

## 補強土壁の補強領域のせん断ひずみと壁面材の回転変位の関係の定式化

国立研究開発法人土木研究所 正会員○澤松俊寿 小出央人 青山翔吾 須田悠尽

## 1. はじめに

補強土壁は、その補強の機構から一定の変位・変形を伴いながら安定する。既往の地震災害ではほとんどが変状が無い又は軽微であるが、過度なはらみだし等の変状は構造的な安定を損なうことにつながるため、地震後の点検等において適切に健全性を診断できるようにしていく必要がある。このような課題に対し Izawa and Kuwano<sup>1)</sup>によって、遠心傾斜台模型実験に基づいて疑似静的水平荷重を受ける補強土壁にすべり線が発生し破壊に至るときの下部壁面の傾きと、盛土材の三軸圧縮試験から得られる軸差応力最大時の最大せん断ひずみの関係が検討されている。筆者らはこのような考え方を参考に補強土壁の健全性評価手法に関する研究を行ってきた<sup>2)</sup>。本報では、そのうち補強領域を通るすべりによって壁面がはらみだす形態の変状について、補強領域の盛土材のひずみを壁面材の回転変位に変換する手法について報告する。具体的には、自立式山留擁壁を対象に定式化された裏込め土のひずみと壁面の回転変位の関係<sup>3)</sup>を補強土壁に拡張し、補強領域のひずみと壁面材の回転変位の関係を定式化した。

## 2. すべりが生じる補強土壁の変状の形態

すべりが生じる補強土壁の変状の形態を概説する。図1は、既往の動的遠心模型実験の結果<sup>2)</sup>について、補強領域にせん断層(以下「すべり線」という。)が確認された時点の最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ 分布及びすべり線の位置を示したものである。荒木ら<sup>4)</sup>によれば、地震時に補強土壁の補強領域に生じる変形はIせん断変形、II伸長変形及びIIIすべり変形によって構成され、このうちIIの割合はごく小さく特に変形の初期にはIが主体であるが、いったんすべりが生じるとIIIが優勢となる。すべり線の形態としては、適正な間隔によって補強材を配置し抵抗力を確保した場合には、補強領域の背面のすべり(図1中の青破線)と下段の補強材をまたいで補強領域を通るすべり(図1中の青実線)が生じる。いわゆる2楔形のすべりである。外形上は天端の沈下のほか壁面のはらみだしが生じる。このときの壁面材の回転変位は、既往の実験結果によれば<sup>1),2),4)</sup>下段の壁面材ほど大きい傾向にある。

## 3. 自立式山留擁壁の裏込め土のひずみと壁面の回転変位の関係

Bransby and Milligan<sup>3)</sup>は、自立式山留め擁壁が変形した際の裏込め土のひずみを予測するために、壁面の回転変位と裏込め土の最大せん断ひずみの関係の理論解を導出した。理論解の導出において、自立式山留壁の模型実験の結果に基づき図2の可容速度場(以下、単に「速度場」という。)が仮定されている。この速度場では、ランキンの主働領域内の主応力の方向と一致するように主応力増分の方向が鉛直と仮定されている。したがって、速度場のひずみの特性曲線( $\alpha$ 線、 $\beta$ 線)は、鉛直とそれぞれ $45^\circ - v/2$ の角度をなす。ダイレイタンシー角 $v$ の値はこの速度場において一定で、線分ABの下側の地盤は剛と仮定されている。このように仮定された速度場によって、壁面の回転変位 $\theta$ と裏込め土の最大せん断ひずみ増分 $\delta\gamma_{max}$ の関係が、次式のように示されている。なお、ひずみ場の理論については文献5)に詳しい。

$$\delta\gamma_{max} = 2\theta \sec v \quad (1)$$

## 4. 補強土壁の補強領域のひずみと壁面材回転変位の関係の定式化

上記の考え方を補強土壁の補強領域に拡張する。補強領域の速度場は、遠心模型実験で観察された補強領域を通るすべり線及びZero-extension lineの方向(せん断ひずみしか生じない方向)を参考に図3(a)のように仮定した。すなわち、 $\beta$ 特性曲線の方向はすべり線の方向(水平から $\alpha_F$ だけ回転した方向)、 $\alpha$ 特

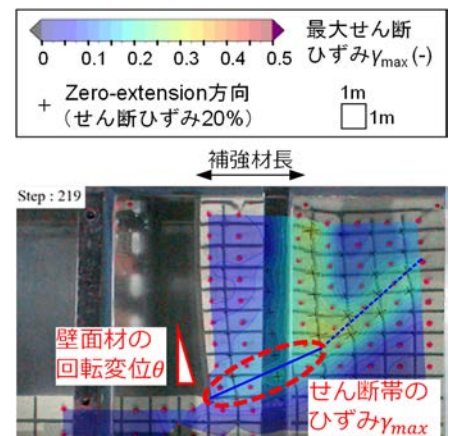


図1 最大せん断ひずみコンター図(補強領域にすべり線が確認された時点)

$V$ : 全速度

$V_\alpha, V_\beta$ : Zero-extension lineの方向に沿った速度成分

$v$ : ダイレイタンシー角

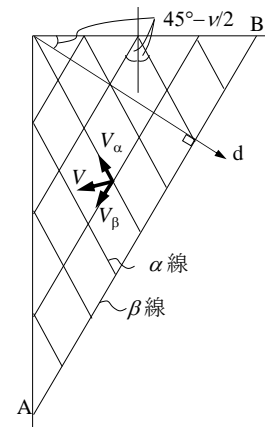


図2 自立式山留め擁壁の速度場<sup>3)</sup>

キーワード 補強土壁, すべり, はらみだし, 健全度評価, 壁面材の回転変位  
連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 TEL 029-879-6759

性曲線の方向は $\beta$  特性曲線から $90^\circ - \nu$  回転した方向である。次に、仮定した速度場における盛土材の最大せん断ひずみ増分 $\delta\gamma_{xy}$ を算出する。図3(b)に示すように、鉛直距離 $\delta H$ の間隔を持つ2つの $\beta$ 特性曲線 EF 及び CD 間の領域を考える。壁面が $\theta$  だけ回転変位していることから E 点に対する C 点の速度は $\delta V$ となる。フロントブロック内の領域では速度 $V$ の方向は $\alpha$ 特性曲線 (CE はその中の1つ) に直交することから、 $x$  軸及び $y$  軸に関して領域 CDFE のひずみは次式で与えられる。

$$\delta\varepsilon_x = 0 \quad (2), \quad \delta\varepsilon_y = -\frac{\delta V \sin \nu}{\delta H \cos \alpha_F} \quad (3), \quad \delta\gamma_{xy} = \frac{\delta V \cos \nu}{\delta H \cos \alpha_F} \quad (4)$$

$\theta$ が微小な場合には、次式が成立する。

$$\theta \approx \frac{\delta V}{\delta H} \cos(\alpha_F - \nu) \quad (5)$$

式(5)より、式(3)及び(4)はそれぞれ式(6)及び(7)のように表すことができる。

$$\delta\varepsilon_y = -\frac{\sin \nu}{\cos \alpha_F \cos(\alpha_F - \nu)} \theta \quad (6), \quad \delta\gamma_{xy} = \frac{\cos \nu}{\cos \alpha_F \cos(\alpha_F - \nu)} \theta \quad (7)$$

ここで、モールのひずみ円によれば、最大せん断ひずみ増分 (工学ひずみ)  $\delta\gamma_{\max}$  は次式で表される。

$$\delta\gamma_{\max} = \delta\varepsilon_1 - \delta\varepsilon_3 \quad (8a)$$

$$\delta\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\delta\varepsilon_x + \delta\varepsilon_y) + \sqrt{\frac{1}{4}(\delta\varepsilon_x - \delta\varepsilon_y)^2 + \left(\frac{\delta\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (8b)$$

$$\delta\varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\delta\varepsilon_x + \delta\varepsilon_y) - \sqrt{\frac{1}{4}(\delta\varepsilon_x - \delta\varepsilon_y)^2 + \left(\frac{\delta\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (8c)$$

式(2)、(6)、(7)を式(8)に代入すれば、最大せん断ひずみ増分 $\delta\gamma_{\max}$ が与えられる。

$$\delta\gamma_{\max} = \frac{1}{\cos \alpha \cos(\alpha - \nu)} \theta \quad (9)$$

ゆえに、壁面材の回転変位 $\theta$ と盛土材の最大せん断ひずみ増分 $\delta\gamma_{\max}$ の関係を、式(10a)のように定義したときの係数 $C_1$ は式(10b)のとおりである。

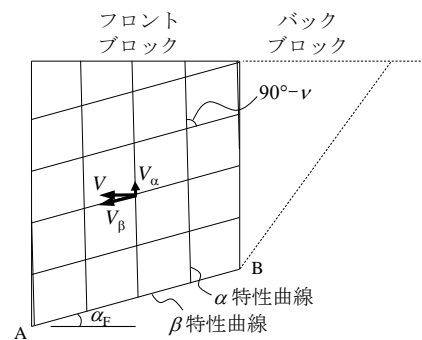
$$\theta = C_1 \delta\gamma_{\max} \quad (10a), \quad C_1 = \cos \alpha_F \cos(\alpha_F - \nu) \quad (10b)$$

$C_1$ はその物理的な意味からは、仮定された速度場 (破壊メカニズム) において、外形上の変位 (壁面材の回転変位) と内部の変形 (盛土材の最大せん断ひずみ) を関連付ける係数である。図3(a)から、特性曲線の方向は変形中において一定と仮定しているため、最大せん断ひずみ増分 $\delta\gamma_{\max}$ の総和として得られる最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ は、回転変位の総和つまり鉛直に対する壁の角度により定まる。式(10b)から得られる $C_1$ を幅広い範囲の $\alpha_F$ に対して描けば図4のようになる。図には、動的遠心模型実験の結果<sup>2)</sup>について、式(10a)の定義により壁面材の回転変位 $\theta$ を画像解析で求めた最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ で除して求めた $C_1$ を併記しているが、理論解である式(10b)と比較的よく対応している。

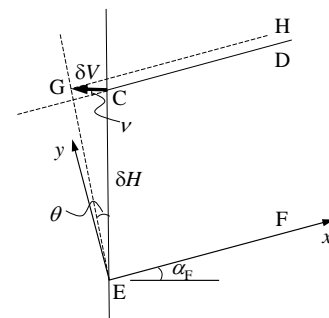
## 5. まとめ

補強土壁の動的遠心模型実験から確認された破壊メカニズムに基づいて速度場を設定し、補強領域の最大せん断ひずみと壁面材の回転変位の関係を定式化 (理論解) した。理論解は、動的遠心模型実験の結果と比較的よく対応した。今後は、補強土壁がすべりに対して限界となる状態を明らかにし、これを定量的に評価できるモデルを検討する予定である。

**参考文献** 1)Izawa and Kuwano: Evaluation of extent of damage to geogrid reinforced soil walls subjected to earthquakes, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.51, No.5, pp.945-958, 2011. 2)澤松ほか: 補強土壁のすべりの限界状態に関する動的遠心模型実験, 第56回地盤工学研究発表会, 2021. 3)Bransby and Milligan: Soil deformations near cantilever sheet pile walls, geotechnique, Vol. 25, No.2, pp. 175-195, 1975. 4)荒木ほか: 補強土壁の動的遠心模型実験を対象とした補強領域内におけるひずみの定量化と分析, ジオシンセティックス論文集, 第29巻, pp.127-134, 2014. 4)龍岡ほか: 鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内実験[III]—補強材の長さの影響—, 生産研究, 36巻, 11号, pp.13-16, 1984.11



(a) 仮定した速度場



(b)  $\alpha$  特性曲線と $\beta$ 特性曲線により分割される1つの要素の速度場

図3 補強土壁の補強領域 (フロントブロック) の速度場

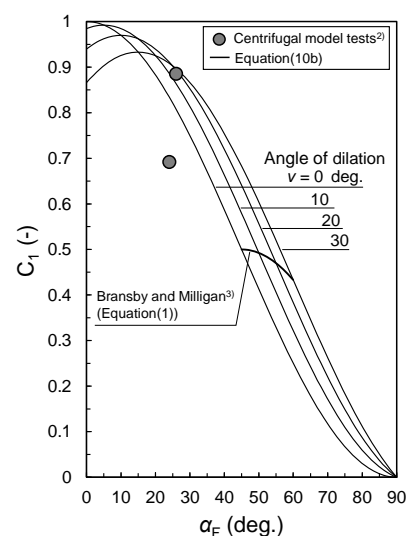


図4  $\alpha_F$ と $C_1$ の関係