

砂質地盤における地中構造物と地盤の 摩擦による構造物下部地盤の応力低減効果

遠藤 宗仁¹・小宮 一仁²・真鍋 峻³・中村 充博⁴

¹正会員 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 非常勤講師

(〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

E-mail: endo.munehito@p.chibakoudai.jp

²正会員 千葉工業大学 学事顧問 工学部教授 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

E-mail: komiya@p.chibakoudai.jp

³計画エンジニアリング株式会社 技術第一部二課

(〒171-0033 東京都豊島区高田 3-5-1 サイテックビル 2F)

E-mail: manabe@keikaku-eng.co.jp

⁴植村技研工業株式会社 NOS 事業計画課 (〒171-0033 東京都国分寺市日吉町 2-30-7)

E-mail: m.nakamura@uemuragiken.co.jp

トンネルなどの地中構造物内の車両の交通量や中構造物内を流れる水の水位が変動すると、地中構造物全体の質量が変化し地中構造物下部の支持地盤に作用する応力が変化する。この応力の変化が支持地盤の破壊や沈下を引き起こす原因となることも考えられる。この地盤の応力の変化には、地中構造物周面と地盤との間の摩擦が関わっている。本研究では、室内模型実験によって、矩形の地中構造物の質量が変化した時の、構造物模型底面に作用する土圧と周面摩擦力との関係について基礎的な考察を行った。実験結果より、模型底面に作用する土圧には、構造物の総重量の変化だけではなく、構造物周面に作用する周面摩擦力が影響していることが明らかになり、摩擦力によって地中構造物下部の地盤の応力変化が低減される可能性が示された。

Key Words: *underground structure, friction, stress, earth pressure, sandy ground*

1. まえがき

トンネルなどの地中構造物下部の地盤の応力は、地中構造物全体の質量によって変化する。例えば、道路トンネルではトンネル内を走行する自動車等の交通量、水路トンネルではトンネル内を流れる水の流量の変動によって地中構造物全体の質量が変わると、構造物下部の地盤の応力に変化が生じ、またその反作用として構造物の底面が地盤から受ける土圧も変化する。このような地中構造物の質量の変動による下部地盤の応力の変化は、地盤沈下や支持地盤の破壊等の発生の要因になる場合がある。しかし、現状では地中構造物の質量の変化に伴う下部地盤の応力発生メカニズムが明らかにされていないため、設計では、地中構造物と交通荷重等の自重の合力を外力として、地盤の支持力公式を用いて下部地盤の破壊に対する安定性の検討が行われている。

一方、地中構造物の側面と地盤との間には摩擦力が作用している。地中構造物全体の質量が増加すれば、この摩擦力は鉛直上向きに作用するので、構造物下部地盤の応力の増加は低減される。現状の支持力公式等を用いた地中構造物下部地盤の安定性の検討では、この摩擦力による応力増加の低減効果が考慮されていないため、過剰な設計が行われている可能性がある。従って地中構造物の質量の増加に伴う下部地盤の応力の増加が構造物周面の摩擦力によって低減されることが示されればより合理的な設計が行えるようになり工費の節約や工期の短縮に繋がると考えられる。

本研究では、矩形の地中構造物の質量が変化した時の構造物底面地盤の応力変化に、地中構造物周面の摩擦が影響を及ぼすことを明らかにするために室内実験を行った。実験では、周面摩擦力の最大値を地中構造物の引き抜き試験で求め、地中構造物模型にすべりが発生してい

ないことを確認したうえで、周面摩擦係数が異なる地中構造物模型の質量の変化に伴う模型底面土圧を詳細に測定した。実験結果に基づき、地中構造物の周面摩擦による、構造物の質量の増加に伴う構造物下部地盤に作用する応力の低減効果について基礎的な考察を行った。

2. 室内実験の概要

(1) 実験装置^{1), 2)}

模型実験には、図-1 に示すような幅 1500 mm×高さ 1000 mm×奥行 100 mm の鉄製の土槽を用いた。なお、地盤や模型の動きを観察できるようにするため土槽前面は透明なアクリル板である。また平面ひずみの実験条件を維持するため、土圧によってアクリル板が変形しないように鉄製の格子を土槽前面に配置した。

地中構造物模型（以下模型）は、上部が開放された函型であり、図-2 に示すように、幅 270 mm×高さ 515 mm×奥行 90 mm である。模型側面には、模型と地盤との間の摩擦を変化させるために、摩擦係数が大きいサンド

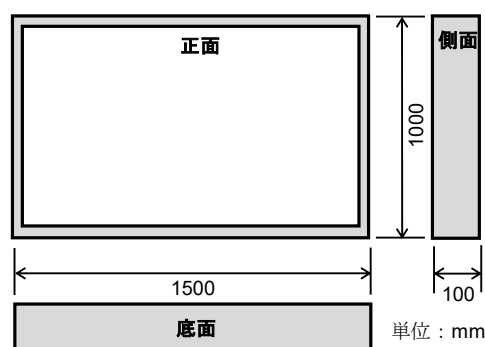


図-1 実験土槽

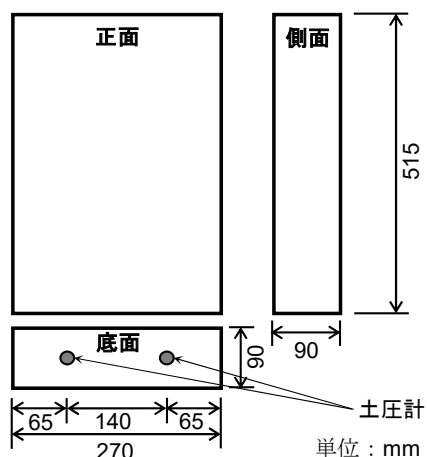


図-2 地中構造物模型の概略

ペーパーと摩擦係数が小さいテフロンシートを貼り付けた。また、地盤と接しない模型前面と背面には、摩擦係数が小さいテフロンシートを貼り付けた。

(2) 実験方法

模型実験は、図-3 に示す手順で行った。手順1では、土槽の上部から 8 号珪砂をふるいを用いて落下させて、適宜土槽の外部を木づちで叩いて 42.0 cm の厚さの地中構造物の下部の地盤を作製した。実験に用いた 8 号珪砂の土粒子の密度は 2.650 g/cm^3 である。続いて水平に堆積した地盤の上に模型を水平に置き、模型底面の土圧計によって土圧を測定した。手順2では、ふるいを用いて珪砂を函型の模型の内部も含め模型上部の高さまで珪砂を敷き詰めた。この時、模型と地盤との間に鉛直方向の摩擦力が小さくなるように模型内の珪砂の深さと土槽の珪砂の表面の高さが同じに保たれるように砂を落下させた。手順3では、土圧を安定させるために約 1 時間静置した。手順4では、模型内部の珪砂を掃除機を用いて完全に除去した後、30 分間静置した。手順5では、珪砂を模型上部まで再投入し、投入後 30 分間静置をした。

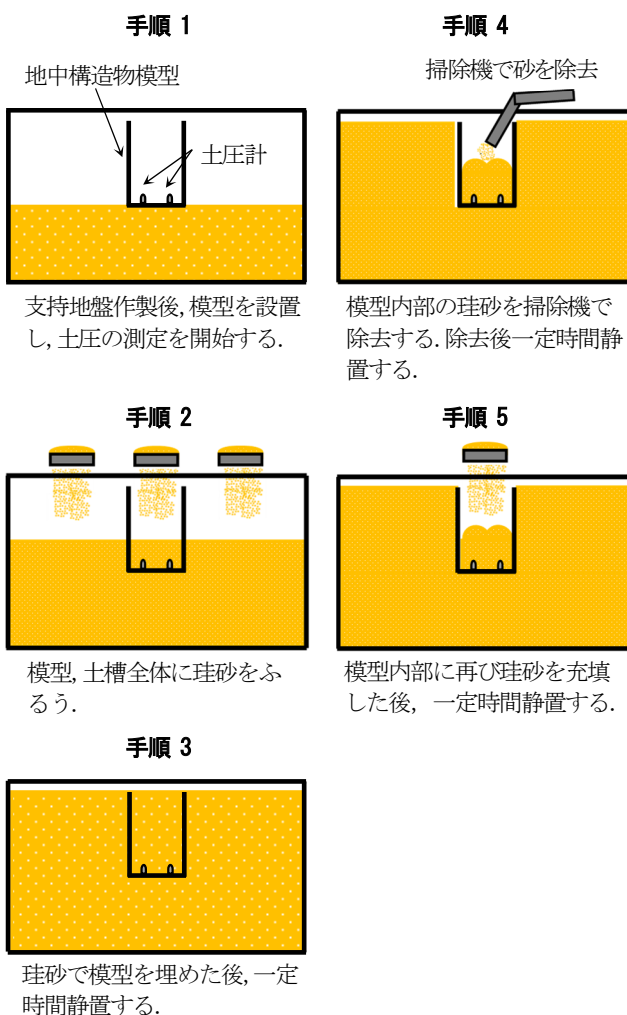


図-3 模型実験の手順

なお、土圧の測定は手順1から手順5まで継続した。別途測定した地盤密度は $\rho=1.39\text{ g/cm}^3$ である。

(3) 地中構造物模型と地盤との間の静止摩擦係数

図4に示す装置を用いて、模型とそれに接する地盤との間の静止摩擦係数を求めた。可動傾斜板の表面に8号珪砂を両面テープで隙間なく貼り付けた。傾斜板の傾きは、傾斜板の片側に取り付けたジャッキを上下させることによって変えることができる。最初、水平にした傾斜板の上に、傾斜板と接する面にそれぞれサンドペーパーとテフロンシートを貼り付けた一辺の長さが100 mmの正方形の試験片を置き、徐々に傾斜板を傾けた。そして試験片が滑り出す傾斜角 θ を測定した。この実験で得られたサンドペーパーと地盤との静止摩擦係数は $\mu=\tan\theta=0.708$ であり、テフロンシートと地盤との静止摩擦係数は $\mu=\tan\theta=0.467$ であった。

(4) 地中構造物模型と地盤との間に作用する最大静止摩擦力

地盤と模型の間に作用する最大摩擦力を求めるため、図5のような装置を用いて模型の引き抜き実験を行った。実験では、模型に設置したピアノ線を、弛ませた状態か

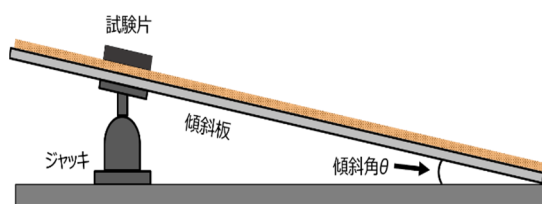


図4 静止摩擦係数の実験装置³⁾

ら等速で引っ張り、ピアノ線の張力と模型の鉛直変位を測定した。

図6は、模型にサンドペーパーを貼り付けた場合の引き抜き試験で得られた引抜荷重と模型の変位を示したものである。図から、ピアノ線の伸張に伴い引き抜き荷重が増加してゆき、引抜荷重が $P=111.2\text{ N}$ になった時に模型に変位が生じた。このことから模型と地盤の間の最大静止摩擦力は $P=111.2\text{ N}$ である。更に引き抜きを続けると、模型は上方に変位しながら引き抜き荷重は増加し、 $P=119.9\text{ N}$ をピークに減少に転じる。この模型の変位と引き抜き荷重が共に増加している間は、模型と地盤の間に完全なすべり線が生じず、トンネルに接する地盤が持ち上げられていることが観察から明らかになった。

一方、図7は、模型にテフロンシートを貼り付けた引き抜き試験で得られた引抜荷重と模型の変位を示したものである。図から、模型に変位が生じた時点に最大の引抜荷重 $P=89.0\text{ N}$ が得られた。テフロンシートを貼り付けた場合は変位が生じると引っ張り荷重は減少し、最大の静止摩擦力が最大の摩擦力になった。

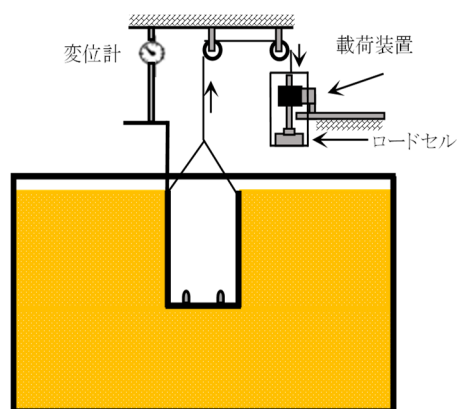


図5 引き抜き実験装置

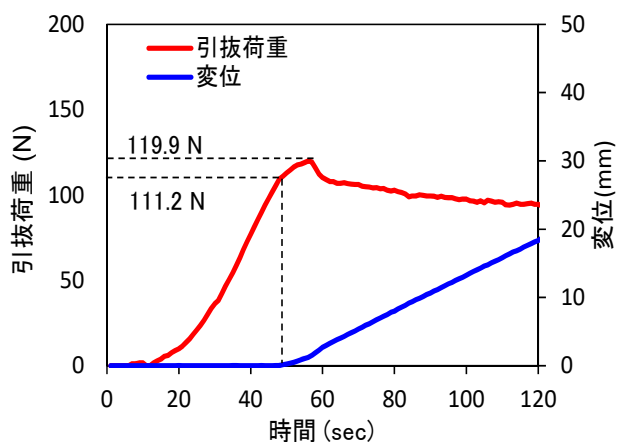


図6 サンドペーパーを貼り付けて行った引き抜き試験での引抜荷重および変位

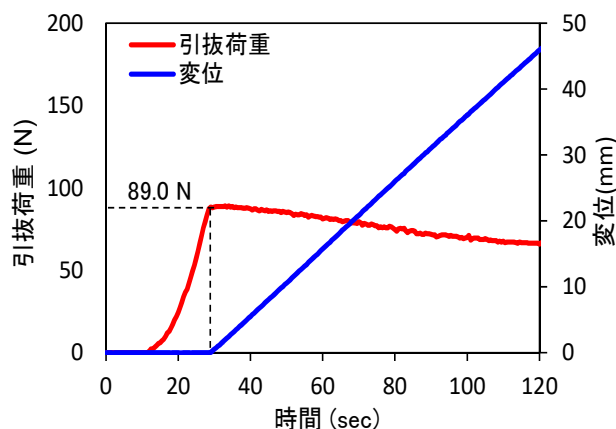


図7 テフロンシートを貼り付けて行った引き抜き試験での引抜荷重および変位

3. 地中構造物の周面摩擦が下部地盤の応力変化に及ぼす影響

図-8は、模型側面にサンドペーパーを貼り付けて行った実験で得られた、模型の底面土圧の計測結果である。図は、3回の実験で得られた底面土圧の平均値を示したものである。なお、本研究では、土圧を奥行き1m当たりの荷重の値(単位：kN/m)で表すこととする。

手順2の開始時の土圧は、模型の自重に相当する値である。手順2では、珪砂の敷き詰めに伴い126.6 (kN/m)まで底面土圧が増加した。敷き詰め完了時の土圧が静止土圧よりも大きくなっているのは、模型底面の土圧計が模型底面から僅かに突き出ているため、土圧計付近に若干応力集中が生じたためであると考えられる。手順3の静置時には、底面土圧が僅かに増加した。手順4では、模型内部の珪砂を除去したが、底面土圧は手順2の最初の土圧には戻らず戻らず44.4 kN/mの残留土圧が生じた。更に手順5において模型内部にふるいを用いて珪砂を敷

き詰めると底面土圧は再び上昇し、模型上面までの敷き詰めを完了した時点での土圧は110.5 (kN/m)になり、手順3における土圧の値よりも小さくなった。なお、3回の実験で得られた各手順での土圧の変化と平均値、および各実験の計測値の誤差を表-1に示す。

図-9は、模型側面にテフロンシートを貼り付けた場合の、模型の底面土圧の計測結果である。図は、2回の実験で得られた底面土圧の平均値を示したものである。

サンドペーパーの場合と同様に、手順2では、珪砂の敷き詰めに伴い底面土圧した。敷き詰め完了時の土圧は130.0 (kN/m)であった。模型内の珪砂を除去すると、サンドペーパーの場合よりも底面土圧は大きく減少し、手順4の土圧は手順2の開始時に近い値になった。手順5において再び模型内部に珪砂を敷き詰めると底面土圧は上昇し、模型上面までの敷き詰めを完了した時点での土圧は83.5 (kN/m)になり、手順3における土圧の値よりも小さくなった。ただし、テフロンシートの場合の手順4→手順5の再敷き詰め時の土圧の増加量は71.5 kN/m

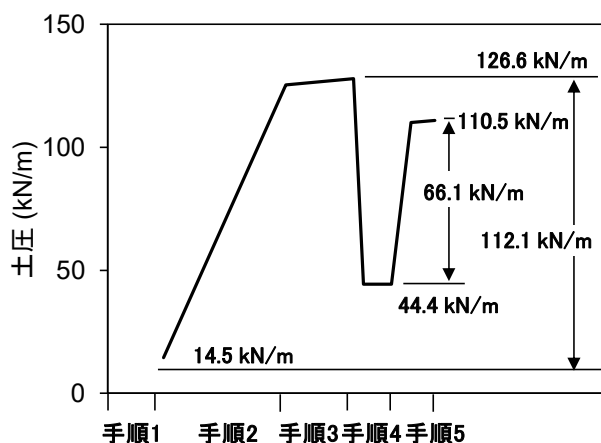


図-8 サンドペーパーを貼り付けた場合の模型実験の底面土圧の挙動

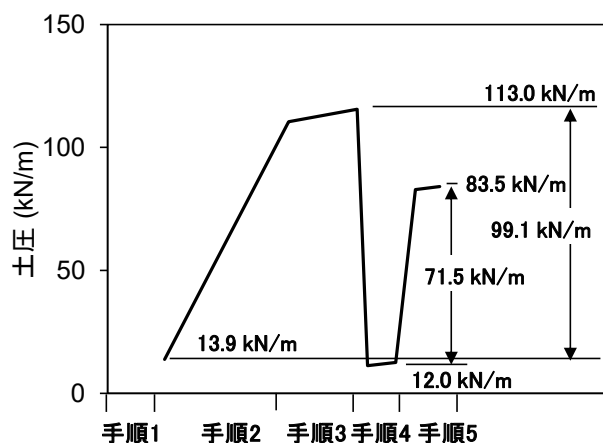


図-9 テフロンシートを貼り付けた場合の模型実験の底面土圧の挙動

表-1 各手順での土圧の変化と平均値、および各実験の計測値のばらつき

		手順2における 土圧の増加	手順3→手順4の 土圧の減少	手順4→手順5の 土圧の増加
サンドペーパーを 貼り付けた場合	実験1 (kN/m)	109.1	82.8	66.5
	実験2 (kN/m)	114.2	85.4	65.3
	実験3 (kN/m)	113.0	78.4	66.4
	3つの実験の平均値 (kN/m)	112.1	82.2	66.1
	3つの実験の誤差(%)※	2.7	4.6	1.2
テフロンシートを 貼り付けた場合	実験1 (kN/m)	111.6	111.6	71.5
	実験2 (kN/m)	86.6	90.4	71.5
	2つの実験の平均値 (kN/m)	99.1	101.0	71.5
	2つの実験の誤差(%)※	12.6	10.5	0.0

※ (実験値と平均値の差の最大値) / 実験値の平均値 × 100 (%)

であり、サンドペーパーの場合の 66.1 kN/m よりも小さくなった。テフロンシートを貼り付けた 2 回の実験で得られた各手順での土圧の変化と平均値、および各実験の計測値の誤差を表-1 に併せて示す。

以上の実験結果から、サンドペーパーを貼り付けた場合も、テフロンシートを貼り付けた場合も、模型全体の質量が変化した時の模型底面土圧の変化量は、模型全体の重量の変化よりも小さくなることが明らかになった。この要因として、模型と地盤との間の摩擦力が考えられる。即ち、手順 3 から手順 4 の間に模型の重量が減少する時には、鉛直下向きの摩擦力の作用により底面土圧の減少が小さくなる。そして、手順 4 から手順 5 の間の模型内に珪砂が敷き詰められる時には、上向きの摩擦力によって模型底面の土圧の増加が小さくなる。このため、模型内部に珪砂が敷き詰められ再び手順 3 と同じ状況になっても、模型底面の土圧は手順 3 の土圧よりも小さくなったと考えられる。

表-2 は、手順 2 における底面土圧の増加量から手順 4 と手順 5 の間の模型底面の土圧の増加量との差を求め、サンドペーパーを貼り付けた実験とテフロンシートを貼り付けた場合のそれぞれの増加量の差の比率と摩擦係数の比率を比較したものである。土圧の増加量の差の比率と摩擦係数の比率が近い値になっていることから、模型底面土圧の変化に摩擦力が影響していることがわかる。なお、表-2 に示した、手順 2 と手順 4→5 の土圧の増加量の差が、サンドペーパーの場合もテフロンシートの場合も 2. (4) に示した静止摩擦力を超えていないため、実験中に模型と地盤の間にすべりは生じていないと考えられる。

実験の数が充分ではないため、詳細なメカニズムの解明には更に実験を行うことが必要であるが、以上の結果から、地中構造物全体の質量が変化した時に、構造物の下部地盤に作用する応力の変化が、構造物と地盤の間の摩擦によって低減される可能性が示された。

5. 結論

本研究は、地盤との間の周面摩擦係数が異なる 2 種類の地中構造物模型を用いた室内実験により、砂地盤中の矩形の地中構造物の質量が変化した時の、構造物の下部地盤の応力変化と地中構造物周面の摩擦の関係について基礎的な考察を行ったものである。本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

1. 構造物の質量が減少した時は、構造物と地盤の間に鉛直下向きの摩擦力が作用するため、構造物底面の土圧の減少は重量の減少よりも小さくなる。
2. 構造物の質量が再び増加すると、構造物と地盤の間に鉛直上向きの摩擦力が作用するため、構造物底面の土圧の増加は重量の増加よりも小さくなる。
3. 以上の結果から、構造物の質量の変化に伴う構造物下部地盤に作用する土圧の変化量は、構造物と地盤の間の摩擦力によって低減される。

参考文献

- 1) 真鍋峻, 遠藤宗仁, 小宮一仁, 中村充博: 浅い砂地盤の矩形トンネルに作用する側面の周面摩擦について, 第 73 回土木学会年次学術講演会, III-578, pp.1153-1154, 2018.
- 2) Manabe, S., Endo, M., Nakamura, M. and Komiya, K.: Study on the mechanism of friction between an underground structure and sandy ground, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol. 8, No. 11, pp. 441-446, 2020.
- 3) 中塚里桜, 遠藤宗仁, 小宮一仁, 小山幸則, 小玉乃理子: 浅い地中構造物と地盤との周面摩擦に関する模型実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会, III-077, pp.153-154, 2016.

(2021. 8. 6 受付)

表-2 サンドペーパーを貼り付けた場合とテフロンシートを貼り付けた場合の底面土圧増加の低減量の比率と摩擦係数の比率

	(手順 2 の土圧増加量) - (手順 4→5 の土圧増加量)	土圧増加量の比 (テフロン/サンドペーパー)	摩擦係数の比 (テフロン/サンドペーパー)
サンドペーパーを 貼り付けた場合	46.0 kN/m	0.60	0.66
テフロンシートを 貼り付けた場合	27.6 kN/m		

BASIC STUDY ON A REDUCTION EFFECT OF THE LOAD REACTION
PRESSURE ON A TUNNEL INVERT
CAUSED BY THE FRICTION BETWEEN TUNNEL AND GROUND

Munehito ENDO, Kazuhito KOMIYA, Shun MANABE and Mitsuhiro NAKAMURA

When vehicles travel through a tunnel or when water flows through it, the gross weight of a tunnel and pressure of the earth acting on the bottom of the tunnel simultaneously increase. This change in earth pressure may induce risks such as ground settlement and ground failure. Additionally the change in the stress state in the vicinity of an underground structure influences the friction between underground structure and the ground to a certain extent. In this study, laboratory experiment was conducted using an underground structure model of rectangular shape in order to clarify the effect of the surface friction between the underground structure and the sandy ground with change in the gross weight of the model. Based on results obtained from this experiment, the earth pressure acting on the bottom of the underground structure is significantly influenced by the gross weight of the structure as well as the surface friction acting on the surface of the structure. Furthermore, the degree of changes in the earth pressure acting on the bottom of the underground structure due to changes in the mass of the structure is possibly reduced by the surface friction acting on the structure surface.