

原位置せん断試験とそのシミュレーションによる礫地盤の挙動に関する考察

中部電力(株) 電力技術研究所	正会員	○河村精一、上田 稔
長岡技術科学大学	正会員	大塚 悟
(株)シーテック 技術コンサルタント部	正会員	鈴木 隆

1 はじめに

礫地盤に超高压送電用鉄塔の深礎基礎を建設する場合、その引揚げ支持力の算定手法を合理化し、基礎をコンパクト化することで建設コストダウンをすることが強く要請されている。そこで、引揚げ支持力算定に資することを目的に、鉄塔建設ルートに現れる代表的な礫地盤において原位置せん断試験を行い、この数値シミュレーションを行った。本論文では、その結果を紹介し、試験時の礫地盤の挙動を考察する。

2 原位置せん断試験

(1) 試験概要

試験は、図-1に示すように上部が直径約3.6m、下部が直径約2.6mの立坑を掘り、下部の立坑壁面に対し長さ1mのコンクリート製リング(以降、载荷体と呼ぶ)を作成し、これをジャッキ10台で押し上げて壁面付近の礫地盤をせん断する形をとった。試験部の立坑直径は深礎基礎で用いる径とほぼ同じであり、掘削面は実際の基礎掘削と同様の方法で作成した。上部と下部の直径が異なるのは、長さ1mの载荷体で破壊する領域を限定すること及び土被り効果を減らすことで、得られるせん断抵抗が安全側評価となりやすいようにしている。なお、载荷体設置深さは、深礎基礎設計でせん断抵抗を考慮する一般的深度のうち最も浅い位置である。これは、深礎基礎に作用する水平荷重のために地表面近くの礫地盤が塑性化することを考慮して定めるものである。また、せん断する礫地盤の直交4方向に、塩ビパイプにゲージを貼り付けたもの(以下、パイプゲージと呼ぶ。図-1参照)を挿入し、応力の伝播状態と破壊の進展状況を確認できるようにした。载荷方法は、地盤工学会基準<sup>1)</sup>を参考に1方向多サイクル方式で行った。

(2) 試験位置の礫地盤状況

対象は、第四紀洪積世の玉石混り礫層で、試験位置付近は礫径φ5~50mm、最大φ80mm混入率70~80%、亜円礫主体で礫種は硬質な泥質砂岩、頁岩、チャートである。玉石は切径φ100~180mm程度で混入率は10~20%である。N値は礫や玉石の影響もあり50以上である。なお、地下水は無い。

(3) 試験結果

荷重~変位関係を図-2に示す。変位は、コンクリート製リング上下端面各々直交4方向で計測された変位の平均である。荷重~変位曲線の両対数グラフ上の折れ点から、降伏荷重は $P_y = 1,870 \text{ kN}$ 、降伏変位は $\delta_y = 10.3 \text{ mm}$ である。また、パイプゲージの計測結果の代表的なものを図-3に示す。降伏荷重以降(図中白ヌキ)でパイプの変形モードに変化が出ており、礫地盤内にせん断破壊と思われる比較的大きな動きが発生していることがわかる。これが立坑上下部間の径変化部にある小段外縁に向けて発生したことを目視で確認した。また、この小段とリング本体上端の変位計測結果から、载荷体と礫地盤間ですべりが生じていないことも確認している。全体挙動としては、降伏点以降も十分支持力があるはずみ硬化型の挙動であり、残留強度もピーク強度の約85%程度ある。

3 非線形弾性FEMによる数値シミュレーション

(1) 解析方法

混合法による非線形弾性有限要素法を用いた。応力~ひずみ関係は、礫地盤の特徴である拘束圧やひずみ依存性を考慮するためダンカン・チャンモデルを用いた。また、要素の引張破壊は、その荷重ステップで引張主応力方向の剛性を落とし、引張応力がなくなるまで再配分を行っている。せん断破壊は、次の荷重ステップで両主応力方向の剛性を落とす方法を用いており、ピーク強度の応力を保ったままとなっている。

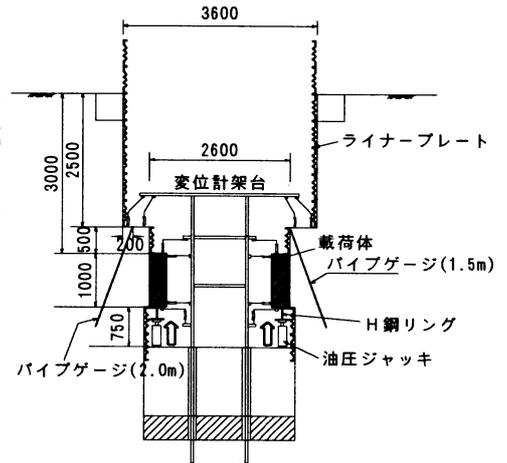


図-1 試験概要

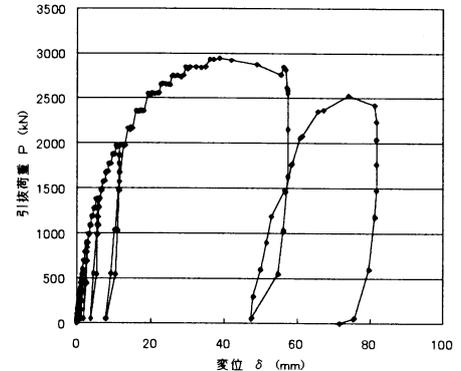


図-2 荷重~変位関係

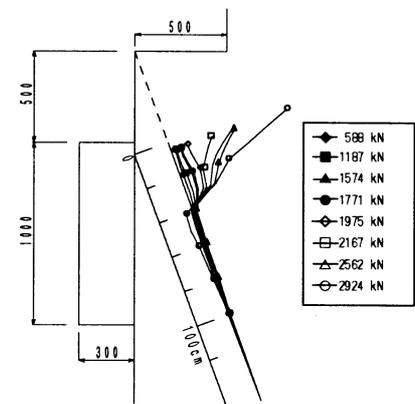


図-3 パイプゲージの計測結果

キーワード: 礫, 原位置試験, 支持力, ダイレイタンスー, 剛塑性有限要素法

〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山20-1 中部電力(株)電力技術研究所土木建築G構築T Tel 052-621-6101

(2) 解析条件

図-4に示す軸対象条件で行った。地盤の初期応力は、 $K_0 = 0.8$ の自重解析後、掘削解析を行って設定した。ダンカン・チャンモデルのパラメータ及び強度特性は、図-6に示す原位置せん断試験位置付近の礫（攪乱試料）を用いた大型三軸圧縮試験（ $\phi 300\text{mm} \times h 600\text{mm}$ ）の結果を考慮して表-1のように設定した。

(3) 解析結果と考察

試験ならびに解析の結果を図-5に示す。解析結果はかなり過小評価となった。これは、図-6に示す大型三軸圧縮試験の軸ひずみ～体積ひずみ関係からわかるように、礫のダイレイタンス特性、特にピーク強度付近でも大きな体積膨張を起こしていることが解析に反映されていないことによるものと考えられる。原位置せん断試験において礫地盤がせん断を受けると、ダイレイタンスによって体積膨張を起こすが、載荷体が体積膨張を制限するために地盤の拘束圧は上昇し地盤のせん断強度が増加する。これをシミュレーションするためにはダイレイタンス特性を考慮する必要があり、この特性を比較的簡単に取り入れることが可能で解析結果の解釈のしやすさも念頭に剛塑性FEMで以下検討した。

4 剛塑性FEMによる数値シミュレーション

(1) 解析方法及び条件

Drucker-Prager の降伏関数に非関連流れ則を適用した構成関係を有する剛塑性FEM<sup>2)</sup>によった。解析モデルは非線形弾性FEMと同じ図-4を用いた。入力物性は、大型三軸圧縮試験の結果を考慮し内部摩擦角 $\phi$ とダイレイタンス角 $\phi_d$ に着目して、 $\phi = 40^\circ$ 、 $\phi_d = 12^\circ$ と設定した。そして、原位置せん断試験を礫地盤として考えられる物性範囲でパラメトリック・スタディにより解析・考察した。

(2) 解析結果と考察

解析結果の例を表-2に示す。また、解析結果の破壊モードの例を図-7に示す。破壊モードは特に $\phi_d$ に依存しており、試験結果（図-3）を説明するためには $\phi_d = 10^\circ$ 以下であった。礫地盤として考えられる $\phi$ の範囲を勘案して $\phi = 40^\circ$ 、 $\phi_d = 7^\circ$ の定数を用いると、極限支持力・破壊モードともに概ね試験結果を説明できた。以上から、非線形弾性FEM解析の場合に考慮できなかったせん断に伴うダイレイタンス特性を考慮した解析が必要であることがわかる。

5 まとめ

礫地盤における深礎基礎引揚げ支持力検討に資するため行った原位置せん断試験結果とそのシミュレーション解析の考察から、礫地盤のダイレイタンス特性を十分反映させた設計を行わないと、引揚げ支持力を過小評価することがわかった。最後に、原位置せん断試験とその結果の整理に関して、(株)白石の野沢稔治氏、池田貴之氏に謝意を表します。

参考文献 1) 地盤工学会：杭の引抜き試験方法・同解説  
 2) Tamura, T.: Rigid-Plastic Finite Element Method in Geotechnical Engineering, Computational Plasticity, Current Japanese Material Research, vol. 7, Elsevier, pp.135-164, 1990.

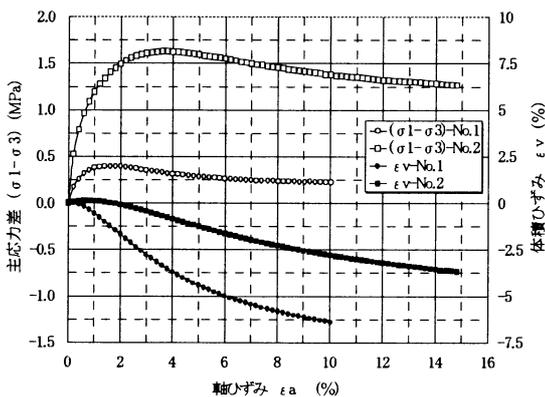


図-6 大型三軸圧縮試験結果

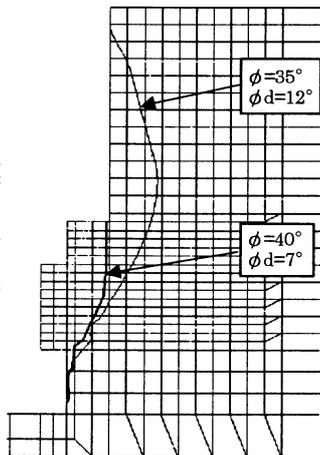


図-7 破壊モード

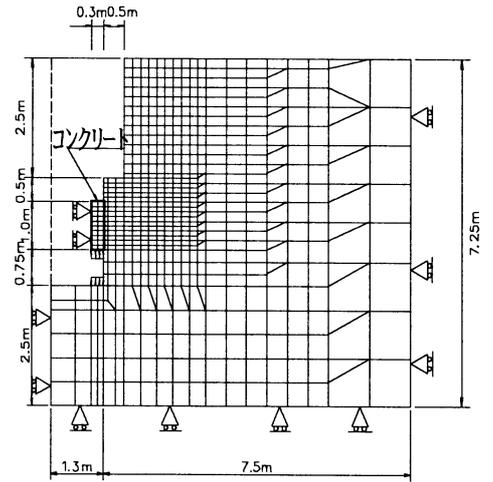


図-4 解析モデル

表-1 非線形FEM解析入力物性値

粘着力	c	1.0kN/m <sup>2</sup>
内部摩擦角	φ	40°
単位体積重量	γ	20kN/m <sup>3</sup>
ダンカン・チャン のパラメータ値	k	187,900kN/m <sup>2</sup>
	n	1.127
	R <sub>f</sub>	0.75
	G	0.3

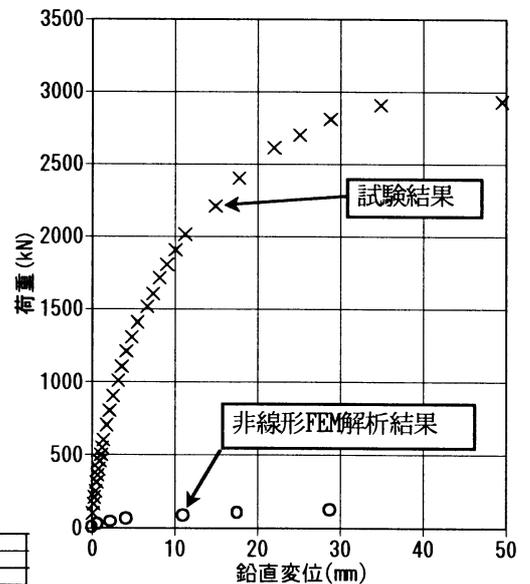


図-5 原位置せん断試験の解析結果

表-2 剛塑性FEM解析入力物性値とその結果（極限支持力）

c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	φ <sub>d</sub> (°)	極限支持力 (kN)
1.0	35	7	618
		12	2,963
	40	7	3,447
		12	5,206