

# たわみ性埋設管の遠心模型挙動に対する FEM弾性解析

吉村 洋<sup>1</sup>・東田 淳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株)鴻池組 技術研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜1-20-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558-0022 大阪市住吉区杉本3-3-138)

遠心実験で精度良く測定したたわみ性埋設管の土圧・変形挙動を弾性FEMによって解析した。解析では、実験容器内壁に働く摩擦の影響と土の変形性の応力依存性・非線形性を考慮するため、地盤材料の重量と変形係数を地盤の深さによって変えた。解析結果は、管剛性、埋設方式、地盤材料を変化させた22ケースの遠心実験の結果と良好な近似を示し、各要因による管挙動の変化メカニズムを明確にできた。特に、仮設矢板の引抜き過程に対する解析から、管挙動が矢板抜け跡の空洞とその周辺地盤のゆるみ領域の出現に支配されることを見出し、さらに、管剛性と地盤材料の影響が矢板引抜き時に極めて顕著に現れるという実験事実は、これらの要因によって矢板抜け跡の空洞とゆるみ領域の発達程度が異なるために生じると説明できた。

**Key Words** : buried flexible pipe, finite element method, elasticity, centrifuge model test, earth pressure

## 1. まえがき

たわみ性埋設管の挙動は土と構造物の相互作用として決まるが、現行のたわみ性埋設管の設計はこの観点に立脚していないため、実施工において種々の問題を引き起こしている。そこで著者らは、現行設計法に代わる設計法の構築を目指して、たわみ性埋設管の土圧・変形挙動を遠心実験<sup>1)</sup>によって詳細に調べ、管の挙動と影響要因を明らかにした。これと並行して、著者の一人が現場実験<sup>2)</sup>と遠心実験<sup>3)</sup>によって調べた剛な埋設管の力学的挙動を弾性理論解析<sup>4)</sup>とFEM弾性解析<sup>5)</sup>によって検討し、剛な管では土を弾性体と仮定しても十分な精度で管に作用する土圧を再現できることを確かめた。

著者らのこれまでの研究によって判明した埋設管の力学的挙動に関する基本事項は以下の通りである。(1)土と構造物の相互作用としての埋設管の挙動を支配する主な要因は、管面の境界条件、地盤側方の境界条件、土と管の相対剛性の3つである。(2)既往の解析では管面境界条件を結合として扱われることが多かったが、現在使用されているプレキャストの埋設管の表面は平滑であり、管面で発揮される摩擦は接触する土の種類と状態によって少し異なるがいずれも非常に小さく、実際上は完全滑(摩擦なし)と見なし得る。(3)埋設管の挙動は埋設方式によって大きく異なるが、その違いは地盤側方の境界条件の相違として統一的に解釈できる。(4)実施工で問題となる管の変形はたわみ率が5%程度であり、この範囲では現在供用されているたわみ性埋設管は線形弾性体と

見なせる。(5)土の変形特性が応力依存性と非線形性を有することは無視できないが、その影響よりも管面や地盤側方の境界条件の影響の方がかなり大きいようである。

本報告では、以上の研究成果に基づいて、土を弾性体と仮定し、管剛性、埋設方式、地盤材料を変化させて実施した22ケースのたわみ性埋設管の遠心実験<sup>1)</sup>に対する詳細なFEM解析を行い、解析結果と実験結果の比較を通してたわみ性埋設管の実用的設計法としてのFEM弾性解析の可能性を検討する。弾性解析を選んだのは、以下の理由による。すなわち、たわみ性埋設管の土圧・変形問題はかなり複雑であり、これを理論的に扱おうとすれば、土の強度・変形特性の応力依存性、非線形性、異方性、時間依存性、締固めなどの施工過程で導入される応力経路依存性、および強度の硬化と軟化を網羅した解析を行う必要がある。しかし、実際にはこれらを扱える構成式の構築(あるいは選択)と入力定数の決定は簡単でなく、さらに、逐次計算を行う必要があるため計算量が膨大となる。したがって、このような精密な解析を行ったとしても設計手法として実際的であるかどうかについては疑問が残る。一方、前述の(5)から、この問題に対しては境界条件の影響が大きいと推定されるため、土の変形性の応力依存性と非線形性を応力レベルに応じた変形係数を用いることによって表わせば、土を弾性体と仮定しても実際の挙動をあまり無理なく再現できる可能性があり、もしこれが確認できれば実用上の価値は高く、設計法として使用できると思われる。

表-1 解析の対象とした遠心実験

模型管	模型地盤		埋設方式
	地盤材料	密度	
F管 M管 R管	乾燥砂	ゆる密	Ditch-S Embk. Ditch-0
F管	乾燥砂 まさ土 シルト質砂	ゆる	Ditch-S Embk.

表-2 地盤材料の一次性質

地盤材料	$G_s$	粒径最大 (mm)	75 $\mu$ m 未満(%)	$U_c$	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)
乾燥砂	2.65	1.4	0	1.75	1.58	1.32	---
まさ土	2.71	2.0	16	70	1.92	1.37	11.4
シルト質砂	2.67	2.0	30	115	1.86	1.18	13.5

表-3 模型地盤の密度と強度定数

地盤材料	密度	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$c_d$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi_d$ (deg.)
乾燥砂	ゆる	0	1.43	0	37
	密	0	1.55	0	43
まさ土	ゆる	10	1.50	0.09	38
シルト質砂	ゆる	12	1.50	0.30	32

本報告で用いたFEM解析手法は、文献6)で示した解析手法に以下の改良を加えて新たに開発したものである。(1)実験容器内壁に働く摩擦の影響を解析に取り込み、解析結果と実験結果を直接、比較した。(2)自重応力レベルと対応する割線変形係数を地盤の各深度に与えることによって土の変形性の応力依存性と非線形性を考慮した。(3)実験で観測された地盤変形から仮設矢板引抜き時のゆるみ領域の範囲を推定し、その領域の変形係数の値を小さくした。(4)引抜かれる仮設矢板に働く摩擦の影響を考慮した。

なお、これまで汎用プログラムを用いたたわみ性埋設管の挙動を解析した例は多いが、内容はいずれもケースヒストリーに留まっており、かつ解析の対象とした計測結果は信頼性が確認されていない例が大半であるため、解析結果の検証が不十分である。すなわち、本報告のように、多数の遠心実験によって得られた精度良い測定結果を系統的に解析した例はこれまでにない。

## 2. 遠心実験の概要<sup>1)</sup>

表-1に解析を行った実験のケースを示す。実験に用いた硬質アルミニウム製の模型管(表面は滑)はF管、M管、R管と称する3種類で、F、M、Rはそれぞれの管の剛性の程度を表すFlexible、Medium、Rigidの頭文字をとったものである。外径DはF管とR管は9cm、M管は8.6cmで、管厚tはF管、M管、R管でそ

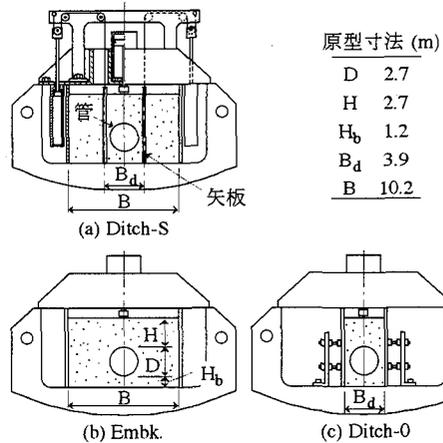


図-1 3通りの埋設方式に対する実験模型

表-4 溝壁面の摩擦定数 $c_w \cdot \phi_w$ と管面の摩擦定数 $c_p \cdot \phi_p$

地盤材料	密度	$c_w$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi_w$ (deg.)	$c_p$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi_p$ (deg.)
乾燥砂	ゆる	0	43	0	18
	密	0	43	0	19
まさ土	ゆる	---	---	0.01	24
シルト質砂	ゆる	---	---	0	25

れぞれ0.95mm、1.5mm、3.5mmである。また、管長はいずれも14.9cmである。この模型管を表-2、3に示す乾燥砂(ゆる詰め、密詰め)、まさ土、シルト質砂の3種類の地盤材料で作成した模型地盤に図-1に示す3通りの埋設方式で設置し、同図の表に示した原型寸法になるように遠心加速度30G場(F管とR管の場合、G:重力加速度)または31.4G場(M管の場合)に置き、管面に作用する垂直土圧 $\sigma$ ・せん断土圧 $\tau$ の分布、管壁に生じる曲げひずみ $\epsilon$ の分布、および管の鉛直たわみ量 $\Delta D$ を測定した。

図-1に示した3通りの埋設方式は、(a)仮設矢板を用いた開削工法による溝型、(b)盛り土型、(c)仮設矢板を用いない素掘り開削工法による溝型で、以下これらをそれぞれDitch-S、Embk.、Ditch-0と呼ぶ。Ditch-Sの実験では管にとって最も厳しい条件を再現するため、管の両側に設置した2枚の模型矢板(硬質アルミニウム板、表面は滑)を遠心場でワイヤによって同時に引抜いた。模型矢板の厚さは原型寸法で15cmになるように、4.8~5mmとした。この原型の矢板厚さ15cmは実施工で引抜かれる矢板の凹部に土が付着して上がってくる状況を考慮して定めたものである。なお、模型矢板の材質を硬質アルミニウムにしたことによって、その曲げ剛性はII型~III型の実矢板壁の曲げ剛性に相当する。また、Ditch-0の実験では表面が粗な鋼板を溝壁の位置に固定した。この粗な壁面の摩擦定数 $c_w \cdot \phi_w$ を、管面の摩擦定数 $c_p \cdot \phi_p$ と併せて表-4に示す。

いずれの実験でも、測定土圧と管自重を外力として管に作用させたときの鉛直力、水平力、モーメントに関する釣合条件を満足した。また、測定土圧と管自重を外力として管に与えたとき、最小仕事の原理によって計算した管壁の曲げひずみ $\epsilon$ の分布は測定した $\epsilon$ の分布と良く一致し、さらに、測定 $\epsilon$ 分布を用いて仮想仕事の原理によって計算した鉛直たわみ量 $\Delta D$ は測定した $\Delta D$ と良い一致をみた。したがって、実験で測定した土圧、曲げひずみ、鉛直たわみ量の精度は非常に高いことが確認された。

### 3. 解析方法の概要

ここでは、地盤の入力定数を除く解析の概要について述べる。地盤の入力定数の与え方はやや複雑であるので、次章で詳述する。

#### (1) 解析モデルと要素特性

解析は、遠心加速度30G場 ( $F$ 管・ $R$ 管の場合)、または31.4G場 ( $M$ 管の場合) に置かれた実験模型を対象として、管、地盤、矢板を等方弾性体と仮定し、平面ひずみ条件で行った。図-2は3通りの埋設方式に対する解析モデルを示したもので、いずれも実験模型の対称性を考慮して半断面モデルとした。なお、 $M$ 管を用いた実験模型の寸法は、 $F$ 管・ $R$ 管を用いた場合とは異なるが、原形寸法は同じであるので、解析モデルは $F$ 管・ $R$ 管のモデルと同一の1/30模型の寸法とした。また、図-2(a)のDitch-Sでは矢板引抜き過程の5時点について解析した。

管、地盤、矢板には8節点のアイソパラメトリック要素を用い、管と地盤の境界、および矢板と地盤の境界には6節点のジョイント要素を挿入した。

#### (2) 管と矢板の入力定数

管要素のヤング率 $E_p$ とポアソン比 $\nu_p$ は、どの管でも管材質である硬質アルミニウムの値をとり、 $E_p=7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  (73GPa)、 $\nu_p=0.33$ を与えた。また、管要素の厚さは、 $F$ 管・ $R$ 管の場合は模型管の厚さに合わせたが、 $M$ 管の場合、外径 $D$ が他の管と異なるので、外径 $D$ を他の管と等しい9cmに置き換え、その代わりに模型管と曲げ剛性 $S_p (=S_f/R^3)$ が等しくなるように管要素の厚さを1.57mmとした。ここに、 $S_f$ は平面ひずみ条件における管壁の曲げ剛性 ( $=E_p \cdot t^3 / \{12(1-\nu_p^2)\}$ )、 $R$ は管厚中心半径 ( $=(D-t)/2$ ) である。管の単位体積重量 $\gamma_p$ は、模型管の重量を管要素に均等に割り振った。

矢板のヤング率とポアソン比は模型矢板の材質 (硬質アルミニウム) の値である  $7.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  (73

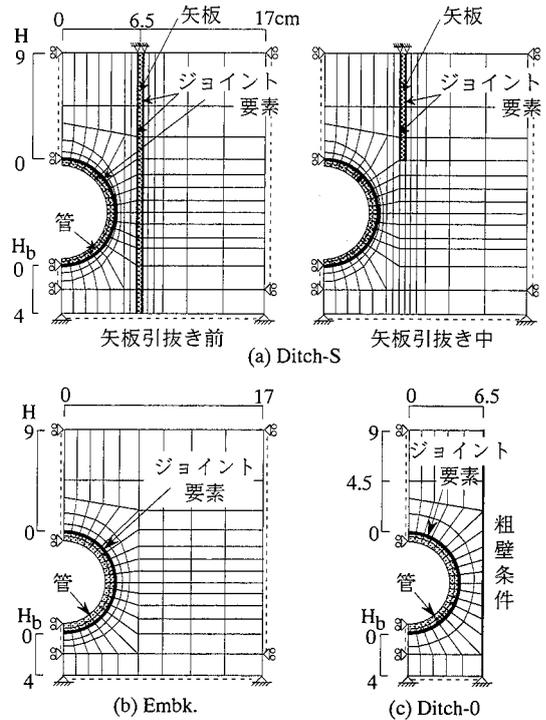


図-2 3通りの埋設方式に対する解析モデル

GPa)と0.33を与えた。また、矢板の単位体積重量は、実験中の矢板がワイヤによって引き上げられているのでゼロとした。

#### (3) 境界条件

管面の境界条件はこれまでの解析<sup>6)</sup>と同様、以下に述べる方法で開口とすべりを表現した。まず、ジョイント要素の垂直剛性 $k_n$ とせん断剛性 $k_s$ としてそれぞれ  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  (98MPa)、 $3 \text{ kgf/cm}^2$  (294kPa) を与えて計算する。次に、垂直応力 $\sigma$ が引張りになったジョイント要素では $k_n$ と $k_s$ をゼロに置き換え、さらに、計算 $\tau$ と摩擦抵抗 $\tau_f (=c_p + \sigma \tan \phi_p$ , ここに $c_p$ 、 $\phi_p$ は管と土との境界で発揮される粘着力と摩擦角の測定値、表-4参照)を比較し、 $\tau > \tau_f$ となった要素では $k_s$ に $\tau_f / \tau$ を乗じて減少させ、 $\tau \leq \tau_f$ となった要素ではもとの $k_s$ をそのまま与える。そして、以上の判定と $k_n$ ・ $k_s$ の置き換えを計算結果が収束するまで繰り返した。

地盤側方の境界条件は、まず、Ditch-Sの場合、地盤境界で滑壁条件 ( $=K_0$ 条件) を与え、さらに、矢板に働く摩擦の引抜き中の変化 (付録参照) を考慮するため、矢板表面に管面境界のものと同じジョイント要素を挿入し、管面の境界条件と同じ繰り返し計算を行った。次に、Embk.の場合は地盤境界で滑壁条件、Ditch-0の場合は溝壁位置で開口、すべり破壊、摩擦抵抗を考慮できる粗壁条件<sup>5)</sup>をそれぞれ与えた。

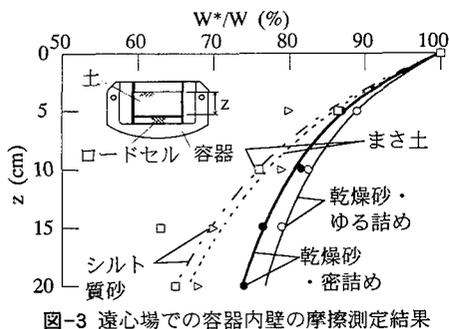


図-3 遠心場での容器内壁の摩擦測定結果

地盤下端の境界条件は固定とした。なお、この境界条件を滑動とした計算も行ったが、解析結果は固定とした場合とほぼ同じであった。

#### 4. 地盤の入力定数

##### (1) 単位体積重量 $\gamma^*$

地盤の単位体積重量は、7層に分割した解析モデルの地盤各層に、実験容器の壁面摩擦を考慮して求めた見かけの単位体積重量  $\gamma^*$  を与えた。これまでの著者らの解析<sup>6)</sup>では、この壁面摩擦の影響を考慮せず、その代わりに実験結果の方を補正して解析結果と比較していたが、今回は  $\gamma^*$  を用いることによって壁面摩擦の影響を解析の方に取り込み、解析結果を実験結果と直接、比較できるようにした。  $\gamma^*$  は以下のように求めた。

まず、図-3中に示す装置を用い、Embk.の場合の模型地盤の全重量  $W^*$  と地盤厚さ  $z$  の関係を30G場で測定した。図-3のプロットは、3種類の地盤材料に対して得られた  $W^*$  を、摩擦がないとしたときの地盤重量  $W$  との比として示したものである。  $W^*/W$  は、どの地盤材料の場合も  $z$  の増大につれて減少し、ラインで示す双曲線で近似できることがわかった。

Embk.の実験に対する解析では、この双曲線近似した  $W^*/W$  を  $z$  で微分して  $\gamma^*$  の深さ方向分布を求めた上で、分割した各層の中央深度における  $\gamma^*$  をそれぞれの層に与えた。Ditch-Sの模型寸法はEmbk.と同じであるので、Ditch-Sの実験に対する解析でも、これと同じ  $\gamma^*$  を与えた。一方、Ditch-0の場合、溝壁に働く摩擦力は粗壁条件によって計算に取り込んでいるので、解析では容器の前・後壁に働く摩擦のみを考慮すればよい。そこで、摩擦を考慮する壁面積  $S$  と模型地盤の底面積  $A$  の比  $S/A$  がEmbk.の場合を1としたとき、Ditch-0で0.69となることを利用して(付録1参照)、図-3に示したEmbk.の場合の  $W^*/W$  に0.69を乗じることによって、Ditch-0に対する  $\gamma^*$  の深さ方向分布を求め、この分布から分割した地盤各層の  $\gamma^*$  を決めた。解析で与えた  $\gamma^*$  値の範囲を図-5、6中の表に示す。

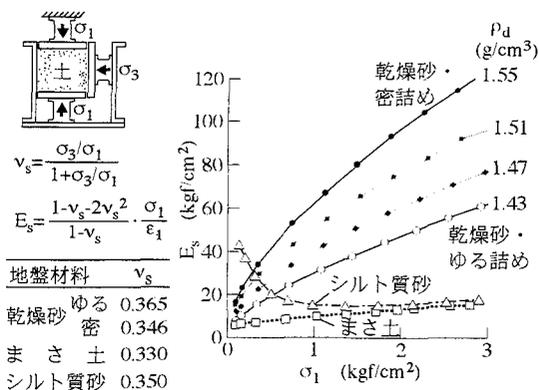


図-4 地盤材料の変形係数  $E_s$  とポアソン比  $v_s$

##### (2) 変形係数 $E_s$ とポアソン比 $v_s$

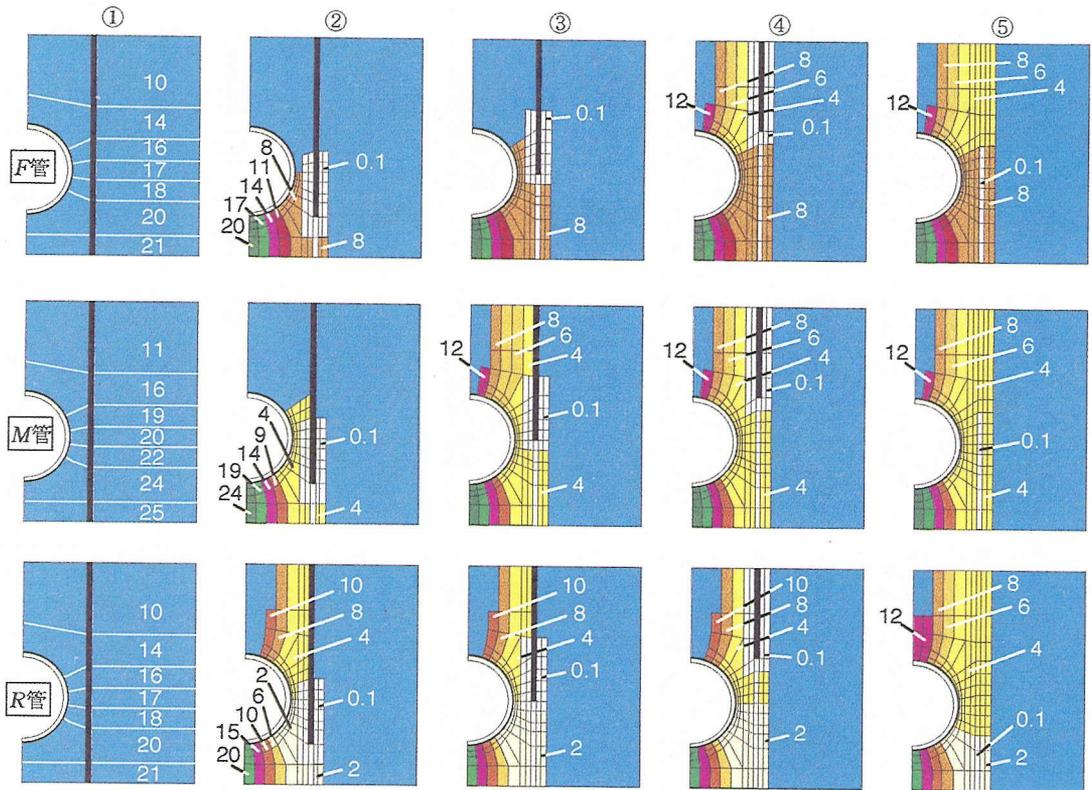
解析で与えた地盤の変形係数  $E_s$  とポアソン比  $v_s$  は、図-4に示す  $K_0$  圧縮試験<sup>1)</sup>の結果から決めた。  $K_0$  圧縮試験の供試体は、遠心実験の模型作成方法と同様、  $\sigma_3$  方向から土を詰め、密度も実験時の模型地盤の密度に合わせた。なお、乾燥砂を用いた遠心実験は地盤密度の管理幅を  $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  に設定して行ったので、この変動幅の影響を捉えるため、乾燥砂に対する  $K_0$  圧縮試験は図に示す4通りの密度で行った。

まず、ポアソン比  $v_s$  は、どの地盤材料も応力レベルによらずほぼ一定となり、図-4中の表に示す値が得られたので、解析ではどの地盤深度に対してもこれらの一定値を与えた。

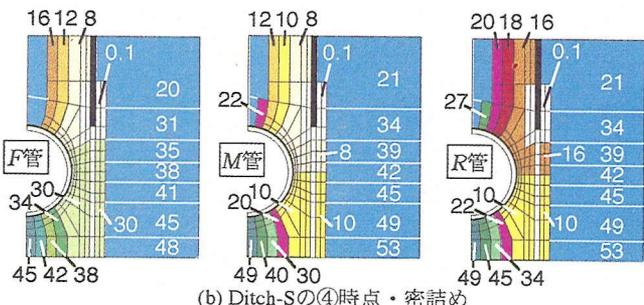
次に、変形係数  $E_s$  は図-4に示すように応力依存性を示し、乾燥砂とまさ土では、  $\sigma_1$  の増大とともに  $E_s$  は増大する。シルト質砂は、3種類の地盤材料のうち、細粒含有率が最も高いため、供試体作成時の締固めの影響を受けて、  $\sigma_1 \approx 1.5 \text{ kgf/cm}^2$  (147kPa) まで減少した後、少し増大する。そこで、このような  $E_s$  の応力依存性を評価するため、見かけの単位体積重量  $\gamma^*$  の深さ方向分布を用いて、分割した地盤各層の中央深度での自重応力を求め、その応力レベルにおける  $E_s$  値を図-4から読み取って各層に与えた。

図-5、6に解析で与えた  $E_s$  を示す。図-5は乾燥砂(ゆる詰め・密詰め)地盤で管剛性と埋設方式を変化させた実験に対する解析モデルの場合、図-6は  $F$  管を用いて地盤材料と埋設方式を変化させた実験に対する解析モデルの場合を示したものである。図-5(a)、(b)と図-6(a)の矢板引抜き過程の解析モデル(②~⑤)で青色で表した部分の  $E_s$  は、矢板引抜き前(①)と同じ値である。また、これらのモデルで色が変化している部分は次節に述べる矢板抜け跡とゆるみ領域を表す。

なお、図-4に示したように、乾燥砂の  $E_s$  は各密度によってかなり異なることがわかったので、乾燥砂



(a) Ditch-Sの矢板引抜き過程・ゆる詰め  
 (①: 矢板引抜き前, ②③④: 矢板下端が管底, 管側部, 管頂通過時点, ⑤矢板引抜き後)



(b) Ditch-Sの④時点・密詰め

ゆる詰め		密詰め	
F管/M管	R管	F管/R管	M管
10/11	14/15	20/19	31/29
16/17	17/19	35/34	38/37
18/20	18/20	41/39	41/39
20/22	20/22	45/43	45/43
21/23	21/23	48/46	48/46

(b) Embk.

ゆる詰め		密詰め	
F管/R管	M管	F管/M管	R管
11/11	16/17	23/21	36/33
18/19	19/21	42/40	46/44
21/23	21/23	50/48	50/48
23/25	23/25	55/52	55/52
24/26	24/26	59/57	59/57

(d) Ditch-0

解析で与えた見かけの単位体積重量 $\gamma^*$ と 実験模型作成時の地盤密度 $\rho_0$			
埋設方式		ゆる詰め	密詰め
$\gamma^*$ ( $\times 30 \text{ gf/cm}^3$ )	Ditch-S・Embk.	1.20~0.96	1.28~1.00
	Ditch-0	1.28~1.12	1.36~1.17
$\rho_0$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Ditch-S	1.41 / 1.43 / 1.41	1.54 / 1.56 / 1.56
	Embk.	1.41 / 1.42 / 1.41	1.54 / 1.54 / 1.53
	Ditch-0	1.42 / 1.42 / 1.43	1.57 / 1.56 / 1.57

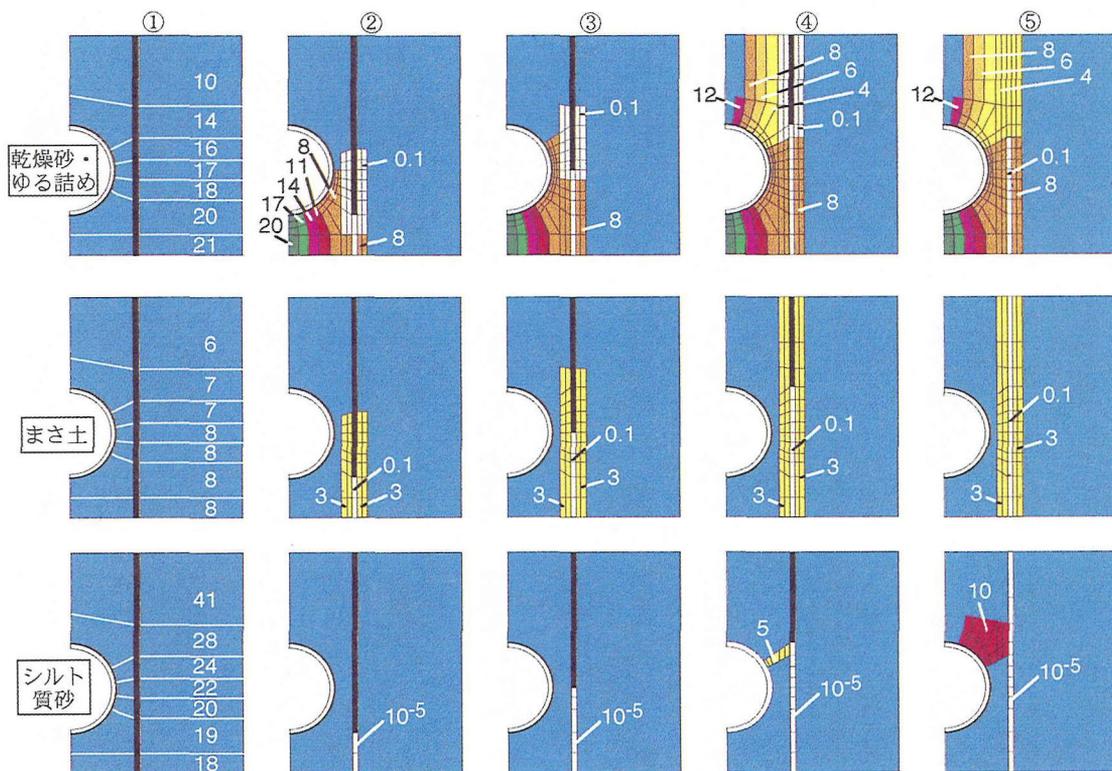
( $\rho_0$ : F管/M管/R管)

図-5 解析モデルに与えた $E_s$  (乾燥砂地盤で管刚性, 埋設方式, 地盤密度を変化させた場合, 単位:  $\text{kgf/cm}^2$ )

を用いた実験に対する解析では, 同図に示した4通りの密度に対する $E_s$ の測定結果を補間して, 模型作成時の地盤密度 $\rho_0$  (図-5中の表参照) に対する $E_s$ - $\sigma$ 関係を求め, これを用いて各解析モデルの $E_s$ を与えた。

(3) Ditch-S: 矢板抜け跡とゆるみ域の入力定数

Ditch-Sの実験で観測した矢板引抜きに伴う地盤変形の例を図-7に示す。これはF管を用いて地盤材料を変えた実験で得られたもので, 図(a), (b), (c)がそ



(a) Ditch-S

S/D/F
10/6/41
14/7/28
16/7/24
17/8/22
18/8/20
20/8/19
21/8/18

S: 乾燥砂・ゆる詰め  
D: まさ土  
F: シルト質砂

(b) Embk.

解析で与えた見かけの単位体積重量 $\gamma^*$ と  
実験模型作成時の地盤密度 $\rho_0$

埋設方式	乾燥砂・ゆる詰め	まさ土	シルト質砂	
$\gamma^*$ ( $\times 30 \text{ gf/cm}^3$ )	Ditch-S Embk.	1.20~0.96	1.33~0.83	1.34~0.81
$\rho_0$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Ditch-S Embk.	1.41	1.65	1.68

図-6 解析モデルに与えた $E_s$  (F管を用いて地盤材料, 埋設方式を変化させた場合, 単位:  $\text{kgf/cm}^2$ )

れぞれ乾燥砂(ゆる詰め), まさ土, シルト質砂地盤の場合を表す。各図の写真は①矢板引抜き前, および引抜いた矢板の下端が②管底, ③管側部, ④管頂深度を通過した時点, ⑤矢板引抜き後の各時点で撮影したものである。また, スケッチの点線, 実線, 破線はそれぞれ①, ④, ⑤のマーカの位置をトレースしたものである。これらの図から, どの場合も矢板引抜きにつれて抜け跡の空洞を埋めるように地盤が変形しているが, 地盤材料が異なると空洞の詰まり方と地盤変形の様子がかなり異なることがわかる。シルト質砂地盤では④時点で管側部付近の土塊が台形状に矢板抜け跡へ向かって崩壊している。なお, 乾燥砂地盤でM管とR管を用いた実験では, 砂の移動範囲を捉える目的でカメラのシャッターを解放して写

真を撮影したため, 図-7に示したような各時点の地盤変形は捉えられていないが, 測定土圧の変化から判断して, 管剛性が変わった場合も空洞の詰まり方と地盤変形の様子がかなり異なると推定された。

このような矢板引抜き過程の地盤の変形状況と測定した $\sigma \cdot \tau$ 分布の変化に基づいて, 各実験において地盤変形に起因して生じたゆるみ領域の範囲と $E_s$ の減少度合いを図-5(a), (b)と図-6(a)に示すように推定した。そして, 矢板抜け跡とゆるみ領域の入力定数を以下のように定めた。

まず, 矢板引抜き過程で生じる矢板抜け跡は, どの場合も非常にゆるいと推定される。そこで, 掘削側と地山側の要素が変形後, 互いに重ならないことを条件として, できるだけ小さい $E_s$ 値を選び, 完全

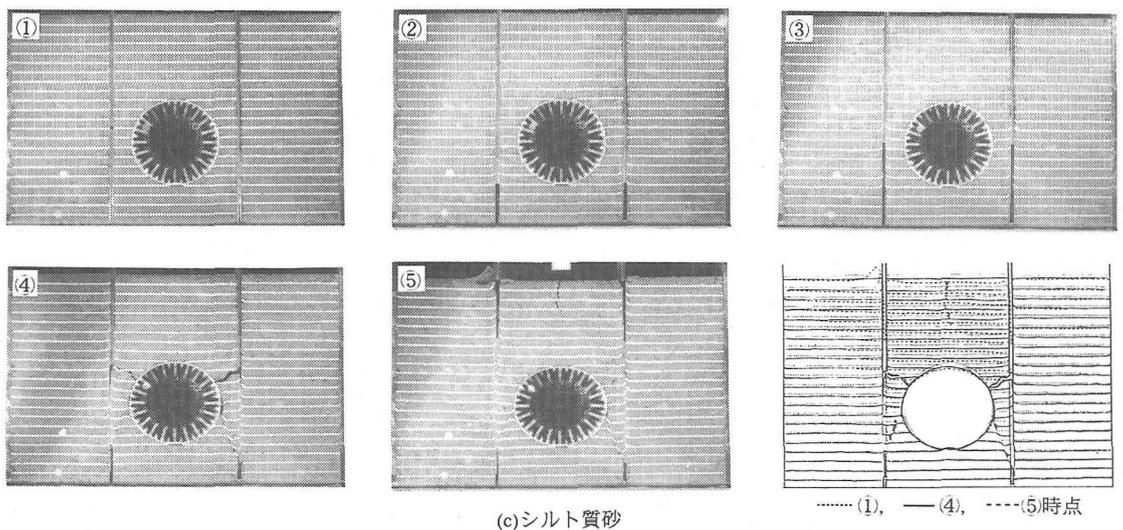
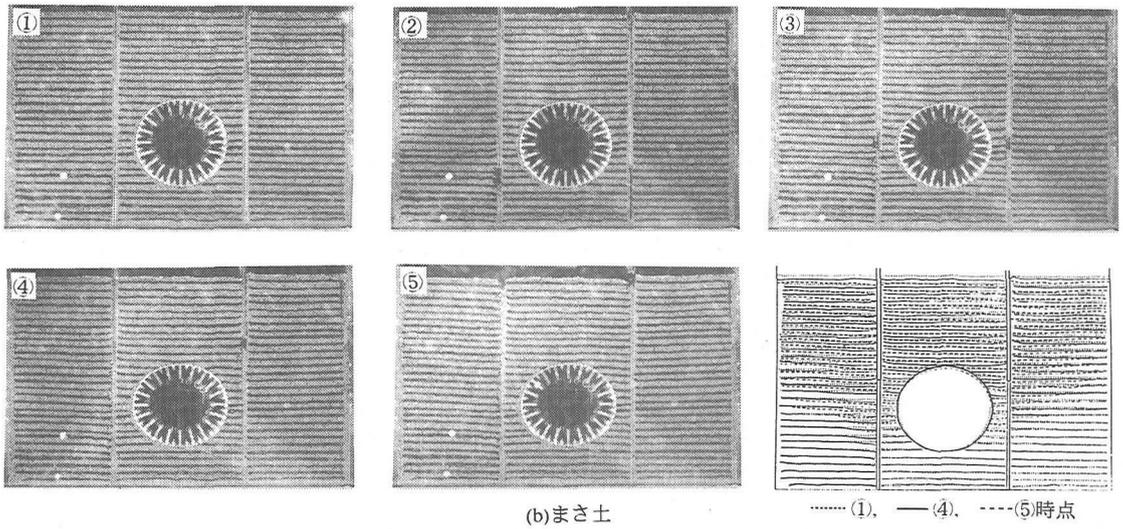
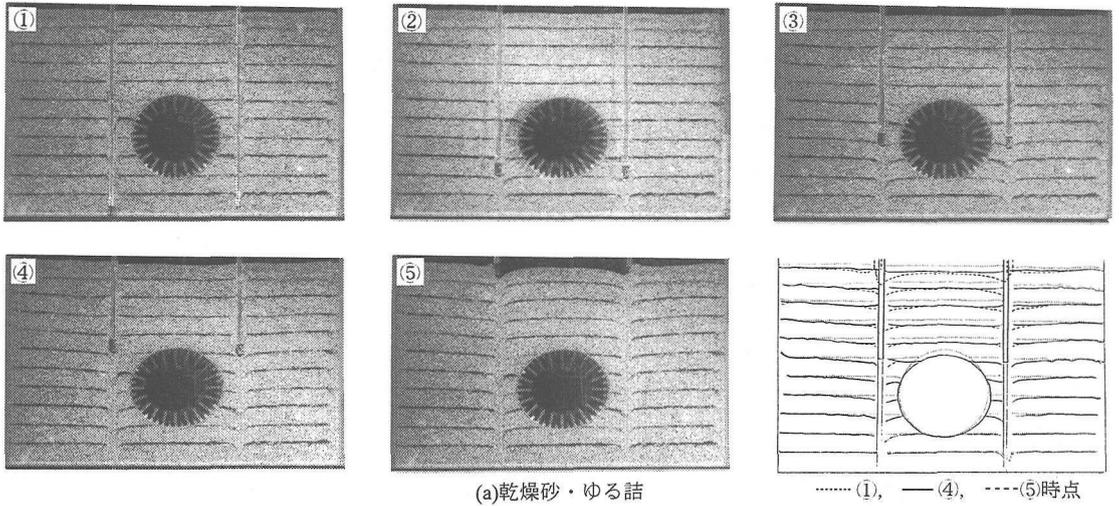


図-7 矢板引抜き過程で生じた地盤の変形 (F管を用いて地盤材料を変化させた場合)

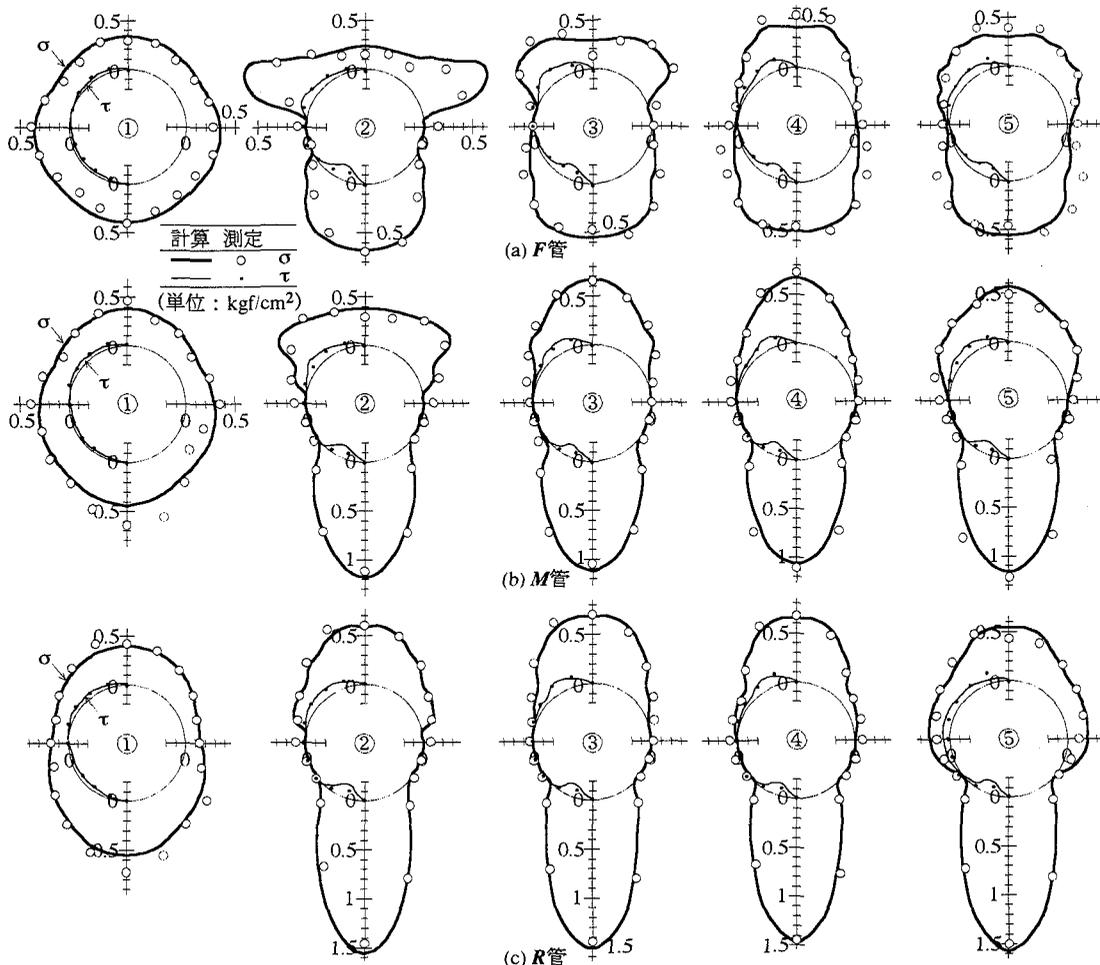


図-9 矢板引き過程における計算土圧と測定土圧の比較 (乾燥砂・ゆる詰め地盤で管剛性を変化させた場合)

に空洞となったシルト質砂地盤の場合のみごく小さい $10^{-5} \text{kgf/cm}^2$  (0.98Pa) を与え, 他の場合には $0.1 \text{kgf/cm}^2$  (9.8kPa) を与えた。また, 矢板抜け跡のポアソン比 $\nu_s$ と単位体積重量はゼロとした。次に, 空洞の発生に引きずられて地盤中に生じるゆるみ領域に対しては, 観察した地盤変形が矢板線近傍で最大で, 矢板線から遠ざかって模型の中央に近づくほど小さくなっていることを考慮して, 矢板線近傍の $E_s$ 値を最小におき, 矢板線から遠ざかるほど $E_s$ 値の減少度合を小さくした。ゆるみ領域のポアソン比と単位体積重量は矢板引き前と与えた値と同じとした。ただし, 乾燥砂地盤では, 抜け跡の空洞よりも上部の矢板近傍で空洞に向かって砂が流れ落ちていると推定されたので, この領域の $E_s$ ,  $\nu_s$ , および単位体積重量は空洞と同じ値を与えた。また, シルト質砂地盤に対する解析モデルでは, ④時点でのクラック発生を考慮して, クラックの位置の $E_s$ を $5 \text{kgf/cm}^2$  (490kPa) と小さく与えた。

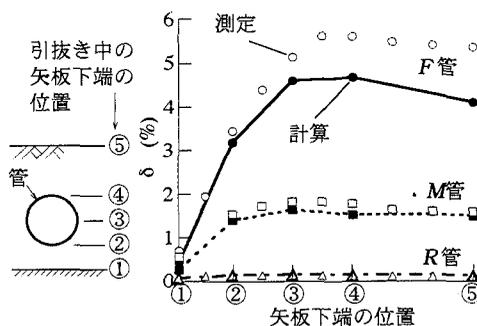


図-8 矢板引き過程における計算 $\delta$ と測定 $\delta$ の比較 (乾燥砂・ゆる詰め地盤で管剛性を変化させた場合)

## 5. 解析と実験の比較

(1)管剛性, 埋設方式, 砂地盤の密度を変えた場合  
地盤材料として乾燥砂を用い, 管剛性, 埋設方式, 地盤密度を変化させた場合の解析と実験の比較を図-8~11に示す。

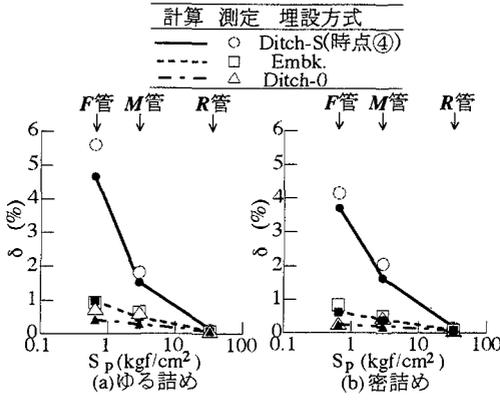


図-10 計算 $\delta$ と測定 $\delta$ の比較 (乾燥砂地盤で管剛性、埋設方式、地盤密度を変化させた場合)

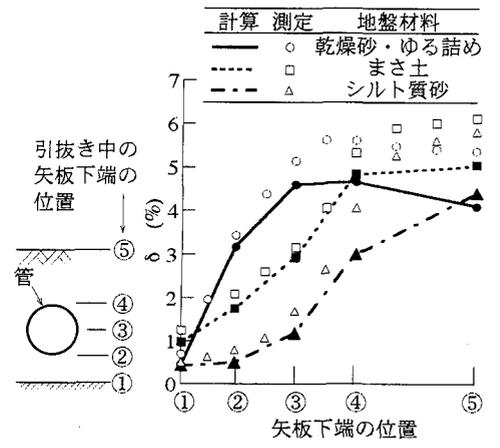


図-12 矢板引抜き過程における計算 $\delta$ と測定 $\delta$ の比較 (F管を用いて地盤材料を変化させた場合)

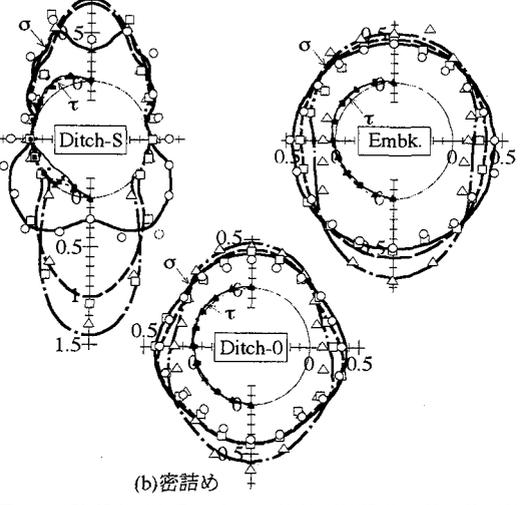
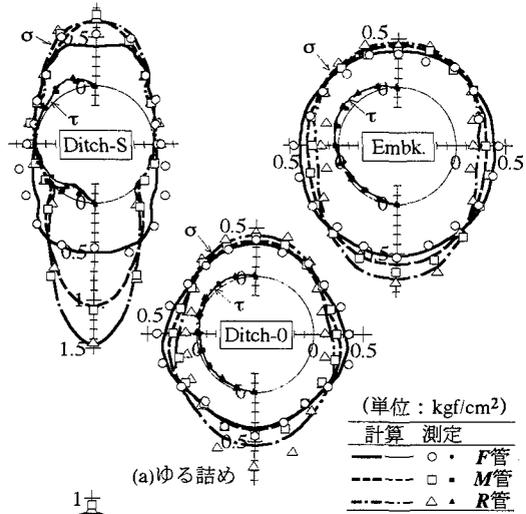


図-11 計算土圧と測定土圧の比較 (乾燥砂地盤で管剛性、埋設方式、地盤密度を変化させた場合)

図-8, 9は, Ditch-Sの矢板引抜き過程におけるF管, M管, R管の鉛直たわみ率 $\delta$  ( $=AD/2R$ ) と土圧 $\sigma \cdot \tau$ の分布を, 乾燥砂のゆる詰めの場合を例にとって比較したもので, いずれも解析, 実験の結果をそれぞれライン, マークで示している. また, 図-9の $\sigma$ は管中心向き,  $\tau$ は下向きに働く場合を正として極座標表示している. 両図から,  $\delta$ と $\sigma \cdot \tau$ は解析と実験で良好な近似を示していることがわかる.

図-10, 11は, 3つの要因の違いによる $\delta$ と $\sigma \cdot \tau$ の変化を解析と実験で比べたもので, Ditch-Sのデータはいずれも $\delta$ が最大となった④時点(矢板下端が管頂を通過した時点)のものである. どの場合も, 解析と実験の結果はほぼ一致している.

(2)地盤条件を変えた場合

F管を用いて地盤材料を変化させた場合の解析と実験の比較を図-12~15に示す.

図-12, 13は, Ditch-Sの矢板引抜き過程における $\delta$ と $\sigma \cdot \tau$ 分布を, 3種類の地盤材料について比較したものである. 図-12の④以降の $\delta$ は解析値の方が実験値よりも小さいが, 定性的な傾向は一致しており, それを除くと, どの場合も $\delta$ と $\sigma \cdot \tau$ は解析と実験で良好な近似を示している.

次に, 図-14, 15は, 地盤材料と埋設方式の違いによる $\delta$ と $\sigma \cdot \tau$ の変化を解析と実験で比べたもので, Ditch-Sのデータはいずれも④時点のものである. どの場合も解析と実験の結果は良く近似している.

このように, 本報告で示した解析手法は管剛性, 埋設方式, 地盤材料をそれぞれ変化したたわみ性埋設管の遠心模型挙動をかなり正確にシミュレートしていると結論される.

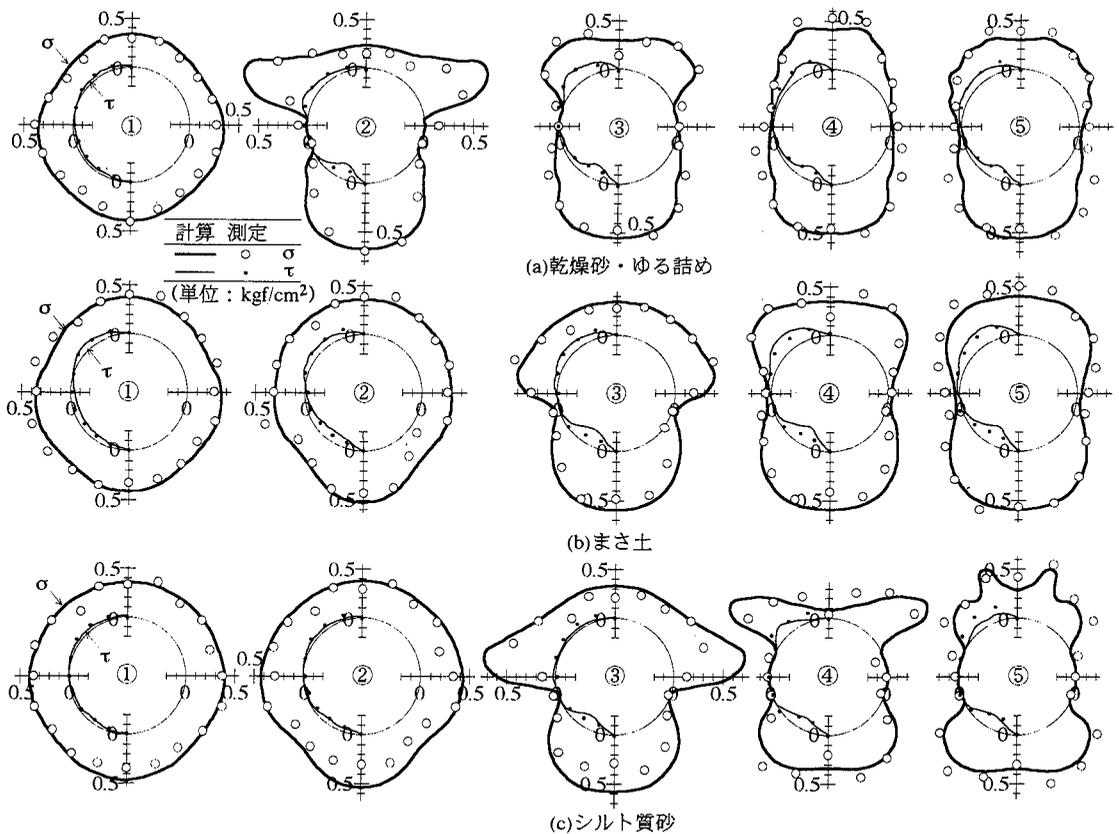


図-13 矢板引抜き過程における計算土圧と測定土圧の比較 (F管を用いて地盤材料を変化させた場合)

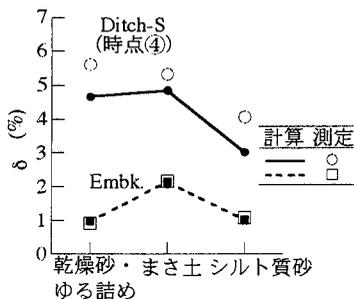


図-14 計算 $\delta$ と測定 $\delta$ の比較 (F管を用いて埋設方式、地盤材料を変化させた場合)

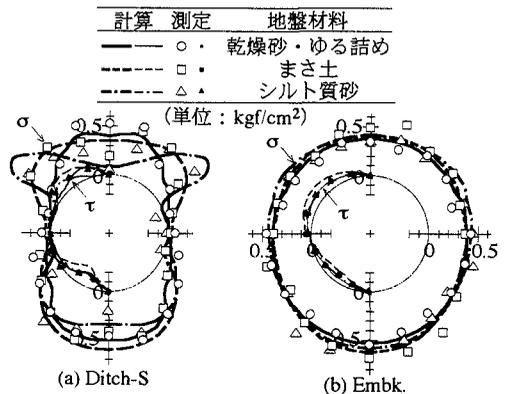


図-15 計算土圧と測定土圧の比較 (F管を用いて埋設方式、地盤材料を変化させた場合)

## 6. Ditch-Sにおける管剛性と地盤材料の影響

Embk.とDitch-0の実験では、管剛性と地盤材料の違いが管挙動に与える影響は小さかったが、Ditch-Sの実験では、これらの影響が極めて顕著に現れた。ここでは、解析と実験両者のデータを用いて、Ditch-Sの場合の管挙動に及ぼす管剛性と地盤材料の著しい影響について考察する。

### (1) 管剛性の違いによる管挙動の変化

図-9に示したように、乾燥砂(ゆる詰め)を地盤

材料として用い、管剛性を変化させたときの矢板引抜き過程の土圧分布は、解析、実験とも管剛性の違いによって以下のように変化した。まず、F管では、矢板を引抜くと、 $\sigma$ の大きい部分(突出部)が管側部の上方に発生し、さらに矢板を引抜くと、 $\sigma$ の突出部は管の上方へ移動しながら強度を弱め、やがて消滅する。次に、M管では、矢板下端が管底を通過する②時点において管上部に弱い $\sigma$ の突出と管底への強

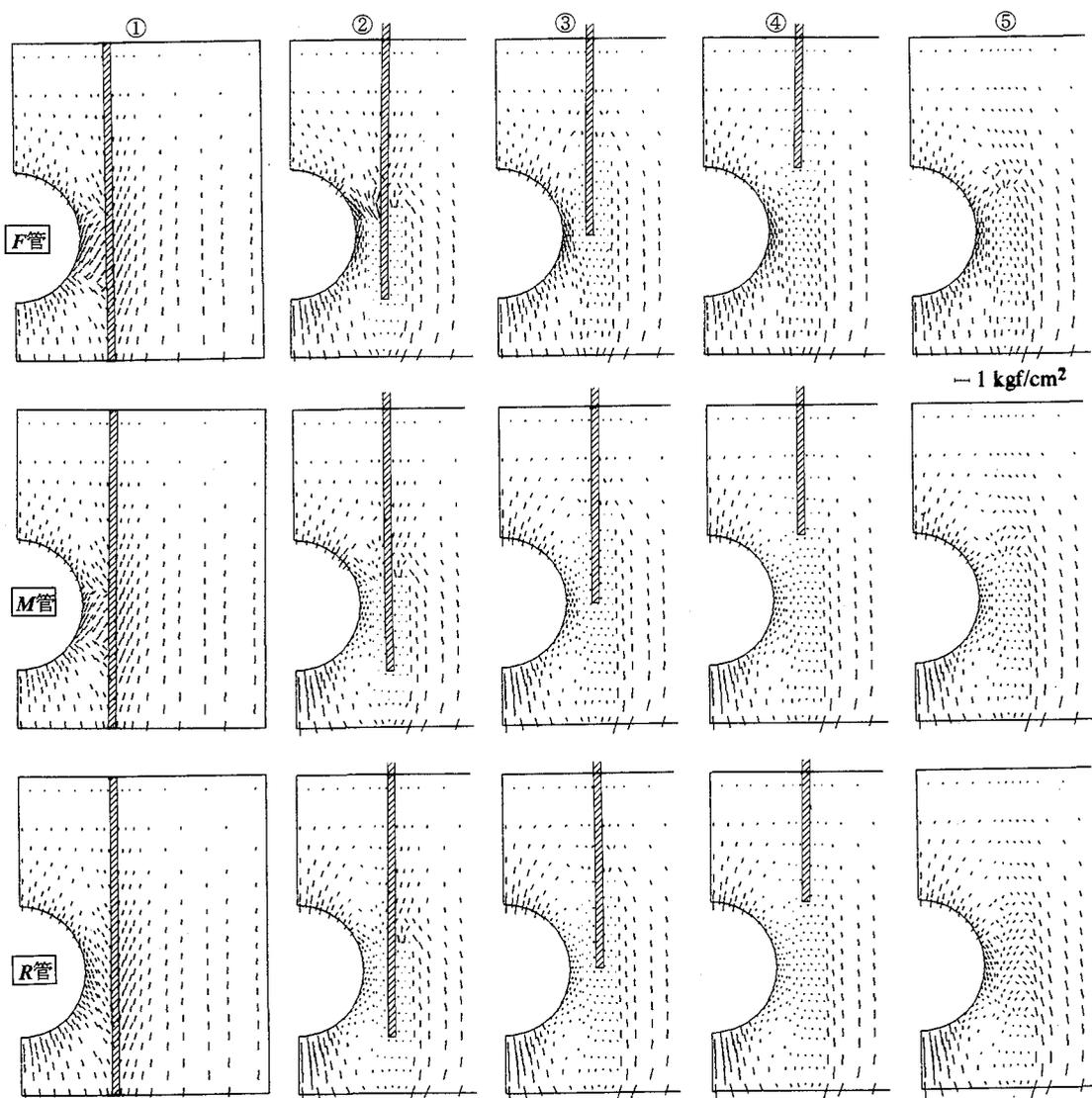


図-16 管剛性の違いによる最大主応力の変化 (Ditch-S, 乾燥砂・ゆる詰め地盤)

い $\sigma$ の集中が生じ、以後、管上部の $\sigma$ は管頂へ強い集中を示した後、減るが、管下部の $\sigma$ に変化はない。最後に、**R管**では、矢板引抜きを始めると、すぐ管頂・管底に土圧が集中し、矢板引抜きにつれて管頂への集中は少し増加してから減少するが、管底への集中には変化がない。

図-16は、この実験に対する解析によって得られた矢板引抜き過程における地盤の最大主応力分布を示したものである。この図と図-5(a)に示した解析モデルおよび図-9に示した土圧分布を併せると、上述した管剛性の違いによる土圧変化の相違が以下のように説明できる。

まず、**F管**の場合、①時点では、矢板近傍の最大主応力の向きは掘削側、地山側とも斜めに傾いており、

矢板近傍で地盤の沈下が矢板に働く摩擦によって抑えられたことを示す。②時点では、矢板抜け跡は空洞となり、その上部では矢板近傍の砂が抜け跡に向かって移動するため、これらの領域では応力がほぼゼロとなる。また、管側部深度より下の掘削側地盤は上方からの砂の移動が管の存在によって阻まれるため、矢板抜け跡に近いほどゆるみ、管底へ土圧が集中する。管側部深度より上方では、管の変形に阻まれて地盤のゆるみが生じず、そのため管側部から約 $30^\circ$ 上と矢板の間に強い応力集中(アーチ)が発生する。次の③時点では、地盤のゆるみ域の発達につれて管と矢板の間のアーチが上方に移動するため、アーチの強さが減る。さらに④時点になると、アーチが消滅して管上方の地盤が一気にゆるみ、管頂を

中心とする $\pm 45^\circ$ の範囲の土圧が大きくなる。⑤時点では、管の変形の影響を受けない地盤上部で矢板抜け跡の空洞が砂の移動によってゆるく詰まり、それよりも下部の抜け跡は管の変形によって砂の移動がさえぎられるため、空洞のまま残る。

次に、*M*管の場合、①時点は*F*管と同じ傾向である。②時点では、*M*管の変形が*F*管よりも小さいので管側部深度よりも下方の地盤が*F*管よりも大きくゆるみ、管底への土圧集中が*F*管より強まる。また、地盤のゆるみが管側部より少し上方まで達するため、管側部から $45^\circ$ 上と矢板の間に弱いアーチが生じる。③時点になると管上部の地盤が全体にゆるんで管頂への強い土圧集中が生じ、④時点でさらに地盤のゆるみ度合が増して管頂への土圧集中が強まる。⑤時点では、*F*管の場合と同様、抜け跡の空洞は地盤上部で詰まり、管頂への集中が減る。

最後に、*R*管の場合、まず管上部では、管の変形がほとんど生じないので、②時点で管側部深度よりも上部の砂が下方の矢板抜け跡に向かって移動する。そのため、管側部深度で浅い地盤は広い範囲でゆるむが、矢板に近いほどゆるみの程度が大きいため主応力が管頂へ向かって流れ、強い管頂への土圧集中が生じる。この管頂への土圧集中は矢板引抜きが進むにつれて少し強まる。⑤時点では、管の変形がほとんどないので、管上部からの砂の移動によって抜け跡の空洞が詰まっていき、管側部の下方 $45^\circ$ 以深のみが空洞として残る。一方、管下部では、管下方の地盤がゆるんだ②時点で管底への土圧集中が強まり、以後、そこでの地盤状態に変化がないので、集中度合いに変化がない。

## (2)地盤材料の違いによる管挙動の変化

*F*管を用いて地盤材料を変化させたときの矢板引抜き過程の土圧分布(図-13)は、解析、実験とも以下のように変化した。①時点の土圧は地盤材料が変わってもあまり変わらない。矢板を引抜くと、どの地盤材料の場合も $\sigma$ の突出部が発生し、矢板の抜け上がりとともに管の上方へ移動していくが、この $\sigma$ の突出部の移動は、乾燥砂の場合が最も早く現れ、シルト質砂の場合が最も遅く現れる。

図-17は、矢板引抜き過程における地盤の最大主応力分布の変化を示したものである。図-6(a)、図-7、図-13に示した解析モデル、地盤変形、土圧分布と併せて考察すると、地盤材料の違いによって管挙動が以下のように変化したものと解釈できる。

乾燥砂地盤では、前述のように、②時点で抜け跡を埋める砂の変形に起因する地盤のゆるみが管側部深度以深で生じ、それに伴って管と矢板の間に強い

アーチが発生する。さらに矢板が上昇すると、地盤のゆるみ域の発達につれてアーチの位置が上昇するが、④時点でアーチが消滅してゆるみ域が管上部まで拡大する。⑤時点の抜け跡の空洞は地盤上部で詰まる。

一方、まさ土地盤はわずかな粘着強度を持つため、矢板引抜き過程全体を通じて、抜け跡の空洞を狭めるような地盤変形を生じ、地盤のゆるみは抜け跡の空洞近傍と上昇中の矢板の近傍に限定される。砂地盤のような広い範囲のゆるみ域は生じないので、砂地盤の場合よりも遅れて③時点で管と矢板の間にアーチが発生し、④時点でアーチの位置が上昇するが、両時点ともアーチの一方の足である矢板側の地盤がゆるんでいるので、その強度はあまり大きくなり、したがって、管に働く $\sigma$ の突出もそれほど目立たない。なお、④、⑤時点では矢板抜け跡の空洞がほとんど閉じるまで地盤の変形が進むが、地山側の応力を掘削側に伝達するまでには至らない。

次に、シルト質砂地盤では、粘着強度が大きいため、矢板を引抜いても、③時点までは地盤のゆるみや矢板抜け跡の空洞を狭めるような地盤変形は、ほとんど生じない。そのため、まさ土地盤と同様に、③時点で管側部深度よりも少し上で管と矢板の間にアーチが発生するが、まさ土地盤のように矢板側のアーチの足がゆるんでいないので、その強度はかなり大きい。④時点では、管側部を中心とする約 $60^\circ$ の範囲の台形状の土塊が管の変形に耐え切れず、矢板抜け跡の空洞に落ち込み、この範囲で管に働く土圧はゼロとなる。さらに、この崩壊に伴って生じた管側部から $45^\circ$ 上のクラックの直上で強いアーチが生じて管に働く $\sigma$ が強まり、管頂土圧がほぼゼロまで減る。矢板を抜き終わった⑤時点では、④時点で生じたクラックを埋めるように管上部の地盤が変形してゆるみ、このゆるみ領域をはずれた管頂付近で土圧が大きくなる。矢板抜け跡は崩壊した範囲を除くと、空洞のまま残る。

以上の考察から、Ditch-Sの実験で観察された管挙動は、管剛性と地盤材料を変えると著しく異なったが、これは管の変形度合と土の粘着強度が矢板引抜きに伴って生じる抜け跡の空洞と地盤のゆるみの発達程度を大きく変化させるために生じると説明できた。

## 7. 結 論

管剛性、埋設方式、地盤材料を変化させて実施したたわみ性埋設管の遠心実験22ケースに対する詳細

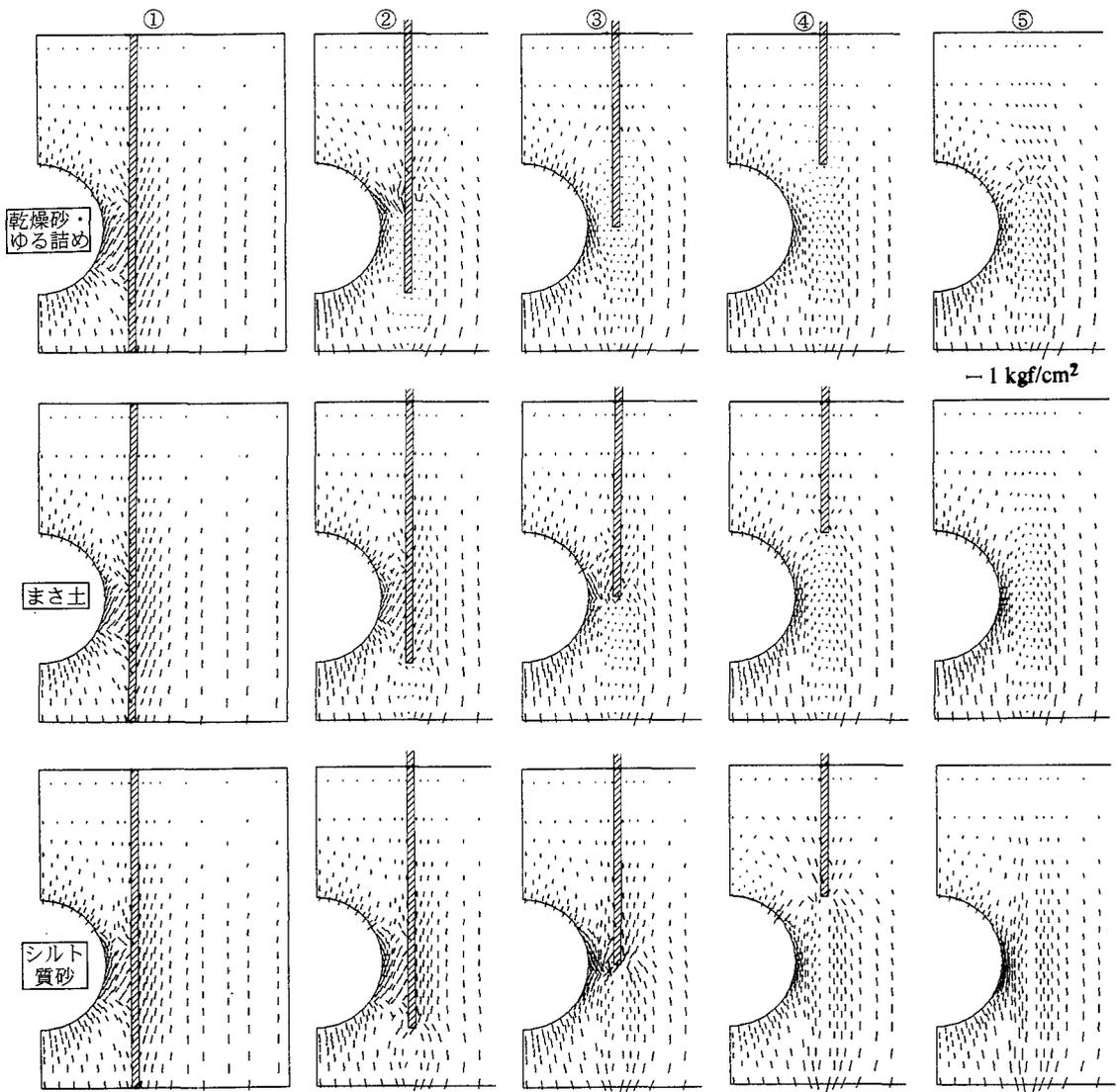


図-17 地盤材料の違いによる最大主応力の変化 (Ditch-S, F管)

なFEM弾性解析を行い、以下の結論を得た。

(1)FEM弾性解析の結果は、仮設矢板の引抜き過程を含む全ケースの遠心実験結果と良好な近似を示し、本解析手法によって地中埋設管の力学挙動が定量化できることが確かめられた。したがって、実態を反映していないためにこれまで問題を引き起こすことの多かった現行の設計法に代わり、この弾性解析手法をベースとする、より適切で実際的な設計法を構築する道筋が用意されたといえる。

(2)本研究によって、管剛性、埋設方式、地盤材料の各要因による管挙動の変化メカニズムが明確になった。特に、仮設矢板を引抜いた場合の管挙動が矢板抜け跡の空洞とその周辺地盤のゆるみ領域の出現によって支配されることを見出し、管剛性と地盤材料

の影響が矢板引抜き時に極めて顕著に現れるという実験事実は、この矢板抜け跡の空洞とゆるみ領域の発達の程度が管剛性と地盤材料によって大きく異なるために生じると説明できた。

謝辞：FEM計算にご協力いただいた元大阪市立大学大学院修士課程・米谷彰司氏（現 大林組）に謝意を表します。

付録1：Embk.とDitch-0のS/Aの値

Embk.とDitch-0の場合、S/A値は次式で求められる。

$$\text{Embk.} : S/A=2(B+L)z/(BL)=0.192z$$

$$\text{Ditch-0} : S/A=2B_0z/(BL)=0.133z$$

ただし、B、 $B_0$ は図-1参照。また、zは地盤厚さ、L

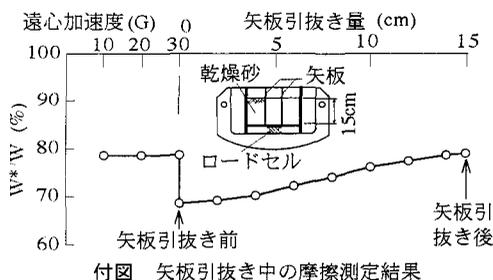
は管長 (=容器の奥行き) である。

## 付録2：矢板に働く摩擦の引抜き過程の変化

付図は、管を設置せずに矢板を引抜いた時の  $W^*/W$  の変化を、乾燥砂 (ゆる詰め) 地盤・ $z=15\text{cm}$  の場合について示したものである。  $W$  は容器内壁および矢板に摩擦が働かないとしたときの地盤全重量である。  $W^*/W$  の値は矢板引抜き前には  $z=15\text{cm}$  の Embk. の場合の値 (本文の図-3参照) とほぼ等しいが、矢板に引抜き力が加わると急減し、その後、矢板の抜け上がりにつれて次第に増え、矢板引抜き後には再び Embk. の場合の値に等しくなる。この矢板引抜きに伴う  $W^*/W$  の変化は、以下のように解釈できる。まず、遠心加速段階では矢板に働く摩擦力は底板に伝達されるので、 $W^*/W$  は矢板のない Embk. の場合と同じ値になる。ついで、矢板に引抜き力が加わると、引抜き力が矢板に働く摩擦力とバランスするまで  $W^*/W$  値は減り、引抜き力が摩擦力よりも大きくなって矢板が動き始めると、矢板の根入れ長の減少につれて摩擦力が減少して、 $W^*/W$  値はしだいに大きくなり、矢板が完全に引抜かれると再び Embk. の場合と同じ値に落ちつく。

## 参考文献

- 1) 吉村 洋, 東田 淳, 李 黎明: 遠心模型によるたわみ性埋設管の土圧・変形挙動の検討, 土木学会論文集,



No.561/Ⅲ-38, pp.245-255, 1997.

- 2) 東田 淳, 堀田清美, 篠崎 亘, 三笠正人: 遠心力鉄筋コンクリート管 (コンクリート支承) に加わる土圧と管の強度について, 土木学会論文報告集, 第310号, pp.97-112. 1981.
- 3) 東田 淳, 三笠正人: 遠心力模型実験による剛性埋設管の土圧の検討, 土木学会論文集, 第376号/Ⅲ-6, pp.171-180. 1986.
- 4) 東田 淳, 三笠正人: 弾性論による埋設管の土圧の検討, 土木学会論文集, 第376号/Ⅲ-6, pp.181-190. 1986.
- 5) 東田 淳, 三笠正人, 八谷 誠, 中橋貞雄: 遠心模型実験による剛性埋設管の実測土圧とFEM弾性解析, 土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp.263-272. 1989.
- 6) Tohda, J., Li, L. and Yoshimura, H.: FE elastic analysis of earth pressure on buried flexible pipes. *Proc. of the Int. Conf. on CENTRIFUGE94*, Singapore, pp.727-732, 1994.

(1997.7.24 受付)

## FE ELASTIC ANALYSIS ON MECHANICAL BEHAVIOR OF BURIED FLEXIBLE PIPES MEASURED IN CENTRIFUGE MODEL TESTS

Hiroshi YOSHIMURA and Jun TOHDA

Earth pressures on and deformations of buried flexible pipes, precisely measured in 22 centrifuge model tests, were compared with FE elastic analysis. In the analysis, effects of friction force acting on the test container and stress dependency of soil's deformation modules were considered. Analyzed results conformed well to the test results, clarifying the mechanism of change in the mechanical behavior of the buried flexible pipes due to the following factors: pipe flexibility, type of pipe installation, and ground material. The analyzed results showed that the behavior of the pipes during the sheet-pile extraction was governed by the appearance of both vacant holes at the zones where the extracted sheet-piles initially occupied and loosened zones near the vacant holes.