

剛塑性有限要素法の岩盤斜面上深礎杭基礎の水平支持力解析への適用

中部電力(株) 電力技術研究所  
長岡技術科学大学  
(株)シーテック 技術コンサルタント部

正会員    〇橋詰 正広, 上田 稔  
正会員    大塚 悟  
正会員    鈴木 隆

1 はじめに

山岳地における送電用鉄塔基礎として用いられる深礎杭基礎は、昭和53年頃より数多く採用されている。その設計手法は昭和55年から58年にかけて、日本道路公団、東京電力(株)および中部電力(株)において、土砂、軟岩の一樣斜面を対象に実施された実規模水平支持力試験から得られた知見に基づき構築されている。その後、中硬岩まで適用範囲を広げるため三紀砂岩(C<sub>L</sub>級)を対象にした実規模水平支持力試験が平成9年から11年に実施される等、現行設計法(地形上の不確定要因に対して安全係数を考慮した設計体系)はより合理化されてきている。本論文では、安全側になりやすい現行設計法の課題を明らかにするため、ダイレイタンスー特性に着目した剛塑性有限要素法を用いて、当時の試験状況を再現している。これより、既往の物性評価手法を用いることにより、極限支持力と破壊形態を再現できることを明らかにし、送電用鉄塔基礎の評価手法について更なる合理化が可能であるかを検討した。

2 実規模水平支持力試験の傾向および結果

(1) 試験概要

実規模水平支持力試験の試験概要を図-1に示す。本論文では、表-1に示すような様々な地盤および地形を対象に9地点をモデル化している。また、これらの試験結果における極限荷重については、 $P \sim \delta$ の関係から宇都らによる式<sup>1)</sup>を用いて推定した。

(2) 試験結果

- 実規模水平支持力試験では、以下の傾向が認められた。
- ①斜面角度：緩斜面(20°程度)上の深礎杭基礎では、拘束力が大きくなるため深度が深い領域においては変形しにくい。
  - ②すべり面角度：すべり面角度は、斜面角度および内部摩擦角と相関がある。
  - ③抵抗幅：抵抗幅と躯体径の比は、径が小さいほど大きくなる傾向を示した。

3 剛塑性有限要素法による数値シミュレーション結果

(1) 解析方法および解析条件

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有限要素法により試験状況の再現解析を行った。地盤物性値は、過去の深礎基礎設計例を用いて設定された値<sup>2)</sup>を基に設定した。なお、土砂から軟岩程度についてはN値による物性設定とし、中硬岩以上では、岩盤分類に基づくコア評点の平均値による物性設定を行った。また、ダイレイタンスー特性を示す $\phi d$ については、C<sub>L</sub>級岩盤で $\phi d=2 \sim 4^\circ$ 、D級岩盤および土砂では $\phi d=0^\circ$ に設定した。

(2) 試験結果との対比

全9地点の支持力に関する推定精度についてまとめた結果を表-2および図-2に示す。また、破壊形態について試験結果と現行設計法と比較した結果を、図-3～5に示す。この結果、極限支持力、破壊形態ともに試験結果と良い一致を示した。また、これまでの経験に基づいて算出した地盤抵抗領域と比較して、側面で大きく、前面ではほぼ同程度からやや小さくなることが分かったが、極限支持力や破壊形態についての実測との整合は良好であることから、本手法は基礎設計時の上限支持力算定に対して有効であることを確認した。

4 まとめ

岩盤斜面上の深礎杭基礎の水平支持力試験について剛塑性有限要素法の適用性を検討した結果、既往の物性評価を行うことにより、性能設計に資する解析が実施可能であることを確認した。また、本解析法を用いることにより、深礎杭基礎の設計手法の更なる合理化が示唆された。

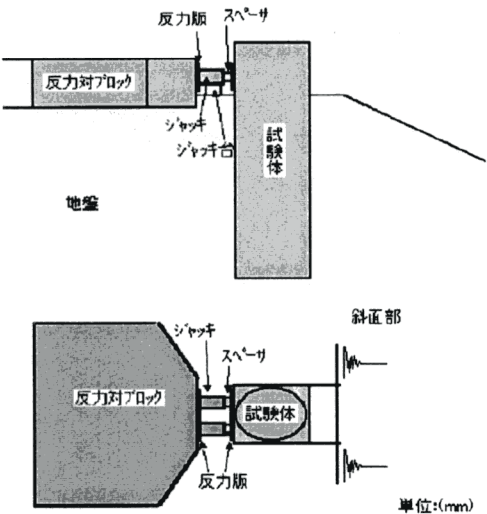


図-1 実規模水平支持力試験の概要

表-1 対象地盤および地層構成

| 実施箇所         | 実施地点    | 斜面角度(°) | 対象地質      | 岩級                      | 試験体寸法 |       | 実施年  | 地層構成 |       |       |
|--------------|---------|---------|-----------|-------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|
|              |         |         |           |                         | 径(m)  | 長さ(m) |      | 層    | 層厚(m) | 層厚(m) |
| 日本道路公団       | 広島県TU地点 | 35      | 軟岩        | D~C <sub>L</sub> 級      | 2.0   | 10.5  | S57年 | 1    | 35.0  | 4.1   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 60.0  | 6.4   |
|              | 群馬県A地点  | 40      | 土砂<br>軟岩  | D級                      | 2.0   | 10.0  | S56年 | 1    | 40.0  | 5.0   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 20.0  | 5.0   |
| 東京電力         | 栃木県I地点  | 30      | 土砂<br>軟岩  | D~C <sub>L</sub> 級      | 3.0   | 10.0  | S56年 | 1    | 20.0  | 5.0   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 20.0  | 5.0   |
|              | 新潟県N地点  | 30      | 土砂        | D級                      | 3.0   | 10.0  | S57年 | 1    | 30.0  | 8.5   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 30.0  | 1.5   |
| 中部電力         | 愛知県TO地点 | 30      | 風化花崗岩     | D~C <sub>L</sub> 級      | 1.0   | 4.0   | H2年  | 1    | 30.0  | 1.1   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 10.0  | 2.9   |
| 東京電力<br>中部電力 | 埼玉県H地点  | 30      | 中生層       | C <sub>L</sub> 級<br>平均値 | 1.5   | 5.0   | H9年  | 1    | 30.0  | 5.0   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 1    | 50.0  | 5.0   |
|              | 愛知県U地点  | 50      | 中生層<br>砂岩 | C <sub>L</sub> 級<br>平均値 | 3.0   | 7.0   | H11年 | 1    | 50.0  | 2.0   |
|              |         |         |           |                         |       |       |      | 2    | 50.0  | 5.0   |

表-2 試験結果と剛塑性有限要素法解析結果の比較

| 実施地点         | 斜面角度<br>(°) | 試験結果<br>(kN) | 剛塑性有限要素法    |      | すべり面角度        |               |                  | 抵抗幅           |                 |                        |
|--------------|-------------|--------------|-------------|------|---------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|------------------------|
|              |             |              | 支持力<br>(kN) | 評価*1 | 試験結果*2<br>(°) | 剛塑性FEM<br>(°) | 評価<br>(剛塑性FEM算式) | 試験結果*3<br>(m) | 剛塑性FEM*3<br>(m) | 評価<br>(剛塑性FEM<br>試験結果) |
| 広島県<br>TU 地点 | 35          | 4,780        | 5,610       | 1.17 | (92)          | 67            | (-25)            | 5.0<br>(2.5)  | 4.6<br>(2.3)    | 0.92                   |
| 群馬県<br>A 地点  | 40          | 5,580        | 4,210       | 0.75 | (97.5)        | 76            | (-21.5)          | 6.0<br>(3.0)  | 7.0<br>(3.5)    | 1.17                   |
|              | 20          | 5,380        | 6,720       | 1.25 | (77.5)        | 57            | (-20.5)          | 7.0<br>(3.5)  | 7.5<br>(3.75)   | 1.07                   |
| 栃木県<br>I 地点  | 30          | 10,000       | 8,580       | 0.86 | (88.5)        | 65            | (-23.5)          | 9.0<br>(3.0)  | 6.6<br>(2.2)    | 0.73                   |
| 新潟県<br>N 地点  | 30          | 4,750        | 4,560       | 0.96 | (92.5)        | 65            | (-27.5)          | 12.0<br>(4.0) | 9.0<br>(3.0)    | 0.75                   |
| 愛知県<br>TO 地点 | 30          | 1,900        | 1,680       | 0.88 | (92.5)        | 70            | (-22.5)          | 6.0<br>(6.0)  | 4.2<br>(4.2)    | 0.70                   |
| 埼玉県<br>H 地点  | 30          | 3,000        | 3,170       | 1.06 | 80<br>(95)    | 90            | +10<br>(-5)      | 6.8<br>(4.53) | 9.0<br>(6.0)    | 1.32                   |
|              | 50          | 2,200        | 2,300       | 1.05 | (115.0)       | 109           | (-6)             | 6.5<br>(4.33) | 8.5<br>(5.67)   | 1.31                   |
| 愛知県<br>U 地点  | 50          | 6,400        | 6,820       | 1.07 | 98.0<br>(110) | 107           | +9<br>(-3)       | 12.0<br>(4.0) | 11.0<br>(3.67)  | 0.92                   |
|              |             |              | 平均          | 1.01 |               |               |                  |               |                 |                        |

\*1 評価：剛塑性有限要素法の解析結果／試験結果

\*2 ( ) 内は、 $\alpha = 45 + \phi/2 + \theta$  により算出した。

\*3 ( ) 内は、抵抗幅と躯体径の比を示す。

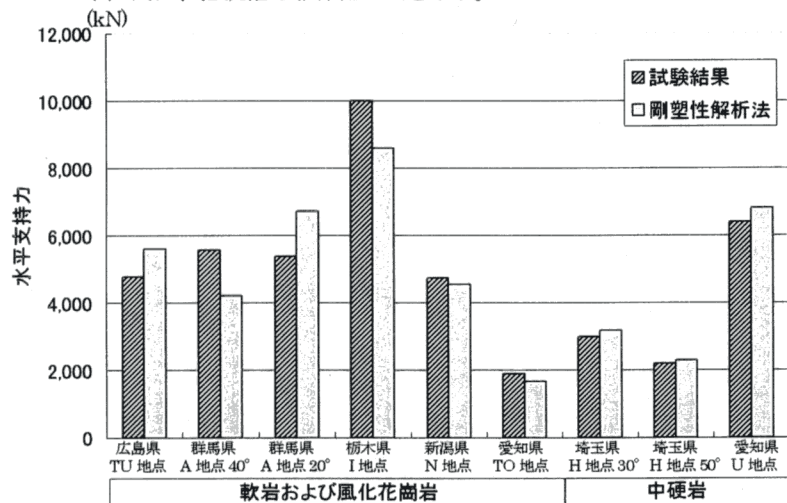


図-2 剛塑性解析法の支持力に関する推定精度の比較

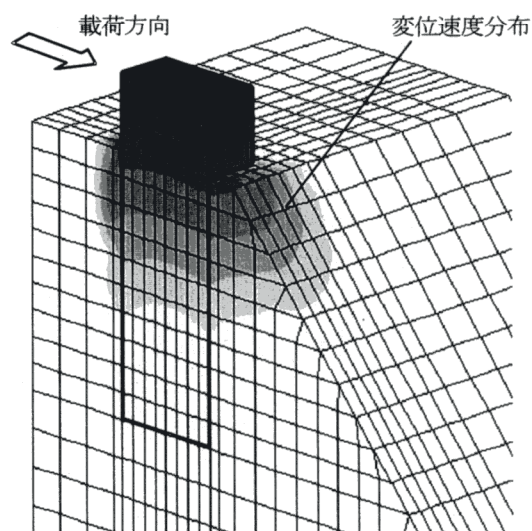
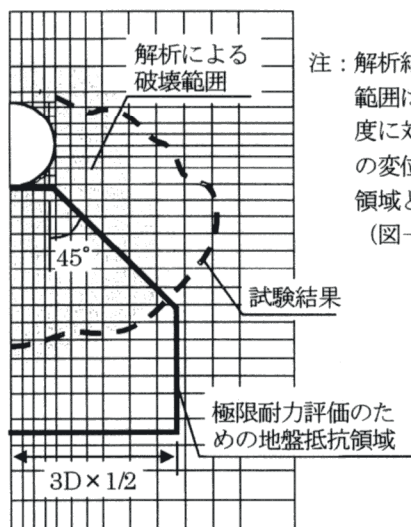
図-3 剛塑性解析により求められた破壊形態  
(愛知県 U 地点)

図-4 地表面における破壊範囲 (愛知県 U 地点)

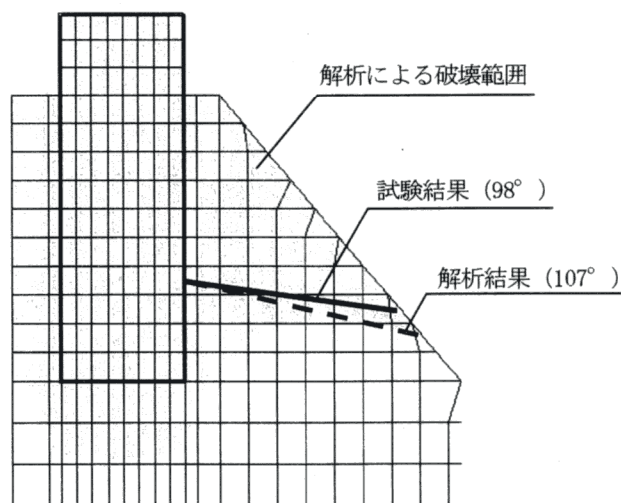


図-5 すべり面角度 (愛知県 U 地点)

## &lt;参考文献&gt;

- 1) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学, 佐藤正人: 数学モデルによる杭の鉛直荷重試験結果の支持力判定, 第27回土質工学研究発表会, 平成4年6月, E-4, pp1565-1568
- 2) 地盤工学会: 現場技術者のための土と基礎シリーズ18「傾斜地と構造物—その調査・設計および維持管理—」