

弾塑性法における双曲線型の非線形地盤バネモデルに関する検討

鉄道総合技術研究所 正会員 小島 謙一 松丸 貴樹
 複合技術研究所 正会員 ○矢崎 澄雄

1. はじめに

鉄道を支持した構造物の近傍や重要構造物に近接した箇所などで土留め工を適用するには、安定や変形を精度良く評価することが非常に必要となる。現在、土留め工の設計においては一般的に弾塑性法¹⁾が適用されており、比較的簡易に変形量を求めることができる。しかし、現行設計では地盤バネにバイリニア型のバネを用いていることから、変形の小さな領域の変位の予測では誤差が大きく近接施工時の予測や経済性において重要な課題となっている。そこで、土留め工の変位予測の精度向上を目的に新しい非線形バネを提案し、比較的小さな変形段階から精度良く変形を予測する手法を検討した。

2. 解析に用いる構成モデル

(1) 新しい非線形バネの提案 土の変形係数 E はひずみ ε に応じて大きく変化する。このような土の非線形挙動を再現するモデルは様々なモデルが提案されているが、設計への導入を前提として、用いるパラメータが比較的少なく、また適用実績も多い Kondner²⁾が提案した双曲線モデルを基本とした。モデルの概要を図1に、 E - ε の関係を次式に示す。

$$\frac{E}{E_{ini}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}\right)^2} \quad (1)$$

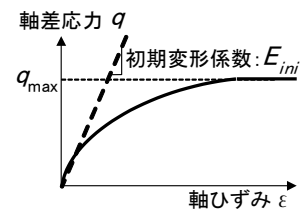


図1 双曲線モデル

ここに、 E_{ini} は初期変形係数、 ε_r は基準ひずみ ($\varepsilon_r = q_{max} / E_{ini}$) である。

(2) 初期の変形係数の設定 式(1)における初期変形係数 E_{ini} は変形初期における接線剛性である。ただし、掘削工事においては種々の施工の乱れなどの影響が少なからずあることから、設計に適用する初期変形係数は掘削工事における実測データ等を基にした検討を行った。図2は既往の文献をもとにまとめた実際の掘削現場から得られた変形から基に逆算した変形係数である³⁾。この結果から、掘削現場の実測から求めた変形係数はPS検層の0.2~0.5倍、N値の2~6倍となることが示され、ひずみレベルで示すと概ね $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度に相当する変形係数であることがわかった。

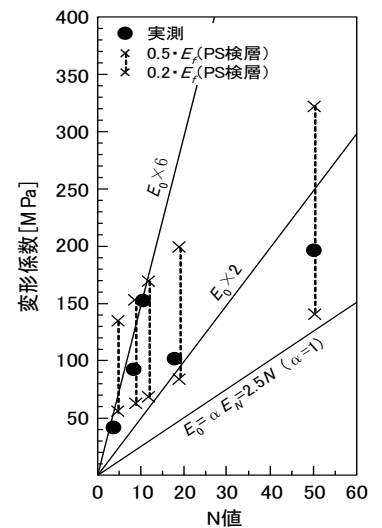


図2 掘削における変形係数 (文献3) を加筆修正)

(3) 双曲線モデルにおけるパラメータ設定 双曲線モデルの妥当性と初期変形係数の評価を行うために三軸圧縮試験結果の解析を実施した。実験で得られたひずみと変形係数 E の関係と、初期変形係数を N 値から求めた E_0 を 2~6 倍に変えた双曲線モデルによる変形係数-ひずみ関係の結果の例を図3に示す。微小ひずみレベルでは若干異なるが、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度より大きなひずみレベルでは、N 値から求めた E_0 の 2 倍程度において実験データと良く整合している。よって、ひずみレベル $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度において、初期変形係数を E_0 の 2 倍程度とした双曲線モデルの適用性が示された。

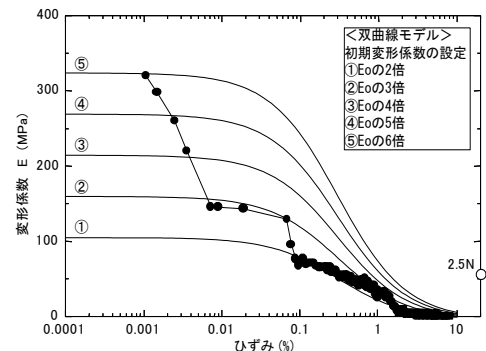


図3 双曲線モデルによる解析例

(4) 設計に用いる提案バネモデル 式(1)を基に非線形バネを掘削土留め工の設計に導入するために、地盤バネ K と土留めの変位 u の関係式

を提案した。その概要を図4に、双曲線モデルによる地盤バネ K と土留めの変位 u の関係式を次に示す。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{u}{u_r}\right)^2} \quad (2)$$

ここで K_0 は初期のバネ値であり、 u_r は基準変位 ($u > 0$ で $u_r = (P_p - P_0)/K_0$, $u < 0$ で $u_r = (P_a - P_0)/K_0$) である。また、 K_0 算定のための変形係数 E は現場の状況を鑑み、 $10^4 \sim 10^2$ のひずみレベルのものを適用することとする。N 値から求めた E_0 から決定する場合には前述の結果から2倍程度したものが適切であると考えられる。

3. 非線形バネを用いた設計例

土留め壁の掘削に伴う計測が実施された現場データ（掘削土留め工の土留め構造諸元、地盤情報、土留壁変形データ）を既往の文献調査により収集し、特に土留め壁の変位に着目して提案バネモデルと用いた試算と実測変位とを比較し、双曲線モデルの適用性について検討した⁴⁾。

掘削初期における土留め壁の変位の実測値とバイリニア型の変位を用いて計算した時の変位、および双曲線モデル（初期変形係数 $E_0 \times 2$ ）を用いて計算した土留め壁の変位の比較の例を図5に示す。また、図6に各現場の実測変位量を1.0とした場合の、バイリニアモデルによる変位および双曲線モデルによる変位の比較を示す。図5では双曲線モデルは非常に実測変位に整合していることがわかる。また、図6のいずれのケースもバイリニアモデルの計算結果により、双曲線モデルの方が実測変位に整合している。よって本モデルを適用することで、より精度の高い変位予測が可能であることがわかった。

5. まとめ

仮土留め工の設計における変形の評価の精度向上を目的として、地盤バネとして非線形バネモデルを提案し、現行設計である弾塑性法へ導入した。非線形な地盤バネモデルとしては双曲線モデルを適用し、土の非線形挙動を再現し、かつ設計法として必要な簡略性についても具備した。弾塑性法に非線形バネを適用することにより、設計時における変形予測が向上し、仮設構造物の合理化や近接施工に対する評価の適正化などが期待される。本モデルでは初期変形係数の設定が重要となる。現場の地盤情報についてN値しかない場合には本論文で示すように概ね2倍の E_0 をとすることとしたが、詳細な試験結果がある場合はそれを基本にすることが望ましい。また逆に非常に複雑な地盤の場合には適用できないこともあることから適用にあたっては注意されたい。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・解説 開削トンネル，丸善，2001. 2) Kondner R.L.: Hyperbolic Stress-Strain Response-Cohesive Soil, Jour. Of the SMV Div., ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp.115~143, 1963. 3) 寺田賢二・福井史朗・真島正人・玉置克之：地盤材料の小ひずみでの非線形特性と地盤変形問題への適用 6.ケースヒストリー（その3），土と基礎，Vol.45, No.11, pp. 49~54, 1999. 4) 山田康裕，矢崎澄雄，小島謙一，松丸貴樹，桐生郷史：地盤の非線形性を考慮した弾塑性計算の実設計への適用性に関する検討，第41回地盤工学研究発表会，2006.

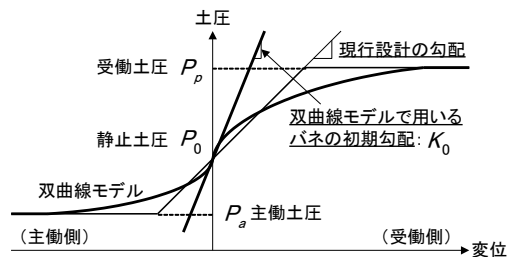


図4 提案モデルの概要

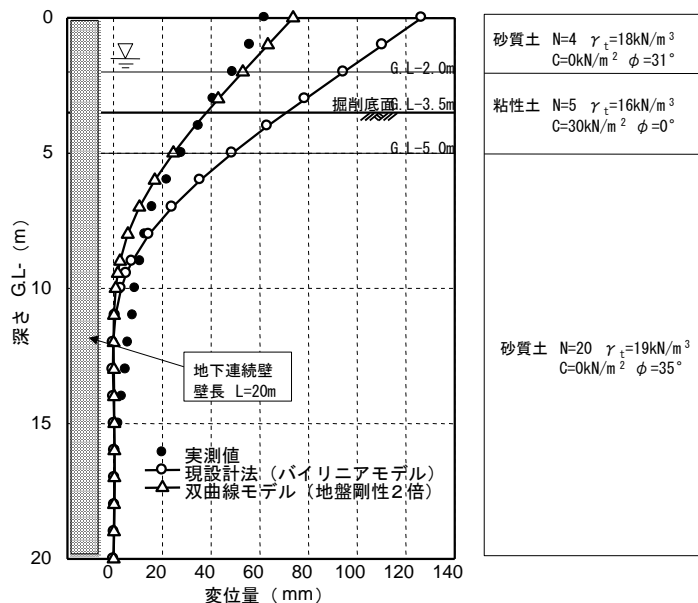


図5 各地盤バネによる計算値と実測値の比較例

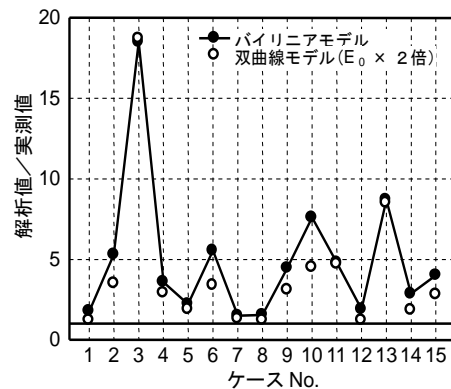


図6 各ケースの解析値の比較