

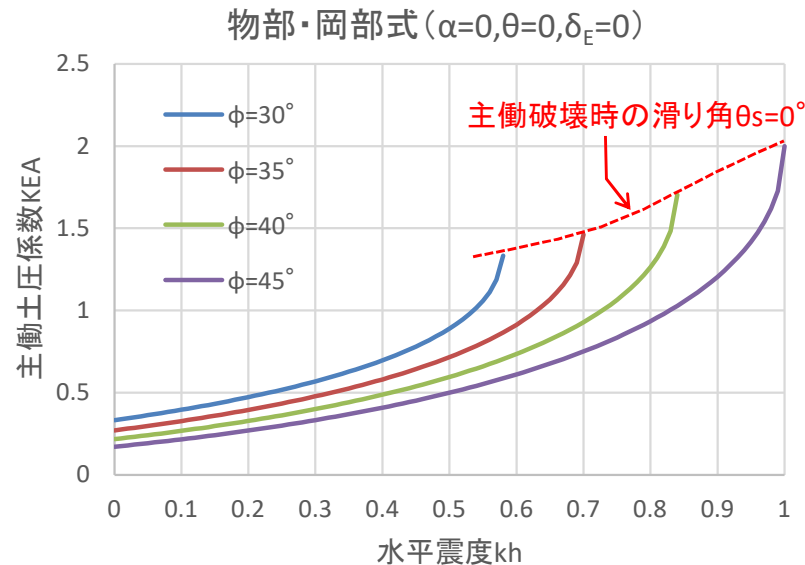
設計で用いる土圧理論の概説(その2)

—修正物部・岡部法—

日中構造研究所 松原勝己

物部・岡部式の問題点(1)

- 水平震度が大きくなると(地震合成角 $\theta_0 = \tan^{-1}k_h$ (k_h : 水平震度)がせん断抵抗角 ϕ に近づく)、主働土圧係数 K_{EA} が急激に大きくなる。($\theta_0 = \phi$ のとき、滑り角がゼロ)



物部・岡部式を用い、せん断抵抗角 ϕ をパラメータとし、水平震度を変えて主働土圧係数 K_{EA} を計算

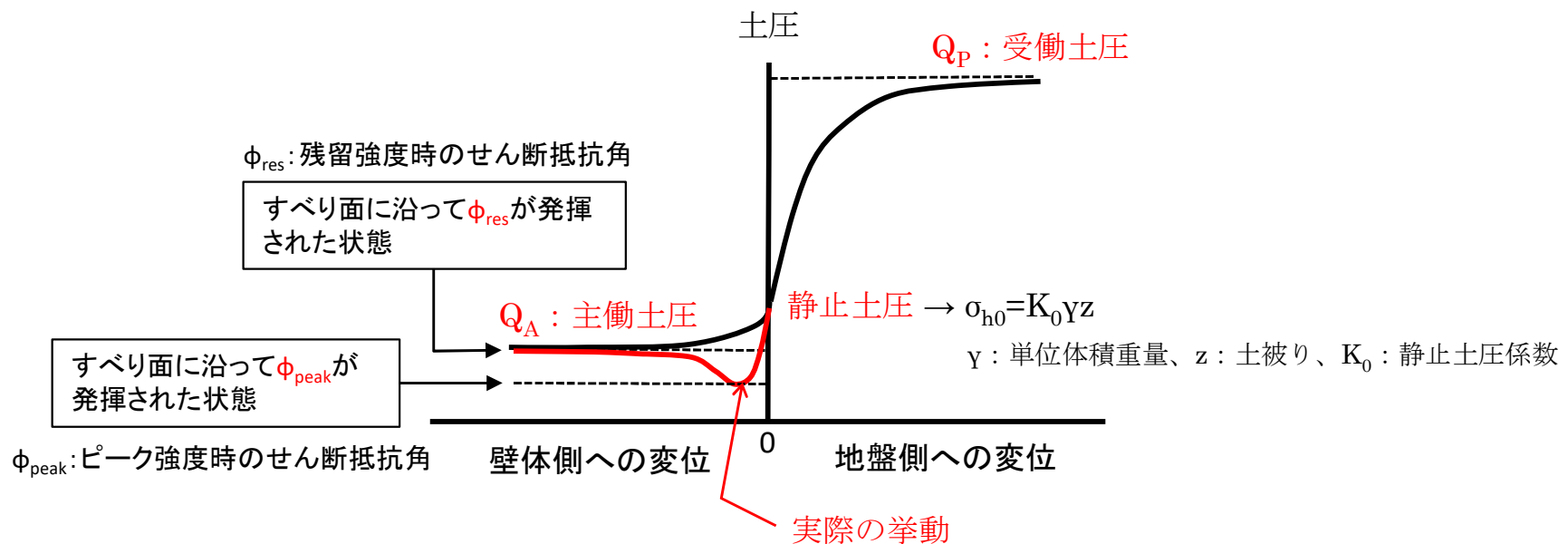
物部・岡部式による主働土圧係数 K_{EA}

$$K_{EA} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \theta_0)}{\cos \theta_0 \cos^2 \theta \cos(\theta + \delta_E + \theta_0) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta_E) \sin(\phi - \alpha - \theta_0)}{\cos(\theta + \delta_E + \theta_0) \cos(\theta - \alpha)}} \right\}^2}$$

- θ_0 : 地震合成角(自重と慣性力の合力の向きが鉛直方向となす角、水平震度を k_h として $\theta_0 = \tan^{-1}k_h$)
- ϕ : せん断抵抗角
- θ : 壁体の傾斜角
- δ_E : 壁体と盛土間の摩擦角
- α : 盛土表面の傾斜角

物部・岡部式の問題点(2)

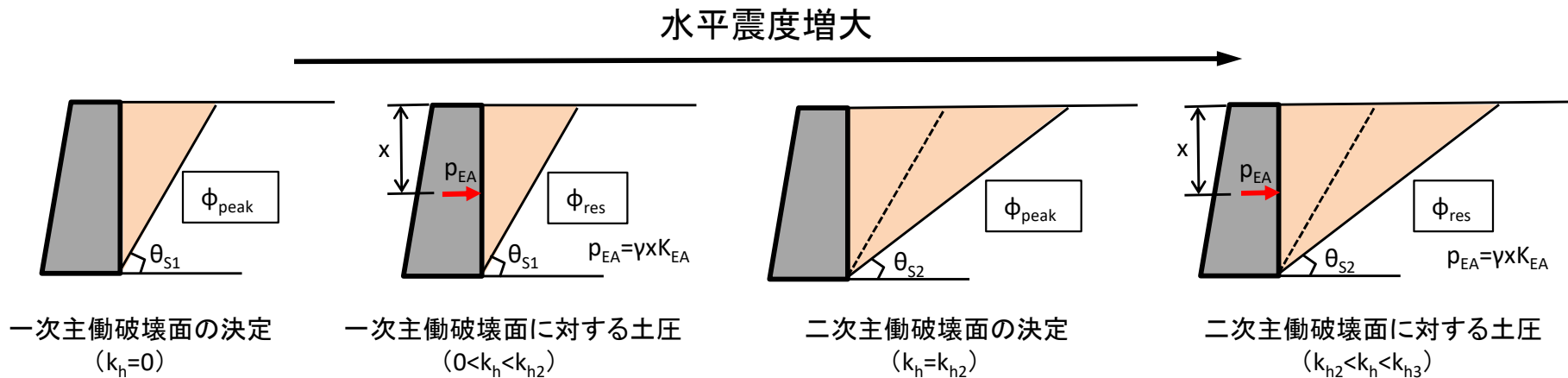
- 静止土圧から主働土圧に土圧が減少してゆく際に、実際の現象としてひずみ軟化が生じる。(せん断抵抗角にピーク強度時の値 ϕ_{peak} と残留強度時の値 ϕ_{res} の2種が存在する)



壁体変位と土圧の関係(龍岡・古関(2010)を修正)

修正物部・岡部法の考え方

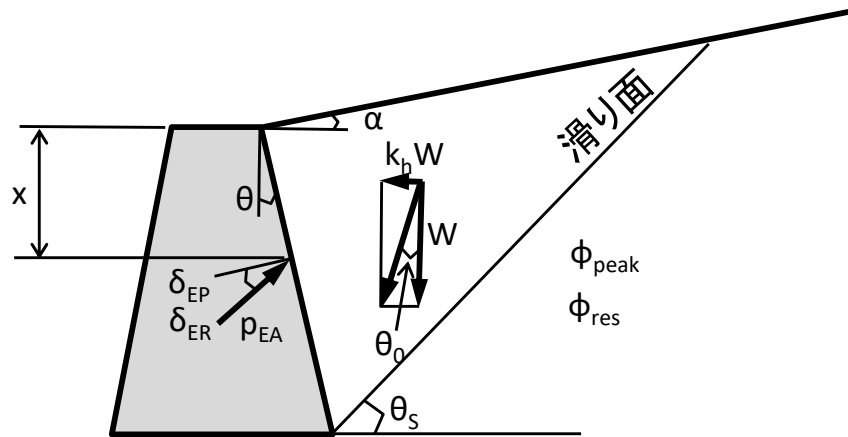
- 主働破壊面の発生は、**ピーク強度 ϕ_{peak}** で決定され、破壊面が発生した後、**残留強度 ϕ_{res}** まで低下する(実験に基づく知見)。
→滑り角 θ_s の決定は ϕ_{peak} を使用し、土圧の計算には ϕ_{res} を使用する。
- 複数の主働破壊面の発生を考慮**
→ある設計震度によって生じた主働破壊面のもとで、さらに設計震度が増大した場合に、新たな主働破壊面の発生を考慮して土圧を計算する。
- 滑り角 θ_s や主働土圧係数 K_{EA} の算出には、物部・岡部式で使用された諸式を用いる。



修正物部・岡部法(右城(2013)を修正)

修正物部・岡部法におけるパラメータ

● 諸元と強度値の条件



p_{EA} : 主働土圧強度 (kN/m^2) ($=\gamma x K_{EA}$)

γ : 土の単位体積重量 (kN/m^3)

x : 土圧強度を求める深さ (m)

K_{EA} : 主働土圧係数

W : 滑り土塊の重量

θ_0 : 地震合成角 ($=\tan^{-1}k_h$, k_h : 水平震度)

θ_s : 滑り角

ϕ_{peak} : 背面土のピーク強度時のせん断抵抗角 ($^\circ$)

ϕ_{res} : 背面土の残留強度時のせん断抵抗角 ($^\circ$)

α : 地表面と水平面のなす角 ($^\circ$)

θ : 壁背面と鉛直面とのなす角 ($^\circ$)

δ_{EP} : 壁背面と土との間の壁面摩擦角 (ϕ_{peak} 対応) ($^\circ$)

δ_{ER} : 壁背面と土との間の壁面摩擦角 (ϕ_{res} 対応) ($^\circ$)

道示・耐震編では、良質な材料で密に締め固められた背面土を前提として、以下のせん断抵抗角および壁面摩擦角が仮定される。

| 土質 | 強度 | ϕ_{peak} | ϕ_{res} | δ_{EP}, δ_{ER} | |
|--------|----|---------------|--------------|----------------------------|----------|
| | | | | コンクリートと土 | 土と土 |
| 砂及び砂れき | | 50° | 35° | 0 | $\phi/2$ |
| 砂質土 | | 45° | 30° | 0 | $\phi/2$ |

修正物部・岡部法の土圧計算手順(1)

●修正物部・岡部法の主働土圧係数の計算

(1) 諸元および強度の設定

- ①地表面の傾斜角 α
- ②壁体の傾斜角 θ
- ③壁体と地盤間の摩擦角(ϕ_{peak} 対応) δ_{EP}
- ④壁体と地盤間の摩擦角(ϕ_{res} 対応) δ_{ER}
- ⑤ピーク強度時の地盤の内部摩擦角 ϕ_{peak}
- ⑥残留強度時の地盤の内部摩擦角 ϕ_{res}

(2) 一次主働破壊時の滑り角 θ_{S1} の算出

- ・常時状態において**一次主働破壊面**が形成されていると仮定し、水平震度 $k_h=0$ とする。
- ・物部・岡部の主働滑り角の式を用いる。
- ・内部摩擦角に ϕ_{peak} を用いる。

$$\cot(\theta_{S1} - \alpha) = -\tan(\phi_{peak} + \delta_{EP} + \theta - \alpha) + \sec(\phi_{peak} + \delta_{EP} + \theta - \alpha) \sqrt{\frac{\cos(\theta + \delta_{EP}) \sin(\phi_{peak} + \delta_{EP})}{\cos(\theta - \alpha) \sin(\phi_{peak} - \alpha)}}$$

修正物部・岡部法の土圧計算手順(2)

●修正物部・岡部法の主働土圧係数の計算

(3) 二次主働破壊面が形成されるまでの主働土圧係数 K_{EA1} の算出

- ・一次主働破壊面の滑り角 θ_{S1} は変化しないとし、水平震度 k_h を増大させ、各水平震度 k_h に対する主働土圧係数 K_{EA1} を求める。
- ・一次主働破壊面が形成された後、破壊面上の強度が ϕ_{peak} から ϕ_{res} に変化することを考慮し、内部摩擦角として ϕ_{res} を用いる。
- ・主働土圧係数 K_{EA1} の計算には、物部・岡部式において滑り角を特定する前(極大値の算出を行う前)の式を使用する。

$$K_{EA1} = \frac{\cos(\theta_{S1} - \phi_{res})(1 + \tan \theta \tan \theta_{S1})(1 + \tan \theta \tan \alpha) \{ \tan(\theta_{S1} - \phi_{res}) + \tan \theta_0 \}}{\cos(\theta_{S1} - \phi_{res} - \theta - \delta_{ER})(\tan \theta_{S1} - \tan \alpha)}$$

震度に関係

$$\theta_0 = \tan^{-1} k_h$$

修正物部・岡部法の土圧計算手順(3)

●修正物部・岡部法の主働土圧係数の計算

(4) 二次主働破壊面が生じる水平震度 k_{h2} と滑り角 θ_{S2} の算出

- ・水平震度を増大させたとき、ピーク強度 ϕ_{peak} を用いた物部・岡部式の主働土圧係数 K_{EA2} が K_{EA1} を上回った時点を、新たな主働破壊面が生じたとし、これを二次主働破壊面とする。
- ・ K_{EA2} の計算には、物部・岡部式(極大値の算出を行った後の主働土圧係数)を用いる。
- ・ θ_{S2} の計算には、(2)と同様の物部・岡部の滑り角の式を用い、水平震度を k_{h2} とする。

$$K_{EA2} = \frac{\cos^2(\phi_{peak} - \theta_0 - \theta)}{\cos \theta_0 \cos^2 \theta \cos(\theta + \theta_0 + \delta_{ER}) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_{peak} + \delta_{ER}) \sin(\phi_{peak} - \alpha - \theta_0)}{\cos(\theta + \theta_0 + \delta_{ER}) \cos(\theta - \alpha)}} \right\}^2}$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} k_h$$

$$\cot(\theta_{S2} - \alpha) = -\tan(\phi_{peak} + \delta_{ER} + \theta - \alpha) + \sec(\phi_{peak} + \delta_{ER} + \theta - \alpha) \sqrt{\frac{\cos(\theta + \delta_{ER} + \theta_{02}) \sin(\phi_{peak} + \delta_{ER})}{\cos(\theta - \alpha) \sin(\phi_{peak} - \alpha - \theta_{02})}}$$

$$\theta_{02} = \tan^{-1} k_{h2}$$

修正物部・岡部法の土圧計算手順(4)

●修正物部・岡部法の主働土圧係数の計算

(5) 三次主働破壊面が形成されるまでの主働土圧係数 K_{EA1} の算出

- ・二次主働破壊面の滑り角 θ_{S2} は変化しないとし、水平震度 k_h を増大させ、各水平震度 k_h に対する主働土圧係数 K_{EA1} を求める。
- ・二次主働破壊面が形成された後、破壊面上の強度が ϕ_{peak} から ϕ_{res} に変化することを考慮し、内部摩擦角として ϕ_{res} を用いる。
- ・主働土圧係数 K_{EA1} の計算には、物部・岡部式において滑り角を特定する前(極大値の算出を行う前)の式を使用する。

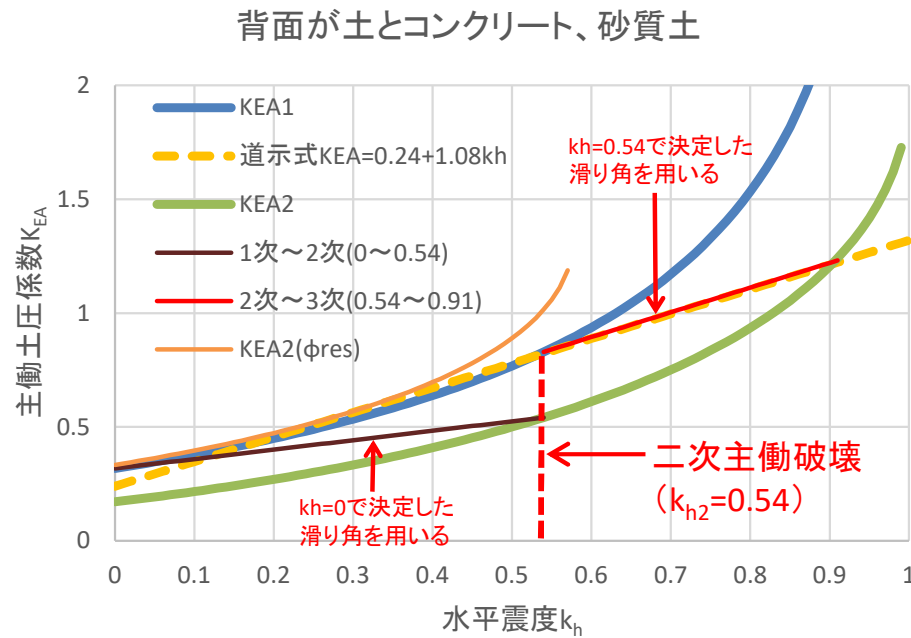
$$K_{EA1} = \frac{\cos(\theta_{S2} - \phi_{res})(1 + \tan \theta \tan \theta_{S2})(1 + \tan \theta \tan \alpha) \{ \tan(\theta_{S2} - \phi_{res}) + \tan \theta_0 \}}{\cos(\theta_{S2} - \phi_{res} - \theta - \delta_{ER})(\tan \theta_{S2} - \tan \alpha)}$$

震度に関係

$$\theta_0 = \tan^{-1} k_h$$

修正物部・岡部法による計算結果

●背面が土とコンクリート、裏込め材料が砂質土の場合の計算結果



条件: $\theta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$, $\delta_E=0^\circ$

K_{EA1} : ϕ_{peak} で決めた滑り角 θ_s に対し ϕ_{res} で計算した K_{EA}
 (水平震度 k_h により滑り角 θ_s は異なる)

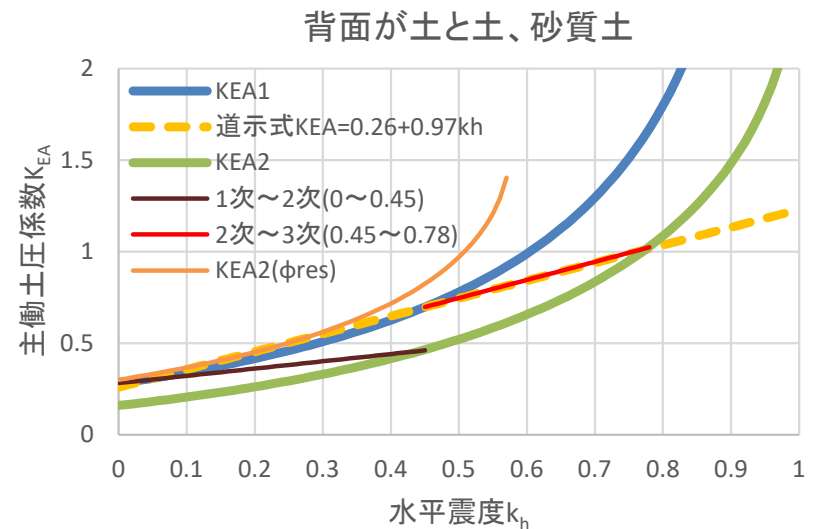
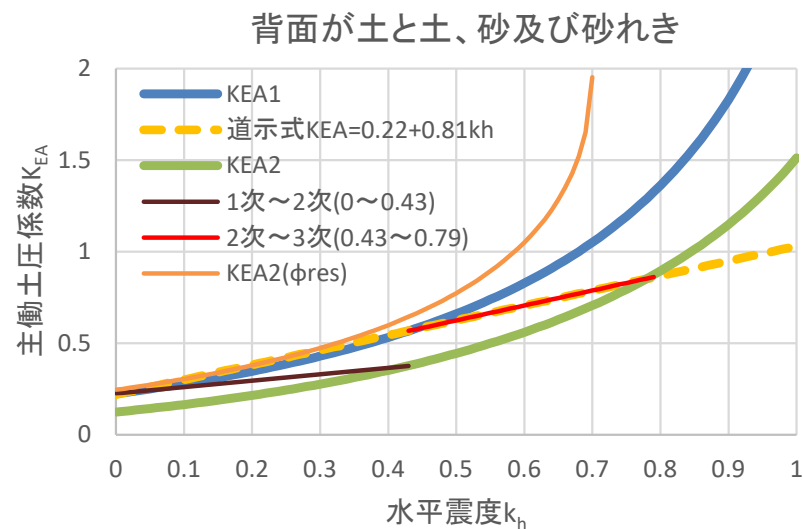
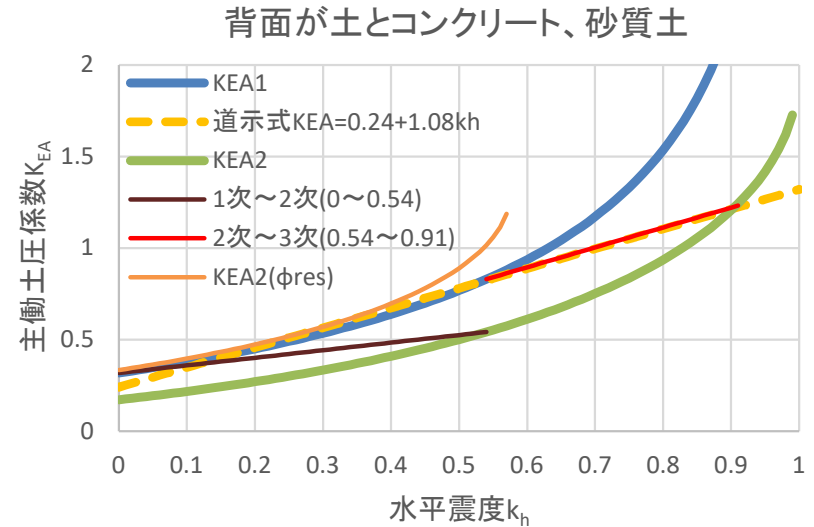
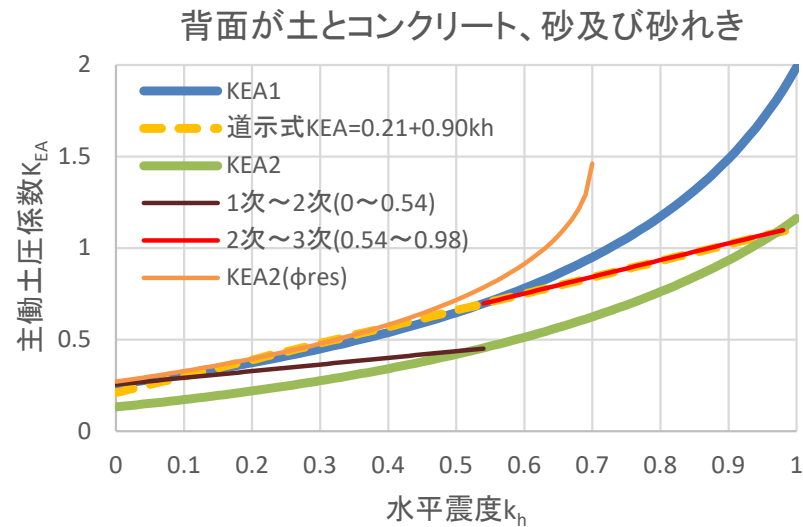
K_{EA2} : ϕ_{peak} で計算した物部・岡部式の K_{EA}

$K_{EA2}(\phi_{res})$: ϕ_{res} で計算した物部・岡部式の K_{EA}

- ・修正物部・岡部法の K_{EA} は、 K_{EA1} と K_{EA2} の中間の値
- ・修正物部・岡部法では、主働破壊後の水平震度に対する K_{EA} の変化が直線的
- ・二次主働破壊時に、 K_{EA} の値が不連続的に変化
- ・道示式では、二次から三次までの K_{EA} の値を水平震度の小さい方へも延長して適用

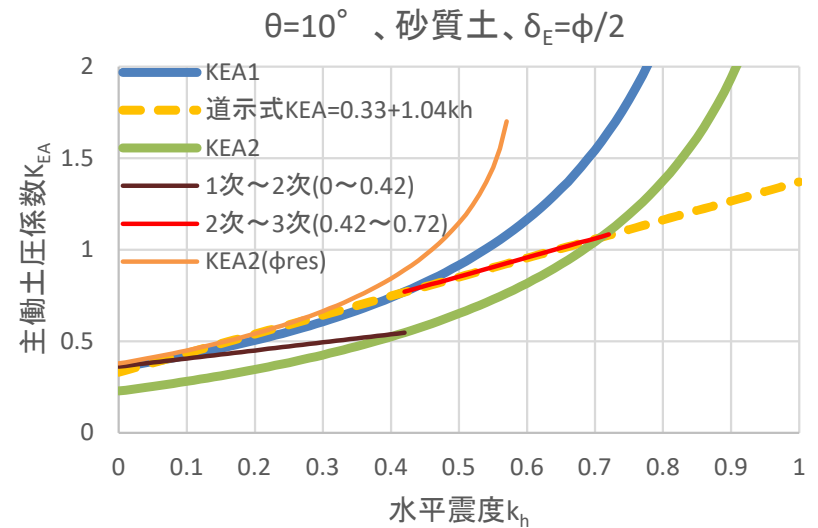
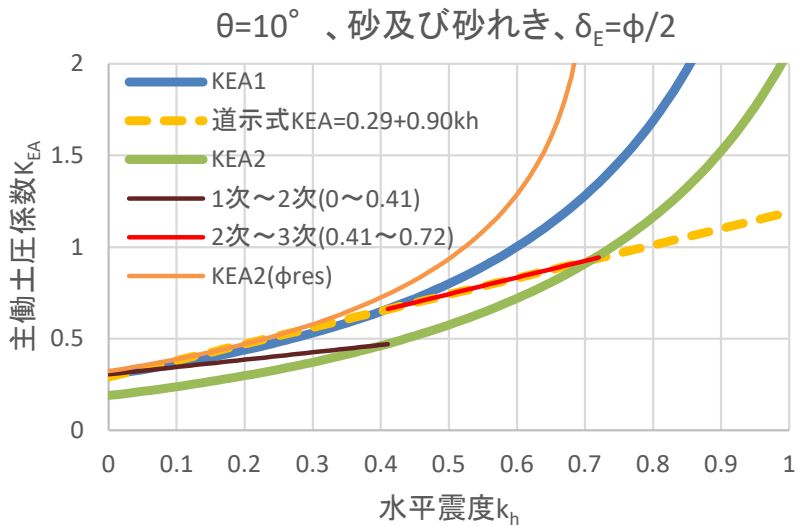
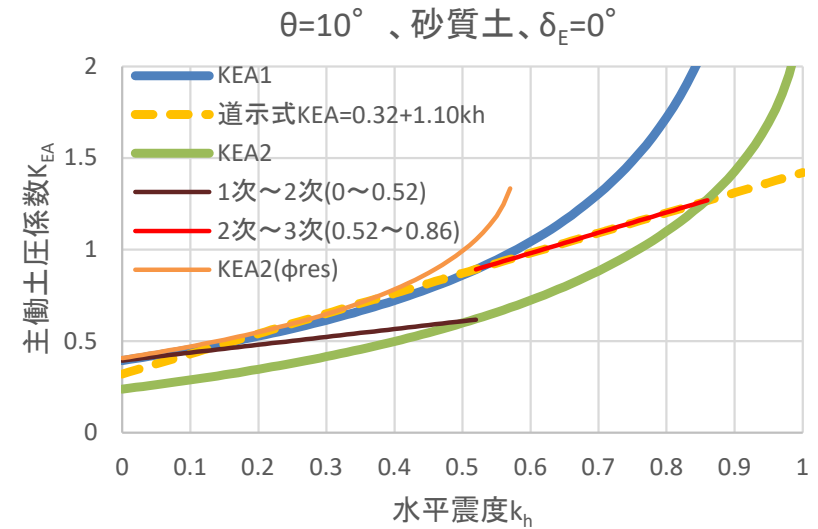
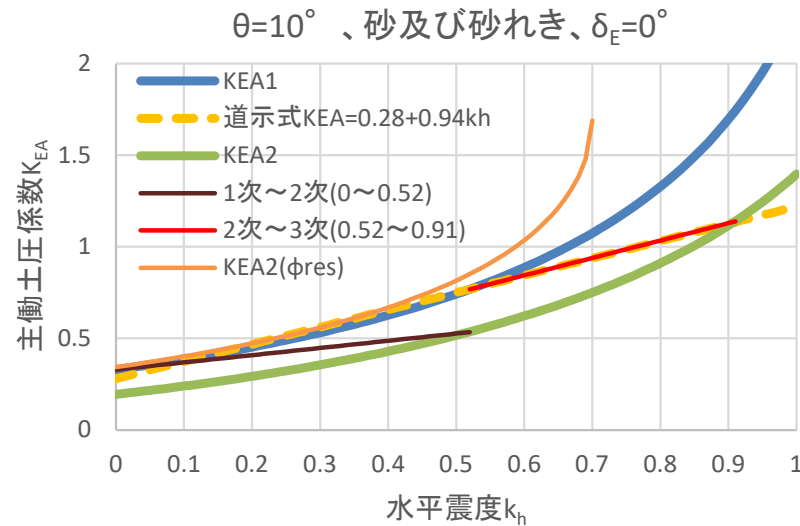
修正物部・岡部法による計算例(1)

●壁背面が鉛直の場合($\theta=0^\circ$)



修正物部・岡部法による計算例(2)

●壁背面に傾斜がある場合($\theta=10^\circ$)



参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会(2012):道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成24年3月
- 2) 龍岡文夫、古関潤一(2010):初級講座 この式どうやってできたの? どう使うの? 第6回地震時土圧(その2)、基礎工、2010年3月
- 3) 右城猛(2013):擁壁の設計法と計算例、第3章土圧、理工図書