

ブロック擁壁 - 砂地盤連成系の 擬似立体個別要素解析手法

原 洋介¹·長嶋文雄²·竹田岳史³

1東京セメント工業(株)技術部関東設計室主任(〒193-0931東京都八王子市台町 2-15-20)

E-mail: tc-kdesign@oregano.ocn.ne.jp

²東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻助教授(〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1) E-mail:fumio-n@ecomp.metro-u.ac.jp

3東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻大学院生(〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: takeda-takasi@c.metro-u.ac.jp

筆者等は、空積みブロック擁壁の1/10スケール模型を用いた振動台実験を行うと伴に、2次元DEMを用いたシミュレーション解析を行い、耐震性能に関する検討を行ってきた.しかし、2次元DEMは、各要素を単位長さを有する円盤形と見做して同一平面内における運動を扱うために、基本的には平面応力状態を仮定し得る場合に限られ、奥行き方向に構造的変化のある場合には使用することはできなかった.本報告は、新しい擬似立体DEMによるブロック擁壁 - 砂地盤連成系の相互作用解析手法を提案するものであり、本手法を用いることにより、2次元DEMでは表現できなかったブロック内部の砂粒子の動きを、演算コストをできるだけ抑えながら、把握することが可能となった.

Key Words : block retaining wall, dynamic response analysis, disctere element method, quasi-3D analysis, coupling problem

1.はじめに

プレキャスト製品である「空積みブロック擁壁」 は,現場施工が主な重力式擁壁や逆T字型擁壁に対 して,現場における工期の短縮を図ることが可能で あり,建設現場労働力の減少や高齢化などの問題を 解決するための方策の一つとして期待されている. また,建設費の縮減効果や緑化による環境保全効果 も同時に期待されている.

しかし,空積みブロック擁壁は重力式擁壁や逆T 字型擁壁などの「自立式擁壁」とは異なり,「もた れ式擁壁」であるために,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, その耐荷のメカニズムについては未だ不明な点が残 されている.したがって,擁壁の標準的な設計指針 を与える道路土工指針においては,自立式の擁壁に 関する記述がほとんどであり,空積みブロック擁壁 に関する記述は最近少しずつ増えては来ているもの の,耐震設計に関しては具体性の乏しい規定となっ ている.

このような背景に基づき,筆者等は,空積みブロック擁壁の1/10模型を用いた振動台実験を行うと伴に,2次元DEMを用いたシミュレーション解析を行

い,耐震性能に関する検討を行ってきた¹⁾⁻⁵⁾.振動 台実験においては,擁壁の転倒限界加速度,基礎に 作用する水平力と地盤反力や土圧の水平分力などを 観察し,「基礎の滑動に対する安定性は地震時土圧 式」が,また「擁壁の転倒および地盤反力に対する 安定性は常時土圧式」でそれぞれ算定する方が実験 値に近いという興味ある結果を得た.この理由につ いて,2次元DEMを用いて検討を行ってきたが,各 要素を単位長さを有する円盤形と見做して同一平面 内における運動を扱うために,基本的には平面応力 状態を仮定し得る場合に限られ,奥行き方向に構造 的変化のある場合には使用することはできなかった. すなわち,2次元 DEM の制約によって,空積みブロ ック擁壁ブロックとブロック内部の土を同時に表現 することが出来なかった.

一方,3次元 DEM では,要素数が非常に多くなり, コンピュータの能力が増している現状においてもな お演算時間・コストが膨大に掛かり,未だ実務的な 解析手法にはなっていない.

本報告は,以上のような問題を解決するため,空 積みブロック擁壁-砂質土連成系の動的応答解析用 の新しい擬似立体個別要素解析手法を提案するもの である.

2.大型ブロック擁壁とその耐震上の課題

平成11年の道路土工 - 擁壁工指針の改定により, 大型ブロック積み擁壁に関する設計基準が新たに規 定された.しかし,以下のような不明確な点が存在 しているものと考えられる.〔 〕ブロック間の結 合構造により, ブロック間の結合にかみ合わせ構 造や突起などを用いたり, 胴込めコンクリートで練 積みにした形式, 控長の大きいブロックで鉄筋コ ンクリートなどを用いてブロック間の結合を強固に ブロック間のかみ合わせ抵抗のない空 した形式, 積みによる形式の3タイプに分類されている.しか し, 各タイプの結合構造にどの程度の剛性が必要な のか明確でない.〔 〕一般的な大型ブロック積み 擁壁については, 控長ごとに直高と法勾配の関係が 示されている.しかし,一般的な大型ブロック積み 擁壁がどのような構造であるか不明確である上,直 高と控長,法勾配の関係を決定した根拠が不明確で あるため,土質条件など大型ブロック積み擁壁の適 用条件が曖昧である.〔〕擁壁高さを8m以下に することを原則とし,8mを超える場合は地震時の 安定性を含めて,別途詳細な方法で検討することと なっている.しかし,詳細な方法とは,どのような 方法を意味するのか明確でない.〔 〕その他の形 式として土砂などを中詰めして用いるタイプが紹介 されている.このようなタイプは一般的に緑化ブロ ックとして用いるケースが多く,植生土への水分補 給のため,中詰めした土砂と,ブロック背面の土砂 の間にはブロック断面が存在しないタイプが多く見 受けられる(図-1).こうした形状のブロックにお いて,中詰め土砂が擁壁の一部として機能するのか が不明確である.



図-1 空積みブロック内部および外部の土砂

上述の課題に対して,大型積みブロック擁壁の プロック間の剛性(一体性)および中詰め土砂の挙 動を明らかにするため,振動台模型実験を行ってき た.しかし,模型実験では,中詰め土砂の挙動など 観察が困難であること,中詰め土砂および背面の土 砂の土質条件の違いに対応出来ないこと等の問題が あり,ブロック間の剛性(一体性)および中詰め土 砂の挙動を同時に観察することが出来るシミュレー ション解析手法が切望された.

3.新しい擬似立体個別要素法による地震応答 解析手法

(1) 擬似立体化手法

図-2 に,筆者等が従来からシミュレーション解 析に用いていたブロック擁壁の2次元モデルを示す. しかし、当モデルでは,空積みブロック擁壁内のブ ロックとブロック内部の砂を同時に表現することが 出来ないため,ブロック内部の砂の挙動がわからな いことや,ブロックの重心位置が実際のブロックと 大幅にずれてしまう等の問題があった.



図-2 従来の2次元 DEM モデル

そこで、複雑な形状をした構造物を擬似的に立体 化してモデル化する手法を考案した.空積みブロッ ク擁壁において、一つのブロック幅を単位幅(奥行 き)と考える.この単位幅には,図-3に示すよう に,ブロックと背面砂(領域1)およびブロック前 面壁とブロック内部の砂と背面砂(領域2)の2層 の構造が存在している.従って,2層構造(領域1, 2)に分割し,連続条件として,ブロック要素にお ける連続性を与えることにする.また,2層構造間 (ブロックと砂および砂と砂の間)に摩擦を考慮す ることもできる.2層構造を平面(単層構造)で表 現するためには,ブロック要素の内,領域1に存在 するが領域2には存在しない要素と砂要素との接触 問題は扱わないことにする(透過要素).このよう に,単位幅に a, b などの長さに関するパラメータ を設定することにより,実際に近い幾何学的な条件 設定が可能となる.また,地震時における擁壁の安 定問題で最も重要な、ブロックの重心位置を精度良 く設定することも可能となった.図-5 に,実際の ブロックの重心位置と,モデル化による重心位置の 場所を示す.



(2) ブロック擁壁 - 砂質土連成系のモデル化

弾性連続体をモデル化する際には,図-6 に示す ような,(a)の正六角形配置や(b)の正四角形配置が 多用されている.本解析における弾性連続体(コン クリート構造物)をモデル化する際にどちらを用い るべきかを,また,正四角形配置においては間隙ば ねを導入した(c)の拡張個別要素法についても検討 を行った.結果として,(b)の正四角形配置におい ては,ポアソン比が0以外の弾性体は表現不可能で あることや⁶⁾,(c)の拡張個別要素法における正四 角形配置では,連続体から非連続体への解析を目的 とした手法であるため⁷⁾,コンクリートの破壊は考 慮せず,転倒挙動等を目的としている本研究におい



要素間の力の作用としては,2つの状態を考える. 状態1は,初期状態において連続体の状態で要素間 には圧縮力,引張力,せん断力の3つの力が働く. 引張力が破壊基準に達した場合,伝達力がなくなり 自由運動となる.せん断力が破壊基準に達した場合 は,法線方向力と内部摩擦角に応じた係数が伝達さ れる.要素が自由運動状態から再び接触した場合は 状態2に移行する. 状態2として,初期状態にお いて離れていた要素どうしが接触した場合,あるい は,接触していた2要素が離間した後に再び接触し た場合に定義される.要素間には圧縮力,せん断力 が働くが,せん断力は要素間に圧縮力が働いている ときのみ作用するものとする.

また, せん断力の破壊基準にはモール・クーロンの 破壊基準を適用した.図-7 における記号はそれぞ れ,C:粘着力, ϕ :内部摩擦角, F_c :圧縮強度, F_t :引張強度, e_n :法線方向ばね力, e_s :接線方 向ばね力を表している.



砂要素のパッキングは落下法を用いているが,落 下した要素は既に落ちて底部にある要素と衝突を繰 り返し,安定した位置に次第に落ち着くことになる. 新たな要素が落下して来るたびに衝突する要素だけ でなく,既に堆積した要素間の力の釣合いも変化し, 要素が少し移動し,新しい釣合い状態を作ろうとす る.要素落下終了後でも堆積要素全体が安定するま でには,ある程度の時間を要する.そこで,時間刻 みを一定のレベルに保ちながら安定した解を得るた めに,式(1)を用いて砂要素パッキングの重力緩和 を行った.

$$g_1 = g\left(1 - e^Y\right) \tag{1}$$

ここで, $Y = -500 \times t^{1.9}$,g:重力加速度,t:解 析時刻とする.図-8 は重力緩和曲線のグラフであ

り,パッキング時には効率を良くするために砂の摩 擦係数を一時的に零としている.



(3) 高速化処理

擬似立体化による要素数の増加に伴い,解析時間 の効率化を図るため高速化処理についての検討を行 った.まず,セル登録法による高速化を行った.セ ル登録法とは,解析対象モデルをセルによって分割 し,ある要素に対する接触判定を行う要素を絞り込 む方法である.すなわち,図-9のように任意のセ ル内にある要素に対して接触判定を行う要素を、そ のセル内に存在する他の要素と,セルの周囲の8つ のセルの中にある要素のみに絞り込み,高速化を実 現するものである.

また,本研究においては,擁壁ブロックは剛体的 な扱いをしてもかまわないので,これを利用した高 速化処理を考えた.擁壁ブロックの外周要素(●要 素)のみ接触判定を行い,内部要素(○要素)は初 期状態において設置した弾性ばね,ダッシュポット, スライダーを常に適用し,接触判定は一切行わない という処理を行った.解析対象モデルや段数等によ って効果の違いはあるものの,3段積みブロックの 解析で13%程度の時間短縮ができた.

さらに,セル登録法を使用する場合,加振する際 の振幅や転倒を考慮しなくてはならないため,解析 モデルに対して左右に余分なセルを設定しておかな ければならなかった.そこで,セル自体を絶対座標 から相対座標に変更することで余分なセルを削減し, 高速化を試みた.しかし,セルの相対座標変換の計 算が増えてしまうため,計算時間の短縮はほとんど 出来なかった.





図-11 セル削減図

(4) 地震応答解析手法

図-12 に本研究における解析フローを示す.始め に,ブロック,砂,振動台等の要素の座標データを 読み込む.次に、砂とブロックの粘着力,ヤング係 数等や時間刻み等の解析パラメータを入力し,初期 状態における接触判定を行う.その後,時間刻み毎 の接触判定,各要素における合力の計算等を行い, パッキング終了ステップ数に達した後に振動台の強 制変位を行い,時間刻み毎の接触判定,各要素にお ける合力の計算等を行う.



- 4.疑似立体手法を用いたシミュレーション解 析
- (1) 振動台模型実験の概要 図-13に示した装置を用いて実験を行った.

中詰め材はブロック内部に充填された砂,裏込め 材はブロック背面の砂とし,両者とも粒径0.8mm単 位体積重量16.2kN/m³内部摩擦角30.5[°]の相馬標準砂 を用いた.

模型の据付は,土槽 内に中詰め材,裏込め材と 共に入れ,各段据付毎に25galの微振動を加え,振 動締め固めを行い,緩詰め状態とした.

予備実験で,鉛直振動を加えることにより,水平 振動のみ加えた場合に比べ耐震安定性が向上するこ とが分かっている.そのため,本実験では水平方向 アクチュエータ による水平振動のみに注目した. 水平振動は,すり付け部を有する正弦波で,3.16 Hzの周波数を採用した.これは,予備実験において 周波数の違いによる影響が認められなかったため, 原型の1 Hz相当のものとした.



図-13 実験装置図

これら水平振動の振幅を変化させ,加振をステッ プ・バイ・ステップに各20秒間行い,転倒限界加速 度を求め,計算により求めた値と比較検討を行った. このとき実験条件の違いを比較するために,切り土 面勾配 をブロック背面と同じ5分勾配から55°, 45°,35°の4パターンとし,ブロック段数は3段から 10段までの8パターンとし比較検討を行った.

実験中加速度計 により振動台 の加速度を測定 した.変位計 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することにより,ブロックの 一体性の確認を行った.土圧計 によりブロック背 面で受ける土圧を測定した.荷重計 にてブロック背 基部に作用する水平力を荷重計 にてブロック基礎 に作用する地盤反力を測定した.これら測定は全て 動的に測定を行った.

ローラ は,水平力の測定を正確に行うため,摩 擦抵抗µ=0となるように努めた.

また,荷重計およびローラの数量が限られていた ため,1スパンのみで実験を行った.

図-14に基礎の測定装置を示した.

水平力は左側の水平力測定用圧縮型荷重計を土槽 に固定し,測点を左右の2点設け測定した.単位長 さ当たりとするため左右の平均値により評価した. また,水平力の伝達は水平力伝達棒を基礎ブロック に固定することで行った.そのため,基礎ブロック は,固定された状態となっている。



図-14 基礎の測定装置

地盤反力は右側の地盤反力測定用圧縮超小型荷重 計を基礎ブロック底面に固定し,測点を前面側2点, 背面側1点の合計3点設けた.また,本来地盤反力は 分布荷重として存在するが,本実験では荷重計で測 定を行ったため,前面側と背面側の集中荷重として 評価した.

(2) 個別要素パラメータの決定方法

各個別要素のばね定数およびダッシュポットの粘 性係数は,基本的には弾性理論に基づいて算定を行 った.

解析によって砂の挙動を正確に観察するためには, これら一粒一粒をモデル化すれば良いが、これは現 実的でない.そこで,ばね定数,粒径および減衰定 数等をパラメータとした安息角に関するシミュレー ション(図-15)を行うことによりパラメータを決 定した.実験で用いた砂の安息角は30.5°であり, シミュレーションによって得られる安息角が所定値 の値となるまで試行錯誤的に行った.



図-15 安息角に関するシミュレーション

(3) シミュレーション解析手法

本論文により提案する,新しい疑似立体 DEM を用 いて,振動台模型実験をシミュレートした.切り土 勾配を 55°とし,ブロック段数を3段とした.実験 にて測定したプロック基礎に作用する水平力および 地盤反力を測定するために,基礎ブロック要素と振 動台要素の間に測定用要素を配置した.また,実験 と同条件となるように,基礎ブロックは固定された 条件となっている。



実験では転倒限界加速度を求めるために,水平振動 の振幅を変化させ,加振をステップ・バイ・ステッ プに各20秒間行ったが,シミュレーション解析に おいては,解析時間短縮のため,入力加速度振幅は, およそ15秒で最大800galに達する緩和曲線を採用 した(図-17).この時の加振は,基礎要素と背面 版要素および測定用要素に強制変位を与えることに よって行った.

解析結果は、ブロック要素の変位やブロック基礎 に作用する水平力および地盤反力を時刻歴毎にファ イル出力し、演算終了後、Excel上でのオブジェク ト描画などの処理を行った。



(4) 解析結果および実験値との比較

3.06GHz の CPU クロックと 2GB のメモリーを有す る PC を用いたが、総要素数 1569 個(砂要素 1111 個, ブロック要素 372 個,振動台,背面板,基礎等 86 個),時間刻み 5.0×10⁻⁷秒,総シミュレート時 間 8.0秒,総演算回数 1.6×10⁷回の場合で,総解 析時間は約 56 時間 40 分要した.

大型ブロック擁壁の解析結果を示す.

振動台に対するブロックの相対変位量(図-19) を見ると,解析時間がおよそ1秒までの間ほとんど 発生していない.このことから,自由落下による 0.5 秒間の砂要素パッキング終了後,およそ0.5 秒 間の振動締固め効果を得ていると考えられ,実験で 行った相対変位を生じない程度の微振動による締め 固めに相当する働きをしていると思われる.

解析結果図(図-18)を見ると,解析時刻およそ 5秒にて,ブロックが初期位置を保つことが困難に なっていることが分かる.その後,解析時刻およそ 6秒にて,背面砂中の空隙が目立つようになり,解 析時刻およそ8.2秒,応答加速度およそ610galに て,転倒に至った.これは,実験で得た転倒限界加 速度600~700galと一致し,転倒に至る直前までブ ロックの一体性が確保されている点においても一致 している.これらのことは,応答加速度を一定に保 つ解析においても確認されており,400galおよび 500galでは転倒に至らなかったが,600galにて転 倒した。



解析値(図-19)および実験値(図-20)それぞれ の振動台に対するブロックの相対変位量を比較する と,ブロックが前後に振動しながら転倒していく等,

同様の傾向を示しており,ほぼ実験を再現している.



法線方向ばねを図示することにより(図-21), 各時刻での土圧分布の観察を行った.解析時刻0秒 から5秒に掛けて,圧縮を表す赤色のラインが下方 へ集まって行くのが分かる.これは,土圧も地震時 慣性力の影響を受け,土圧の水平分力は地震時土圧 式による値に近いものの,土圧合力の作用位置が加 振時間と共に低下することにより,結果として,

「基礎の滑動に対する安定性は地震時土圧式が,ま た擁壁の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する方が実験値に近い値とな る.」と言う実験による仮定を裏付ける結果である と考えられる.

砂の変位は,ブロックが変位することにより出来 たくさび状のブロック - 背面砂間の隙間を埋めるよ うに変位する.解析時刻6秒以降の砂は,この隙間 を十分に埋めることが出来ず,ばね密度が粗な状況 となり, 土圧は十分ブロックに伝達されていないよ うに見受けられる.ブロックの変位が進行している ため,ブロックに掛かる慣性力が主になり転倒に至 るものと考えられる.





0.0sec(0.0gal)

1.0sec(6.4gal)



5.0sec(325.7gal) 6.0sec(427.8gal) 7.0sec(520.4gal)



各図の土圧が受働および主 働土圧のどちらの状態にある かを明確にするため,加振に よる振動台の変位方向を矢印 により示した.

図-21 法線方向ばね力図

シミュレーション解析による地盤反力(図-22) および水平力(図-23)は,時刻4秒から5秒,応 答加速度 220gal~330gal において,それぞれ最大 となり,その後変動が大きくなっている.



図-22 シミュレーション解析による地盤反力



図-23 シミュレーション解析による水平力 シミュレーション解析により,およそ最大値を示

した 320gal での振動台実験による地盤反力(図-24)および水平力(図-25)との比較検討を行った. 実験において,基礎の拘束が簡易であったために値 が大きく変動しているが,ほぼ傾向および値も一致 している.従って,ブロックが大きく傾く迄の間は, 十分地盤反力および水平力に対しても精度の良いシ ミュレーションが可能であると思われる.



5.まとめ

2次元DEMの奥行き方向に構造的な変化のある系の擬似立体解析手法を提案した.擬似立体化を行うことで,擁壁ブロック内部の砂の挙動を捉えること

が可能となり,実験と同様の動きを示すシミュレー ション解析が可能となった.解析の結果,「基礎の 滑動に対する安定性は地震時土圧式が,また擁壁の 転倒および地盤反力に対する安定性は常時土圧式で それぞれ算定する方が実験値に近い値となる.」と の仮説を裏付けるデータを得た.実務においては, 地震時土圧式を採用するか,もしくは根入れを十分 確保する必要があるものと考えられる.

今後は,当解析手法を用いて,転倒に加えて滑動 に対する挙動や,プロック擁壁-地盤連成系の地震 時挙動を明らかにし,耐震安定化策の検討を行う予 定である.

参考文献

- 1) 星野隆浩, 原 洋介,岩間久継,長嶋文雄: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 27 回関東支部技術研究発表会講演論文集,I-81, pp.160-161, 1999.
- 2) 星野隆浩,原 洋介,岩間久継,長嶋文雄: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回年次学術講演概要集, A196,2000.
- 3) 原 洋介,星野隆浩,岩間久継,長嶋文雄: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 回年次学術講演概要集, A197, 2000.
- 第 洋介,長嶋文雄:個別要素法を用いた土留緑化プロックの動的挙動解析,土木学会,第 56 回年次学術 講演概要集, A184, pp.604-605, 2001.
- 5) 原 洋介,長嶋文雄:緑化ブロック-砂質土系の耐震 性能に関する一考察,第26回地震工学研究発表会講演 論文集,pp.573-576,2001.
- 6) 阿部和久:個別要素法による連続体解析におけるバネ 定数の設定,土木学会論文集,No.543/ -36, pp.83-90, 1996.7
- 7) 伯野元彦:破壊のシミュレーション 拡張個別要素法 で破壊を追う - ,森北出版株式会社

(2003. 6.29 受付)

Quasi-3D Discrete Element Method for Block Retaining Wall - Sand Interaction Analysis

Yohsuke HARA, Fumio NAGASHIMA and Takashi TAKEDA

A new quasi-3D discrete element method for analyzing the interaction of block retaining wall and sand coupling system is proposed in this paper. While 2D discrete element method is conveniently used for analyzing dynamic destruction behavior with small computational costs, the method is restricted to be used for the plane stress problem. On the other hand, 3D discrete element method costs huge computing time and labor, and it has not been a practical tool yet.

The proposed quasi-3D method is able to calculate dynamic behavior of both wall block element and inner sand element as if they behave in 3D space with reasonable computer costs. Effectiveness and validity of this method are verified by simulating shaking table test of block retaining wall-sand coupling system, which has been conducted by authors using 1/10-scaled model.