

# 土の急速締固め・ 圧密工法の開発

新納 格 | 佐賀大学 低平地防災研究センター 助手

## 1. まえがき

現在、年間に約4億5000万 $\text{m}^3$ 程度の処分が必要な建設発生土が生じ、自然景観の破壊や自然災害の原因となる土砂採取が約2億万 $\text{m}^3$ も行われている。さらに廃棄物埋立地の確保も難しく、処分量の減量政策によって土砂受入量も減少し、それに応じた建設発生土の減量技術が無いために深刻さを増している。また、地下鉄、地下街、下水道の建設や大深度地下利用は、地下の土砂を構造物と置き換えるものであり建設発生土の増加は避けられない。このように公共施設の充実を目指した開発は、時には処分が必要な建設発生土や自然景観の破壊及び自然災害の原因となる土砂採取量の増大によって成り立っているのである。人間と環境の調和を目指すには、この問題を解決する技術・工法の開発が必要不可欠である<sup>1)</sup>。

土は、固相、液相、気相の三相からなるが、わが国においては湿潤な気候のために自然地盤は水で飽和している場合が多い。しかし、盛土や地下水位以上の地盤など土木工事の対象となる土は不飽和状態にあることも少なくなく、また、工事に用いる土

質材料は不飽和土である。不飽和土の力学的特性は全応力 $\sigma$ 、間隙水圧 $U_w$ のみならず間隙空気圧 $U_a$ にも支配されている。特に間隙空気圧と間隙水圧の差、サクション( $U_a - U_w$ )は不飽和土の挙動に大きな影響を及ぼす。例えば細粒分の多い不飽和土や建設発生土を、工作物の埋戻し、道路盛土、河川築堤、土地造成、埋立等に使した場合、サクションによる粒子間力が土粒子の移動を妨げるために締固めが不十分になりやすい。その為、長期にわたる地盤沈下現象や降雨等によって飽和度が変化した場合には大きな沈下を起こしたり、地震による液状化現象が生じたりする。

本研究は、このような土を土質材料として有用な土に変える技術を開発し、建設発生土の再使用と土質材料として有用な土砂の種類の拡大に関わる工法の開発を目的としている。本研究の目指す工法は、非イオン性界面活性剤を散布することで成される。建設発生土の場合は、発生した建設現場において処理を行い再使用することにより、搬出される建設発生土と新規購入する土砂量の両方を減ずることを念頭に置いている。

## 2. 工法の基本的考え

### 2. 1 既存の研究

載荷状態下の緩い構造の不飽和土に水が浸透すると、飽和度の上昇に伴いコラプス沈下現象と言う圧縮変形が生じる。Leonards<sup>2)</sup>は水浸により有効応力が減少し、せん断強さが減少することでせん断破壊が生じ、圧縮沈下するものであると考察し、Burland<sup>3)</sup>は粒子間応力の変化に着目し、微視的せん断破壊が生じた現象であると指摘している。コラプス沈下現象の生じ易い土として、Barden et al.<sup>4)</sup>は粘土によってシルト粒子が結合された大きな間隙を有する緩い構造となっているシルト質土、Basma and Tuncer<sup>5)</sup>は粒度の良い土ほど、粘土含有率が多いほど生じ易いと述べている。Barden et al.<sup>6)</sup>はコラプス沈下現象が生じる条件は、大きな間隙を有し不安定な構造であること、構造が一時安定を保持できる全応力と高いサクシオン、またはセメンテーション効果を有すること等を挙げている。さらに、Mitchell<sup>7)</sup>はサクシオンの減少やセメンテーション効果の消滅によって、土粒子構造のせん断破壊が生じる可能性を有するとき、最もコラプス沈下が生じ易くなると指摘している<sup>8)</sup>。

飽和土の有効応力原理を不飽和土に適用する試みの一つに、Aitchison<sup>9)</sup>と Bishop<sup>10)</sup>の以下の式がある。

$$\sigma' = \sigma - Ua + \chi(Ua - Uw) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma'$ ：有効応力、 $\sigma$ ：全応力、 $Ua$ ：間隙空気圧、 $Uw$ ：間隙水圧、 $\chi$ ：パラメーター、 $(Ua - Uw)$ ：サクシオン。

Jennings and Burland<sup>11)</sup>は、上述のコラプス沈下現象は有効応力原理に矛盾する現象とし、この有効応力式の限界を指摘している。Bishop が研究対象としたせん断変形破壊に限定してコラプス沈下現象を考えると、式の第2項のサクシオン  $(Ua - Uw)$  の増加は等方圧力の増加による塑性的収縮を生

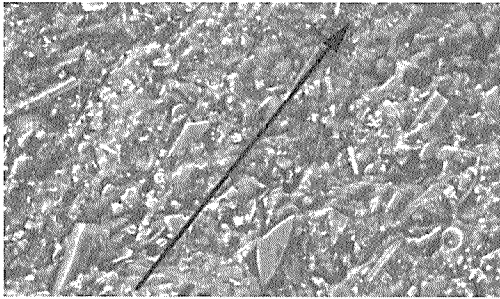
じるとともに、構造を形作る力に寄与し土構造の強化をもたらす。また、サクシオン  $(Ua - Uw)$  の減少は等方圧力の減少による弾性的膨張を生じるとともに、構造を保持しようとする力を弱め、その崩壊を生じる原因となると解釈されている<sup>12), 13), 14)</sup>。

締固め過程を考えると、密度が低い段階では、締固め力による等方圧力の増加が密度を増加させ、ある程度密度が増加した段階では、締固め力の軸差応力の方が主要な働きをし、局部的なせん断変形破壊を生じ密度が高まるとすれば<sup>15)</sup>、ある程度密度が増加した段階におけるサクシオンの減少は土粒子構造のせん断変形破壊を促すことになる。

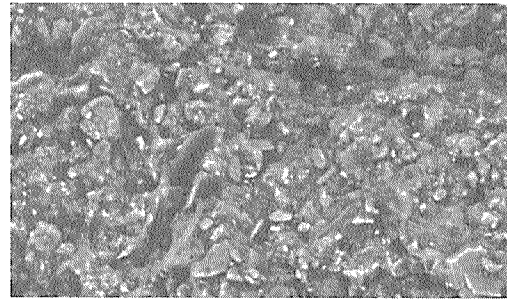
本研究では上記の点に着目し、締固め時にサクシオンを強制的に低下せしめ、低い飽和度でコラプス沈下現象と類似の現象を発生させれば、土粒子構造のせん断変形破壊が容易となり締固めが促進され、土質材料として不適とされてきた細粒土や建設発生土を水浸を受けても体積変化を生じない限界の状態にすることが出来るのではないかと考えた。不飽和状態においてコラプス沈下現象と類似の現象を発生させるには、単純には土中水の表面張力を締固め力にに応じて変化させればよいことになる。土粒子間に作用する凝集・分散力は電荷力と吸着層の作用に分類できるが、サクシオンを変えるには吸着層の界面自由エネルギーを変えたらよい。本研究では、非イオン性界面活性剤を用い、その効果を実施工試験によって検討した。

### 2. 2 作用モデル

粘性土に非イオン性界面活性剤を添加し低圧で再圧密した有明粘土は、写真-1に示すように平行性の高い配行構造となるのに比べ、写真-2の未添加の有明粘土は綿毛構造に近い状態にあること、界面活性剤の排水性に与える影響が大きいことは定性的ながら明らかであること<sup>16)</sup>、さらに非イ



写真－１ 非イオン性界面活性剤を添加した有明粘土（倍率：500倍）



写真－２ 未添加の有明粘土（倍率：500倍）

オン性界面活性剤を添加した土は、同一のpF 値における含水比が著しく低下することから、前述の効果に圧密を促す作用を加えて、図－１に非イオン性界面活性剤の簡単な作用モデルを示す。

### ３．実施工試験による検討<sup>17)</sup>

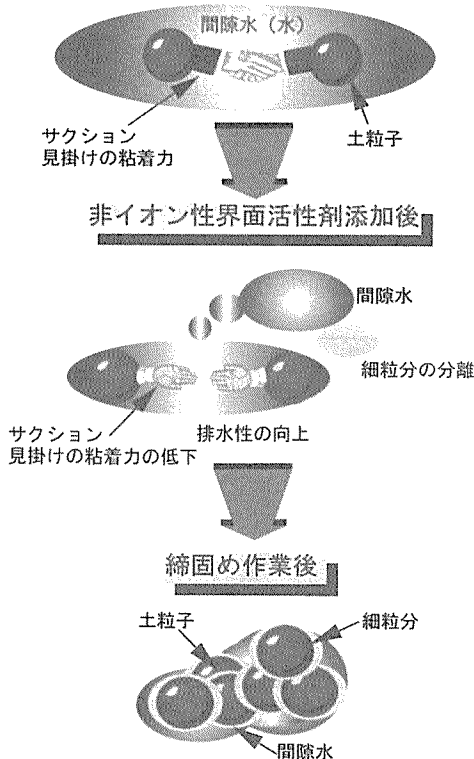
#### ３．１ 試験の概要

表－１に示すHLBおよび表面張力が異なる６種類の非イオン性界面活性剤を、埋

設管埋め戻し工事において、シルト混じり砂（愛知県猿投町産、 $\rho_2=2.60$ ）に添加し、仮復旧後の地表面沈下量を測定した。測定期間中の往来の遮断はしていない。表－２

表－１ 実施工試験に用いた薬剤の仕様

名称	科学組成	HLB	表面張力
A	非イオン性、ポリオキシエチレンソルビタンモノパルミテート	15.6	49.5
B	非イオン性、ポリオキシエチレン高級アルコールエーテル	13.3	30.0
C	非イオン性、ポリエチレングリコールモノラウレート	13.7	44.3
D, E	非イオン性、ポリオキシエチレンソルビタンモノパルミテート及びポリオキシエチレン高級アルコールエーテル混合物	14.25, 14.5	42, 39.8
F, G	非イオン性、ポリオキシエチレンソルビタンモノパルミテート及びポリエチレングリコールモノラウレート混合物	14.7, 15	46.9, 46
H, I	非イオン性、ポリオキシエチレン高級アルコールエーテル及びポリエチレングリコールモノラウレート混合物	13.4, 13.5	32.5, 37.2
J, K	非イオン性、ポリオキシエチレンソルビタンモノパルミテート及びポリオキシエチレン高級アルコールエーテル混合物	15.3, 15.8	48, 52



図－１ 非イオン性界面活性剤の作用

注：・表面張力＝空気に対する表面張力（水溶液濃度0.01%，温度15℃），単位：0.0001 N/m，参考値：水＝73.48。

・HLB（親水・疎水バランス）＝20（MH/M），M H：親水基部分の分子量，M：活性剤の分子量

表－２ 実験の内容

実験名称	一回の埋戻し層厚	添加の有無	締固め層数
実験方法 1	35cm	未添加	2 層
実験方法 2	35cm	添加	2 層
実験方法 3	70cm	添加	1 層



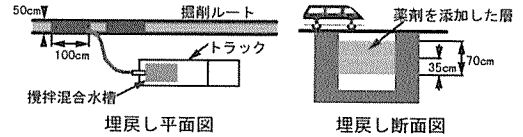
写真－３ 非イオン性界面活性剤水溶液の作製状況



写真－４ 薬剤の散布状況



写真－５ ランマーによる締固め状況

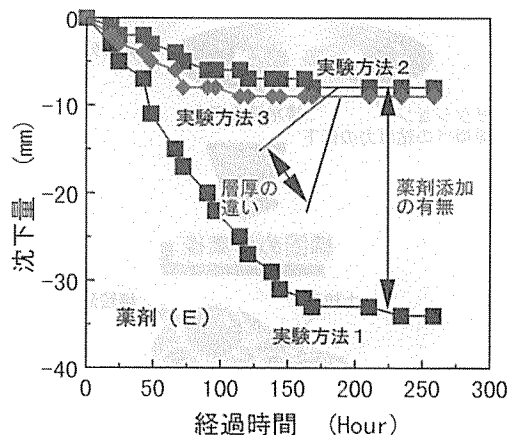


図－２ 実施工試験の概要

に実験の内容、図－２に実施工試験の概要を示す。１回の埋め戻し層厚は35cmと70cmの２種類とし、総埋め戻し土量0.35m<sup>3</sup>当たり125ccの薬剤を50リットルの水に溶かし、締固め時に散布した。また、比較のために同量の水のみを散布した実験も実施した。作業工程は、トラックに設置した攪拌混合水層で所定の濃度の水溶液を作製し、山砂を投入した後、散布した。その後、ランマー（自重：63kg）にて転圧した。写真－３、４および写真－５にその様子を施工順序に従って示す。尚、薬剤は土壤汚染に関する基準を満足しており、生物分解性が高く残留せず、安全な物質である。

### ３．２ 試験結果と考察

図－３に薬剤（E）を添加した場合の仮復旧後の経過時間と地表面沈下量の関係を示す。図より、安定化所要時間（仮復旧後から沈下が止まるまでの時間）の短縮および沈下量の低下が表れており、締固め層厚の影響も小さいことがわかる。図－４にH L Bおよび表面張力と締固め効果の関係を



図－３ 仮復旧後の経過時間と地表面沈下量の関係

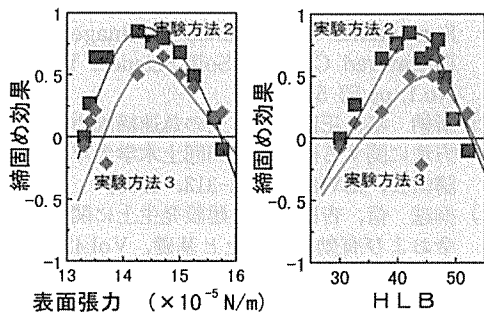


図-4 HLB及び表面張力と締固め効果の関係

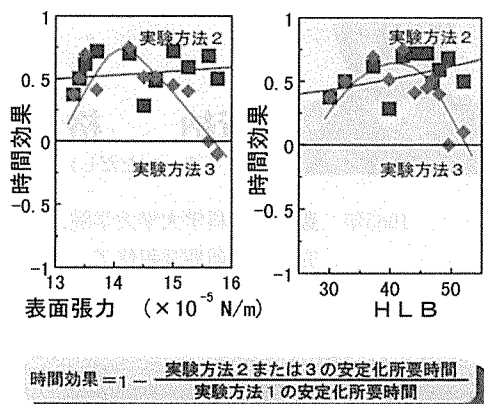


図-5 HLB及び表面張力と時間効果の関係

示す。締固め効果を図中に定義する。図より、締固め効果はHLBおよび表面張力に対して、最大となるピークがあり、締固め層厚が薬剤未添加の実験方法1と同じ実験方法2は、沈下量が最大80%（締固め効果=0.8）程度低下する。図-5にHLBおよび表面張力と時間効果の関係を示す。時間効果を図中に定義する。図より、HLBおよび表面張力に対して、時間効果が最大となるピークがある。平均して、安定化所要時間が50%（時間効果=0.5）程度短くなる。

以上から、非イオン性界面活性剤によって、締固め時にサクションを強制的に低下せしめ、締固め特性を改善する効果を実施工試験によって検討した結果、大幅な締固め促進が生じること、最も効果の高い非イ

オン性界面活性剤が存在すること等がわかった。得られた結果には、非イオン性界面活性剤による締固め促進効果以外に不飽和土の有効応力特性に関して興味ある現象がみられたが、これらについては考察せず詳細も割愛した。別の機会に報告する予定である。

#### 4. まとめ

建設省を中心として行っている建設発生土情報システムや東京都および大阪府の建設残土再利用センター等によって、20%程度の建設発生土は再利用され、再利用技術に関する研究も活発に行われている。しかしながら、都市部においては再利用プラントまでの運搬による交通渋滞等の問題が懸念されており、将来の建設工事の増大や再利用プラントから排出される廃棄物及び運搬による交通量の増大を考慮した場合には不都合な点がある。将来の建設工事の増大を考えた場合、本研究の方法も有用である。提案した方法は、建設発生土の発生現場からの搬出量と土砂採取量の両方を減量する方法で、環境にやさしい効果的方法である。本手法がその効果を発揮するには、年間4億5000万 $\text{m}^3$ 程度の建設発生土の約74%を占める公共工事への導入が必要で、その為に各自治体の施工基準の見直しが必要である<sup>18)</sup>。この施工基準の見直しには、国及び自治体の支援と理解を強く希望する。本研究がこれらの問題を解決する一助となればと考える。

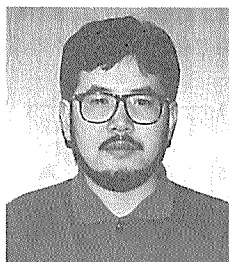
本研究に遂行にあたり、実施工試験は株式会社 光建の正田要一氏に、薬剤の製造は花王株式会社 和歌山研究所の水沼達也氏にお世話になった。また、低平地プロジェクト研究の助成を受けた。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 山田 優：建設発生土の再利用の現状と課題、

- 土と基礎, Vol.42, No.10, pp.1-6, 1994.
- 2) Leonards, G.A.: Discussion on the Paper by Jennings and Burland (1962). Geotechnique, Vol.12, pp.354, 1962.
  - 3) Burland, J. B.: Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils, Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Australia, Butterworth, pp.270-278, 1965.
  - 4) Barden, L., McGown, A. and Collins, K. : The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil, Engng. Geol., Vol.7, pp.49-60, 1973.
  - 5) Basma, A.A. and Tuncer, E. R. : Evaluation and Control of Collapsible Soils, Proc. ASCE, Vol.118, No. GT10, pp.1491-1504, 1992.
  - 6) Barden, L., Mader, A.O. and Side, G. F.: Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, Proc. ASCE, Vol.95, No. SM1, pp.33-51, 1969.
  - 7) Mitchell, J. K.: Fabric, Structure, and Property Relationships, Fundamentals of Soils Behavior, John Wiley & Sons, New York, pp. 222-252, 1976.
  - 8) 亀井健史, 榎本雅夫: 締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.97-103, 1994.
  - 9) Aitchison, G. D.: Relationship of Moisture Stress and Effective Stress Function in Unsaturated Soils, Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils, pp.47-52, 1960.
  - 10) Bishop, A. W.: The Measurement of Pore Pressure in the Triaxial Test, Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils, pp.38-46, 1960.
  - 11) Jennings, J. E. B. and Burland, J. B.: Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, Geotechnique, Vol. 12, pp.125-144, 1962.
  - 12) 軽部大蔵, 苗村康造, 森田登, 岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第269号, pp.105-119, 1978.
  - 13) 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.
  - 14) 阿部廣史: 不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究, 東京大学博士論文, 1994.
  - 15) 大北康治, 中沢重一: 不飽和土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, pp.141-148, 昭和62年.
  - 16) R.E.Zartman and R. A. Bartsch: Using Surfactants to Enhance Drainage from Dewatered Column, Soil Science, Vol.149, No.1, pp.52-55, 1990.
  - 17) 新納 格, 正田要一: 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, VI-313, 1995.
  - 18) 桐越 信, 吉田 仁: 建設発生土に関する法令および有効利用, 土と基礎, Vol.42, No. 10, pp.7-12, 1994.

## ■ 著者略歴



**新納 格**

(にいろ ただし)

1985年 豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士前期課程修了  
1992年 佐賀大学低平地防災研究センター助手