

# 真空蒸発による土の含水比低下技術(その1)

—— メカニズムとモデル実験 ——

日笠山 徹 巳 鳥井原 誠  
平 間 邦 興

## Reduction in Soil's Water Content Using Vacuum Evaporation (Part 1) —— Study on the Mechanism and Model Experiment ——

Tetsumi Higasayama Makoto Toriihara  
Kunioki Hiramama

### Abstract

The Authors investigated a system of using vacuum evaporation to reduce the water content of partially saturated cohesive soil without changing its properties. The system evaporates water by boiling under low pressure, and reduces the water content of cohesive soil. This report describes the mechanism of reducing the water content of soil using vacuum evaporation and the results of some experiments. As a result, parameters (pressure, temperature) of the evaporation of water and the possibility of reducing the water content are confirmed. The efficiency of the reduction is related to the surrounding temperature due to the supply of heat for evaporation.

### 概 要

著者らは、材料を変質させることなく、不飽和土の含水比を低下させる技術として、真空蒸発現象を利用したシステムを考案した。この方法は、高い真空度(低圧力環境)における沸点効果を期待した水分蒸発現象を含水比低下による粘性土の良質化に展開したものであり、土の持つ基本的な特性を変化させることなく、物理的に含水比を低減させることに特徴を有する。本論文では、この真空蒸発による高含水比不飽和土の含水比低下技術のメカニズムを基礎的実験の結果をもとに述べるとともに、各種のモールド実験によって実証した結果を示すものである。なお、結果として、水分の蒸発現象に及ぼすパラメータ(圧力、温度)を明らかにし、効果的な含水比低下技術の可能性を確認した。また、含水比低下の効率は、気化熱の供給条件に関連して特に周辺温度の影響を受けることを確認した。

### 1. はじめに

高含水比粘性土の良質化技術としては、天日乾燥法や機械脱水法あるいは石灰を用いた化学的処理法があるが、これらはそれぞれ、気象の影響を受けやすかったり、設備が大規模であったり、用途によっては均一性に不安を残すなどの問題点がある。そこで、材料を変質させることなく、高含水比粘性土とくに不飽和土の含水比を低下させる技術として、真空蒸発現象を利用したシステムを考案した。この方法は、土の持つ基本的な特性を変化させることなく、物理的に含水比を低減させることに特徴を有する。地盤改良における真空を用いた技術は、大気圧を圧密脱水の載荷重として利用する真空圧密工法(大気圧工法)<sup>1)</sup>であるが、ここに提案する手法は、「高い真空度(低圧力環境)における沸点効果を期待した水分蒸発現象を含水比低下による土の良質化に展開」したものである。

本論文では、この真空蒸発による土とくに高含水比不飽和土の含水比低下技術のメカニズムを基礎的実験の結果をもとに述べるとともに、現場適用をモデル化したコンテナ実験によって実証した経緯を示すものである。

### 2. 真空蒸発による土の含水比低下メカニズム

Fig. 1 のように気密材料に高含水比土を密封し、真空ポンプを用いてその内部の空気を抜取り、内部の圧力を下げる。圧力が下がれば水の沸点温度も下がり、気化

熱相当の熱量(式(1)~(3))が供給されると、真空蒸発現象が発生する。この現象により土の間隙水が水蒸気化し、真空ポンプを通じ外部へ排出され、含水比低下(真空乾燥<sup>2)</sup>)に至る。間隙水の蒸発は気化熱(式(4))を消費し、温度低下をもたらすが、同時に周辺の大気中温度との温度差が生じ、大気から土に対し熱伝導や熱放射による熱の流入が発生することになる。この熱収支に関して Fig. 2 に概念図を示すが、単位時間において式(1)~(5)に示す熱収支バランスに支配される。

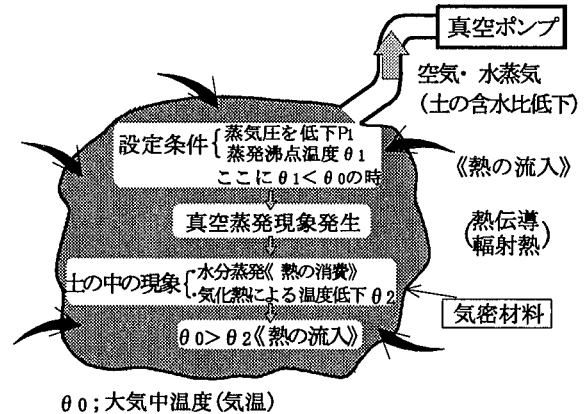


Fig. 1 真空蒸発による土の含水比低下メカニズム  
Mechanism of Reduction in Soil's Water Content  
Using Vacuum Evaporation

【熱の流入】

熱伝導による流入量  $Q_1$   
 $Q_1 = \sum (A_j \times \lambda_j \times \Delta \theta_j / d_j) \dots \dots \dots (1)$   
 [  $A_j$ : 断面積,  $\lambda_j$ : 熱伝導率,  $\Delta \theta_j$ : 温度差,  $d_j$ : 厚さ ]

輻射熱による流入量  $Q_2$   
 $Q_2 = \sum (\alpha_j \times A_j \times \Delta \theta_j) \dots \dots \dots (2)$   
 [  $\alpha_j$ : 熱伝達率 ]

土の顕熱変化による流入分  $Q_3$   
 $Q_3 = c \times W \times \Delta \theta \dots \dots \dots (3)$   
 [  $c$ : 土の比熱,  $W$ : 土の重量,  $\Delta \theta$ : 温度変化 ]

【熱の流出】

水分蒸発による気化熱消費量  $Q_4$   
 $Q_4 = q_{ev} \times \Delta w \dots \dots \dots (4)$   
 [  $q_{ev}$ : 水の気化熱,  $\Delta w$ : 水分蒸発量 ]

水蒸気とともに排出される熱量  $Q_5$

【熱収支】

$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 \dots \dots \dots (5)$

3. 基礎実験

3.1 水の真空蒸発に関する基礎実験

3.1.1 実験概要 低圧力環境における水の蒸発現象を確認するとともに、影響因子として圧力および周辺温度に着目し、Fig. 3の装置を用い実験を行った。

アクリル製真空容器(φ15×h20cm)に水200ccを入れた深シャーレ(φ8.5cm)を設置し、真空ポンプで容器内の空気を排出した。真空ポンプは圧力一定装置と連動しており、所定の圧力になるよう制御されている。水の蒸発量は、真空容器全重量を計量し、その減少分より算出した。水および容器内空間、実験室の温度計測は熱電対を用いて行った。

実験条件は、室温3ケース(20, 25, 30℃)と容器内圧力4~6ケース(1~40Torr; ※大気圧760Torr)である。

3.1.2 実験結果および考察 水の蒸発量および温度の経時変化例として、Fig. 4に室温30℃、容器内圧力1 Torrとした場合の計測結果を示す。蒸発量は、初期段階を除いて時間に比例しており、蒸発速度が一定であることを示す。その際、室温30℃に対し、容器内空間は2℃、水は22℃の温度降下を呈している。これは、水の顕熱変化分による熱量と周辺空間から流入する熱量が水分蒸発に消費され(気化熱相当)、平衡状態となった時、その蒸発速度も一定となると考えられる。

各ケースにおける平衡状態時の水の蒸発速度と容器内圧力および室温の関係を図5に示す。この図より、蒸発速度は、圧力および室温(周辺温度)に依存している。

文献3)によれば、水の単位時間の蒸発量dx/dtは、式(6)により表現される。

$dx/dt = kS(p_{ws}' - p_w) \dots \dots \dots (6)$

$k$  ; 拡散に関する定数,  $S$  ; 水の表面積

$p_{ws}'$ ; 水表面の水蒸気圧,  $p_w$ ; 水蒸気圧

ここで、 $p_{ws}'$ を容器内温度における飽和水蒸気圧  $p_{ws}$ ,  $p_w$ を容器内圧力  $p_0$ とほぼ等しいと見なし(実際は水蒸気と残存空気による圧力)、実験結果をまとめるとFig. 6のようになる。この関係は式(6)に準ずるものであり、容器内温度における飽和水蒸気圧と容器内圧力の差が大きいほど蒸発速度が大きいことがわかる。なお、容器内温度は、蒸発を伴う容器内外の熱収支バランスで決定されることになる。

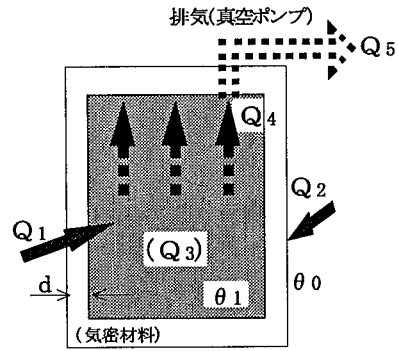


Fig. 2 熱収支の概念  
Concept of Heat Balance

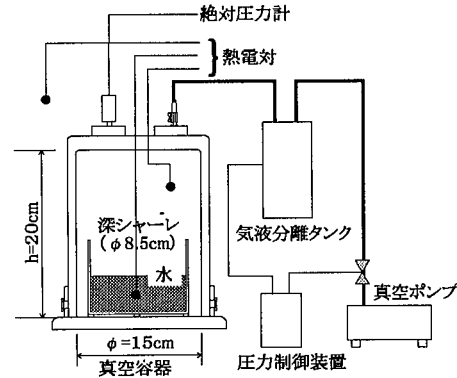


Fig. 3 実験装置の概要  
Outline of Apparatus

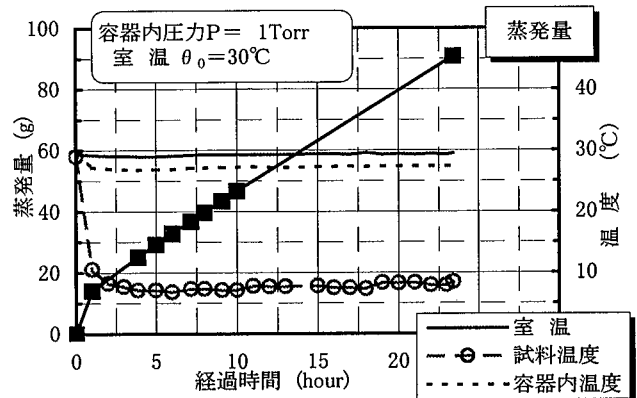


Fig. 4 蒸発量の経時変化例  
Time History of Evaporation

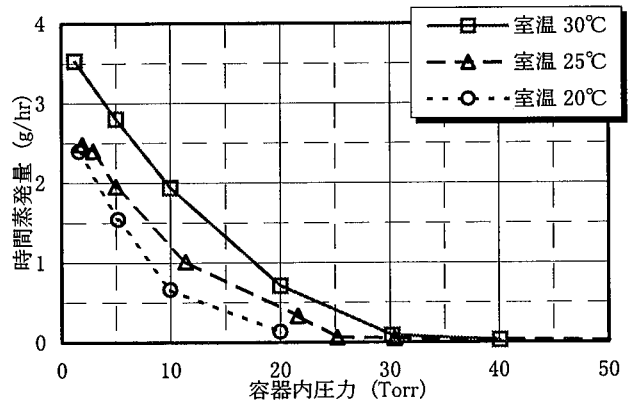


Fig. 5 水の蒸発速度と圧力、室温の関係  
Relation of Pressure and Temperature in Room to Moisture Evaporation Rate

3.2 不飽和土の真空蒸発に関する基礎実験

3.2.1 実験概要 真空蒸発による不飽和土の含水比低下メカニズムを確認するためにFig. 7の装置を用い、長野産ロームを対象にモールド実験を行った。

モールドは塩ビ製(φ30×h35cm)であり、試料条件をTable 1に示す。各部位の温度計測は熱電対で行い、モールド内圧力の計測はブルドン管を用いた。ロームの含水比の変化は装置全重量を計量し、その減少分より算出した。

3.2.2 実験結果および考察

(1) モールド内圧力 モールド内の圧力は、重量測定時を除いて、ほぼ15Torr程度であった。

(2) 室内温度とモールド内(砂層)温度 室内温度は昼間24℃程度、夜間22℃程度で日変動し、平均約23℃である。Fig. 8に含水比の変化と室内およびモールド内(砂層)、ローム内の温度変化を示す。モールド内(砂層)の温度は室温と同様に日変動するが、その変化は室温よりも小さい。その理由としては、室温の高くなる昼間は水分蒸発も盛んとなり、気化熱の消費も増加して温度上

昇を抑制することと、夜間は室温が下がり蒸発が衰えるので気化熱の消費が減少して温度低下も減少することが考えられる。

(3) ローム内温度と含水比の変化 ローム内温度T-2、T-3ともほとんど同一の変化を示した。深さ方向の差はほとんどなく、圧密現象とは異なってローム全層での真空蒸発が発生していることを意味する。特徴的なことは、ローム内温度および含水比の変化が8日目を境に大きく変化することである。

①初日~8日間の挙動； ローム内温度は当初22℃程度であったが、真空ポンプを稼働させると、蒸発に伴う気化熱消費のために1日目で16℃に低下し、日変動はあるものの上限18℃程度、下限16℃程度であり、8日間平均17℃で推移している。一方、真空蒸発によって含水比は低下しているが、その低下割合は8日間を通じてほぼ一定であった。一日当たりの含水比低下量で示すと約1.5%/dayとなり、脱水量にすると約250g/dayである。ここで強調すべきは、含水比の変化が圧密現象の場合とは異なり、時間に比例して定量的に低下することである。

②8日以降の挙動； 含水比27%程度に至るとそれ以降の含水比変化は減少し、それまでと異なった勾配の緩い直線を示した。この変曲点<sup>4)</sup>は極めて明確に発生した。この時、土中の温度は急激に上昇し、モールド内温度および外気温との差が小さくなった。すなわち温度変化から見ると、温度低下につながる気化熱の発生する量がなくなったことを示す。このことは間隙水や土粒子表面水が蒸発する時期と、これらが蒸発を終え、その後は土粒子内部に含まれた水が土粒子内部から表面に至って蒸発する時期に分けて考えれば理解できる。間隙水蒸発の前半の時期は真空蒸気圧の程度と消費熱量によって蒸発量が左右され、間隙水が蒸発した後半の時期は土粒子内部に含まれた水が土粒子表面に浸出した分が蒸発する。当然、土粒子内部を通過するには時間を要し、蒸発対象となる水も少なく、除去される水の結合エネルギーが前半の場合と異なると考えられる。この時点の土の状態はほとんどカラカラであり、現実的にこの含水比まで下げてもなく、土工の目的は達せられる。

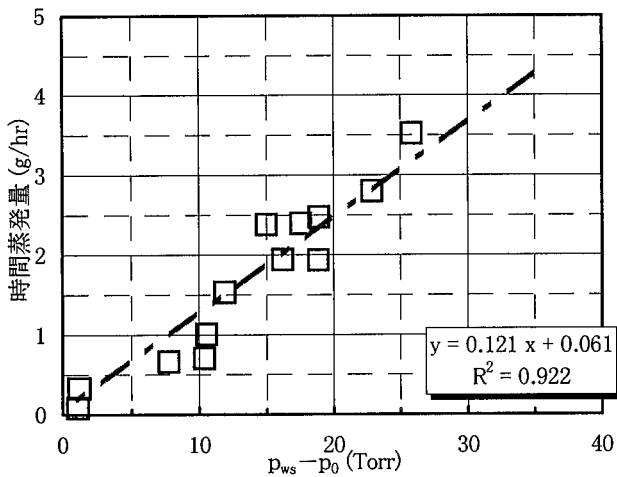


Fig. 6 時間蒸発量と  $p_{ws} - p_0$  の関係  
Relation of Moisture Evaporation to  $p_{ws} - p_0$

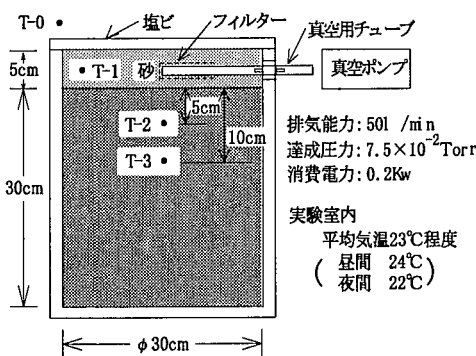


Fig. 7 実験概要  
Outline of Apparatus

Table 1 試料条件  
Conditions of Sample

| 試料名   | 長野産ローム                  |
|-------|-------------------------|
| 土粒子密度 | g/cm <sup>3</sup> 2.627 |
| 初期含水比 | % 40.1                  |
| 初期飽和度 | % 90.0                  |

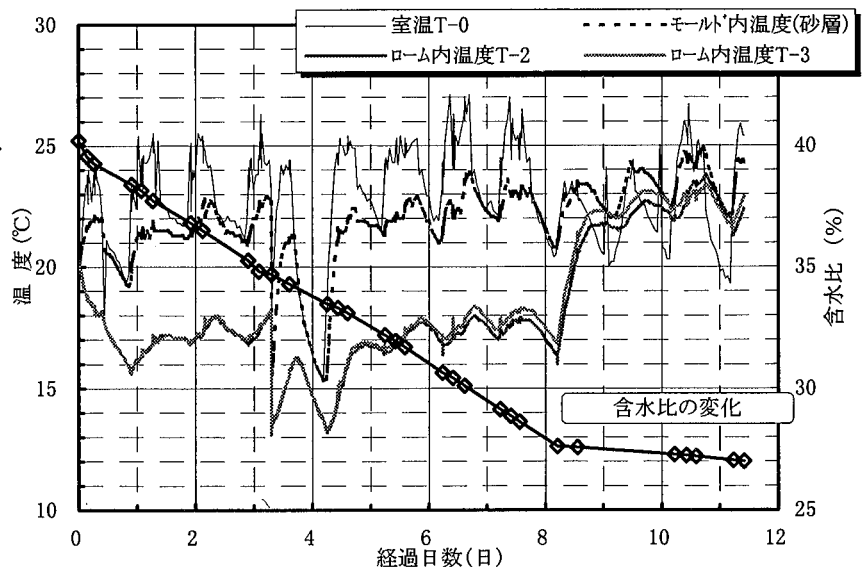


Fig. 8 含水比の変化と温度変化(室内, モールド内(砂層), ローム層)  
Changes of Sample's Water Content and Temperatures (Room, Inside of Mold (Sand Layer), Loam Layer)

4. モデル実験

4.1 実験概要

モールド実験レベルでは、真空蒸発による土の含水比低下を実証したが、本章では試料の量を多くしたコンテナ(0.42m<sup>3</sup>)を用いたモデル実験(2ケース)を実施した。このモデル実験では、試料層厚が大きくなった場合の改良効果や含水比の深度分布特性を調査するとともに、モデル実験2では、屋外にコンテナを設置し、外気温度が改良効果に及ぼす影響を検討した。

Table 2にモデル実験1, 2の概要をまとめて示す。

4.2 実験装置

Fig. 9 に示すポリプロピレン製の大型コンテナ(L100×W70×H60cm)に試料土を層厚 50cm に敷き詰め、試料土内部の温度分布を測定するために深さ方向に3点熱電対を設置した。試料上面にはフィルターを介して有孔管および乾燥砂 10cm を敷き均した。コンテナ上部はゴム膜(厚さ 3mm)で覆い、真空ポンプを有孔管に接続し、コンテナ内の空気を排出した。この場合、3.2 基礎実験と異なり、大気圧とコンテナ内圧力の差が上載荷重としてゴム膜を介し試料土に作用することになる。試料土の沈下量を測定するためにコンテナ上面に変位計を設置し、コンテナ内の圧力測定は試料内部に通管されたブルドン管または絶対圧力計を用いて行った。モデル実験1は実験室内に実験装置を設置し、モデル実験2では各計器を設置したコンテナのみを屋外に配置した。

4.3 含水比の計測

試料土の含水比の変化は、実験直前と一日2回の頻度でコンテナ総重量を測定し、測定値の減少分から水分蒸発量を求め、平均含水比を算出した。約7日の頻度で真空ポンプの稼働を一時中止し、サンプリング管(φ5cm)による試料土全層厚のサンプリングを行い、深度方向の含水比測定を行った。

4.4 関東ロームを対象にした屋内実験(モデル実験1)

4.4.1 試料条件 試料土は清瀬産の関東ロームであり、その基本物性をTable 3に示す。実験では含水比低下を効果的に把握するために、自然含水比状態の試料土に加水混合し、24時間放置することで高含水状態とした。

4.4.2 実験結果および考察

(1) 含水比の経時変化 コンテナ重量から算定した試料の含水比と試料土の上層、中層、下層のサンプリ

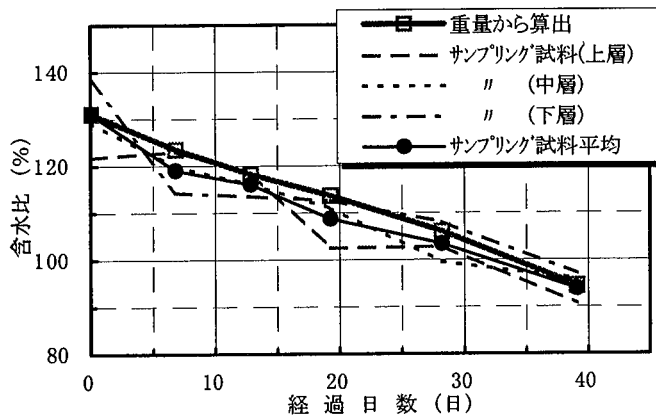


Fig. 10 含水比の経時変化  
Change of Water Content

Table 2 モデル実験の概要  
Abstract of Model Experiments

| 実験NO. | モデル実験1 | モデル実験2                    |
|-------|--------|---------------------------|
| 対象試料  | 関東ローム  | 大山ローム                     |
| 設置場所  | 実験室内   | 屋外                        |
| 実験時期  | 5~6月   | 9~10月                     |
| 圧力計測  | ブルドン管  | 絶対圧力計<br>(歪ゲージ式)          |
| 真空ポンプ | 達成圧力   | 7.5×10 <sup>-4</sup> Torr |
|       | 排気能力   | 0.2 m <sup>3</sup> /min   |
|       | 消費電力   | 0.55kW                    |
|       |        | 5.0×10 <sup>-3</sup> Torr |
|       |        | 0.76 m <sup>3</sup> /min  |
|       |        | 1.5kW                     |

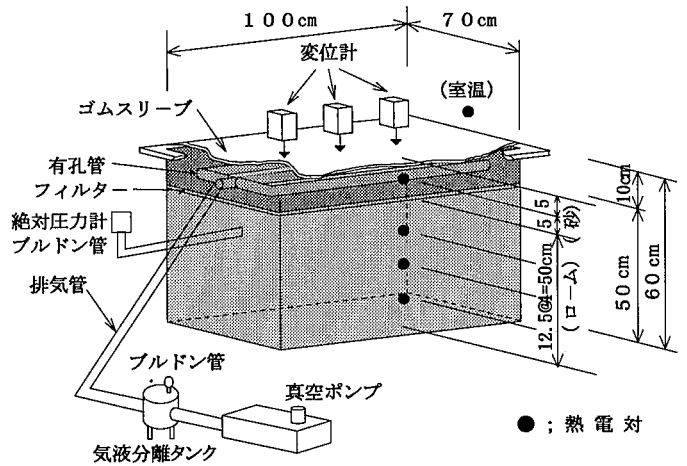


Fig. 9 実験装置の概要  
Outline of Apparatus

Table 3 試料条件  
Conditions of Sample

| 基本物性     | 試料名   | 関東ローム(清瀬産)        |       |
|----------|-------|-------------------|-------|
|          | 土粒子密度 | g/cm <sup>3</sup> | 2.781 |
| 自然含水比    | %     | 119.6             |       |
| 液性, 塑性限界 | %     | 146.0, 84.5       |       |
| 試料湿潤重量   | kgf   | 350               |       |
| 初期状態     | 含水比   | %                 | 131.1 |
|          | 乾燥密度  | g/cm <sup>3</sup> | 0.454 |
|          | 間隙比   |                   | 5.126 |
|          | 飽和度   | %                 | 71.1  |

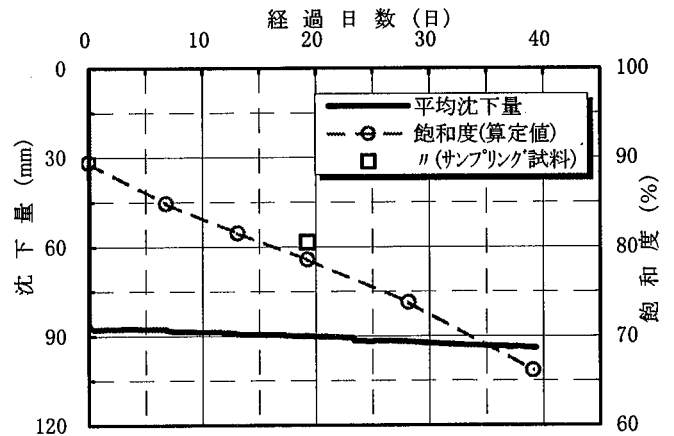


Fig. 11 沈下量と飽和度の経時変化  
Time History of Settlement and Degree of Saturation

ング試料による含水比測定結果の経時変化をFig. 10に示す。この図によれば、含水比は真空蒸発によって時間とともに比例的に減少しており、その減少割合は約1%/日程度であった。さらに、深さ方向の含水比のバラツキは少なく、全層においてほぼ一様に含水比が低下した。

(2) 沈下量および飽和度の経時変化 試料の平均沈下量と飽和度の経時変化をFig. 11に示す。沈下量は3測点の平均値を示したが、真空ポンプ稼働直後、約9cm近く瞬時沈下が発生し、その後は沈下傾向であるものの極めて微量である。

飽和度はコンテナ重量から得られる試料重量および含水比と沈下量から求められる試料体積を用いて算定した。飽和度は、真空载荷による瞬時沈下直後の値を初期値として示すが、体積がほぼ一定の状態では含水比が低下するために比例的に減少する。同図中にはサンプリング試料から求めた実測値も併示した。

(3) 温度およびコンテナ内圧力の経時変化 室温、砂層温度および試料温度の経時変化をFig. 12に示す。なお、コンテナ内の圧力は、真空ポンプ稼働中、ほぼ20 Torrを示した。特徴的な事項を以下にまとめる。

①室温は、約40日間において季節変動によって21℃程度から24℃程度と上昇した。この室温と土中温度差を見ると、15日前後では1~2℃と温度差が小さいが、30~40日後は温度差が3℃前後と大きくなっており、これらは含水比低下に反映している。しかし、全体的には含水比低下を大きく左右させるまでは至らず、Fig. 10示すように経過日数に比例して低下した。

②試料土の温度変化は全層にわたって生じ、7日以降は全層はほぼ一定温度で変化している。このことは含水比低下が全層にわたって均等に発生したことの裏付けともなる。すなわち、試料全層に真空伝達が行き渡り、それに伴う間隙水の真空蒸発も試料全層でほぼ均一に発生したものと考えられる。

③砂層の温度は、真空稼働後、0.5、2日時点で急激に低下しているが、これは瞬時沈下により砂層に排出された水分が蒸発した際に気化熱を必要としたものと推測できる。

#### 4.5 大山ロームを対象にした屋外実験(モデル実験2)

4.5.1 試料条件 試料土は鳥取産の大山ロームであり、その基本物性をTable 4に示す。この試料土の鉱物組成は、X線分析の結果ハロイサイトが優勢であり、土粒子の内部水が多く、練り返し等による強度低下が大きいことが予想され、盛立材などの土工材料として利用する場合、含水比の低下が必要な材料である。

#### 4.5.2 実験結果および考察

(1) 含水比および沈下量の経時変化 コンテナ重量から算定した試料土の含水比とサンプリング試料の平均含水比の経時変化を試料の平均沈下量の経時変化と合わせてFig. 13に示す。

沈下量は3測点の平均値で示したが、真空ポンプ稼働直後、減圧分の大気圧が試料に作用し、約40mmの瞬時沈下が発生するが、それ以降の沈下は見られない。一方、含水比は勾配が測定毎に異なるが、経過日数とともに確実に低下している。

(2) 含水比の深度分布 実験直前および真空ポンプ稼働後7、14、16日目に行った全層厚サンプリング試料から得られる含水比の深度分布を時系列的にFig. 14に示す。この図より、含水比の深度別における低下状況

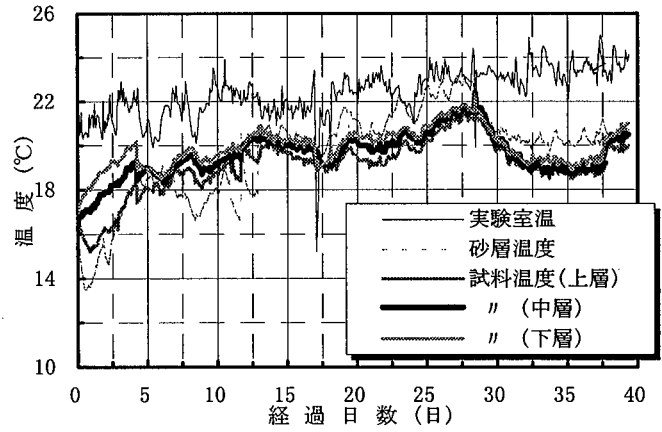


Fig. 12 室温、砂層、試料温度の経時変化  
Time History of Temperature in Room, Sand Layer, Loam Layer

Table 4 試料条件  
Conditions of Sample

| 基本物性    | 試料名    | 大山ローム(鳥取産)        |       |
|---------|--------|-------------------|-------|
|         | 土粒子密度  | g/cm <sup>3</sup> | 2.824 |
| 自然含水比   | %      | 80.7              |       |
| 液性、塑性限界 | %      | 87.7, 32.7        |       |
| 初期状態    | 試料湿潤重量 | kgf               | 350   |
|         | 含水比    | %                 | 80.7  |
|         | 乾燥密度   | g/cm <sup>3</sup> | 0.553 |
|         | 間隙比    |                   | 4.104 |
|         | 飽和度    | %                 | 55.6  |

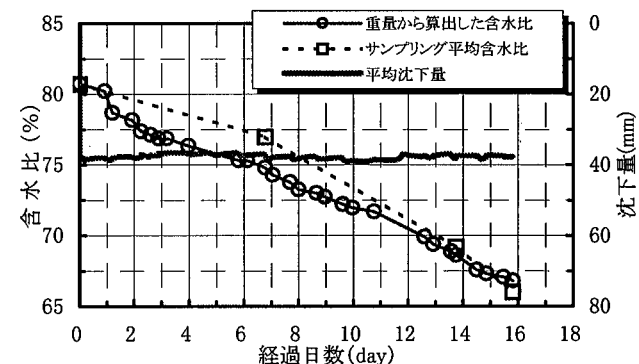


Fig. 13 含水比および沈下量の経時変化  
Time History of Water Content and Settlement

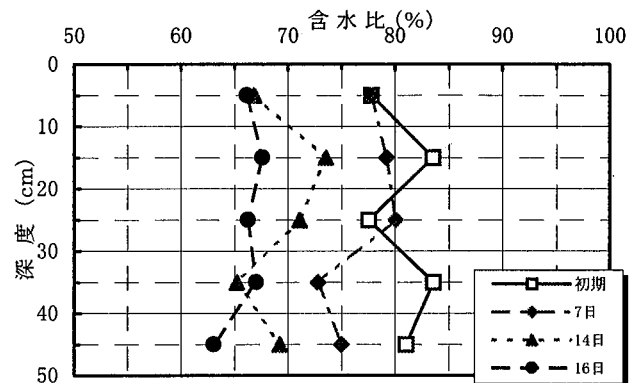


Fig. 14 含水比の深度分布  
Depth distribution of Water Content

は、データのバラツキはあるもののほぼ同程度の割合で進行しており、全層一様に含水比が低下しているものと考えられる。

(3) 温度およびコンテナ内圧力の経時変化 外気温、砂層温度、試料温度およびコンテナ内圧力の経時変化を Fig. 15 に示す。この図より、次項が伺える。

①外気温は、12~34℃の間で日変動するのに対し、試料温度の変動幅は 16~23℃と小さい。しかし、試料温度も 6 時間程度のタイムラグを持ちながら、日変動する。

②試料内の温度分布は、全層ほぼ同じ温度を呈しており、試料内の水の気化が全層ほぼ同程度に発生していることがわかる。

③コンテナ内圧力は、試料温度と同様に日変動している。その関係を水の飽和蒸気圧曲線とともに Fig. 16 に示すが、水の飽和蒸気圧が温度の関数であることに起因し、試料温度の変動に対応し、コンテナ内圧力も変動したものと考えられる。

(4) 外気温と日蒸発量の関係 水が水蒸気になるには、気化熱が必要である。その熱量の供給源としての周辺温度の影響を明らかにするために、平均外気温と日蒸発量の関係を、Fig. 17 に示す。

この図より、明らかに周辺温度が高い程、コンテナ内へ供給される熱量が多く、気化が促進され蒸発量が大きくなる。試料温度の変動と蒸発量から、コンテナ内への流入した熱量を計算し、その内、気化熱として消費された熱量の割合を算出すると 23% となる。

## 5. まとめ

基礎実験およびモデル実験から得られる知見をまとめると次のようになる。

1) 水の真空蒸発に関する基礎実験により、低圧力環境の蒸発現象は容器内圧力と周辺温度に依存し、特に容器内温度における飽和蒸気圧と容器内圧力の差が大きいほど蒸発速度が大きい。容器内温度は、蒸発を伴う容器内外の熱収支バランスで決定される。

2) モールドやコンテナを用いた実験において、真空ポンプを用いて低圧力環境を創造することによって、高含水比不飽和土の真空蒸発による含水比低下技術の可能性を確認した。

3) 真空蒸発によって、対象土の含水比低下は、各深度方向に同程度で進行しており、含水比の均質的な良質化が期待できる。

4) 湿潤土の真空蒸発現象においても、水の場合と同様に容器内圧力と周辺温度に依存し、周辺温度が気化熱の供給源として大きく影響することを確認した。

今後は、現場での実用化を目指した実証実験を実施し、より効果的な試料厚や容器形状、施工法などを検討するとともに設計手法を確立していく予定である。

## 参考文献

- 1) 藤森, 内田: 新しい軟弱地盤処理工法, 近代図書, p.66~80, (1967)
- 2) 真空ハンドブック: 日本真空技術(株), オーム社, p.328~331, (1992)
- 3) 守安: 空気調整工学, 技報堂, p.14~17, (1957)
- 4) 桐栄: 乾燥装置, 日刊工業新聞, p.12~13, (1974)

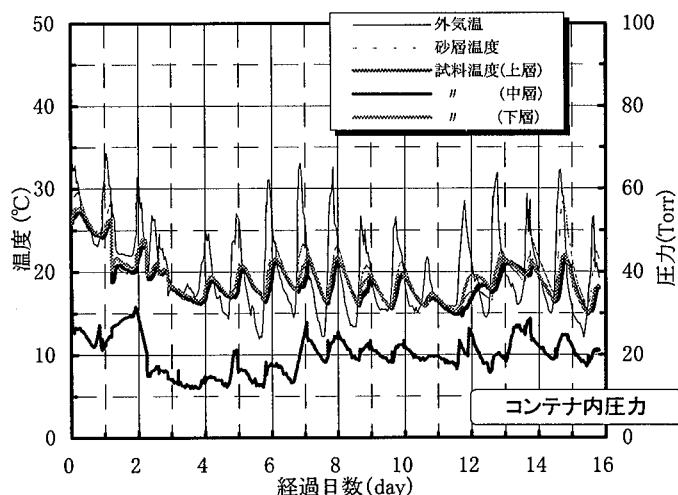


Fig. 15 室温、砂層、試料温度およびコンテナ内圧力の経時変化  
Time History of Temperature in Room, Sand Layer, Loam Layer and Pressure in Container

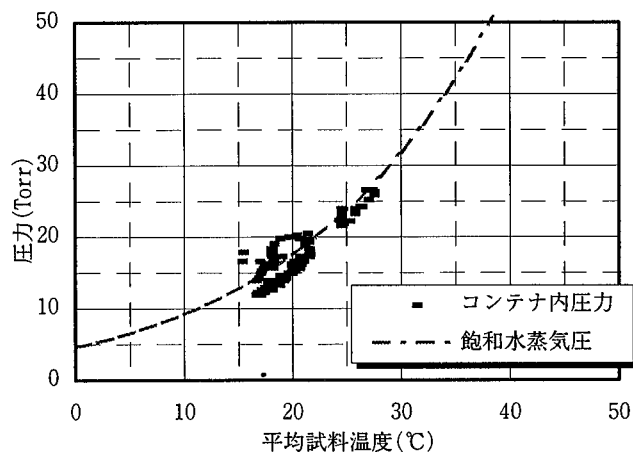


Fig. 16 試料温度とコンテナ内圧力の関係  
Relation of Temperature to Pressure in Loam

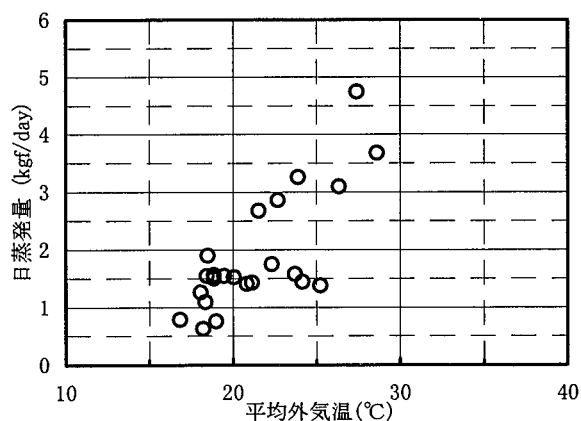


Fig. 17 外気温と日蒸発量の関係  
Relation of Moisture Evaporation to Air Temperature

- 5) 日笠山ら; 真空蒸発による不飽和土の含水比低下技術(その4)-加熱を考慮したモールド実験-, 土木学会第53回年次学術講演会Ⅲ部門, p.530~531, (1998)