## 盛土による地盤の側方変位が既設鉄塔基礎構造物へ与える影響評価手法の研究

A STUDY OF WAY OF PREDICTION INFLUENCE TOWARD FOUNDATION OF OLD TRANSMISSION TOWER NEAR EMBANKMENT

# 白濱美香<sup>·</sup>,高橋秀明<sup>·</sup>,佐藤博<sup>··</sup>,河村直明<sup>··</sup>, 中井照夫<sup>····</sup>,檜尾正也<sup>····</sup>,鈴木誠<sup>····</sup>,福武毅芳<sup>····</sup>

Mika SHIRAHAMA, Hideaki TAKAHASHI, Hiroshi SATO, Naoaki KAWAMURA, Teruo NAKAI, Masaya HINOKIO, Makoto SUZUKI and Kiyoshi FUKUTAKE

> \*東電設計株式会社(〒110-0015 台東区東上野 3-3-3) \*\*東京電力株式会社 \*\*名古屋工業大学 \*\*\*清水建設株式会社

During the construction of an embankment near a foundation of old transmission tower, settlement and lateral displacement of surrounding ground occurs, which may give bad influence to the foundation. In this research, the technique to predict the bad influence to the shallow foundation is proposed by result from two-dimensional analyses of elastoplastic subloading tij model. It is shown that lateral displacement is to model by both the displacement of the surface of ground and the maximum displacement under the ground and to approximate by exponential of settlement at the center of the embankment. In addition, it is shown that it is possible to estimate reasonably the influence of shear strength, the tickness of a soft ground, and the height of the embankment by the setting of the parameter of the exponential model accoring to the distance away from the embankment.

Key Words: embankment, rateral displacement, foundation of transmission tower

### 1.はじめに

近年,市街化の郊外拡大に伴う社会資本整備の進展に より,公共構造物や道路設備等の建設が増加している. このような状況の中,小規模送電用鉄塔基礎の周辺で盛 土が施工される事例が増えており,鉄塔基礎に対する影 響評価が必要とされている.また,影響評価の結果を施 工計画に反映するため迅速な対応が求められている.

従来,盛土施工による鉄塔基礎への影響評価は,簡便 な一次評価と詳細な二次評価の2段階で実施されている. 一次評価は,地盤条件,盛土高さ,盛土離隔距離などを パラメータとしたノモグラムを用いて行う.二次評価は, 詳細な検討を行い基礎への影響度を判定するが,その標 準化した検討手法は確立されておらず,現状では,個別 に対応している.具体的にはFEM解析などを用いている が,この手法では迅速に対応することが難しいため,よ り簡易な検討手法が望まれている.

また,影響評価項目は基礎型によって異なり,直接基礎は鉄塔脚間の不同変位量を,杭基礎は杭頭変位量や杭の構造を照査する.直接基礎は,地盤と基礎の変位量は同じと仮定し地盤変位で不同変位量を評価する.杭基礎は,応答変位法などを用いて盛土により発生する側方変位の影響を評価する.

本研究は,二次評価における詳細影響評価手法の簡素

化を目的とし,盛土による地盤変位を定量的に評価する 手法を提案した.

### 2.数值解析

盛土による地盤変位の定量的な評価は,地盤の圧密現 象を解析できる二次元弾塑性FEM 解析(subloading tij model<sup>1)</sup>)を用いた.

2.1 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル・解析ケース

解析モデルは,基礎構造物のない地盤・盛土のモデル とし,盛土荷重をソリッド要素で与えた.解析モデルと 解析メッシュを図 - 1 に示す.解析範囲は,境界条件の 影響を受けないよう盛土の大きさに対して十分な範囲を 設定した.

解析ケースは,表-1に示すように地盤種別(粘性土地 盤,砂質土地盤),地盤強度,盛土高さhe,軟弱層厚Hを パラメータとした.各種パラメータは対象地盤から採取 した試料を用い三軸試験と標準圧密試験を行って決定し ている<sup>2)</sup>.決定した土質パラメータの一覧を表-2に示す. 盛土高さheと軟弱層厚Hは,既往の事例から代表的な値 を選定し,粘性土地盤,砂質土地盤ともに一層地盤とし た.下層には支持層として密な砂層を設定している.



図-1 解析モデルと解析メッシュ

表 - 1 解析ケース

粘性土地盤

地盤強度	非常に軟らかい (N=1程度)		軟らかい (N=2程度)			中位 (N=6程度)			
Pr	50kN/m <sup>2</sup>			100kN/m <sup>2</sup>			200kN/m <sup>2</sup>		
he	2m	4m	6m	2m	4m	6m	2m	4m	бm
10m									
20m									
30m									
지수 도도 나 나 하고									

砂質土地盤

地盤強度		緩い砂		締まった砂		
初期間隙比 $e_0$	1.05			0.85		
he H	2m	4m	бm	2m	4m	6m
10m						
20m						
30m						

ト,he: 盛土局,H: 軟弱層厚 ここで,Pr:フレロ·

	砂質土地盤
粘性土地盤	(軟弱層,支持層,
	盛十)

0.192

0.0068

1.25

3.55

1.5

500

500

(平均主応力 - 間隙比の勾配(載荷時))

(平均主応力 - 間隙比の勾配(除荷時))

N(平均主応力が98kPaのときの間隙比)

(降伏曲面の形状を表すパラメータ)

AF(密度や拘束応力の影響を表す

IC(密度や拘束応力の影響を表す

パラメータ(等方的な成分))

パラメータ(異方性成分))

1/ 3) cs

(残留主応力比)

Rcs=(

0.07

0.006

1.0

3.5

1.2

50

500

表 - 2 土質パラメータ

表 - 3 時間ステップ(盛土高さ6mの場合)

	1ステップの時間	総ステップ数	総時間
盛土施工時間	21.6分	4,000	60日
放置時間	65分	26,000	1,174日

6mの場合,表-3に示すように時間ステップを設定すると, 1174日後に過剰間隙水圧がほぼ消散した.

3)排水条件

地下水位は地表面とし,要素の排水条件は,粘性土層 を過剰間隙水圧の発生を考慮した有効応力解析を行う 水・土連成に,砂質土層を完全排水にした.

4)初期地盤状態

地盤の初期応力は自重圧密により作成した.粘性土層 は,自重圧密後さらに地表面に50kN/m<sup>2</sup>,100kN/m<sup>2</sup>, 200kN/m<sup>2</sup>のプレロードを載荷して強度の異なる地盤を作 成した.砂質土層は,初期間隙比を変化させて,強度の 異なる地盤を作成した.

2.2 解析結果

粘性土地盤の変位は、盛土直後の非排水状態と圧密終 了時の2つの時間に着目した.砂質土地盤は,完全排水条 件のため盛土直後のみに着目した.

水平変位の深度分布

図 - 2に粘性土地盤の軟弱層厚30mの変形図を示す.盛 土直下の地盤は大きく沈下し,それに伴い側方に変位が 発生していることが確認できる.

図 - 3に粘性土地盤の軟弱層厚30mの水平変位深度分布 を,図-4に盛土近傍の水平変位コンターを示す.地盤強 度が小さい粘性土(プレロード50kN/m<sup>2</sup>)は,盛土直後にす べての深度において盛土と反対方向に変位するが,圧密 に伴い地表面は盛土方向へ,地中は盛土から離れる方向 へ変位する.圧密終了時,弱い地盤は大きい圧密沈下に 伴い,地表面は盛土方向に変位し地中はせん断変形が卓 越するために盛土反対方向に変位する.ただし,盛土か らの離隔距離が0mの場合はせん断変形が卓越するために 地表面も盛土反対方向に変位している.

地盤強度が大きい粘性土(プレロード200kN/m<sup>2</sup>)は,盛 土直後に地表面は盛土方向へ変位し,地中は盛土と反対 方向へ変位する. 圧密に伴う変位は, 地表面, 地中とも に盛土方向へ変位する. 圧密終了時, 地表面は盛土直下 の圧密沈下が小さいため,沈下に伴う盛土方向への変位 が小さい.地中はせん断変形が小さいため盛土反対方向 への変位が小さい.

すなわち,盛土直後の変位は地盤強度によって地表面 の変位方向が異なる.弱い地盤は盛土から離れる方向, 強い地盤は盛土方向に変位する.弱い地盤は強い地盤に 比べ, せん断変形が卓越するためと考えられる, 地中の 変位は,地盤強度による差がなく盛土と反対方向に変位 する.盛土直後から圧密終了時までの変位増分の方向は,

(2) 解析条件<sup>3)</sup>

1)境界条件

地盤と盛土は平面ひずみ要素とした.地盤の変位境界 条件は,側方を水平方向固定,底部を完全固定とした. 水理境界条件は,地表面および軟弱層底面を排水条件と し,側方を非排水条件とした.側方は地盤が無限に続く と想定している.

2)解析時間ステップ

盛土は10日で高さ1mの速度で施工し,施工後は過剰間 隙水圧が消散するまで放置した.粘性土地盤,盛土高さ



盛土



地表面で地盤強度による差はなく盛土方向へ変位する. 地中で弱い地盤は盛土から離れる方向,強い地盤は盛土 方向に変位する.



図4\_c.粘性土地盤,H=30m,Pr=200kN/m2,he=6m 図-4 水平変位コンター(地盤強度比較,圧密終了時)

圧密終了時の変位は,盛土から離れる方向への最大変 位は軟弱層厚Hの中央位置(深度15m)付近において発生し, 盛土方向への最大変位は地表面において発生している. この傾向は地盤強度によらず同じである.

図 - 5に,砂質土地盤の軟弱層厚30mの水平変位深度分 布を示す.砂の水平変位分布は,地表で盛土方向,地中 で盛土反対方向へ変位するモードを示し,離隔距離に よって大きく変化していない.砂質土は粘性土と深度方 向の変形モードは同じであるが,水平変位の絶対値は砂 質土が粘性土より小さい.

次に,粘性土地盤の軟弱層厚H=10mとH=30mの水平変 位深度分布を図-6に,盛土近傍の水平変位コンターを図 -7に示す.盛土直後はH=10mの場合,地表面が盛土方 向変位,地中が盛土反対方向変位であるのに対し, H=30mの場合,地表面,地中ともに盛土反対方向の変位 が発生している.圧密終了時はH=10m,H=30mともに, 地表面で盛土方向への引き込み変位,軟弱層厚Hの中央 位置付近で盛土から離れる方向への最大はらみ出し変位 が発生している.図-7より圧密終了時の水平変位は,圧 密に伴う盛土の沈下により地表面で盛土方向に変位し, 地中で盛土から離れる方向に変位する傾向が層厚によら ず確認できる.盛土直後と圧密終了時の水平変位の差は, 軟弱層厚が大きいH=30mで顕著である.H=30mは圧密に 伴う盛土下部の沈下が大きいためと考えられる.

(2)地表面鉛直変位の分布

図 - 8に軟弱層厚30mの粘性土地盤と砂質土地盤の地表 面の鉛直変位分布を示す.粘性土地盤は,圧密に伴い盛













土下部で大きい沈下量が発生する.粘性土地盤の沈下量 は砂質土地盤の3倍程度である.

3. 地盤変位モデルの作成

3.1 地盤変位モデル

2章の解析結果を踏まえて,地盤変位を図-9に示すようにモデル化した.離隔距離xにおける水平変位深度分布は,地表面水平変位D<sub>0</sub>と地中最大水平変位D<sub>max</sub>,軟弱層厚Hの下端を結ぶ2本の直線分布とした.ここで,D<sub>max</sub>の発生深度は軟弱層厚の中央とし,軟弱層の下端における水平変位は0とした.水平変位を定義するパラメータD<sub>0</sub>とD<sub>max</sub>は盛土中央の沈下量S<sub>0</sub>と関連づけた.離隔距離xにおける鉛直沈下量Dvは,分布のモデル化はしないで直接,沈下量S<sub>0</sub>と関連づけた.

図 - 10に離隔距離 x=0m, 4mにおける地盤変位モデル のパラメータ $D_0$ ,  $D_{max}$ ,  $D_v$ と盛土中央沈下量 $S_0$ の関係を 示す. 横軸に $D_0$ ,  $D_{max}$ ,  $D_v$ を $S_0$ で基準化した値, 縦軸に  $S_0$ の値を取った.  $D_0/S_0$ ,  $D_{max}/S_0$ ,  $Dv/S_0$ は, 軟弱層厚Hご とに $S_0$ の指数関数で近似できる. 地表面の引き込みや地 中のはらみ出しは盛土による圧密沈下が支配的であるた め,  $D_0$ ,  $D_{max}$ ,  $D_v$ を基準化する値として盛土中央の沈下 量 $S_0$ を採用した. 盛土中央の沈下量 $S_0$ は容易に計算でき, 推定精度も比較的良く, さらに $S_0$ の算定に盛土高さ $he^{theta}$ 地盤強度の影響を含めることができる. ただし, 軟弱層 厚Hによって沈下に伴う側方変位の傾向が異なるため, H ごとに変位量をモデル化をした.

 $S_0$ をパラメータとした $D_0$ ,  $D_{max}$ ,  $D_v$ の算定式を式 - 1に



図10-b.地中の最大水平変位Dmaxと沈下量Soの関係

示す.式中の , , , , , , は解析結果から整 理した,離隔距離x,軟弱層厚Hによって決定する係数で





図 - 11 地盤変位モデルの係数

図 - 11に示す値である.ただし,軟弱層厚H,地盤強度, 盛土高さheの条件が,本解析の適用範囲外である場合は, 係数についての再検討が必要である.

$$D_0 = ln(\frac{S_0}{g})^{\frac{S_0}{h}}, D_{\max} = ln(\frac{S_0}{a})^{\frac{S_0}{b}},$$
$$D_v = ln(\frac{S_0}{m})^{\frac{S_0}{r}}, \dots : \vec{x} - 1$$

図 - 12,13に解析結果から得られた盛土中央沈下量S<sub>0</sub> を用いて式(1)より求めた地盤変位モデルと解析結果の比 較を示す.両者は良く一致しており,S<sub>0</sub>が精度良く推定



図 - 12 解析値と地盤変位モデルの比較(水平変位)



図 - 13 解析値と地盤変位モデルの比較(地表面沈下)

できれば地盤の水平変位,鉛直変位も精度良く推定できることを示している.

図 - 14は今回の解析結果から得られた盛土中央沈下量 S<sub>0</sub>と一次元圧密理論より求めた盛土中央沈下量S<sub>0d</sub>の関係 を示している.S<sub>0</sub>とS<sub>0d</sub>はほぼ一致しており,一次元圧密 理論によってS<sub>0</sub>の推定が可能であると言える.

3.2 盛土による影響評価検討例

鉄塔基礎における逆T字型直接基礎の影響評価は,地 盤変位に伴う鉄塔脚間の不同変位量を照査して行う.本 来,直接基礎は良好な地盤に建設されるが,既設基礎の 中には軟弱層に建設されている場合もある.鉄塔脚間の 不同変位量は,鉛直不同変位量 vと水平不同変位量 H を分離して評価し,それらを足し合わせた値としている. 不同変位量は地表面の地盤変位により評価した後,鉛直 不同変位量 vは地表面鉛直変位量Dv,水平不同変位量

<sub>H</sub>は地表面水平変位量D<sub>0</sub>を用いて算定する.図-15に 示すように,鉛直不同変位量は鉄塔の3脚で作られる面と 残り1脚の距離とし,水平不同変位量は隣り合う鉄塔脚間 の伸びまたは縮みの最大値とする.許容不同変位量は, 上部工である鉄塔により決定し鉄塔根開きの1/1200とし



図 - 14 解析沈下量S<sub>0</sub>と一次元圧密理論沈下量S<sub>0d</sub>の比較



図 - 15 不同変位量



(Pr=50kN/m2,非常に軟らかい粘性土) 図 - 16 離隔距離と不同変位量の関係

ている.今回提案する地盤変位モデルにより算定したD<sub>v</sub>, D<sub>0</sub>を用いた不同変位量と盛土からの離隔距離の関係を図 -16に示す.同図には鉄塔根開き10mの場合の許容変位 を併記した.

このように,一次元の圧密理論より求めた盛土直下の 沈下量 $S_{0d}$ と軟弱層厚Hの2つのパラメータにより求められ る地表面変位 $D_0$ , $D_v$ から鉄塔脚間の不同変位量を算定す ることで,鉄塔近傍に施工される盛土の影響評価を行う ことができる.

4.まとめ

盛土による地盤変位の定量的な評価を目的として2次元 弾塑性FEM解析を行い,以下の所見を得た.

粘性土は,圧密に伴う沈下が,地表面で盛土方向に引 き込む変位を,地中で盛土反対方向にはらみ出す変位 を引き起こす.

粘性土の弱い地盤は,盛土中央の圧密沈下量SOが大き く,沈下に伴う地表面の盛土方向変位とせん断変形に よる地中の盛土反対方向の変位が卓越する.強い地盤 は盛土中央の圧密沈下量SOが小さく,沈下に伴う地表 面の盛土方向変位, せん断変形による地中の盛土反対 方向への変位はともに小さい.

砂質土は,水平変位の深度方向の変形モードが に示 す圧密終了時の粘性土の傾向と同じである.しかし, 水平変位の絶対値は粘性土より小さい.

地盤の水平変位深度分布は,地表面変位D<sub>0</sub>と地中最大 変位D<sub>max</sub>によりモデル化することができる.また,D<sub>0</sub> とD<sub>max</sub>を盛土中央の圧密沈下量S<sub>0</sub>により算定する式を 提案した.

地盤の鉛直変位分布 $D_v$ は,盛土中央の圧密沈下量 $S_0$ により算定する式を提案した.

水平変位の深度方向の変形モードは、軟弱層厚Hの影響を大きく受ける.盛土高さheと地盤強度の影響は $S_0$ を評価する際に含めることができる.

盛土中央の圧密沈下量 $S_0$ は,一次元の圧密理論より求める沈下量 $S_{0d}$ で推定することができる.

提案する地盤変位の算定式により,直接基礎に対する 鉄塔の不同変位量をより迅速に検討できるようになった. 今後は,今回提案した地盤変位モデルを用いた応答変位 法による杭基礎の影響評価手法を提案する予定である. 謝辞 本報告は、東京電力(株)技術開発研究所からの 受託「近接施工に伴う既設鉄塔基礎への影響評価手法検 討業務」の一部であり,東京電力(株)技術開発研究所, 東京電力(株)工務部,名古屋工業大学,清水建設(株) の皆様に多大のご援助をいただきました.ここに記して 厚くお礼申し上げます.

#### 参考文献

1) T.Nakai&M.Hinokio,A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters.,S&F,vol.44(2),2004

2)檜尾正也 他:水平荷重を受ける杭の支持力特性に関する解析-粘土地盤および砂地盤での検討,第38回地盤工学研究発表会,vol2,pp.1447-1448,地盤工学会,2003
3)檜尾正也 他:盛土施工が既設杭基礎に及ぼす影響-2次元および3次元解析による検討,土木学会第59回年次学

術講演会, pp.943-944, 土木学会, 2004