

# 非塑性の細粒分を含む土の締固め法

新納 格<sup>1</sup>・正田要一<sup>2</sup>・蔣 建群<sup>3</sup>・栗林栄一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 株式会社アーステクノ 室長(〒890-0072 鹿児島市新栄町26番6号)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 光建 代表取締役(〒460-0012 名古屋市中区千代田1丁目7番8号)

<sup>3</sup>正会員 工博 豊橋技術科学大学 助手 工学部第六工学系(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 豊橋技術科学大学 名誉教授(〒441-8106 豊橋市弥生町西豊和10-2-801)

粒子間力の物理学的考察と検証を行ったうえで、室内試験で液体表面張力を調整した水溶液を混合土に添加し、細粒分含有率、締固め仕事量およびサクシジョンの締固め密度等への影響を吟味した。その結果、締固め密度は粒子間力と締固め仕事量の力関係で決定される結果を得た。次に屋外試験を行い、土中水の液体表面張力低下は地盤沈下量と沈下安定時間を減少短縮することを明らかにした。

**Key Words:** *unsaturated soils, non-plastic fine-grained soil mixture, interfacial forces, interparticle forces, laplace pressure, laboratory test, in situ test, improved compaction method*

## 1. まえがき

ロマプリエタ地震、北海道南西沖地震および兵庫県南部地震等で、非塑性から低塑性の細粒分を多く含む埋立地盤で液状化が生じた。多くの研究成果から、このような土は砂以上に液状化し易く、既存の締固め法では、容易に液状化強度を高めるほどの密度が得られない問題が明らかとなった<sup>1),2),3),4)</sup>。この問題の原因はマトリックスポテンシャル(主にLaplace圧力から成る、式(1)を参照)による粒子間力で、締固め時の土粒子間のすべりが抑制されるためと考えられる<sup>5)</sup>。一方、このような土の締固め密度増加が容易に可能となれば、盛土や埋戻し地盤の品質向上にも有効である<sup>6)</sup>。

以上から、本研究はこのような土の締固め密度の増加方法として、マトリックスポテンシャルの減少を目的とした非イオン性界面活性剤(以下、活性剤と記す)水溶液による締固め法を示し、その効果を室内試験および屋外試験で検討したものである。

広義の意味の界面活性剤を土に加えた効果については、多くの研究成果<sup>7),8),9)</sup>があるが、本研究の界面の物理的なエネルギー調整作用<sup>10),11)</sup>に着目したものは、著者らの研究<sup>12),13)</sup>以外には成されていない。

## (1)研究の概要と経緯

著者ら<sup>13)</sup>は、活性剤の液体表面張力減少作用を利用し、非塑性の細粒土にこの水溶液を添加し、液体表面張力の締固め性への影響を調べている。例えば、図-1は直径50mm高さ100mmの二つ割モードを用いての、非塑性の細粒土の非繰返し法による締固め試験結果である(詳細は後の第2章を参照されたい)。これによると、液体表面張力減少で初期サクシジョンは低下し、その結果、一軸圧縮強さは低下し、締固め密度は増加する。締固め密度と粒子間力を代表するサクシジョンの関係は、液体表面張力の値にかかわらず同じ曲線で近似できることを明らかにした。

これらの成果をもとに、本研究では粒子間力の表面物理学的考察を行い、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャル間の相互作用を検証したうえで、非塑性の細粒土と中砂の混合土の室内試験(不飽和一軸圧縮試験)で液体表面張力の影響を吟味し、屋外のモデル地盤で活性剤水溶液の最適な屋外混合方法を検討し、実施工でその効果を示した。

本論文の構成は、第1章で研究の概要と経緯、粒子間力の表面物理学的考察と検証を行った。第2章は室内試験結果、第3章は屋外試験結果を考察し、第4章の結論で結果を総括する。

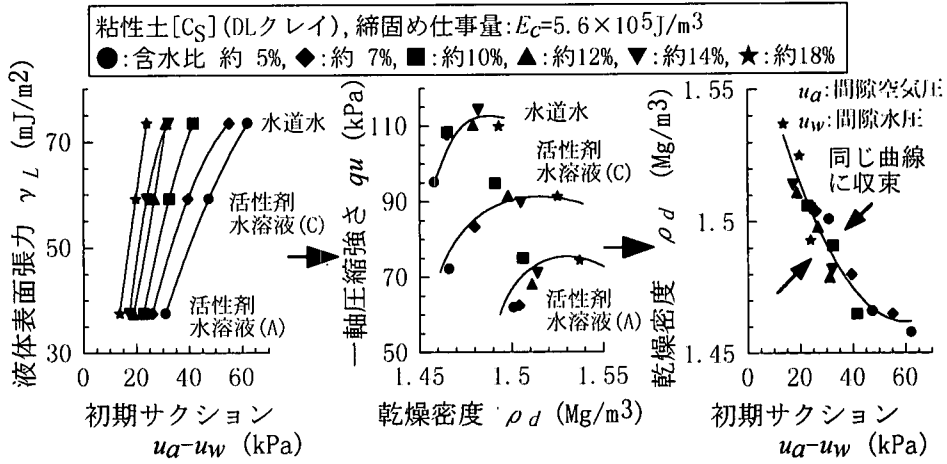


図-1 液体表面張力の締めめへの影響の一例

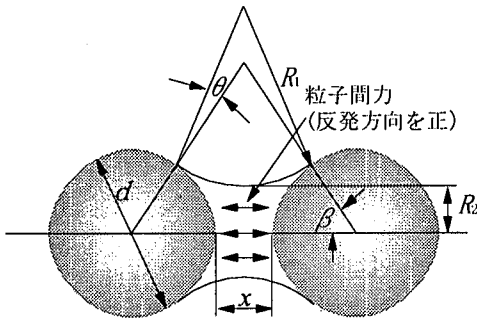


図-2 液体架橋の二粒子モデル

## (2) 粒子間力の考察と土質材料の検証

### a) 粒子間力の考察

PietschとRumpf<sup>(14)</sup>は、図-2の液体架橋の二粒子モデルにおいて、粒子間の液体架橋が鞍型の場合、Laplace圧力と水膜の線張力による力の和の式(1)の粒子間力が生じることを示した。

$$F_M = F_K + F_R \quad (1)$$

$$F_K = -\gamma_L \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{\pi}{4} d^2 \sin^2 \beta$$

$$F_R = -\gamma_L \pi d \sin \beta \sin(\beta + \theta)$$

ここに、 $F_M$ : マトリックスポテンシャルの粒子間力

$F_K$ : Laplace圧力,  $F_R$ : 線張力,  $d$ : 粒径

$\gamma_L$ : 液体表面張力,  $R_1, R_2$ : 曲率半径

$\beta$ : 液量に対する角度,  $\theta$ : 固液間の接触角

弾性体接触による粒子間力 $F_s$ は、JKR理論<sup>(15)</sup>のJKR極限からDerjaguin-Muller-Toporov理論<sup>(16)</sup>のDMT

極限まで変化し<sup>(17),(18)</sup>、粒子接触を含むマトリックスポテンシャルの粒子間力は式(2)で定義できる。

$$F_{MS} = F_M + F_S \quad (2)$$

ここに、 $F_{MS}$ : 粒子接触を含むマトリックス

ポテンシャルの粒子間力

$F_S$ :  $F_{JKR}$ から $F_{DMT}$ の範囲の値

$$F_{JKR} = -3\pi \frac{d}{2} \gamma_{SL}, \quad F_{DMT} = -4\pi \frac{d}{2} \gamma_{SL}$$

$\gamma_{SL}$ : 固液間の界面張力

$$= \gamma_{SV} - \gamma_L \cos \theta$$

$\gamma_{SV}$ : 固体表面張力

式(1)および式(2)より、粒子接触を含むマトリックスポテンシャルの粒子間力には、液体表面張力が関係していることがわかる。

もう一つの化学ポテンシャルである浸透ポテンシャルによる粒子間力は、近似的に式(3)の接触値定理で与えられる<sup>(6)</sup>。

$$F_{OSM}(x) = kT \left[ \sum_i \rho_i(x/2) - \sum_i \rho_i(\infty) \right] \quad (3)$$

ここに、 $F_{OSM}(x)$ : 浸透ポテンシャルの粒子間力

$x$ : 粒子表面間距離,  $k$ : ボルツマン定数

$T$ : 絶対温度,  $i$ : イオン種別

$\sum_i \rho_i(x/2)$ : 粒子間中央部の全イオン濃度

$\sum_i \rho_i(\infty)$ : バルク相の全イオン濃度

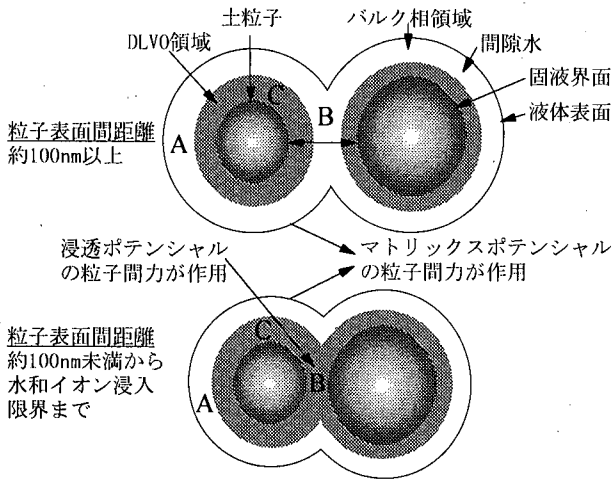


図-3 土中水が付着した二粒子モデル

式(3)の粒子間力発生原因のイオン濃度差は、粒子表面間距離が約100nm以上では理論的に存在しない<sup>16)</sup>。イオンの吸着等による粒子間力の変化は、100nm～電気二重層では、van der Waals引力と静電的反発力の相互作用であるDerjaguin, Landau, VerweyおよびOverbeekの定義したDLVO理論<sup>16)</sup>で示され、約1nm～4nmの電気二重層以下の距離においては、非DLVO力で説明される<sup>16),19)</sup>。

以上から、概念的な化学ポテンシャルの粒子間力 $F_A(x)$ は式(4)となり、個々の粒子間力の寄与度は土質や水和イオン等で異なると考えられる。

$$F_A(x) = F_M + F_S + F_{OSM}(x) \quad (4)$$

ここに、 $F_A(x)$ ：化学ポテンシャルの粒子間力

この粒子間力と粒子集合体の平均的粒子間力である引張強さの関係は、Shinoharaら<sup>20)</sup>の修正式等から求められる。

岩田らの研究<sup>21),22)</sup>を参考にして得られた図-3の二粒子モデルを用いて、式(4)を粒子表面間距離で分けて、遠距離から順に解説すると以下ようになる。図中にはDLVO理論および非DLVO力の影響領域をDLVO領域として示した。また、物理学の慣例に従い、粒子間力は反発方向を正值としている。

1. 粒子表面間距離が約100nm以上：バルク相のA点と粒子表面間中央部のB点は等しいイオン濃度であるので $F_{OSM}(x)$ は存在せず、 $F_M$ のみが作用する。

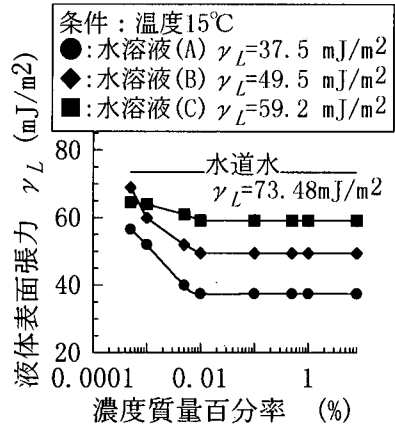


図-4 活性剤水溶液の性質

- 約100nmから電気二重層の距離：互いのDLVO領域の重なりで、B点とA点間にイオン濃度差が生じ、DLVO理論で示される $F_{OSM}(x)$ と $F_M$ が作用する。
- 電気二重層から水和イオン浸入限界の距離：非DLVO力で説明される $F_{OSM}(x)$ および $F_M$ が作用する。
- 水和イオン浸入限界から粒子接触直前の距離：非DLVO力で説明される $F_{OSM}(x)$ またはバルク相イオン濃度相当の付着力および $F_M$ が作用する。
- 粒子が接触する場合： $F_S$ 、非DLVO力で説明される $F_{OSM}(x)$ またはバルク相イオン濃度相当の付着力および $F_M$ が作用する。

以上の考察から、締固め性への液体表面張力減少効果をマトリックスポテンシャルについて検討するには、実験に用いる土粒子表面への活性剤成分の吸着量が、 $F_{OSM}(x)$ を発生するほど多くないこと、さらに、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャル間の相互作用の存在有無を検証する必要がある。

すなわち、土粒子の表面電荷や微細骨格構造等でイオン移動が妨げられ、イオンが土中で局在する場合、この局所的な浸透ポテンシャル低下を補うべく水分移動等が生じ、マトリックスポテンシャルを上昇させ、等しい化学ポテンシャルを持つようにエネルギー調整されている可能性が存在する。よって、式(1)で示される本来のマトリックスポテンシャルが支配的であることの検証が必要となる<sup>11),16),21)</sup>。

#### b) 土質材料の検証

図-4に示す水溶液(A)の濃度0.5～8質量%の6種

表-1 検証と室内試験に用いた基本土質材料の性質

表示	粗粒土	非塑性の細粒土
土質材料分類 <sup>23)</sup>	中砂(SP)	粘性土 [Cs]
名称	ケイ砂6号	DLクレイ
主要組成	ケイ砂	ケイ石粉砕物
SiO <sub>2</sub> 含有率 (%)	95.9	94.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.97	2.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.91
MgO	0.05	0.12
土粒子密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.660	2.65
液性限界 $w_L$ (%)	NP	NP
塑性限界 $w_P$ (%)	NP	NP
均等係数 $U_c$	1.3	3.5
曲率係数 $U_c'$	1.1	1.8
粘土分含有率 (%)	0.0	9.5
シルト分含有率 (%)	0.1	90.4
砂分含有率 (%)	99.9	0.1

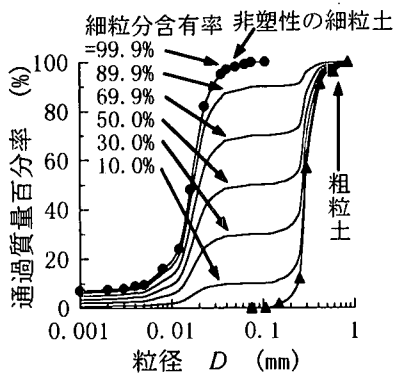


図-5 室内試験に用いた混合土の粒径加積曲線

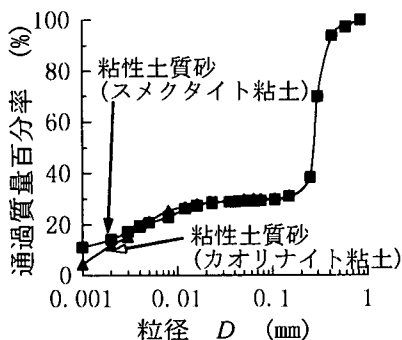


図-6 検証に用いた粘性土質砂の粒径加積曲線

類および水道水を用い、ある特定の濃度以上で液体表面張力一定となる活性剤の性質を利用して、活性剤濃度とそれを添加した土のマトリックスポテンシャルのサクション変化挙動から上述の検証を行った。

供試体寸法直径50mm高さ30mmの黄銅製モールドに、所定の土粒子の体積率 ( $V_s/V$ )、体積含水率 ( $V_w/V$ ) および空気間隙率 ( $V_a/V$ ) となるように土を3層に分けて均等に入れ、最大荷重49kN、載荷速

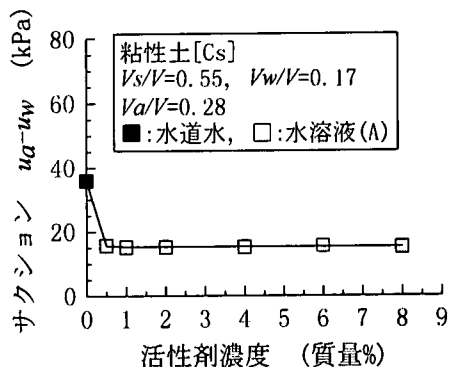


図-7 活性剤濃度とサクションの関係  
非塑性の細粒土 (DLクレイ)

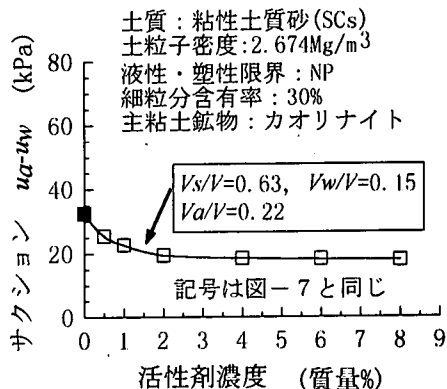


図-8 活性剤濃度とサクションの関係  
粘性土質砂 (カオリナイト粘土)

度1mm/minで静的に締固めて作製した。供試体は乾燥防止の処置を施し、2日間恒温室に静置し、加圧版法<sup>1)</sup>でサクションを測定した。非塑性の細粒土として、表-1の粘性土 (DLクレイ) を用い、粒径加積曲線を図-5に示す。粘性土質砂は主鉱物の異なる粘土を表-1の粗粒土と混合して作製し、粒径加積曲線は図-6に示す。表面電荷密度または比表面積の大きさは、粘性土質砂 (スメクタイト粘土) > 粘性土質砂 (カオリナイト粘土) > 非塑性の細粒土 (DLクレイ) の順序となる。

図-7に非塑性の細粒土 (DLクレイ) の試験結果を示す。活性剤濃度0.5質量%以上でサクション一定となり、土粒子表面間とバルク相の間に大きなイオン濃度差が生じていない。同様に図-8に粘性土質砂 (カオリナイト粘土) の試験結果を示す。活性剤濃度2.0質量%以上で近似的にサクション一定となり、この活性剤濃度以上では大きなイオン濃度差

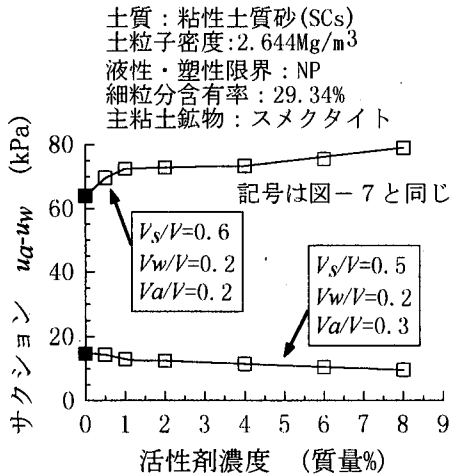


図-9 活性剤濃度とサクシヨンの関係  
粘性土質砂 (スメクタイト粘土)

は生じていない。同様に図-9に粘性土質砂 (スメクタイト粘土) の試験結果を示す。土粒子の体積率 ( $V_s/V$ ) が0.5では、図-8と同じサクシヨン減少が見られる。 $V_s/V$ が0.6では、サクシヨンは増加傾向を示す。土粒子表面間とバルク相の間のイオン濃度差で発生した浸透ポテンシャルが、マトリックスポテンシャルのサクシヨンを増加させたと考えられる。 $V_s/V$ が0.5の場合とその挙動が異なるのは、土粒子表面間距離が短縮されたことが原因であろう。

以上から、室内試験で用いる非塑性の細粒土 (DLクレイ)への活性剤吸着量は、浸透ポテンシャルの影響が生じるほど多くなく、マトリックスポテンシャルに対する液体表面張力減少の影響を検討可能である。さらに、表面電荷密度または比表面積が大きい土ほど、活性剤成分の土粒子表面への吸着によって、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの間に相互作用を生じることを確認した。他のイオンでも同様な作用が生じていると考えられる。

## 2. 室内試験による検討

### (1)土質材料組成と活性剤水溶液濃度

表-1に混合土の作製に用いた基本土質材料の性質<sup>23)</sup>、図-5に粒径加積曲線を示す。いずれも親水性表面が支配的な表面電荷の小さな高純度シリカ鉱

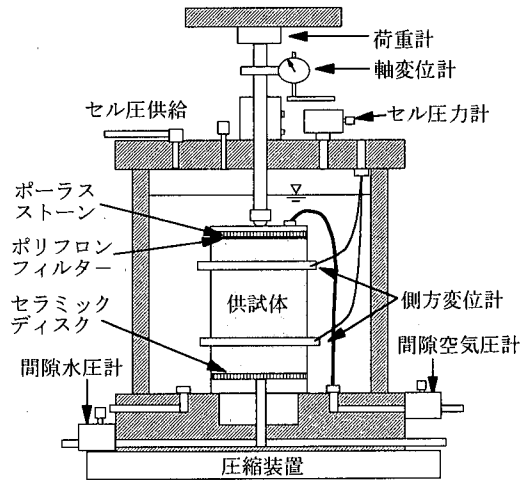


図-10 三軸圧力室の概要

物である<sup>24)</sup>。活性剤水溶液は図-4に示す水溶液(A)および水溶液(C)を用い、その濃度は図-7に示すように、土のサクシヨンが一定となる0.5質量%に設定した。

### (2)供試体作製と試験方法

供試体は直径50mm高さ100mm、鏡面仕上げの2つ割モールドを用い、落下高さ100mm、質量1kgのコンパクターで締固め仕事量 $E_c=100\%=5.6 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ および50% $=2.8 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ で作製した。均一な供試体を得るために、加水する水滴を細かくし、締固め前に全断面ピストンで軽く押さえている<sup>25)</sup>。供試体は2日間恒温室に静置し、不飽和一軸圧縮試験を行った。図-10に三軸圧力室の概要を示す。間隙水圧測定はセラミックディスクが埋め込まれたペDESTALを通じて行い、間隙空気圧はポラスストーンを埋め込んだ上部キャップの接続ホースを圧力室内で解放し、上部キャップ下の撥水性ポリフロンフィルターを通じて供給した。供試体の体積変化は側方変位計および載荷ピストンの軸変位計から求められる。試験順序等は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験<sup>26)</sup>に従い、せん断時のひずみ速度は0.05%/min、間隙空気圧は間隙水圧が正值となるよう78.45kPaとした。

### (3)試験結果の考察

#### a)細粒分含有率の影響

図-11および図-12に体積率表示による締固め曲

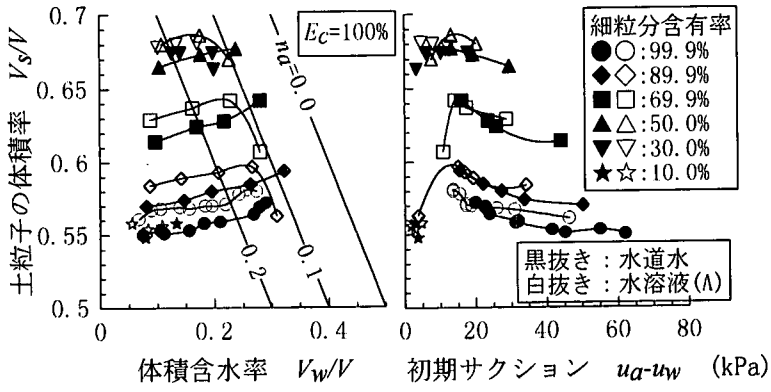


図-11 体積率表示の締固め特性 その1

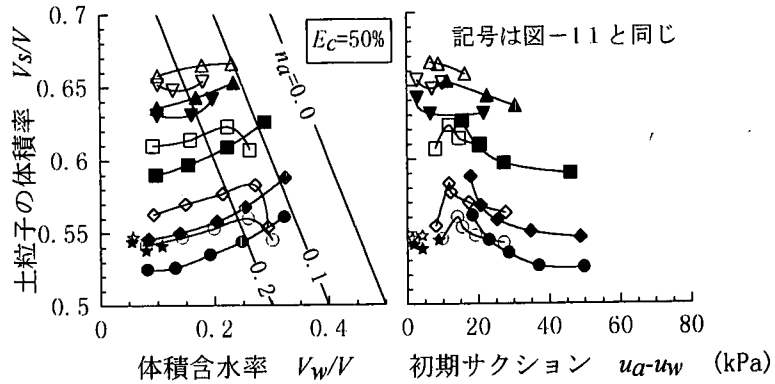


図-12 体積率表示の締固め特性 その2

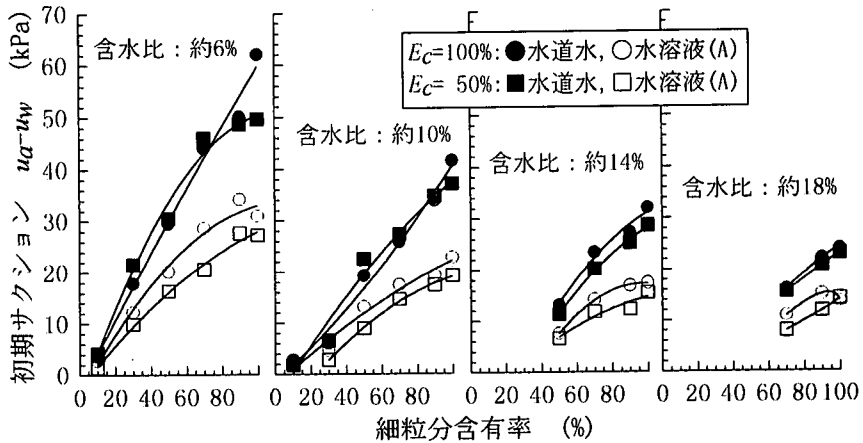


図-13 初期サクシオンと細粒分含有率の関係

線と初期サクシオンの関係を示す。締固め仕事量の異なるそれぞれの図の締固め曲線の細粒分含有率30%以上で、水溶液(A)の場合の土粒子の体積率は水道水のそれを上回る。細粒分含有率10%は均一粒

度で、初期サクシオンも小さいために有意な曲線は得られていない。両図の初期サクシオンと土粒子の体積率の関係曲線は、粒子接触の影響で、初期サクシオン増加および細粒分含有率減少に応じて離れる

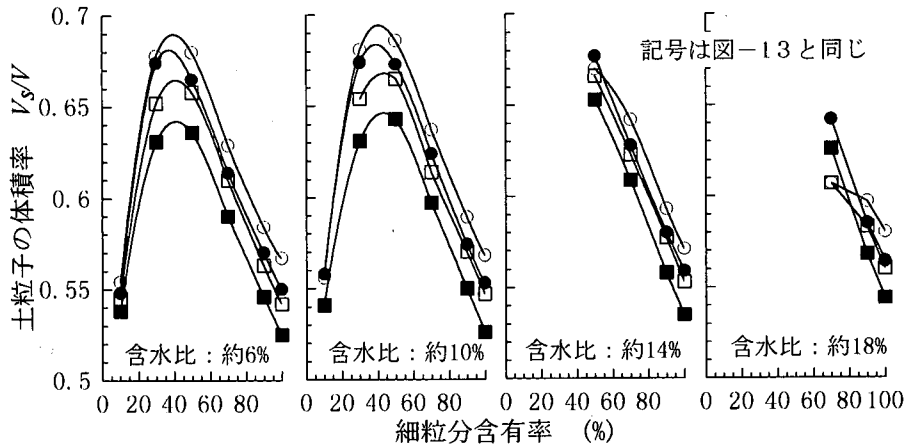


図-14 土粒子の体積率と細粒分含有率の関係

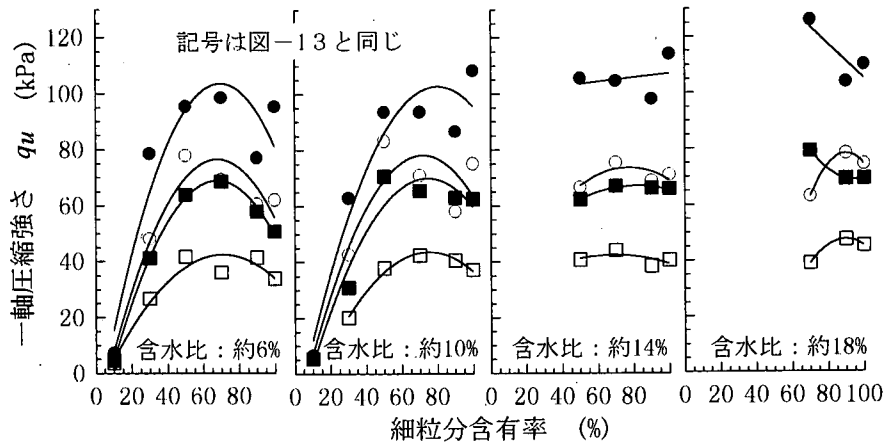


図-15 一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係

傾向にあるが、細粒分含有率50%以上では図-1と同様に各細粒分含有率ごとに同じ曲線で近似できる。

±0.2%の誤差範囲で含水比ごとに整理した初期サクシオンと細粒分含有率の関係を図-13に示す。細粒分含有率が増加するほど初期サクシオンは増し、水道水と水溶液(A)の差も拡大する。これは同じ含水比における比表面積の増加は不飽和状態を進め、粒子間のメニスカスが発達し、液体表面張力の影響が増すことを示している。

図-14は図-13と同様に含水比ごとに整理した土粒子の体積率と細粒分含有率の関係を示したものである。全体傾向として水溶液(A)の土粒子の体積率は水道水のそれを上回り、含水比約6%および約10%では、締めめ仕事量 $E_c=100\%$ の細粒分含有率30%以上および $E_c=50\%$ の10%~30%以上で、水溶液

(A)の土粒子の体積率は水道水のそれを上回り、細粒分含有率約40%で最大となる。 $E_c=100\%$ の方が細粒分含有率10%~30%で液体表面張力減少の影響が小さい理由は、低い細粒分含有率によって初期サクシオンが小さく、粒子同志の接触や均等係数に代表される粒度特性の影響が増すことが原因と考える。

図-15は図-13と同様に含水比ごとに整理した一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係を示したものである。全体傾向として水溶液(A)の場合の一軸圧縮強さは水道水のそれを下回り、液体表面張力減少によるせん断強さの低下が表れている。同様に図-16の変形係数と細粒分含有率の関係では、水溶液(A)の場合は水道水よりやや低く分布する傾向が見られる。このように活性剤水溶液による液体表面張力減少によって、締めめ密度は増加しても一軸圧縮強さや変

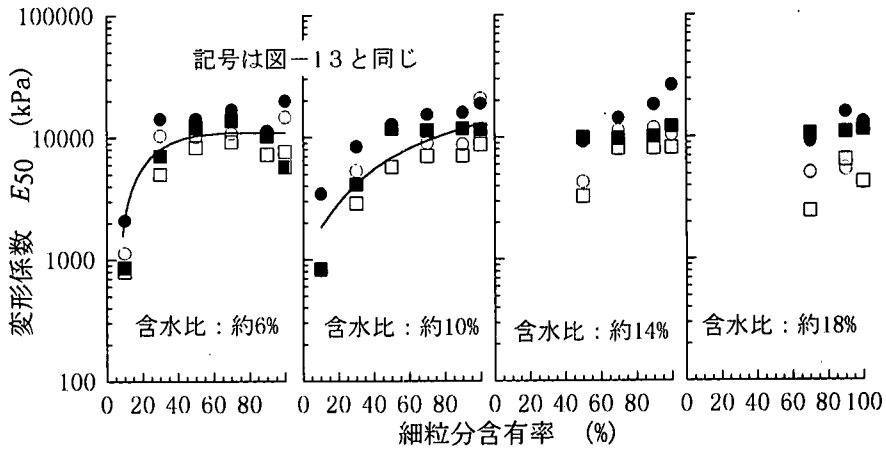


図-16 変形係数と細粒分含有率の関係

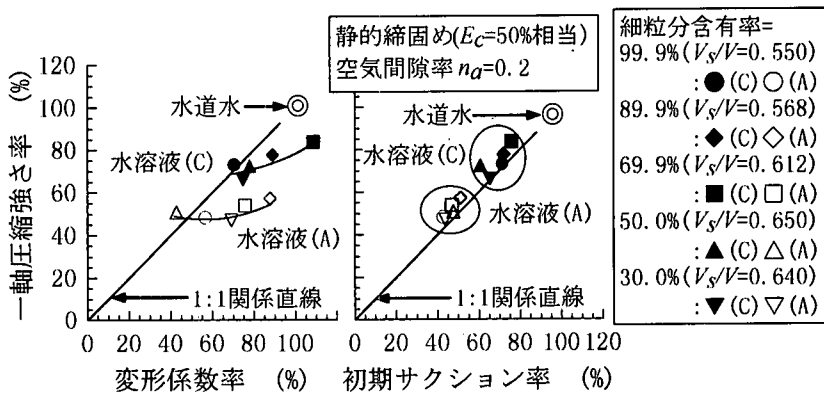


図-17 一定空気間隙率における液体表面張力の影響

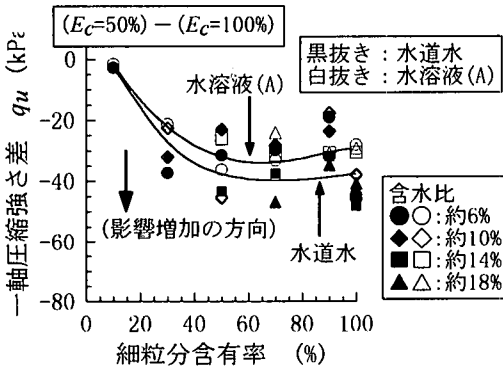


図-18 締固め仕事量の一軸圧縮比への影響

形係数は低下することは、第1章の図-1や粒子間力の考察から予測できる。また、浸水によって強度特性は回復することが確認されており<sup>13)</sup>、この現象が実用上の支障とはならない。この強度回復現象については、後の第3章でも検討している。

図-17は図-12の $E_c=50\%$ の実験結果から、空気

間隙率 $n_a=0.2$ の線と交わる土粒子の体積率および体積含水率で静的締固めを行い、液体表面張力の影響を検討したもので、水道水での値を100%として正規化してある。左図の一軸圧縮比と変形係数率の関係において、水道水>水溶液(C)>水溶液(A)の順序で低下する液体表面張力に応じて、一軸圧縮比および変形係数は低下する。右図の一軸圧縮比と初期サクシオン率の関係において、液体表面張力の値に応じて初期サクシオン率と一軸圧縮比率は1:1関係直線付近に分布して対等な関係にある。

従って、土の締固めが局部的なせん断変形破壊を生じて密度が高まる現象<sup>27)</sup>と考えれば、締固め密度は粒子間力(本研究ではマトリックスポテンシャル)と締固め仕事量の力関係で決定すると結論できる。

#### b) 液体表面張力および締固め仕事量の影響

図-18および図-19は締固め仕事量の違いによる $q_u$ 、体積率の変化を $E_c=50\%$ と $E_c=100\%$ の差としてプ



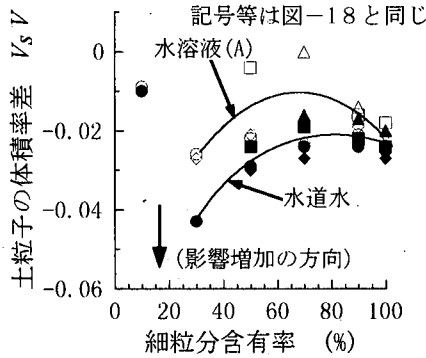


図-19 締固め仕事量の土粒子の体積率への影響

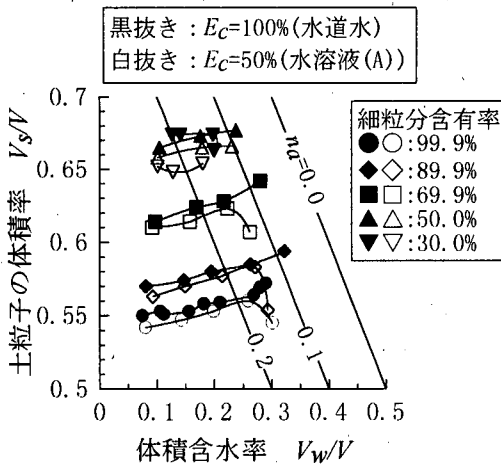


図-20 締固めに対する液体表面張力減少の効果

ロットしたものである。図-18の一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響は、細粒分含有率の増加に応じて増す。間隙水の違いによる顕著な差は見られないが、やや水溶液(A)のほうが影響は低く分布している。図-19の土粒子の体積率への影響は細粒分含有率約30%付近で最も大きく、細粒分含有率10%は均一粒度で、初期サクシオンも小さいために締固め仕事量の影響は得られていない。また、水溶液(A)は水道水の場合より影響が低く分布しており、活性剤水溶液による液体表面張力減少は、低い締固め仕事量で効果的に密度を増加させると結論できる。

図-20は $E_c=100\%$ の場合の水道水使用および $E_c=50\%$ の場合の水溶液(A)使用の2つの締固め曲線をプロットしたものである。細粒分含有率50%以上の両者の締固め曲線は近接することから、液体表面張力の約50%減少は、締固め仕事量50%増に匹敵し、

表-2 屋外試験で用いた土質材料の性質

表示	建設発生土	山砂
土質材料分類 <sup>23)</sup>	粘性土まじり 礫質砂(#SG-C <sub>s</sub> )	粘性土まじり 礫質砂(SG-C <sub>s</sub> )
産出場所	愛知県豊橋市	愛知県猿投町
自然含水比 $w_n$ (%)	16.5	6.1
土粒子密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.59	2.6
液性限界 $w_L$ (%)	NP	NP
塑性限界 $w_p$ (%)	NP	NP
均等係数 $U_c$	30.7	17.3
曲率係数 $U_c'$	0.75	1.2
粘土分含有率 (%)	6.9	2.9
シルト分含有率 (%)	3.2	4.0
砂分含有率 (%)	47.9	53.9
礫分含有率 (%)	42.0	39.2

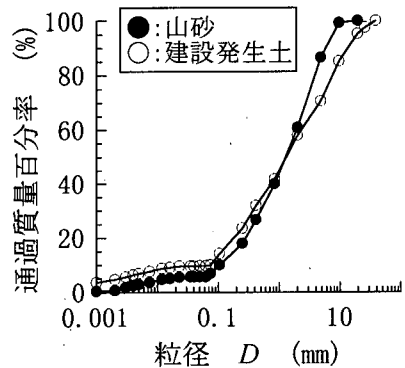


図-21 屋外試験で用いた土質材料の粒径加積曲線

表面張力減少で締固め効果が向上することを端的に示している。細粒分含有率の減少に応じて、両者の締固め曲線が離れる傾向を示すのは、初期サクシオンが低下し、粒度や粒子形状等の影響<sup>28)</sup>が増すのが原因と考えられる。

### 3. 屋外試験による検討

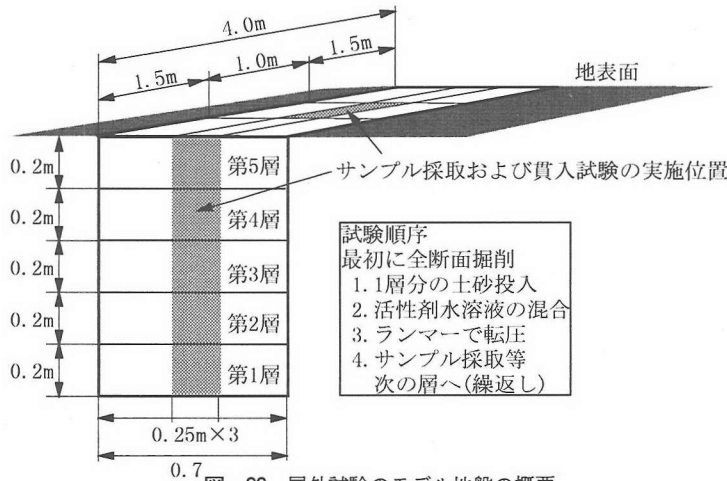
#### (1) 土質材料組成

屋外試験の土質材料の性質および粒径加積曲線を表-2および図-21に示す。いずれも粘性土まじり礫質砂<sup>23)</sup>に分類され、産出場所で建設発生土および山砂と表示する。観察では建設発生土に腐食物質はみられない。活性剤の性質は図-4に示した。

#### (2) 屋外混合方法の検討

##### a) 試験方法

屋外混合方法の検討に用いたモデル地盤を図-22



0.7 図-22 屋外試験のモデル地盤の概要

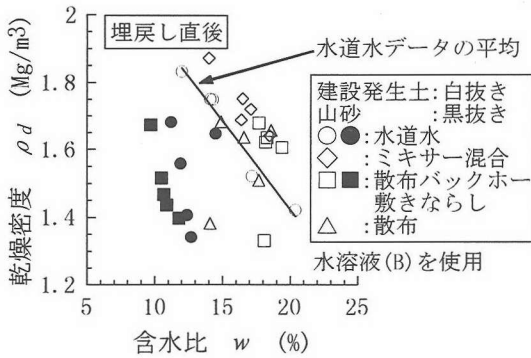


図-23 締固め密度への混合方法の影響

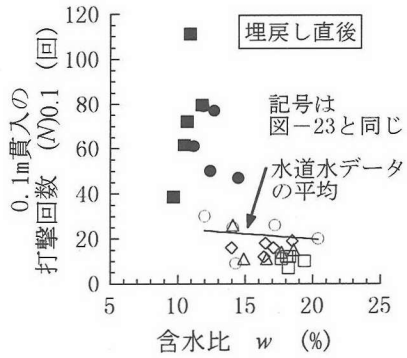


図-24 打撃回数への混合方法の影響

に示す。地表面を掘削した後に仕上がり締固め層厚0.2mで5層の埋戻しを行った。締固めに用いた衝撃型ランマーはハンドガイド式、質量63kg、足回り型式は平板型絶対剛性(0.33m×0.33m)、公称接地圧7.35kPa、打撃数9回/secである。締固め走行回数はモデル地盤の長辺方向に沿って、中央部、左周辺部および右周辺部の各1回で、走行速度は平均0.04m/secであった。モデル地盤の長辺方向の両端部1mはランマーの回頭に使用し、中央部1mおよび掘削壁面間の中央部の各締固め層上部で、原位置密度試験として砂置換法(注砂法)および含水比測定用のサンプル採取を行い、埋戻し終了直後、4日後および36日後に土研式貫入試験<sup>29)</sup>を実施した。埋戻し後の上載荷重は無く、3日後に降雨を記録している。水溶液(B)の濃度は1.0質量%、水溶液添加量は埋戻し土量あたり、建設発生土は0.08m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、山砂

は0.13m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、同量の水道の試験も実施した。

検討した活性剤水溶液の屋外混合方法は以下の3種類である。「ミキサー混合」は活性剤水溶液を添加した土を傾胴型ミキサーで約10秒間混合の後に投入、「散布バックホー敷きならし」は埋戻し土を投入後、活性剤水溶液を均一に散布し、バックホーで混合目的の敷きならしを実施、「散布」は敷きならし後に活性剤水溶液の散布だけを行った。水道水は「散布バックホー敷きならし」方法を用いている。

#### b) 試験結果の考察

図-23に埋戻し直後の各締固め層上部で、砂置換法(注砂法)および採取された土質サンプルから得られた乾燥密度と含水比の関係を示す。建設発生土の水道水と活性剤水溶液を用いた各混合方法では、「散布」では効果はみられないが、「ミキサー混合」および「散布バックホー敷きならし」は同一含水比

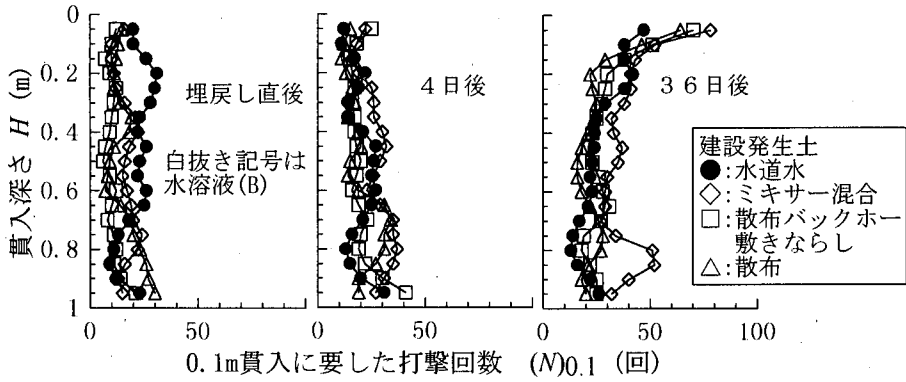


図-25 建設発生土の貫入試験結果

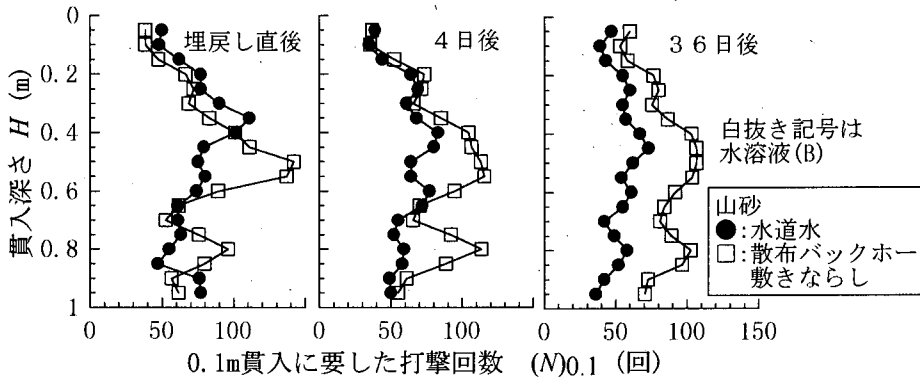


図-26 山砂の貫入試験結果

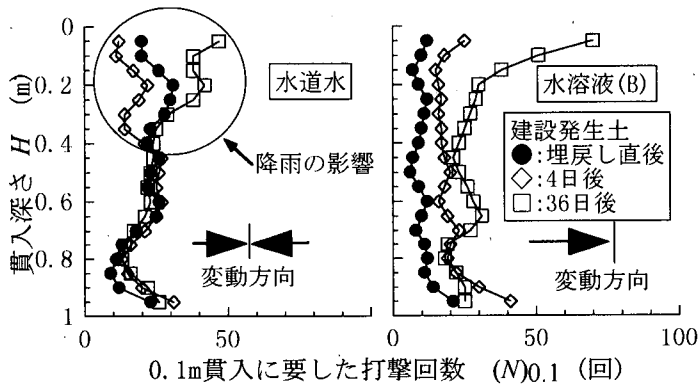


図-27 活性剤の有無と打撃回数変化の関係 (建設発生土)

における乾燥密度の増加傾向がみられる。図-24は表層まで埋戻しが終了した直後に行った土研式貫入試験の結果と含水比の関係である。建設発生土の活性剤水溶液は水道水の場合に比べ0.1m貫入に要する打撃回数が減少し、室内試験の液体表面張力減少によって一軸圧縮強さが低下すると同じ効果が表れている。両図において山砂には活性剤水溶液の有意な影響が見られないが、細粒分含有率が建設発生土よ

りも低く、マトリックスポテンシャル自体が相対的に小さいことがその原因と考えられる。

建設発生土の貫入試験結果を図-25に示す。埋戻し直後に打撃回数の減少が生じた活性剤水溶液のケースは、時間経過とともに打撃回数が増加する傾向があり、36日後の「ミキサー混合」は全域で水道水を上回っている。図-26に山砂の貫入試験結果を示す。

図-23および図-24で活性剤水溶液添加の効果がみ

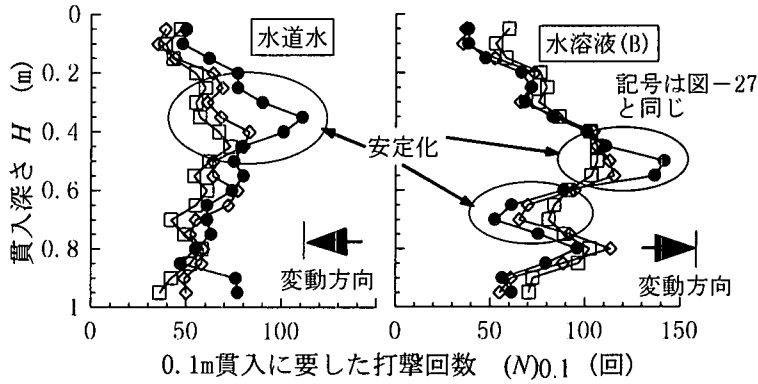


図-28 活性剤の有無と打撃回数変化の関係(山砂)

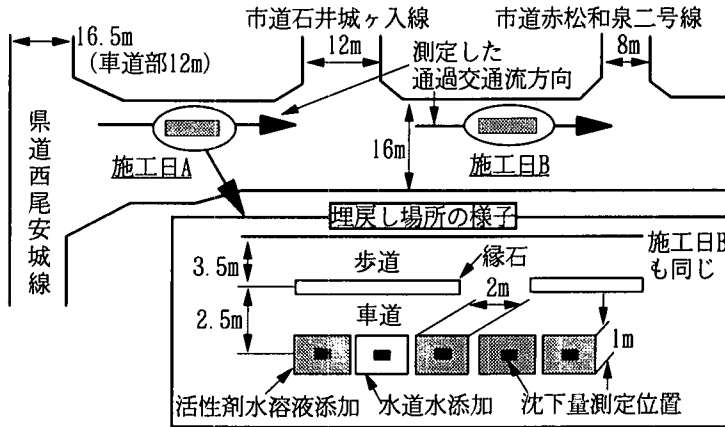


図-29 実施工の現場周辺と埋戻し場所の様子

られなかった山砂は、「散布バックホー敷きならし」による混合では、時間経過とともに打撃回数は増加し、36日後には全域で水道水の場合を上回る。

図-27に建設発生土における水道水および活性剤水溶液の「散布バックホー敷きならし」で混合した場合の打撃回数変化を示す。左図の水道水の場合、地表面下0.4m付近までに打撃回数の変動がみられ、4日後の打撃回数低下は3日後に記録した降雨の影響が考えられる。地表面下0.4m以下では経過日数による変動は少ない。右の活性剤水溶液の場合、時間経過とともに打撃回数が増加する。

同様に図-28に山砂における水道水および活性剤水溶液の「散布バックホー敷きならし」で混合した場合の打撃回数変化を示す。左図の水道水の場合、時間経過とともに打撃回数はやや減少の傾向が見られ、右図の活性剤水溶液を添加した場合は逆に増加

傾向が見られる。両図の埋戻し直後に突出した打撃回数を示した箇所は、時間経過とともに打撃回数が減少し、収束安定する傾向がある。

以上から、最も効果的な活性剤水溶液の混合方法は「ミキサー混合」であるが、実用性の面から有利な「散布バックホー敷きならし」でも、活性剤水溶液の効果を得られる。さらに、活性剤による液体表面張力減少で生じた貫入試験の打撃回数低下は、時間経過と共に次第に回復する。この回復現象の原因は、活性剤によって低下した液体表面張力が降雨等の浸透で回復すること、さらに、別途行った経済協力開発機構(OECD)の易分解性試験301B<sup>30)</sup>での活性剤の生分解率は86%であったことから、活性剤の微生物分解も考えられる<sup>13)</sup>。その他の化学反応による原因は、活性剤の反応性が低いことから否定できる<sup>10)</sup>。

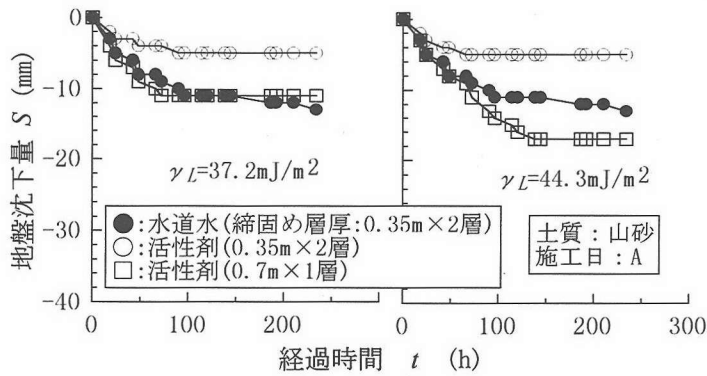


図-31 埋戻し地盤の沈下量の時間変化 (施工日A)

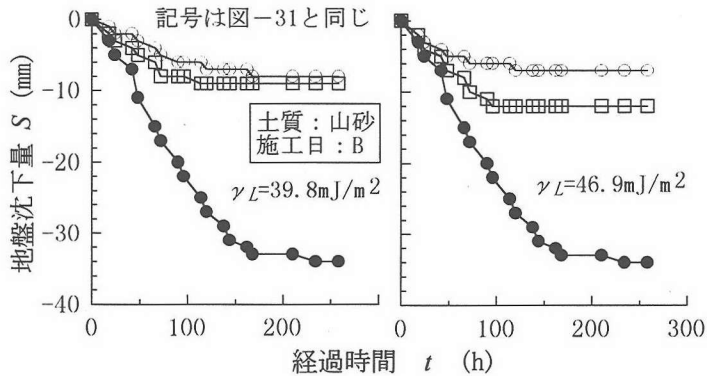


図-32 埋戻し地盤の沈下量の時間変化 (施工日B)

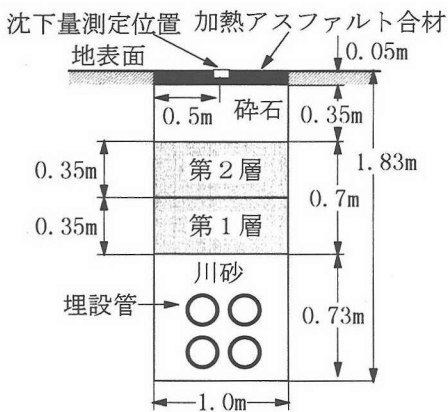


図-30 実施工の埋戻し断面

溶液の混合方法は「散布バックホー敷きならし」を用いた。活性剤水溶液は図-30の第1層および第2層の締固めに使用し、締固めは0.35m×2層および0.7m×1層の2種類、活性剤水溶液は水溶液(A)と水溶液(B)を混合して作製した液体表面張力の値が37.5から46.9mJ/m<sup>2</sup>の4種類で、天候や締固め作業によるバラツキを考慮して施工日を変え、それぞれ液体表面張力の大小2つの組み合わせの2種類の活性剤と水道水添加の試験を実施している。活性剤水溶液濃度は0.25質量%、添加量は埋戻し土量あたり0.14m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>である。土質材料は表-2の山砂である。仮復旧後の地盤沈下量は埋戻し直後をゼロとして、図-29および図-30に示す掘削壁面間の中央部の定められた位置で水準測量によって測定した。仮復旧後から測定終了までの平均交通量は午前7時から午後7時の間で3881台、指定最高時速は40kmであった。施工日ごとの各埋戻し場所は隣接しており、通過交通量等の条件は同一である。

## (2) 実施工による効果の検証

### a) 試験方法

実施工の現場周辺と埋戻し場所の様子を図-29に、埋戻し断面を図-30に示す。施工場所は愛知県安城市内である。締固めに用いたランマーは前節の屋外混合法の検討と同じである。水道水および活性剤水

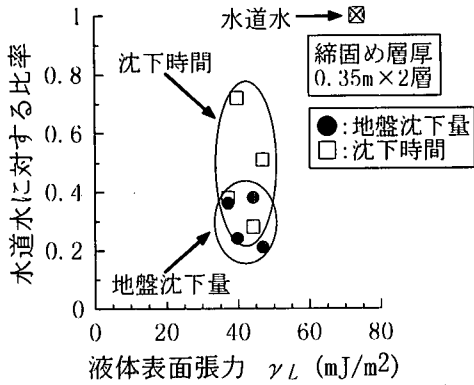


図-33 液体表面張力減少の効果

#### b) 試験結果の考察

施工日ごとの埋戻し地盤の沈下量変化を図-31および図-32に示す。図-31の左の活性剤水溶液の液体表面張力が小さい場合、水道水と同じ縮固め層厚と埋戻し回数の活性剤水溶液は、水道水に比べて地盤沈下量が減少し沈下安定に要する時間が短縮する。さらに、2倍の縮固め層厚で埋戻した活性剤水溶液と水道水の地盤沈下量および沈下安定に要する時間は同程度である。右の活性剤水溶液の液体表面張力が大きい場合、同じ縮固め層厚と回数の活性剤水溶液と水道水の結果は同様な傾向であるが、2倍の縮固め層厚の活性剤水溶液の沈下量は、水道水の場合より大きい。このことから、液体表面張力が十分に小さい場合には、活性剤水溶液による縮固めは厚層縮固めに効果的であると言える。図-32も図-31と同様な傾向が見られる。

このように活性剤水溶液の添加によって、地盤沈下量の減少および沈下時間の短縮が生じる原因は、液体表面張力の減少で、マトリックスポテンシャルが低下した結果、埋戻し直後の縮固め密度が増加したためと考察する。

図-33は縮固め層厚0.35m、埋戻し回数2回の活性剤水溶液と水道水の場合の最大地盤沈下量とその時の埋戻し完了後からの経過時間を水道水の場合を1として、プロットしたものである。地盤沈下量および沈下時間と液体表面張力値の間に有意な関係はみいだせないが、液体表面張力減少で地盤沈下量は減少し、沈下安定に要する時間が短縮されることは明らかである。

#### 4. 結論

非塑性の細粒分を含む土では、マトリックスポテンシャルによる粒子間力が支配的と考え、粒子間力の表面物理学的考察を行い、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャル間の相互作用を検証したうえで、室内試験で液体表面張力の影響を吟味し、屋外試験のモデル地盤で最適な活性剤水溶液の屋外混合方法を検討し、実施工でその効果を検証した。

表面物理学的考察と検証から以下の結論を得た。

1. 概念的な化学ポテンシャルの粒子間力式を示した。
2. 本研究で用いた非塑性の細粒土への活性剤吸着量は、浸透ポテンシャルの影響が生じるほど大きくなく、マトリックスポテンシャルに対する液体表面張力減少の影響を考察することができる。
3. 活性剤成分の土粒子表面への吸着によって、表面電荷密度または比表面積が大きいほど、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの間に相互作用を生じる。他の水和イオンでも同様な相互作用が生じると考えられる。

室内試験から以下の結論を得た。

1. 非塑性の細粒分を含む土は、液体表面張力減少で初期サクシオンおよびせん断強さは減少し、相対的に縮固め密度が増加する。
2. 縮固め仕事量が小さい方が液体表面張力減少による縮固め密度の増加効果が相対的に大きい。
3. 土の縮固めが、局部的なせん断変形破壊を生じて密度が高まる現象と考えれば、縮固め密度は土の粒子間力と縮固め仕事量の力関係で決定する。

屋外試験から以下の結論が得られた。

1. 最も効果的な活性剤水溶液の屋外混合方法は「ミキサー混合」であるが、実用性の面から有利な「散布バックホー敷きならし」でも、活性剤水溶液の効果が得られる。
2. 活性剤水溶液によって減少した貫入試験の打撃回数は時間経過に従って回復する。
3. 液体表面張力減少は、縮固めた地盤の沈下量の減少および沈下時間の短縮に効果的である。

以上から、活性剤水溶液による液体表面張力減少効果を応用した、液状化強度および盛土や埋戻し地

盤の品質の向上、厚層締固めによるコスト縮減等が期待できる、新たな土の締固め法の有効性を示した。

なお、活性剤の添加が環境面に及ぼす影響<sup>31),32)</sup>については、食品認可された活性剤等は土中で分解消滅することが著者ら<sup>13)</sup>により明らかにされている。

**謝辞：**本研究は佐賀大学 低平地防災研究センターのプロジェクト研究の支援を受けた。活性剤とその物性情報等は、株式会社 花王 和歌山研究所から提供して頂いた。心から謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 黄大振, 柳沢栄司, 菅原高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.25-33, 1993.
- 2) 足立雅樹, 安原一哉, 福島正明: 非塑性シルト質土の液状化とそれに伴う体積変化特性, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.145-154, 1996.
- 3) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.271-282, 1997.
- 4) 兵動正幸, 荒牧憲隆, 徳原裕輝, 菊地慎二, 中田幸男, 村田秀一: 六甲アイランド埋立まさ土の非排水繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.87-98, 1997.
- 5) Lambe, T.W. and Whitman, R.V.: *Soil mechanics*, SI version, John Wiley and Sons, pp.515-520, 1979.
- 6) 加藤俊昭: 第32回地盤工学研究発表会総括, 地盤改良2(化学的安定処理), 土と基礎, Vol.45, No.12, p.43, 1997.
- 7) 松尾新一郎編: 土質安定工法便覧, 日刊工業新聞社, 1972.
- 8) 森 麟, 斉藤一郎: 液分の性状にもとづく土の締固めの研究, 土と基礎, Vol.18, No.2, pp.37-45, 1970.
- 9) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原一郎: 界面活性剤-物性・応用・化学生態学, 講談社, pp.212-220, 1989.
- 10) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原一郎: 界面活性剤-物性・応用・化学生態学, 講談社, pp.3-47, 1989.
- 11) Adamson, A.W.: *Physical chemistry of surfaces*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, 1976.
- 12) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一: 土の締固め・圧密方法, 特許第2816653号, 特許公報, 1998.
- 13) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.265-274, 1997.
- 14) Pietsch, W., Rumpf, H.: Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, *Chemie Ingenieur Technik*, No.39, pp.885-893, 1967.
- 15) Johnson, K.L., Kendall, K. and Roberts, A.D.: Surface energy and the contact of elastic solids, *Proc. R.Soc. London*, Ser.A, No.324, pp.301-313, 1971.
- 16) J.N.イスラエルアチヴィリ (近藤保, 大島広行訳): 分子間力と表面力, 第二版, 朝倉書店, pp.205-325, 1997.
- 17) Fogden, A. and White, L.R.: Contact elasticity in presence of capillary condensation, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.138, No.2, pp.414-430, 1990.
- 18) Schukin, E.D.(J.M.Georges, ed.): *In microscopic aspects of adhesion and lubrication*, Elsevier, Amsterdam, pp.389-402, 1982.
- 19) Horn, R.G., Smith, D.T. and Haller, W.: Surface forces and viscosity of water measured between silica sheets, *Chemical Physics Letters*, Vol.162, No.4.5, pp.404-408, 1989.
- 20) Shinohara, K., Tanaka, T.: Ultimate tensile strength of cohesive powders based on non-uniform packing model, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, No.8, pp.50-56, 1975.
- 21) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P.: *Soil-water interactions*, 2nd ed., Marcel Dekker, p.35, 1994.
- 22) 岩田進午, 喜田大三監修: 土の環境圏, 株式会社フジ・テクノシステム, pp.69-71, 1998.
- 23) 社)地盤工学会編: 改正地盤工学会基準・同解説 地盤材料の工学的分類方法(日本統一分類法)(JGS M 111-1996), pp.10-25, 1996.
- 24) 社)日本化学会編: 土の化学, pp.50-109, 1993.
- 25) 軽部大蔵, 加藤正司, 勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.179-188, 1986.
- 26) 不飽和地盤の安定性に関する研究委員会編: 不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.23-58, 1992.

- 27) 大北康治, 中沢重一: 不飽和土の締固め機構について, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.141-148, 1987.
- 28) 吉村優治, 小川正二: 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No.487/Ⅲ-26, pp.99-108, 1994.
- 29) 谷藤正三, 森 麟: 貫入試験による地盤支持力の測定, 建設省土木研究所報告, 第83号, pp.1-24, 1952.
- 30) 経済協力開発機構編: *Oecd Guidelines for Testing of Chemicals*, Organization for Economic, OECD, 1994.
- 31) 例えば, 環境庁: 外因性内分泌攪乱化学物質問題への環境庁の対応方針について—環境ホルモン戦略計画SPEED'98—, 1998年5月.
- 32) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原 一郎編: 界面活性剤—物性・応用・化学生態学—, 講談社, pp.497-508, 1989.

(1998.3.3 受付)

## AN IMPROVED COMPACTION METHOD FOR NON-PLASTIC FINE-GRAINED SOIL MIXTURE

Tadashi NIIRO, Yoichi MASADA, Jianqun JIANG  
and Eiichi KURIBAYASHI

Since the movement of soil particles and aggregates in compaction practice is hindered by the interparticle forces, the non-plastic fine-grained soil mixture may not obtain sufficient compaction density. This study aims to propose a solution to deal with these problems mentioned above by interparticle force regulation making use of interfacial forces reduction surfactant. The influence of changes in interfacial forces on compaction density has been investigated attentively in the laboratory and in situ tests, associated with a variety of fine-grained materials content and compactive effort. As a result, the compaction density increased obviously with the reduction in the gas-liquid interfacial forces, and smaller and faster consolidation settlement was observed at compaction sites.