

地中構造物端部形状が周辺地盤に及ぼす影響

Effects of the shape of the edge of an underground structure on the surrounding ground

石田哲朗*, 川中島寛幸**

Tetsuro Ishida, Hiroyuki Kawanakajima

*工博, 東洋大学助教授, 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

**修(工), ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目 2 番 6 号)

An increasing number of underground structures are recently being constructed under numerous restrictive conditions. Interaction between the ground and the structure due to neighboring construction is therefore inevitable. No effects of such an interaction have, however, been fully identified. In this study, ground deformations and stress changes in the ground owing to the relative displacement between the ground and the structure were examined based on the results of various model tests and numerical analyses. In particular, the effects of varying shapes of the edge of an underground structure on the ground deformation and stress changes in the ground were identified.

Key Words: underground structure, earth pressure, model experiment, FEM analysis,

キーワード: 地中構造物, 土圧, 模型実験, FEM 解析

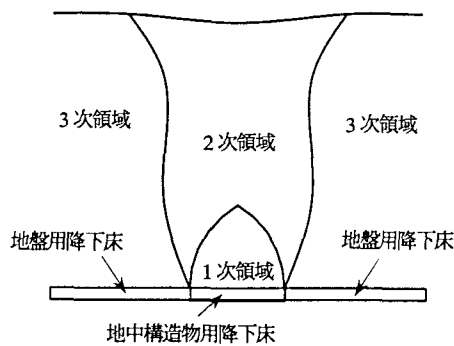
1. はじめに

地下空間は貴重な空間資源として強震都市への改築, 都市機能・都市環境の維持・向上に活用されつつある。種々の地下建設技術は, 多くの施工実績や研究成果などにより, 確立されてはきているものの, 今後, 複雑な条件下において建設するためには, 改善すべき点を多々残している。その取組むべき点の一つとして, 既設と新設する各種地下構造物に生じる相互問題を統一的に評価する手法の構築が挙げられる。現在, 都市部の新設工事の多くは近接施工となり, 大抵の場合既設構造物に何らかの影響を及ぼすが, その影響に関する情報量は満足な状況にはない。実際, 近接施工においては, 既設構造物および新設構造物の設計思想の違い, または地盤～構造物間の相互作用に関する情報量の不足によって生じる工期の遅れ, 建設費の増大など多くのトラブルが生じている。さらに, 新たな土地開発によって生じる既設構造物上方地盤の応力変化や, 大きな地震などの自然現象によって生じる既設構造物～地盤間の変位や変形に伴う地盤内応力変動もトラブルを引き起こす要因として考えられる。しかしながら, このような場合に既設構造物が受ける周辺地盤の挙動は十分に解明されているとは言いがたい。当然, 構造物の重要度によって対処の方法も異なり, 基礎工事やトンネル工事などの工事の種類によっても影響する範囲や変位の大きさは異なる。また, 周辺地盤が砂質土か粘性土によっても影響度に差異が生じる結果となる。この地盤の挙動が十分に予測できれば対策工も容易になるが, 詳細に把握することは難しい。

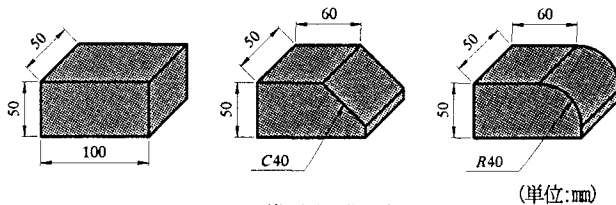
本研究は, 既設構造物直上地盤の応力変化, ならびに地盤～構造物間の相対変位に伴って生じる影響に着目し, 既設構造物への作用土圧特性, および構造物周辺地盤の変形メカニズムについて解明することを試みたものである。このことによって, 前述した問題に対応していくための指標の構築を目指している。特に本論文では, 地中構造物端部形状の違いによって生じる影響の把握に主眼を置き, 地中構造物建設時に比較的多く用いられる形状を有する 3 種類のモデル (矩形モデル, 斜面形状を有するモデル, アーチ形状を有するモデル) を用いて地盤～構造物間の基礎的事象を想定した模型実験および数値解析を実施し, 砂質土地盤内に位置する既設構造物が新設工事等により外力を受けたときの地盤挙動および, それに伴って変化する地盤内の応力挙動を明らかにした。

2. 相対変位に伴う地盤内部挙動の測定

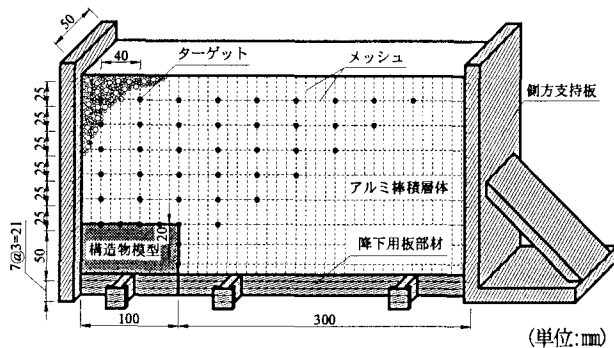
地盤挙動の解明を試みるため, 村山¹⁾, 村山・松岡²⁾ はトンネル掘削に伴う砂質地山の挙動を降下床実験より, 図一1 に示した地中構造物と一体となって移動する「1 次領域」と 1 次領域に追従して移動する「2 次領域」, および地盤用降下床とともに変位する領域を示す「3 次領域」に分かれることを明らかにした。これらは, 降下量の増加に伴い降下床への作用土圧は減少し, ある一定値に落ち着くということで, そのときの土圧は 1 次領域の重量とほぼ等しいと結論付けられている。また, 足立ら^{3), 4)} によると, 先述した各領域はグラウンドアーチが形成されない浅い



図一1 相対変位に伴う地盤の挙動領域



図二 構造物模型概要



図三 二次元降下床模型実験概要

土被り厚とグランドアーチ効果が期待される深い土被り厚とでは異なる分布を示すとのことである。なお、当然ながらトンネル構造物自体の変形も、それぞれの領域形成に大きく影響する。

これらの既往の研究では、主に構造物の変形に伴う地盤変位を題材としたものが多く、今後は既設の構造物が受ける影響を明らかにしていく必要があると考える。そこで本研究では既設構造物を対象とし、地盤と構造物間に相対変位が生じた際、その形状の違いによって生じる地盤挙動のメカニズムの把握を試みている。降下の対象は構造物（模型）と地盤（アルミ棒積層体）の2パターンで実施している。

2.1 二次元降下床模型実験

本研究では、既設構造物に鉛直方向の相対変位が生じた場合を想定し、形状の違いに伴う構造物近傍地盤の二次元的挙動を把握するため、異径アルミ棒を用いた降下床実験を採用した。実験は砂質土の代用として、砂の力学的性質が相似すると考えられている $\phi 1.6$ mm および $\phi 3.0$ mm で長さが 50 mm のアルミ棒を、豊浦砂の粒径加積曲線の勾配と等しくなるように重量混合比 3 : 2（単位体積重量

$\gamma_d=21.17$ kN/cm³、内部摩擦角 $\phi=28^\circ$ 、初期間隙比 $e=0.25$ ）に混合したものを用いている⁹⁾。なお、内部摩擦角は積層体として詰めたアルミ棒を入れた試料箱を徐々に傾斜させていき、試料箱の表面のアルミ棒が自然崩落したときの角度である。

構造物の模型は、木材を加工して図一2 に示す直方体、端部に C40 mm の斜面を持つ形状、ならびに端部に R40 mm の円弧形状を持つ3種類（以下、形状1、形状2、形状3と記す）を作成した。図一3 に二次元降下床模型実験の概要を示す。アルミ棒積層体へは鉛直方向に 20 mm および 25 mm 間隔、水平方向 10 mm 刻みでメッシュ（図中の破線）を描き込み、木材によって作成した降下用板部材を引き抜くことで、地盤と構造物それぞれに鉛直方向の相対変位を与えた。このときのターゲット（図中の黒丸）とメッシュの移動量から地盤挙動を把握する。降下用板部材1枚の厚みは 7.0 mm であり、それぞれの構造物模型形状で各3段階、合計 21.0 mm 降下による計測を実施し（土被り厚 100 mm においては9段階、合計 63.0 mm の降下を計測）、構造物模型天端からの土被り厚は 100 mm と 150 mm の2パターンとした。ターゲットおよびメッシュの移動量の計測は、降下用板部材を1枚引抜くごとにアルミ棒積層体をデジタルカメラによって撮影し、その画像から求めている。

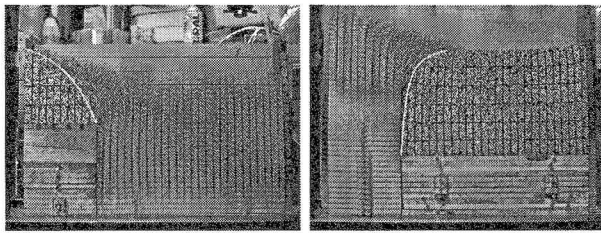
2.2 地盤内部変形の観察

ここでは前節に示した模型実験の結果に基づき、目視によって相対変位に伴う地盤挙動について考察する。特に相対変位に伴って生じる異なる領域形成の把握を目的とする。各領域は図一4～図一8 へ示すように画像焦点を調整することで確認できる。それぞれ図の(a)は構造物模型に焦点を合わせ、計測毎の画像を重ね合わせて1次領域を示し、図の(b)は地盤降下用板部材に焦点を合わせて、同様に画像を重ねて3次領域を表したものである。また、図(a)及び図(b)のいずれにも属さない領域が2次領域となる。実線(白)は合成された画像に見られる境界面である。

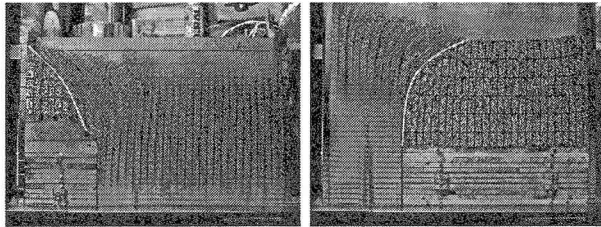
(1) 構造物端部形状の違いによる影響

図一4～図一6 に着目し、構造物端部形状の違いによる影響について観察すると、形状2、形状3そして形状1の順で1次領域の増大する傾向が確認される。ただし、形状2および形状3については、非常に似た範囲で1次領域が形成されている。これは構造物模型～アルミ棒積層体間のせん断抵抗力が大きく、目視観察からせん断面は構造物模型より上方に生じたと判断でき、その結果として、形状2と形状3の1次領域が類似したと考えられる。すなわち、1次領域の形成と構造物形状の関係については、天端幅と構造物端部形状の角度および構造物～地盤間の摩擦角が、支配的な要素であると判断する。

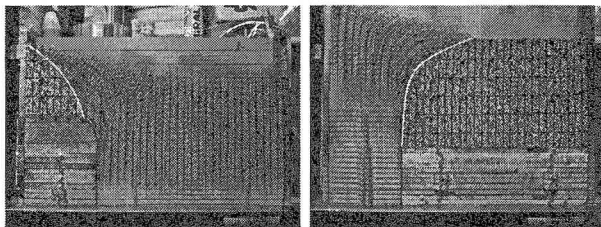
図一4～図一6 の図(b)からは、構造物形状の違いに伴う3次領域の差異が確認でき、形状1による3次領域が最も乱れが少ないことがわかる。また、1次領域同様、形状2と形状3による3次領域は類似した結果となった。したがって、構造物形状の違いは、1次領域のみならず3次領域



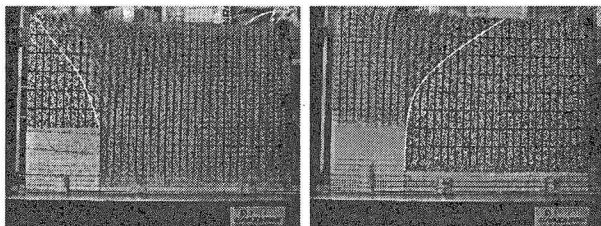
(a) 1次領域 (b) 3次領域
図—4 形状1, 地盤降下, 土被り厚 100 mm



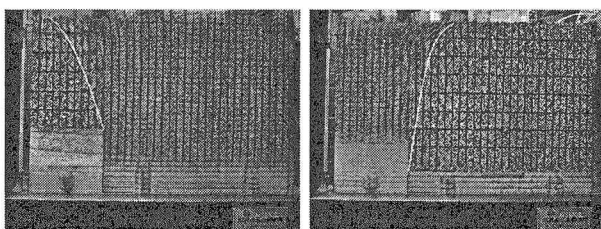
(a) 1次領域 (b) 3次領域
図—5 形状2, 地盤降下, 土被り厚 100 mm



(a) 1次領域 (b) 3次領域
図—6 形状3, 地盤降下, 土被り厚 100 mm



(a) 1次領域 (b) 3次領域
図—7 形状1, 地盤降下, 土被り厚 150 mm



(a) 1次領域 (b) 3次領域
図—8 形状1, 構造物降下, 土被り厚 150 mm

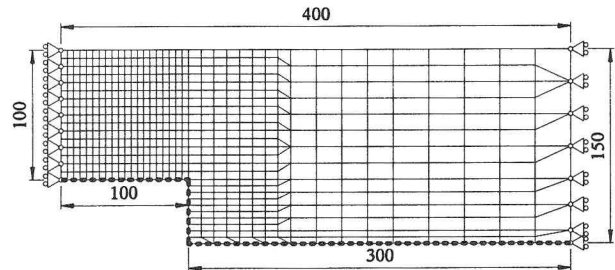
の形成にも影響を及ぼすことがわかる。

1次領域, 2次領域および3次領域の各境界面の線型(勾配)は, 本実験における種々の形状において概ね等しい。ただし, それぞれの領域は形成される根元位置に応じて, 上下に平行移動していることが見て取れる。

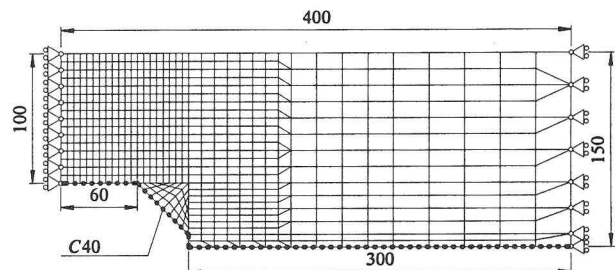
(2) 移動対象の違いによる影響

表—1 解析パラメータ

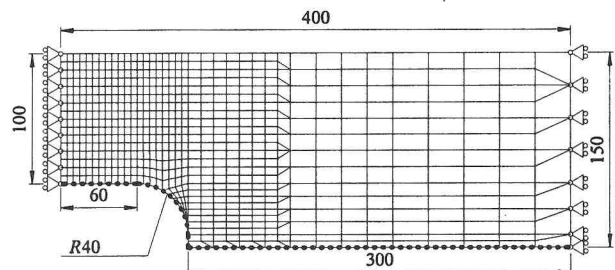
ヤング率 E kN/m ²	ポアソン比 ν	粘着力 c kN/m ²	内部摩擦角 ϕ°	硬化率 Hk kN/m ²
2648.7	0.27	9.81	28	1049.7



(a) 形状1



(b) 形状2



(c) 形状3

図—9 解析モデル (単位:mm)

図—7, 図—8 との比較から降下対象の違いによる各領域の形成について考察すると, 1次領域の形成は, 地盤を降下させた場合(図—7)より構造物の降下に伴う領域(図—8)の方が大きいことがわかる。また, 3次領域については, 構造物の降下に伴う領域の方が, 地盤の降下に伴う領域よりも大きく形成されている。つまり, 構造物天端へ受働的な土圧が作用するように相対変位を生じさせた場合, 地盤の乱れが最も大きくなり, 逆に構造物へ主働土圧が作用するように相対変位を生じさせた場合は, 地盤の乱れは最も小さくなると思われる。

2.3 数値解析結果との比較

数値解析にはFEM用い, Drucker-Pragerの降伏条件に従う二次元弾塑性解析を実施した。解析ではアルミ棒積層体を均一地盤材料であると考え, 降下床模型実験のスケール

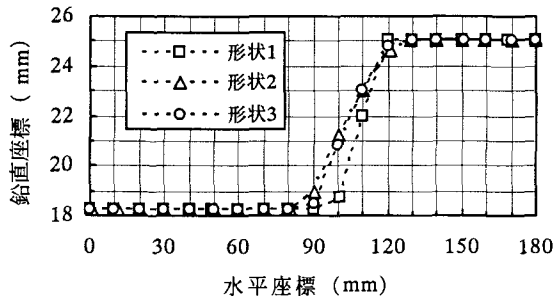


図-10 構造物降下 (実験値)

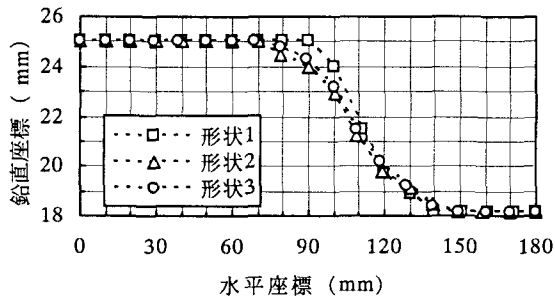


図-11 地盤降下 (実験値)

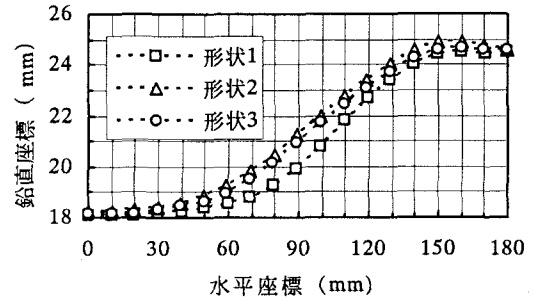


図-12 構造物降下 (解析値)

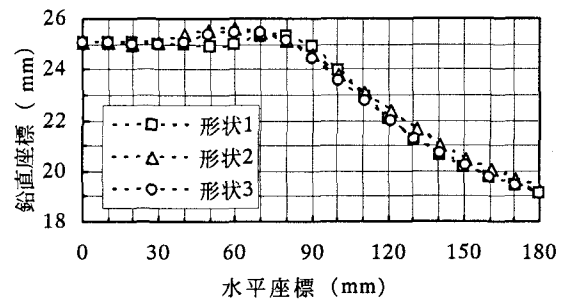


図-13 地盤降下 (解析値)

で解析を行っている。なお、地盤は連続体として扱い、降下量 7.0 mm、構造物模型天端からの土被り厚 100 mm について比較・検討を行った。解析に用いた各パラメータは表-1 に示す通りで、ヤング率 E および硬化率 H_k は降下床模型実験結果から逆解析した値を使用している。ここでの硬化率とは、降伏後の応力～ひずみ曲線の勾配である。なお、本解析は解析領域の自重による初期圧縮を避けるため比重を 0 とした。

図-9 は模型実験のアルミ棒積層体をモデル化した解析条件図であり、側面は水平方向面を拘束し、底面および構造物模型周面へは降下床模型実験から得られた値を強制変位 (図中の破線部) として入力している。

図-10～図-13 は、構造物模型または降下床を 7.0 mm 降下させた際の鉛直座標 25 mm におけるメッシュおよびターゲットが移動した位置を示す。図中の縦軸 (鉛直座標)、横軸 (水平座標) に示した座標は、構造物模型左上端部を原点としている。図-10 と図-11 は実験結果を、図-12 と図-13 は解析による出力結果を示し、種々の構造物端部形状を比較している。実験値、解析値ともに形状 2 と形状 3 による地盤挙動が近似しており、形状 1 の結果とは差異が生じている。ここで、実験結果に比べて解析出力値における破壊域が大きく形成されているのは、二次元弾塑性解析では広域な破壊領域が生じて応力再配分を解析してしまうためである。

以上の結果から、地盤～構造物間の相対変位に伴う種々の領域は前節で述べたように、構造物端部形状ならびに移動対象の違いの影響を受けて形成されていると判断できる。

3. 弾性域における構造物天端土圧

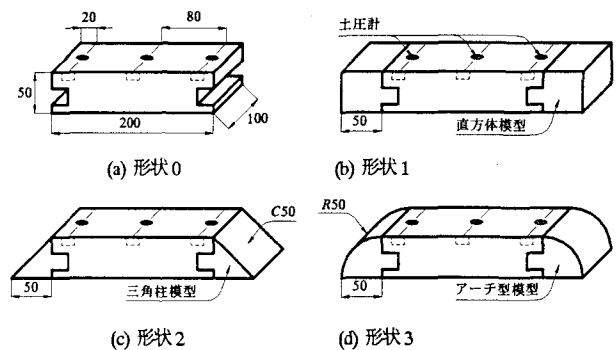


図-14 構造物模型概略図 (単位:mm)

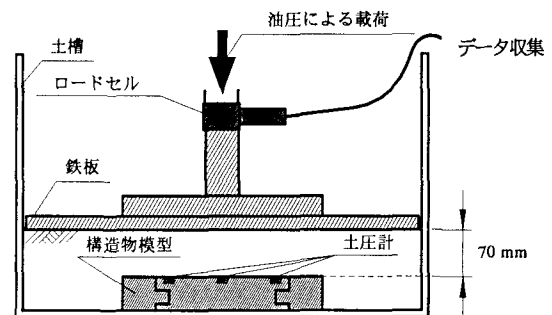


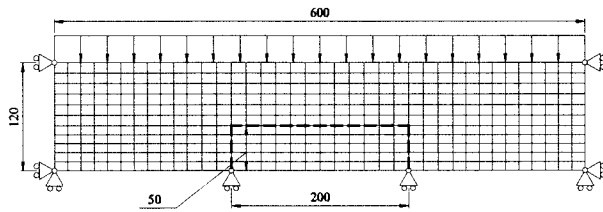
図-15 実験装置の概要

通常、地下構造物の設計時に考慮される荷重は、施工時または施工後に作用すると考えられる値に安全率を換算したものが用いられる。しかし、近年の高度開発化による土地利用状況を考えると、設計時に予測していた荷重で、必ずしも安全性が確保できるとは言い難いところがある。

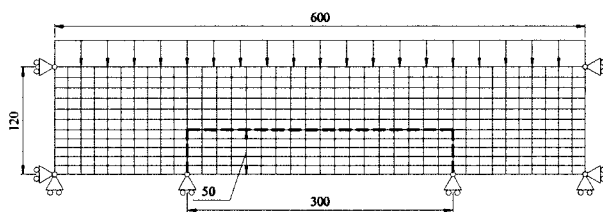
ここでは、地盤の塑性変形が生じない範囲の上載荷重を

表—2 解析パラメータ

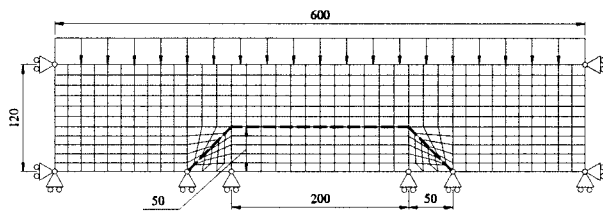
材料名	ヤング率 E kN/m ²	ポアソン比 ν	粘着力 c kN/m ²	内部摩擦角 ϕ°
ステンレス	2.1×10^8	0.275	0.098	45
珪砂6号	1.5×10^5	0.300	0.098	35



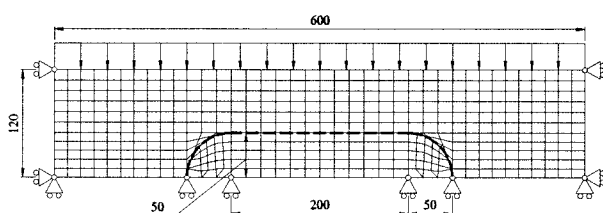
(a) 形状0



(b) 形状1



(c) 形状2



(d) 形状3

図—16 解析モデル (単位: mm)

与え、その際に既設構造物へ作用する鉛直土圧の挙動の把握を試みた。特に、構造物端部形状の違いによる作用土圧への影響に着目し、模型実験ならびに二次元 FEM による数値解析を実施した。

3.1 鉛直土圧の計測方法

図—14 に本実験に用いた構造物模型の概略図を示す。構造物模型はステンレスで4パターン作製し、それぞれ模型上面(模型天端)3箇所に $\phi 27.7$ mmの小型土圧計を設置

した。模型形状は以降、矩形模型を形状0、端部から土圧計までに距離がある矩形模型を形状1、端部に面取りを施した模型を形状2、そして端部にアーチ形状を有する模型を形状3と称する。なお、応力計測時には模型周面ヘテフロンシートを敷き、周面摩擦の低減を図った。実験方法は図—15 に示す通り、土圧計受圧部からの土被り厚を70 mm 取り、珪砂6号を $D_r=60\%$ に積層した後、上方から加圧、減圧を繰り返して载荷させた。载荷過程は、206 kN/m²/min の速度で3分間加圧した後、1分間静止させ、加圧時と同様の速度で減圧している。以上の操作を各形状に対して3サイクル繰り返した。

3.2 二次元 FEM 解析の条件

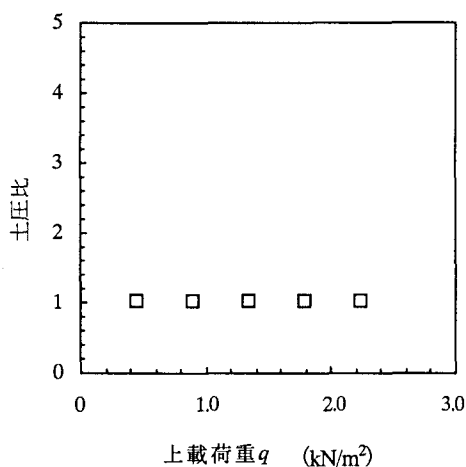
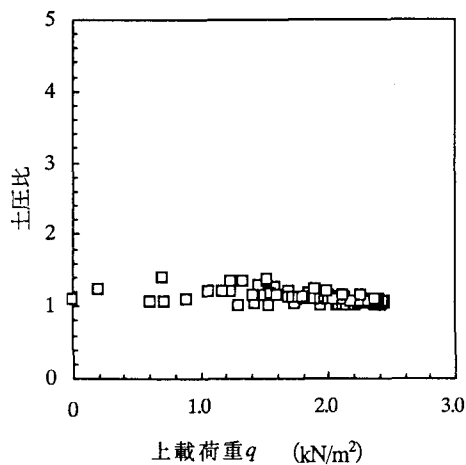
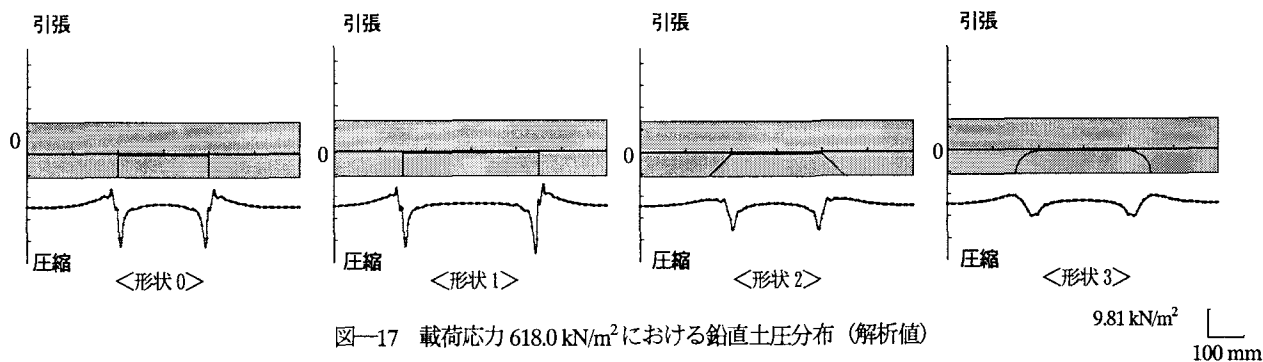
解析には表—2 に示すパラメータを用いて、二次元弾性解析を実施した。ここで弾性解析を選定した理由としては、前述した模型実験における载荷応力が地盤に塑性変形を生じさせない範囲(Mohr-Coulomb の降伏条件下において破壊しない範囲)で実施したことによる。図—16 は、模型実験の形状別にモデル化したものである。側面は水平方向面を拘束し、底面は鉛直方向変位を拘束している。また、構造物と地盤との間には接触面(図中破線)を設定した。解析領域上方からの载荷応力については、1つのモデルにつき5段階の载荷応力を設定し、模型実験の加圧過程をモデル化させた。解析で想定した载荷応力は、127.5, 245.3, 372.8, 490.5, 618.0 kN/m²の5パターンである。

3.3 構造物天端へ加わる鉛直土圧の特性

図—17 は618.0 kN/m² 負荷された状態を想定し、解析をしたときの水平断面における鉛直応力分布を示したものである。図中の網掛け部分は解析領域を示し、水平断面は、構造物模型上面より上方5 mm (図中、横軸)の位置で出力している。なお、縦軸は作用応力、横軸は水平位置を示しており、作用応力については引張力を正值、圧縮力を負の値として扱っている。

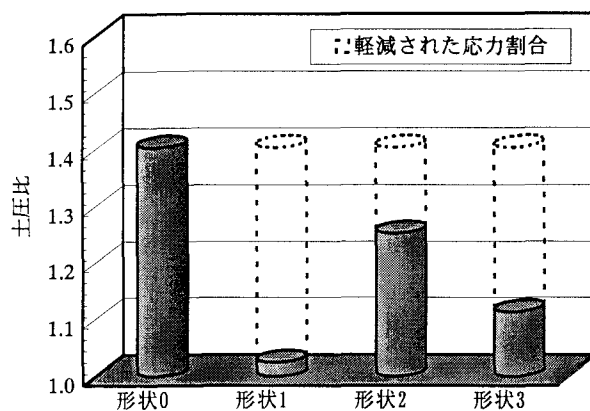
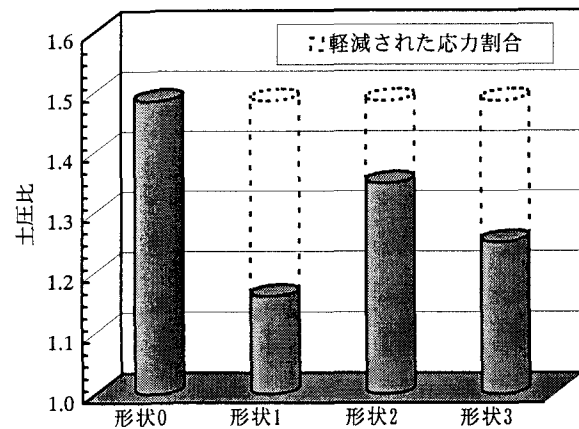
各形状ともに応力集中の影響は端部の局所的な位置に見られるものの、その分布特性は異なるものであり、端部形状がなだらかになるほど、応力の差が小さくなる傾向が見受けられる。また、载荷に伴い生じる地盤内応力の変化は、構造物形状の変化が生じる位置近傍において最大値を示すことがわかる。

図—18 は形状1における模型天端中央部に設置した土圧計出力値と天端左右に設置した土圧計出力値の比を示したものである。この比を土圧比(左右鉛直土圧の平均値/中央部鉛直土圧)と称す。図—18 の縦軸はこの土圧比で、横軸は载荷応力である。図—18 の実験値と解析値の比較から明らかのように、土圧比は载荷応力に関わらず一定値を示すことがわかる。この土圧比の性質を利用し、種々の形状について比較したのが図—19 であり、土圧比と構造物模型形状の呼び名で整理してある。全ての形状において土圧比が1以上を示す結果となった。これは、载荷に伴い応力集中が地中構造物周辺に生じ、構造物端部近傍に土圧が大きく作用することを意味する。図中の破線部は、



図一18 土圧比と上載荷重の関係

形状0による出力値を基準とし、形状を変えることによって軽減されたそれぞれの土圧比を示す。結果から、模型実験、FEM 解析とともに同様の傾向が見られ、形状1のように構造物端部から距離が離れると、左右計測位置に設置された土圧計出力値は緩和され、土圧比は軽減される。また、形状2と形状3の結果を比較すると、構造物の端部形状は角を持たない方が応力集中による鉛直土圧を軽減すると判断できる。すなわち、円形形状を有する構造が最も端部



図一19 形状効果

に集中する鉛直土圧を緩和することができ、本実験で行った3種類の端部形状の中では、図一17からもわかるように、形状3が最もその点で有効である。

4. 砂を用いた昇降実験

本章では、地盤と構造物間に相対的な鉛直方向の変位が生じた場合を想定し、構造物端部形状の違いによる作用土圧の影響を模型実験によって検討する。試験装置は底面が

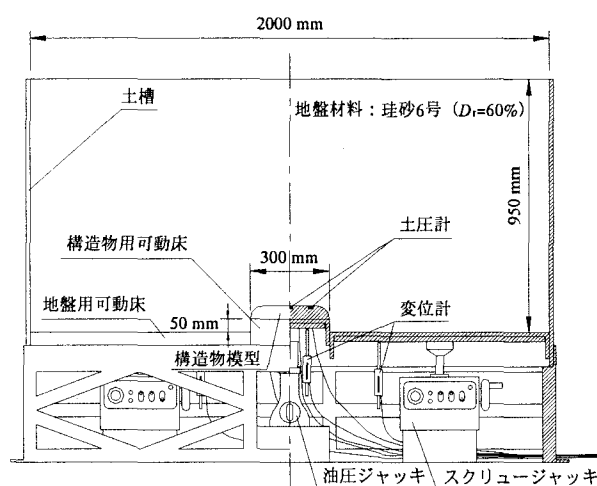


図-20 実験装置の概要

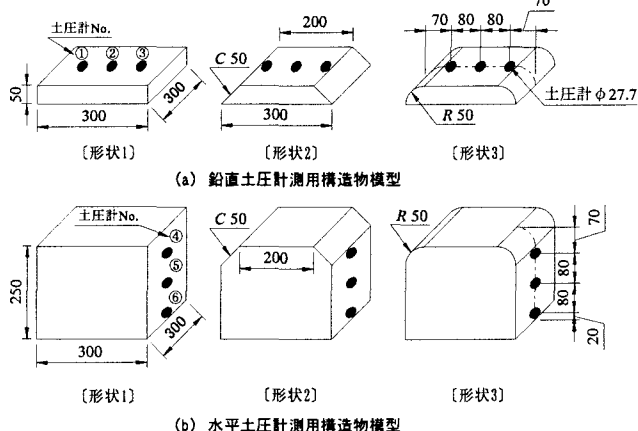


図-21 構造物模型概略図 (単位:mm)

表-3 実験条件

計測土圧	移動対象	移動方向	土被り厚 (mm)
鉛直土圧	構造物用可動床	上昇	700
			500
			300
		降下	700
			500
			300
水平土圧	地盤用可動床	上昇	500
		降下	
	構造物用可動床	上昇	
		降下	
	地盤用可動床	上昇	
		降下	

上昇あるいは降下可能なものを作成した(以下、これを昇降模型実験と記す)。

4.1 昇降模型実験

図-20 に試験装置概要を示す。地盤材料は珪砂 6 号を相対密度 $D_r=60\%$ に調整して用い、相対変位に伴い構造物に作用する土圧を計測する。地盤～構造物間の相対変位は、土槽底面にあたる地盤用可動床と構造物用可動床をそれぞれ別にジャッキの上下動(1 mm/min)によって制御し与

えた。構造物模型は、図-21 に示したものを用地盤用構造物天端における鉛直土圧および構造物側壁への水平土圧を計測している。各土圧計の配置は種々の形状において同位置にある。実験は表-3 へ示す条件の下、3 種類の形状に対して実施した。なお、土槽内面および構造物模型周面へはテフロンシートを敷き、周面摩擦の低減を図った。

4.2 計測結果とその考察

図-22 に構造物用可動床および地盤用可動床を移動させたときの形状 1 の土圧計 No.①における出力値の挙動を示した。横軸へ上昇を正とした可動床の変位量を、縦軸は初期土圧で正規化した作用土圧で表わした。両者の正規化土圧の変動幅は、地盤移動に伴う正規化土圧の挙動より、構造物移動による方が大きく変化する結果を得た。ここの計測結果によれば、地盤～構造物間に同一の相対変位が生じる場合は、構造物自体が変位する方が作用土圧の変化が大きく、危険側になることを示唆している。

図-23 は構造物可動床の移動に伴い、模型側壁へ作用する土圧の挙動を示す。図は形状 1 による結果である。図-22 と比較すると、構造物天端へ受働的な土圧が作用する場合、構造物側壁へは主働的な土圧が作用するように相対変位に伴う天端と側壁への各直応力は相反する関係にあることが明らかである。また、正規化土圧の変動幅は、構造物の端部に近い位置ほど大きな変動幅が見られる。すなわち、構造物端部近傍に最も応力の乱れが生じていると考えられる。

図-24 および図-25 は、種々の模型形状、土被り厚における構造物天端への主働土圧(緩み土圧)と受働土圧を示したものである。図-24、図-25 とともに構造物天端中央位置における出力値(土圧計 No.②)より端部に近い位置(土圧計 No.①および③)の方が大きく変化する傾向が見られる。また、形状 2 および形状 3 のように構造物端部を削った形状の場合は、正規化土圧の変動が著しい。形状 2 と形状 3 の結果を比較すると、アーチ形状を有する形状 3 が若干ではあるが、正規化土圧の変動を抑制できる傾向にある。

5. 結 論

本研究では、砂質地盤内における地中構造物の上端部形状の違いによる地盤変形および構造物への作用土圧の影響を把握することを目的として、地盤と構造物の相対変位を考慮した数種の模型実験ならびに FEM 解析を行った。本研究によって得た結論を要約すると以下ようになる。

- (1) 地中構造物と地盤の間に相対変位が生じた際の砂質地盤の挙動は、1 次領域から 3 次領域までの 3 つの領域に分けられる。この領域の形成には、構造物上端部形状が大きく依存する。
- (2) 構造物降下に伴い生じる 1 次領域は、地中構造物端部が欠けた形状(形状 2、形状 3)の方が面積は小さい。これは、構造物降下時に作用する鉛直土圧も小さくなることを示唆する。

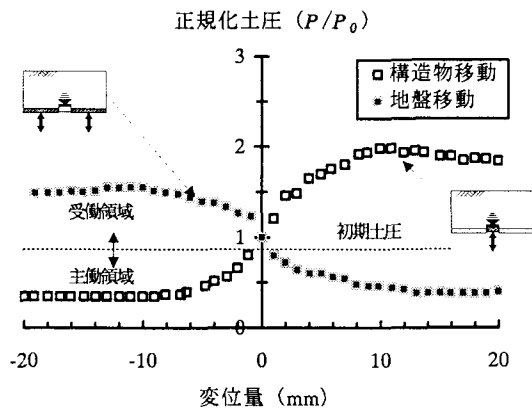


図-22 移動対象の違いによる影響 (形状1・土圧計 No. ①)

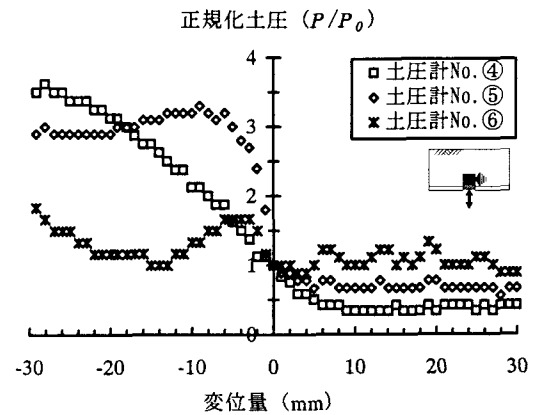


図-23 側壁への水平土圧挙動 (形状1・構造物移動)

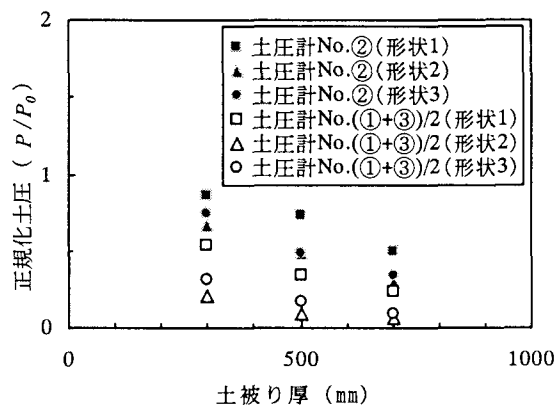


図-24 構造物降下に伴う土圧 (主働土圧)

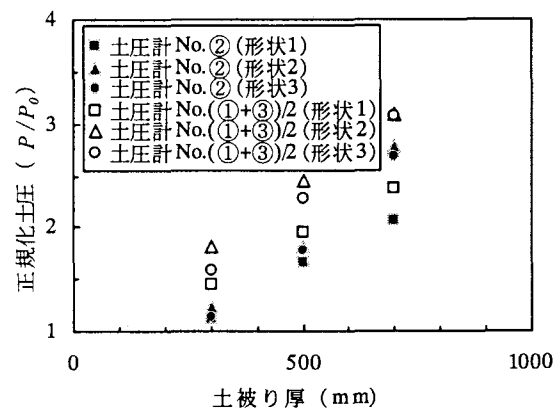


図-25 構造物上昇に伴う土圧 (受働土圧)

- (3) 構造物天端へ主働土圧 (緩み土圧) が作用するような相対変位が生じた場合 (構造物降下の場合) より, 受働土圧が生じるような相対変位が生じた場合 (地盤降下の場合) の方が地盤内応力の変化は大きい。
- (4) 構造物天端への作用土圧は, 構造物形状に変化が生じる位置の近傍において最も大きく作用する。
- (5) 応力集中の影響は, 載荷応力に無関係に一定の割合で生じる。また, 応力集中の緩和には, 構造物端部形状に角を持たないものがよい。すなわち, 円形形状を有する構造が最も端部に集中する鉛直土圧を緩和することができ, 本研究で行った3種類の端部形状の中では形状3が適合する。
- (6) 構造物天端へ主働側の土圧が作用するような相対変位が生じた場合, 構造物側壁には受働側の土圧が作用し, 構造物天端に受働側の土圧が作用するような相対変位が生じると, 構造物側壁へは主働側の土圧が作用する, というように相反する関係にある。
- (7) 構造物天端へ主働側の土圧が作用する場合, 天端中央部より側方部の方が作用土圧は小さい。構造物天端へ受働側の土圧が作用する場合は, 天端中央部より側方部の方が大きな土圧が作用する。
- (8) 構造物端部を欠いた形状にすることで, 構造物天端へ

作用する緩み土圧を軽減することができる。

- (9) ここでの計測結果では, 地盤変動によって生じる土圧挙動と構造物変動によって生じる土圧挙動を比較すると, 前者の方がその変動幅は小さい。

最後に, 本研究を行うに当たり, 本学環境地盤工学研究室の卒論生であった桐竹孝徳, 大河聡, 野口健洋君らの助力を得た。彼らの労に対して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 村山朔郎: 砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧, 京都大学防災研究所年報 第11号 B, pp.549-565, 1968.
- 2) 村山朔郎・松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第187号, pp.95-108, 1974.
- 3) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・上野洋: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木学会論文報告集, 第358号, pp.129-136, 1985.
- 4) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・上野洋: 被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下, 土木学会論文報告集, 第370号, pp.85-93, 1986.
- 5) 尼田正男: 土質工学における基礎の支持力実験装置への新しい試み - 異径アルミ棒を地盤材料として -, 工業教育, Vol.40, No.2, pp.23-27, 1992.

(2004年4月16日 受付)