

技術報文

落石防護擁壁の衝撃力載荷実験

群馬大学大学院 若井 明彦
三菱樹脂(株) 間 昭徳

1. はじめに

従来工法と比較して施工性や費用面で優れた特長を有する補強土擁壁を、落石防護目的に用いる機会が近年増加している。コンクリートのような硬質な人工材料と異なり、衝撃力に対する緩衝性能は極めて高く、構造体としての使用目的を損なわないレベルの軽微な損傷であれば、特に大規模な補修を必要としない点も従来工法にはない利点と言える。

本稿では、ダイク型の落石防護擁壁を対象として、落石衝撃力による構造体としての内的安定性能（壁体自身の限界耐力）を評価するため、既往の研究事例^{1) 2) 3)}で得られた知見などを参考にして、補強土壁の表面に重錘を衝突させる衝撃力載荷実験を実施した。衝突時の壁体の抵抗特性と補強材の損傷状況などについて詳細に観察するとともに、今後、同現象を有限要素法に基づく数値解析により再現するための準備として、力学機構に関する基礎的な考察を行った。

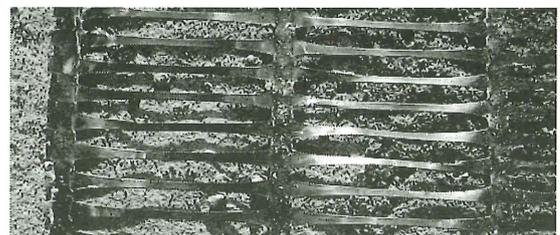
2. 載荷実験⁴⁾の概要

(1) 擁壁の諸元と計測方法

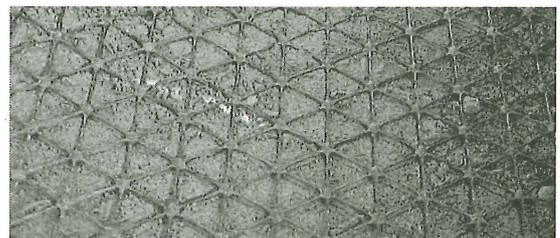
衝撃力載荷実験を行った補強土壁の側面の写真（第一回打撃後）を写真-1に、補強土壁の諸元、ひずみゲージ等の計測器の設置状況を図-1にそれぞれ示す。補強土壁の表面（天端を除く）は溶接金網と不織布により被覆するとともに、盛土本体は300mm厚さ毎にジオグリッド（通常格子、三角形の二種類；図-1と写真-2を参照）を敷設して補強されている。重錘は壁面衝突部でちょうど水平方向に運動するように、一定の高さから振り様に自由落下させた。



写真-1 載荷実験の状況（第一回打撃後）



(a) 通常格子



(b) 三角形形状

写真-2 使用したジオグリッド

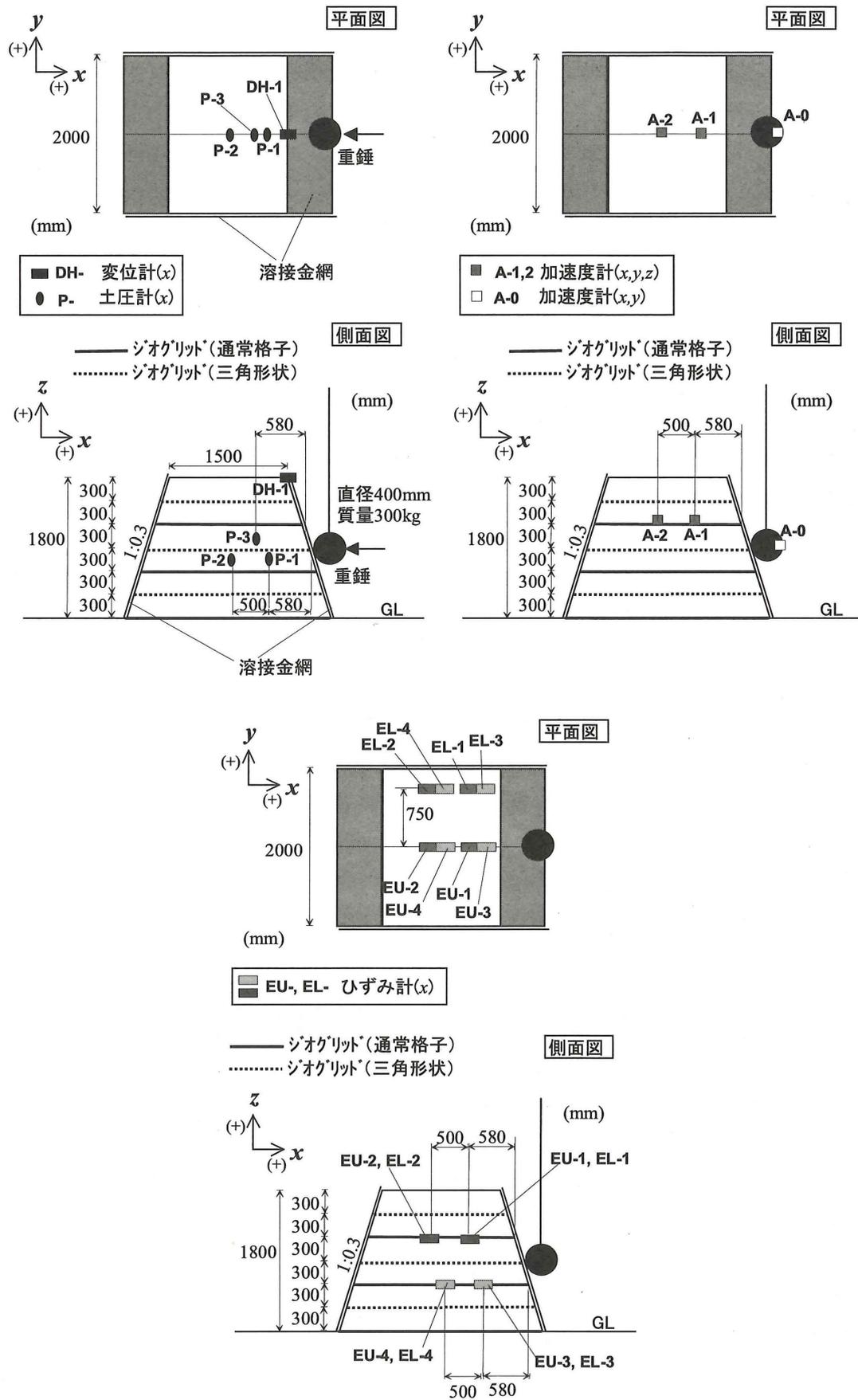


図-1 補強土壁の諸元と計測位置

重錘に貼付された加速度計の精度を確認するために、別途スピード・ガンによる重錘の最大速度の計測も行っている。衝撃力载荷中は図-1 に示した各計測器により測定を行ったが、これらの他、試験後の擁壁表面の変形状については、衝突部を中心に詳細な残留変位計測を行った。

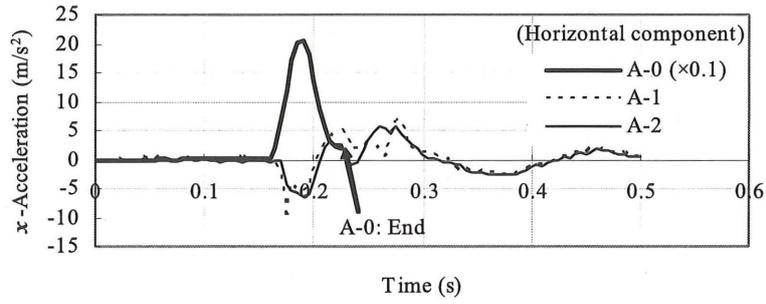
盛土材料は細粒分混じり砂（含水比 15.3%、乾燥密度 1.545g/cm^3 、 ρ_{dmax} に対する締固め度 92%）である。今後計画されている有限要素解析による詳細な力学的検討に備えるため、同材料に対する物理試験、室内力学試験（不飽和条件下）等を実施し、強度および変形特性を把握した。ただし、衝撃力に対応するような高周波数（大ひずみ速度）条件での力学試験は極めて困難であるため、一般の有限要素法による地震応答解析を行う際の物性把握に用いられる繰返し三軸試験に基づいて、波動伝播条件下における土の動的変形特性や繰返し载荷中の応力ダイレイタンスー関係などを調べた。これらを反映して決定した数値解析用のパラメーター一覧（ただし暫定値）については文献^{5) 6)}を参照されたい。室内試験結果自体の詳細は紙面の都合上ここでは省略する。

(2) 実験結果と考察

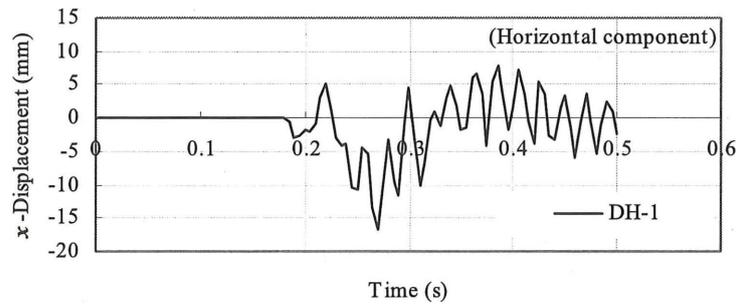
実験結果の一部を図-2、図-3 および写真-3 に示す。図-2(a)は重錘自身（A-0）および壁体内部（A-1、A-2）の水平応答加速度の時刻歴である。波形同士の比較のため、極めて振幅の大きなA-0については値を1/10倍して描画している。衝突とともに重錘には最大 200m/s^2 程度の加速度が発生し、その後約0.05秒後に加速度がゼロに転ずるまでの間は壁体表面と接触している。壁面から離れた後のA-0の計測値は省略した。壁体内部に設置したA-1、A-2については、A-0の波形からA-1、A-2の順にそれぞれ僅かに遅れて振幅を生じさせているが、これらは衝突位置から各加速度計の設置位置まで波動の伝播する時間が必要なためである。これらは重錘で観測された加速度より遥かに小さな $10\sim 5\text{m/s}^2$ 程度の最大振幅となった。壁体に衝突した部位周辺で衝撃力のエネルギーが吸収され、壁体の内部を伝達する波動の振幅が著しく減衰したものと考えられる。一方、重錘が壁体から離れた後の時間帯においては、A-1、A-2ともに衝突直後に比べてより長い周期（0.2秒程度）の振動が継続している。これは今回対象とした補強土壁の全体の固有振動の周期に近いものと推定され、振動エネルギーの分散とともに減衰していく様子がわかる。

図-2(b)、(c)、(d)はそれぞれ壁体上端の水平変位、壁体内部の水平土圧、補強材の軸ひずみの時刻歴である。図-2(a)で示した水平加速度の時刻歴と同様、重錘の衝突位置から近い順に波動到達時間の遅れを伴いながらそれぞれ振動を開始している。図-2(b)の水平変位の波形（DH-1）が短周期（約0.02秒）とそれよりやや長周期（約0.2秒）の振動成分が合成された波形となっていることは興味深い。前者は壁体表面を覆う金網の固有周期、後者は（前述のように）壁体の構造体全体としての固有周期に近いものと考えられる。このDH-1の位置での変位の残留は極めて小さいが、後述のように衝突部位周辺では塑性変形に起因する大きな残留変位が生じている。

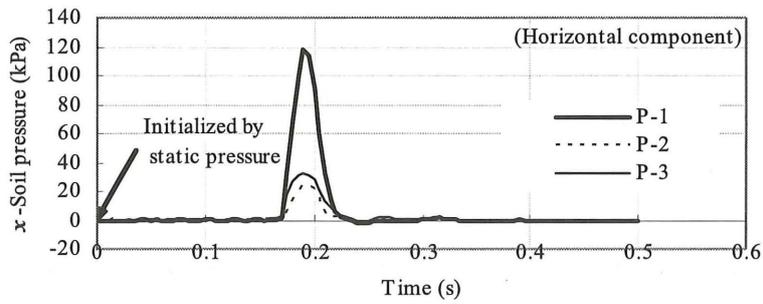
図-2(c)の水平土圧の時刻歴は衝突前の土圧（初期土圧）に対する増分で示した。土圧計の各設置位置同士の波形を比較すると、P-1における最大振幅が卓越して大きく、P-2やP-3の位置ではそれほど大きな振幅を生じていない。これは、衝突位置から離れるに従い、急速に衝撃力のエネルギーが減衰していることを示唆する。加速度、変位、補強材の軸ひずみ（後述）と異なり、振動の第一波が各土圧計の位置を通過したのちにはほとんど振動が見られないが、これは土圧計の機器としての計測面のごく近傍の土が、いったん土圧計に圧力を作用させた後、若干の緩みを生じて以降の微小振幅の振動に追随しなかったためと推定される。



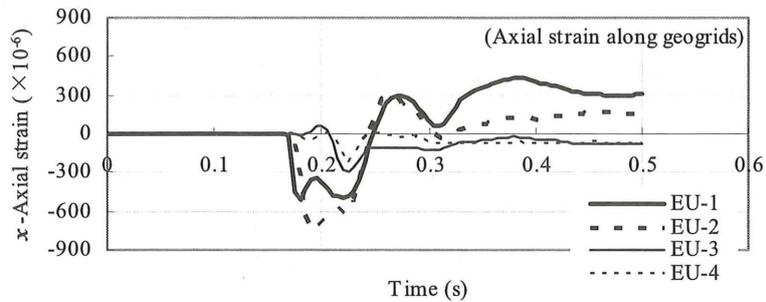
(a) 水平加速度 (x 方向) : A-0 のみ 0.1 倍で表示



(b) 水平変位 (x 方向)



(c) 水平土圧 (x 方向)



(d) 補強材の軸ひずみ (x 方向)

図-2 衝撃力載荷実験 (1 回目) で計測された諸量の時刻歴

図-2(d)には補強材の軸ひずみのうち、平面図で見たときに重錘衝突位置の延長線上に位置するEU-1～EU-4の4箇所のみ波形を記した。なお、EU-1およびEU-2は衝突位置より上方にある補強材での計測結果であり、EU-3およびEU-4は下方にある補強材の計測結果である。各位置で計測された波形の最大振幅ならびに残留値を比較すると、EU-3に比べてEU-1が、EU-4に比べてEU-2がそれぞれ大きい。これは衝撃力に起因する壁体内部の波動の伝播方向の軸が水平方向よりやや上方に傾いていることを示す。これらの振幅値自体はいずれも補強材の降伏を意味するものではないが、衝突部位の近傍ではこの値が大きく降伏限界を超えたことが想像される。落石のような衝撃力が壁体全体の安定性を損なうか否かという議論を行うためには、このような壁体内部の補強材の塑性化領域の拡大状況について把握することが有用と考えられる。

図-3は各衝撃力载荷の後、壁体表面の金網の残留水平変位量(陥没量)を計測したものである。各回の結果は初期状態(第1回载荷の前)の変位を基準とした累積変位量で示した。いずれの载荷回の後においても、水平変位量は衝突点を最大値としてほぼ同心円的に分布していることがわかる。今回は同一の衝撃力による2回の試験を連続して実施したが、図-3の壁面陥没量を比較すると、1回目より2回目の方が陥没量の増分値は小さくなった。これは2回目载荷の前の時点で壁体表面がすでに凹形に湾曲しており、重錘が壁体に接触する瞬間の接触面積が増加したため、また、衝突部位の内部にある土が第1回目の载荷の際に局所的に密実化して強度が増していたため、などの理由が考えられる。いずれにせよ、複数回の落石がほぼ同一箇所に衝突した場合に類似した力学条件と考えられるため、このようなジオグリッドを用いた落石防護擁壁の耐久性を検証する上で非常に興味深い結果である。

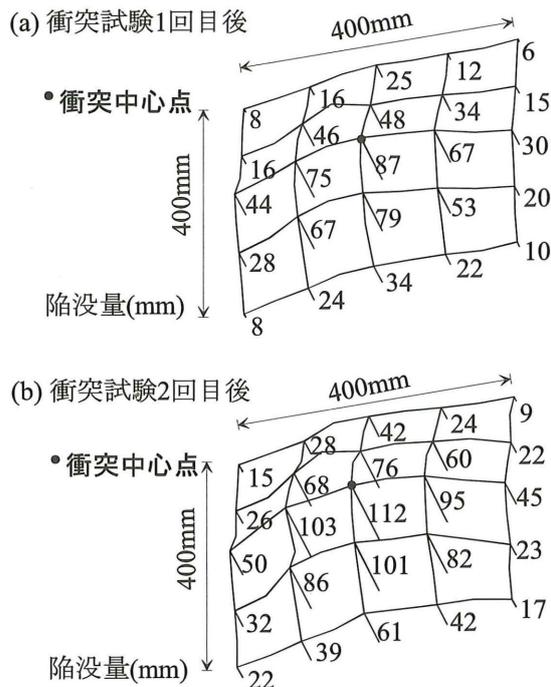


図-3 衝突部付近の壁面の陥没量
(水平変位量(mm))

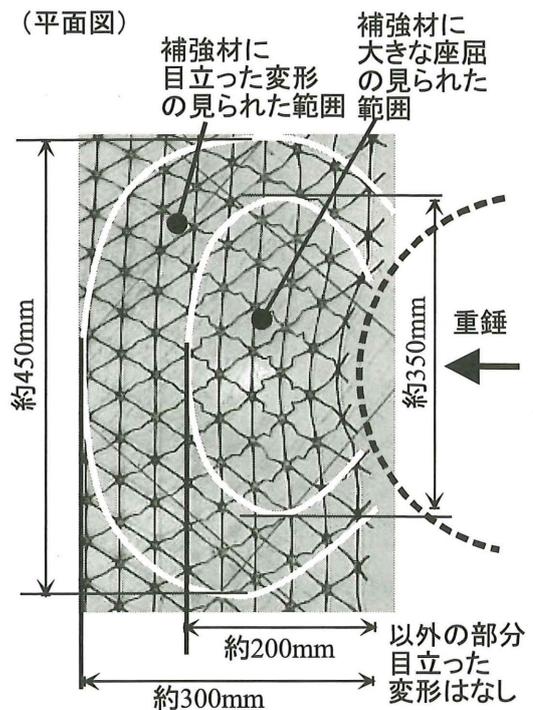


写真-3 壁体内部の補強材の変状
(2回目の衝撃力载荷の後)

試験後に壁体内部を解体して、衝突部位の近傍部分の補強材の状況を観察した様子（平面図）を写真-3に示す。三角形のジオグリッドの格子の一部が座屈していることがわかる。衝撃部位の幅 350mm、奥行き 200mm 程度の範囲内で特に顕著な座屈が見られ、その周辺においても写真のように一定の塑性変形が確認された。写真の範囲を超えた外側においては、ほとんどジオグリッドの塑性変形は観察されないことから、衝撃力による補強材の変状は衝突位置のごく近傍にとどまることが確認された。図-2(d)の軸ひずみの伝播状況、図-2(c)の水平土圧の発生状況などとあわせ、壁体内部の衝撃力抵抗機構と被害程度を考える上で貴重な知見であると考えられる。

3. まとめ

ダイク型の落石防護擁壁を対象として、補強土壁の表面に重錘を衝突させる衝撃力载荷実験を実施した。主な知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 実験で計測された結果に基づいて、衝突直後の壁体内部への波動の伝播、すなわち加速度や土圧、補強材の軸ひずみなどの発生状況が明らかになった。これらの振幅が衝突部位からの距離に応じて減少していることから、衝撃力がもたらす振動エネルギーが壁体内で急速に減衰すること、また、波動の伝播方向の主軸が水平方向よりやや上方に傾いていることが認められた。
- (2) 衝撃力の载荷による壁面および壁体内部の補強材の塑性変形（残留変形）の状況より、複数回の落石がほぼ同一箇所に衝突した場合に類似した力学条件を含め、このような落石防護擁壁の耐久性を検証する上で非常に興味深い観察結果が得られた。衝撃力による補強材の変状は衝突位置のごく近傍にとどまることが確認された。

今後、有限要素法に基づく解析的検討を通じてさらに詳細な落石抵抗機構の考察を進めるとともに、壁体の幾何学的、材料的条件を変えた一連のケースの解析結果から、合理的かつ簡便な同擁壁の性能評価手法を構築することが望まれる。

参考文献

- 1) 久保哲也, 横田善弘, 吉田眞輝, 荒井克彦, 篠原久雄, 竹内一介, 和田秀一: ジオシンセティックスを用いた落石防護擁壁の実証実験 (その1—施工性の確認と予備実験), ジオシンセティックス論文集, Vol.16, pp.141-146, 2001.
- 2) 久保哲也, 横田善弘, 吉田眞輝, 荒井克彦, 篠原久雄, 竹内一介, 和田秀一: ジオシンセティックスを用いた落石防護擁壁の実証実験 (その2—落石の衝撃力が防護擁壁に与える影響), ジオシンセティックス論文集, Vol.17, pp.245-250, 2002.
- 3) Peila, D., Oggeri, C. & Castiglia, C.: Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests, Landslides, Vol.4, pp. 255-265, 2007.
- 4) 若井明彦, 間 昭徳: ジオグリッド補強土壁の耐衝撃力性能に関する実験的研究, 第44回地盤工学研究発表会講演集, pp.1379-1380, 2009.
- 5) 若井明彦, 間 昭徳: 衝撃力を受けるジオグリッド補強土壁の有限要素シミュレーション, 第45回地盤工学研究発表会講演集, pp.1425-1426, 2010.
- 6) 若井明彦, 間 昭徳: 衝撃力を受けるジオグリッド補強土壁の有限要素解析, 第65回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第III部門, pp.571-572, 2010.