

I-38

AFRPロッドを補強筋としたRCスラブを芯材とする三層緩衝構造の緩衝特性

開発土木研究所 正 員 中 野 修
 開発土木研究所 正 員 今 野 久 志
 室蘭工業大学 正 員 松 岡 健 一
 三井建設(株) 正 員 三 上 浩

1. はじめに

近年、重要構造物(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など)の衝撃的な荷重に対する安全性を一層高めるための研究が盛んに行われている。構造物の耐衝撃性を確保し、さらに高めるための研究には次の二通りの方向性が考えられる。一つは衝撃荷重が直接構造物に作用する場合の挙動を検討することであり、他は構造物に作用する衝撃的な荷重による断面力を低減させる緩衝構造の検討である。

一方、コンクリート構造物の耐久性を向上させる目的で、近年、耐蝕性に優れた高い引張強度を有する連続繊維補強材(FRP ロッド)のコンクリート補強材への適用性が盛んに研究されている。著者らはこれらの現状をふまえ、FRP ロッドで補強した RC スラブや RC、PC 梁に直接衝撃荷重が作用した際の衝撃応答性状や耐衝撃性に関する研究を室内実験を中心にやってきた¹⁾。その結果、組紐状のアラミド繊維製 FRP (AFRP) ロッド表面に珪砂を接着したロッドで補強した RC スラブや RC 梁の耐衝撃性は異形鉄筋で補強したものと比較して同等以上に高いことが判った²⁾。また、緩衝構造として敷砂および EPS (Expanded Poly-Styrol) を各々表・裏層材として用い組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブを芯材とする三層緩衝構造に関する大型実験を行ってきた。その結果、少ない試験体数であるが、芯材 RC スラブの補強筋の剛性や付着特性が三層緩衝構造の緩衝特性に影響を与えることが考えられた³⁾。

本研究は、芯材として組紐状の AFRP ロッドで補強した約 4m×4m の RC スラブを用い、表・裏層材として各々 50cm 厚の敷砂および EPS を用いた三層緩衝構造の緩衝特性をより詳細に検討することを目的として行った。この際、芯材 RC スラブの厚さ、スラブの補強筋の剛性および付着特性ならびに補強筋比を変化させ、これらが緩衝構造の緩衝特性に与える影響を比較検討した。なお、衝撃荷重は各実験ケースで 3tonf の重錘を高さ 30m から構造物中央に 1 回のみ自由落下させて載荷している。

2. 実験概要

2.1 実験方法と実験ケース

本実験に用いた緩衝構造体の横断面形状寸法を図-1に示す。本実験では、660cm×660cm×30cm の基礎鉄筋コンクリート上に縦横 400cm の緩衝構造体(上層より敷砂 50cm、RC スラブ 20cm または 30cm、EPS50cm)を配置した。衝撃荷重は重量 3tonf の重錘(高さ 97cm の円柱体で底部は高さ 17.5m の球状)を 30m の高さから構造物中央に自由落下させて載荷した。芯材 RC スラブの断面特性を変化させた本研究での実験ケースは表-1に示す 5 ケースである。なお、芯材 RC スラブの名称のうち、第一項目は補強筋の種類、第二項目はスラブ厚さ、第三項目は補強筋比を表す。

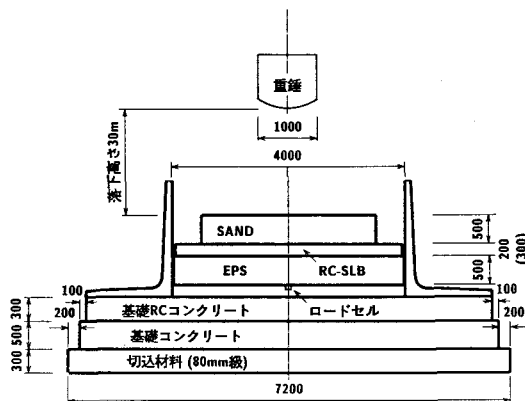


図-1 緩衝構造体の横断面形状寸法

Shock Absorbing Properties of 3-Layered Cushion System Composed of RC-Core Layer Reinforced with AFRP Rods.

by Osamu NAKANO, Hisashi KON-NO, Ken-ichi MATSUOKA and Hiroshi MIKAMI

2.2 芯材 RC スラブの断面特性

補強筋の材料特性を表-2に示す。本実験に用いた補強筋のうち、RA13 はアラミド繊維を組紐機で編み上げた後樹脂を含浸硬化して成形した組紐状 AFRP ロッドである。また、RA9S、13S、15S は樹脂が硬化する前に 5 号珪砂をロッド表面に接着して成形したものである。なお、補強筋は全スラブとも複筋配置とした。コンクリートは粗骨材の最大寸法が 25 mm で、配合強度が $210(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ のものである。なお、実験時における圧縮強度は $188\sim 218(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、弾性係数は $2.67\sim 2.79 \times 10^5(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ である。

2.3 表・裏層材の材料特性

表層に用いた敷砂の単位体積重量は $1.6\text{tf}/\text{m}^3$ 、比重は 2.59 である。敷砂は 20cm 毎に平均的に踏み固め所定の厚さにした。裏層材として用いた EPS は密度が $20\text{kgf}/\text{m}^3$ 、5% 圧縮強度が $1.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 、ポアソン比が 0.05 である。弾性挙動を示す領域は圧縮歪が 2% 程度以下であり、その応力は 5% 圧縮強度の約 $2/3$ である。本実験では $200\text{cm} \times 100\text{cm} \times 50\text{cm}$ のブロックを組み合わせて所定の寸法とした。

2.4 測定項目

本実験での測定点は、重錘衝撃力を算定するための重錘加速度 4 点と、コンクリート基礎上への伝達衝撃力を算定するためのロードセル 39 点である。なお、ロードセルは受圧部の直径が 32mm で容量が $100\text{kgf}/\text{cm}^2$ の衝撃荷重測定用のものである。また、各センサーからの出力はデータレコーダに一括集録し、A/D 変換の後ワークステーションにて処理している。

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 にロードセルより得られた伝達応力の経時変化および分散性状を示す。ここで、横軸は載荷点中央を原点とする各ロードセルの位置を示し、縦軸は伝達応力の大きさ、奥行き方向は経過時間を示す。ここでは、伝達応力が載荷点中心から端部まで、二方向についてほぼ対称であったため、一方向の応力分布のみを示した。全測定時間は全ての実験ケースで 200msec とした。

補強筋の剛性の観点から As-20-1.0 と D-20-1.0 を比較する。As タイプでは載荷点中央と中央からの距離が 80～90cm の 2 箇所で応力が比較的大きく、それから端部まではなだらかに応力が減少している。一方、D タイプでは載荷点中央から端部までなだらかに応力が減少している。ともに顕著な応力集中は見られず比較的良好に衝撃力を分散して伝達していることが判る。すなわち、補強筋の剛性は伝達衝撃力の分散性状には顕著な影響を与えないと考えられる。ただし、D タイプでは端部において負の応力、すなわち浮き上がりの現象が顕著に生じているが As タイプでは顕著には示されていない。これは補強筋を含めた RC 版の剛性が D タイプのほうが大きいことに関連するものと考えられる。また、載荷点近傍では重錘落下終了後も応力が発生しているが As タイプではその傾向は見られない。

補強筋の付着特性の観点から As-20-1.0 と A-20-1.0 を比較する。A タイプでは載荷点部分の応力が As タイプに比べて大きく、As タイプと比較して衝撃荷重の分散性能に劣ることが判る。この傾向は特に中心からの距離が 50cm

表-1 実験ケースの一覧

芯材RC スラブ	補強筋 の種類	スラブ 厚さ(cm)	補強筋比 (%)
As-20-1.0	アラミド砂付き ロッド RA13S	20	1.0
A-20-1.0	アラミド砂なし ロッド RA13	20	1.0
As-20-0.5	アラミド砂付き ロッド RA9S	20	0.5
As-30-1.0	アラミド砂付き ロッド RA15S	30	1.0
D-20-1.0	異形鉄筋 D13	20	1.0

表-2 補強筋の材料特性

補強筋名	RA13 RA13S	RA9S	RA15S	D13
材質	アラミド 繊維	同左	同左	SD30A
公称直径 (mm)	12.7	9.0	14.7	12.7
公称断面積 (mm^2)	127	63	170	127
引張耐力 (tonf)	19.2	9.6	25.6	5.7 ～7.7
降伏耐力 (tonf)	—	—	—	3.8 以上
弾性係数 $\times 10^6(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	0.7	同左	同左	2.1
弾性伸び (%)	2.0	同左	同左	0.2

程度までで顕著である。逆に 50cm から端部までの応力は As と同等か少し小さくなっている。このように、載荷点部分の応力の集中度合いには補強筋の付着特性が影響を与えていることが判る。また、A タイプでは重錘落下終了後も依然として載荷点近傍で応力が生じているが As タイプではこの傾向は見られない。

補強筋比の観点から As-20-1.0 と As-20-0.5 を比較する。-0.5 のタイプでは載荷点直下の応力の集中が極めて顕著であり、応力は載荷点から端部まで双曲線的に減少している。このように、補強筋比は伝達衝撃力の分散性状に対して極めて顕著な影響を与えている。

スラブ厚さの観点から As-20-1.0 と As-30-1.0 を比較する。As-30 では載荷点直下に若干応力が集中する傾向にあるが応力度は As-20 とほぼ同程度であることが判る。特に中心からの距離が 20~30cm 程度までで応力が大きく、以後端部までの応力変化は少なくほぼ一定の応力を示している点で特徴的である。また、As-30 では応答時間が極めて短いことが判る。さらに、端部において負の応力、すなわち浮き上がりの現象が生じており、これは補強筋を含めた版の剛性の影響と考えられる。このように、スラブ厚さは伝達衝撃力の分散性状や継続時間に影響を与え、厚くなると載荷点部に若干応力が集中するものの芯材全体に平均的に応力を分散させるが、版の剛性が高いため衝撃力の継続時間が短くなり、かつリバウンド状態で端部で浮き上がり等が生じるものと考えられる。

3.2 衝撃力の経時変化

本文では衝撃力の評価方法として次の二つを考えた。一つは衝突時の加速度に重錘の質量を乗じて求めた重錘衝撃力であり、他はロードセルより得られた伝達応力を総和して求めた伝達衝撃力である。なお、伝達衝撃力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、かつ測点間を線形として算定した。ここでは、実測値をより多く用いることとし、軸対称点の応力を平均して用いた。図-3 に重錘衝撃力の経時変化を実線で、伝達衝撃力の経時変化を破線で示した。

補強筋の剛性の観点から As-20-1.0 と D-20-1.0 を比較する。重錘衝撃力の最大値は D タイプが As タイプよりも大きく波形の継続時間は As のほうが長い。伝達衝撃力は大きさおよび波形の傾向ともに両者でほぼ同様であるが As タイプが少し継続時間が長い。ともに重錘衝撃力の 2 波目の最大値と伝達衝撃力の最大値がほぼ同程度である。

補強筋の付着特性の観点から As-20-1.0 と A-20-1.0 を比較する。重錘衝撃力の 1 波目の大きさおよび形状は両者で類似しているが 2 波目の大きさと形状は若干異なり、As タイプのほうが大きく継続時間は A タイプのほうが長い。伝達衝撃力は As タイプより A のほうが小さく、継続時間は A タイプのほうが長い。また、重錘衝撃力の 2 波目のピークと伝達衝撃力のピークはほぼ同程度である。

補強筋比の観点から As-20-1.0 と -0.5 を比較する。重錘衝撃力、伝達衝撃力ともに、-0.5 のほうが継続時間が長いことが判る。なお、-0.5 では伝達衝撃力が重錘衝撃力の 2 波目のピークよりも大きく、他とは異なった性状を示している。一方、重錘衝撃力および伝達衝撃力の最大値には両者で顕著な差異は生じていない。

スラブ厚さの観点から As-20 と As-30 を比較する。As-30 の重錘衝撃力が極端に大きく、2 波目のピークが As-20 と比べて明瞭に出現しているのが特徴的である。また、重錘衝撃力、伝達衝撃力の継続時間はともに As-20 と比べて大幅に短くなっている。

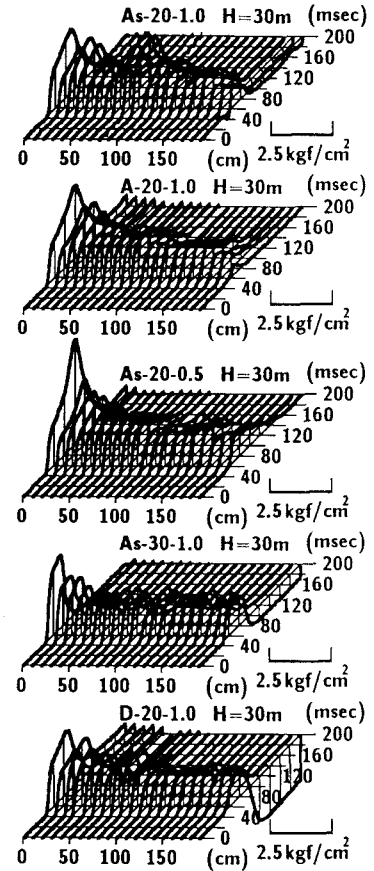


図-2 伝達応力の経時変化

以上から、重錘衝撃力と伝達衝撃力の経時変化を要約すると、伝達衝撃力の応答波形は衝撃力の大きさが各ケースでほぼ同様であり、継続時間が変化するため上に凸の曲率が異なるものの外観は比較的類似している。一方、重錘衝撃力は各実験ケースで2波目の形状が若干異なるが、1波目の傾向は比較的類似している。すなわち、重錘、伝達衝撃力の大きさおよび応答波形の継続時間は各スラブの断面特性で異なるが、波形の外観には顕著な差異を与えないものと考えられる。

3.3 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力

図-4(a)に最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力を、図-4(b)に重錘衝撃力と伝達衝撃力の継続時間を示した。図-4(a)より、スラブ厚 30cm の場合、異形鉄筋で補強した場合、スラブ厚 20cm で AFRP ロッドで補強した場合の順に最大重錘衝撃力が小さくなることが判る。なお、スラブ厚 20cm で AFRP ロッドで補強した場合には三者で顕著な差異はない。このように、スラブ厚さと補強筋の剛性は最大重錘衝撃力の大きさに顕著な影響を与え、これは両者の場合に RC 版の剛性が高いためであると考えられる。

一方、最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力ほど顕著な差異はないが、やはり 30cm 厚のスラブを用いたケースが最も大きく、次いで補強筋比が 0.5% のケースと異形鉄筋で補強したケースが同程度で、さらに砂付きのケースから砂なしのケースの順に少しずつ小さくなっている。

このように、スラブ厚を 30cm としても伝達衝撃力は小さくならないことや、補強筋の剛性、補強筋比、付着特性が伝達衝撃力に与える影響は最大重錘衝撃力ほどは顕著ではないことが判る。これは、補強筋の剛性、補強筋比、付着特性などの伝達衝撃力に与える影響度合いよりも、裏材 EPS の衝撃力吸収性能のほうが影響として顕著であることを示すと考えられる。

図-4(b)の継続時間の関係から、重錘衝撃力ではスラブ厚 30cm のケースが最も短く、補強筋比が 0.5% のケースで最も長く、他はほぼ同程度であることが判る。

一方、伝達衝撃力では、異形鉄筋を用いたケースが最も短く、次いでスラブ厚 30 cm のケース、そしてその他の三者がほぼ同程度であるが、砂付きで 1% のケースが最も長いことが判る。このように、異形鉄筋で補強し

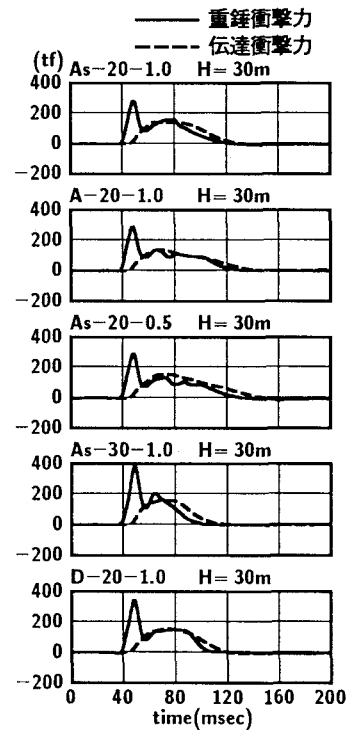


図-3 重錘衝撃力と伝達衝撃力の経時変化

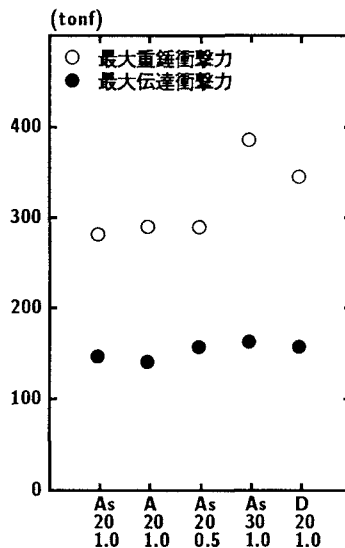


図-4(a) 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力

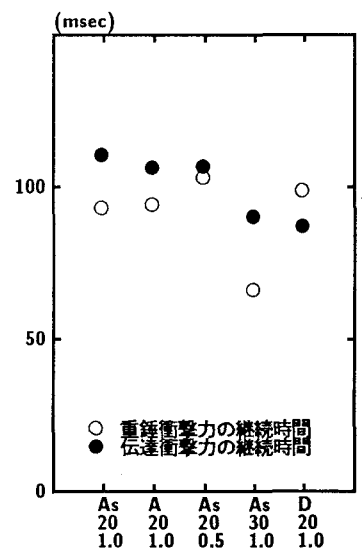


図-4(b) 重錘衝撃力と伝達衝撃力の継続時間

たケースやスラブ厚 30cm のケースなど、RC 版の剛性が高い場合は継続時間が短いようである。以上から、衝撃的な荷重の継続時間を長くするためには、スラブ厚をできるだけ薄くし、剛性が低くて付着特性の良好な補強筋を用いた RC スラブを芯材に用いることが適切と考えられる。

3.4 RCスラブのひびわれ性状

図-5 (a)、(b)にRCスラブ表・裏面のひびわれ性状を示す。

先ず、図-5 (a)より表面のひびわれ性状を各々で比較する。

As-20 と D-20 を剛性の観点で比較する。As タイプでは円周状と十字に直交するひびわれがともに密に多数発生し、特に十字に直交するひびわれのうち上部での損傷が激しい。一方、D タイプでは片側半分に集中してひびわれが発生しているがひびわれはAsタイプと同様、円周状と十字に直交するものである。なお、ひびわれ間隔は As タイプよりも広く、ひびわれ本数は As タイプに比べてかなり少ない。

As-20 と A-20 を付着特性の観点で比較する。A タイプでは円周状のひびわれが顕著であり、領域も As に比べて広いが、As に見られる十字に直交するひびわれが少ない。また、載荷点部分のコンクリートが大きな範囲で剝離している。As-20-1.0 と As-20-0.5 を補強筋比の観点で比較する。-0.5 のひびわれ性状は A-20-1.0 と比較的類似しているが -1.0 と比べてひびわれ間隔が広い。また、載荷点部のコンクリートが剝離しているが、この領域は A-20-1.0 に比べて小さくなっている。

スラブ厚の観点から As-20 と As-30 を比較する。As-30 では載荷点部分のコンクリートがほぼ重錘の直径に対応して剝離し、それ以外には直交する十字のひびわれが 4 本入っているのみである。すなわち、As-30 では表面の損傷領域は最も狭いが、同時に載荷点部分のみに応力が集中していることが判る。

以上を要約すると、1)スラブ表面のひびわれ性状には RC スラブの断面特性が大きく影響している。2)発生するひびわれは円周状と十字に直交するものの 2 種類である。3)コンクリートが剝離する位置やその領域の大きさおよび損傷の程度はスラブの断面特性に関連しているものと思われる。

次にスラブ裏面のひびわれ性状を図-5 (b)で比較する。As-20 と D-20 を比較する。ともに明瞭な円周状のひびわれ1本と多数の放射状のひびわれが発生している。ただし、As タイプでは不完全な円周状のひびわれが完全なものの外側にも発生している。また、上部の放射状のひびわれ部分が一部剝落しているが、ひびわれ本数は D タイプのほうが多い。一方、D タイプでは円周状のひびわれの内側でひびわれが密に発生し、一部のコンクリートが剝落している。

As タイプと A タイプを比較する。放射状のひびわれは As タイプのほうが若干密に発生しているが、円周状のひびわれの本数は A タイプのほうが多くひびわれの領域も広い。また A タイプでは、載荷点直下の一部の領域でコン

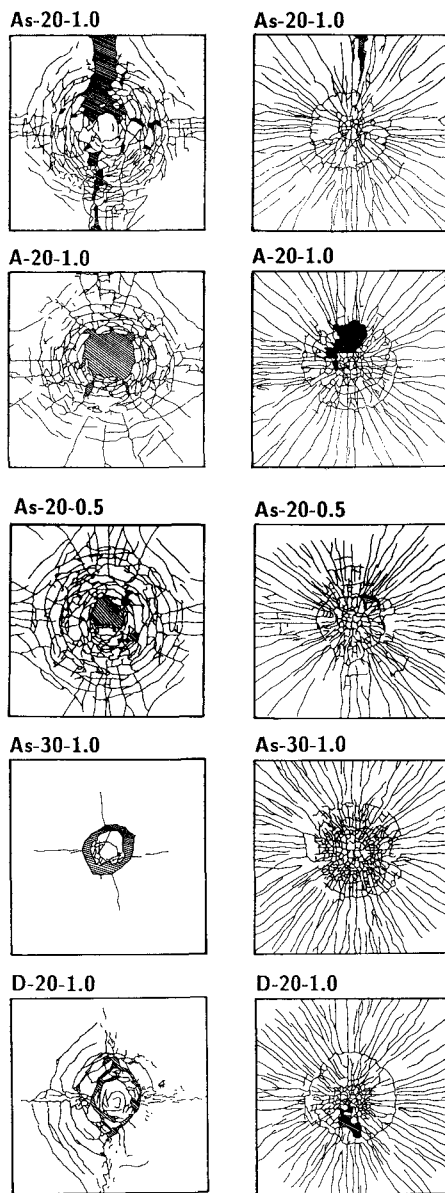


図-5 (a) スラブ表面
のひびわれ性状

図-5 (b) スラブ裏面
のひびわれ性状

クリートが剥落している。-0.5 と -1.0 を比較すると、-0.5 では放射状のひびわれの分散性に偏りが見られ、連結した完全な円周状のひびわれの外側に不完全な円周状のひびわれが数本発生している。また、連結した円周状のひびわれの一部の領域でコンクリートが剥落している。

As-20 と As-30 を比較すると、円周状のひびわれおよび放射状のひびわれが As-30 ではより密に多数発生していることが判る。また、最も外側の円周状のひびわれの領域は As-30 が As-20 に比べて広く、その内部で極めて細かいひびわれが多数分散している。なお、コンクリートの剥落は As-30 では見られず、最も損傷は軽微である。

以上を要約すると、1)スラブの断面特性が裏面のひびわれ性状に与える影響は表面よりも顕著ではない。2)ひびわれは円周状と放射状の2種類から成っている。3)コンクリートが剥落する位置やその領域の大きさおよび損傷の程度はスラブの断面特性に関連しているものと思われる。

4. まとめ

組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブを芯材とし、敷砂と EPS を各々表・裏層材とする実大規模の三層緩衝構造体を用いて衝撃実験を行った。その際、芯材 RC スラブの補強筋の剛性、付着性能、補強筋比および芯材 RC スラブの厚さを変化させ、それらが緩衝特性に与える影響を比較検討した。

本実験の範囲内で得られた結果を要約すると

- 1)スラブ厚さ、補強筋比、付着特性が伝達応力の経時変化や分散性状に与える影響は顕著であるが、補強筋の剛性の影響はさほど顕著ではなかった。
- 2)重錘衝撃力および伝達衝撃力の経時変化より、大きさおよび応答波形の継続時間は RC スラブの断面特性によって異なるが、応答波形の外観は顕著には影響されていないことが判った。
- 3)最大重錘衝撃力の大きさには、スラブ厚と補強筋の剛性の影響が顕著に見受けられた。しかし、伝達衝撃力に与えるこれらの影響はさして顕著ではなかった。
- 4)衝撃力の継続時間はスラブ厚や補強筋の剛性などに影響される。特に伝達衝撃力の継続時間を長くするためにはスラブ厚を薄くし、剛性が低くて付着特性の良好な補強筋を多く用いることが有効と考えられる。
- 5)芯材 RC スラブの断面特性は、スラブのひびわれ性状、特にスラブ表面の性状に顕著な影響を与える。また、表・裏面の損傷の程度はスラブ厚が厚いものほど軽微である。

最後に本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の岸徳光助教授ならびに大学院生の尾山靖史君、松岡篤君に多大なる御支援を頂きました。記して謝意を表するものであります。

参考文献

- (1) 三上、岸、松岡、能町「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,1991.3,pp1591-1602
- (2) 三上、加藤、田村、岸「組紐状AFRPロッドで補強したRCスラブの耐衝撃性に関する実験的研究」コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14,No.2,1992,pp661-666
- (3) 岸、中野、三上、松岡「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」コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14,No.2,1992,pp655-660