The Japanese Geotechnical Society

報文—2172

ポリエチレン排水管の変形挙動

Deformation Behavior of Polyethylene Drainage Pipe

大井克己（おおい かつみ）
タキロン㈱八日市工場 技術部開発課

松山眞三（まつやま しんぞう）
タキロン㈱八日市工場 技術部開発課

東田淳（とうだ じゅん）
大阪市立大学講師 工学部土木工学科

1. まえがき

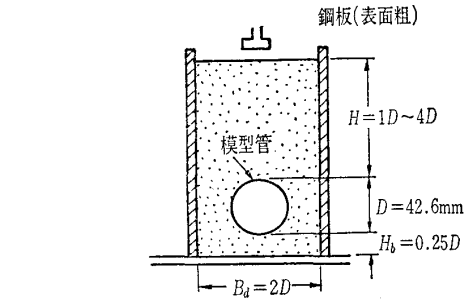
高密度ポリエチレン管（High Density PolyEthylene Pipe，以下 HDPE 管と呼ぶ）はこれまで小口径のガス管や水道管として用いられてきたが，最近，形状をコルゲート状にするなどして管剛性を高めた大口径 HDPE 管が宅造等の造成地の排水管として使用される例が増えてきた。この HDPE 排水管は現在使用されている管の中で最もたわみ性が大きいので，地盤変形に良く追随でき，大変形してもぜい性破壊しないという特長を持つが，その反面，土中での変形挙動はいまだに不明な点が多い。そこで，比較的口径の大きな HDPE 排水管を対象として，シビアーな二つの埋設条件—輪荷重を伴う浅埋設と最大 30m までの深埋設—における HDPE 管の変形挙動を遠心模型実験（以下，遠心実験と呼ぶ）によって調べ，実験結果に基づいてこれらの埋設条件に対するたわみ率を推定した。

2. 遠心実験の方法

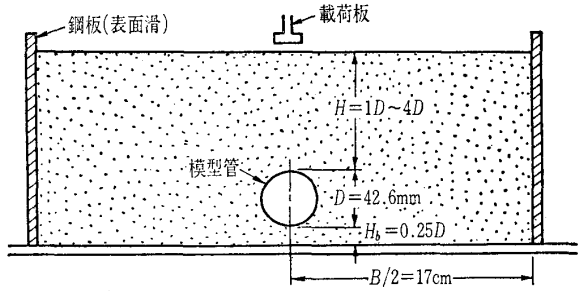
遠心実験は縮小模型を遠心加速度 nG 場に置くことによって，模型に実際と同じ土自重応力を加えて実験するものである。本文で用いる「原型」とは模型の寸法を n 倍したものを指し，原型と模型の間には，原型の埋設寸法や管のたわみ等の長さの次元を持つものは模型の n 倍，原型における土自重や輪荷重による応力・管壁に生じる曲げひずみ・管の曲げ剛性（$=EI/R^3$，R は管厚中心半径）は模型と同じという関係（相似則）が成立する。

2.1 浅埋設実験[1)~5)]

模型は原型の1/15を想定した二次元模型で，図—1 に示すように HDPE 製模型管（図—2）を素掘り溝型（以下，溝型と呼ぶ）と盛土型の二つの埋設方

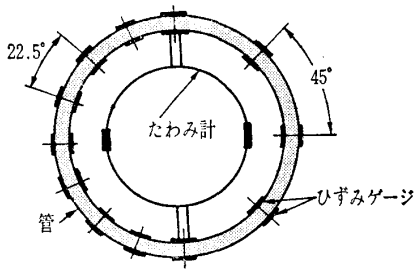


(a) 素掘り溝型



(b) 盛 土 型

図—1 浅埋設実験の模型



	外径D	管厚t	曲げ剛性S_p
模型管	42.6mm	1.8mm	0.68
原型管	639	27	0.68

$S_p=EI/R^3$kgf/cm², $E=11.800$kgf/cm², $I=t^3/12$cm⁴/cm, R：管厚中心半径$=(D-t)/2$

図—2 HDPE 模型管

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表—1　砂の性質

G_s	粒径範囲	U_c	$\rho_{d\max}$	$\rho_{d\min}$
2.65	0.24～1.4mm	1.75	1.58 t/m³	1.32 t/m³

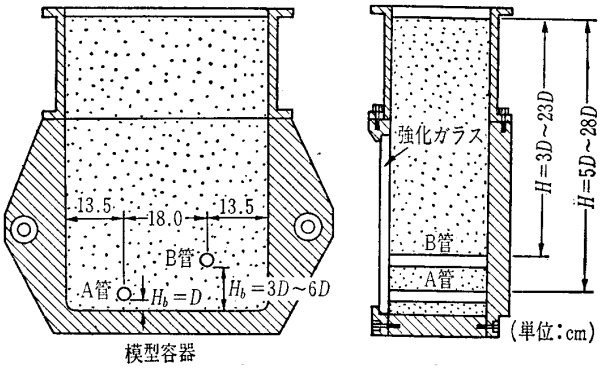
表—2　地盤の性質（密度 ρ_d，強度定数 $c_d \cdot \phi_d$，管面摩擦角 ϕ_p，溝壁面摩擦角 ϕ_w）

地盤	ρ_d	c_d	ϕ_d	ϕ_p	ϕ_w
密地盤	1.55 t/m³	0 tf/m²	47°	23°	45.5°
ゆる地盤	1.43 t/m³	0 tf/m²	36°	17°	44.5°

式で，乾燥砂地盤（表—1，2）中に埋めたものである。溝型では地山が変形しないものとして溝壁を剛な鋼板（表面粗）で置き換えた。模型管の寸法は，図—2中の表に示したように外径 D=42.6mm，管厚 t=1.8mm，管長14.8cmで，原型管の外径は64cmとなる。

模型地盤は，容器を横にして，砂を異なる高さから管軸方向に落下させて（横詰め），2種類の密度（密，ゆる）を持つように作成した。密地盤の相対密度は D_r=90% と極めて良く締まった地盤状態であり，ゆる地盤の相対密度は D_r=50% で，良く施工管理された現場の地盤状態に近い。

これらの模型を遠心加速度15G場におき，幅13.3mm（原型で20cm）の粗な載荷板を用いて20t輪荷重を想定した荷重 q=3.78 kgf/cm² を管直上の地表面に100回まで繰返し載荷し[注1)]，模型管のたわみと曲げひずみの分布を測定した。載荷重強度 q は，20t車が台数に制限なく並んで管軸を直角に横断する時の設計式 $q=2P(1+i)/(L\cdot b)$ に，後輪荷重 P=8tf，衝撃係数 i=0.3，車体幅 L=2.75m，車輪接地幅 b=0.2m を代入して求めたものである。

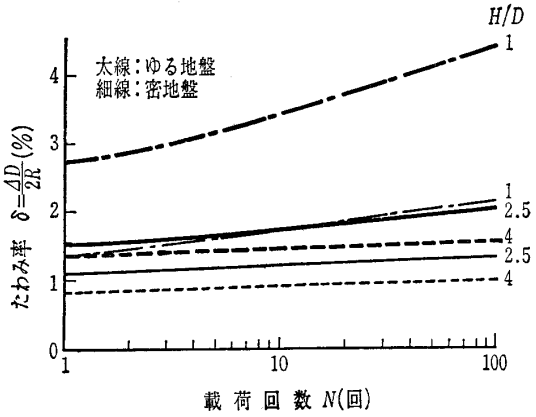


図—3　深埋設実験の模型

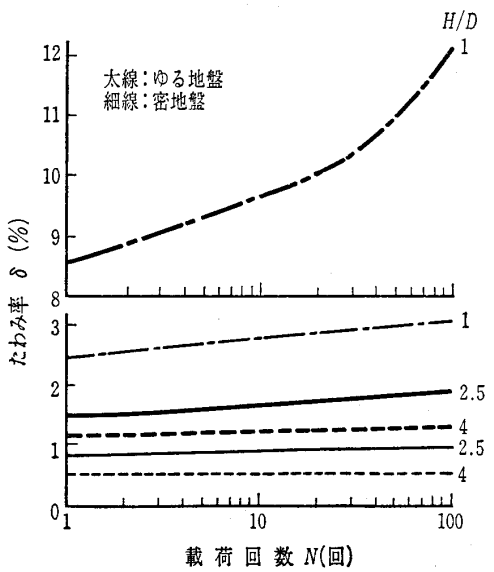
実験条件として，管の埋設方式（溝型，盛土型），砂地盤の密度（密，ゆる），土かぶり高 H（D，2.5D，4D：原型で64cm，160cm，256cm）をそれぞれ変化させた。基礎砂厚 H_b は0.25D（原型で16cm）と一定とした。

2.2　深埋設実験

外径 D=22.6mm，管厚 t=0.9mm，管長21.3cmのHDPE製模型管（注2）参照）2本を図—3に示すように乾燥砂地盤中に埋め，遠心加速度を10Gずつ段階的に49Gまで増し，各段階で管のたわみを測定した。深い埋設を対象としたので，輪荷重載荷は行わなかった。49G場の模型管に対する原型管の外径は1.1mである。実験条件として，砂地盤の密度（密，ゆる），土かぶり高 H（3D～28D，原型で3.3



図—4　管のたわみ率 δ と載荷回数 N の関係（溝型）



図—5　たわみ率 δ と載荷回数 N の関係（盛土型）

注1）現状では，ポリエチレン排水管が舗装道路で用いられることは少ないので，今回は地表面に直接載荷する条件で実験した。載荷回数の100回は実験時間を考慮して決定した。

注2）この管の曲げ剛性（EI/R^3=0.56 kgf/cm²）は，製作上の精度から浅埋設実験で用いた模型管の値（=0.68 kgf/cm²）よりも17%ほど小さくなっている。したがって，後述する図—13の推定たわみ率は管にとって若干安全側（実際よりも大きめの管たわみを与える）である。

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

m～31m)，基礎砂厚 H_b (D～6 D，原型で1.1m～6.6m) を変化させた。地盤材料と地盤作成方法は浅埋設の実験と同じである。なお，相似則を検討するため，D=42.3 mm，t=1.7 mm の模型管を用いて27Gまで遠心載荷する実験も行った。

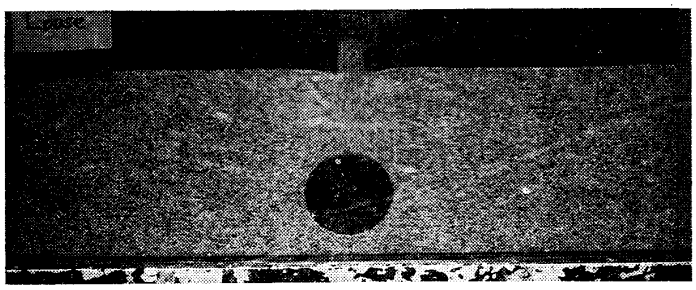
3. 浅埋設実験の結果と考察

3.1 実験結果

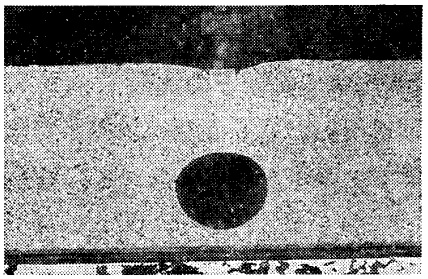
たわみ率 $\delta=\Delta D/2R$ と地表面載荷回数 N の関係を溝型，盛土型について示したものが**図—4**，**図—5** である。ここに，ΔD は管の鉛直たわみ量，Rは管厚中心半径を表す。$H=D$・ゆる地盤の場合を除くと，いずれの場合も δ は $\log N$ に対してほぼ直線となっており，載荷回数の増大につれて δ は次第に収束することを示す。同一の土かぶり高のもとでは，ゆる地盤の δ は密地盤の δ よりも常にかなり大きい。

図—6 は$H=D$・ゆる地盤の実験で撮影した地表面載荷時の砂の動きと管の変形モードを溝型，盛土型について示したもので，載荷によって管は逆おむすび形に変形していることが分かる。

なお，実験は基礎砂厚 H_b を一定にして行ったが，別に行った H_b を変化させた溝型の実験では H_b による δ の変化はあまり大きくなかった。



(a) 砂の動き（開放写真）

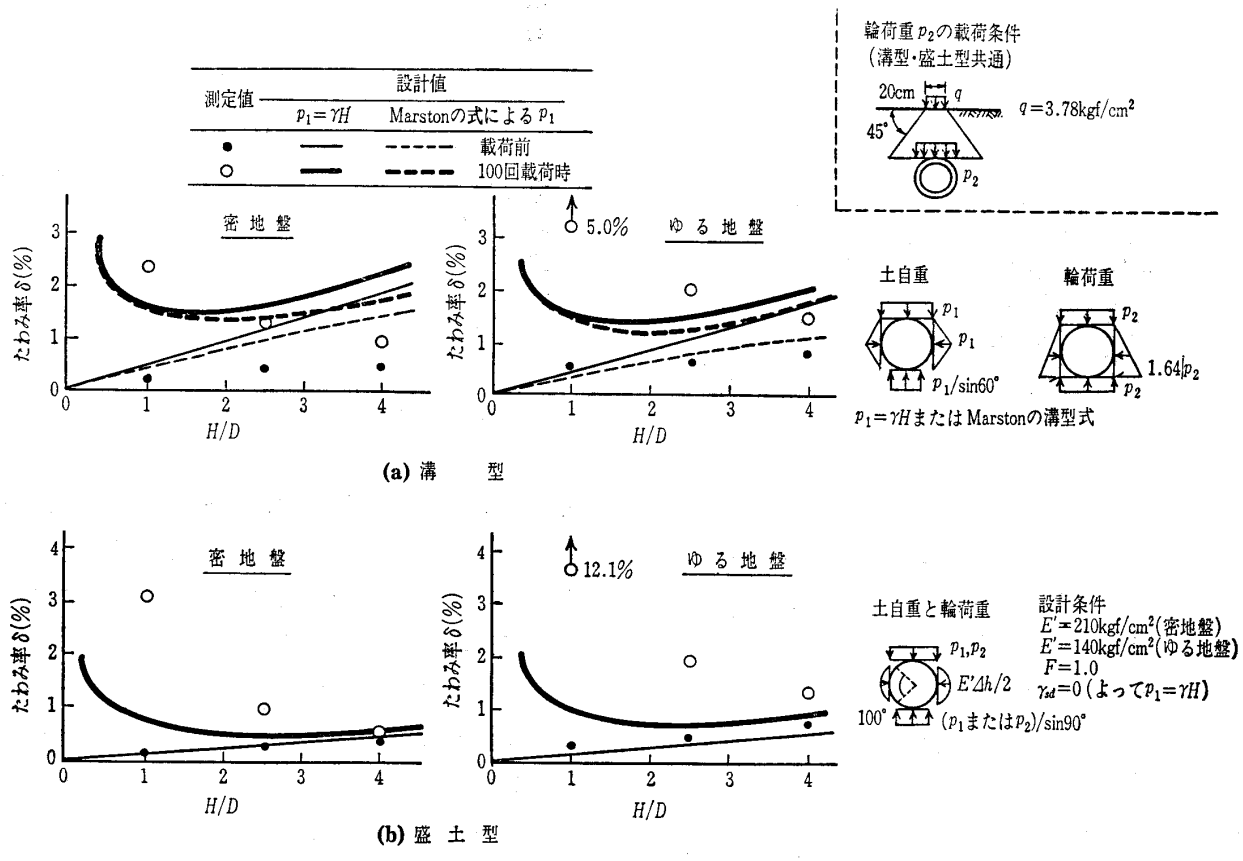


(b) 管の変形モード

図—6 地表面載荷時の砂の動きと管の変形モード（盛土型，$H=D$，ゆる地盤）

3.2 たわみ性埋設管の現行設計法との比較

図—7 は，浅埋設実験で得られた δ-H/D の関係を現行のたわみ性埋設管の設計法（溝型：硬質塩化ビニル管埋設指針[6]，盛土型：農水パイプライン設



図—7 浅埋設実験の結果と現行設計法との比較

NII-Electronic Library Service

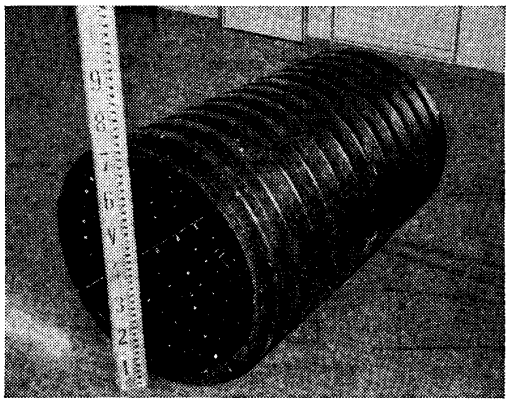
The Japanese Geotechnical Society

計基準[7]）を参考にして計算した設計値と比較したもので，この図から設計値は実験値と合わず，浅い土かぶり高の場合に実験値よりも小さ目（管の設計にとって危険側）の値を与え，この傾向は特にゆる地盤で強いことが分かる。なお，文献7）では管の水平たわみ算定式のみが示されているので，**図—7（b）**の設計値は，同図の右側の荷重条件に対する管の鉛直たわみ式を新たに求め，これを用いて算定した。

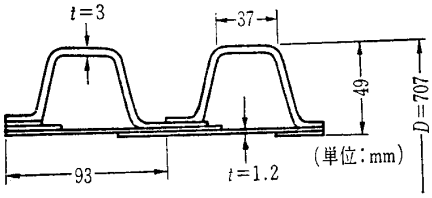
3.3 実際規模の実験との比較[8]

縮小模型を用いた遠心実験の結果が実際規模にどの程度外挿できるかを調べるために，溝型埋設・$H=D$ の場合について，呼び径 600 mm の HDPE コルゲート排水管（**図—8**，注3）参照）を用いた実物大の土槽実験，および $D=102.4$ mm・$t=4.1$ mm の模型管を用いた 1/6.2 の遠心実験を密・ゆる両地盤で行った。これらの実験の条件は，土槽実験で管を土槽に水平に置き，鉛直に砂を落下させた（縦詰め）点を除くと，前述の 1/15 模型実験と同じである。この砂詰め方法の違いの影響をみるために，土槽実験と同じ方法で砂を詰めた 1/15 の遠心実験も行った。

以上の実験で得られた δ と載荷板の沈下量 S/B



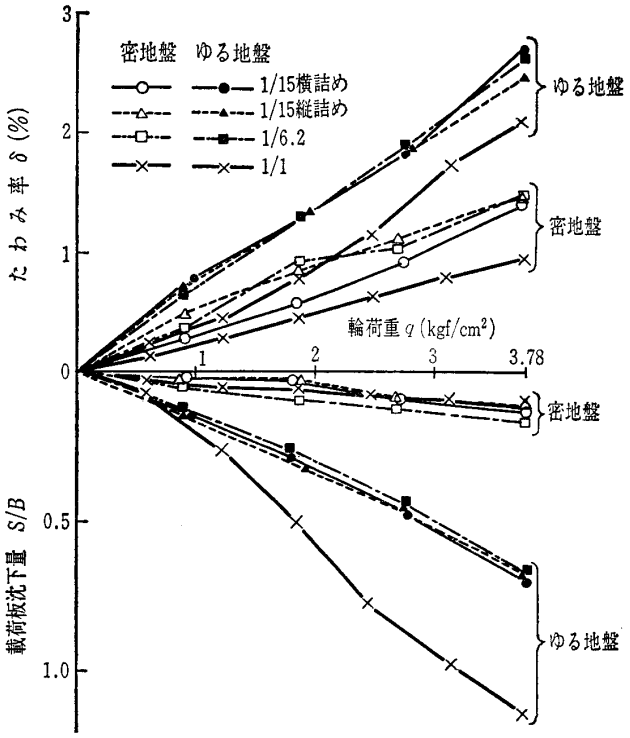
（a） 全体図



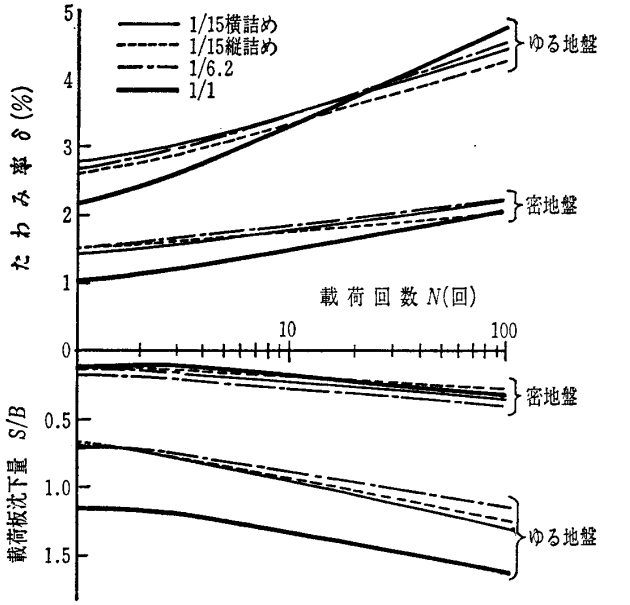
（b） 管壁断面

図—8 HDPE コルゲート排水管

注 3） このコルゲート管と模型管の曲げ剛性が等しいことを，管頂・管底への集中線荷重載荷試験によって確認している。



図—9 管のたわみと載荷板沈下量（1回載荷過程）



図—10 管のたわみと載荷板沈下量（繰返し載荷過程）

を**図—9**（1回載荷過程），**図—10**（繰返し載荷過程）に示す。ここに，S は載荷板の沈下量，B は載荷板の幅（いずれの実験も原型で 20 cm）である。遠心実験では地盤密度が同じであれば，模型の縮尺，砂の詰め方によらず，すべての実験結果がほぼ一致している。一方，土槽実験の結果は，ゆる地盤の S/B が遠心実験よりもかなり大きくなっているのを除くと，全体としては遠心実験の結果に割合近いものになっている。なお，1/15 と 1/6.2 の二つの遠心実験

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

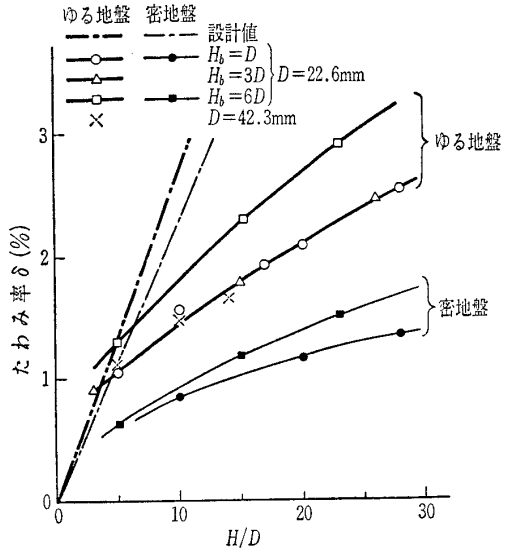
および土槽実験で得られた管の変形モードはほぼ同じであった。

以上の結果から判断して，縮小模型を用いた今回の遠心実験の結果を実際規模に外挿してもそれほど大きな問題は生じないと思われる。

4. 深埋設実験の結果と考察

4.1 実験結果

図—11 は深埋設実験で得られた δ-H/D 関係を示したもので，この図から次のことが分かる。ゆる地盤の δ は密地盤の δ よりも2倍程度大きい。基礎砂厚 H_b が最大の $6D$ の時の δ は他の H_b の場合よりも大きいが，$H_b=D$, $3D$ の二つでは差が見られない。原型が同じ $D=22.6$ mm と $D=42.3$ mm の実験の δ はほぼ一致しており，相似則の成立が認められる。



図—11 深埋設実験の結果と現行設計法との比較

4.2 現行設計法との比較

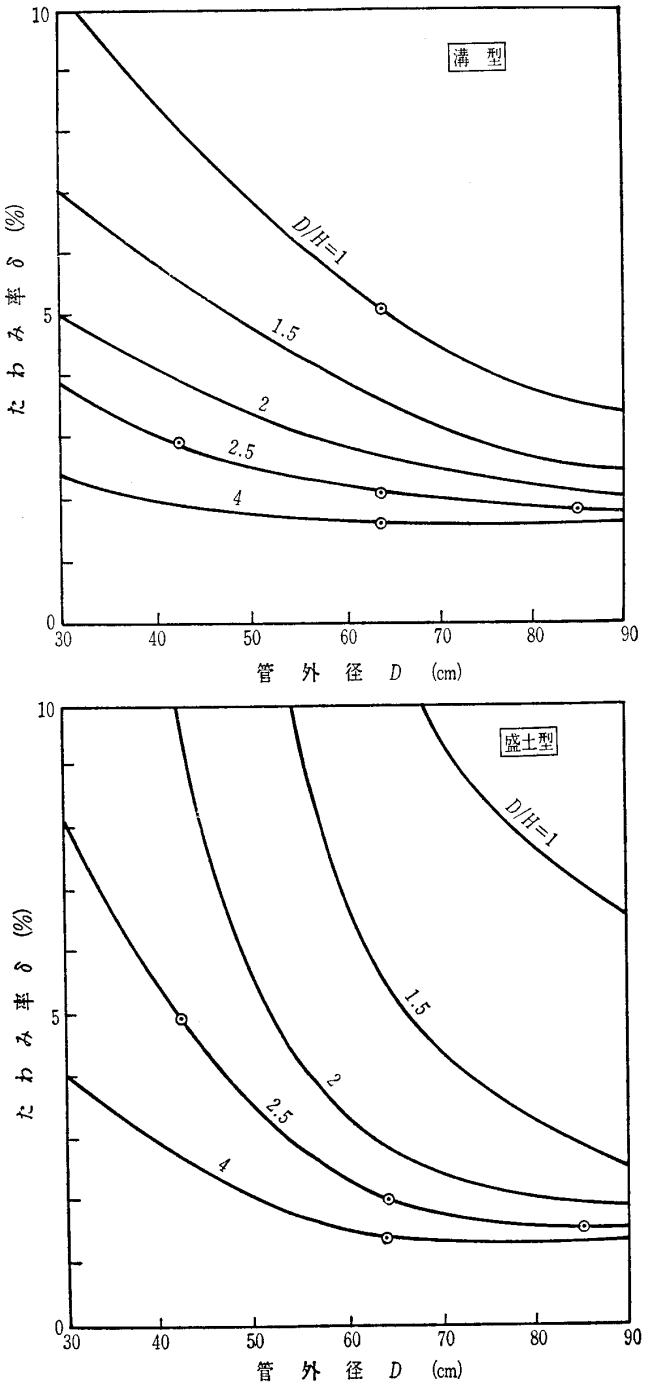
図—11 の一点鎖線は農水基準[7] を参考にして計算した設計 δ 値（鉛直たわみ）である。計算条件は**図—7(b)**に示したものと同じである。密，ゆる両地盤とも，土かぶり高が大きくなるにつれて設計値は測定値よりも大きくなっており，現行設計法では深埋設される管のたわみがかなり過大に見積もられることが分かる。

5. 原型管のたわみ率の推定

HDPE 排水管の口径／管厚の値はどの管径でもほぼ同じである。ここでは，この関係を用いて種々の口径を有する HDPE 排水管のたわみ率を推定する。

5.1 浅埋設の場合

前述した浅埋設の遠心実験で用いたのと同じ模型管を $H=2.5D$, $H_b=0.25D$ の寸法でゆる地盤中に埋め，遠心加速度10G，20G場で，$B=2$cm，1cmの載荷板を用いた地表面載荷を100回繰り返した時の管のたわみを測定した。これらの実験結果と1/15



図—12 浅埋設される HDPE 排水管の推定たわみ率（砂質土，$D_r \fallingdotseq 50\%$）

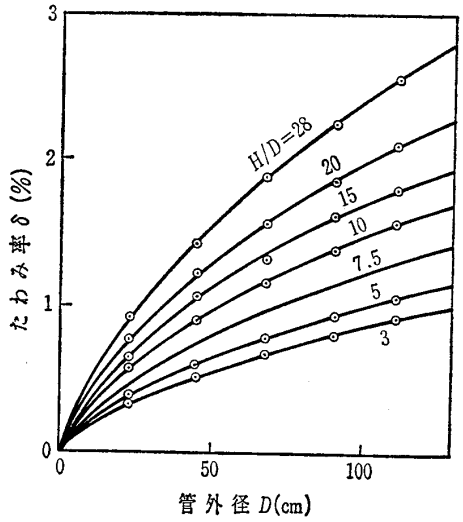
NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

模型の実験結果（図—4，5のゆる地盤のデータ）を用いて推定した原型管の δ-H/D 関係を図—12に実線で示す。図中の◉印は実験値である。

5.2 深埋設の場合

深埋設の遠心実験（$H_b=D$，$3D$，ゆる地盤）で得られた遠心加速度 nG と δ の関係を，原型管の外径 D と δ の関係に置き直すことによって図—13の実線が得られる。図中の◉印は実験値である。この図から異なった管径，H に対する δ 値が推定できる。



図—13 深埋設されるHDPE排水管の推定たわみ率（砂質土，$D_r \fallingdotseq 50\%$）

6. まとめ

浅埋設および深埋設されるHDPE排水管の変形挙動を遠心模型実験によって調べ，実験結果に基づいて，管径が43 cm～122 cm，曲げ剛性（$=EI/R^3$）が0.6～0.7 kgf/cm² の範囲のHDPE排水管のたわみ率を推定する図表（図—12，13）を示した。この図表は，従来の埋設管の設計に対するアプローチ（Marston-Spangler 理論のような数学的モデル，あるいは限定された実大実験に基づく）とは異なり，数多くの系統的な遠心模型実験の結果に基づいて作成されたものである。ただし，遠心模型実験では，地盤材料として乾燥砂を用い，また地盤作成は十分管理された良好な条件で行われているので，この図表を用いて実際のたわみ率を推定する際には，細粒分をほとんど含まない良質な砂質土を地盤材料として用いるとともに，密度測定やコーン貫入試験を含む十分な締固め管理の下に $D_r=50\%$ 程度に締固めることが必要である。

参考文献

1) 大井克己・松山眞三・東田　淳・矢野博彦：遠心模型による埋設ポリエチレン管の変形観測，第23回土質工学研究発表会，1988.
2) 大井克己・松山眞三・東田　淳：遠心模型による埋設ポリエチレン管の変形挙動（盛土型埋設の場合の設計について），土木学会第43回年次学術講演会，1988.
3) 大井克己・松山眞三・東田　淳・吉村　洋・徳永哲郎：素掘り溝型埋設されるポリエチレン管の設計について，土木学会第44回年次学術講演会，1989.
4) 松山眞三・大井克己・東田　淳・吉村　洋・徳永哲郎：盛土型で埋設されるポリエチレン管の設計について（設計図表の提案），第25回土質工学研究発表会，1990.
5) J. Tohda, K. Ohi and H. Yoshimura: Deformation Behavior of Buried Polyethylene Pipes Measured by Centrifuge Model Tests, Proc. of the 6th Int. Sympo. on Freight Pipelines, 1989.
6) 財国土開発技術研究センター：下水道用硬質塩化ビニル管道路埋設指針，1983.
7) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準，1988.
8) 松山眞三・大井克己・東田　淳・吉村　洋・徳永哲郎：埋設ポリエチレン管の変形挙動（実物大実験と遠心模型実験の比較），第24回土質工学研究発表会，1989.

（原稿受理　1990. 10. 18）

NII-Electronic Library Service