

プレキャスト擁壁の変状形態に関する有限要素法解析

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○佐藤 登 澤松 俊寿 新田 武彦 宮武 裕昭

1. はじめに

国土交通省では、2016年を生産性革命元年と位置づけて各種の取り組みを進めており、公共土木工事においてもプレキャストの活用による生産性向上が検討されている。擁壁、カルバート等の道路土工構造物におけるプレキャスト製品はその種類が極めて多様であるため、個別の現場条件から所要の安全性等を確保したうえで、最も合理的な製品を慎重に選定する必要がある。一方で、土工構造物は主たる使用材料である土砂や岩石等の不確実性が大きく、机上での計算結果だけでなく実際に発生している被災等の事例の収集・分析が重要である。本論文では別報¹⁾において報告した、変状事例の状況を想定した大型ブロック積擁壁の傾斜土槽模型実験を対象に、二次元有限要素解析手法を用いて実験結果の再現を試みた。また、再現を行った解析パラメータをもとに実物大でブロックの単位体積重量、控長の異なる条件でパラメトリックスタディを実施した。

2. 大型ブロックの傾斜土槽模型実験を対象とした数値解析

傾斜土槽模型実験は、大型ブロック積擁壁の変状事例のうち安定性に大きく関連すると考えられる上下ブロック間のずれを想定し実施¹⁾したものである。直高 $H=7.0\text{m}$ の空積みに対応する条件(以下「分割型」と称す)の大型ブロック積み擁壁を想定し1/10に寸法を縮小した模型を傾斜させることにより擬似的に水平力を載荷した。

数値解析は二次元有限要素法解析により実施した。図1に解析モデル図を示す。傾斜土槽模型全体をモデル化し、要素数は14471要素、地盤要素は四節点ソリッド要素とした。解析パラメータを表1に示す。モデルの構成則は、豊浦砂はMohr-Coulomb、コンクリートブロックは線形弾性体とした。単位体積重量 γ は、実際の模型の重量より設定した。豊浦砂のせん断抵抗角 ϕ 、ヤング率 E は、Tatsuoka et al.²⁾の低拘束圧下の豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験の結果より $\phi = 50.2^\circ$ 、 $E = 12531\text{kN/m}^2$ とした。ブロック同士の境界部、ブロックと土の境界部にはずれと剥離を表現するためにインターフェイス要素を使用した。インターフェイス要素のパラメータは文献³⁾、ブロック同士の摩擦試験結果等を参考に設定した。自重解析の後、水平力を与えた。模型の傾斜は、鉛直方向と水平方向の物体力を傾斜の量に応じて静的に変化させることで考慮した。実験における滑動拘束板はブロックつま先のX自由度を拘束することで考慮した。

3. 傾斜土槽模型実験結果と数値解析結果の比較

図2に $k_t=0.36$ における傾斜土槽模型実験の結果と数値解析の結果を示す。実験では1段目のブロックと2段目のブロック間が滑動したが、数値解析においてもブロックがずれる形態を確認した。ブロック背面に発生したすべり線は解析では滑動した2段目のブロック背面付近から発生し、実際の挙動に概ね近い傾向を示した。これより数値解析によりブロック間のずれの挙動のシミュレーションが出来たと考えられる。図3に実験結果と数値解析結果の水平震度

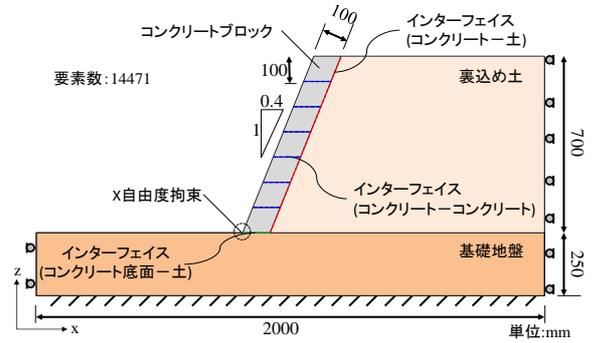
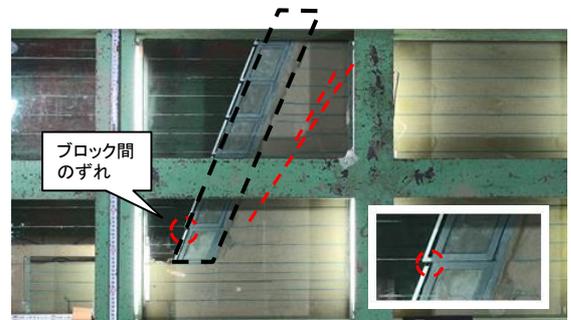


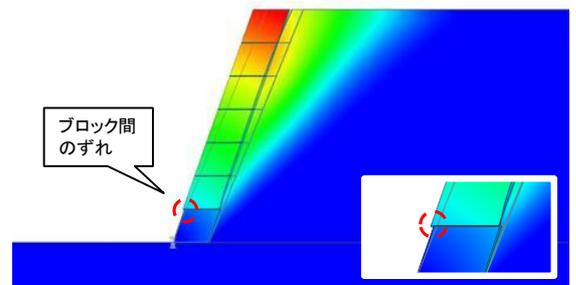
図1 解析モデル図

表1 解析パラメータ(傾斜土槽模型)

地盤要素		裏込め材 豊浦砂 $D_r=80\%$	基礎地盤 豊浦砂 $D_r=80\%$	コンクリート ブロック
構成則		Mohr-Coulomb		Linear elastic
単位体積重量	γ (kN/m ³)	15.66	15.66	18.58
粘着力	c (kN/m ²)	0	0	-
せん断抵抗角	ϕ (deg.)	50.2	50.2	-
ポアソン比	ν	0.17	0.17	0.3
ヤング率	E (kN/m ²)	12531	12531	23500000
インターフェイス要素		土 - コンクリート	土 - コンクリート底	コンクリート- コンクリート
構成則		Coulomb		
垂直剛性係数	k_n (kN/m ³)	1.E+09	1.E+09	1.E+09
せん断剛性係数	k_t (kN/m ³)	1.E-01	1.E+05	1.E+05
粘着力	c (kN/m ²)	0	0	0
せん断抵抗角	ϕ (deg.)	33.5	31.0	32.3



(a) 模型実験結果



(b) 数値解析結果

図2 模型実験と数値解析の結果の比較

k_h と高さ $hi=650\text{mm}$ における水平変位 dx の関係を示す。実験では $k_h=0.38$ まで転倒モードが卓越して変位し、その後急激に崩壊に至ったが、数値解析結果では、概ね $dx=20\text{mm}$ 程度までは挙動を再現できた。

4. パラメトリックスタディ

前述した傾斜土槽模型実験の再現解析結果を参考に、実物大を想定した大型ブロック積擁壁を対象とした数値解析を実施した。表2に解析ケースを示す。載荷する水平力は前述の解析で挙動が再現できた範囲内である $k_h=0.2$ とした。地盤要素のパラメータは、文献³⁾を参考に実際の大型ブロック積擁壁を想定し設定した。 $H=7.0\text{m}$ 、壁面勾配は $1:0.4$ とし、ブロックの γ と、ブロック1個の高さ h に対する控長 b の比 b/h を変数とした。インターフェイス要素は、前述の傾斜土槽模型実験の値を参考とした。要素数は23482要素でモデル化した。また、基本となるケースとして $\gamma=23\text{kN/m}^3$ 、 $b/h=1$ の練積みに相当する条件(以下「一体型」と称す)についても検討した。一体型はブロック同士のインターフェイス要素を無くすことで考慮した。

図4に、相対水平変位 dx を H で正規化した dx/H 、ブロック間のずれ dx_s を b で正規化した dx_s/b 、及びブロックの回転 θ と h/H の分布を示す。相対水平変位 dx/H は、 b/h が小さくなるにつれ、また γ が小さくなるにつれて dx/H は増加する傾向にある。また、一体型の条件は剛体的に傾倒しているのに対し、分割型の b/h が小さい条件では高さの中程を頂点としたはらみ出しが認められた。ブロック間のずれ dx_s/b 、ブロックの回転 θ は、一体型の条件では0となる。分割型の $b/h=1.0$ では、ずれは高さ方向に全体的に分布し、回転の発生も僅かであったが、 b/h が小さくなると dx_s/H と θ はともに大きくなり、中段部にずれ、回転が集中する傾向を示した。

各条件のはらみ出しの程度を次式の I_b ⁴⁾により定量的に評価した。

$$I_b = \frac{Z_m}{H} \times \frac{dx_m}{dx_t} \quad (1)$$

ここに、 I_b ははらみ出し指数、 Z_m : 擁壁頂部から dx_m の箇所までの深さ、 H : 直高、 dx_m : 最大相対水平変位、 dx_t : 擁壁頂部の相対水平変位である。したがって、 $I_b=0$ の場合は剛体的な傾倒であり、 I_b が大きい程はらむモードが支配的となる。図5に I_b と b/h の関係を示す。 b/h が 0.9 までは $I_b=0$ 、すなわち剛体的な傾倒であるが、 $b/h < 0.8$ では、 $I_b > 0$ となりはらみ出しが生じている。すなわち、 b/h の小さい扁平なブロック形状では、傾倒に加えてはらみ出す変状形態が加わっている。また、ブロックの γ が小さいほど I_b が大きく、はらみが大きくなる。

5. まとめ

- ・傾斜土槽模型実験を二次元有限要素法解析により再現した結果、1段目と2段目のブロックがずれる変状形態及びすべり位置など概ね一致した。
- ・実大寸法におけるパラメトリックスタディの結果、事例調査でも認められたはらみ出しの変状形態を確認した。はらみ出しはブロックの控長がより小さく、ブロックの単位体積重量 γ が小さい条件で特に顕著となる傾向を示した。

参考文献 1) プレキャスト擁壁の変状形態に関する一考察, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018(投稿中) 2) Tatsuoka et al.: Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.26, No.1, pp.65-84, 1986.3 3) 日本道路協会: 道路土工-擁壁工指針, 2012.7 4) M. Sabermahani et al.: Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls, Geotextiles and Geomembranes, Vol.27, pp.121-136, 2009.

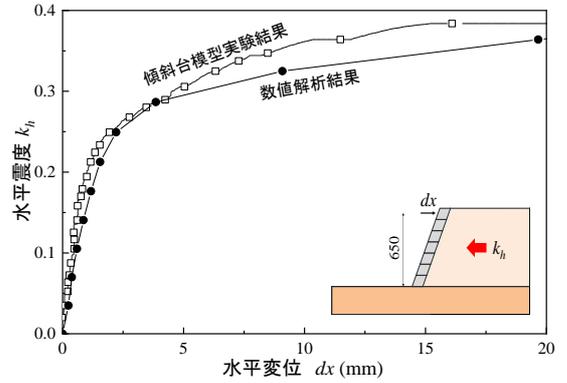


図3 水平震度 k_h と水平変位 dx の関係

表2 解析パラメータとケース

地盤要素		裏込め材	基礎地盤	コンクリートブロック
構成則		Mohr-Coulomb		Linear elastic
単位体積重量	γ (kN/m ³)	19	20	23, 20, 17
粘着力	c (kN/m ²)	0	0	-
せん断抵抗角	ϕ (deg)	30	35	-
ポアソン比	ν	0.35	0.3	0.3
ヤング率	E (kN/m ²)	14000	84000	23500000
高さ控長比	b/h	-	-	1 ~ 0.6

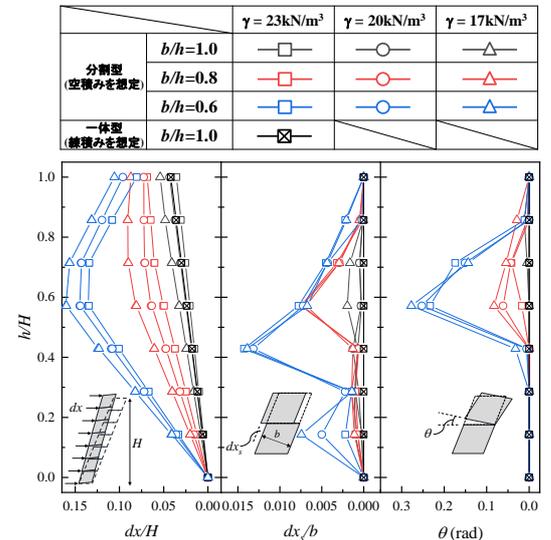


図4 相対水平変位, ずれ, 回転の分布
はらみ出しが卓越 傾倒が卓越

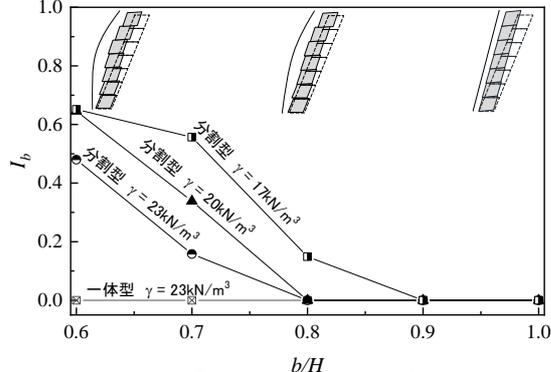


図5 各条件のはらみ出し