

火山灰の受働抵抗係数に関する埋設模型実験

Model Test on the Modulus of Soil Reaction Values of Volcanic Ash Soil

太田 寛彰* 小野寺康浩* 秀島 好昭** 佐藤 吉則***

Hiroaki OTA, Yasuhiro ONODERA,

Yoshiaki HIDESHIMA and Yoshinori SATO

一般に土中に埋設する可とう性管のたわみ量の予測には、Spanglerの仮定に基づく計算方法を採用している。この方法では、管体側部に作用する受働土圧は管周囲の土の受働抵抗係数(e')を用いて計算され、 e' は管の変形量の算定上支配的な因子である。現在、可とう性管の構造計算に用いる e' の値には、米国開拓局による土質分類と土の締固めの程度より得られる標準値が推奨されている。しかし、この土質分類に該当しない火山灰等の特殊土の e' の値は不明である。

筆者らは埋設可とう性管の埋戻し材に火山灰を用いた模型実験を行い、火山灰の e' について検討した。その結果、埋戻し材の締固め密度として一般的な締固め度85%程度では、火山灰の e' は米国開拓局が示すSM材（米国統一土質分類による）の約2倍の値を示した。

本報では、可とう性管の埋戻し材に特殊土を利用するにあたり基礎資料となる、火山灰の e' に関する知見を述べた。

《受働抵抗係数 (e')；火山灰；可とう性管；パイプライン》

For the estimation of the amount of deflection of flexible pipes buried in the ground, the calculation method based on the Spangler assumption is generally adopted. In this method, passive earth pressure acting on the side of pipes is calculated using the modulus of soil reaction values(e') of the soil surrounding the pipes. The e' is dominant factor to calculate the amount of deformation of pipes. Currently, the standard value of the U. S. Bureau of Reclamation, which is obtained from soil classification and the degree of soil compaction, is recommended as the e' value that is used for structural calculation of flexible pipes. However, the e' value of unusual soil like volcanic ash soil is unknown, because it does not fall under any soil classification.

We conducted model test using volcanic ash soil as back - fill soil for buried flexible pipes and examined the value of e' of volcanic ash soil. The results showed that when the degree of compaction is around 85%, which is a common degree of compaction density for back - fill soil, the e' value of volcanic ash soil was approx. twice that of SM material based on the U. S. unified soil classification indicated by the U. S. Bureau of Reclamation.

*農業土木研究室研究員 **同室長 ***同室副室長

In this report we show results obtained by us of the e' value of volcanic ash soil, which can be basic information for the use of unusual soil as back - fill soil of flexible pipes.

Keywords : modulus of soil reaction values (e'), volcanic ash soil, flexible pipe, pipe line.

まえがき

土中に埋設するパイプラインの管種に可とう性管を使用する場合には、管のたわみ量の予測が不可欠である。現在、農業農村整備事業で行うパイプライン工事の設計・施工は、「土地改良事業設計基準設計水路工（その2）パイプライン」¹⁾（以下、「設計基準」とする）および「土地改良事業標準設計第4編パイプライン（解説書）」²⁾に準拠しており、可とう性管のたわみ量の予測には Spangler の仮定³⁾に基づく計算方法を採用している。Spangler の計算式では、可とう性管に作用する受働土圧は埋設管周囲の土の受働抵抗係数 (e') を用いて計算され、管の変形量は、上載荷重、管のたわみ剛性、および管周辺土の e' によって規定されている。そして、Spangler の計算式においては、 e' の値が管の変形量に対して支配的なパラメータをなしている⁴⁾。

一般に設計で用いる e' の値には、Howard⁵⁾ の研究成果による土質分類と土の締固めの程度でカテゴリー化された代表的な e' の値を採用するケースが多い。「設計基準」においても Howard が求めた e' の値が標準値として推奨されている。しかし、火山灰等の「設計基準」の土質分類に該当しない特殊土や軟弱地盤の e' に関する知見は少ない。

筆者ら⁶⁾は軟弱地盤における e' に関しては、原位置埋設実験および現地調査の結果から、その知見について報告している。

本報では、「設計基準」に e' の標準値が示されていない、火山灰の e' に関する実験結果について述べた。火山灰の e' の値は、室内埋設実験によって検討したものであり、これらの結果を道内各地に分布する特殊土の e' に関する基礎資料として報告する。

1. 埋設実験の概要

1. 1 実験の目的

e' は管が上載荷重によって変形するとき、管側の埋戻し材が与える拘束力の程度を示すものである。この埋設実験では、火山灰の e' の値を調べるために種々の締固め度で埋戻しを行い、火山灰の e' 値と締固めの程度の見出すことにある。

実験では e' の標準値¹⁾ が設定されている砂を対象土に、火山灰を用いた比較実験を行い、火山灰の e' を求めた。 e' の算定には、実験土槽内に埋設した供試管のたわみ量の計測値と上載荷重から、Spangler の式を用いて e' を逆算する方法を用いた。

1. 2 埋戻し材料

埋戻し材料として使用した試料は、日本統一土質分類で S V に分類される火山灰および、比較試料の S P に分類される砂の2種類である。火山灰および砂の物理・力学的性質を表-1に示す。火山灰、砂ともに実際に埋戻し材として使用されている材料であるが、埋設実験では土

表-1 埋戻し材に用いた試料の物理・力学的性質

試 料 名		火山灰	砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.42	2.69
粒 度	礫 分 (%)	4	7
	砂 分 (%)	79	90
	シルト 分 (%)	11	3
	粘 土 分 (%)	6	0
	Uc	13.3	3.7
	Uc'	1.9	1.1
最大粒径 (mm)		4.75	4.75
液性限界 LL (%)		—	—
塑性限界 Ip		NP	NP
日本統一土質分類		S V	S P
統一土質分類 (ASTM)		SM	S P
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)		1.163	1.730
最適含水比 W_{OPT} (%)		37.2	17.2
実験時の含水比 (%)		1.4	0.5

* ρ_{dmax} , w_{opt} は、JIS A 1210, A-c 法による試験結果。

槽内における試料の締固めの均一性を確保するために、2試料とも粒径4.75 mm以下とし、十分に空気乾燥した状態で使用した。

なお、埋設実験では上述の理由から乾燥した試料を用いているが、火山灰の含水比状態と締固めの程度の違いによる強度発現の傾向は、後述するように埋設実験に先立ち比較検討した。

1. 3 埋設実験土槽および载荷装置

埋設実験に用いた土槽は図-1に示すように、内寸が高さ750 mm、幅1600 mm、奥行400 mmの鋼板製のピットで、正面には土槽内部の状況が観察できるように硬質強化ガラスが配置されている。また、土槽の外側部はH鋼で補強されており、平面ひずみ状態を保持できる剛構造をなしている。

载荷装置は、油圧ポンプによって応力制御方式で上载荷重を与えるもので、3連式の油圧シリンダーが連動する構造となっている。载荷時には3分割された厚さ35 mmの鋼板製の载荷板を介して、土槽上面より鉛直等分布圧力を加えるしくみとなっている。

1. 4 供試管

埋設実験に使用した供試管の寸法および性質を表-2に示す。供試管には $\phi 200$ mmの薄肉

表-2 供試管の寸法および性質

管 種	管厚中心 径D (mm)	管 厚 (mm)	弾性係数 E (kgf/cm ²)	リング外圧剛性 EI/D ³ (kgf/cm ²)
FRP管	202.9	2.3	210,000	2.7×10^{-2}

の強化プラスチック管 (FRP 管) を使用した。環片圧縮試験より求めた供試管のリング剛性 (EI) は224.0 kgf・cm²/cmであり、十分な可とう性を有する管である。管内中央部には、ダイヤルゲージ (精度1/100 mm) を取り付けて鉛直方向および水平方向の管のたわみ量を測定した (図-1)。また、管の中央部断面には内・外面の円周方向に15° 間隔に一軸のひずみゲージを貼付し、実験中は管体に発生するひずみを測定し、埋戻しから载荷過程の各段階における管の変形状況の確認を行っている。供試管の両端面は、管内部への埋戻し材の流入防止のため、厚さ0.3 mmのポリエチレンシートで密閉している。

2. 埋設実験方法

2. 1 実験ケースおよび締固め方法

供試管の埋設位置は、図-1に示したように各実験ケースとも厚さ200 mmの砂基礎上の中

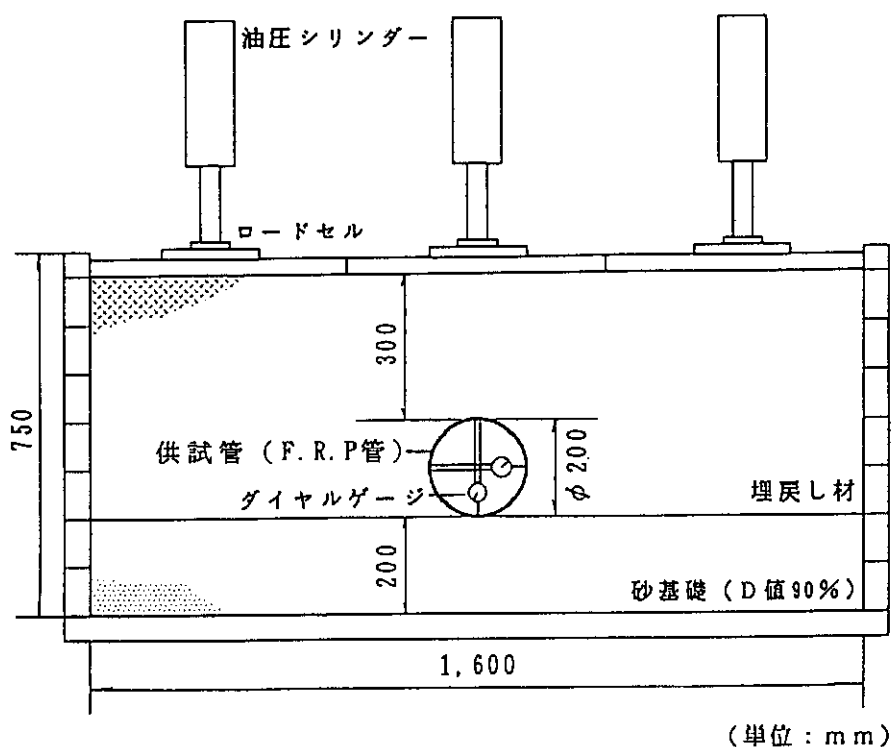


図-1 埋設実験土槽断面図

表-3 火山灰の実験ケース

実験ケース	D値(%)	締固め方法
Case-A	82.5	高さ1 cmからの自由落下
Case-B	86.7	突き棒による突固め
Case-C	91.0	プレートバイブレータによる締固め
Case-D	93.7	突き棒、プレートバイブレータの併用

中央部に土被り300 mmの状態では埋設した。実施した実験ケースを火山灰の場合を表-3に、砂の場合を表-4に示す。実験で設定した締固め度（以下、D値とする）は、パイプラインの実施工において埋戻し材の標準的な締固めの程度である、締固めI^{1,2,5)}（D値85%程度）前後を目標とした。各実験ケースでは埋戻し材のD値以外は全て同一条件としている。砂基礎は全実験ケースでD値90%とし、砂基礎の締固めはプレートバイブレータで行った。

各実験ケースにおける埋戻し材の締固め方法は、事前に行った予備実験により決めており、締固め度の差が現われるように表-3, 4に示した自由落下、突き棒による突固め、プレートバイブレータによる締固め等で実施した。なお、当実験では供試管のたわみ量から e' を算出することから、上載荷重による管の変形状態はSpanglerの仮定と一致した左右対称の変形が生ずることが必要である。管の変形が偏った場合には、たわみ量から求めた e' の信頼性が低くなる。管の変形が左右対称に生ずるためには埋戻し材の締固めの均一性が極めて重要となるが、この点は上述した締固め方法によって管側・管上部における埋戻し材の均一性が得られることを、予備実験における密度試験にて検証している。

2.2 実験方法

各実験ケースとも埋戻し完了（管頂上の土被り300 mmの状態）後には、埋戻し材上面から載荷板を介し、3連式の載荷装置により載荷圧力約1.0 kgf/cm²まで、0.1 kgf/cm²毎に載荷した。なお、一荷重の載荷時間は30分間とした。

表-4 砂の実験ケース

実験ケース	D値(%)	締固め方法
Case-A	86.0	突き棒による突固め
Case-B	93.0	プレートバイブレータによる締固め
Case-C	96.1	突き棒、プレートバイブレータの併用

実験中の計測は全てデータロガーにより収録しており、供試管設置、埋戻し過程（埋戻し厚100 mm毎）、載荷過程（0.1 kgf/cm²毎）の各段階における管のたわみ量、発生ひずみ量の各計測値は、その都度確認しながら実験をすすめた。

なお、Howardは埋戻し部の溝幅が管径の5倍以上の場合には、管の変形に与える現地盤の影響は無くなることを指摘をしている⁵⁾。当埋設実験では、土槽の溝幅（1600 mm）は供試管の管径（200 mm）の8倍程度あり、供試管の変形には土槽側壁の剛性は影響しないと考えられる。

3. 実験結果

3.1 管のたわみ量の変化

埋戻しから載荷過程における管の水平方向たわみ量の変化を、火山灰の実験ケースを図-2に、砂の実験ケースを図-3に示す。火山灰、砂のいずれのケースでも、埋戻し材のD値が低い場合には管のたわみの増加は大きく、D値が高くなるにしたがってたわみの増加は小さくなっているようすがわかる。火山灰のCase-A, B, 砂のCase-Aにみられるように、埋戻し材のD値が低いケースでは、管頂までの埋戻し時点における変形量は極くわずかであり、管の形状はほぼ真円に近い状態にある。そして、その後の載荷過程では、載荷圧力が小さい段階でたわみの増加が顕著に現われているが、載荷圧力の増加に伴ってたわみの進行は低下している。これは埋戻し材のD値が低い場合には、上載荷重の増加に伴い拘束力が増加し、埋戻し材が徐々に硬化するためと考えられる。

一方、火山灰のCase-C, D, 砂のCase-B, C

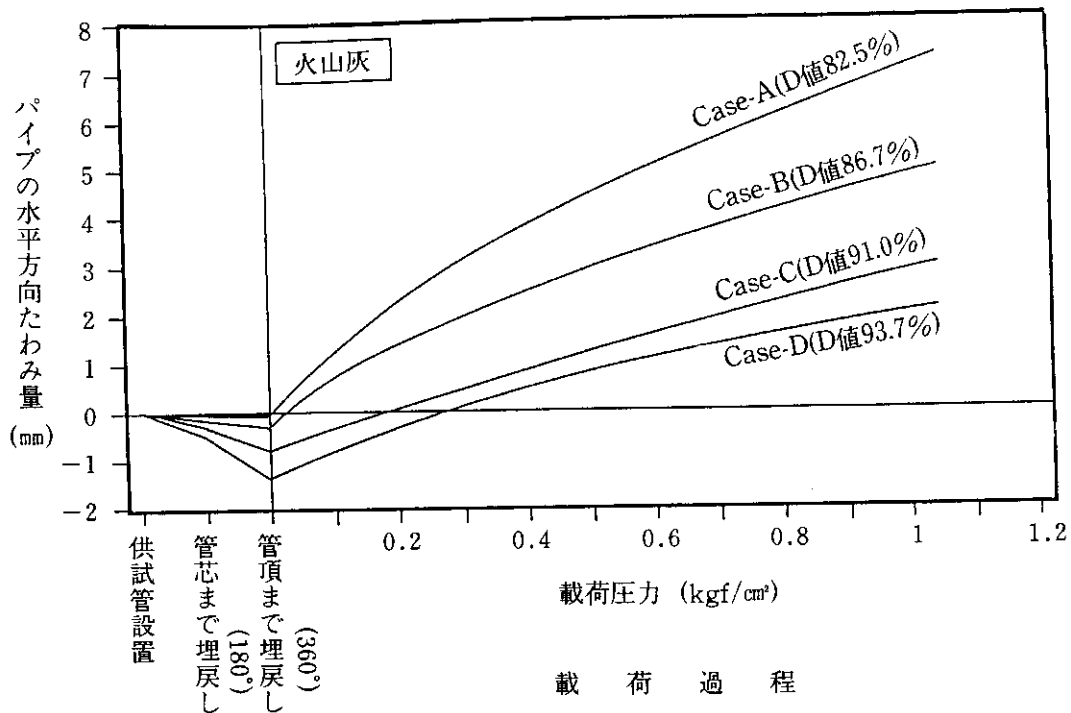


図-2 管の水平方向たわみ量の変化（火山灰の場合）

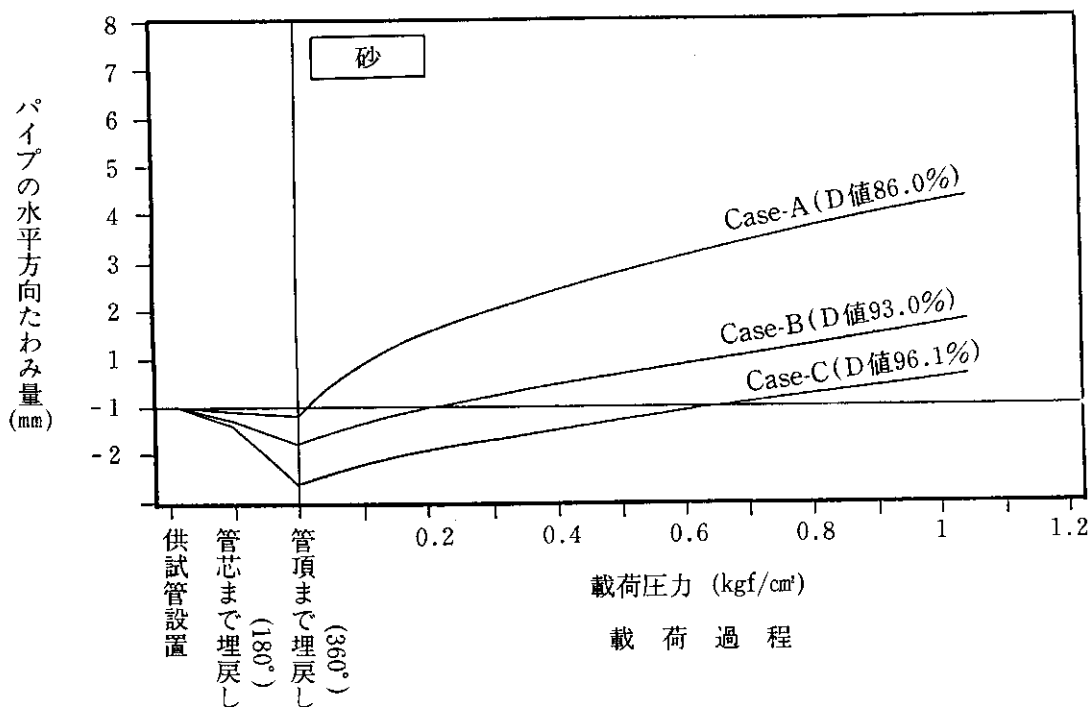


図-3 管の水平方向たわみ量の変化（砂の場合）

のように、埋戻し材のD値が高いケースでは管頂までの埋戻しによって、水平方向たわみ量は-1.0 mm 前後の値を示しており（管の水平方

向の直径が真円時に比べて減少）、すなわち管の形状は縦に長い楕円形に近い状態にある。これは、埋戻し材のD値が高い場合、管側の埋戻し

によって管には埋戻し材による主働土圧が作用していることを示している。今回の実験結果では、上載荷重と水平方向たわみ量の関係には、埋戻し材のD値が90%以下のケースでは非線形の関係がみられ、D値が90%以上のケースでは線形に近い関係がみられた。

3. 2 たわみ量より求めた受働抵抗係数 e'

図-4には、各実験ケースにおける管の水平方向たわみ量(Δx)と鉛直荷重(W_v) (埋戻し材の土被り圧と載荷圧力の和) から求めた e' を示す。 e' の算出では、(1)式に示す Spangler の式を用い、変形遅れ係数 (F) は1.0、基礎の支持角によって決まる係数 (K) は $K=0.110 \sim 0.083^{1)}$ の平均値0.1を採用した。 Δx の値は Spangler の仮定にしたがい、真円時からの変化量とした。したがって、埋戻し材のD値が低いケースでは、載荷過程の初期段階を Δx の初期値としており、D値が高いケースでは、管の形状が縦長の楕円形から真円に戻った時点を Δx の初期値としている。

$$e' = \frac{1}{0.061 \cdot R^3} \left(\frac{2 \cdot F \cdot (K \cdot W_v \cdot R^4 + K_p \cdot W_p \cdot R^4)}{\Delta x} - E \cdot I \right) \quad \dots (1)$$

ここに、 Δx : 水平たわみ量 (cm)

R : 管厚中心半径(cm)

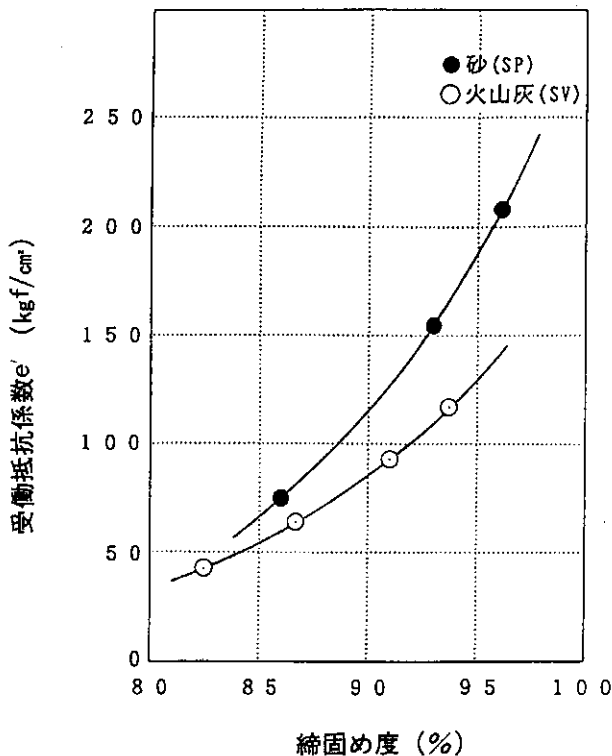


図-4 埋設実験より求めた火山灰と砂の締固めと e' の関係

W_v : 土圧による鉛直荷重強度

(kgf/cm²)

W_p : 管体の単位面積当り重量

(kgf/cm²)

K, K_p : 基礎の支持角によって決まる係数

E : 管材の弾性係数(kgf/cm²)

I : 管軸方向を軸とし、管延長1 cm 当りの管壁の断面二次モーメント (cm⁴/cm)

埋設実験より求めた火山灰、砂の e' の値は、いずれのケースでもD値が高くなるにつれて e' は大きい値を示し、D値の増加に伴う e' 値の増分は火山灰よりも砂の場合でより顕著に認められる。しかし、パイプラインの埋戻し材の締固め密度として一般的なD値85%程度 (締固め I) に着目すると、火山灰と砂の e' の値の差はそれほど大きくないようである。図-4の結果から、火山灰と砂のD値85%, 90%, 95%における各 e' の値を示すと表-5のようになる。火山灰と砂の e' の値は、D値85%ではその差は小さいが、D値が90%, 95%と高くなると e' の差はかなり大きくなっている。

ここで、「設計基準」に引用されている Howard が示した土の分類と締固めの程度より定めた e' の標準値を表-6に示す。表-6から、埋設実験で用いた砂 (米国開拓局による統一分類法ではS P材) の e' の標準値を求めると、締固め I (D値85%程度) で $e'=70$ kgf/cm² であり、この値は埋設実験から求めた砂のD値85%における $e'=67$ kgf/cm² (表-5) と同程度の値である。また、表-6の e' の標準値から砂の締固め II (D値85%以上) における e' の値を求めると $e'=140$ kgf/cm² であり、図-4の結果から $e'=140$ kgf/cm² を得る砂のD値は約92%である。このように、砂の e' を標準値と

表-5 埋設実験から求めたD値85%, 90%, 95% における受働抵抗係数 e'

		(kgf/cm ²)		
試料	D 値 (%)	85	90	95
火山灰		55	84	128
砂		67	116	186

表-6 土の受働抵抗係数 e' の標準値¹⁾(単位: kgf/cm^2)

締固めの程度		締固めなし	締固め I	締固め II
埋戻し土の種類 (統一土質分類法)				
細粒土	液性限界が50%以下 細粒部分が25%以下の CL, ML, ML-CL	3.5	14	28
	液性限界が50%以下 細粒部分が25%以下の CL, ML, ML-CL	7	28	70
粗粒土	細粒部分が12%以上の GM, GC, SM, SC			
	細粒部分が12%以上の GW, GP, SW, SP	14	70	140

締固め程度は次のとおりである。

締固めなし……………厳密な施工管理を行わない (いわゆる膨軟状態ではない)

締固め I……………プロクター密度85%程度, 若しくは相対密度40%程度 (一定の使用を定めて管理する締固め)

締固め II……………プロクター密度85%以上, 若しくは相対密度40%以上 (厳密な施工管理のもとで行う締固め)

表-7 埋設実験から求めた受働抵抗係数 e'
(kgf/cm^2)

締固めの程度	締固め I (D値85%)	締固め II (D値92%)	統一土質 分類 (ASTM)
火山灰	55 (28)	100 (70)	SM
砂	67 (70)	140 (140)	SP

() 内の値は、表-6の土の分類と締固めの程度より求めた e' の標準値を示している。

埋設実験から求めた値で対比し (締固め I は D 値85%, 締固め II は D 値92%として) 締固め I, II の場合について埋設実験から求めた e' を示したものが表-7である。同表には「設計基準」から求めた e' の標準値も示した。なお、火山灰の e' の標準値を求めるにあたっては、Howard が示した標準値の表の土質分類方法と同様に統一土質分類法 (ASTM) で分類して、当該火山灰を SM 材と仮定した。その場合、SM 材の e' は締固め I で $e' = 28 \text{ kgf}/\text{cm}^2$, 同 II で $e' = 70 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ が適用される。表-7からは、埋設実験から求めた火山灰の e' は締固め I で $e' = 55 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ であり、 e' の標準値の表を用いて SM 材の e' として求まる $e' = 28 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の約2倍の値を示している。

3.3 含水比の違いによる火山灰の強度の比較

今回の埋設実験では、火山灰および砂ともに空気乾燥試料を用いている。しかし、一般的に

は砂に比べて火山灰の自然含水比は高い場合が多く、含水比が高い試料では乾燥試料に比べて強度が低くなることも予想される。また、現実の施工条件下では地下水の影響による埋戻し材の強度低下による e' の変化も考えられるので、設計に用いる埋戻し材の e' の検討の際には、含水比が高い状態における材料の強度についても考慮する必要がある。

そこで、火山灰の締固め後の強度について、埋設実験と同じ乾燥試料と含水比の高い状態の試料で比較実験を行った。実験は CBR 試験に準じて行い、乾燥試料と4日間水浸させた試料の荷重強さを測定した。供試体は D 値85%, 90%, 95% の3通りの締固め度で各々3個作成し、荷重強さは貫入量5.0 mm における各供試体の平均値とした。

D 値と荷重強さの関係を乾燥・水浸試料で比較した結果を図-5に示す。D 値85%の供試体では間隙が大きいために、乾燥試料よりも水浸試料のほうが水締めの影響により強度はやや大きい。D 値90%では乾燥、水浸試料とも同程度の強度となっている。また、D 値95%では逆に乾燥試料の方が水浸試料の強度を大きく上回っている。この結果からは、火山灰は締固めの程度によって、乾燥・水浸時の強度特性が大きく異なるようすがわかる。この点、表-7に示した埋設実験から求めた火山灰の e' の値は乾燥試料を使用した結果であるため、火山灰の D 値が高いケースの締固め II (D 値92%) における $e' = 100 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ は、含水比が高い状態では標

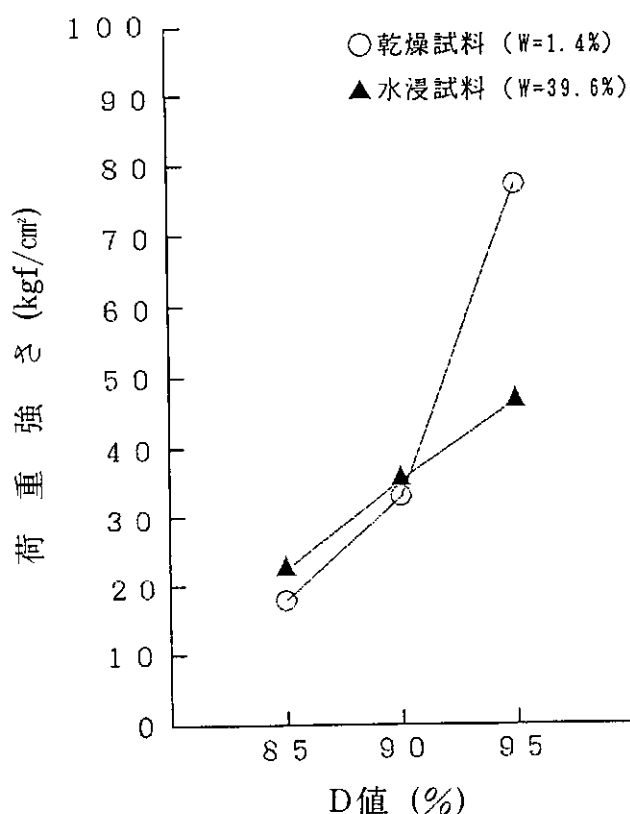


図-5 乾燥・水浸状態における火山灰の荷重強さ

記の値よりも e' が低下する可能性が考えられる。しかし、D値85%程度の締固めを実施するうえでは、図-5の結果にみられたように締固めによる土の組織構造の方が強度に与える影響は大きいいため、含水比の多少による火山灰の強度の差異は小さく表われているようである。したがって、一般にパイプラインの埋戻し材の締固め密度はD値85%程度とする場合が多いことから、表-7に示した火山灰の締固めI (D値85%) の $e'=55 \text{ kgf/cm}^2$ の値は、火山灰を埋戻し材として使用する場合の参考値として有用であろう。

なお、「設計基準」の e' の標準値の表を用いて火山灰の e' 値を引用する場合、SM材として求まる $e'=28 \text{ kgf/cm}^2$ (締固めI) は、埋設実験から示した $e'=55 \text{ kgf/cm}^2$ の約1/2の値であることから、締固め密度が低いケースでは火山灰の種類に応じてその値が変化することに留意する必要があるだろう。

4. まとめ

パイプラインの埋戻し材に用いる火山灰の受働抵抗係数 e' を、埋設実験から求めた。その結

果、火山灰(SV材)の e' は、締固めI (D値85%程度) で $e'=55 \text{ kgf/cm}^2$ を示した。この値は、Howardが示した土の分類と締固めの程度より求まる e' の標準値の表を準用して、火山灰をSM材として求めた $e'=28 \text{ kgf/cm}^2$ に比べて約2倍の値であった。

あとがき

e' はパイプの変形と埋戻し土の反力の関係を表わす指標であり、現行の可とう性管の構造設計においては、管のたわみ量の子測および管体に作用する受働土圧の算定においては極めて重要な値である。今後も、道内各地に分布する土質、施工条件に応じた e' に関する調査・研究を継続し、パイプラインの設計施工に関する基礎データを蓄積したい。

謝辞：本実験に際し、七戸義一氏（北海道開発局農業水産部）および澤田則彦氏（同帯広開発建設部）の両氏にはパイプライン埋戻し材の現場施工の実状に関する御指導、ならびに実験試料等の御提供を頂いた。また、埋設実験では高瀬一隆氏（同小樽開発建設部）の御協力を得た。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 水路工（その2）パイプライン（1988）。
- 2) 農林水産省構造改善局：土地改良事業標準設計 第4編パイプライン（解説書）（1989）。
- 3) Spangler, M.G. : The Structural Design of Flexible Pipe Culverts, Bulletin 135 Iowa Engineering Experiment Station (1941)。
- 4) 毛利栄征：パイプラインの構造設計（設計基準の解説）, 農土学会, 69-112. (1988)。
- 5) Howard, A.K. : Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, GT1, 33-43 (1977)。
- 6) 小野寺康浩, 太田寛彰, 秀島好昭：軟弱地盤における可とう性管の土中挙動（I）—管の変形と土の受働抵抗係数について—, 開発土木研究所月報 No.490, 3-12. (1994)。