

# 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

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 工修 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 (〒441 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 光建 (〒460 愛知県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 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 工学部 第六工学系 (〒441 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

本論文は非イオン性界面活性剤による表面張力低下の締固めに与える影響を実験的に検討したものである。非イオン性界面活性剤は土粒子界面の電荷の影響を受けず土粒子間の付着力を低下させることを考察し、この水溶液で締固めた不飽和土のpF試験および一軸圧縮試験を実施した。その結果、最適含水比、サクシオンおよび圧縮強さは締固めに用いた非イオン性界面活性剤水溶液の液体表面張力値に比例して低下し、相対的に締固め密度が高くなることが明らかとなった。応用分野として締固め促進があげられる。

**Key Words:** surface tension, surfactant, unsaturated soil, suction, rapid compaction method

## 1. まえがき

土粒子界面の間隙水に関わる物理化学的作用は、帯電による静電相互作用と毛管圧および表面張力に起因する液体架橋による相互作用の2つに分類できる。帯電による静電相互作用は粘性土のKイオン固定工法等<sup>1), 2)</sup>として実用化されている。これらはアロフェン以外の組成鉱物が水中で負電荷を帯び、正電荷を与えれば凝集し、pHが高く陰イオン濃度の小さいほど分散する現象の応用である<sup>3)</sup>。

毛管圧および表面張力に起因する液体架橋による相互作用は、土粒子間に作用する付着力として定義される。図-1の粒子間の液体架橋モデルにおいて、PietschとRumpf<sup>4)</sup>は粒子間の液体架橋が鞍型の場合、粒子間には式(1)の毛管圧による力と式(2)の水膜の液体表面張力による力の和の付着力が生じることを示し、液量の増大により付着力は急増したのち極大値をへて減少することを解析的に示している。液体表面張力の液量による変化はギブス・トルマン・ケーニッヒ・バフの式から極めて少ない<sup>5)</sup>とされている。粒子が接触する状態の粒子間の付着力は、圧着のない場合の付着力と粒子に加えられた力に起因する付着力の和として示される<sup>6)</sup>。

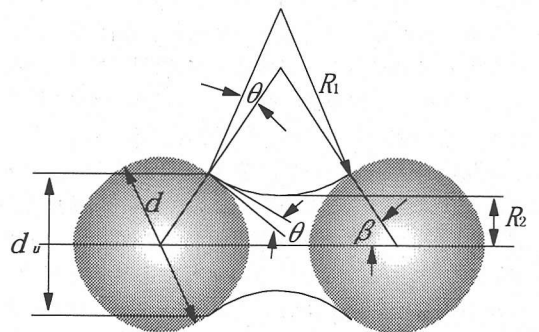


図-1 土粒子間の液体架橋モデル

$$H_K = \Delta P \frac{\pi}{4} d_u^2$$

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

ここに、 $H_K$  : 毛管圧による付着力、 $d$  : 粒子直径

$d_u := d \sin \beta$ ,  $\beta$  : 液量に対応する角度

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

$\Delta P$  : サクシオン  $= u_a - u_w = \sigma_L \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

$u_a$  : 間隙空気圧、 $u_w$  : 間隙水圧

$$H_R = k \sin(\beta + \theta) = \sigma_L \pi d \sin \beta \sin(\beta + \theta) \quad (2)$$

ここに、 $H_R$ ：水膜の液体表面張力による力

$k$ ：線張力( $=\sigma_L \ell = \sigma_L \pi d \sin \beta$ )

$\ell$ ：接触線長、 $\theta$ ：液体と粒子の接触角

式(1)および式(2)の和の粒子間に作用する付着力と粒子集合体における引張強さの関係は、Rumpf<sup>7)</sup>によって式(3)で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{(1-\varepsilon)}{\pi} \kappa \frac{H}{D^2} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_z$ ：引張強さ、 $\varepsilon$ ：空隙率

$\kappa$ ：見かけの配位数、 $D$ ：平均粒径

$H$ ：付着力( $=H_K + H_R$ )

神保ら<sup>8)</sup>は式(3)における付着力 $H$ も空隙率 $\varepsilon$ の影響を受け、粒子集合体の充てん方法で異なることを指摘し、Shinoharaら<sup>9)</sup>は充てん構造の影響を含めた式(3)の修正式を提案している。

密度がある程度増加した締固め過程では、せん断変形破壊によって密度が高まる<sup>10)</sup>とすれば、その抵抗力である摩擦力との力関係によって土粒子が再配列され、平衡状態で締固め密度が決定する。破壊面の垂直応力の抵抗力である付着力と、破壊面に沿って作用する摩擦力の間に直線的な比例関係が仮定できる<sup>11)</sup>クーロン粒状体の土は、式(3)の土粒子間の付着力 $H$ の減少による引張強さ $\sigma_z$ の低下に比例して摩擦力が低下し、締固め密度が増大する。既に著者ら<sup>12)</sup>は試験的屋外実験を実施し、液体表面張力の低下による付着力の減少が締固め性の改善に効果的であることを確認している。締固め密度を増大させるために凝集効果に着目した高分子界面活性剤の応用<sup>13)</sup>や液分の性状による締固めの研究<sup>14)</sup>は成されているが、本研究の界面活性剤で液体表面張力を低下させ、締固め密度を高める検討は成されていない。

本論文の第2章は界面活性剤(以下、活性剤と記す)水溶液の土粒子への影響について、固体界面への吸着モデルおよび液体の付着仕事から考察した。第3章は第2章の考察を実験によって検証することを試み、非イオン性活性剤の有効性とイオン性活性剤の複雑な挙動を述べている。第4章は非イオン性活性剤によって動的に締固めた試料を用いて、液体表面張力の締固め密度、土の保水性および圧縮強さへ与える影響を実験的に考察し、第5章の結論および研究結果の応用で実際問題への応用を示した。

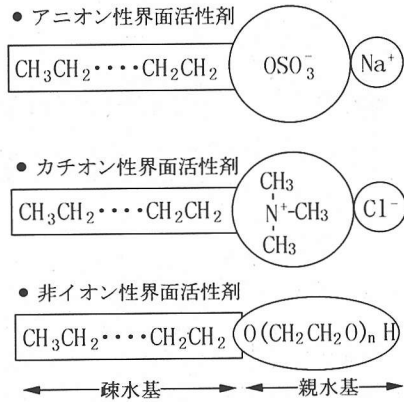


図-2 代表的な活性剤の構造モデル

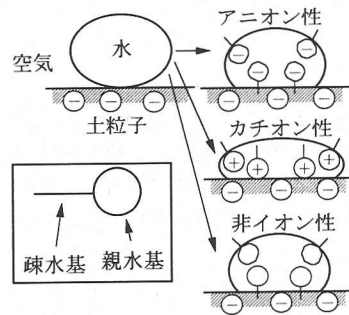


図-3 吸着モデル (負電荷)

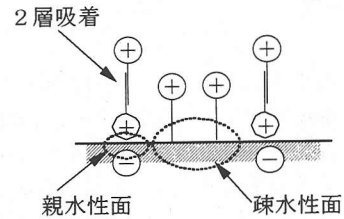


図-4 カチオン性活性剤の吸着形態

## 2. 土粒子界面電荷および固液接触の性質

### (1) 土粒子界面電荷の性質

図-2に代表的な活性剤の構造モデルを示す。アニオン性(陰性)活性剤およびカチオン性(陽性)活性剤は親水基に電荷を有している。負電荷に帯電した土粒子への吸着モデルは図-3となる<sup>13)</sup>。土粒子界面の負電荷によって、カチオン性活性剤は親水基が吸着し土粒子界面の疎水性を高め、アニオン性活性剤と非イオン性活性剤は、疎水基が吸着し親水性を高める。土粒子界面が正電荷の場合はカチオン性活性剤とアニオン性活性剤の吸着は逆となるが、非イオン性活性剤は変わらない。図-4にカチオン性活性剤の吸着形態を拡大して示す。土粒子のような親水性固体でも必ず疎水面が有り、そこに疎水基が吸

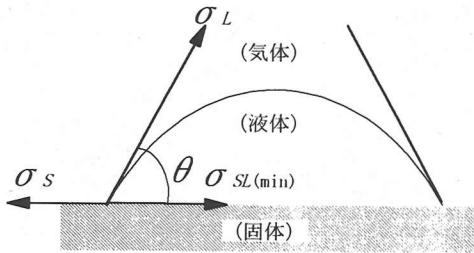


図-5 固体上の液体の付着モデル

着する。活性剤の添加量が表面積の飽和吸着量以上では2層吸着が生じ、土粒子界面の疎水性を高めない。吸着力および吸着速度には電荷力が支配的に作用する。以上から、非イオン性活性剤は固体面の親水性を高めるよう作用し、活性剤の添加量や土粒子表面積および電荷に起因する複雑な吸着は生じないと考察できる。食品添加物のショ糖類の非イオン性活性剤は環境への影響はなく、微生物分解される<sup>13)</sup>。

(2) 固液接触の性質

固体上に液体を付着させた場合の付着仕事は式(4)となる。力に置き換えて示すと図-5となる<sup>15)</sup>。

$$W = \sigma_L + \sigma_S - \sigma_{SL(\min)} \quad (4)$$

ここに、 $W$ ：付着仕事、 $\sigma_S$ ：固体表面張力

$\sigma_{SL(\min)}$ ：平衡した界面張力の最小安定値

ボルプカとノイマンは厳密な平衡接触角方程式として式(5)を導いている<sup>9)</sup>。式(4)および式(5)から、付着仕事は式(6)となる。

$$\sigma_{SL(\min)} - \sigma_S + \sigma_L \cos \theta + kR = 0 \quad (5)$$

ここに、 $k$ ：線張力 =  $\sigma_L \ell$ 、 $\ell$ ：接触線長さ

$R$ ：接触線の曲率半径

$$W = \sigma_L (1 + \cos \theta) + kR \quad (6)$$

線張力を無視すると式(6)はヤング・デュプレの式<sup>15)</sup>となり、液体表面張力と接触角の関数となる。付着仕事は固体面への液体の付着力の強さを示す。接触角は親水性固体では $0^\circ \sim 90^\circ$ 、疎水性固体は $90^\circ \sim 180^\circ$ 、付着仕事は $0 \sim 2 \sigma_L$ の範囲となる<sup>16)</sup>。接触角は固体の親水性、疎水性、粗度等によって変化し、液体表面張力と直線的な比例関係にある<sup>17)</sup>。これらから土粒子に非イオン性活性剤水溶液が付着すると、水と比べ低い液体表面張力は付着仕事の減少に作用

表-1 試料の物理的性質

土質分類	シルト(1)	シルト(2)
産出	豊橋技科大学内	DLクレイ (名称)
密度 $\rho_s$	2.67Mg/m <sup>3</sup>	2.650Mg/m <sup>3</sup>
液性限界 $w_L$	32.8%	NP
塑性限界 $w_p$	27.1%	NP
均等係数 $U_c$	11.2	3.5
曲率係数 $U_c'$	1.03	1.4
土質分類	シルトまじり砂	
産出	名古屋市	
密度 $\rho_s$	2.75Mg/m <sup>3</sup>	
液性限界 $w_L$	NP	
塑性限界 $w_p$	NP	
均等係数 $U_c$	18.2	
曲率係数 $U_c'$	1.14	

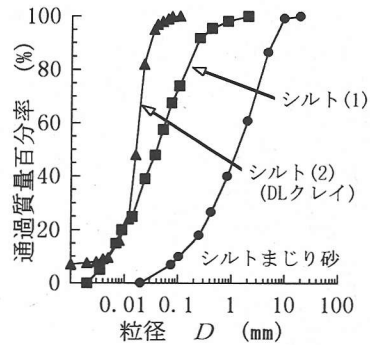


図-6 粒径加積曲線

し、逆に比例関係にある接触角は小さくなり付着仕事を高めるよう作用する。清浄な土粒子と水との接触角はゼロに近い<sup>3)</sup>ことから、非イオン性活性剤は液体表面張力に応じて付着仕事を減じ、粒子間の付着力を減少させると考えられる。土粒子界面が負電荷の場合、カチオン性活性剤は親水基が固体面に吸着し、固体面の疎水性を高め接触角を大きくし、液体表面張力の低下と共に付着仕事を減少させるが、2層吸着が生じると非イオン性活性剤と同様な付着挙動となる。これらの接触角の変化には電荷力が支配的に作用する。このようにイオン性活性剤は複雑な挙動を示す。表面が粗い固体では浸水による前進接触角と脱水による後退接触角が大きく異なり、前進接触角が図-5の平衡状態の接触角に近い<sup>16)</sup>。

3. 活性剤の影響の実験的検証

(1) 試料および活性剤水溶液の性質

試料は表-1の種類のシルトおよびシルトまじり砂である。図-6に粒径加積曲線を示す。図-7に活性剤の水溶液濃度と液体表面張力の関係を示す。一定の濃度に達すると飽和吸着状態となり、液体表面

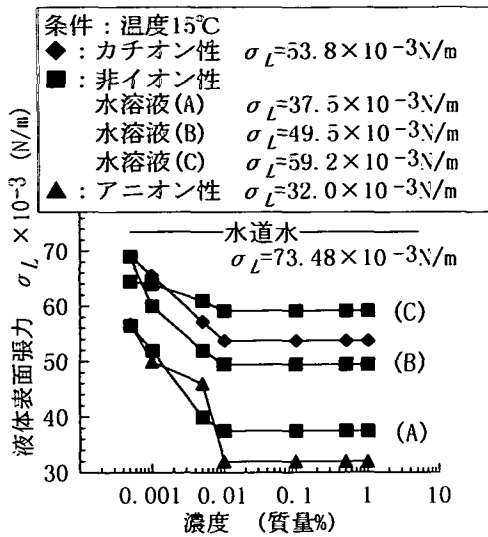


図-7 水溶液濃度と液体表面張力

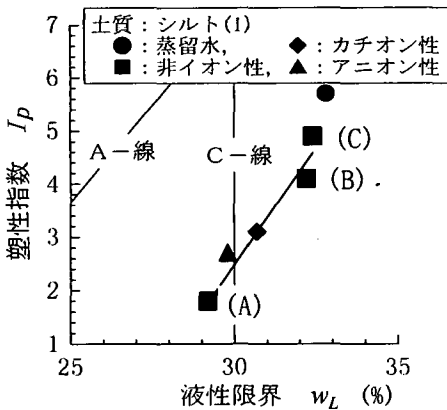


図-8 塑性図による水溶液の影響

張力は図中に示す値で一定となる。本研究ではこの濃度以上の0.5質量%で使用した。

## (2) 液性限界，塑性限界への影響

空気乾燥で調整したシルト(1)を用いた。塑性図を図-8に示す。蒸留水に代えて活性剤水溶液で加水すると塑性指数、液性限界は低下する。カチオン性活性剤は液体表面張力の値のわりに低下が大きく、アニオン性活性剤は液体表面張力は最も低い最大の低下ではない。カチオン性活性剤は土粒子界面の負電荷に親水基が吸着し、固体界面の疎水性を高め接触角が大きくなる。液体表面張力との相乗効果で、土粒子間の付着力は大きく減少したと考えられる。アニオン性活性剤は土粒子界面の負電荷に反発し疎水基が吸着し、固体界面の親水性が高まり接触角は小さくなる。さらに電荷のロスが生じ、付着力の減

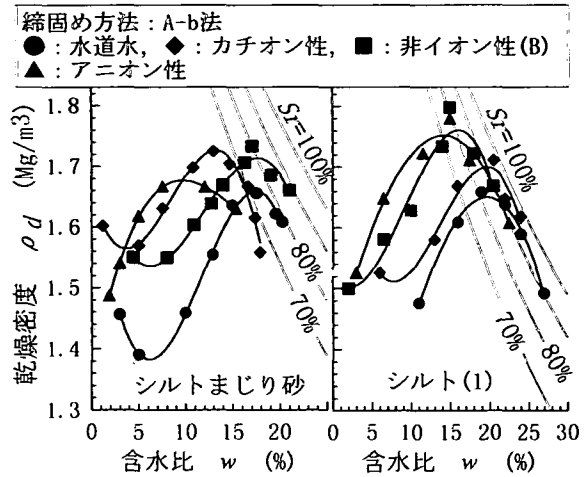


図-9 突き固めによる締固め試験結果

少は大きくないと考察できる。非イオン性活性剤は土粒子界面の電荷に関わりなく疎水基が吸着し、固体界面の親水性を高め付着仕事は大きくなるが、液体表面張力の値に応じて付着力が減少したと考える。

このように土粒子間の付着力は塑性指数、液性限界と比例関係にある可能性を示すことが出来る。液体表面張力の低下および固体界面の接触角の変化の相互作用により減少した付着力に応じて、塑性指数、液性限界が低下したという考察は、海成粘土の陽イオン濃度の減少による凝集力低下に起因する溶脱現象が同様な傾向<sup>10)</sup>を示すことから裏付けられる。

## (3) 締固め特性への影響

図-9に締固め試験結果を示す。水道水に代えて活性剤水溶液で加水すると低含水比で高い乾燥密度が得られる。シルトまじり砂の最適含水比は液性限界、塑性限界と同じ順序で低下し、付着力が小さいほど低い最適含水比を示す。シルト(1)はイオン性に関わらず、水溶液の液体表面張力と最適含水比は比例関係にある。カチオン性活性剤が2層吸着し、固体界面が親水性界面へ転移し、付着力は液体表面張力の値に応じて低下したと両者の違いを考察することもできるが、表面積の小さなシルトまじり砂で2層吸着が生じないとは考えにくい。

活性剤の負電荷の土粒子界面への吸着力は、カチオン性活性剤、非イオン性活性剤、アニオン性活性剤の順で大きく、シルトまじり砂の最大乾燥密度と比例するが、シルト(1)は異なっている。有泉ら<sup>10)</sup>の示したとおり、土の種類、活性剤のイオン性および液体表面張力に起因した複雑な相互作用が存在し、イオン性活性剤の締固めに対する統一的な解釈を行うには、さらに精密な物理化学実験が必要である。

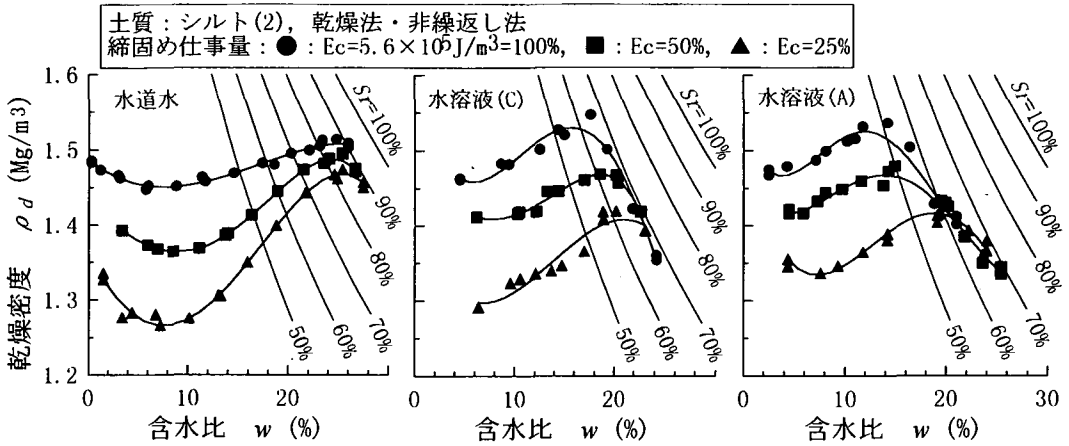


図-10 3種類の締固め仕事量による締固め試験結果

シルトまじり砂はシルト(1)に比べ活性剤の乾燥密度への影響が小さい。締固め力と摩擦力との平衡によって締固め密度が決定する仮定に違いはないが、締固め過程において粒径が大きなシルトまじり砂は土粒子接触点で互に加圧し、ヘルツの接触理論による変形を生じ接触面積を広げて付着力の増加を伴い<sup>6)</sup>、また液体架橋による付着力も小さい。粒径の小さいシルト(1)は土粒子に直接的に作用する締固め力は少なく、主に土粒子間の付着力に作用し、また液体架橋による付着力も大きいことが原因と考察できる。このことから活性剤による締固め密度の向上は、液体架橋による土粒子間の付着力が大きな、粒径の小さい土がより効果的と考えられる。

非イオン性活性剤によるシルト(2)の3種類の締固め仕事量による締固め試験結果を図-10に示す。水道水は最適含水比よりも乾燥側で締固め仕事量の影響が大きい。非イオン性活性剤は締固め仕事量が多いほど乾燥密度は高く、最適含水比は低く分布する。同じ締固め仕事量では液体表面張力が低い方が最適含水比は低く、締固め仕事量の曲線は含水比が高くなるに従い接近する。以上から、付着力の大きな低い含水比領域で、付着力に比例して減少した摩擦力と締固め力との平衡によって決定される締固め密度は高くなり、曲率半径が大きく付着力の小さな高い含水比領域では、締固め仕事量の影響は小さくなると考察できる。

(4) CBR値への影響

図-9の締固め試験の最適含水比で貫入試験を行った。図-11のシルトまじり砂はカチオン性活性剤が最大のCBR値を示し、水浸96時間後の他の活性剤や水道水との差は小さくなる。シルトまじり砂の最適含水比におけるCBR値は図-9の最大乾燥密

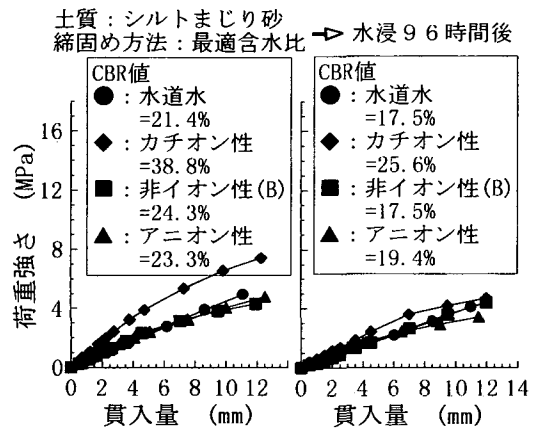


図-11 荷重強さ-貫入量曲線(シルトまじり砂)

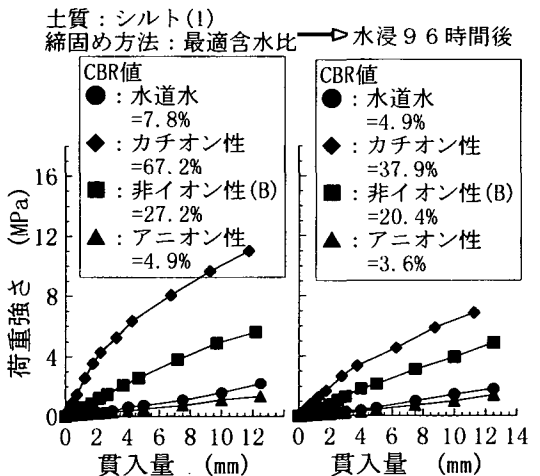


図-12 荷重強さ-貫入量曲線(シルト(1))

度と比例関係にあるが、カチオン性活性剤の水浸後のCBR値の低下現象は、水浸によって変化する要

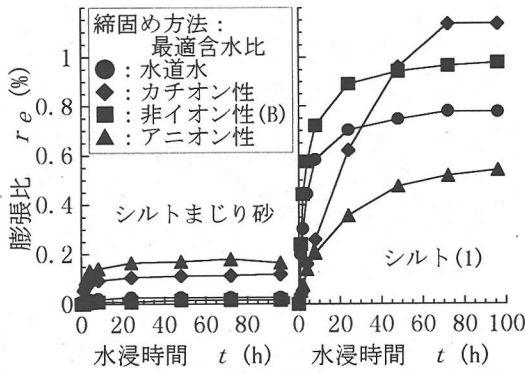


図-13 吸水膨張試験結果

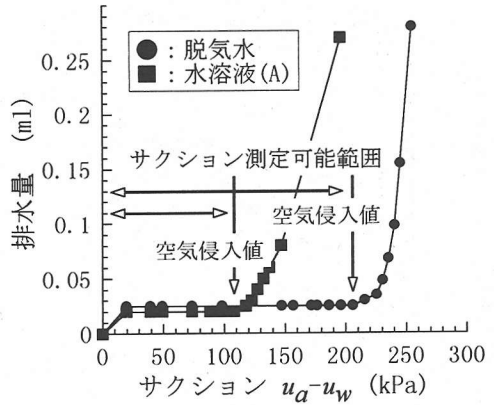


図-15 セラミックディスクの通気試験結果

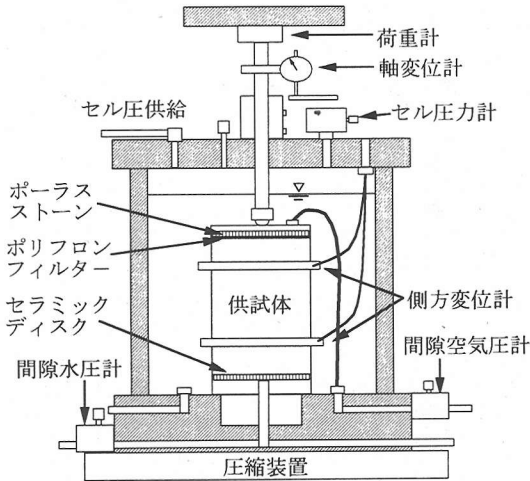


図-14 三軸圧力室の概要

因の存在を示唆している。図-12のシルト(1)は乾燥密度が最も高いアニオン性活性剤のCBR値が小さく、貫入抵抗から密度を予測する妥当性を否定し、密度以外の要因の存在を明らかに示している。

活性剤水溶液で締固めた土の付着力は水道水より小さく、水浸による変化量は大きくない。またシルト(1)ではカチオン性活性剤とアニオン性活性剤が両極端のCBR値を示すことから、カチオン性活性剤、非イオン性(B)活性剤、アニオン性活性剤の順で大きい土粒子界面への活性剤の親水基の吸着力と密度の相互作用でCBR値を変化させたと考えられる<sup>13)</sup>。Frydmanら<sup>20)</sup>によるとKイオンで処理した粘性土は、最大乾燥密度や最適含水比は大きく変化しないがCBR値は増大することからも吸着力の影響は明らかに存在する。シルトまじり砂とシルト(1)の相違は、表面積の大きさによる土粒子界面作用の影響の表れ易さの差と考える。非イオン性活性剤のCBR値が大きいのは高い密度が原因である。

図-13に吸水膨張試験の結果を示す。シルト(1)

において、非イオン性(B)活性剤および水道水は初期膨張が大きく早期に安定するが、カチオン性およびアニオン性活性剤は相対的に膨張の継続時間が長い。CBR値は増大するが密度は高いカチオン性活性剤は膨張が大きく、逆のアニオン性活性剤は小さい。活性剤水溶液で締固めた土の水浸による付着力の変化量は大きくない。よってイオン性活性剤で締固めた試料は、水道水に含まれる交換性イオンによるイオン交換反応によって界面化学的な吸着力の変化が生じ<sup>11), 13), 19)</sup>、非イオン性(B)活性剤と水道水は液量の増大による付着力の減少だけが生じることが両者の異なる原因と考えられる。現象の解明には精密な物理化学的実験が必要であろう。

#### 4. 液体表面張力低下の影響

非イオン性活性剤水溶液によって締固めた試料を用いて、液体表面張力の締固め密度、土の保水性および圧縮強さへ与える影響を検討する。

##### (1) 試験方法と試料

図-14に試験に用いた不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を示す。試料は図-6および表-1に示したシルト(2)、水溶液は濃度0.5質量%の非イオン性活性剤の水溶液(A)および水溶液(C)である。図-15にセラミックディスクの通気試験結果を示す。水溶液(A)は空気侵入値が低下し、サクシオン測定可能範囲は脱気水の約半分となる。これは低い液体表面張力による毛管圧の低下によるものである。

##### a) pF試験

加圧法、脱水過程で行った。供試体寸法は直径50mm高さ30mm、モールドに含水比10%の調整試料を入れ、落下高さ100mm質量1kgのコンパクターを用いて標準プロクターの仕事量で動的に締固め作成した。

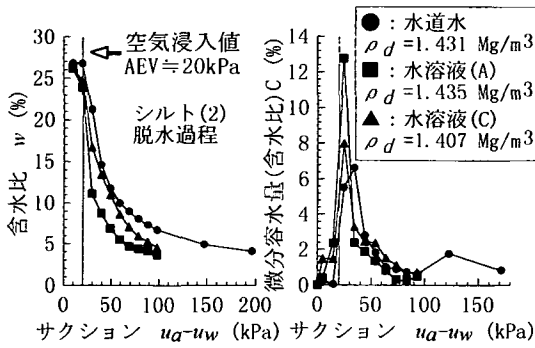


図-16 水分特性曲線および水分分布曲線

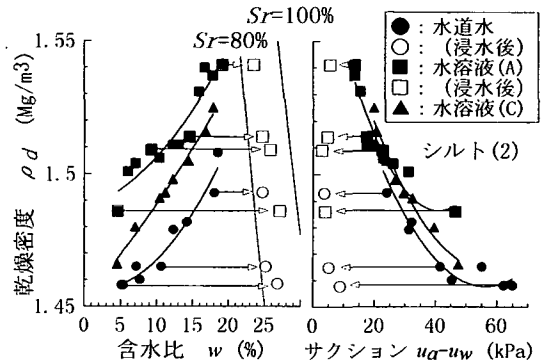


図-18 乾燥密度と含水比，初期サクシヨンの関係

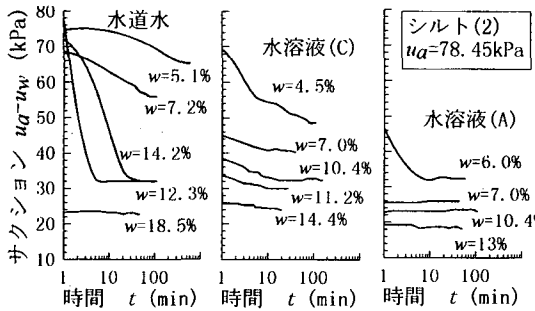


図-17 初期サクシヨンの測定に要する時間

飽和はモールドをペDESTALに設置し，膨潤およびコラプス沈下が生じないように鉛直圧20kPa~40kPaで制御した体積一定条件下<sup>21)</sup>で，供試体下面からセラミックディスクを介して脱気水または水溶液を徐々に吸水させた。

### b) 不飽和一軸圧縮試験

供試体寸法は直径50mm高さ100mm，供試体を容易に押し出すために鏡面仕上げした二つ割モールドを用い，前述のコンパクターによって標準プロクターの仕事量で動的に締固めて作成した。締固めによる個体間のばらつきが少なく均一な供試体を得るために，空気乾燥した試料を加水する水道水または水溶液の水滴を細かくし，締固める前に全断面ピストンで軽く押さえ替えている<sup>22)</sup>。

間隙水圧の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，間隙空気圧はポーラスストーンを埋め込んだ上部キャップの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。試験手順は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験<sup>23)</sup>に従い，せん断試験時のひずみ速度は0.05%/min，間隙空気圧78.45kPaの条件下で行った。

浸水後の供試体はジャケットを被せた体積一定条件下で，セラミックディスクを介して脱気水を背圧2kPa~3kPaで吸水させ，ビューレットの吸水量およ

び間隙水圧から飽和度80%以上を目安に作成した。この際，上部キャップからの排水はポリフロンフィルターによって遮断して大気に解放し，活性剤成分は土中に残留している。

## (2) 試験結果と考察

### a) pF試験

図-16の左側に水分特性曲線，右側にそれを擬微分した水分分布曲線<sup>24)</sup>を示す。水分特性曲線から，非イオン性活性剤水溶液は同一含水比におけるサクシヨンが水道水より小さく，付着力の減少は明らかである。水分分布曲線から，水溶液の液体表面張力が低いほど空気侵入値付近の微分容水量が大きく，軽部<sup>25)</sup>の提案したバルク水の保水性に差が生じていると考える。さらにサクシヨンが大きくなると水分分布曲線は接近し，両者の差は少なくなる。

### b) 浸水前の一軸圧縮さ特性

供試体セット直後のサクシヨンは29.4kPaである。図-17に間隙空気圧78.45kPaが作用後のサクシヨン変化を示す。含水比に近い値を比較すると，測定に要する時間は含水比に関わりなく，サクシヨンが小さいほど短いことが明らかとなった。

図-18に供試体の乾燥密度と含水比および初期サクシヨンの関係を示す。左図から締固めに用いた水溶液の液体表面張力が小さいほど，同一含水比における乾燥密度が高いことがわかる。さらに右図から水溶液の液体表面張力が異なってもサクシヨンと乾燥密度は同一ライン付近に分布し，反比例関係にある。よって締固め密度は付着力に比例する摩擦力と締固め力との平衡によって決定されると結論することが出来る。図-19に初期サクシヨンおよび破壊時サクシヨンと含水比の関係を示す。同一含水比におけるサクシヨンは，締固めに用いた水溶液の液体表面張力が低いほど小さく，図-16と同様に付着力の減少が示されている。

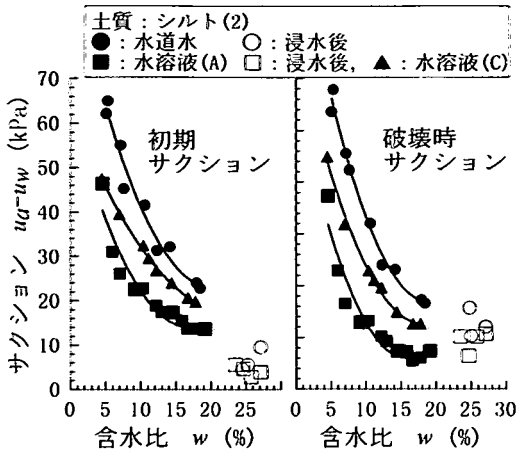


図-19 初期・破壊時サクシオンと含水比の関係

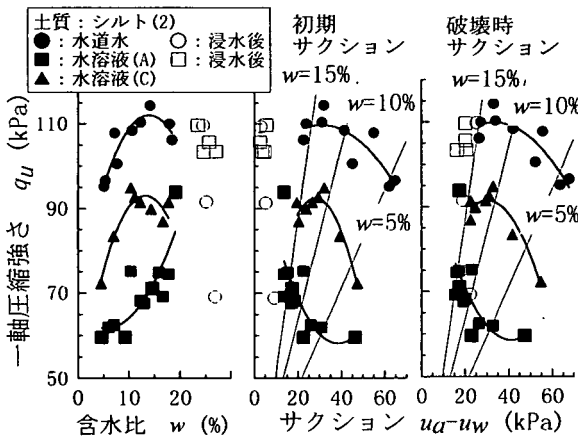


図-20 一軸圧縮強さと含水比、初期・破壊時サクシオンの関係

図-20に一軸圧縮強さと含水比および初期・破壊時サクシオンの関係を示す。同一含水比またはサクシオンにおける圧縮強さは、締固めに用いた水溶液の液体表面張力が小さいほど弱くなる。個々の曲線では含水比の増加またはサクシオンの減少に応じて圧縮強さは強まり、ピークが存在する。図-21に一軸圧縮強さと乾燥密度の関係を示す。締固めに用いた水溶液の液体表面張力が小さいほど圧縮強さは弱く分布し、乾燥密度は高くなる傾向が明らかである。図-22に参考文献<sup>23)</sup>の破壊包絡線といわゆるBishopの有効応力式の係数 $\chi$ を1と仮定した破壊応力点を示す。含水比が高いほど破壊包絡線に接近し、係数 $\chi$ が1に近づいている。

c) 浸水後の一軸圧縮強さ特性

締固め含水比が異なる浸水前後の応力-ひずみ曲線の比較を図-23に示す。水道水は浸水による圧縮

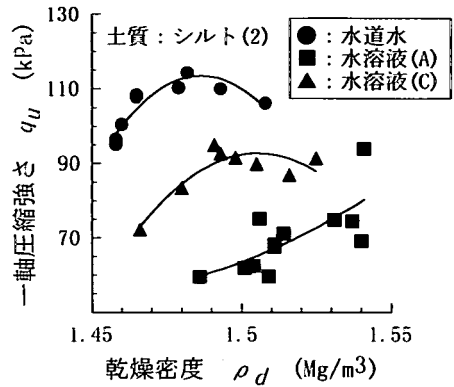


図-21 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

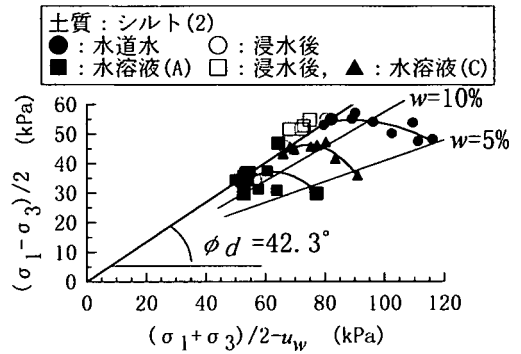


図-22 破壊応力点の分布

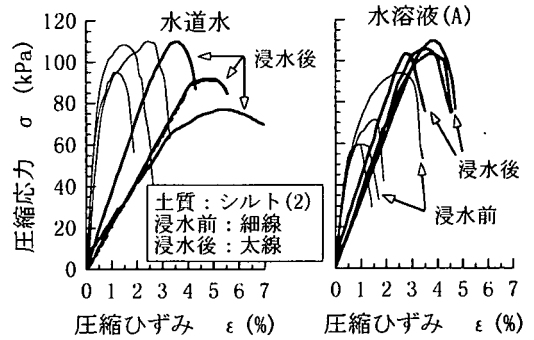


図-23 浸水前後の応力-ひずみ曲線の比較

強さの低下がみられるが、浸水後の水溶液(A)の曲線は締固め含水比に関わらず同じ形状である。

締固め後の含水比に近い水道水と水溶液(A)と比較する。図-18に浸水前後の関係を矢印で、図-19、図-20、図-22では白抜き記号で示す。図-24および図-25では浸水前の圧縮強さは水道水の方が強いが浸水後は逆転している。図-26の含水比18.0%と19.2%では、水道水と水溶液(A)の浸水後の圧縮強さは変わらない。このように低い含水比で締固めた供試体ほど、水道水は浸水によって圧縮強さは低下し、



浸水前●: 水道水  $w=5.1\%$ ,  $\rho_d=1.458\text{Mg/m}^3$   
 ■: 水溶液(A)  $w=4.6\%$ ,  $\rho_d=1.486\text{Mg/m}^3$   
 浸水後○: 水道水  $w=27.0\%$ ,  $S_r=85.3\%$   
 □: 水溶液(A)  $w=27.1\%$ ,  $S_r=89.0\%$

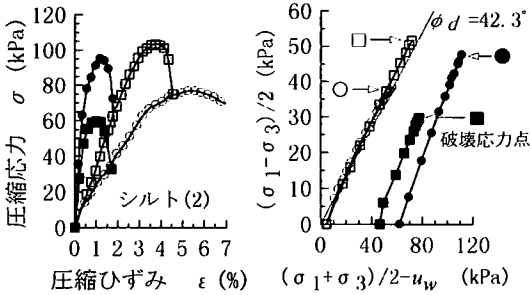


図-24 浸水前後の比較 (含水比 約5%)

浸水前●: 水道水  $w=10.7\%$ ,  $\rho_d=1.465\text{Mg/m}^3$   
 ■: 水溶液(A)  $w=9.2\%$ ,  $\rho_d=1.509\text{Mg/m}^3$   
 浸水後○: 水道水  $w=25.3\%$ ,  $S_r=82.2\%$   
 □: 水溶液(A)  $w=25.8\%$ ,  $S_r=89.6\%$

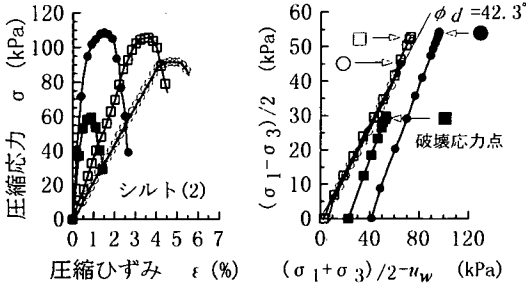


図-25 浸水前後の比較 (含水比 10%前後)

浸水前●: 水道水  $w=18.0\%$ ,  $\rho_d=1.493\text{Mg/m}^3$   
 ■: 水溶液(A)  $w=19.2\%$ ,  $\rho_d=1.541\text{Mg/m}^3$   
 浸水後○: 水道水  $w=24.7\%$ ,  $S_r=83.5\%$   
 □: 水溶液(A)  $w=23.5\%$ ,  $S_r=87.4\%$

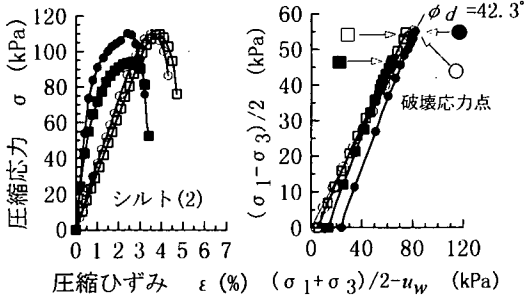


図-26 浸水前後の比較 (含水比18.0%と19.2%)

水溶液(A)は圧縮強さが向上し、締固め時の含水比の影響は少ない。水道水は低い含水比における付着力が強く、摩擦力と締固め力の平衡状態で決定する締固め密度は低くなる。浸水によってサクシオンがある程度解放されると、粒子骨格を保持する付着力の減少による摩擦力の低下によって浸水後の圧縮強

さは弱くなる<sup>26)</sup>。水溶液(A)の場合、締固め後の圧縮強さは弱いが、締固め密度は高く、浸水後の粒子骨格を保持する摩擦力は小さくない。よって浸水後の圧縮強さは弱くならないと考察できる。

## 5. 結論および研究結果の応用

非イオン性活性剤による液体表面張力の低下によって、気体-液体-固体の3相間における相互作用を吟味し、以下の結論を得た。

- 1) 非イオン性活性剤は土粒子界面の電荷力の影響を受けず土粒子間の付着力を低下させる。
- 2) 土粒子間の付着力は液性限界および塑性指数と比例関係にある。
- 3) 締固め密度は土粒子間の付着力に比例する摩擦力と締固め力との平衡によって決定される。

研究結果の応用に関して以下の結論を得た。

- 4) 非イオン性活性剤による締固め密度の向上は、液体架橋による土粒子間の付着力の大きい土ほど効果的である。
- 5) 非イオン性活性剤で締固めると圧縮強さは低下するが、低い含水比ほど浸水後の圧縮強さは向上し、高い含水比の場合と同等である。

本研究は、締固め不十分による地盤沈下や降雨による崩壊の解決に一つの示唆を与える。通常の締固め工事の補助として非イオン性活性剤水溶液を散布混合することで、安定性の高い土構造物の構築が期待できる。

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ました。また、活性剤は株式会社 花王 と歌山研究所の水沼達也 室長に合成して頂きました。深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 松尾新一郎, 富田武満: 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 材料, 第19巻, 第205号, pp.53~58, 1970.
- 2) 松尾新一郎編: 土質安定工法便覧, 日刊工業新聞社, 1972.
- 3) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.36~71およびpp.211~225, 1979.
- 4) Pietsch, W., Rumpf, H.: *Hafkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln*, *Chemie Ingenieur Technik*, 39, pp.885~893, 1967.
- 5) 小野 周: 表面張力, 共立出版, pp.17~85, 1980.

- 6) 久保輝一郎, 神保元二, 水渡英二, 高橋 浩, 早川宗八郎: 粉体 理論と応用, 改訂二版, 丸善, pp. 324~332, 1979.
- 7) Rumpf, H.: *Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten*, *Chemie Ingenieur Technik*, 42, pp. 538~540, 1970.
- 8) 神保元二, 浅川貞雄, 曾我尚人: 粉体充てん層の引張強度による付着力の測定, 材料, 第17巻, 第177号, pp. 88~92, 1968.
- 9) Shinohara, K., Tanaka, T.: *Ultimate Tensile Strength of Cohesive Powders based on Non-Uniform Packing Model*, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 8, No. 1, pp. 50~56, 1975.
- 10) 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.
- 11) 島昭治郎, 建山和由, 藤本直昭: 締固めた不飽和土の水浸時挙動の予測に関する研究, 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. 131~140, 1987.
- 12) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一: 土の急速締固め・圧密方法に関する研究: 第50回土木学会年次学術講演会第VI部門発表論文集, VI-313, 1995.
- 13) 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. 48~68, pp. 212~220, pp. 497~508, 1989.
- 14) 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.
- 15) Adamson, A.W.: *Physical Chemistry of Surfaces*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp. 61~63 and pp. 339~363, 1976.
- 16) 丸井智敏, 村田逞詮, 井上雅雄, 桜田 司: 表面と界面の不思議, 工業調査会, pp. 192~211, 1995.
- 17) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝: 表面および界面, 共立出版, pp. 122~133, 1973.
- 18) 三浦哲彦, 赤峰剛徳, 下山正一: 有明粘土層の堆積環境とその鋭敏性について, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp. 119~131, 1996.
- 19) 有泉 昌, 牧隆 正, 和田茂治: 有機物処理による粘土の性質の改変に関する研究, 土木研究所報告, 第116号, pp. 53~77, 1963.
- 20) Frydman, S., Ravina, I., Ehrenreich, T.: *Stabilization of heavy clay with potassium chloride*, *Geotechnical Eng.*, Vol. 8, pp. 95~108, 1977.
- 21) 亀井健史, 榎本雅夫: 土の粒度の違いが締固めた土のコラプス沈下量に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 65~72, 1996.
- 22) 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.
- 23) 地盤工学会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.
- 24) 土壌物理性測定法委員会編: 土壌物理性測定法, 養賢堂, pp. 157~159, 1975.
- 25) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 83~92, 1996.
- 26) 宇野尚雄, 宮下高昭: 浸水による不飽和土の強度低下について, 土と基礎, Vol. 29, No. 6, pp. 41~48, 1981.

(1997. 2. 10 受付)

## EFFECTS OF GAS-LIQUID INTERFACIAL FORCES ON COMPACTION BEHAVIORS OF UNSATURATED SOIL

Tadashi NIRO, Yoichi MASADA, Jianqun JIANG

and Eiichi KURIBAYASHI

Laboratory tests presented tremendous effects to reduce surface tension on mechanical behaviors of unsaturated soil masses. Surfactants are noted for capable to reduce the surface tension, thereby diminishing the gas-liquid interfacial forces and the nonionic class not to receive the influence of soil particle electric charges. The potential of soil water test and unconfined compression test of unsaturated soil that is compacted by using nonionic surfactant solutions were carried out. The results of experiments showed that the optimum moisture content, soil suction and unconfined compressive strength decrease in proportion to decreases in surface tension and the compaction density increases conversely. As a application the obtained results are useful to development of rapid compaction methods.