

論文 ソイルセメント・敷砂・碎石の緩衝効果に関する重錘落下衝撃実験

山口 悟^{*1}・木幡 行宏^{*2}・牛渡 裕二^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、落石防護擁壁の背面に設置する新たな三層緩衝構造の開発を目的として、従来から緩衝工として用いられている敷砂単層や碎石単層およびソイルセメント単体の耐衝撃挙動や緩衝効果を明らかにするため、重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) ソイルセメント単体の場合には、敷砂単層や碎石単層の場合よりも緩衝効果が劣るものの、提案の三層緩衝構造に適用する場合には、敷砂単層よりも伝達衝撃力を低減できること、2) ソイルセメント単体の場合には入力エネルギーの増加に伴い応力分散幅が広がる傾向にあるため、荷重点直下の伝達衝撃応力は減少する傾向にあることなどが明らかになった。

キーワード: ソイルセメント、敷砂、碎石、重錘落下衝撃実験、応力分散

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線を通過する道路は、急峻な地形を呈していることから、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。一方で、近年の異常気象や対象斜面の経年変化、調査手法の高度化によって、設計当初には想定され得なかった大規模な落石要因が確認されるなど、落石防護構造物の安全性向上が望まれている。しかしながら、昨今の国や地方自治体の財政状況を考えると、新規の対策には既設構造物の撤去も含め膨大な費用を必要とすることから、時代のニーズは既設対策工の有効活用によって建設コストを縮減することである。

ここで、本研究の対象である落石防護擁壁¹⁾は、通常、落石の持つ運動エネルギーと擁壁基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となるように設計されている。そのため、一般的には直接基礎の無筋コンクリート製重力式擁壁(以後、単に擁壁)が多い。しかしながら、実際には落石による衝撃荷重が作用するため、せん断破壊の事例が数多く報告されている。このような擁壁の耐衝撃挙動を向上させるためには、擁壁背面に安価で緩衝性能に優れた緩衝工を設置する工法が有効であるものと考えられる。

そこで、著者らが研究開発したロックシェッド用の三層緩衝構造¹⁾(砂+RC版+発泡スチロール(以後、EPS)ブロック)や落石防護擁壁背面に設置するための二層緩衝構造²⁾(RC版+EPS)の原理を発展応用させ、既設の擁壁背面に設置する「ソイルセメント+ジオグリッド(土の補強に用いられる格子形状の合成高分子材料)+EPS」から構成される、新たな三層緩衝構造(図-1)を考案し、現在その緩衝効果や耐衝撃挙動について実験的に検証を実施している^{3,4)}。

本論文では、提案の三層緩衝構造を構成するソイルセメント単体の緩衝性能や応力分散に関する基礎資料を得

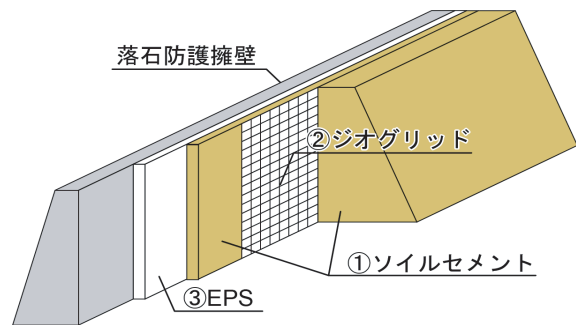


図-1 提案の三層緩衝構造

ることを目的として、従来からの敷砂単層やヨーロッパ(スイス)で使用されている碎石単層⁵⁾との緩衝性能の比較衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 ソイルセメントと敷砂、碎石緩衝材

実際の現場では、崩土を含めて現地発生土を使用して緩衝効果が得られれば、発生土の運搬等が不要となり、コスト縮減が期待できる。また、土にセメントを添加することにより、硬化したソイルセメントによる衝撃荷重の分散が期待できる。更にソイルセメントを用いることにより急勾配で施工をすることが可能となり、既設擁壁背面の狭小地においても緩衝材として設置することが可能となる。一方、発生土は土質分類や含水比、施工時期や施工方法等により、セメントの種類、添加量、強度発現のパラツキが懸念される。このため、本研究ではソイルセメントの緩衝効果に関する基礎資料を得ることを目的に、表-1に示すような物性値を有する砂を用いて実験を実施した。また、緩衝性能の比較材料として、ソイルセメントに用いている砂とスイスの碎石緩衝工と同様の粒度分布の碎石を緩衝工の材料として選定した。

*1 (独)土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (非会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 建築環境工学専攻 (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

表-1 ソイルセメントを含めた敷砂と碎石の物性値

緩衝工	種別	産地	最大粒径 (mm)	粒度分布 (碎石の場合は通貨質量百分率)	%	均等係数	粗粒率 FM	自然含水比 (%)	最適含水比 (%)
ソイルセメント・敷砂	中粒砂	登別	9.5	礫分 (2~75 mm)	8.7	2.7	-	6.95	15.9
				砂分 (0.075~2 mm)	91.1				
				シルト分 (0.005~0.075 mm)	0.2				
				粘土分 (0.005 mm 未満)					
碎石	碎石 (0~30 mm 級)	小樽	31.5	53 mm	100	-	5.65	3.92	6.8
				37.5 mm	100				
				13.2 mm	60.8				
				2.36 mm	26.7				
				0.6 mm	14.3				

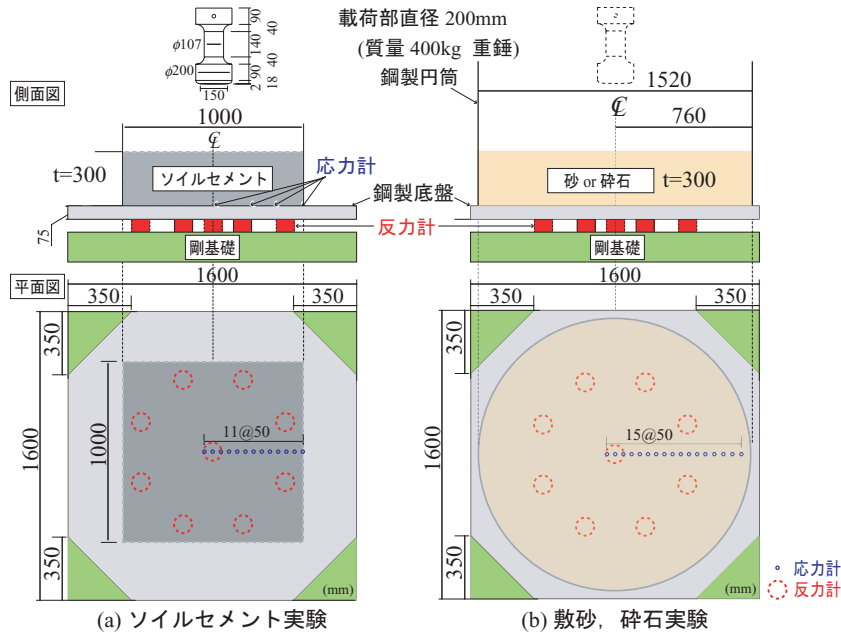


図-2 実験装置概要

表-2 実験ケース一覧

試験体名	緩衝工	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E_k (kJ)
C-V 3.0	ソイルセメント 単体	3.00	1.8
C-V 3.54		3.54	2.5
C-V 4.0		4.00	3.2
S-V 2.0	敷砂単層	2.00	0.8
S-V 3.0		3.00	1.8
S-V 4.0		4.00	3.2
S-V 5.0		5.00	5.0
G-V 3.0	碎石単層	3.00	1.8

ソイルセメントのセメント添加量 C は「セメント系固化材による地盤改良マニュアル」⁶⁾に基づき、最小添加量を 50 kg/m^3 として、事前に固化材添加量と養生期間および強度発現の関係性を求めた。その結果、最小添加量 50 kg/m^3 では、材齢 14 日においても地盤改良の最低値⁷⁾である 0.2 MPa の一軸圧縮強度を得ることが出来ないことから、本実験においては $C = 100 \text{ kg/m}^3$ として検討を進めた。また、養生期間は実施工や実験のサイクルを考慮し、7日とした。

セメントは、早期強度発現を期待し早強ポルトランド

セメントを使用した。セメントの水和反応を得るため、砂の含水比を最適含水比に調整し、セメントを投入し攪拌した。ソイルセメントの打設は、攪拌後、平面寸法で $1,000 \times 1,000 \text{ mm}$ の型枠に 50 mm 厚程度毎に足踏みおよび突き固めにより締固めた。ソイルセメントの一軸圧縮強度は $0.83 \sim 1.11 \text{ MPa}$ であった。

2.2 実験ケース

表-2には、衝撃実験のケース一覧を示している。重錘落下衝撃実験では、ソイルセメントを含めて緩衝工の層厚を 300 mm とし、衝突速度をパラメータとしている。

実験ケース名は、緩衝工毎にソイルセメントを示す“C”，敷砂を示す“S”，碎石を示す“G”と衝突速度 $V \text{ (m/s)}$ をハイフンで結び示している。ソイルセメントは衝突速度を $3.00, 3.54, 4.00 \text{ m/s}$ とし、敷砂の場合には、ソイルセメントの衝突速度に対して前後 1.00 m/s のケースも考慮して $2.00 \sim 4.00 \text{ m/s}$ とした。碎石の場合には、 3.00 m/s のみとして実験ケースを決定した。

2.3 実験装置

図-2には、本研究に使用した実験装置の概要を示している。本実験装置は、ソイルセメントなどの緩衝工内部を

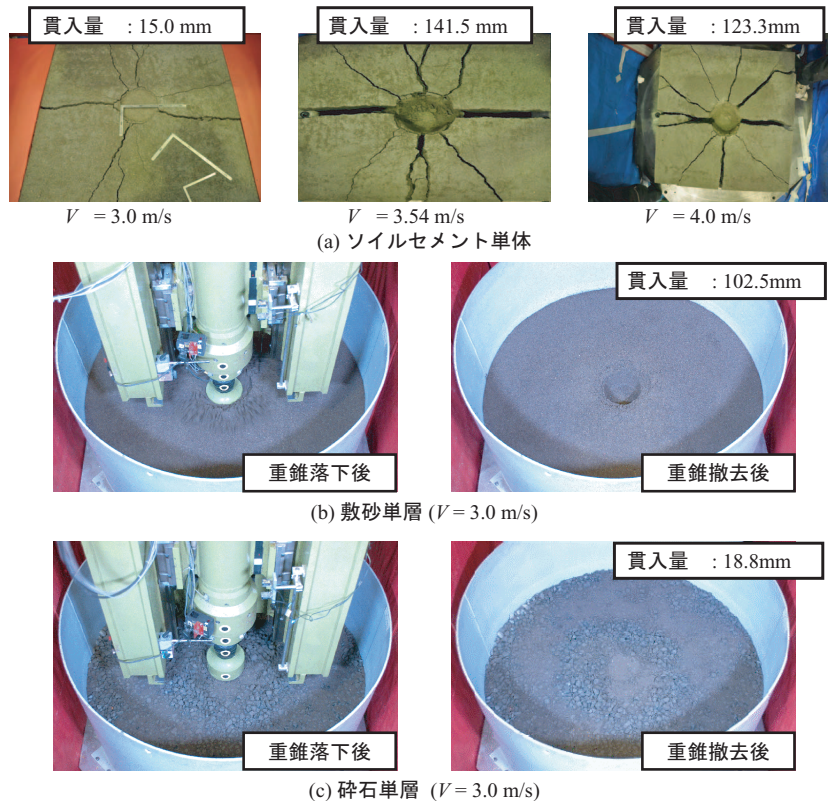


写真-1 各緩衝工の実験時と実験後の試験体状況



写真-2 ソイルセメント内のせん断コーン ($V=3.0$ m/s)

伝播して底面に伝達される衝撃応力の分布を測定するために、起歪柱型の伝達衝撃応力測定用ロードセル (以後、応力計、受圧面の直径 20 mm、容量 7 MPa) を、鋼製底盤 (1,600 mm 四方、厚さ 75 mm) 中央部より対称軸に沿って 50 mm 間隔で設置している。

なお、応力計の受圧面は底盤上面と面一となっており、碎石緩衝工の場合には、碎石の片当たりによる計測の誤差と応力計の破損が懸念されたため計測を行っていない。また、擁壁に作用する伝達衝撃力を測定するために、鋼製底盤の下には 9 個の起歪柱型伝達衝撃力測定用ロードセル (以後、反力計、受圧面の直径 87 mm、容量 100 kN) を設置している。

(b) 図には、敷砂単層と碎石単層の実験の際に設置した鋼製円筒 (内径 1,520 mm、高さ 800 mm、厚さ 9 mm) を示している。敷砂と碎石の設置状況は、実現場での緩衝工を想定し、振動締め機 (タンパ) をそれぞれ 100 mm 厚毎に使用して、密実となるように締め固め、緩衝工としての試験体を設置した。

衝撃載荷実験は、所定の厚さに成形したソイルセメントなどの緩衝工に対して、鋼製重錘を所定の高さから供

試体中央部に落下させることにより行っている。なお、重錘は、写真に示すようにリニアウェイレールを用いていることにより、精度よく落下が可能となっている。

衝撃実験に使用した鋼製重錘は、質量 400 kg (換算落石直径: 440 mm) で、実際の落石衝突形状を考慮して、直径 200 mm の平底形状としている。

2.4 計測項目

本実験による計測項目は、1) 重錘先端に組み込まれているロードセルによる重錘衝撃力、2) 鋼製底版に面一で設置されている応力計による伝達衝撃応力、3) 反力計の合計値である伝達 (衝撃) 力、4) レーザ式変位計による重錘貫入量、5) 実験終了後のソイルセメントの破壊形状である。

3. 実験結果

3.1 各実験時の衝撃実験状況と試験後の試験体性状

写真-1 には、各緩衝工毎の衝撃実験時の状況写真と実験終了時における試験体の破壊を含めた性状と重錘貫入量を示している。また、写真-2 には、ソイルセメント内部に形成されたせん断コーンの状況を示している。

写真-1 (a) と写真-2 より、実験終了時のソイルセメントは、中心部において大きく陥没し、押し抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる。また、放射状にひび割れが発生し、全ての方向において端部まで達している。さらに、衝突位置直下ではコーン状の破壊面が形成されていることから、主にこのせん断コーンが発生した際のせん断力や形成されたせん断コーンによる応力

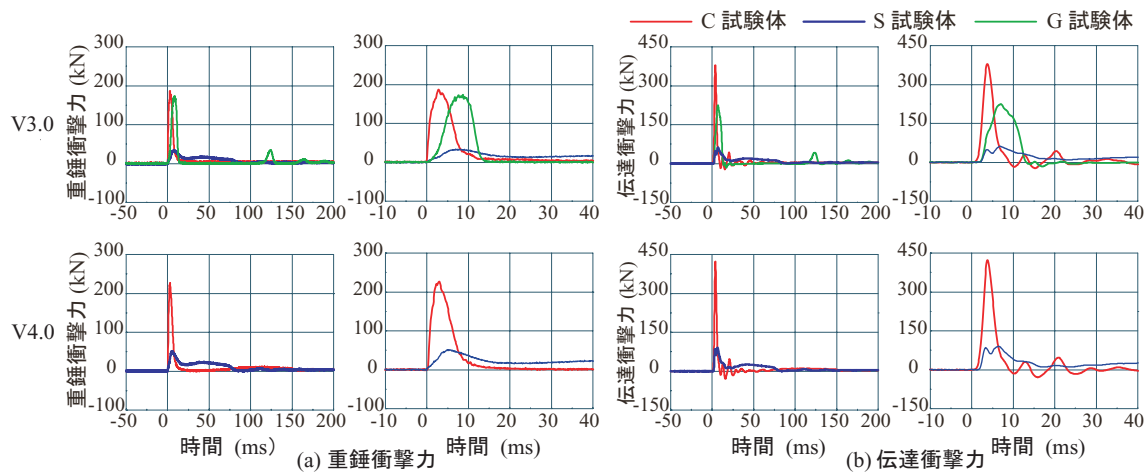


図-3 各種応答波形（重錘衝撃力，伝達衝撃力）

分散によって，緩衝効果が発揮されたものと推察される。

写真-1(b)の敷砂単層の場合には，重錘衝突時に重錘直下の敷砂が急激に圧縮されると共に重錘の端部では衝撃波により砂が横移動と共に解放面である上面に飛散するように移動し，その後，砂粒子の自重により重錘端面にわずかに盛り上がりが形成されている。実験時の自然含水比が約7%の場合においては，実験後の重錘撤去後にも，重錘形状の孔壁が保持される結果であった。

写真-1(c)の碎石単層の場合には，重錘衝突時に碎石表面の重錘先端端部の碎石が衝撃波により移動をしているものの，碎石の粒度分布に大きな偏りがなく密実に締め固められていることから，実験後の重錘貫入量は，ソイルセメント単体の場合における同一衝突速度の実験結果と同様に，貫入量が20 mm以下となった。

以上より，敷砂，碎石単層の場合には重錘の衝突により粒子の移動が生じ衝撃力を緩衝している構造であるのに対し，ソイルセメントの場合にはセメントによる結合性により圧縮破壊や割裂破壊，ソイルセメント内部でのせん断コーン形成に伴うエネルギー吸収によって，より大きな入力エネルギーに対しても緩衝効果が期待できることが明らかとなった。

3.2 時刻歴応答波形

図-3には，衝突速度 $V = 3.0, 4.0$ m/s の場合について，衝撃実験から得られた (a) 重錘衝撃力，(b) 伝達衝撃力を，図-4には，重錘貫入量の時刻歴応答波形を $t = 200$ ms にて図示している。特に 図-3 の (a)，(b) 図については，重錘衝突直後の詳細な考察を行うために $t = 40$ ms までを拡大して示している。

図-3(a)より，重錘衝撃力波形はいずれも重錘衝突初期に急激に立ち上がる継続時間が $t = 10$ ms 程度の正弦半波状の第1波と，敷砂単層の場合には第1波よりも振幅が小さく継続時間が $t = 80$ ms 程度までの第2波が継続する構成となっている。碎石単層の場合には，後述の重錘貫入量と連動する， $t = 120$ ms 程度においてリバウンドに

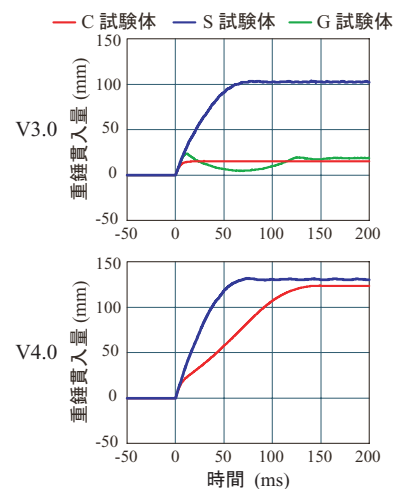


図-4 重錘貫入量の時刻歴応答波形

よる重錘衝撃力波形を計測した。最大応答値は，ソイルセメント単体の場合には碎石単層の場合とほぼ同程度であり，敷砂単層の場合の4.4～5.5倍となっている。最大応答値発生時刻はソイルセメント単体の場合が $t = 3$ ms 程度，敷砂単層の場合が $t = 5 \sim 6$ ms 程度，碎石単層の場合が $t = 8$ ms 程度と異なっている。

図-3(b)より，ソイルセメント単体の伝達衝撃力波形においては，第1波の発生時間は重錘衝撃力とほぼ同様である。しかし，重錘衝撃力に比べて最大応答値近傍が鋭い三角形状に近い波形性状を示していることがわかる。また，第1波励起後，振幅の小さい高周波成分が50 ms程度続いている。碎石単層の場合については重錘衝撃力波形と同様な波形性状となっている。敷砂単層の場合には，継続時間が $t = 20$ ms 程度の第1波と振幅が小さく継続時間が $t = 80$ ms 程度までの第2波が継続する構成となっている。また，ソイルセメント単体の最大応答値は，重錘衝撃力よりも大きくなっている。最大応答値発生時刻はソイルセメント単体の場合が $t = 4$ ms 程度，敷砂単層の場合が $t = 8$ ms 程度，碎石単層の場合が $t = 8$ ms 程度と異なっている。

図-4には，重錘貫入量に関する応答波形を示してい

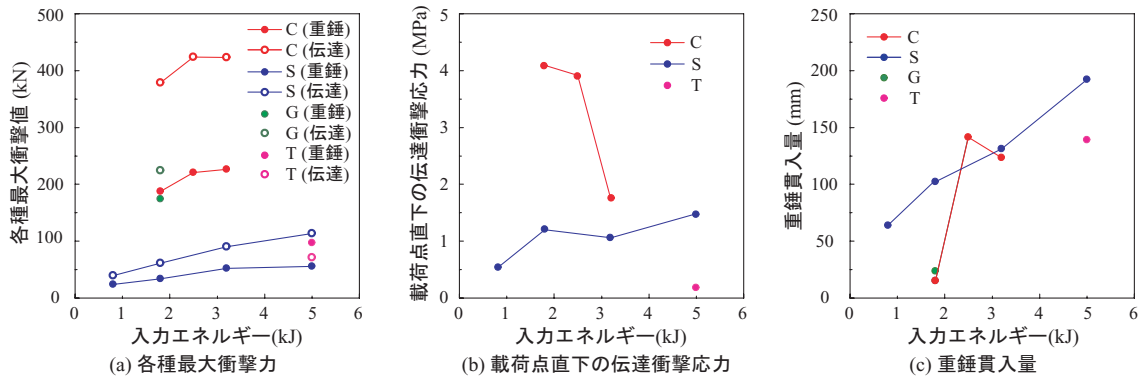


図-5 各最大応答値と入力エネルギーの関係

る。図より、重錘貫入量波形は重錘衝突後ほぼ線形に増大し、ソイルセメント単体および敷砂単層の場合には、ピーク値に達した後、収束している。碎石単層の場合には重錘衝撃力や伝達衝撃力の最大応答値発生時刻後の $t = 12 \text{ ms}$ 程度で貫入量が最大となり、リバウンドが発生している。この最大応答値の発生時刻歴応答から、碎石単層の場合には重錘が貫入量のピーク値に達する前に重錘による衝撃波と碎石緩衝材の内を伝播する反射波との増幅により、最大の伝達衝撃力が発生していると推察される。

3.3 各種最大応答値と入力エネルギーの関係

図-5には、各試験体の各種最大応答値と入力エネルギー ($MV^2/2$, $M = \text{重錘質量 } 400 \text{ kg}$, $V = \text{衝突速度}$)¹⁾ の関係を示している。ここで (b) 図の载荷点直下の伝達衝撃応力とは、図-2 に示す重錘の载荷点直下の伝達衝撃応力 (载荷点直下の応力計 1 個の値) である。また、凡例の“T”については、本実験装置を用いて図-1 に示す新たな三層緩衝構造による一連の実験結果の内、入力エネルギーが同一 ($E_k = 5 \text{ kJ}$) の三層緩衝構造 (ソイルセメント $t = 300 \text{ mm}$ を使用し、ジオグリッドと EPS $t = 250 \text{ mm}$ 厚の組合せ) の実験結果を示したものである。

(a) 図より、各試験体の最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力は入力エネルギーの増加に伴って増大し、かつ重錘衝撃力よりも伝達衝撃力の方が大きいことが分かる。これは既往の敷砂単層の場合による知見と同様な現象であり⁸⁾、ソイルセメント単体や碎石単層の場合においても同様な結果となることが分かった。

各緩衝工の比較では、重錘衝撃力、伝達衝撃力共に小さな値を示しているのは敷砂単層の場合であり、その次には碎石単層の場合となっている。ソイルセメント単体の伝達衝撃力は、同一入力エネルギーの場合、敷砂単層の場合に対して 4.7~6.2 倍、碎石に対して 1.7 倍になる。

新たな三層緩衝構造との比較では、T の場合には最大重錘衝撃力に対して、最大伝達衝撃力が小さいことが分かる。伝達衝撃力の値は敷砂単層の値に対して約 30% 減少しており、既設の擁壁に作用する衝撃力を大幅に低減することが可能であることを示している。

(b) 図より、敷砂単層の最大伝達衝撃応力は最大重錘衝

撃力や最大伝達衝撃力と同様な分布性状を示している。一方、ソイルセメントの場合には入力エネルギーの増加に伴い、载荷点直下の伝達衝撃応力が大きく低減していることが分かる。次に T との比較では、入力エネルギーが同一の敷砂単層に比べて、伝達衝撃応力が約 13% と大きく減少している。これらの現象については伝達衝撃力分布にて後述する。

(c) 図より、敷砂単層の場合には入力エネルギーの増加に比例して重錘の最大貫入量も比例的に増加していることが分かる。一方、ソイルセメント単体の場合には入力エネルギーが小さい場合には、重錘貫入量は碎石単層の場合とほぼ同程度となり、敷砂単層の場合よりも小さく示されるが、入力エネルギーが増加すると貫入量が急増する傾向にある。これは、写真-1(a) に示されるとおり、入力エネルギーが小さい場合には、ソイルセメントの重錘衝突部がわずかに陥没する程度であるが、入力エネルギーの増加に伴い、ソイルセメント全体が割裂し、重錘貫入量が増加するものと推察される。次に T との比較では、新たな三層緩衝構造においても大きな重錘貫入量となっていることが分かる。

3.4 伝達衝撃応力分布

図-6には、ソイルセメント単体および敷砂単層の場合の重錘载荷点中心から右側端部までの伝達衝撃応力分布を重錘の衝突位置を原点に、時系列で衝突速度 $V = 3.0 \text{ m/s}$ および 4.0 m/s の場合について示している。

図より、ソイルセメントの衝突速度 $V = 3.0 \text{ m/s}$ の場合には、重錘の衝突位置の直下で伝達衝撃応力は最大値を示しておらず、衝突位置から 150 mm の位置で最大値を示している。また、伝達衝撃応力は重錘衝突位置から 300 mm までの範囲では 2~3 MPa 程度の応力が計測され、その外側では 450 mm まで応力が伝達されている。衝突速度 $V = 4.0 \text{ m/s}$ の場合にも、重錘の衝突位置の直下で伝達衝撃応力は最大値を示しておらず、衝突位置から 250 mm の位置で最大値を示している。また、衝突位置からの距離が 350 mm 程度まで応力が伝達している。これは、衝突速度が大きくなることにより、写真-1(a) や図-5(a) から明らかのように重錘衝撃力や伝達衝撃力は増加するが、

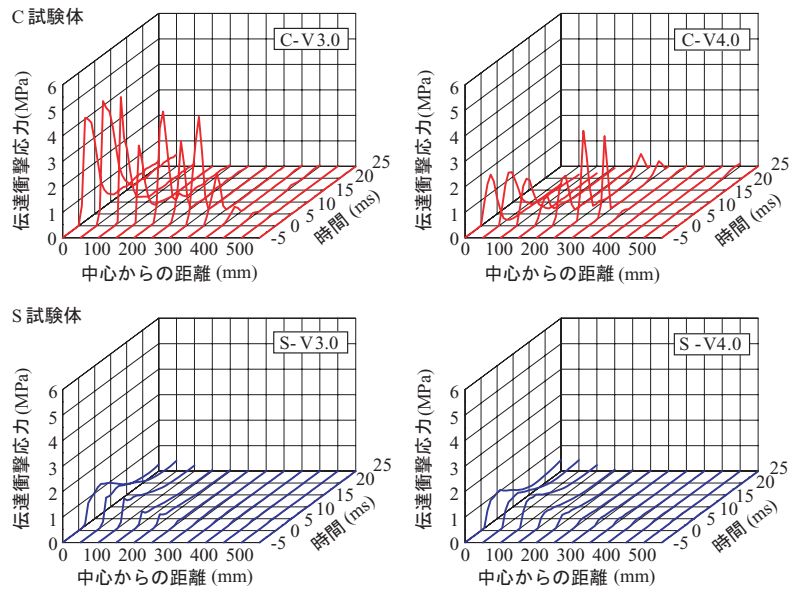


図-6 ソイルセメントと敷砂の伝達衝撃応力分布図

特に伝達衝撃応力分布に関しては、ソイルセメントが固結していることにより、押し抜きせん断的に破壊する応力波がコーン全体に分散して伝播することや、破壊近傍部で破壊に伴う複雑な挙動を示すこと等により、荷点直下点以遠で大きい値を示すものと推察される。つまり、衝突速度が大きい場合には重錘が貫入するものの、相対的に剛性が大きいことより応力の分散領域が拡大するためと考えられる。

次に敷砂単層の衝突速度 $V = 3.0 \text{ m/s}$ の場合には、衝突位置からの距離に対応して応力が減少し、200 mm の位置でほぼ零レベルとなっている。衝突速度 $V = 3.00 \text{ m/s}$ において、衝突位置からの距離が 400 mm 程度まで応力が伝達している。これは、敷砂単層の場合にはソイルセメント単体の場合と異なり、衝撃波が放射状に伝播するものの、同時に砂の粒子が移動することによってエネルギーも吸収されるため、基本的には水平方向の移動が小さい荷点直下では締め固めの傾向を示して伝達応力も大きく示されるが、荷点から離れるに従い伝達応力も緩やかに減少する傾向を示すものと推察される。

以上より、ソイルセメント単体の場合には衝突速度が大きいほど重錘衝撃力や伝達衝撃力は大きくなるが、応力分散幅が大きくなる傾向にあることより、荷点直下での伝達衝撃力は減少傾向にあることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、新たな三層緩衝構造の開発を目的として、従来からの緩衝工である敷砂や碎石単層とソイルセメント単体の場合における耐衝撃挙動や緩衝効果を明らかにするため、これらの重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ソイルセメント単体では重錘衝撃力、伝達衝撃力とも従来からの敷砂や碎石単層とする緩衝材の方が緩

衝効果として優れているが、ソイルセメントを用いた三層緩衝構造の場合には敷砂単層よりも伝達衝撃力が低減可能である。

- 2) ソイルセメント単体の場合には、敷砂や碎石単層と異なり、入力エネルギーの増加に伴い応力分散幅が広がる傾向にあるため、荷点直下の伝達衝撃力は減少する傾向にある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 川瀬良司，岸 徳光，今野久志，鈴木健太郎：二層緩衝構造と杭基礎を併用した壁式落石防護擁壁の開発に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1285-1294，2006.3
- 3) 山口 悟，岸 徳光，栗橋祐介，牛渡裕二：ソイルセメントに関する重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.733-738，2012.7
- 4) 牛渡裕二，岸 徳光，保木和弘，前田健一：ソイルセメントを有する三層緩衝構造を設置した 1/2 スケール落石防護擁壁模型に関する重錘衝突実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.727-732，2012.7
- 5) 山口 悟，岸 徳光，今野久志，西 弘明：敷砂及び碎石を用いた 2 辺支持大型 RC スラブの重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.751-756，2010.7
- 6) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル 第 3 版，2003.9
- 7) (独)土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル，2011.3
- 8) 土木学会：構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの耐衝撃設計，P.70，1998.11