

重力式擁壁の地震挙動とその予測法について — 擁壁の水平・鉛直・回転変位予測法

独立行政法人 土木研究所 正員 ○岡村 未対
国土交通省 国土技術政策総合研究所 正員 松尾 修

1. はじめに 擁壁や橋台などの剛な浅基礎の地震時変位量の予測には、ニューマークのスライディングブロック法をはじめとする手法がしばしば用いられる。それらの方法では、基礎の水平（滑動）変位、あるいは回転変位のみが計算されるが、実際には水平、鉛直及び回転変位が同時に生じ、それらを合理的に評価することが求められている。本報では、基礎—地盤系をマクロな要素として捉え、支持力破壊局面及び基礎の塑性変位増分方向を与える変位ポテンシャル面を用い、剛な基礎の水平、鉛直及び回転変位量を同時に求める方法を提案する。

2. 計算法の基本的な考え方 図 1(a)に示すような水平砂地盤上の剛体基礎を考える。基礎に水平荷重 H_e 及び鉛直荷重 V_e が作用するとき、もし地盤も剛体で、破壊(滑動)は基礎底面と地盤の間だけで生じるのであれば、地盤反力(この場合は摩擦抵抗)は $V_e \tan \mu$ であり、滑動中の基礎の運動方程式(式(1))を解くことにより水平変位の時刻歴が求められる。これはニューマーク法を基にした計算法である。ここで m は基礎の質量、 μ は摩擦係数、 h は水平方向の相対変位である。

$$H_e - V_e \tan \mu = m \ddot{h} \quad (1)$$

しかしながら、鉛直荷重 V_e 、水平 H_e 、モーメント荷重 M_e の組み合わせ荷重を受ける砂地盤の支持力局面は、概ね図 1、2 のごとく回転放物線となることが知られている¹⁾。従って、地盤が破壊し基礎が運動している瞬間の地盤反力は、この支持力局面上のどこか一点にある。この地盤反力($V, H, M/B$)が求められれば、鉛直、水平、回転に関する基礎の運動方程式を解くことにより同時に 3 つの変位成分が求められることになる。なお、図 1、2 では荷重の単位の整合を図るために、モーメントを基礎幅 B で除してある。また後述する変位ポテンシャルでは、同様の理由から基礎の回転角 θ に B を乗じてある。

3. 支持力局面とポテンシャル面 前述したように、既往の支持力実験結果等を基に提案されている支持力局面の概形は図 2(a)、式(2)に示す通りである¹⁾。

$$F = \left(\frac{H}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{M}{\phi B} \right)^2 - \left(\frac{V}{V_{\max}} \right)^2 (V_{\max} - V)^2 = 0 \quad (2)$$

V 軸に直交する面での切り口は楕円、 V 軸に平行な面での切り口は図 1 のように放物線である。 μ 、 ϕ は定数で μ は基礎底面と地盤の間の摩擦係数である。

また、地盤が破壊状態(地盤反力が支持力局面上)にあるとき、基礎の変位増分方向と荷重の間にユニークな関係(流れ則)が存在することが既往の研究で報告されている^{例え 2)}。すなわち破壊状態において、地盤反力の比($V:H:M/B$)が与えられれば変位増分方向 $\dot{s}$ が決まり、逆に $\dot{s}$ を与えれば地盤反力の比が決まる。変位増分方向 $\dot{s} = \{\delta v, \delta h, B\delta\theta\}$ を示す変位ポテンシャル面 Q を図 2(b)、式(3)に示す¹⁾³⁾。ただし v, h, θ はそれぞれ鉛直、水平変位と回転角である。

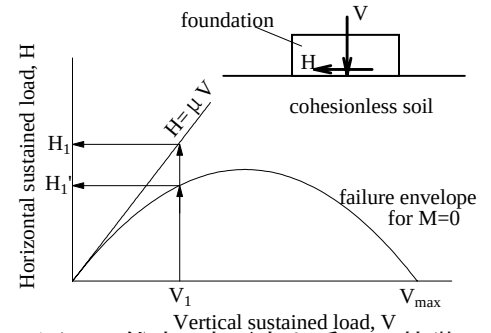


図 1 鉛直・水平力を受ける基礎の支持力局面

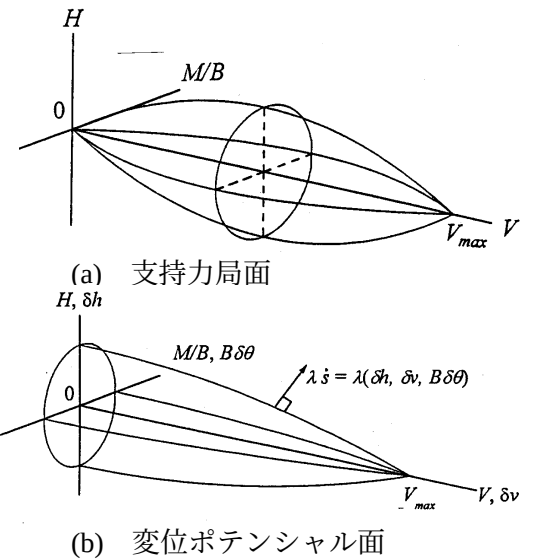


図 2 支持力局面と変位ポテンシャル

砂、擁壁、地震、変形

〒305-8561 つくば市南原 1-6、Tel:0298-79-6759、okamura@pwri.go.jp

$$Q = \sqrt{\left(\frac{H}{\mu V_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{M}{\phi B V_{\max}}\right)^2} + 0.44 \left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 - 0.44 = 0 \quad (3)$$

4. 変位計算方法 本研究で提案する変位予測手法は、地盤反力と変位増分方向に関する制約条件を与えた上で擁壁の運動方程式を解くものである。計算では次の3つの仮定を置く。すなわち、(1)地盤の支持力局面が $F = F(V, H, M/B) = 0$ で表される。(2)地盤は剛完全塑性体である。(3)変位増分方向は変位ポテンシャルに直交する ($\dot{s} = \{\delta v, \delta h, B\delta\theta\} = \lambda \partial Q / \partial R$)。ただし、 $R = \{V, H, M/B\}$ は地盤反力ベクトルである。これらの仮定より、擁壁と地盤が相対運動する時には、外力によらず R は支持力局面上にあり、運動の方向(変位増分方向)は変位ポテンシャル面に直交する。

5. 計算の流れ 水平砂地盤上の擁壁が、ある時刻 t において図3に示すように外力

$E_{(t)} = \{V_{e(t)}, H_{e(t)}, M_{e(t)}/B\}$ を受ける場合の変位計算の流れを以下に述べる。ここで $E_{(0)}$ は時刻 t における擁壁の慣性力と背面からの土圧合力の和である。

Step1: $t=0$ において擁壁は止まっており、外力と地盤反力は釣り合っている(図3(a), $\dot{s}=0, R=E$)。この釣り合い状態は外力 E が支持力局面を越えない限り続く。

Step2: 次の時間ステップ, $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ に進み、外力 $E_{(i)}$ が支持力局面を越えているかどうかを調べる。越えていない場合には越えるまで step2 を繰り返す。

Step3: Step2 で外力 $E_{(i)}$ が支持力局面を越えたと判断されたとき(図3(b))、外力と地盤反力は等しくなく、 $E_{(i)} - R_{(i)}$ の力によって擁壁が加速度運動する。擁壁の回転量が微小であると仮定すると、

擁壁の運動方程式は以下ようになる。

ここで m は擁壁の質量、 I_G は重心に関する回転慣性モーメント、 x_G, y_G はそれぞれ底面中心と重心との水平、鉛直距離、モーメントは基礎底面中心に関するものである。

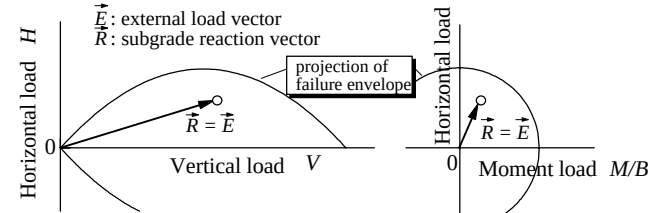
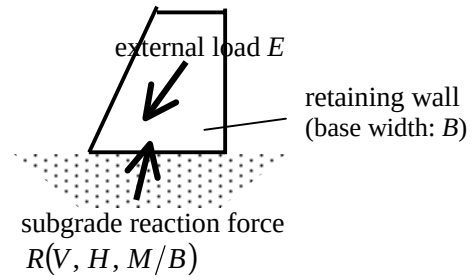
これらの式を時間で積分することにより、速度と変位が式(7)、(8)のように求められる。

ここで地盤反力 $R_{(t)} = \{V_{(t)}, H_{(t)}, M_{(t)}/B\}$ は支持力局面上にあり、かつ(6)式から求まる

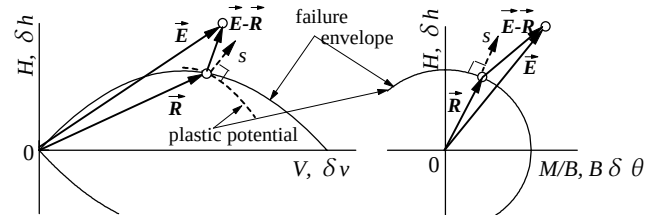
変位増分方向が変位ポテンシャルに直交するように決めなければならないので、数回の繰返し計算が必要となる。**Step4**: 擁壁の速度が0となるまで step3 を繰り返し(図3(c))、0となった後は step2 に戻る。

6. おわりに 本計算法は、運動方程式を地盤反力に関する制約条件を与えることによって連成させて解くものである。本法の適用性については実験や実事例を対象とした計算によって確認して行く予定である。なお、本研究は中村伸也、斉藤由紀子両氏との擁壁の地震時挙動に関する議論を通じて行ったものであり、ここに記して謝意を表す。

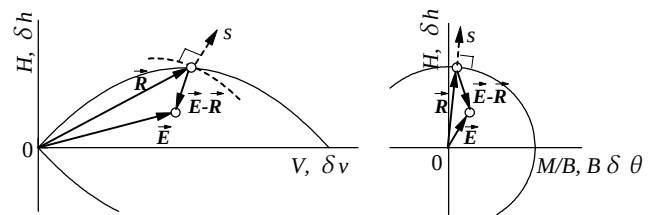
参考文献 1)Georgiadis and Butterfield (1988): Canadian Geotechnical J., 25, pp. 199-212、2) Martin and Houlsby (2000): "Geotechnique, 50(4), pp.325-338、3)岡村ら(2000):第45回地盤工学シンポジウム, pp.61-64



(a) external load is within the failure envelope ($F \leq 0$) and the foundation is not moving



(b) external load violates the failure condition ($F > 0$)



(c) external load comes down within the failure envelope ($F \leq 0$) but the foundation is still moving

図3 外力、地盤反力ベクトルと変位増分方向

$$V_{e(t_i)} - V_{(t_i)} = m\ddot{v}_{G(t_i)} = m(\ddot{v}_{(t_i)} - \ddot{\theta}_{(t_i)}x_G - \dot{\theta}_{(t_i)}^2 y_G) \quad (\text{水平}) \quad (4)$$

$$H_{e(t_i)} - H_{(t_i)} = m\ddot{h}_{G(t_i)} = m(\ddot{h}_{(t_i)} + \ddot{\theta}_{(t_i)}y_G - \dot{\theta}_{(t_i)}^2 x_G) \quad (\text{鉛直}) \quad (5)$$

$$M_{e(t_i)} - M_{(t_i)} = m(\ddot{h}_{(t_i)}y_G - \ddot{v}_{(t_i)}x_G) + I_G\ddot{\theta}_{(t_i)} \quad (\text{回転}) \quad (6)$$

$$\dot{s}_{(t_i)} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\ddot{s}_{(t_i)} + \ddot{s}_{(t_{i-1})}}{2} dt + \dot{s}_{(t_{i-1})} \quad (\text{速度}) \quad (7)$$

$$s_{(t_i)} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\dot{s}_{(t_i)} + \dot{s}_{(t_{i-1})}}{2} dt + s_{(t_{i-1})} \quad (\text{変位}) \quad (8)$$