

平成22年3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19580274

研究課題名（和文） 締め固め土に封入された空気の挙動とその力学性への影響

研究課題名（英文） Behavior of the entrapped air in compacted soil and its effects on soil mechanical properties

研究代表者

古賀 潔 (KOGA KIYOSHI)

岩手大学・農学部・教授

研究者番号：70091642

研究成果の概要（和文）：

土で構造物を造る際に土の締め固めは重要な作業である。締め固められた土に封入された空気ははじめ高い圧力をもち、土の中の水の圧力など土の力学性に影響を与える。この研究では、封入された空気起因する水圧の経時変化を測定した。また、封入された空気の圧力と体積を測定する方法を開発した。その結果、空気の圧力は水の圧力よりやや高いことが分かった。このことを元に、締め固められた土から水がしみ出す現象のモデル化や解析が可能となる。

研究成果の概要（英文）：

Soil compaction is an important work when constructing earth structures. The entrapped air in compacted soil has a high pressure just after the compaction and affects the pressure of water and other mechanical properties of the soil. In this study change in water pressure which is caused by entrapped air pressure was observed. A method which determines the pressure and the volume of the entrapped air was devised. It was revealed that the air pressure is higher than the water pressure a little. Based on such a fact, it will be possible to develop a model and analyzing method for a phenomenon that water is forced out from compacted soil.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学 農業土木学・農村計画学

キーワード：地盤工学, 超精密測定, 土砂災害, 土壌圏現象, モデル化

## 1. 研究開始当初の背景

太田, 古賀 (2004) は締め固めた土の間隙水圧の経時変化を各種条件の下で計測した。

これによると、間隙水圧は締め固め直後は高い値となるが、急速に低下した後緩慢な低下を続け、最後には負圧となって安定する。こ

れと並行して計測した土の骨格の体積変化，土・水・間隙空気系全体の体積変化と合わせて検討した結果，直後の間隙水圧低下は高い空気圧による骨格の体積膨張によること，またその後の緩慢な低下は封入空気が間隙水に溶解するためであること，さらに土の骨格の体積変化を拘束した場合は間隙水がしみ出す「離水現象」が発生することが明らかにされた。以上の様に，締固め土に封入された空気が高い間隙水圧，土の体積膨張，離水現象の原因であること，また空気の間隙水への溶解が過剰水圧の低下の原因であることが分かっているが，間隙水圧と間隙空気圧の関係は不明であった。また，間隙水圧，間隙空気圧の変化が土の力学的特性に与える影響についても十分な知見が蓄積されていない現状がある。

## 2. 研究の目的

本研究は締固めによって形成された土の構造に含まれる封入空気の挙動とそれが巨視的な力学性に及ぼす影響を解明することを目的とする。

具体的には，(1)封入空気の圧力を測定し，続いて(2)封入空気に起因する過剰間隙水圧の経時変化，(3)封入空気ならびに土全体の体積の経時変化，(4)これらと離水現象（過剰間隙圧により土から水がしみ出す現象）の関係を実験的に明らかにし，モデルにより解析する。さらに，(5)これら土の内部で進行する過程と土の巨視的な力学性の関係を調べる。

## 3. 研究の方法

(1)封入空気の圧力を測定し，続いて(2)封入空気に起因する過剰間隙水圧の経時変化，(3)封入空気ならびに土全体の体積の経時変化，(4)これらと離水現象（過剰間隙圧により土から水がしみ出す現象）の関係を実験的に明らかにし，モデルにより解析する。さらに，(5)これら土の内部で進行する過程と土の巨視的な力学性の関係を調べる。

## 4. 研究成果

(1)の封入空気の圧力の測定に関しては「2段加圧法」の改良を重ね，ほぼ満足できる精度で封入空気の圧力と体積を測定できるようになった。以下その詳細を記す。

### ① 2段加圧法の構築

#### (i) 2段加圧法の原理

2段加圧法とは次に述べるように試料外部で測定可能な量をもとに試料内部の封入空気の圧力と体積を求める方法である。封入空気を理想気体と仮定すると次式が成り立つ。

$$PV = nRT \dots \dots \dots (1)$$

ここで， $P$ : 封入空気の圧力（未知）， $V$ : 封入空気の体積（未知）， $n$ : 封入空気の実数（未知）， $R$ : ガス定数， $T$ : 温度（測定可能，一定とする）である。

初期状態を  $P_1V_1$  とし，圧力を1回目は初期の  $P_1$  に対して  $\Delta P_1$ ，2回目は初期の  $P_1$  に対し  $\Delta P_2$  増加させ，これによって生じる体積変化を1回目は  $\Delta V_1$ ，2回目は初期状態に対し  $\Delta V_2$  とすると，次式が成り立つ。

$$(P + \Delta P_1)(V + \Delta V_1) = nRT \dots \dots (2)$$

$$(P + \Delta P_2)(V + \Delta V_2) = nRT \dots \dots (3)$$

(1)，(2)，(3)より次式を得る。

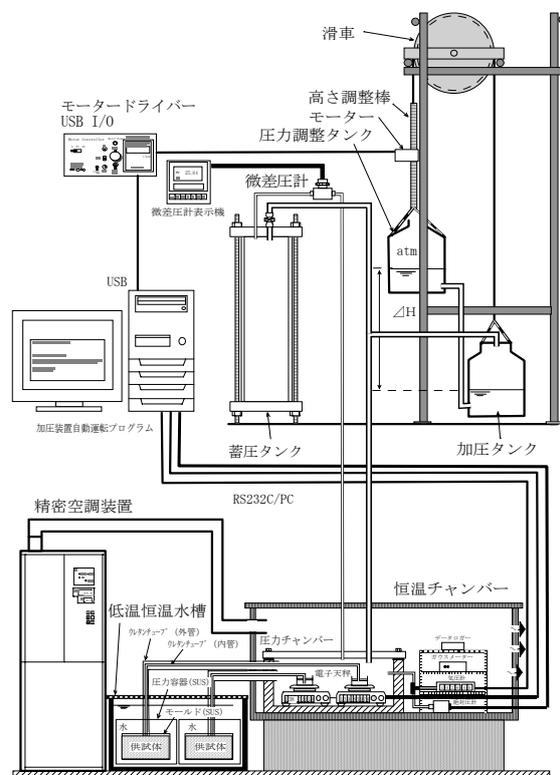
$$P = \frac{\Delta P_1 \Delta P_2 (\Delta V_1 - \Delta V_2)}{\Delta P_1 \Delta V_2 - \Delta P_2 \Delta V_1} \dots \dots \dots (4)$$

$$V = \frac{\Delta V_1 \Delta V_2 (\Delta P_2 - \Delta P_1)}{\Delta P_1 \Delta V_2 - \Delta P_2 \Delta V_1} \dots \dots \dots (5)$$

$\Delta P_1$ ， $\Delta P_2$ それぞれの加圧による体積変化  $\Delta V_1$ ， $\Delta V_2$ を測定することにより，封入された空気圧力  $P$ と空气体積  $V$ を(4)，(5)を用いて算出することができる。

#### (ii) 測定装置

装置は下図に示すように圧力調整部と測定部からなる。



圧力調整部（上半）は圧力調整タンクと加圧タンクから成り，これらの水位差で圧力を

発生させた。発生させた圧力は、加圧タンクからチューブを通じて圧力チャンバーへ供給した。圧力チャンバー内の圧力は絶対圧計で測定する。これを PC に出力し自動運転プログラムにより圧力調整タンクの高さを自動的に調整して常に圧力が一定になるようにした。なお、圧力チャンバー内の絶対圧と天秤上の水の質量変化は PC で記録した。

測定部（下半）は、圧力チャンバーの中に電子天秤を入れて、その上に水の入った計量容器を置いた。供試体中の間隙水は水で満たしたチューブを介して圧力チャンバー内の計量容器中の水と繋がっている。このようにして、供試体の体積変化すなわち封入空気の体積変化は電子天秤上の容器の水の質量変化として測定できる。測定部は微細な温度変化でも結果に大きく影響するため、圧力チャンバーは恒温チャンバーにモールドは低温恒温水槽に入れて温度を一定に保った。

#### (iii) 供試土

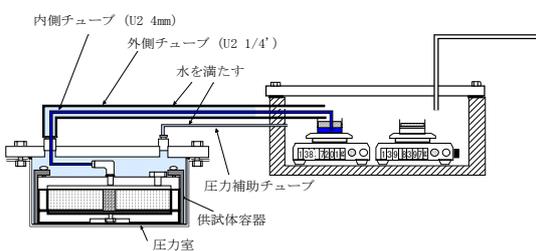
供試土は 2 種類の粘性土である。

ひとつは、岩手県滝沢村岩手大学付属滝沢農場で採取した火山灰質粘性土 (VH<sub>2</sub>) を含水比 75.2% で用いた。なお、締固め直後の飽和度  $S_r$  は 91.4% だった。

もうひとつは、岩手県盛岡市玉山区藪川で採取した赤色土 (LiC) を最適含水比 ( $w=39.6\%$ )、自然含水比を 2 回 ( $w=45\%$ )、高含水比を 2 回 ( $w=51.6\%$ ,  $w=53.4\%$ ) の計 5 回、含水比を変化させて用いた。なお、締固め直後の飽和度  $S_r$  は 90.4% だった。

#### (iv) 供試体の容器

供試体の容器は下図に示すような二重圧力容器とした。これにより、供試体を収容する容器の内外の圧力を常に同じにすることができるため、体積変化による誤差を発生させないで加圧することができる。



#### ② 2 段加圧法実験の方法

以下の手順で実験を行った。

- ・ 供試土の締め固め
- ・ 養生
- ・ 毛管上昇飽和
- ・ 二重圧力容器への組み込み
- ・ 定温恒温水槽への投入
- ・ 加圧試験

初期状態 1000hPa

第 1 段 1025hPa 1 時間

第 2 段 1050hPa 1 時間

第 3 段 1075hPa 1 時間

このように 3 段加圧することにより、2 段加圧の組み合わせが 4 組得られる。

- ・ 加圧溶解法による封入空气体積の測定

#### ③ 解析方法

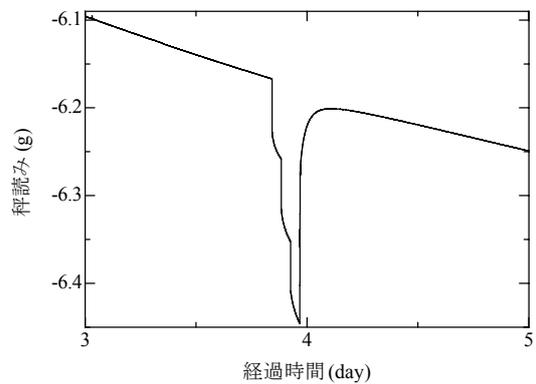
加圧による封入空気の体積変化の測定値には、体積圧縮だけでなく間隙水への溶解および僅かな蒸発が含まれる。したがって、これらのなかから計算に必要な体積圧縮のみを分離する必要がある。このため、以下の手順で解析を行った。

- ・ 蒸発量補正
- ・ 溶解量補正(1)
- ・ 溶解量補正(2)

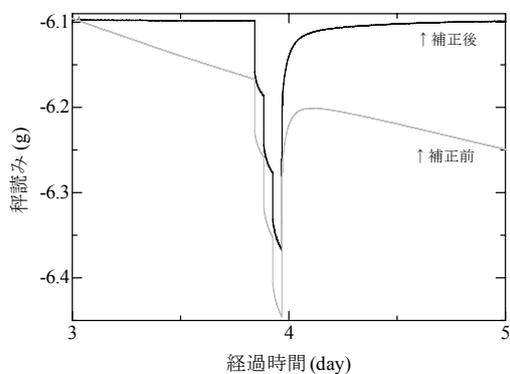
上記のうち、溶解量補正(1)は例えば 1050hPa の測定値には 1025hPa の時の溶解未了分が含まれることを考慮した補正であり、溶解量補正(2)は実際には避けられない加圧時間の遅れを考慮した補正である。以上のようにして得られた体積圧縮量を理論式に代入して封入空気の体積と圧力を計算した。

#### ④ 測定・解析結果の一例

実験で得られたデータの一例を示す。

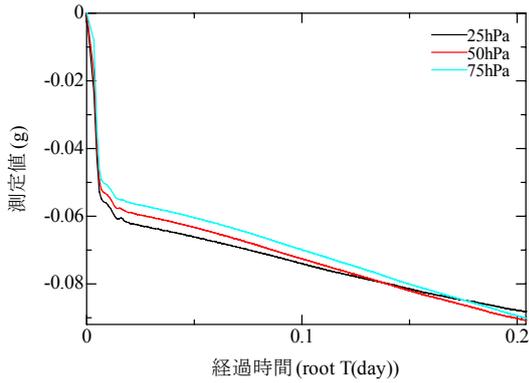


蒸発量補正を行った結果を示す。

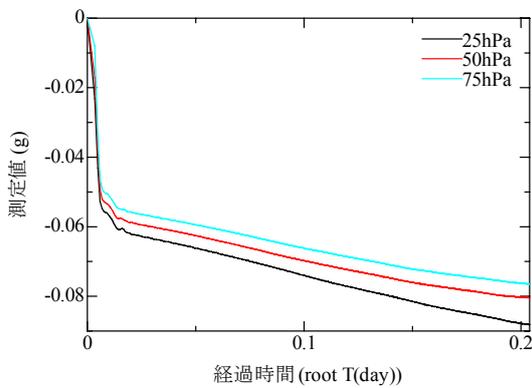


各加圧段階に分けて、それぞれの経過時間

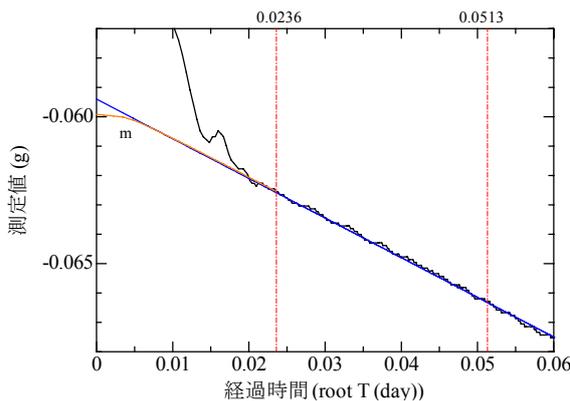
の平方根に対して表すと次のようになる。



続いて、溶解量補正(1)を施すと次のように3つのデータはほぼ並行になる。



体積圧縮量は上図の初期直線部を時刻ゼロに外挿して得られる切片であるが、ここで溶解量補正(2)を施すと以下のようなになる(1025hPaの例)。



以上のようにして、各段階の体積圧縮量を求め、計算式に代入する。

自然含水比で締め固めた赤色土について得られた計算結果の例を下表に示す。

$\Delta V_{25} = -0.06475 \text{ cm}^3$	$\Delta V_{50} = 0.02000 \text{ cm}^3$	$\Delta P_{25} = 24.986 \text{ hPa}$
$\Delta V_{50} = -0.06189 \text{ cm}^3$	$\Delta V_{75} = 0.02646 \text{ cm}^3$	$\Delta P_{50} = 50.008 \text{ hPa}$
$\Delta V_{75} = -0.05896 \text{ cm}^3$	$\Delta V_{1025} = 0.02979 \text{ cm}^3$	$\Delta P_{75} = 74.999 \text{ hPa}$

	P (hPa)	V (cm <sup>3</sup> )
0-25-50	1122	2.71
25-50-75	1136	2.74
0-25-75	1126	2.72
0-50-75	1131	2.73
平均	1129	2.73
変動係数	0.0054	0.0047

以上の様に本研究により2段加圧法をほぼ確立することができた。

(2)の過剰間隙水圧の経時変化の測定を実施した結果、背景で述べた結果が再確認された。

(3)封入空気ならびに土全体の体積の経時変化についても背景で述べた結果が再確認された。

(4)離水現象とモデルによる解析に関しては、現象の測定は実施したが、モデルの設定に必要な封入空気圧の測定方法の確立に時間を要したためまだ実施していない。今後の課題としたい。

(5)巨視的な力学性との関係の検討については、フォールロード試験により締固め土の強度の経時変化を測定したが、間隙水圧、空気圧の変化との対応は検討しておらず、今後の課題とした。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

①梅田直人, 坂本浩貴, 古賀 潔  
2段加圧法による締固め土の封入空気圧力・体積測定(2), 農業農村工学会, 2009年8月5日, つくば市, 筑波大学

②坂本浩貴, 古賀 潔, 梅田直人  
2段加圧法による締固め土の封入空気圧力・体積測定, 農業農村工学会, 2008年8月26日, 秋田市, 秋田県立大学

③坂本浩貴, 古賀 潔, 梅田直人  
2段加圧法による締固め土の封入空気圧測定, 農業農村工学会東北支部, 2007年10月31日, 福島市, 福島テルサ

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 潔 (KOGA KIYOSHI)

岩手大学・農学部・教授

研究者番号: 70091642

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし