 重錘重量3tf

表-2 補強筋の材料特性

補強筋名	K192S	K192	D13
材質	アラミド 繊維	同左	SD30A
(公称)直径 (mm)	15.5	14.0	12.7
(公称)断面積 (cm ²)	1.50	同左	1.267
密度 (g/cm ³)	1.30	同左	7.85
降伏耐力 (tf)	—	—	3.8
引張耐力 (tf)	19.2	同左	5.7~7.7
弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)	0.65	同左	2.10
弾性伸び (%)	1.97	同左	0.20
ポアソン比	0.62	同左	0.30

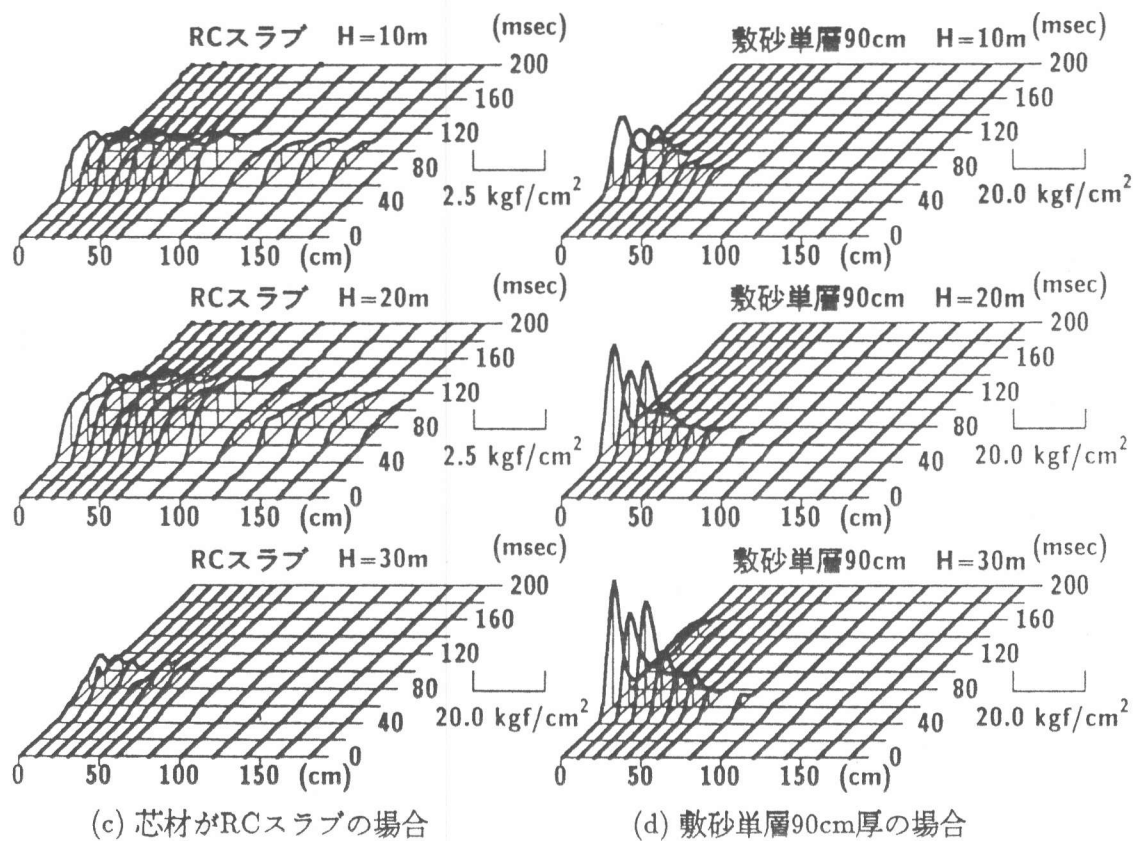
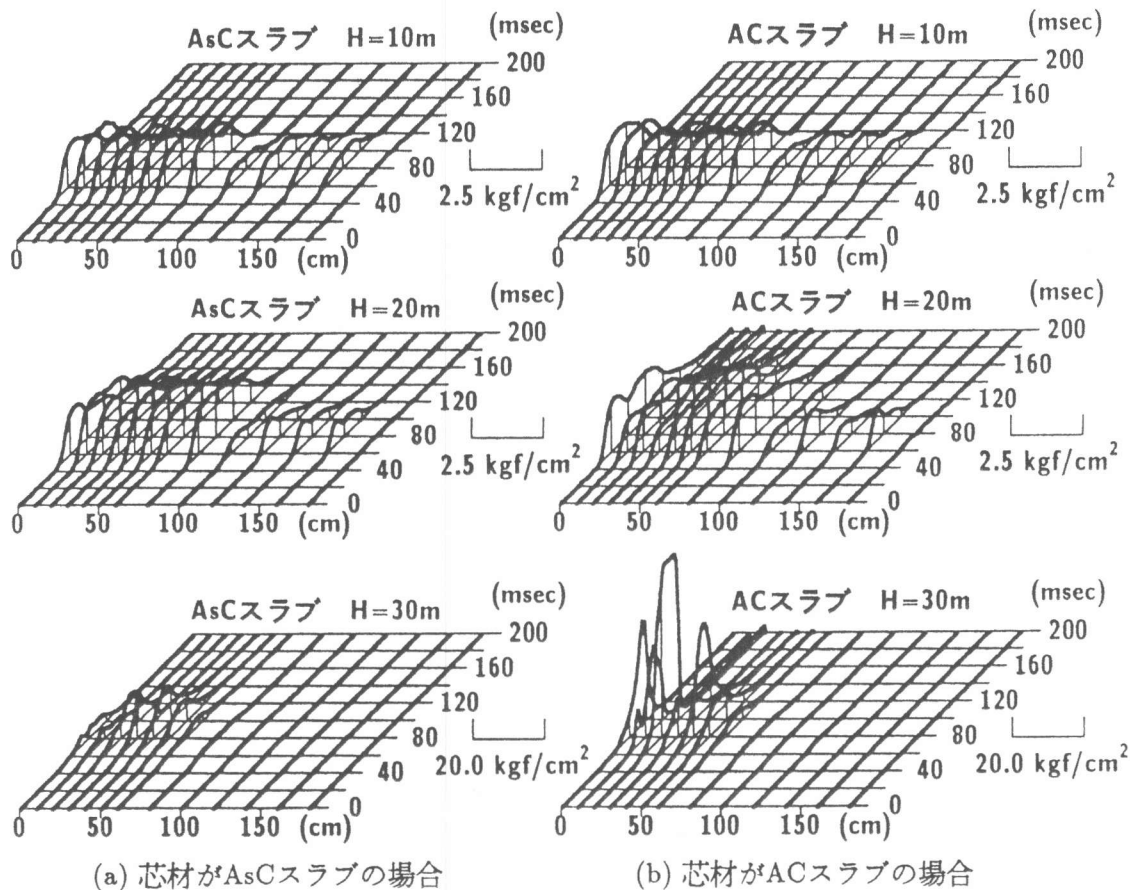


図-2 伝達衝撃力の経時変化

としている。

まず、三層緩衝構造とした場合の芯材コンクリートスラブの効果について検討を行う。10m落下時には3スラブとも衝撃荷重が同程度に分散されており、その応力も最大で 2.0kgf/cm^2 となっているようである。20m落下時には3スラブとも原点より70cm以内各点の応力が100cm以上離れた各点の応力より大きくなっており、応力の分散性能は若干低下しているようである。しかしながら、この程度の落下回数、落下エネルギーの場合には、いずれのスラブとも大きな損傷を受けず衝撃荷重をよく分散できているものと考えられる。

30m落下時には応力は20m落下時より一層中央部に集中していることがわかる。その程度はACスラブがAsC, RCスラブの場合よりも大きく、中心部で 20kgf/cm^2 以上になっておりAsC, RCスラブの場合の4倍以上の値を示している。また原点より20cm離れた点の応力は 45kgf/cm^2 以上の値を示している。これはACスラブのロッドとコンクリートとの付着性能が低いため載荷点部のコンクリートが大きく剝離し、そのコンクリート塊がEPS材中に食い込み応力集中が生じたものと考えられる。これよりAsC, RCスラブの場合は荷重分散性がある程度低下するものの伝達応力が 10kgf/cm^2 程度であり未だ緩衝材としての機能を十分果たしているものと考えられる。また、1) 補強材の剛性はAsCスラブとACスラブの場合が等しいこと、2) コンクリートと補強材との付着性能はRCスラブとAsCスラブがACスラブより優れていること、等から類推すると、衝撃力の分散効果には補強材とコンクリートとの付着性能が大きく関与しているものと考えられる。

三層緩衝構造とした場合と敷砂単層を用いた場合について比較を行うと、三層緩衝構造の場合には落下高が10~20mまでは3スラブとも衝撃荷重が構造全体に分散しているが、敷砂単層の場合は落下高にかかわらず原点より100cm前後以内に集中している。その分布の程度も原点から20cmまでの応力が大きく、その後徐々に減少しているようである。敷砂単層の伝達応力は10m落下時で最大 16kgf/cm^2 を示しており、三層緩衝構造の8~10倍程度の値となっている。30m落下時の応力分布はACスラブの場合と同様のものであり、この時点のACスラブを用いた緩衝構造の性能は敷砂単層を用いた場合と同程度まで低下していることが明らかになった。本実験では各実験毎に敷砂を掘り返し、スラブやEPS材が残留変形し芯材と裏層の体積が減少した場合には砂を補填して表層のレベルが初期の状態と等しくなるようにしている。30m落下時のACスラブの場合は、前述のようにロッドの付着性能が低いためスラブ中央部のコンクリートが剝離し、大量の砂が補填されたため敷砂単層と似た分布性状になっているものと考えられる。

3.2 衝撃力の時系列分布

本文では衝突衝撃力の評価方法として次の2つを考えた。1つは重錘衝突時の加速度(G)に重錘重量を乗じて求める方法(本文では以後重錘衝撃力と呼ぶ)であり、他の1つは基部ロードセルより得られた応力分布を総和する方法(以後、これを総伝達衝撃力と呼ぶ)である。後者の場合には応力分布が載荷点中心を原点として点対称であるものとし、かつ測点間を線形に仮定し算定している。ここでは精度をより高めるために軸対称点の応力を平均して用いている。

図-3に重錘衝撃力の経時変化を実線で、総伝達衝撃力のそれを破線で示している。まず三層緩衝構造の場合について比較検討を行う。重錘衝撃力は落下高さごとに経時変化の性状が異なるが、各スラブ間では3者類似の性状を示しており、補強材の剛性やコンクリートとの付着特性は重錘衝撃力の波形性状にそれほど大きな影響を与えていないようである。また総伝達衝

撃力波形の変動分布は同一落下高さで重錘衝撃力同様3スラブともほぼ類似していることがわかる。

全応答時間に注目してみると、重錘衝撃力の場合には10m落下時には3スラブの場合ともほぼ同様(70msec程度)であるが、20m, 30m落下時の場合はAsC, ACスラブ(100msec程度)の方がRCスラブを用いた場合よりも若干長いようである。一方総伝

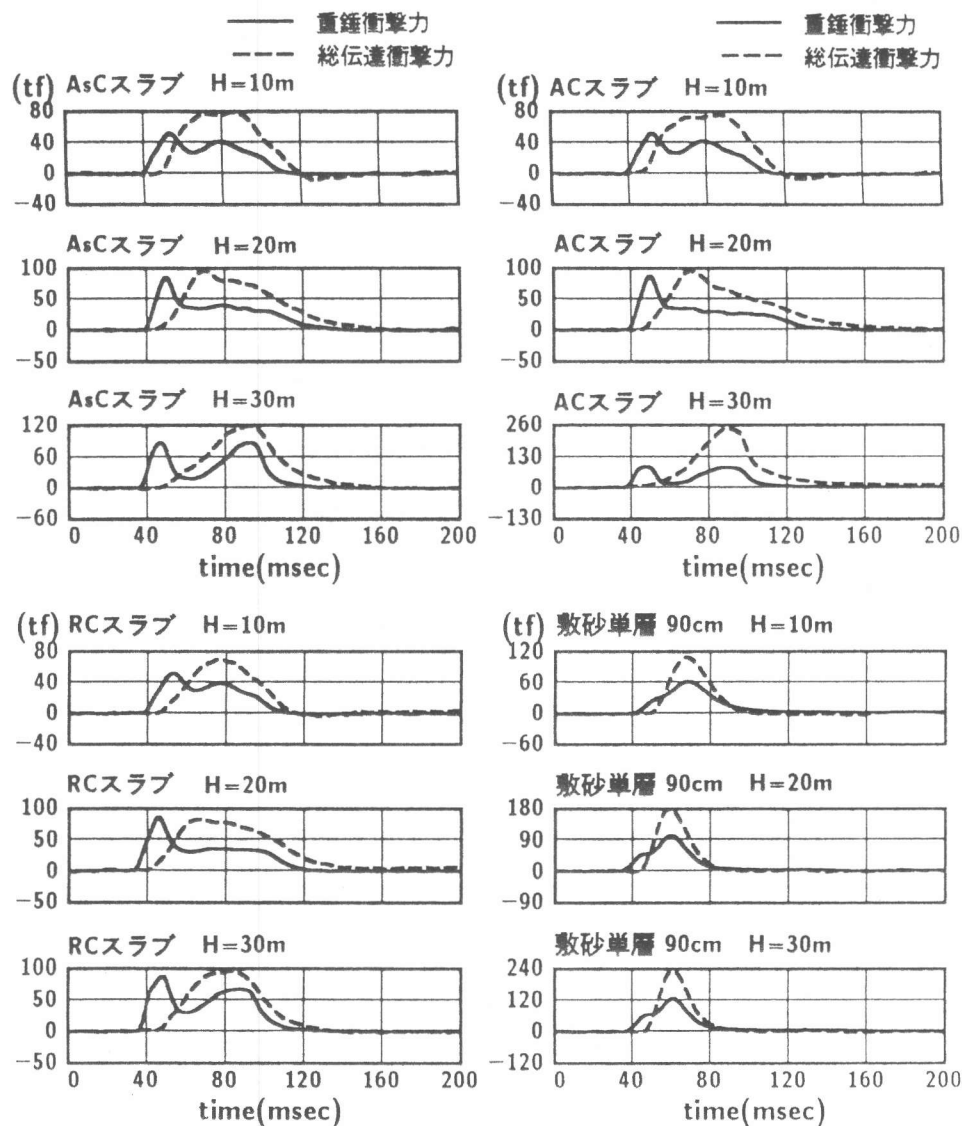


図-3 重錘衝撃力および総伝達衝撃力の経時変化

達衝撃力の場合における10m落下時の波動継続時間は3スラブとも重錘衝撃力波形とほぼ同じである。10m落下以降には、20m落下時のRCスラブの場合を除くと、AsC, ACスラブの場合の波動継続時間はRCスラブの場合より長くなっている。この現象を補強材とコンクリートとの付着性能や剛性の大小関係から類推すると、付着性能よりも補強材の剛性による影響が大きいものと考えられる。すなわち、AsC, ACスラブの場合は補強材の剛性が小さくかつ弾性域が広いため、ひび割れ発生とともに曲げ作用よりも膜作用が卓越し、その結果変形量や変形範囲も大きくなり応答時間が長くなったものと考えられる。特にACスラブの場合は、3.1でも述べているように載荷点中心部のコンクリート剝離により応力集中が示されているが、伝達衝撃力波形の継続時間がAsCスラブと同程度であることよりロッドの膜作用が効果的に働いているものと推察される。

次に最大衝撃力に関して検討を行う。なお、落下高30m時のACスラブの場合は応力集中と思われる応力が発生し総伝達衝撃力が過大評価されているものと考えられるため、ここでは比較の対象外とする。重錘衝撃力は3スラブとも同様の傾向を示し、10m落下時は52tf, 20m, 30

m落下時には85~90tf程度になっている。一方総伝達衝撃力の場合、AsCスラブとACスラブの場合にほぼ同じ値を示しているが、RCスラブの場合にはAsC、ACスラブの場合より10m、20m落下時に11~12%、30m落下時には18%程度小さい値を示している。これは応答の継続時間の場合と相反し、RCスラブの場合はAsCやACスラブに比較して補強材の剛性が大きく載荷点部の局所的な変形が小さくなることによるものと考えられる。また総伝達衝撃力と重錘衝撃力との大きさを比較すると、いずれの場合も前者は後者と等しいか大きく示されている。その割合は、10m、30m落下時で1.1~1.5倍程度、20m落下時では両者ほぼ等しい値となっている。

一方、敷砂単層の場合の重錘衝撃力、総伝達衝撃力は落下高さの増大とともにその最大値も大きくなるが、波動の経時変化は落下高さに依存せずほぼ一様である。各衝撃力の主波動の継続時間は50msec程度であり、三層緩衝構造の総伝達衝撃力波形は敷砂単層よりも1.5~3.0倍程度長いことがわかる。また、敷砂単層における最大総伝達衝撃力は最大重錘衝撃力の1.7~1.8倍程度大きい。ACスラブの30m落下時を除いた三層緩衝構造の最大総伝達衝撃力は敷砂単層の場合より小さく、その程度はAsCスラブの場合10m落下時で敷砂単層の0.7倍、20mおよび30m落下時には0.5~0.55倍程度になる。落石覆工等の実構造物の最低次固有周期が50~60msec程度で共振時における衝撃力の波動継続時間はその1/2であることを考慮すると、三層緩衝構造は衝撃力の波動継続時間および最大値とも本体構造の断面力を大幅に低減する方向にある。

以上より、三層緩衝構造の緩衝性能に関する芯材RCスラブの効果について比較検討を行うと、AsC、ACスラブの場合は衝撃力の波動継続時間がより長くなり、RCスラブの場合は最大衝撃力がより小さくなることが明らかになった。これより、AFRPロッドは鉄筋と共に緩衝構造の芯材の補強筋として十分適用可能であるものと考えられる。

4. まとめ

芯材に補強筋として組紐状AFRPロッドを用いたRCスラブ、表層材および裏層材としてそれぞれ50cm厚の敷砂、EPS材を用いた緩衝構造の緩衝性能を検討することを目的として大型実験を行い、補強筋として異形鉄筋を用いた場合や敷砂単層とした場合との比較検討を行った。本実験の範囲で得られた結果を要約すると、

- 1) ACスラブの場合の30m落下時を除き三層緩衝構造は敷砂単層構造に比べ、伝達応力をよく分散し、最大総伝達衝撃力を低下させ、衝撃力の作用時間を長くするため、本構造の応答値を大きく低減できるものと考えられる。
- 2) 三層緩衝構造の基部伝達応力の分散効果は補強材とコンクリートとの付着特性に影響され、ひび割れ発生後ACスラブの場合はAsCおよびRCスラブの場合より分散性が悪くなる。
- 3) 三層緩衝構造の最大総伝達衝撃力はRCスラブの場合がAsC、ACスラブの場合より小さく、作用時間は前者より後者の場合が長くなる傾向にあり、いずれの場合も本体構造の断面力を低減する方向にある。これよりAFRPロッドは鉄筋とともに緩衝構造の芯材の補強筋として適用可能であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 三上浩他：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，土木学会構造工学論文集，Vol.37A，pp1591-1602，1991.3
- 2) 岸徳光他：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験，土木学会構造工学論文集，Vol.38A，pp1577-1586，1992.3