

土留緑化ブロック—砂質土系の耐震性能に関する一考察

原 洋介¹・長嶋 文雄²・星野 隆浩³・岩間 久継¹

¹正会員 東京セメント工業株式会社 技術部 (〒193-0331 東京都八王子市台町2-15-20)

²正会員 東京都立大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 東京セメント工業株式会社 神奈川工場 (〒220-0209 神奈川県津久井郡津久井町三ヶ木1820)

土留緑化ブロックは、「もたれ式擁壁」であるために、地震時には埋土との間で非常に複雑な挙動を示す。このため耐震性能の確認が難しく、合理的な設計手法が得られているとは言い難い状況にある。

本報告は、土留緑化ブロックの1/10スケール模型を用いた振動台実験と個別要素法によるシミュレーション解析を通して、その耐震性能を明らかにすることを目的としたものである。振動台実験においては、擁壁の転倒限界加速度、基礎に作用する水平力および地盤反力、土圧の水平分力などの測定を行い、「滑動に対する安定性は地震時土圧式で、また転倒および地盤反力に対する安定性は常時土圧式でそれぞれ算定した方が実験値に近い」という結果を得た。この理由について、最も単純な個別要素を用いたシミュレーション解析を行って検討した。

Key Words : Retaining Wall, Block Masonry, Seismic Performance, Distinct Element Method

1. はじめに

緑化タイプの大型ブロック積み擁壁は、プレキャスト製品であるため施工性に優れ、また表面に草花などの植栽を施すことができるため、環境保護の面においても優れているといえる。また近年は、特に建設現場における労働力の減少と高齢化が進んでいることや施工期間の短縮による建設費の削減等の要求が強くなり、大型ブロック積み擁壁に対する期待は大きいものがある。

しかし、ブロック擁壁は、理論的な裏付けがないまま石工の経験的技術により伝承されてきた経緯があり、その設計には主に経験に基づいた標準的な断面が使用されてきた。すなわち標準設計において、適用高は5m以下であり、適用できる盛土形状や地盤条件が明確になっていない等、施工上の制約や不明確な点を多く残している。

地震の多い我が国においては耐震性の検討が設計上の重要課題となるが、特に、もたれ式のブロック擁壁は背面土との間で複雑な挙動を呈すために、未だ不明な点が多い。

本研究は、ブロック高1mのブロック積み擁壁の耐震性を探るため、1/10スケール模型と相馬標準砂を用いた実験を行い、擁壁の転倒限界加速度、基礎に作用する水平力および地盤反力、土圧分布などに関する検討を行ったものである。また、個別要素法を用いて動的シミュレーション解析を行い、実験結果の補足的な解釈を試みたものである。

2. 転倒限界加速度に対する実験

(1) 実験装置と実験方法

図-1に示したような土槽①と振動台⑥を用いて実験を行った。中詰め材、裏込め材ともに粒径0.8mm単位体積重量

1.62 tf/m³、内部摩擦角約30°の相馬標準砂を用いた。ブロック擁壁③模型の据付けは、土槽内に中詰め材、裏込め材と共に1段ずつ行った。また、各段据付毎に25galの微振動を加えて、砂を緩詰め状態とした。

本実験では水平方向アーク⑧による水平振動のみを扱った。この水平振動は、すり付け部を有する正弦波で、周波数は3.16Hzとした。これは、相似率による換算では、原型の1Hzに相当する。水平振動の振幅を段階的に変化させ、加振を各ステップに20秒間行った。パラメータとして、切り土面勾配②をブロック背面と同じ5分勾配から55°、45°、35°の4段階に変化させ、ブロック段数は3段から1段毎に10段まで変化させた。各段のブロックは水平方向には連結されているが、上下方法の連結は無く、単に積み上げられている。土槽は6段積みが限界(図-1の右側のパターン1)であり、7段積み以上の実験を行う際にはパターン2に示すようにアクリル板で仕切り、1ブロック列に対する実験を行った。加速度計④により振動台の加速度を測定し、変位計⑤によりブロック最上段および中段の水平方向変位量を測定し、ブロックの一体性を確認した。また、土圧計⑨によりブロック背面の土圧も測定している。

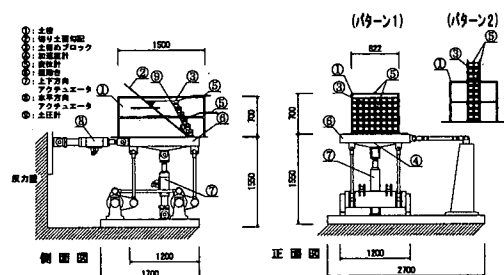


図-1 加振実験装置図

(2) 転倒限界加速度の実験結果と考察

転倒限界加速度は、基礎ブロック上面位置、図-2のAを支点とし、転倒モーメントと抵抗モーメントの釣り合うときの加速度として算定される。

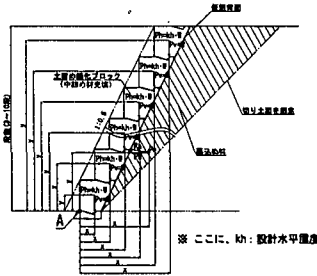


図-2 計算方法

土圧算定式として、常時土圧式(1)、地震時土圧式(2)の両方を考え、比較検討を行うことにする。

・常時土圧

$$Pa = \frac{Ws \cdot \sin(\beta - \phi)}{\cos(\beta - \phi - \delta + j)} \dots (1)$$

・地震時土圧

$$Pa = \frac{Ws \cdot \sin(\beta - \phi + \theta)}{\cos(\beta - \phi - \delta + j) \cdot \cos \theta} \dots (2)$$

図-3は、裏込め材のない5分勾配(擁壁部のみ)での実験結果と計算結果を比較したものである。

実験結果と計算値は良く合致しており、模型の重心位置や相似性などの精度を確認することができた。

図-4に切り土角55°勾配での転倒限界の比較を示す。実験値が常時土圧式(1)を用いた計算値に近い傾向を示している。このことから、結果として地震時土圧式(2)より常時土圧式(1)を用いた方がより現実的であると思われる。6段積みの実験値で低い値を示しているデータがあるが、これは図-5に示した滑動モードにより破壊したケースであり、ブロックと基礎ブロック間の接触面の清掃を怠ったときなどに極く希に見られる現象である。また、9段および10段積みで希に折れ破壊が確認された。

また、他の35°、45°勾配においても55°勾配と同じ傾向を示した。

図-4に薄墨の帯を付けたが、これは通常設計で求められる設計水平震度を表している。よって切り土角55°の砂質土での最大施工可能段数は、およそ8段ということになる。

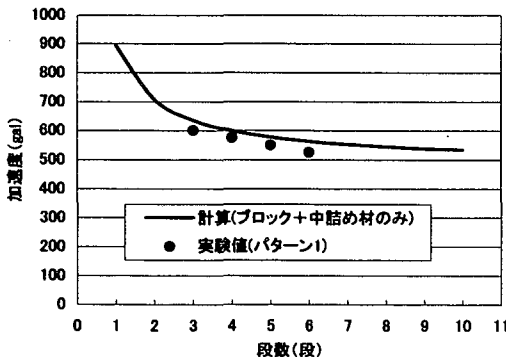


図-3 5分勾配(擁壁部のみ)の転倒限界

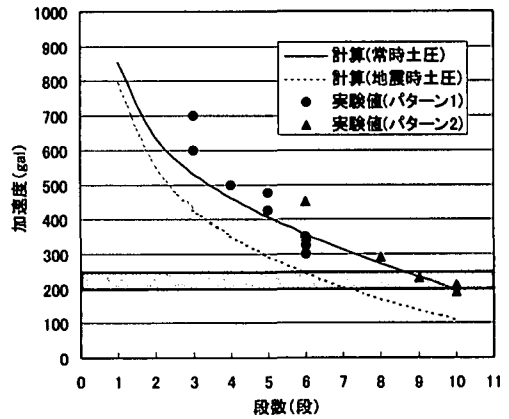


図-4 55°勾配の転倒限界

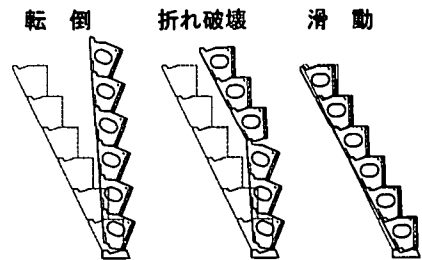


図-5 破壊モード

3. 地震時作用力に対する実験

(1) 実験方法と実験装置

荷重計を用いて擁壁基部に作用する水平力と地盤反力を測定した。基礎部をローラーの上に載せ、摩擦抵抗が殆ど無視できる($\mu=0$)ほど小さくするように工夫した。

(2) 実験結果と考察

図-6に5段積み/切り土角55°の基礎底面における水平力測定結果と計算値の比較を示す。実験値が地震時土圧式(2)に近い傾向を示している。このことから、滑動に対する検討は地震時土圧式(2)を用いるか、常時土圧式(1)を用いる場合には、ある程度の安全率を見込む必要があると思われる。

また、他の35°、45°においても55°と同じ傾向を示し、3段積みから10段積みまでの全ての段数で、ほぼ同じ傾向を示した。

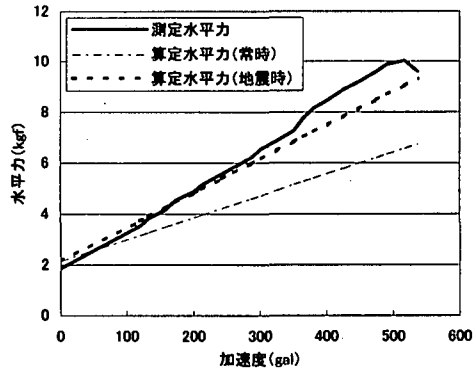


図-6 5段/55°の基礎底面における水平

図-8 に 5 段積み / 切り土角 55° における地盤反力の測定結果と計算値の比較を示す。実験値が常時土圧式(1)を用いた計算値に近い値を示し、勾配や前後の反力が交差する点などの傾向も合致している。このことから、地盤反力に対する検討は常時土圧式(1)を用いた方がより現実的であると思われる。

地盤反力の計算値は、合力 R の作用位置より図-7 に示した R_A 、 R_B 位置での集中荷重として式(3)、(4)、(5)により算出した。

a) 合力 R の作用点までの距離 d

$$d = \frac{\sum M_r - \sum M_o}{\sum V} \dots (3)$$

ここに、 $\sum M_r$: 擁壁底板つま先回りの抵抗モーメント
 $\sum M_o$: 擁壁底板つま先回りの転倒モーメント
 $\sum V$: 底板下面における全鉛直荷重 である。

b) 地盤反力 R_A (前)・ R_B (後)

$$R_A = \sum V - R_B \dots (4)$$

$$R_B = \frac{\sum V}{\lambda} \times (d - a) \dots (5)$$

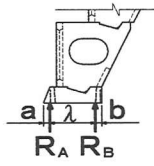


図-7 地盤反力

ここに、 λ : 測点間距離

a : つま先から測点までの距離 である。

合力 R の作用位置は、転倒・抵抗モーメント、全鉛直荷重によって求められるが、全鉛直荷重は地震力の影響が小さいため、転倒・抵抗モーメントの比により定まる。したがって、転倒限界算定時において、常時土圧式(1)を用いた方がより現実的であると思われたことに合致するものである。

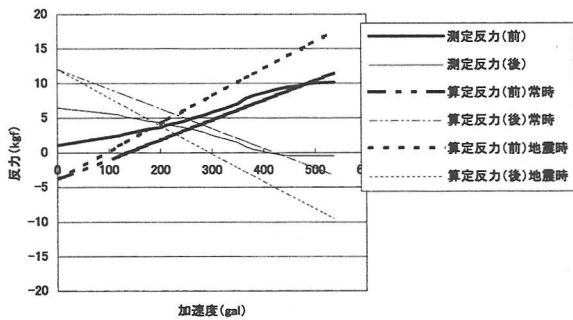


図-8 5段 55° - 地盤反力の変化

加速度増加に伴う土圧分布の変化を確認するため、土圧の水平分力を測定した。測点位置を図-9に示す。

図-10、図-11 に 5 段積み / 切り土角 55° における土圧の水平分力測定結果を示す。

図-10 の入力加速度 100gal から図-11 の 480gal にかけて下段部にて大きな土圧の増加が確認され、上段部ではあま

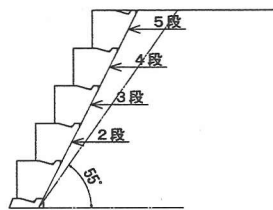


図-9 土圧測定位置

り土圧の増加は確認されなかった。これは土圧合力の作用位置の下方への移動現象を示している。

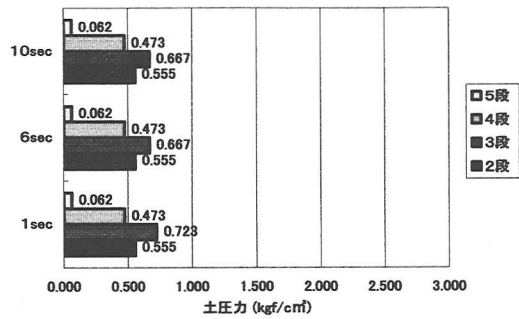


図-10 5段積み / 切り土角 55°, 100 gal

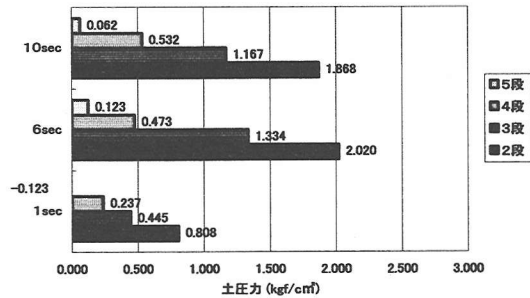


図-11 5段積み / 切り土角 55°, 480 gal

土圧は地震力の影響を少なからず受けているが、図-12 のように、土圧合力の作用位置が加速度増加に伴い下方に移動したために、転倒・地盤反力に対して

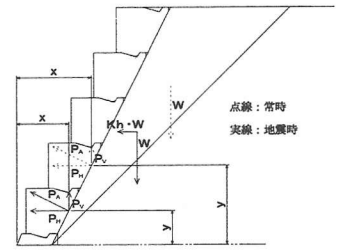


図-12 土圧合力の作用位置

の検討は結果として常時土圧式(1)を用いた方が現実的となったと思われる。

5. 個別要素法による解析

(1) 解析手法

各ばね定数は砂および鉄筋コンクリートの標準的な物性値より求めたが、粘性減衰を含めた各材料定数の妥当性を検証するために、安息角に関する実験およびシミュレーションを行うことにした。ブロック砂および切り土面一砂の境界での摩擦角は、壁面摩擦角 $\delta = 2/3\phi$ を採用した。

砂の要素配置は、まず対象領域内になるべく高密度で落下距離が小さくなるように配置し、これに重力をかけることにより落下充填した。しかし、ステップ関数的に急激に重力を掛けると要素間の衝突が生じ、堆積要素全体が安定するまでかなりの時間を要してしまう。そこで、下式を用いて初期の重力を緩和させた。

$$g(1 - e^{-t}) \dots (6)$$

ここで、 $Y = -500 \times t^{1.9}$ 、 g : 重力の加速度、 t : 解析時刻である。

また、砂要素の微小運動を取り除くため、落下充填配置を行う間のみ減衰定数を 0.50 とした。さらに、接触判定に許容値を設定し、発散することを抑制した。全て倍精度演算を行うことにした。

(2) 解析結果

安息角に関するシミュレーションは主に要素半径 r の影響と粘性減衰定数 h の影響および時間刻み Δt による解の収束性を求めるために行った。図-2 に示すように左右の壁を用意し、砂を重力落下させながら右側の壁をゆっくり右側に移動させた。 $r=3.0\text{mm}$, $h=0.006$, $\Delta t=1.0 \times 10^6$ 秒のものを例示したが、0.6 秒付近で砂は安定し、安息角は 35° 程度となった。内部摩擦角との差が僅かであったため、次の水平方向加振シミュレーションではここで用いたパラメータを使うことにした。減衰定数は 0.01 程度以下のものが実験値に近い挙動を示した。

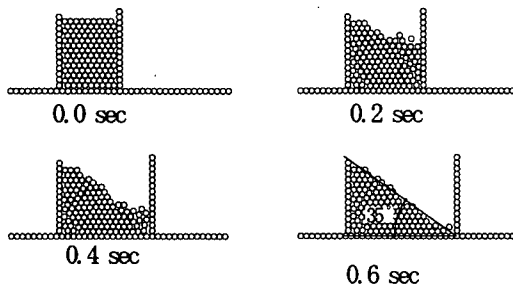


図-13 安息角に関するシミュレーション結果

ブロック擁壁、砂、切り土面、振動台で構成される全体系の動的な挙動をシミュレートした。基礎底面と切り土面に対してすりつけした 3.15Hz (実物大では 1.0Hz 相当) の正弦波を入力した。砂の落下充填配置時間が 0.15 秒、その後振動(変位振幅 1.395 cm 加速度振幅 $\alpha = 550 \text{ gal}$)を加えた。

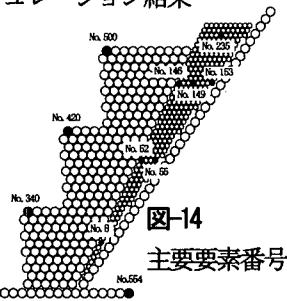


図-14 主要要素番号

図-15 に砂要素の水平方向相対変位量を、図-16 に砂要素の鉛直方向相対変位量を示す。水平方向、鉛直方向共に切り土面付近の要素の動きは鈍く、ブロック側の要素の動きが大きい。また、図-18 に示した全体系のシミュレーション結果を見るとブロックの振動によって出来た隙間を埋めようと砂が移動しており、この挙動が前述のブロック擁壁転倒に関する問題の解明につながるように思われる。

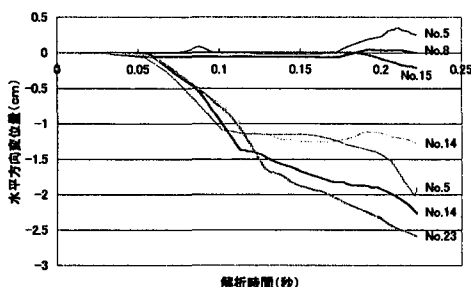


図-15 砂要素の水平方向相対変位

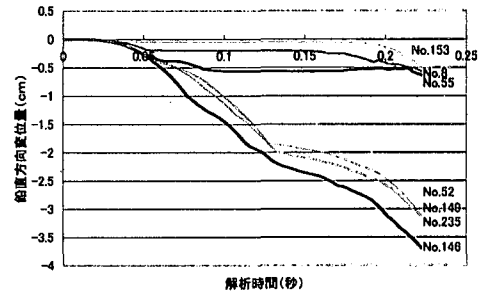


図-16 砂要素の鉛直方向相対変位

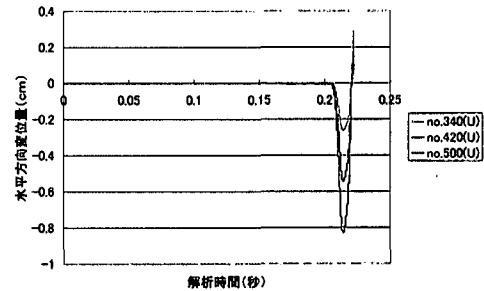


図-17 ブロック要素の相対変位

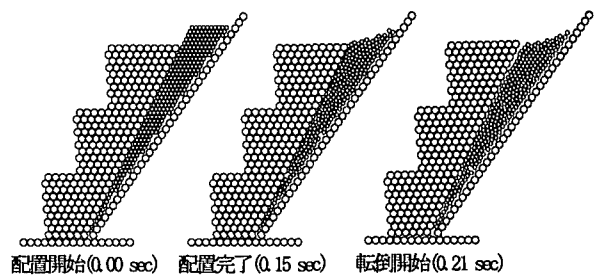


図-18 シミュレーション解析結果 ($\alpha=550\text{gal}$)

6. おわりに

土留緑化ブロックの耐震性能を明らかにするために 1/10 模型を用いた振動台実験を行い、「滑動に対する安定性は地震時土圧式で、また転倒および地盤反力に対する安定性は常時土圧式でそれぞれ算定した方が実験値に近い」という結果を得た。この理由について、最も単純な個別要素を用いたシミュレーション解析を行った結果、ブロックが振動することによって背面砂とブロックとの間に生じた隙間を埋めようと砂が移動することにより、土圧合力の作用位置が下方に移動したためであると思われる。

ただし、今回行った解析は精度が粗いため、今後解析の精度を高め、粘性土への検討も行いたいと思っている。

参考文献

- 1) 伯野：破壊のシミュレーション、森北出版、1997。
- 2) 道路土工擁壁工指針、日本道路協会、1999。
- 3) 星野、原、岩間、長嶋：土留緑化ブロックの地震時転倒限界に関する模型実験、土木学会、第 55 回 年次学術講演会講演概要集、2000。
- 4) 原、星野、岩間、長嶋：土留緑化ブロック基部の地震時作用力に関する実験的研究、土木学会、第 55 回 年次学術講演会講演概要集、2000。