

I-34

PC床板の衝撃応答性状に及ぼす緩衝構造の効果

室蘭工業大学工学部 正員 松岡健一
 開発土木研究所 正員 中野 修
 北海道大学工学部 正員 三上 隆
 室蘭工業大学工学部 正員 岸 徳光

1. はじめに

落石による衝突など、衝撃的な外力を受ける構造物の設計・施工に当たっては合理的な衝撃力の算定とともに構造物の耐衝撃挙動を明らかにすることが重要であり、これまで多くの研究がなされている。一方、衝撃外力に対して安全な構造物の建設のためには、これとは別に落石などによる衝撃力を直接構造物に伝えることなく、そのエネルギーを吸収し緩和するための緩衝構造の開発も重要な課題である。

落石覆工構造物においては、従来この緩衝材として土砂が用いられているが、土砂はその粒度や含水率などによって緩衝効果に変化し、また自然状態でも時間の経過とともに締固められ緩衝効果が減少すること、十分な緩衝効果を得るためには相当の土砂の厚さが必要であり、これが覆工構造物の耐震設計に影響を与えるなどの問題があり、より高性能な緩衝構造の開発が望まれている。

著者らは、この一つの方法として発泡スチロールと鉄筋コンクリート床板を用いた三層緩衝構造を提案し、理論的実験的に研究し発表してきた^{1)~3)}。ここでは、この一連の研究の一つとして、種々の緩衝構造が構造物に及ぼす効果を検討するための基礎実験としてPC床板上に緩衝構造を設置しPC床板へ及ぼす衝撃力の大きさと、PC床板の耐衝撃挙動を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験場所及び載荷方法

実験は江別市郊外角山の北海道開発局機械工作所内の空地に特別に設置された実験場で行なった。実験構造物は、7m×7mの基礎コンクリートの上にスパン5mの支承を取り付け、PC床板を設置し、その上に各種の緩衝構造を置くように準備した。また衝撃力の載荷は、重量3tonの重錘(直径1m、高さ0.8mの円筒に曲率半径0.8mの球の一部を付けたもの)をクレーンにより吊上げ、高さ30mにセットし自由落下させる方法で行なった。

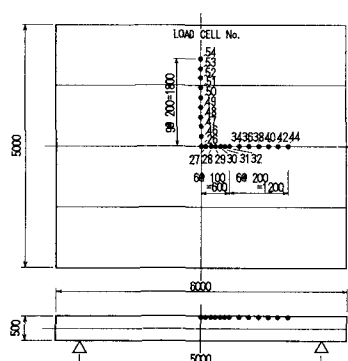


図-1 ロードセル配置図

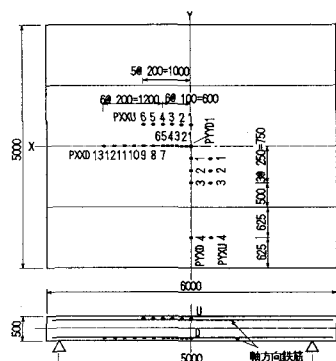


図-2 ストレインゲージ位置

2.2 PC床板

実験に使用したPC床板の寸法は、6m×5m×0.5mで主鉄筋量は0.3%、配力鉄筋は0.1%とし、PC鋼棒はφ23mmを25cmピッチに二段設置した。PC床板の支持条件は2辺単純支持としスパン方向には全断面50kgf/cm²のプレストレスを導入している。PC床板の製作は、日本高圧コンクリート（株）千歳工場で、全体を3つに分割して行い、これを現地に運搬しかつ横締めして一体とした。横締めのプレストレス力は25kgf/cm²とした。

Absorbing effect to Dynamic Responses of PC Slab under Impact loading
 by Kenichi MATSUOKA, Osamu NAKANO, Takashi MIKAMI and Norimitsu KISHI

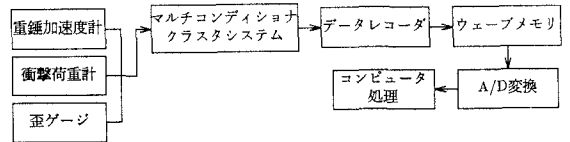
床板の上面には、衝撃力測定のために特別に開発されたロードセルを図-1のように上面をコンクリート面と合わせて設置した。また、床板のひずみ測定のため、PC床板の鉄筋を図-2に示すようにストレングジを貼付し埋設した。コンクリートの配合強度は 600kgf/cm^2 であるが、その他の条件は紙面の都合により省略する。

2.3 緩衝構造

実験に用いた緩衝構造は砂のみ(層厚90cm)、発泡スチロールのみ(EPS材層厚300cm)、及び三層緩衝構造の3種類とした。また三層緩衝構造は、表層に層厚50cmの砂、中間層に板厚20cmのRC床板、下層に層厚50cmのEPS材とし、RC床板は単鉄筋と複鉄筋の2ケースを用いた。

各種緩衝構造の施工に当たっては、砂層は敷厚20cm毎に踏み固め、締固めの程度がほぼ一定となるようにした。

またEPS材は大きさ $200\text{cm} \times 100\text{cm} \times 50\text{cm}$ の単体を合わせ目が高さ方向に重ならないように設置した。

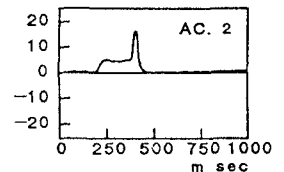


2.4 計測方法

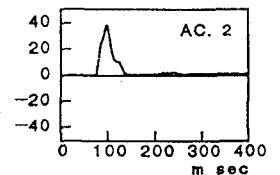
実験では、まず衝撃力を測定するために、重錘の4カ所にひずみゲージ型の加速度変換器(容量100G～

図-3 計測システムのフローチャート

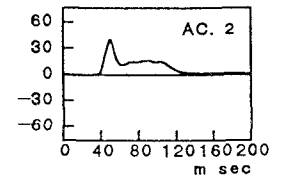
500G)を取り付けている。先に述べたようにPC床板に伝達される衝撃力を測定するために29個のロードセルをPC床板上に設置し、またPC床板のひずみ波形を測定するために合計27ヶ所の鉄筋にひずみゲージを貼付している。これらの計測システムのフローチャートを示せば図-3のようである。



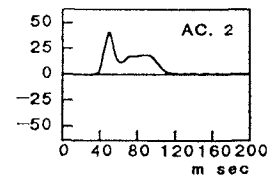
(a) EPS



(b) 砂



(c) 三層（単鉄筋）



(d) 三層（複鉄筋）

図-4 加速度波形

3. 実験結果

3.1 重錘加速度波形

重錘加速度は重錘の4個所に加速度計を設置し計測している。結果を図-4に示す。図(a)はEPS材厚300cmの場合である。波形は衝撃継続時間の後半にピークをっており、衝撃継続時間は約250msec、加速度の最大値は約18.3Gである。

図(b)は砂層厚90cmのもので、この場合の波形は衝撃開始とともに立ち上り、最大値を示した後急速に減少している。衝撃継続時間は約70msec、最大加速度は約38.5Gである。

三層緩衝構造の場合は、中間層のRC床板に単鉄筋床板と複鉄筋床板を用いた2種類について実験を行っているので、その結果を図(c)及び図(d)に示した。波形はいずれもほとんど同じで、衝撃開始とともに立ち上がり、急激に減少した後2度目のピークを示しながらだらかに減少している。衝撃継続時間は単鉄筋床板と複鉄筋床板で多少異なり、それぞれ約100ms及び80msである。最大加速度はそれぞれ約40.2G、及び40.9Gである。

3.2 ロードセル応力波形

ロードセル応力波形の一部を図-5に示す。図は横軸に床板中央からのロードセルの位置を、奥行き方向に時間軸をとり、応力を上側正で示している。EPS材のみの場合(図(a))には、応力は平面的に広く分布せず載荷点付近に集中しており、その最大値は約 30.6kg/cm^2 である。

また、時間的な分布も短時間に集中しており、主たる応力の継続時間は約60msec位である。これは重錘加速度波形のピークに対応しているようである。

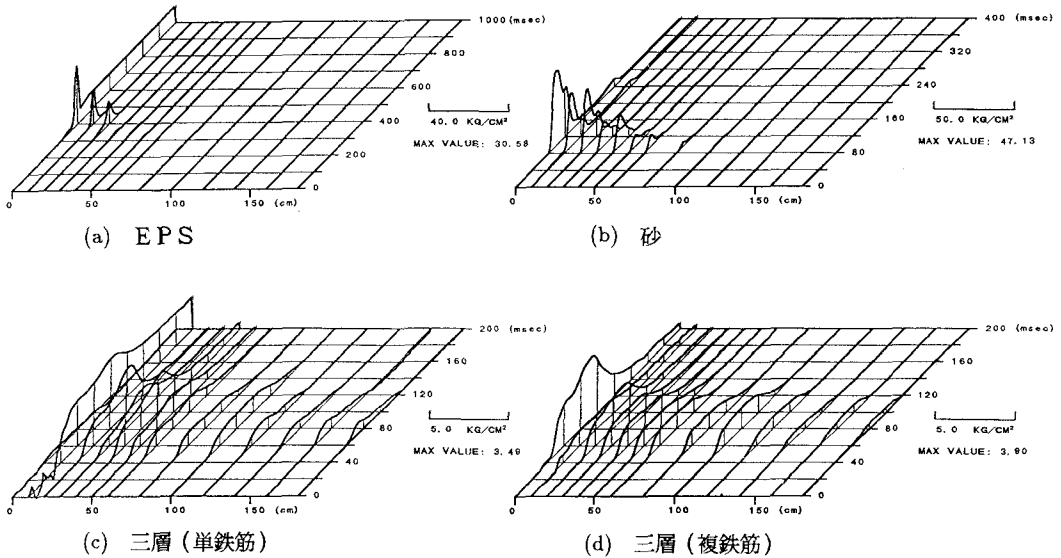


図-5 ロードセル応力波形分布

図(b)は砂層のみの場合であるが応力は割合広い範囲に分布しているが、その最大値は約 $47.1\text{kg}/\text{cm}^2$ と大きい。時間的な波形分布は重錘加速度波形とほぼ同様で継続時間は約70msecである。

図(c)及び(d)は三層緩衝構造の場合である。どちらも応力分布は広範囲にわたり最大値も約 $3.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 及び $3.9\text{kg}/\text{cm}^2$ とかなり小さい。また分布はスパン方向にかなりばらつきがあるが、これはEPS材とPC床板上面間に多少の不整が生じたためと考えられる。波形の継続時間にも多少ばらつきが生じているが、この場合もほぼ重錘加速度の継続時間と同様である。しかし、波形分布形状は重錘加速度とは異なり、継続時間の後半にピークが現れている。芯材のRC床板の違いによる差は最大応力ではそれ程大きくはなく、継続時間にも加速度波形のような差は見られない。

3.3 鉄筋歪波形

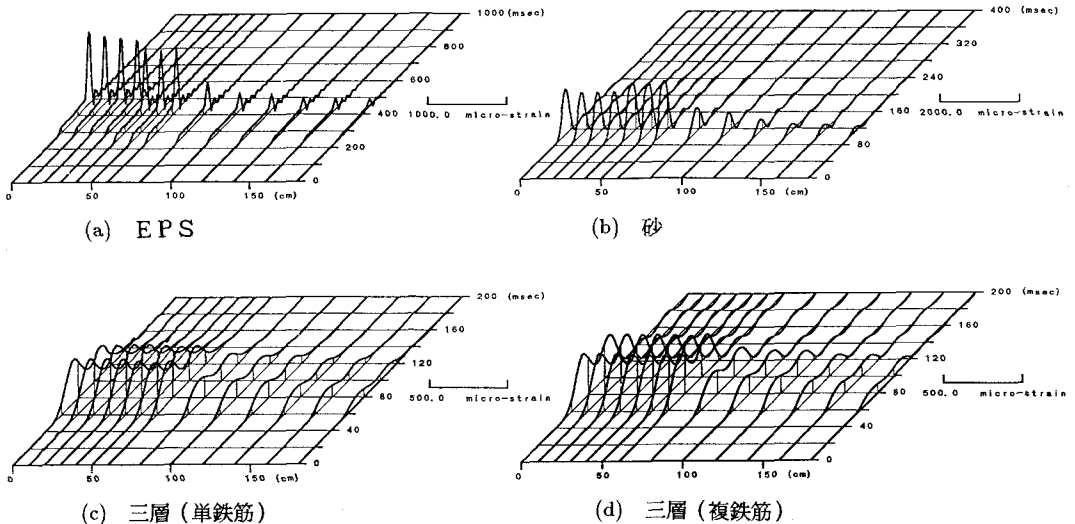


図-6 鉄筋歪波形分布(下端筋)

同様ケースの鉄筋歪の一部を図-6、7に示す。これらの図も図-5と同様横軸にゲージ位置を、奥行き方向に時間軸をとり、引張歪を上側に示している。図-6は下端筋の歪であり、図-7は上端筋の歪である。

EPS材のみの場合、幅員中央部の鉄筋歪は下端ではスパン中央部荷重範囲でほぼ一定であるが、上端では荷重点から離れるに従い減少している。また最大歪は、下端

で約 950×10^{-6} 、上端で -305×10^{-6} であり、波形の時間的変化は初期に小さな歪が現れ、後半に急激なピークが現れている。(図-6,7(a)参照)

砂層のみの場合には、EPS材のみの場合と比較すると波形の時間的変化は異なるが、平面方向の分布性状は類似している。この場合の最大歪は、下端で約 1140×10^{-6} 、上端で 830×10^{-6} である。波形の時間的変化は、重錘加速度波形と同様に衝撃荷重載荷とともに急激に増加し、最大値を示した後急激に減少している(図-6,7(b))。

三層緩衝構造の場合を図-6,7(c),(d)に示しているが、図から明かなように時間方向の分布は、衝撃初期では両者にほとんど差はなく第2ピークに多少の差を示し単鉄筋RC床板ではややなだらかに減少している。最大歪は下端で約 270×10^{-6} と 290×10^{-6} 、上端で約 -230×10^{-6} と -240×10^{-6} となっている。継続時間は、重錘加速度波形と同じように単鉄筋で約100ms複鉄筋で約80msecである。

4. 考察

4.1 重錘加速度について

EPS材のみの場合は重錘がEPS材に接触すると同時に加速度を生ずるが、EPS材の抵抗が小さいため、加速度も小さい。しかし、重錘がEPS材に貫入するに従いEPS材の圧縮により抵抗が増加しPC床板の影響も受けて加速度も急激に増大している。この実験では、EPS材の層厚が300cmと厚いため衝撃継続時間も長くなっている。砂層のみの場合は、抵抗が大きいため重錘は砂層の影響を受けて、加速度は急激に立ち上がり重錘の静止とともに急激に減少している。

三層緩衝構造では重錘は衝撃初期には上層の砂層による抵抗を受け、砂層のみの場合と同様の立ち上がりを見せるが、砂層のみの場合とは異なり下層のEPS材の影響を受けて重錘はすぐには静止せずRC床板とともにEPS材を圧縮した後静止するため、後半になだらかな曲線を示しながら加速度が減少して行くものと思われる。RC床板が単鉄筋と複鉄筋で衝撃継続時間が異なるのは、床板の剛性が異なるため単鉄筋では下層への貫入も大きくなり衝撃時間が長くなるものと思われる。

各緩衝構造の重錘加速度を比較すると、まず最大値では、EPS<砂<三層構造となり、継続時間では、砂<三層構造<EPSとなっている。時間方向に累積した概略の累積加速度を求めれば、砂層<EPS=三層構造である。このことから、重錘の加速度を緩和する効果は砂層で大きいように思える。

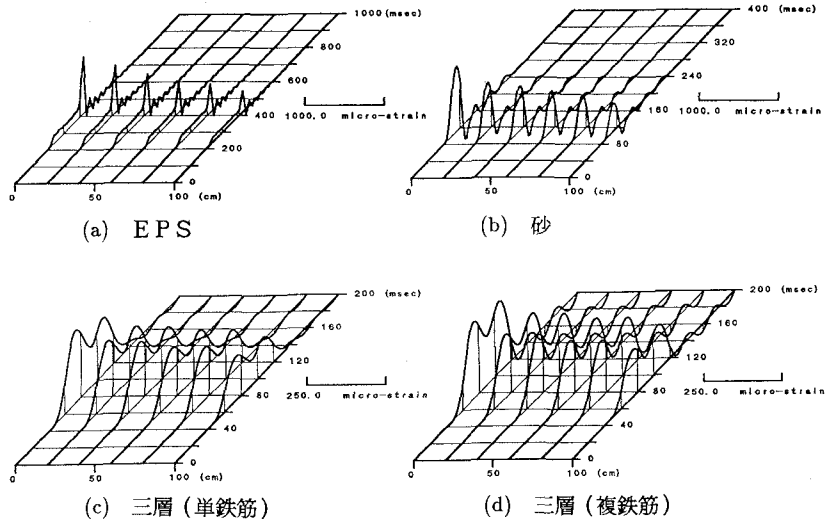


図-7 鉄筋歪波形分布(上端筋)

4.2 伝達衝撃圧力について

伝達衝撃圧力はEPS材のみの場合には、EPS材の剛性が小さいため、衝撃力の分散が行われず載荷点直下に集中的に生じており衝撃加速度は減少するものの伝達衝撃圧力の最大値はかなり大きい。砂層ではEPS材に比較すれば圧力は広く分散するものの、分散効果はそれ程大きくない。従って大きな衝撃力（重錘加速度）が狭い範囲に分散するため最大衝撃圧力も大きくになっている。

三層緩衝構造はいずれの場合も伝達衝撃圧力は広い範囲に分散しており局部的な最大値が現れず、荷重の分散効果が大きいことを示している。この場合の重錘加速度波形は衝撃初期に大きくなだらかに減少しているのに対して伝達衝撃圧力はなだらかに増加し、衝撃の後半に最大値を示し急激に減少している。これは砂層を通してRC床板に伝播された衝撃力が衝撃の初期には下層のEPS材の変形に消費されEPS材の変形の増大とともにPC床板に衝撃力を伝えるためと思われる。

各種緩衝構造の緩衝効果を判断するためには、最大伝達衝撃圧力、衝撃継続時間とともに総伝達衝撃力の変化を検討することも重要である。図-8には、重錘加速度から得られる重錘衝撃力(実線)とともに総伝達衝撃力(破線)の時間分布を示した。EPS材及び砂層のみの場合には、重錘衝撃力と総伝達衝撃力の最大値に差はあるものの両者の波形分布は比較的似ている。しかし、三層緩衝構造では総伝達衝撃力はゆるやかに立ち上がりなだらかな変化を示しており、重錘衝撃力とはかなり異なっている。総伝達衝撃力の最大値はEPS材のみの場合で約30.7t、砂層のみの場合では約250t、三層緩衝構造では単鉄筋RC床板の場合約82.4t、複鉄筋RC床板の場合約79.6tである。EPS材のみの場合、三層緩衝構造とも重錘衝撃力に比べ総伝達衝撃力の最大値は65%程度減少しているが、砂層のみの場合は2倍以上になっている。これは砂層を弾性体と考えたとき、 λ （ラメ定数）が小さい場合伝達衝撃圧力が載荷荷重の2倍以上になると云う解析結果と符号している¹⁾。

伝達衝撃圧力の最大値は三層緩衝構造<EPS材<砂層、波形継続時間はEPS材<砂層<三層緩衝構造、圧力分布面積はEPS材<砂層<三層緩衝構造となっており、総伝達衝撃力の最大値はEPS材<三層緩衝構造<砂層である。

4.3 PC床板の鉄筋歪について

PC床板の鉄筋歪は、EPS材や砂層のみの場合には、ほぼ重錘衝撃力と同様に衝撃荷重載荷と同時に歪が発生し、衝撃終了と同時に僅かな減衰自由振動の後静止している。時間的な分布は重錘加速度、伝達衝撃圧力とも同じような傾向を示している。衝撃力が集中して作用するために、中央付近の歪も大きくなっている。先に述べたように総伝達衝撃力はEPS材のみの場合の方が砂層のみの場合に比べかなり小さいにもかかわらず、歪の最大値にそれ程差がないことは両者の衝撃力の最大値が総伝達衝撃力ほどの差がないことと合わせ、構造物の変形は局部的でも大きな圧力が作用することによってかなり影響を受けることを示している。

三層緩衝構造では総伝達衝撃力はそれ程小さくないが芯材RC床板により、伝達圧力を構造全体に広く分散させることにより、応力集中の影響がなく、鉄筋歪も小さくなっている。三層緩衝構造の歪には2つのピークが表わされているが、これは固有振動の影響と思われる。このPC床板を単純ばりとしたときの固有振動周期は約32msecであり、これは波形図から得られる周期とほぼ対応している。

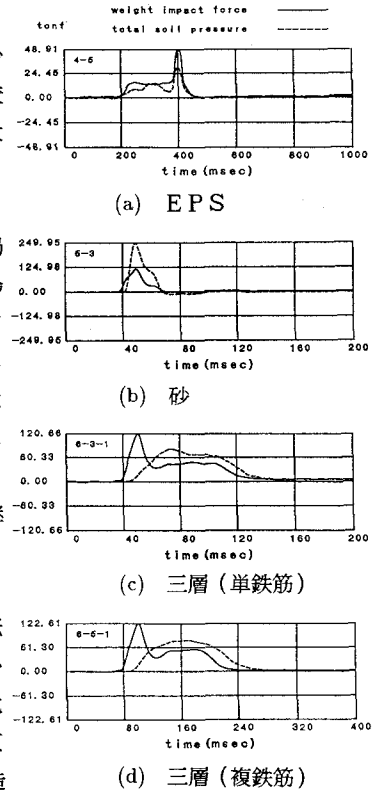


図-8 重錘衝撃力と総伝達
衝撃力の時間分布

PC床板の鉄筋歪を各緩衝構造毎に比較してみると、最大値では、三層緩衝構造<EPS材<砂層であり、特に三層緩衝構造の場合はEPS材のみの場合の1/3以下、砂層の場合の1/4以下となり、緩衝効果が大きいことがわかる。また、スパン方向、幅員方向の分布も三層緩衝構造の方が広い範囲に作用していることがわかる。床板の鉄筋歪でみる限り、三層緩衝構造は、落錘による衝撃力のエネルギーのかなりの部分を吸収し緩衝能力が大きいことを示している。

5. まとめ

構造物として2辺単純支持のPC床板を取り上げ、PC床板の落錘に対する衝撃挙動を、緩衝構造の効果と合わせ検討を行った。紙面の都合で全ての実験結果を示すことは出来なかったが、他の実験結果についてもほぼ同様の結果を与えていることを確認している。

ここに示した実験結果はEPS材のみ(厚さ300cm)、砂層のみ(厚さ90cm)、三層緩衝構造(砂50cm, PC床板20cm, EPS50cm材厚)の3種類(4ケース)に対する、重錘重量3ton、落下高さ30mの場合に関するものであるが、この結果から次のことが明かとなった。

- 1) 重錘の最大加速度は、表層の材料と厚さによって決定され、その大きさの順序はEPS材<砂層<三層緩衝構造となる。
- 2) PC床板上面への伝達衝撃圧力は、最大値では三層緩衝構造<EPS材<砂層であり、特に三層緩衝構造の場合の最大値は、EPS材のみの場合の1/8、砂層のみの場合の1/10と極端に小さくなる。
- 3) 伝達衝撃圧力の分布は、EPS材、砂層では局部的であり三層緩衝構造の場合は広範囲である。
- 4) PC床板鉄筋歪の最大値は、三層緩衝構造<EPS材<砂層となるが、三層緩衝構造は他の2つに比べ極端に小さい。

以上のことから構造物に対する衝撃力の緩和機構として芯材にRC床板を用いた三層構造が最も優れていることが明かとなった。

今後、三層緩衝構造に対して、繰り返し落下による衝撃力の変化等に対する検討を行う予定である。

なお、本研究は文部省科学研究費試験研究(1)の補助金を受けて行ったものである。また、本研究の実施に当たり実験材料の一部を、日本高圧コンクリート(株)及び三菱油化(株)から提供を戴いた。記してここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岸徳光, 吉田紘一, 松岡健一, 能町純雄: 層状弾性体モデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.34A, pp817-826, 1988.3.
- 2) 岸徳光, 松岡健一, 中野修, 菅田紀之, 西弘明: EPSを用いた複層緩衝構造の重錘衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第47号, pp131-136, 1991.2.
- 3) 今野久志, 中野修, 岸徳光, 松岡健一: FPSを用いた緩衝システムを伝達する圧力性状, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第I部, pp1050-1051, 1991.9.