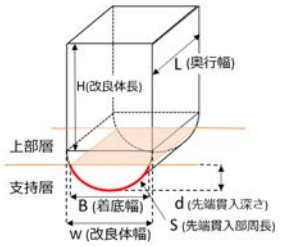
縦型回転式攪拌中層混合処理工法における改良体先端形状の3次元的影響に関する検討

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　松井 倫嗣
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，縦型回転式撹拌中層混合処理工法[1)]がある．これは，先端部の左右両側に取り付けた大型撹拌翼を鉛直回転させる専用撹拌装置により，攪拌混合し改良体を造成する工法である．一般的な水平回転式攪拌と比べて，この工法は水平断面形状が矩形体となるため，改良体配置・改良率を自由に設定可能であり，効率のいい改良を行うことができる利点がある．一般的な水平回転式撹拌による改良体の先端形状は水平な平面となり，支持層に改良体先端を着底させることで先端支持を発揮する．一方，当工法では，改良体の先端形状が円形の尖状となるため，水平回転式撹拌による改良体と同等の支持力を確保するためには，支持層に対して改良体を貫入して施工する必要がある．本研究では，これを必要貫入深さと呼ぶ．図–1に当工法による改良体の概略図を示した．当工法の現行設計法では，支持層に対する先端貫入部の表面積が平面載荷における支持層への着底面積に相当するとみなし，先端貫入部周長 S が改良体幅 W と等しくなるように先端貫入深さ d を定めている．支持力に対する先端貫入の寄与程度を明らかにし，上述の先端貫入深さの設定によって確保できる支持力を明確にする必要がある．

本研究では，改良体の先端形状が支持力に与える影響を調べることを目的として，弾塑性有限要素解析による検討を行い，支持力の評価とともに支持層の応力・ひずみ分布を検討し，改良体の先端形状や先端貫入深さの違いによる支持力発揮メカニズムを考察した．



図–1 縦型回転式撹拌により造成される改良体の模式図

2. 解析モデルと解析手法

本研究の有限要素解析では，2次元解析では四辺形8節点2次要素を，3次元解析では六面体20節点2次要素を用いて，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，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所定の深さ（先端貫入深さ d）だけ支持層に貫入させた先端円形モデルを用いた．前者は Terzaghi の支持力公式で想定されている支持状態をモデル化したもので，この支持力が参照値となる．後者は縦型回転式撹拌工法による改良体の先端形状をモデル化したものである．先端貫入深さは，15 cm, 35 cm, 55 cm, 75 cm の4ケースとした．改良体幅は，標準型の攪拌翼径を想定し 1.5m とし，改良体長は，一般的な改良厚を想定した 5.0 m を基準に解析を行った．

(2) 改良体と地盤の材料定数

改良体，支持層ともに Mohr-Coulomb 弾塑性体としてモデル化した．改良体の材料定数は本研究を通して同一とした．支持層は，大きく分けて粘性土，砂質土を想定した2種類の材料定数を用いた．それぞれの材料定数を表–1に示す．

表–1 改良体と支持層の材料定数

	改良体	支持層 (粘性土)	支持層 (砂質土)
単位体積重量 γ (kN/m^3)	16	20	20
弾性係数 E(kN/m^2)	180,000	56,000	56,000
ポアソン比 ν	0.26	0.33	0.33
粘着力 c(kN/m^2)	500	40,50,60,70	1
内部摩擦角 ϕ (度)	0	0	10,15,20,25

3. 有限要素解析結果

(1) 2次元有限要素解析

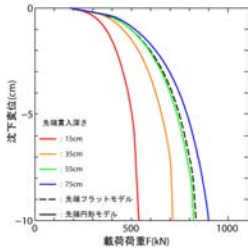
はじめに，支持力に対する先端貫入深さ d の影響を確認するために，支持層は粘性土 (粘着力 : 50 kN/m^2), 砂質土 (内部摩擦角 : 20°) を想定して，先端貫入深さを 15 cm, 35 cm, 55 cm, 75 cm と変化させた4ケースの2次元有限要素解析を行った．解析結果を，図–2に示した．

粘性土, 砂質土の双方において，先端貫入深さが大きいほど，先端円形モデルの極限支持力は大きくなる．縦型回転式撹拌工法による改良体の現行の設計法では，先端フラットモデルと同程度の支持力を確保するために，先端貫入部周長 S を改良体幅 W と同じだけ確保する方法が一般に取られている．この設計法によると今回の改良体幅 1.5 m の場合は，先端貫入深さは 35 cm となる．先端円形モデル (d=35 cm) の載荷荷重は，許容支持力レベルでは先端フラットモデルの載荷荷重と同等であるが，極限支持力レベルでは先端フラットモデルの載荷荷重を2割程度下回っている．このことから，現行の先端貫入部周長を基準とした設計法で求められる先端貫入深さでは，先端フラットモデルと同程度の極限支持力を確保するには十分ではないと考えられる．しかし，先端円形モデル (d=55 cm) では，先端フラットモデルと荷重-沈下変位曲線が同様な経路を辿っており，同程度の極限支持力を得られることが確認できた．

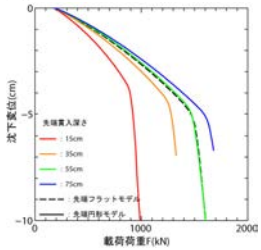
Key Words: 中層混合処理工法, 縦型回転式撹拌, 支持力, 改良体先端形状, 3 次元効果, 有限要素解析
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, Phone: 022-795-7420, E-mail: takumi.sayama.s1@dc.tohoku.ac.jp

次に，支持層の地盤物性が及ぼす影響を調べるため，先端貫入深さを 55 cm として，**表–1** の通り，粘性土，砂質土において材料定数を変化させてそれぞれ 4 ケースの解析を行った．解析結果をそれぞれ，**図–3** に示した．比較対象として先端フラットモデルの結果も併せて示した．

粘性土，砂質土ともに，4 ケース全て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となっており，支持層の材料定数の値による傾向の違いは見られなかった．すなわち，今回検討した条件においては，地盤物性によらず，先端貫入深さ 55 cm の先端円形モデルにおいて，先端フラットモデルと同程度の極限支持力を得ることができることが確認された．

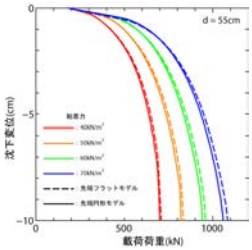


図–2-a 粘性土

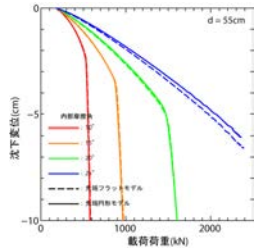


図–2-b 砂質土

図–2 先端貫入深さ d の影響（2 次元解析）



図–3-a 粘性土



図–3-b 砂質土

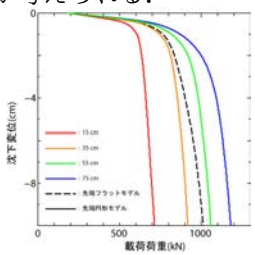
図–3 材料定数の影響（2 次元解析）

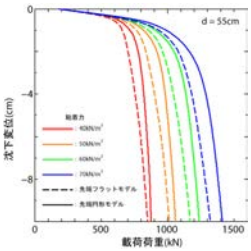
(2) 3 次元有限要素解析

2 次元有限要素解析では，地盤物性によらず必要貫入深さは変わらないという結果が得られた．しかし，縦型回転式撹拌工法による改良体の先端形状は，円形の尖状（カマボコ形）となり，支持層への貫入部の縦横形状比が先端貫入深さによって変化するため 3 次元効果が顕著になると考えられる．そのため，先端貫入深さの違いによる支持力の発揮メカニズムを検討するため，3 次元解析を行った．

2 次元解析同様，はじめに先端貫入深さによる支持力への影響を確認するために，支持層は粘性土 (粘着力 : 50 kN/m^2) を想定して，先端貫入深さを変化させた 3 次元有限要素解析を行った．それぞれの解析結果を，**図–4** に示した．さらに，粘着力を変化させた先端フラットモデルと先端円形モデル (d=55 cm) の解析結果を，**図–5** に示した．

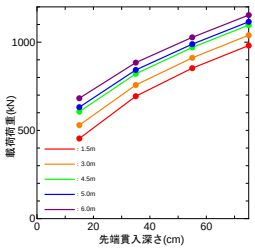
2 次元解析と同様に，先端貫入深さが大きいほど支持力が大きくなる傾向が確認できた．また，現行の設計法に用いられている先端貫入深さ 35 cm の先端円形モデルの荷重-沈下曲線は，2 次元解析と同じく許容支持力レベルでは先端フラットモデルの載荷荷重と同等であるが，極限支持力レベルでは先端フラットモデルの載荷荷重を下回っている．しかし，2 次元解析で先端フラットモデルと同程度の支持力を示していた先端貫入深さ 55 cm では，粘着力を変化させた解析結果において全てのケースで，先端フラットモデルを上回る支持力を発揮していることから，2 次元解析よりも先端貫入の寄与が大きいことを示唆している．以上の結果から，必要貫入深さを 55 cm よりも小さくできる可能性が考えられる．



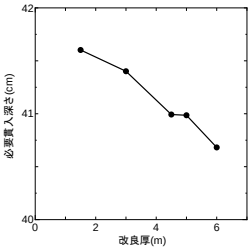


図–4 3 次元-粘性土-先端貫入 **図–5** 3 次元-粘性土-材料定数

2 次元解析結果では，先端円形モデルと先端フラットモデルの荷重-沈下変位関係が同様な曲線を描いていたが，3 次元解析では異なる．そこで，3 次元解析結果の考察では，接線交点法[2),3)] による極限支持力の評価を行う．**図–6** に，改良体長 H の異なる 5 つの解析結果に接線交点法を用いて求めた極限支持力を示し，**図–7** に，そこから求められた必要貫入深さを示した．この結果から，改良厚が大きくなるほど，必要貫入深さが小さくなる傾向が確認された．改良厚 5.0 m では，必要貫入深さは 41 cm 程度となっており，2 次元解析結果よりも小さい値となっている．このことから，3 次元解析では 2 次元解析よりも先端貫入の効果が大きく表れている事が分かる．



図–6 粘性土-改良厚



図–7 粘性土-必要貫入深さ

4. まとめ・今後の展望

本研究では，改良体の先端形状と支持層への先端貫入を忠実にモデル化した 2 次元・3 次元解析により，支持力に対する先端貫入の寄与程度を確認した．また，現行の先端貫入部周長 S を基準とした設計法で確保される支持力との比較を行った．2 次元解析で得られた結果では，改良厚・材料定数に関わらず，同一の必要貫入深さ 55 cm（貫入率 0.73）であった．一方，3 次元解析では，改良厚が大きいほど，必要貫入深さが小さくなることが確認できた．3 次元解析により改良体の支持力特性に対する 3 次元効果を適切に評価でき，2 次元解析によりも正確に必要貫入深さを評価できた．

今後は，土被りの影響に関する支持力評価や，支持層の応力・ひずみ分布の検討から，改良体の先端形状や先端貫入深さの違いによる支持力発揮メカニズムを考察したい．

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.
2) W. S. Housel, “Pile load capacity: estimates and test results,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 92, no. SM4, pp. 1–30, 1966.
3) M. J. Tomlinson, *Pile Design and Construction Practice (A Viewpoint Publication)*, Cement and Concrete Association of Great Britain, London, UK, 1977.