論文 ソイルセメントに関する重錘落下衝撃実験

山口 悟*1・岸 徳光*2・栗橋 祐介*3・牛渡 裕二*4

要旨:本研究では,落石防護擁壁の背面に設置する「ソイルセメント+ジオグリッド+EPS」から構成される新た な三層緩衝構造の内,ソイルセメント単独で用いた場合の耐衝撃挙動や緩衝効果を明らかにするために,静載荷 実験と重錘落下衝撃実験を実施した。その結果,1)伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも2倍程度大きくなる傾向を示 すこと,2)ソイルセメントの層厚が厚いほど,応力分散幅が広くなる傾向にあること,3)ソイルセメントの強度 が大きくなることで,伝達衝撃応力は大きく示されること,4)破壊性状は押し抜きせん断破壊型となること,な どが明らかになった。

キーワード:ソイルセメント,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,昨今の国や地方公共団体の 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。

本論文では、提案の三層緩衝構造を構成するソイル



図-1 提案の三層緩衝構造

表-1 砂の物性値

産地	重錘質量	均等係数	土粒子 密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	最適 含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	2.46	16

セメントの緩衝性能や耐荷性能に関する基礎資料を得る ことを目的として,層厚,セメント量,衝突速度を変化 させた静載荷および重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 ソイルセメント

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 ることによって、水と反応して硬化し粘着力等が増大し、 衝撃荷重の分散が期待できる。更に急勾配で盛土をする 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、強度発現のバ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

*1	(独)土木研究所寒地土	木研究所 🤋	後地構造チーム	研究員	(正会員	()	
*2	室蘭工業大学大学院	くらし環境	系領域社会基盤	ユニット	教授	工博	(正会員)
*3	室蘭工業大学大学院	くらし環境	系領域社会基盤	ユニット	講師	博(L) (正会員)
*4	室蘭工業大学大学院	工学研究科	· 博士後期課程	建設環:	噫工学専	퇵攻 (正会員)

性値を有する砂を用いて実験を実施することとした。

セメントの添加量は「セメント系固化材による地盤改 良マニュアル」³⁾に基づき,最小添加量を 50 kg/m³ 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 係を求めた。その結果,最小添加量 50 kg/m³ では,材齢 14日においても地盤改良の最低値⁴⁾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 **表**-2 に示す $C = 100, 150 \text{ kg/m}^3$ とした。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、セメントを投入し撹 拌した。ソイルセメントの打設は、攪拌後、平面寸法で $1.0 \times 1.0 \text{ m}$ の型枠に 5 cm 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 $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合で $0.83 \sim 1.11 \text{ MPa}$, $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合で $2.92 \sim 3.02 \text{ MPa}$ であった。

2.2 実験ケース

表-2 には,静載荷および衝撃実験のケース一覧を示 している。衝撃実験では,ソイルセメントの層厚,セメ ント量,衝突速度をパラメータとしている。層厚につい ては 10, 20, 30 cm の 3 種類とした。

実験ケース名は, 層厚 (h = 100 mm: S10, h = 200 mm: S20, h = 300 mm: S30) に, 静載荷は S を, 衝撃実験 では衝突速度 V (m/s) をハイフンで結び示している。 なお, セメント量が 150 kg/m³ の場合には, 層厚 (cm) の 後に H を付加している。

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、ソイルセメント内部を伝幡して 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(1.6 m 四方、厚さ75 mm)中央部より対称軸に沿って50 mm 間 隔で12 個設置している。なお、その受圧面は底盤上面と 面一となっている。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。

写真-1には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。 衝撃載荷実験は、所定の厚さに成形したソイルセメント 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

	ソイル・	セメント	衝空声度	入力
試験体名	セメント量	厚さ	倒矢述度	エネルギー
	$C (\text{kg/m}^3)$	h (cm)	<i>V</i> (m/s)	E(kJ)
S10-S			(静載荷)	—
S10-V0.71		10	0.71	0.10
S10-V1.00			1.00	0.20
S10-V1.58			1.58	0.50
S20-S	100	20	(静載荷)	—
S20-V1.58			1.58	0.50
S20-V2.00			2.00	0.80
S20-V2.55			2.55	1.30
S30-S			(静載荷)	—
S30-V3.00		30	3.00	1.80
S30-V3.54			3.54	2.50
S30-V4.00			4.00	3.20
S30H-S		30	(静載荷)	—
S30H-V3.00	150		3.00	1.80
S30H-V3.54			3.54	2.50
S30H-V4.00			4.00	3.20



写真-1 実験状況



石直径:44 cm)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。また、静載荷実験は、 載荷面が衝撃実験時と同じになるように、重錘先端部を 油圧ジャッキに取り付け実施している。

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,伝達衝撃応力,3) 反力計の合計値であ る伝達(衝撃)力,4) 写真-1 に示すレーザ式変位計に 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 各実験の破壊性状

写真-2には、各実験終了時における破壊性状と重錘 貫入量を示している。写真より、静載荷と衝撃載荷では 実験終了後におけるソイルセメント表面の性状が違うこ とが分かる。ソイルセメントの厚さが*h* = 10 cm の場合 における静載荷実験では、剛性勾配が小さく、初期の荷 重の小さな段階から斜めひび割れが発生している状況が 推察される。これは、固結したソイルセメントが板状で 薄いことにより、載荷された荷重がソイルセメント内部 で分散される傾向を示さないことによるものと考えられ



(a)せん断コーン(上方より) (b)せん断コーン(側方より) 写真-3 衝撃実験終了時の破壊状況(S20-V2.55)



る。ソイルセメントの厚さがh = 20 cm以上の場合には, 最大荷重に達した際にひび割れが発生して除荷し,終局 に至っている。

写真-3 には, S20-V2.55 を一例として, 実験終了時



における破壊性状を示している。両写真より,実験終了 時のソイルセメントは,試験体中心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 のせん断コーン内で応力分散や緩衝効果が発揮されたも のと推察される。ここで,せん断コーンの底面範囲から 推定される角度を応力分散角と定義すると,応力分散角 は 20~45°程度であることが分かる。

3.2 載荷荷重-重錘貫入量関係(静載荷実験)

図-3 に、各試験体の静載荷実験時における荷重一変 位曲線を示す。厚さ h = 10 cmである S10-S 試験体の剛 性勾配が他の試験体に比べて、小さいことが分かる。こ れは、前述の破壊性状において、初期の小さな荷重段階 から斜めひび割れが発生したことによるものと推察され る。

 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合には,最大荷重時に一方向の斜め ひび割れが発生し除荷状態となった。各試験体の最大荷 重は厚さに比例して大きい値を示している。また,セメ ント量の違いに着目すると,セメント量が $C = 150 \text{ kg/m}^3$ である S30H-S 試験体の場合には, $C = 100 \text{ kg/m}^3$ であ る S30-S 試験体と比較して,剛性勾配がほぼ同程度であ るものの,最大荷重は 2 倍程度の値を示している。なお, 同時に計測を行っている反力計から得られる伝達力にお いても,載荷荷重と同様の結果となっている。

以上より,ソイルセメントの厚さが厚いほど,また, セメント量が多いほど,静的耐力が大きくなることが明 らかになった。

3.3 時刻歴応答波形 (衝撃実験)

図-4 には、衝撃実験から得られた(a) 重錘衝撃力, (b)伝達衝撃力,(c) 載荷点直下の伝達衝撃応力(載荷点 直下の応力計 1 個の値),(d) 重錘貫入量の波形を衝突 速度毎に示している。

(a) 図より、最大応答値は衝突速度にかかわらずt = 2
3 ms 程度で生じており、衝突速度の増加に伴い最大応
答値も増加する傾向にあることが分かる。波形性状は、
最大応答値を示す第1波のみで構成されている。

(b) 図より,第1波の発生時間は重錘衝撃力とほぼ 同様である。しかしながら,第1波励起後,振幅の小さ い高周波成分が50ms程度続いている。また,最大応答 値は,重錘衝撃力と同様に衝突速度の増加に対応して増 加している。

(c) 図より,載荷点直下の伝達衝撃応力は,波動継続 時間が 10 ms 程度の 1 波のみで構成されていることが 分かる。最大応答値に着目すると,衝突速度との比例関 係は見られない。これは,衝突初期段階において試験体 全体にひび割れが生じて,荷重分散に偏りが生じたこと や,押抜きせん断コーンの発生状況およびクラック発生 位置と応力計の微妙な位置関係のためと推察される。 S30-V4.00 において,伝達衝撃応力は最大値を示した後 に負の値を示している。これは,最大値発生後にロード セル設置近傍部でひび割れが発生し,自重分が除荷され たことによるものと推察される。

(d) 図には, 重錘貫入量に関する応答波形を示している。図より, セメント量が $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合に着目すると, 衝突速度の小さい V = 1.58 m/s までは最大応答値に達した後変位が戻る傾向を示し, 最大応答値に収斂

している。衝突速度が V=1.58 m/s 以上の場合には貫入 量が増大する傾向を示している。これは衝突速度が小さ い場合には、対応して入力エネルギーが小さいことによ り損傷も小さく弾性に近い状態であることにより、リバ ウンドが生じる。一方、衝突速度が大きい場合には入力 エネルギーが大きいことにより塑性化が進行し、貫入量 も大きくなるものと推察される。

また, $C = 150 \text{ kg/m}^3$ に着目すると, 衝突速度が V = 3.00 m/s時において, リバウンドにより負の応答値が発生している。これはソイルセメントの圧縮強度が大きいことによるものと推察される。

3.3 各種応答値と入力エネルギーの関係(衝撃実験)

図-5 には、衝撃実験における各種応答値と入力エネ ルギー ($MV^2/2$, M = 重錘質量 400 kg, V = 衝突速度) ¹⁾の関係を示している。

(a) 図より,最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加 に伴って増大し,かつソイルセメントの厚さが厚いほど, 大きくなる傾向にあることが分かる。

(b) 図より,最大伝達衝撃力は重錘衝撃力と同様な分 布性状を示している。ここで,最大伝達衝撃力値は,最 大重錘衝撃力の約2倍の結果となった。このような傾向 は敷き砂緩衝材の場合と同様であり,弾性棒の固定端に おける動的性状と類似している。また,入力エネルギー が大きくなると重錘衝撃力および伝達衝撃力の増加割合 は小さくなる傾向を示している。これは,衝突面の局部 破壊や押抜きせん断コーンの破壊が顕在化することによ るものであると推察される。

3.4 伝達衝撃応力分布 (衝撃実験)

図-6 には、衝撃実験結果の重錘載荷点中心から右側 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、 時系列で示している。図より、上段 2 段目までの C =100 kg/m³ の場合に着目すると、ソイルセメントの厚さ が h = 10 cmの場合には、衝突速度にかかわらず、衝突 位置の直下で伝達衝撃応力は最大値を示し、衝突位置か らの距離に対応して応力が減少し、20 cm の位置でほぼ 零レベルとなっている。厚さが h = 30 cm の場合には、 衝突速度 V = 3.00 m/s および 3.54 m/s において、衝突 位置からの距離が 40 cm 程度まで応力が伝達している。 一方、V = 4.00 m/s の場合には、衝突位置から30 cm 以 遠には応力が伝達せず、応力分散領域が減少しているこ とが分かる。これは、衝突速度が大きくなることにより、 ソイルセメントが押し抜きせん断的に破壊する傾向を示 したことによるものと推察される。

 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合に着目すると、衝突速度の小さい V = 3.00 m/sの場合には、応力分散範囲が衝突位置から 30 cm程度となっている。それに対して、衝突速度の大 きい $V = 3.54 \sim 4.00 \text{ m/s}$ の場合には、40 cm程度まで応



図-5 衝撃実験の各種応答値と入力エネルギーの関係

力が伝達しており, $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合と異なる傾向を 示している。これは、ソイルセメントの強度が高い場合 において, 衝突速度が小さい場合には縦波動的な挙動が 卓越して応力が局所化する傾向を示すのに対して、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。従って, 伝達衝撃応力値も C = 100 kg/m³の 場合に対して大きくなる傾向を示している。また、これ らの応力伝達範囲から応力分散角を推定すると、45~ 60°程度となる。このような結果は、前述の静載荷実験 終了時の円柱状やせん断コーンの底面範囲から推定され る応力分散角と異なる。荷重分散角の差異は、衝撃荷重 載荷の場合には衝突初期に応力がある程度分散して伝達 されるものの、波動伝幡の観点から応力がより集中する ことにより狭い領域でコーンが形成されることによるも のと推察される。

以上より,ソイルセメントの層厚が大きいほど応力分 散幅が大きくなる傾向にあること,衝撃荷重載荷時には 静載荷時よりも狭い領域にせん断コーンが形成されるこ と,また,強度が高くなることで伝達衝撃応力も大きく なる傾向にあることが明らかとなった。

三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼすソイルセメント厚 および強度の影響

ここでは,前節までの実験結果を踏まえて,前述の三 層緩衝構造の緩衝性能に及ぼすソイルセメント厚や強度



図-6 衝撃実験の伝達衝撃応力分布図

の影響について検討する。本実験結果より,ソイルセメ ント厚さを大きくすることにより伝達衝撃応力のより大 きい分散効果を期待できることを明らかにしている。従 って,三層緩衝構造の表層材としてソイルセメントを用 いる場合には,厚さを増加することにより,裏層材であ る EPS ブロックへの伝達衝撃応力もより広い領域に分 散が可能であることより,より大きな緩衝性能の向上効 果を期待できるものと考えられる。

また、本実験において、ソイルセメントの強度を大き くする場合には、伝達衝撃応力が増大しかつその分散効 果の向上は小さい。一方で、ソイルセメントの耐衝撃性 は飛躍的に向上する。従って、三層緩衝構造にソイルセ メントを用いる場合には、EPS 厚さを増加して過大な伝 達衝撃応力を吸収することで、ソイルセメントの高い耐 衝撃性能が活用できるものと推察される。

5. まとめ

本研究では,提案の三層緩衝構造を構成する材料の一 つであるソイルセメント単体の緩衝効果および耐衝撃性 能の把握を目的として,土質材料としてばらつきの少な い砂を用いて,ソイルセメントの層厚や強度をパラメー タとした静載荷実験と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。

- 伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも2倍程度大きくなる傾向を示す。
- ソイルセメントの層厚が厚いほど、応力分散幅が 広くなる傾向にある。また、ソイルセメントの強度 が高くなることで、伝達衝撃応力は大きくなる傾 向を示す。
- 3) 破壊性状は押し抜きせん断破壊型となる。

今後は、ソイルセメントの土質材料の検討を含め、提 案の三層緩衝構造が普及できるように研究を進めていく 考えである。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6
- 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
- (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
- (独) 土木研究所寒地土木研究所: 泥炭性軟弱地盤 対策エマニュアル, 2011.3