縦型回転式攪拌混合中層処理工法における改良体先端形状の影響に関する数値解析的検討

東北大学　学生会員　○ 佐山 拓海
東北大学　正会員　山川 優樹
小野田ケミコ（株）　非会員　竹田 敏彦
小野田ケミコ（株）　非会員　山根 行弘

1. はじめに

地盤改良工法の一種として，縦型回転式撹拌混合中層処理工法[1)]がある．これは，先端部の左右両側に取り付けた撹拌翼を鉛直回転させる専用撹拌装置により，先端部から吐出する固化材スラリーと改良対象土を撹拌混合し改良体を作成する工法である．

縦型回転式攪拌による中層混合処理工法は，改良体の水平断面形状が円形ではなく矩形となるため，矩形体形状の選択ができ，効率的に連続配置した施工が可能であるなどの利点がある．一方，改良体の先端形状が半円形の尖状となる．そのため，平面載荷を前提とした一般的な支持力公式に基づいて適切な支持力を確保しようとすると，支持層に対して改良体を貫入して施工する必要がある．しかし，支持層への貫入施工は容易ではなく，コスト及び工期の面が問題となっている．

本研究では，改良体の先端形状および先端貫入深さが支持力に与える影響を調べるため，弾塑性有限要素解析による検討を行った．

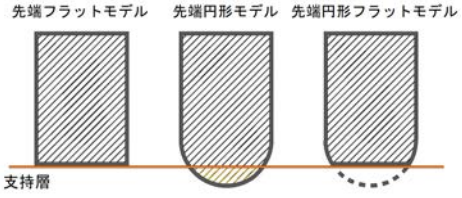
2. 解析モデルの概要

本研究では，2 次元四辺形 8 節点 2 次要素で，Mohr-Coulomb モデルを用いた弾塑性解析を行った．

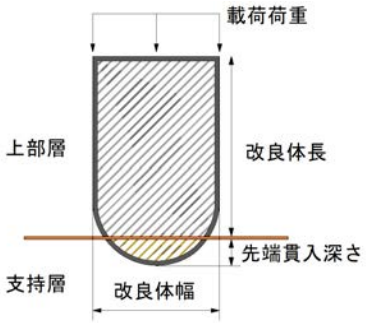
(1) 解析モデルの形状

解析モデルとしては，図–1 に示すように，先端部がフラットな改良体を支持層に着底させた先端フラットモデルと，先端部が半円形の改良体を支持層に貫入させた先端円形モデルに加えて，先端円形モデルの先端を支持層に貫入させない先端円形フラットモデルの 3 種類を用いた．図–2 に，先端円形モデルの概略図を示した．

先端貫入深さは，15cm, 35cm, 55cm, 75cm の 4 ケースとした．また，改良体幅は，標準型の撹拌翼径を想定し 1.5m とし，改良体長は縦型回転式撹拌混合中層処理工法の最低改良厚である 1.5m および 5.0m の 2 ケースとした．上部層の上載圧（単位体積重量：$\gamma = 16\,\mathrm{kN/m^3}$）を考慮し，改良体長 1.5m のモデルには $24\mathrm{kN/m^2}$，改良体長 5.0m のモデルには $80\mathrm{kN/m^2}$ の上載圧をかけた解析も行った．



図–1 解析モデル図



図–2 改良体の概略図

(2) 材料定数

改良体，上部層，支持層ともに Mohr-Coulomb モデルを用いて弾塑性体としてモデル化した．改良体および上部層の材料定数は本研究を通して同一なものを用いた．支持層は，他の条件は揃えて粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を変えた一般土，粘性土，砂質土を想定した 3 パターンの材料定数を用いた．それぞれの材料定数を表–1 に示す．本稿では紙面の制約により，砂質土の解析結果は省略する．

表–1 材料定数

	改良体	上部層	一般土	粘性土	砂質土
単位体積重量 γ ($\mathrm{kN/m^3}$)	16	16	20	20	20
弾性係数 E($\mathrm{kN/m^2}$)	180,000	8,400	56,000	56,000	56,000
ポアソン比 ν	0.26	0.33	0.33	0.33	0.33
粘着力 c($\mathrm{kN/m^2}$)	500	10	40	50	0
内部摩擦角 ϕ (度)	0	0	0,10,20,30	0	30

3. 解析結果と考察

(1) 先端フラットモデルの精度検証

有限要素解析の精度検証として，Terzaghi の支持力公式

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \qquad (1)$$

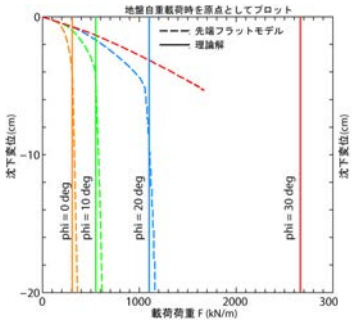
を用いた．支持力公式で想定している載荷形態に相当する先端フラットモデルの解析を行った．一般土で改良体長 1.5m において，内部摩擦角を変化させた解析結果と，支持力公式 (1) で算定した理論解を図–3 に示した．2 次元平面ひずみ解析であるため，横軸には単位奥行きあたりの載荷荷重 F (kN/m) を示してある．理論解は改良体の重量を考慮し，差し引いたものを用いている．ϕ=30° の解析では極限支持力を得られなかったため，理論解との比較はできないが，0°, 10°, 20° では理論解と解析解による大きな誤差は見られず，本研究の有限要素解析が妥当であることを確認した．

Key Words: 中層混合処理工法, 縦型回転式撹拌, 先端貫入深さ, 弾塑性有限解析
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, Phone: 022-795-7285, E-mail: takumi.sayama.s1@dc.tohoku.ac.jp

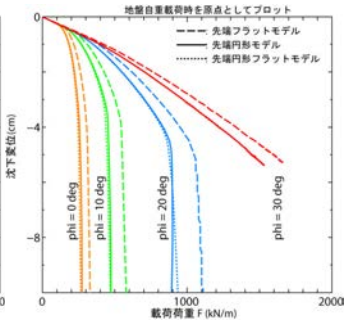
(2)　一般土の先端支持力の解析結果

一般土で改良体長 1.5m，先端貫入深さ 35cm とし，上載圧を考慮しない場合について，内部摩擦角を変化させて解析を行った結果を図–4 に示した．

極限支持力の大きさは，内部摩擦角の値によらず，先端フラットモデルの支持力が最も大きかった．先端円形モデルと先端円形フラットモデルはおおよそ同じ支持力を示しており，先端フラットモデルよりも 2 割程度小さかった．この結果からは，極限支持力に関する先端貫入の有効性は見られなかった．ただし，許容支持力の載荷範囲では，先端フラットモデルと先端円形モデルは，ほぼ同程度の沈下変位を示し，先端形状による差がないことが確認された．



図–3 理論解との比較

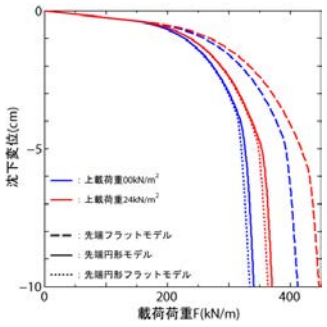


図–4 先端支持力の解析結果

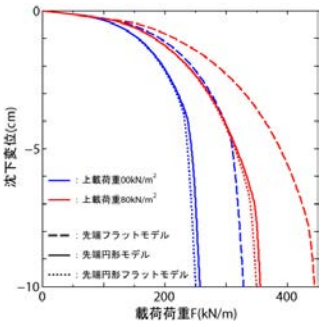
(3)　粘性土の上載圧を加えた解析結果

粘性土の支持層で，貫入深さが 35cm であるときに，支持層の上面に上載圧を作用させ，改良体長 1.5m 及び 5.0 について解析を行った．上載圧を作用させない場合の解析結果と比較したものを，図–5，図–6 に示した．

上載圧の大きさにかかわらず，前節 (2) で示した一般土の解析結果と同様に，極限支持力の大きさは，先端フラットモデルが最も大きく，先端円形モデルと先端円形フラットモデルはおおよそ同じ値となった．



図–5 改良体長 1.5m

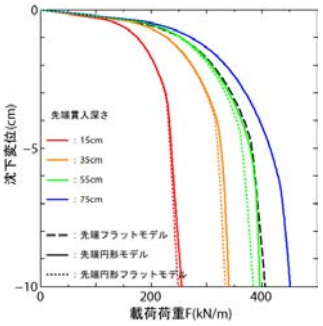


図–6 改良体長 5.0m

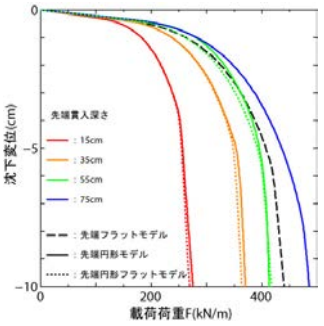
(4)　先端貫入深さを変えた解析結果

粘性土の支持層で，改良体長が 1.5m 上載圧なし，改良体長が 1.5m 上載圧 24kN/m^2，改良体長が 5.0m 上載圧なし，改良体長が 5.0m 上載圧 80kN/m^2，の 4 ケースにおいて，先端貫入深さを変えた時の解析結果をそれぞれ，図–7, 図–8, 図–9, 図–10 に示した．

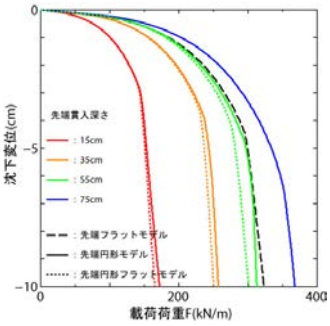
図からわかるように，先端貫入深さが大きいほど先端円形モデルおよび先端円形フラットモデルの極限支持力は大きくなっており，先端貫入深さが 55cm の場合は，先端円形モデルと先端円形フラットモデルの極限支持力が先端フラットモデルの極限支持力と同程度の値となっている．さらに，4 ケース全てにおいて，先端貫入深さが 75cm の先端円形モデルの極限支持力は，先端フラットモデルの極限支持力を上回っており，先端貫入の有効性が見られた．



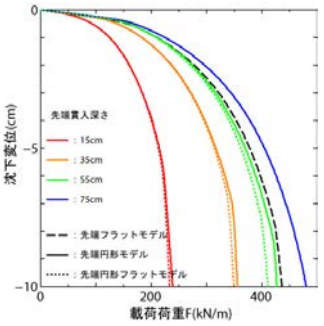
図–7 改良体長 1.5m-00kN



図–8 改良体長 1.5m-24kN



図–9 改良体長 5.0m-00kN



図–10 改良体長 5.0m-80kN

4.　まとめ

本研究では，先端円形モデルと先端円形フラットモデルによる極限支持力の差はあまり見られなかった．

しかし，先端貫入深さ 55cm において，先端円形モデルの極限支持力は先端フラットモデルの極限支持力と同程度の値となった．さらに，先端貫入深さ 75cm の場合は，先端円形モデルの極限支持力が先端フラットモデルの極限支持力を上回った．このことから，先端貫入の有効性が確認された．今回検討した条件に限っていえば，先端フラットモデルと同等の支持力を得るために，先端部の半円形をすべて支持層へ貫入させる必要はないと考えられる．

今回検討したのは，粘性土を想定した限られたケースのみであるため，他の物性の支持地盤においても解析を行い，今回の検討から示唆されたことが様々な物性の支持層において成り立つかについて確認を行う必要がある．また，先端貫入が改良体の支持力挙動へ及ぼす影響とそのメカニズムを明らかにするため，改良体の先端周辺地盤の変形の状況なども調べていきたい．

参考文献

1) ツイン・ブレードミキシング工法研究会：中層混合処理工法「ツイン・ブレードミキシング工法」資料．