

## 埋設管路の引上げ・引下げ抵抗に関する研究

地盤工学分野

大城 泰久

### 1. まえがき

下水道で用いられるような大口径埋設管路(外径2~3m)では、建設コストの削減や環境問題に対して有効であるという理由から浅埋設化が進んでいるが、集中豪雨などによる地下水位の上昇に伴って管路が浮上した事例が報告されている。また、管路が埋設されている地盤が、圧密や近接工事などの影響によって部分的に圧縮され沈下したり、近接したシールドの通過や薬液注入、凍上などによって部分的に浮き上がると、管路はしばしば破損する。これらはいずれも管路と地盤が相対沈下するために生じる現象であるが、このような相対沈下に伴って埋設管にどのような土圧が生じるかは未だによく分かっていない。

本研究では、まず地下水位の上昇による埋設管路の浮上現象を取り上げ、大口径管路を飽和地盤に埋設し、これを引上げる二次元遠心実験を行って、地盤が発揮する浮上抵抗を種々の条件下で測定し、要因分析を行う。次に、管路と地盤に相対沈下が生じる時の土圧の発現機構を非線形弾性解析によって検討し、その解析手法を構築する。

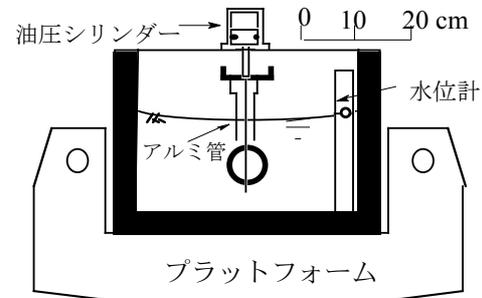


図-1 模型と実験装置

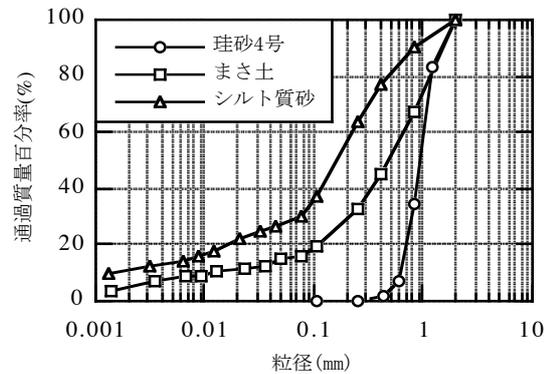


図-2 各試料の粒径加積曲

### 2. 浅埋設される大口径管路の浮上抵抗に関する研究

#### (1) 実験方法

実験に用いた模型管は、硬質アルミ製で、外径  $D=6.9\text{cm}$ (原型で 2m)、管厚 4.7mm、長さ 16.2cm、重量 28.4g/cm である。図-1 に模型と実験装置の概要を示す。

地盤材料には、珪砂 4 号(S0#4)、まさ土(S16)、シルト質砂(S30)の 3 種類を用いた。図-2 に各試料の粒径加積曲線、表-1 に材料特性を示す。模型地盤の作成は S0#4 地盤では、気乾状態で口径 9mm の漏斗を用いて高さ 48cm から容器に落下させ、S16 地盤と S30 地盤では、6~9 層に分けて締固める方法で行った。

実験で設定した管頂での土被り高と管頂からの水位高さを表-2 に示す。実験は 3 種類の地盤材料ごとに表-2 に示す条件で行った。全実験数は 18 ケースである。

実験方法は、模型管を模型地盤中に埋め、模型を遠心加速度 29G 場に置き、水タンク兼用のプラットフォームに空気圧を送って地盤水位を上昇させ、(1)地盤全体を飽和(C シリーズ)、(2)地盤の一部を飽和(B シリーズ)、(3)乾燥および不飽和地盤(A シリーズ)の状態で、

表-1 各試料の材料特性

地盤材料*	原型		模型作成時		飽和時		原型		模型作成時		飽和時	
	$D_{\text{max}}$ mm	$G_s$	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	w %	$c_d$ tf/m <sup>2</sup>	$\phi_d$ deg	$c_d$ tf/m <sup>2</sup>	$\phi_d$ deg	$c_d$ tf/m <sup>2</sup>	$\phi_d$ deg
S0#4	2.0	2.65	1.75	1.58	1.31	1.55	0	2.0	45	1.5	45	
S16	2.0	2.71	70	1.92	1.42	1.70	10	2.3	38	0	38	
S30	2.0	2.67	115	1.86	1.29	1.70	12	4.6	32	0	32	

\* S0#4: 珪砂4号、S16: まさ土、S30: シルト質砂。

表-2 管の土被り高と管頂からの水位高

シリーズ区分	土被り高 H	管頂からの水位高 $H_w$
A	1.1D	0
	1.1D	0
B	1.1D	0.55D
	1.1D	1.1D
C	1.1D	1.1D
	0.5D	0.5D
	0.15D	0.15D

- O は模型管の外径 - 各条件とも土被り高は O

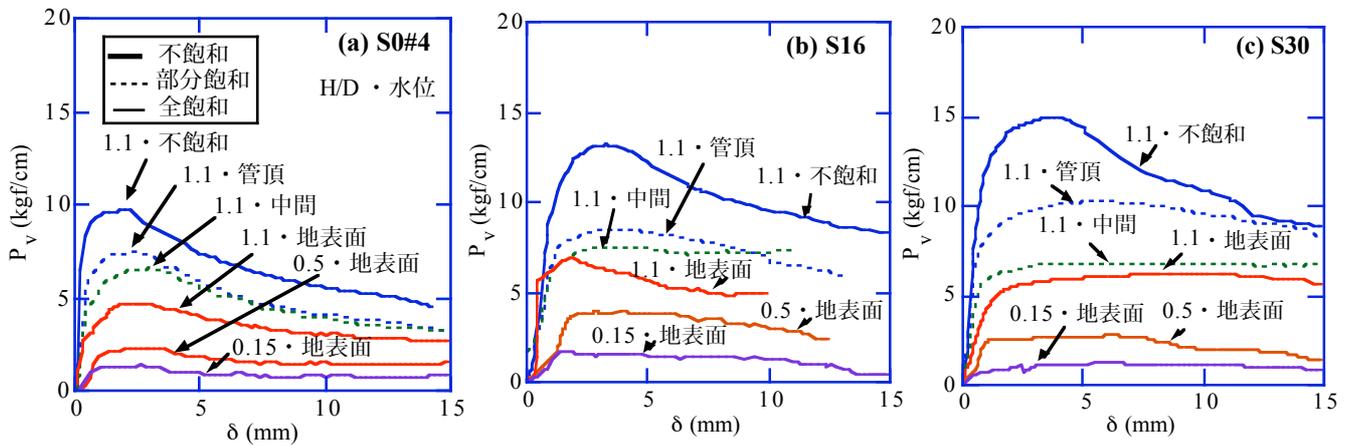


図-3 引上げ力  $P_v$  - 引上げ量  $\delta$  関係

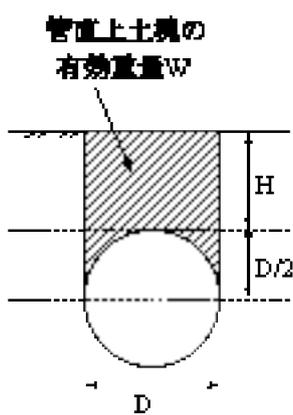


図-4 管直上土塊の有効重量  $W'$

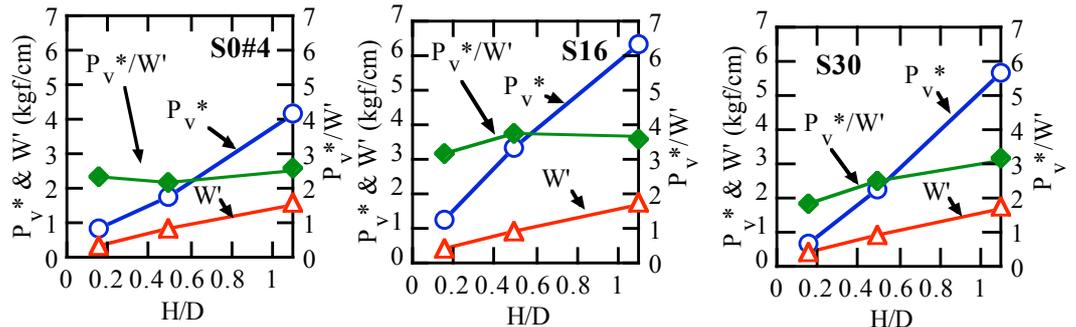


図-5 全飽和地盤の  $P_v^*$ ,  $W'$  および  $P_v^*/W'$  の H/D による変化

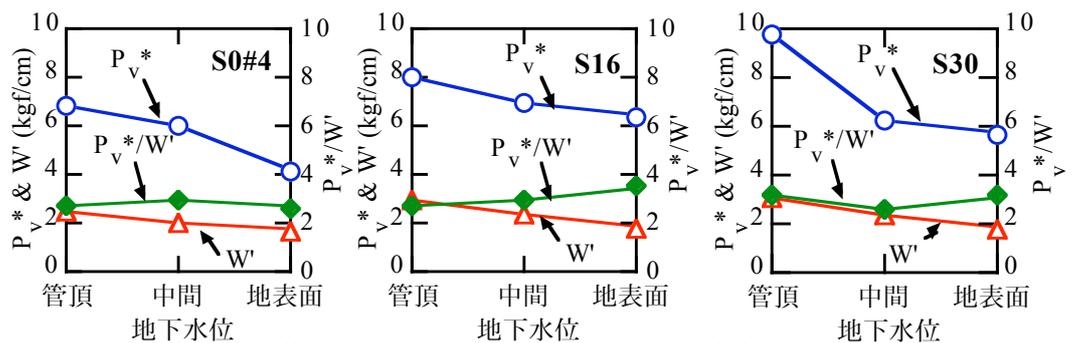


図-6 部分飽和地盤の  $P_v^*$ ,  $W'$  および  $P_v^*/W'$  の地下水位による変化

油圧シリンダーに接続した 2 本の鋼棒( $\phi 4\text{mm}$ 、摩擦を切るため、薄いアルミ管に収納)によって一定スピード(1mm/min)で引上げ、鋼棒に取り付けたロードセルと引上げ装置上部に取り付けた変位計により引上げ力  $P_v$  と引上げ量  $\delta$  を測定した。地盤水位はガラス面に付けた水位計のフロートにより測定した。模型管断面には水が出入りできるように穴を数カ所開けたアクリル板を詰めた。

## (2) 実験結果

図-3 に、実験で得られた引上げ力  $P_v$  と引上げ量  $\delta$  の関係を模型スケールで示す。

また、図-5 と図-6 は、 $P_v$  の最大値から管自重を差引いた値  $P_v^*$ 、図-4 に示す管の肩部を含む管直上土塊の有効重量  $W'$ 、および両者の比  $P_v^*/W'$  を、全飽和地盤の H/D(図-5)、ならびに部分飽和地盤の水位位置(図-6)に対してプロットしている。 $P_v^*$  は  $W'$  よりも常に大きく、全飽和地盤では  $W'$  の 1.8~3.7 倍、部分飽和地盤で

は 2.6~3.6 倍の値となっている。

図-7 は、H/D=1.1 の不飽和(乾燥)条件と完全飽和条件における各地盤の地盤変形を示している。点線、破線、実線は、管の引上げ前、 $P_v$  がピークを過ぎて地盤変形が明瞭となった時点( $\delta \approx 4\sim 5\text{mm}$ )、引上げをほぼ終了した時点( $\delta \approx 10\sim 14\text{mm}$ )をそれぞれ表す。各地盤ともせん断面はほぼ直線状で、水平面となす角度  $\alpha$  は S0#4 の不飽和(乾燥)地盤で  $64^\circ$ 、飽和地盤で  $76^\circ$ 、S16 地盤では不飽和地盤で  $55^\circ$ 、飽和地盤で  $80^\circ$ 、S30 地盤では不飽和地盤で  $60^\circ$ 、飽和地盤で  $75^\circ$  となり、各地盤とも飽和地盤の方が不飽和地盤よりもやや大きい。また、飽和地盤で H を変化させても  $\alpha$  はそれほど変わらず、さらに、部分飽和地盤の水位中間では、下の方から飽和地盤の  $\alpha \rightarrow$  不飽和地盤の  $\alpha$  に変化していた。

## 3. 引上げ・引下げ抵抗に関する解析的研究

### (1) 解析の対象とした遠心実験

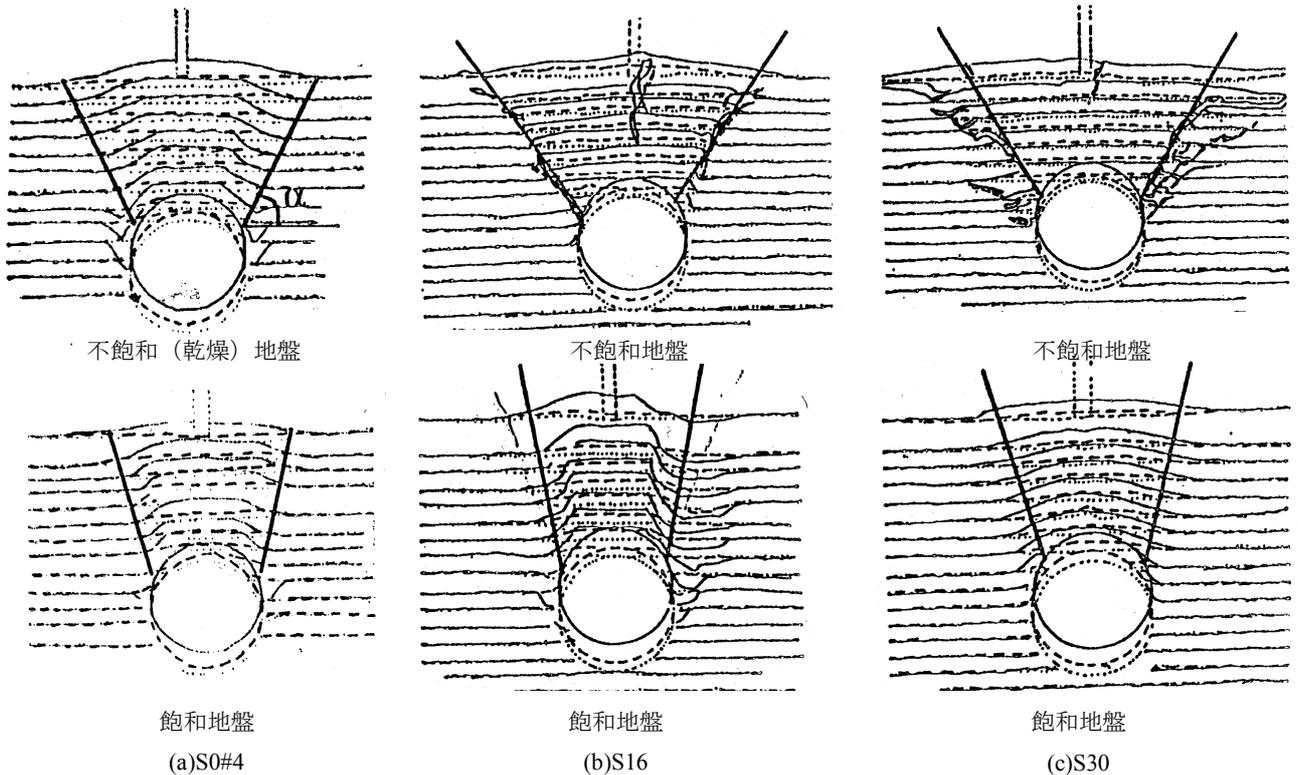


図-7 管の引上げに伴って生じた地盤変形(H/D=1.1)

計算の対象とする遠心実験は、永田(1993)が行った引上げ実験と、村中(1996)が行った引下げ実験である。これらは相似則の成立が検証されている。地盤材料の性質を表-3に、実験条件を表-4に示す。

表-3 地盤材料の性質

地盤材料	$G_s$	$U_c$	$\rho_{dmax}$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{dmin}$ g/cm <sup>3</sup>	$W_{opt}$ %	$W$ %	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$D_f$ %	$D_c$ %
乾燥砂(S0)	2.7	1.8	1.58	1.32	—	0	1.43	47	91

表-4 実験条件

	Dp cm	H/D	Model		D cm	G	幅 cm	地盤 材料	密度
			H cm	基礎厚 cm					
引上げ	60	2	18	10	9	6.7	33	乾燥砂	密
引下げ			8	18	4	15	45		ゆる

## (2) 地盤材料の構成式

地盤材料の応力~ひずみ関係の非線形性と応力依存性を表現しうる Duncan-Chang モデルを構成式として使用した。このモデルは図-8 に示すように三軸圧縮試験で得られた土の応力~ひずみ曲線を双曲線で近似し、体積変化をポアソン比 $\nu_s$ の変化によって表現する。

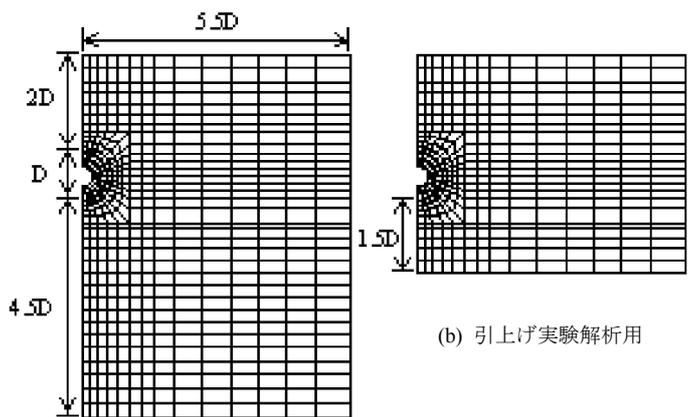
今回の解析では、土のヤング係数  $E_s$  についてはこの構成式を用いて逐次計算を行うが、ポアソン比 $\nu_s$ については一定値を与えた。

## (3) FEM 計算の方法

図-9 に計算に用いたメッシュを示す。解析は、実験模型の対称性を考慮した判断面モデルで行った。断面の幅は、境界の影響が出ないように管径の5倍の幅をとり、基礎厚については実験と同じにした。

土とパイプ要素には2次8節点のアイソパラメトリック要素を用い、管面と土の間には6節点の Curved Parabolic Joint 要素を挿入した。また、Joint 要素の単位奥行き当りの垂直剛性率は、 $k_n=1000\text{kgf/cm}^2$  とし、せん断剛性は完全滑動条件の  $k_s=0\text{kgf/cm}^2$  とした。

計算は、まず全体に実験と同じ応力状態となるように自重応力を載荷した。その後、引き上げ実験では管底部の1節点に、引下げ実験では管頂部の1節点に強制変位を与た。強制変位は、引上げ実験に対する解析では、引上げ開始から変位0.1cmまでを0.0005cmピッ



(a) 引下げ実験解析用

(b) 引上げ実験解析用

図-9 FEメッシュ図

チで与え、その後1.6cmまでを0.005cmピッチで与えた。次に、引下げ実験では、引下げ開始から変位0.18cmまでを0.0009cmピッチで与え、その後2.88cmまでを0.009cmピッチで与えた。

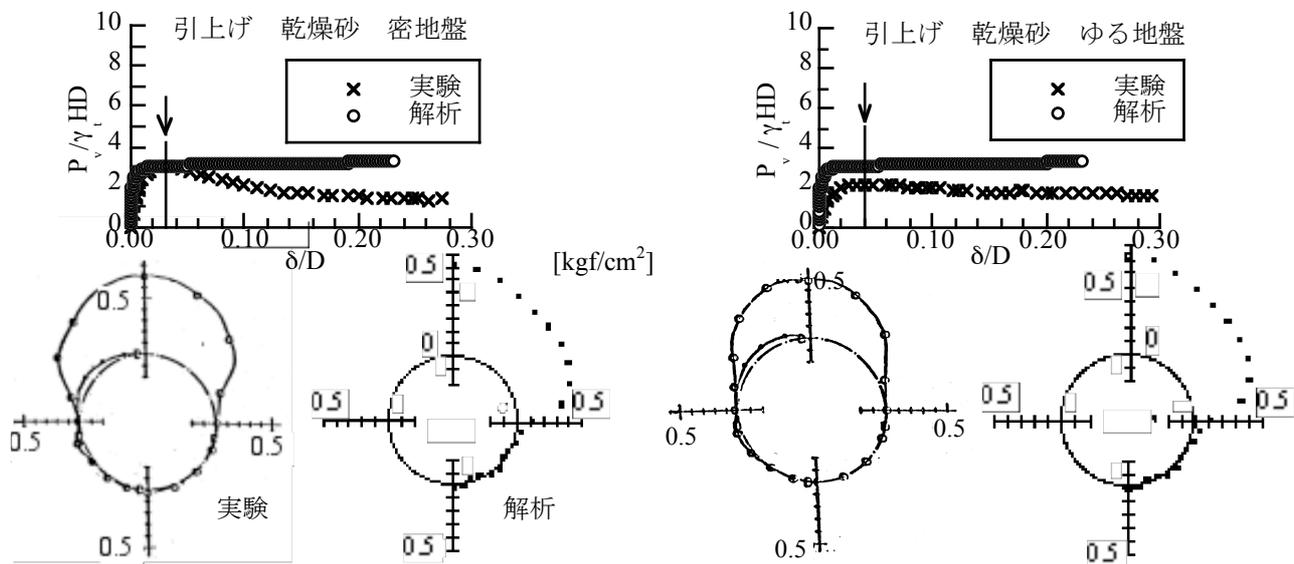


図-10 乾燥砂(S0)の引上げ実験に対する比較

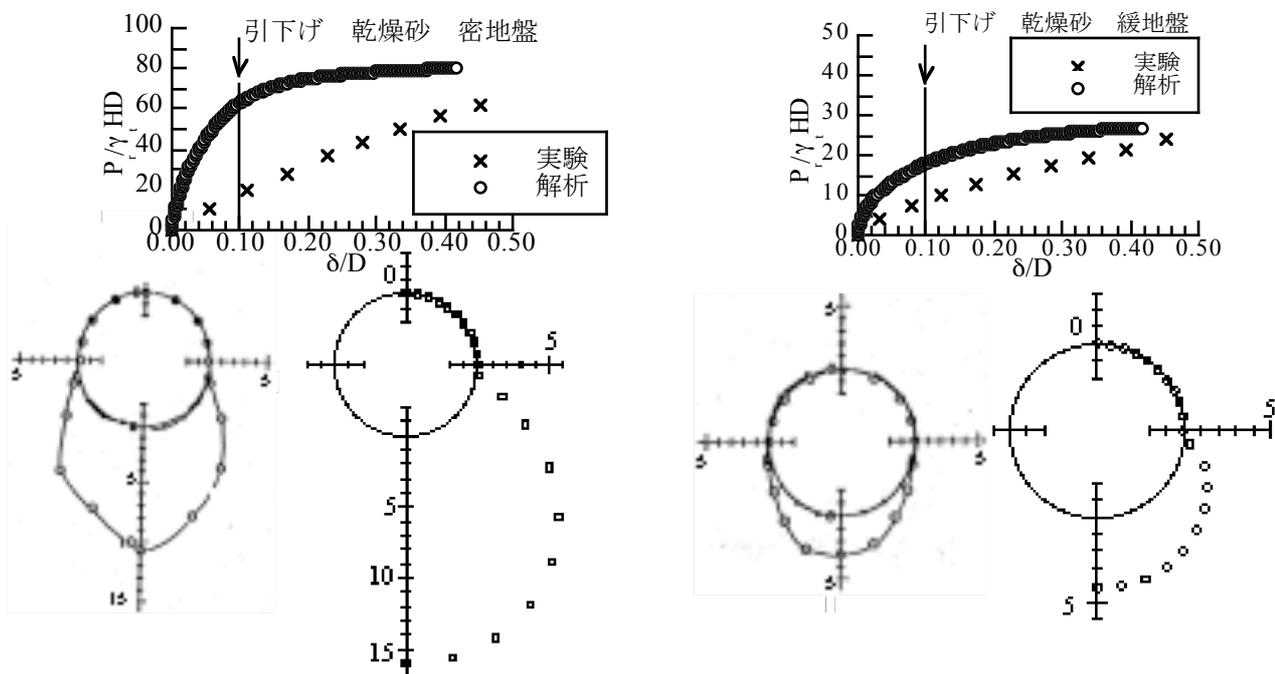


図-11 乾燥砂(S0)の引下げ実験に対する比較

#### (4) 解析結果と実験結果の比較

乾燥砂(S0)の引上げ実験に対する解析結果と実験結果の比較を図-10 に、引下げ実験に対する比較を図-11 に示す。図は、引上げ・引下げ抵抗力  $P_v/\gamma HD$  と変位量  $\delta/D$  の関係、および矢印で示した時点の土圧分布を示している。

引上げ実験に対する解析では、密詰め地盤で引上げ抵抗力、土圧分布とも実験結果にかなり良い近似を示すが、緩詰め地盤ではいずれも解析値の方がやや大きくなった。また、両地盤とも解析値の方が引上げ力の立ち上がりが急であり、土圧が働く領域も実験に比べて広がっている。

引下げ実験では両地盤とも、変位初期に解析値の引下げ抵抗力は実験値に比べてかなり大きくなっているが、引下げ量が増加するにつれて実験、解析値は近づく傾向を示し、土圧分布形は割合よく似ている。

#### 4. 結論

浅埋設される大口径管路の引上げ抵抗力を遠心場で測定した結果、引上げ抵抗力は、水浸時においても管直上土塊の有効重量の 1.8~3.7 倍となることが分かった。これより、すべり面で発揮されるせん断抵抗を無視し、管直上土塊の有効重量のみを用いて浮上安全率を求める慣用計算法は過剰な安全率を与えると結論される。

また、二次元引上げ・引下げ遠心実験に対する FEM 非線形解析を実施した結果、土圧の管頂、管底への集中傾向や引上げ抵抗~引上げ量の関係は良好な結果が得られたが、引下げ抵抗~引下げ量の関係に関しては解析の方が過大となった。したがって、今回の解析によって、ある程度は現象を再現することができたが、この解析ではポアソン比を一定としたため、土のダイレイタンシー挙動による影響を正確に再現することが出来ず、この点を改良することが今後の課題として残った。