

Gas 를 함유한 粘性土의 壓密特性에 관한 研究.

The Consolidation Behaviour of Muddy Soil Containing Gas Bubbles.

金 修 三*

Kim, Soo-Sam

Abstract

Soft offshore sediments quite frequently contain undissolved gas, probably methane produced biogenically.

The presence of gas bubbles can have a significant effect on the engineering behaviours of the seabed.

One of the main difference between saturated and gassy soils is that the undrained response is not incompressible, and without volume change, may be assumed for a fully saturated soil.

This paper describes the basic experimental work to further understanding of a gassy soil. The test has been performed for a gassy soil under undrained and drained conditions.

It was confirmed that the gas inclusions deformed due to changes in the total stress on the sample and also the pore gas pressure response to change in total stress, but not directly to those in pore water pressure.

And the test which applied the repeated load under undrained state also showed the similar behaviour as the simple load.

要 旨

해성토는 유기질등 부패등으로 흔히 methane 등을 생성하여 개스를 간극속에 함유하는 경우가 많다. 따라서 이 개스는 흙의 포화를 방해하게 되고, 외부에서 작용하는 압력에 따라 흙의 반응이 다양하게 나타난다. 특히, 개스를 함유한 흙의 거동의 대표적인 차이에는 비배수상태에서 외력이 작용할 때의 반응에 관한 것이다.

본 연구는 비배수 및 배수상태하에서 개스를 함유한 흙의 압밀거동을 실험을 통해 관찰하고, 개스를 포함한 간극수의 변화는 총응력에 상관관계가 있음을 알았으며, 압밀 압력의 변화에 따른 개스기포를 감싸는 포화된 흙의 거동을 분석하였고, 비배수상태에서 반복하중이 작용하는 경우, gassy soil의 거동을 살펴보았다.

* 正會員, 中央大學校 工科大學 土木工學科 副教授

1. 序 論

해안매립, 각종 해양구조물 등을 건설하는 경우, 설계 및 시공단계에서 해안에 퇴적된 흙의 거동에 따라 많은 문제에 봉착하게 된다. 특히, 해성토가 오랜 시간동안 입자의 퇴적에 의해 형성됨에 따라 각종 화학반응에 의해 포화상태에 있다고 간주되는 경우에도 실제에는 일부 개스(gas)를 함유한 상태로써 존재하는 경우가 많아 이를 불포화토와 같은 상태로 이해해야 하는 경우도 있다.

해성토에 개스를 형성하는 요인으로는 유기질이 부패하는 경우, 유기질이나 무기질 물질들이 지각변동에 따라 온도등의 변화로 지층내부에서 표층부위로 개스가 확산되는 경우와 화산활동 등에 의해 지각에 포함되는 개스 등등을 지적하고 있다.

우리나라의 경우에도 남·서해안에 분포한 해성토에도 상당한 개스를 함유했을 가능성이 농후하며 실제로, 해양연구소에서 조사한 연구에 의하면 서해안에 분포한 해성토에는 유기질을 상당히 함유한 흙이 산재해 있음을 알려주고 있어, 개스를 함유한 흙의 존재 가능성을 예측해 하고 있다.¹⁹⁾

따라서, 개스를 함유한 흙의 거동을 정확히 이해하여야만 각종 구조물을 보다 정밀하게 건설하게 될 것이며, 개스를 함유한 흙의 거동은 흔히 말하는 흙의 삼상 즉, 토입자, 공기, 물의 관계를 공기대신 개스로 그 구성을 재편성하여 해석하는 문제로 정의된다.

흙속에 존재하는 개스는 간극속에 있는 개스가 서로 연결되어 개스 자체의 흐름을 형성할 수 있는 상태와 포화도가 높은 흙속에서 간극속에 채워진 물속에 독립된 형태로 존재하는 개스의 존재등으로 구분할 수가 있으며 이 경우, 개스의 기포가 토입자나 간극보다도 매우 큰 상태와 개스기포가 간극수속에 포함될 정도로 매우 작은 모양으로 함유한 상태를 생각할 수가 있다.

그동안 진척된 연구에 의하면, 포화도 85% 이상의 해성토의 경우, 개스는 독립된 형태로

토입자간이나 간극수 중에 존재한다고 알려지고 있다.^{21, 24, 25)} 따라서, 수중에서 개스를 함유하고 있는 흙의 거동은 불포화토로써 해석해야 할 것이며 개스를 함유한 흙의 거동을 이해하는 문제로 제한하여 생각할 수 있고, 이를 Oxford 대학에서는 "Gassy Soil"이라는 용어로 정의하고 있다. 즉, 85~90% 이상의 높은 포화도를 갖으면서 독립된 형태의 개스기포를 포함하고 있는 불포화상태의 흙으로 정의하고 있다.²⁰⁾

본 연구에서 취급하는 개스기포를 함유한 흙의 경우도 포화도 80% 이상을 갖는 경우의 흙을 대상으로 하고 있으며 실제로 우리나라 서·남해안에 산재한 해성토의 경우에도 수중에 놓여 있어 포화된 흙으로 간주되고 있으나 엄밀하게 말하면, gassy soil의 영역에 속할 가능성이 농후하며 앞으로 연구를 통하여 이를 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 gassy soil의 압밀특성을 파악하기 위한 많은 연구의 한 단계로써, 영국 서해안의 Irish Sea에서 채집한 해성토를 사용하여 Oxford group이 개발한 실험기기를 이용하여 실내에서 gassy soil의 제작기술을 정밀 검토하고, 배수 및 비배수상태에서 초기압력을 변화시켰을 때 gassy soil의 거동이 보여주는 특성을 파악하고 이를 모델링하여 압밀특성을 해석하는 기초를 제공하고자 하였다.

2. Gassy Soil에 對한 研究

불포화토의 체적 및 유효응력에 대한 연구는 Terzaghi(1923)가 포화된 흙에 대한 유효응력 이론을 제안한 이후 Orlob and Radhakrishna에 의해 불포화토구조에 대한 개략적인 모델이 제시되었으며, Bishop(1959) 및 Bishop and Donald(1961)에 의해 불포화토의 유효응력 이론이 제시되어 흙의 유효응력이 포화도에 따라 간극수압(U_w)과 간극 gas압(U_g)에 의해 변화함을 발표하였다. 그러나, Jennings and Burland(1962)가 Bishop이론의 한계성을 지적하였고, Matyas and Radhakrishna(1968)는 불포화토에 대한 체적변화를 ($\sigma - U_g$)와 ($U_g - U_w$) 및 간극률(n)의 함수로 나타낼 수 있다

고 하였으며 또한, Fredlund와 Morgenstern (1976)은 등방압밀 및 1차원압밀실험을 통해 이를 증명하고 불포화토를 토입자, 물, 개스 및 수축면의 4상으로 정의하였다. 여기서, 수축면은 물과 개스를 분리하는 얇은 막을 말한다. (5, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 18, 20)

불포화토의 압밀에 대한 연구 또한, Terzaghi (1944)에 의해 처음 압밀이론이 제시된 이후 Taylor(1948), Abbot(1960), Schiffman and Gibson(1964), Gibson and Hussey(1967) 등등에 의해 선형·비선형 또는 다층구조 및 대형변형을 수반하는 압밀등에 관한 이론들이 제안되었고 Barden(1965)에 의해 부분적으로 포화된 흙에 대한 1차원압밀이론이 제시되었다.

또한, Biot(1941)가 제안한 압축성매질을 통하여 압축성유체가 흐르는 경우에 있어서 압밀방정식의 해를 구하기 위하여 많은 수치해석들이 시도되었다. 즉, Ghaboussi and Wilson (1973)에 의해 2차원 유한요소 모델이 제시되었고, Settari and Aziz(1975), Lewis, Verner and Zienkiewicz(1975), Meiri and Karadi(1982)등에 의해 수치모형들이 제공되었다.⁴⁾

Narasimhan and Witherspoon(1978)에 의해 부분포화된 간극속을 흐르는 유체의 흐름을 3차원 모델로 개발되었으며, Chang and Duncan(1983)은 elastic-plastic effective stress-strain model을 이용한 부분포화토의 해석방법등을 연구하였다.²⁴⁾

1978년부터 Sills을 중심으로 Oxford대학에서 집중적으로 연구가 시작된 gassy soil에 관한 연구들은 'gassy soil의 자연시료채집이 불가능함에 따라 실험실에서 gassy soil을 제작하기 위한 연구를 시작으로 Nageswaran(1983)의 gassy soil의 압밀특성에 대한 초보적인 연구, Wheeler(1986)의 전단특성에 대한 연구, Thomas(1988)에 의한 gassy soil의 압축성의 수치 modelling 작업이 계속 진행되고 있으며, Gardner(1987)는 해성토의 원위치에서 gassy soil의 존재와 특성을 파악하기 위한 음향탐사방법에 대한 연구를 수행해 오고 있다. (16, 21, 22, 23, 24, 25)

3. Gassy Soil의 壓密實驗

3.1 Gassy Soil 試料 製作

자연상태에서 gassy soil을 이상적으로 채집하는 것이 불가능하기 때문에 실내에서 시료를 제작하였으며 Nageswaran(1983)과 Wheeler (1986)이 제안한 "Zeolite Molecular Sieve Technique"을 이용하였다.^{3, 21, 24)}

gassy soil을 만들기 위해 영국 서해안에 위치한 Combwich Mud를 채집하여 Fig. 1에 나타난 순서에 의해 gassy soil을 제작하였다.

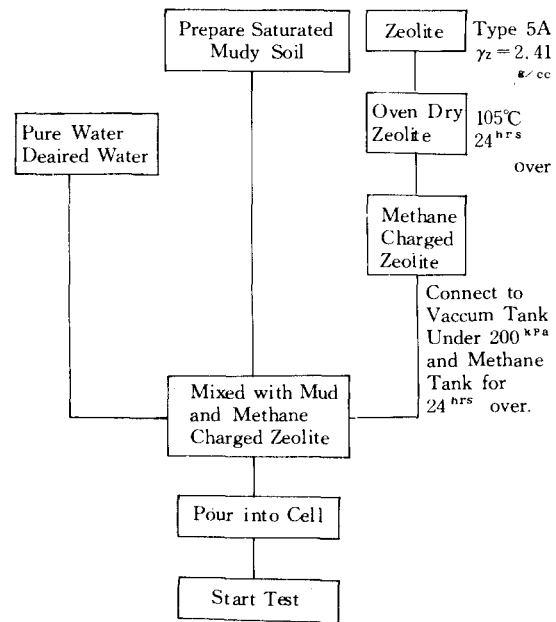
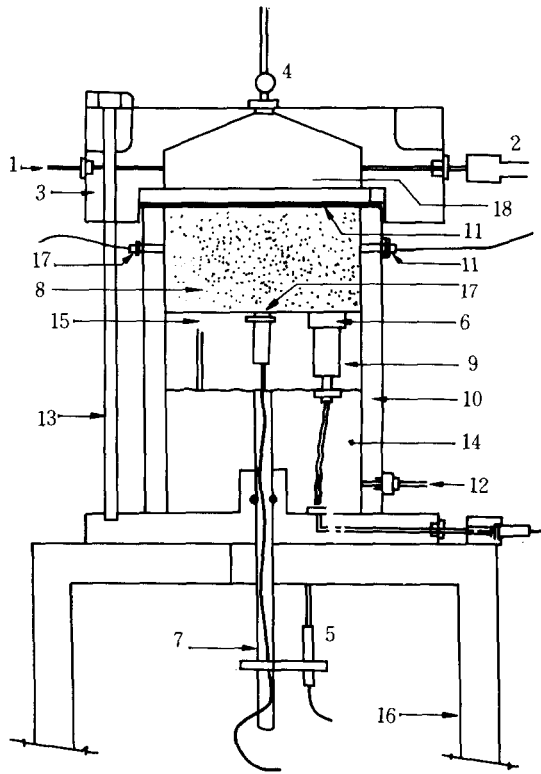


Fig. 1 Product of gassy soil sample.

3.2 실험장치

압밀실험을 실시하기 위한 실험장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제작하여 사용하였다.

본 실험장치는 내경 140 mm인 perspex 실린더를 사용하였으며, 실린더 내부에 알미늄 피스톤을 설치하여 시료를 떠 받치고 하중을 가할 수 있게 하였으며, 피스톤 바닥에는 간극수압(비배수면) 측정과 전응력을 측정하기 위한 500 kpa 까지 측정 가능한 transducer가 각각



- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Drainage Port | 10. Cylinder Wall |
| 2. Pressure Transducer | 11. Filtering System |
| 3. Top Cap | 12. Water Reservoir Inlet |
| 4. Tap Valve | 13. Holding Down Bolt |
| 5. Displacement Transducer | 14. Water Reservoir |
| 6. Porous Stone | 15. Bleed Screw |
| 7. Guide Rod | 16. Support Frame |
| 8. Soil Sample | 17. Total Stress Transducer |
| 9. Piston | 18. Drainage Water |

Fig. 2 Test equipment of gassy soil.

설치되어 있으며, 연직 방향의 변위를 조사하기 위하여 LVDT를 피스톤 하부에 연결시켰다.

실린더 상부에는 스테인레스로 만든 특수 필터와 종이 필터를 덮고 고강도 perspex로 만든 top cap 을 씌웠으며, top cap 은 원추형으로 내부공간을 만들어 배출된 개스와 물을 모을 수 있도록 하였다.

top cap 에는 간극수압을(배수면) 측정할 수 있도록 'transducer' 를 연결하였으며, 상부에 배수공을 개폐식으로 만들어 배수 및 비배수상태에서 실험이 가능하도록 하였으며, 배수시에는 burette 에 연결하여 배수량을 엄밀히 측정하도록 하였다.

또한, 측벽에도 수평응력을 측정하기 위하여 transducer 를 설치하여 연직응력과 수평응력과 의 상호관계에 따른 시료의 거동을 분석하고자 하였으며, 측정된 모든 자료는 PC 에 연결하여 data logging system 에 의해 분석 정리되도록 설계하였다.

또한, 적용압력은 air compressor 에 의한 공기압을 이용하여 임의로 재하조건을 조절할 수 있게 하였다.

3.3 Gassy Soil 에 關한 基本的인 工學的 性質

본 논문을 통하여 쓰여진 gassy soil 에 관한 기본적인 제사항을 간단히 요약하면 다음과 같다.

즉, 본 연구에서는 개스기포는 독립적으로 존재하고 개스기포를 포화된 흙일단(saturated soil matrix)이 감싸고 있다고 생각하며, 실제 실험실에서 제작한 gassy soil 시료는 이와 같은 가정을 충족시켜 주었다.

따라서, 포화된 흙 일단(saturated soil matrix) 의 간극비는,

$$e_w = V_w / V_s = [V_w / (V_w + V_g)] [(V_w + V_g) / V_s] = S_{we_t} - (1)$$

여기서, V_w 와 V_s 는 흙속의 토입자와 물, 개스의 체적이고 S_w 는 물의 포화도이다.

개스간극비(e_g)는,

$$e_g = V_g / V_s \dots\dots\dots (2)$$

V_g 는 주어진 흙에서 개스의 체적이다. 따라서, 이를 이용하여 총간극비를 구하면,

$$e_t = (V_w + V_g) / V_s = V_w / V_s + V_g / V_s = e_w + e_g \dots\dots\dots (3)$$

이고, 순개스체적은 다음 식으로 정의된다.

$$V_g = V_t - V_s - V_w \dots\dots\dots (4)$$

또한, 유효연직압밀응력(σ'_v)는

$$\sigma'_v = \sigma_v - U_w \dots\dots\dots (5)$$

σ_v 는 연직하중에 대한 응력, U_w 는 간극수압이다.

평균연직응력(σ'_v)은

$$\sigma'_v = \sigma_v - U_w = \sigma_v - (2U_{wu} + U_{wd}) / 3 \dots\dots\dots (6)$$

이다. 여기서, U_w 는 평균간극수압, U_{wu} 와 U_{wd}

는 비배수면과 배수면에 작용하는 간극수압이다.

압밀시험중에 개스체적은 개스압력을 알면 Boyle 법칙에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$U_{ga} \times V_{ga} = U_{gb} \times V_{gb}$$

여기서, V_{ga} , V_{gb} 는 A점, B점에서 개스체적이고, U_{ga} , U_{gb} 는 A점, B점에서의 개스의 압력을 의미한다. 또한, Boyle과 Henry의 법칙을 이용하면,

$$U_{ga} \times (V_{ga} + H \times V_{wa}) = U_{gb} (V_{gb} + H \times V_{wb}) + H \times U_g \times \Delta V_w \dots \dots \dots (7)$$

에 의해서도 구할 수 있다.

여기서, H는 Henry의 계수이고, ΔV_w 는 간극수체적의 임의의 압력에서의 변화량이다.

3.4 非排水壓密實驗

Fig. 2에 나타난 실험장치를 이용하여 흡속에서 개스가 어떻게 반응하는가를 판단하기 위하여 비배수압밀실험을 일정한 초기압력(initial consolidation pressure)을 작용시킨 경우와 초기압력을 변화시켜가면서 gassy soil의 거동을 살피고자 하였다.

4. 實驗成果와 考察

4.1 排水條件의 影響

배수 및 비배수상태에서 gassy soil의 반응을

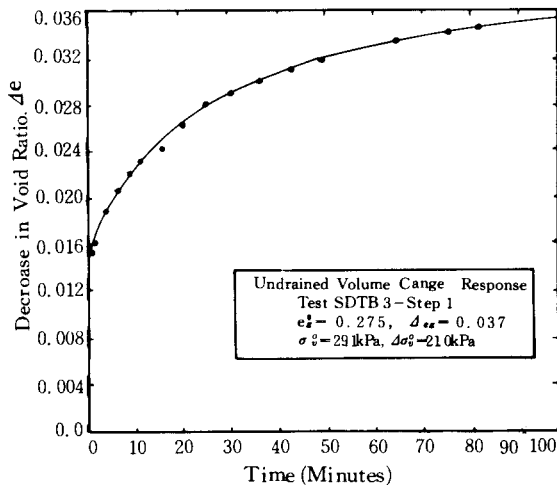


Fig. 3. Typical time-dependent undrained settlement response.

관찰하기 위하여, 비배수상태에서 간극비의 변화를 조사한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 3에 의하면 초기에 개스의 압축에 의하여 즉시 체적의 감소를 나타내고 있으며, 간극수의 손실이 전혀 없는데도 불구하고 시간의 경과에 따라 침하가 발생하고 있다.

이와 같은 현상이 발생하는 이유는 개스간극주위에서 발생하는 국부적인 압밀현상이 나타나는 경우와 간극수에 개스가 용해하여 체적이 감소하는 경우 등 몇가지를 생각할 수 있다.

Fig. 4에는 비배수상태에서 배수상태로 조건을 바꾸었을 때 나타나는 침하특성을 나타냈다. 이를 살펴보면, 배수·비배수조건에서 Gassy Soil의 반응을 알 수 있다.

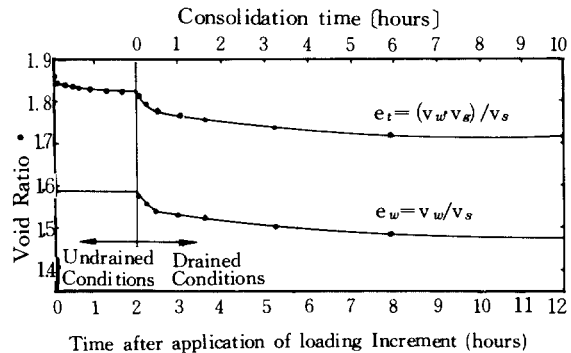


Fig. 4 Typical time-dependent undrained-drained settlement response.

따라서, gassy soil의 체적변화는 간극수와 개스의 체적을 분리하여 전체 체적변화로 나타내야 함을 의미하고 있다. 따라서, gassy soil의 체적변화를 간극비로 나타낼 때는 총간극비, 개스간극비, 포화된 주변 흡일단의 간극비(matrix void ratio)등으로 구분하여 정의되어야 함을 의미한다.

Fig. 4에 이들의 특성을 나타낸 실험성과의 일례를 제시하였다. 즉, 배수상태에서는 총간극비와 포화된 흡일단의 간극비(matrix void ratio : e_w)가 거의 같은 모양으로 변화함을 나타내고 개스간극비나 개스체적이 배수상태에서는 미소하게 변화함을 알 수 있으며, 이는 개스기포가 흡입자사이를 흘러가지 않고 독립되고 분리된 상태로 존재함을 의미하고 따라서,

어떤 압력이상에서는 간극수 속으로 용해될 가능성을 배제할 수 없다.

4.2 間隙比와 應力の 關係

시료의 상부만 배수를 허용하고 압밀실험을 실시한 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

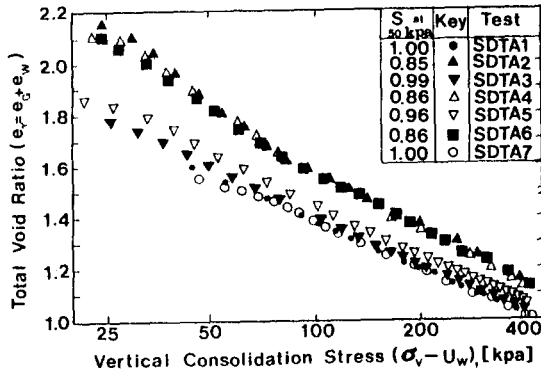


Fig. 5 Total void ratio vs. consolidation. Thomas 1986.

서로 다른 초기포화도를 갖는 경우에 있어 총간극비와 연직유효응력과의 관계를 나타낸 것으로 포화도에 따라 서로 다른 반응을 나타내고 있으며, 이를 포화된 흙일단의 간극비로 나타내면 Fig. 6과 같이 거의 일양한 값을 보여주고 있어 앞에서 가정한, 포화된 흙이 개스기포를 감싸고 있다는 가정을 입증하고 있으며 따라서, 포화된 흙일단의 조건이 압밀응력에 의하여 결정될 수 있음을 의미하고 gassy soil의 압축성을 예측할 수 있는 가능성을 제공하고 있다.

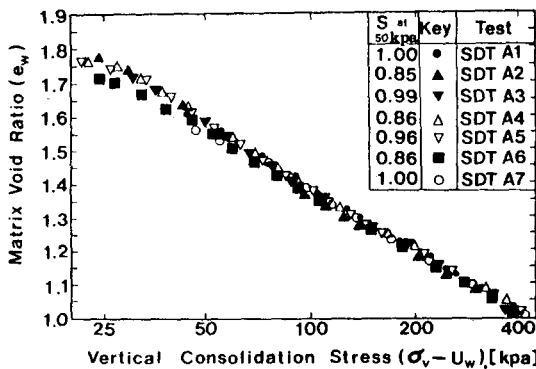


Fig. 6 Matrix ratio vs. consolidation stress, Thomas 1986.

4.3 間隙에서의 Gas의 壓力

포화된 흙과 gassy soil의 주요한 차이는 간극수에 개스압력이 존재하는 것이며, 개스압력을 알아내는 방법으로는 실험기에서 transducer 를 가지고 직접 측정하는 방법과 Boyle법칙에 의한 계산에 의하여 얻어내는 방법등이 있다.

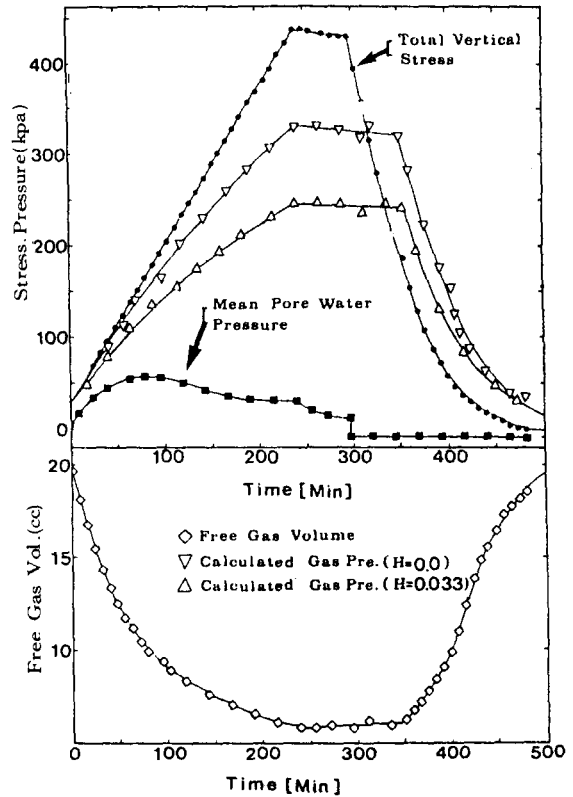


Fig. 7 Increasing load consolidation results Thomas 1986.

실측에 의한 개스압력측정은 개스존재의 민감성 때문에 실패하기가 매우 쉬우므로 본 연구에서는 총체적과 물의 체적 및 토입자의 체적등을 이용하여 개스압력을 식 (7)을 이용하여 구하였다. 이 방법은 S.D. Thomas가 제안한 방법으로 이를 이용하여 실험한 결과의 한 예를 Fig. 7

과 같이 나타냈다. 그 결과에 의하면, 연직총응력은 하중이 재하됨에 따라 선형으로 증가하고 있고 간극수압은 비배수상태에서 증가하다가 배수상태로 변하면서 서서히 감소하다가 안정된 모습을 보이고 있으며, 이는 포화된 흙에서의 반응과 매우 유사하다. 개스의 체적 또한, 압력이 증가함에 따라 감소하고 있으며 총응력을 잠깐동안 일정하게 하여 조사한 바에 의하면, 이 때 간극수압은 일정한 상태를 유지하다 급격히 감소하고 있으나 개스의 체적은 총응력을 떨어뜨릴 때까지 상당한 시간동안 일정한 상태를 유지하다가 결과적으로 다시 체적증가를 나타내고 있다.

개스체적으로부터 Henry의 계수, $H=0$ 과 $H=0.033$ 일 때에 대하여 개스압력을 계산한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 여기서 용해된 개스의 농도를 H , 즉 Henry의 계수로써 표시하고 20°C 에서 물 속에 용해된 methane의 경우 $H=0.033$ 을 사용하고 있으며 $H=0$ 인 경우에는 Boyle의 법칙과 같은 방법이 된다. 이를 살펴보면, 개스압력은 간극수압과는 무관하고

총응력의 변화와 상호 밀접한 관련이 있음을 나타내고 있다.

따라서, gassy soil에 대한 압밀이론의 구성은 총응력에 비례해서 개스압력이 변화한다는 성질을 이용하여 모델화를 할 수 있다.

4.4 非排水條件에서 反復荷重에 對한 Gassy Soil의 反應

gassy soil이 대부분 해안에 위치하고, 파압 등에 의한 반복하중이 작용하는 경우에 gassy soil의 반응을 관찰하기 위하여 비배수상태에서 초기응력조건을 변화시켜가면서 압밀시험을 실시한 결과를 Fig. 8, 9, 10 등에 나타냈다.

특히, gassy soil의 제작과정에서 개스를 빨리 발생시키기 위한 방법으로 미소한 초기압력(initial consolidation pressure)(35~50 kpa 정도)을 작용시키는 방법을 사용하고 있으나, 초기압력에 따라 제작된 gassy soil의 거동이 어떻게 변화하는지를 구체적으로 규명하지 못하고 있다. 따라서, 본 실험은 시간의 제약때문에 현재까지 실시된 시험성과만을 정리한 것으로

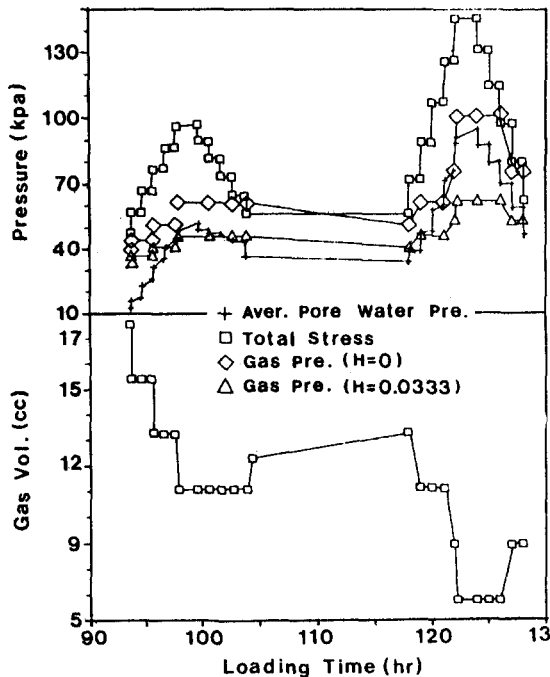


Fig. 8 Gassy soil response under undrained state with $P_i = 50$ kpa

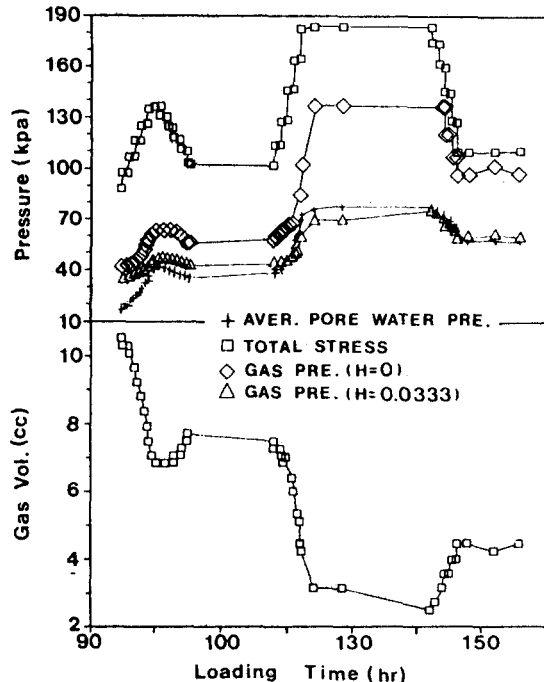


Fig. 9 Gassy soil response under undrained state with $P_i = 100$ kpa

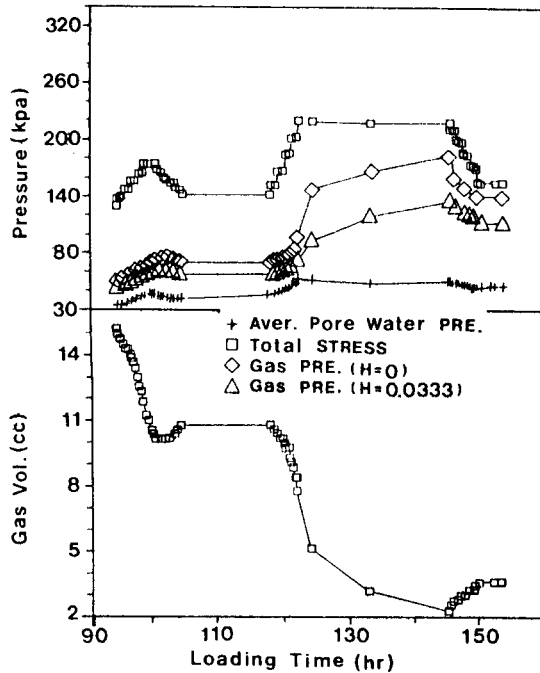


Fig. 10 Gassy soil response under undrained state with $P_i = 150$ kpa

응력과 개스압력·체적등의 변화를 관찰하고자 하였다.

그림에 나타난 바와 같이 초기압력을 $P_1 = 50, 100, 150$ kpa로 변화시키면서 loading, unloading을 반복하였으며, P_{max} 를 1 단계에 $P_1 = 100, 150, 200$ kpa까지. 2 단계에서 $P_2 = 150, 200, 250$ kpa까지 압력을 가하였다가 제거하면서 총응력, 간극수압을 측정하고 개스압력과 개스체적을 계산하여 나타냈다.

실험결과를 살펴보면, 전체적으로 작용, 반작용에 따른 gassy soil의 반응이 각각 유사한 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 그러나, 간극수압의 경우(배수, 비배수면에서 측정된 간극수압의 평균값임.), 초기압력(P_1)이 낮은 경우에는 간극수압의 영향이 매우 민감하게 나타나나, P_1 가 큰 경우에는 총응력에 대한 간극수압의 변동이 훨씬 감소하고 있다. 이는 초기하중에 의해 시료가 선행압밀 상태가 되어 부가하중에 대한 영향을 그만큼 덜 받기 때문이라 사료된다. 비배수상태이기 때문에 압력이 가해짐에 따라 개스의 체적이 감소하다가 압력이 제거되면 개스체적이 팽창하는 특성을 보여주고 있으

나, 회복량이 충분히 초기치까지 달성하지 못하고 있다.

이는 수분 중에 용해된 개스가 용출되기 위해 상당한 시간을 필요로 함을 의미하며 따라서, 반복하중에 대한 gassy soil의 응답이 상당한 지체시간을 갖게 됨을 뜻한다.

본 실험성과는 기타 사항에 대한 상세한 분석이 현재 진행중이므로 추후에 상세히 보고하고자 한다.

4.5 壓密理論의 Model化

완전포화상태에 있는 흙의 1차원 응력과 변형과의 관계를 Terzaghi 압밀이론 등에서 일반적으로 함수형으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = F(\sigma, U_w) \dots\dots\dots (8)$$

gassy soil의 앞에서 나열한 제요소를 감안하면 개스간극압력이 총응력과 함께 고려되어야 할 것이다. 그러나, 개스간극압을 하나 하나의 개스기포의 조건에 따라 나타내기가 불편하므로 포화도로 대신 이를 나타낼 수 있다.

즉, gassy soil에서 포화도가 100%이면 개스가 없는 상태이고 포화도가 떨어질수록 개스를 많이 보유한 상태가 된다. 그러나, Nageswaran의 연구에 의하면 85% 이하의 포화도를 나타나는 경우에는 압력에 의하여 개스가 연속적으로 배출되는 상태를 나타내게 되고 85% 이상의 포화도에서 독립된 형태의 개스기포로써 흙속에 존재한다고 하였다. 따라서 포화도를 고려하면,

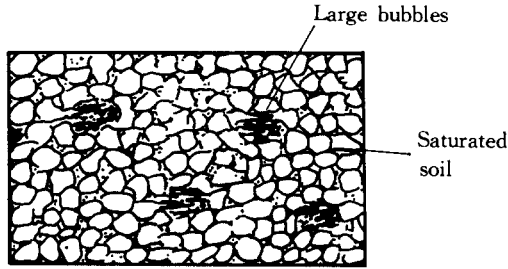
$$e = F(\sigma, U_w, S) \dots\dots\dots (9)$$

로 나타낼 수 있을 것이다.

그런데, 85% 이상 포화도를 갖는 경우에 개스기포는 토립자와 간극사이에 띄엄띄엄 존재하게 되고 따라서, 이들의 전체적인 거동은 완전포화도와 유사하다고 가정한다.

따라서, gassy soil의 포화된 부분의 간극비는 e_S 로써 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있고 이때, 간극비 e 는 gassy soil의 전체적인 값이다.

그러므로, gassy soil에서 간극비와 유효응력과의 관계를 압밀이론으로 나타내면,



Total soil = Saturated soil + Large bubbles

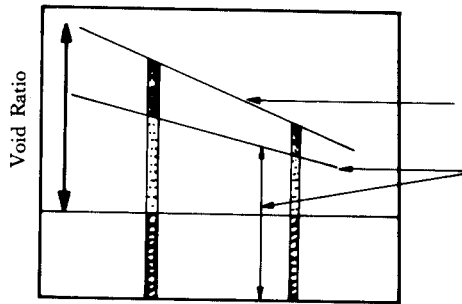


Fig. 11 Idealized gassy soil.

$$eS = e_1 + A \text{Log}_e(\sigma - U_w) \dots\dots\dots (10)$$

이 된다. 따라서, 압밀실험을 행하고 eS 와 $\text{log}_e \sigma'$ 의 곡선을 그림으로써 압밀이론을 적용하는 모델화를 착수할 수 있다.

여기서, A 는 상수이고, e_1 은 단위응력($\sigma - U_w$)에서 간극비를 의미하고 압밀실험에서 구할 수 있다.

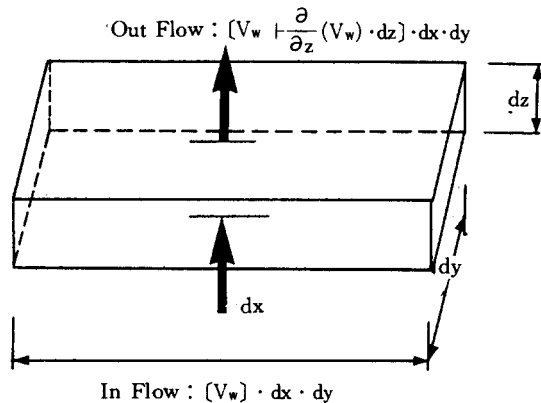


Fig 12. Modelling of water flow in soil.

이상의 검토결과를 중심으로 gassy soil의 압밀방정식을 유도하면 다음과 같다.²⁴⁾

Terzaghi(1944)의 이론에 의하여,

$$V_z dx dy = -\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\partial u_w}{\partial z} dx dy \dots (11)$$

으로 나타낼 수 있고, 요소를 흐르는 순유량은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial V_w}{\partial z} dx dy dz = \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{K}{\gamma} \frac{\partial U_w}{\partial z} \right] dx dy dz \dots\dots\dots (12)$$

또, 물로 채워진 간극의 체적은

$$\left[\frac{S_w \cdot e_t}{1 + e_t} \right] dx dy dz = \left[\frac{e_w}{(1 + e_w + e_g)} \right] \cdot dx dy dz \dots\dots\dots (13)$$

이고, 간극의 체적변화는

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{e_w}{(1 + e_t)} \right] dx dy dz \\ &= \frac{dx dy dz}{(1 + e_t)} \cdot \frac{\partial e_w}{\partial t} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

이다. 여기서, $\frac{dx dy dz}{1 + e_t}$ 는 일정하다고 사료되 토입자의 체적이다.

따라서, 비압축성유체와 토입자의 체적보존의 법칙에 따라

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\partial u_w}{\partial z} \right] dx dy dz \\ &= \frac{dx dy dz}{(1 + e_t)} \cdot \frac{\partial e_w}{\partial t} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

이거나,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\partial u_w}{\partial z} \right] = \frac{(1 + e_w)}{(1 + e_t)} \cdot \\ & \frac{1}{(1 + e_w)} \cdot \frac{\partial e_w}{\partial t} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

이다.

그런데, 실험성과에 의하면 포화된 흙일단의 간극비(matrix void ratio)는 압밀하중 $\sigma' = \sigma - U_w$ 에 따라 결정된다. 따라서,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{\gamma} \frac{\partial u_w}{\partial z} \right] = -\frac{(1 - n_g)}{(1 + e_w)} \cdot \frac{de_w}{d\sigma'} \\ & \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

여기서, $\sigma' = \sigma - U_w$ 이고 $m_v = -\frac{1}{1 + e_w} \cdot$

$$\frac{de_w}{d\sigma'} \dots\dots\dots (18)$$

이므로,

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\partial U_w}{\partial z} \right] = (1-n_g) \cdot m_v \frac{\partial U_w}{\partial t} - (1-n_g) \dots \dots \dots (19)$$

이거나 또는,

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\partial U_w}{\partial z} \right] = m_v^g \frac{\partial U_w}{\partial t} - m_v^g \frac{\partial \sigma}{\partial t} \dots \dots \dots (20)$$

가 성립하여 압밀방정식이 완성된다.

여기서, m_v^g 는 gassy soil에서 체적변형계수이다.

5. 結 論

이상의 연구결과는 본인이 Oxford 대학에 체제 중, gassy soil의 거동에 대하여 공동으로 연구한 성과중에서 그 일부를 정리한 것이다.

gassy soil에 대한 연구는 현장의 흡과 실험실 흡의 차이점, 원위치시험에서 gassy soil의 반응, 적절한 gas체적의 산정, gassy soil의 전단특성, 동하중하에서 gassy soil의 반응 등등 앞으로 해결해야 할 문제가 많이 남아 있다.

본 연구는 이제 초기단계로써 계속 연구가 추진 중에 있으며, 우리나라 남·서해안처럼 유기질이토가 넓게 분포된 지역에서, 각종 정밀하고 매우 중요한 시설물을 설계·시공하는 경우 충분히 고려되어야 할 이론이라 사료된다. 따라서, 본 이론의 도입을 통해 부분 포화토의 거동을 이해하는 하나의 시작이 될 수 있을 것이다.

본 연구의 성과를 간략히 요약하면, 비배수상태에서 gassy soil은 외부 압력에 의해 체적변화를 가져옴을 확인하였으며, 배수상태에서는 총간극비의 변화가 포화된 흙일단의 간극비의 거동과 유사함을 알 수 있었다.

또한, 비배수상태에서 반복하중에 의한 gassy soil의 반응은 작용하중에 따라 gas의 체적, 압력등이 민감하게 영향을 받고 있음을 확인하였고, 초기압력에 따라서 gassy soil의 반응 또한 상이함을 알았다.

감사의 말

본 연구를 위해 각종 지원을 베풀어 주신 Oxford大, Dept. of Engineering Science의 Dr G. C. Sill와 Head Prof. P. Wroth에게 감사드리고 연구재원의 일부를 문교부 해외연수 기금에서 지원 받았음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. Anderson, A.L. and Hampton, L.D. (1980). Acoustics of Gas-Bearing Sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 67, No. 6, pp.1865-1903.
2. Barden, L.(1965). Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays. *Geotechnique*, Vol. 15, No. 3, pp. 267-286.
3. Barrer, R.M.(1978), "Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Series.", Academic Press, London.
4. Biot, M.A.(1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *J. Appl. Phys.*, Vol. 12, pp.155-164.
5. Bishop, A.W.(1959). The Principle of Effective stress. *Tek. Ukeblad*, Vol. 39, pp.859-863.
6. Bishop, A.W. and Henkel, D.J.(1962), "The Measurement of Soil Properties in The Triaxial Test." William Arnold.
7. Bishop, A.W. and Blight, G.E.(1963). Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils. *Geotechnique*, Vol. 13, No.3, pp.177-197.
8. Bishop, A.W. and Donald, I.B.(1961). The Experimental Study of Partly Saturated Soils in the Triaxial Apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Paris, pp.13-21.
9. Chang, C.S. and Duncan, J.M.(1983). Consolidation Analysis for Partly Saturated Clay by Using an Elastic-Plastic Effective Stress-Strain Model. *Int. J. Num. Anal. Methods Geomech.*, Vol. 7, No. 1, pp.39-55.
10. Cryer, C.W.(1963). A Comparison of the Three-Dimensional Consolidation Theories of Biot and Terzaghi. *Quart. J. Mech. and Appl. Math.*, Vol. 16, pp. 401-412.
11. Esrig, M.I and Kirby, R.C.(1977). Implications of Gas Content for Predicting the Stability of Submarine Slopes. *Marine Geotechnology*, Vol. 2, pp.81-100.
12. Fredlund, D.G.(1976). Density and Compressibility Characteristics of Air-Water Mixtures. *Can. Geotech. J.* Vol. 13, pp.386-396.
13. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R.(1976).

- Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils. *Can. Geotech. J.*, Vol. 13, pp. 261-267.
14. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R.(1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Proc. ASCE*, Vol. 103, No. GT5, pp.447-466.
 15. Fredlund, D.G.(1979), "Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils." *Canadian Geotechnical Joul.*, Vol. 16, pp.121-139.
 16. Gardner, T.(1987). The Acoustic Properties of Gassy Soil. D. Phil. Thesis, Oxford University.
 17. Gibson, R.E., England, G.L. and Hussey, M.J.L. (1967). The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays. *Geotechnique*, Vol. 17, pp.261-273.
 18. Jennings, J.E.B. and Burland, J.B.(1962). Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soil. *Geotechnique*, Vol. 12, No. 2, pp. 125-144.
 19. Lee, H.J., Chough, S.K., Jeong, K.S., Han, S.J. (1987). "Geotechnical Properties of Sediment Cores from Southeastern Yellow sea : Effects of Depositional Processes.", *Marine Geotechnology*, Vol. 7, pp.46.
 20. Matyas, E.L and Radhakrishna, H.S.(1968). Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, Vol. 18, No. 4, pp.432-448.
 21. Nageswaran, S.(1983). Effect of Gas Bubbles on the Seabed Behaviour. D. Phil. Thesis, Oxford University.
 22. Sills, G.C. and Austin, G.(1982). Pore Pressure Measurement in a Seabed Containing Gas Bubbles. *Oxford Univ. Dept. Eng. Sci. Report No. SMO 28 / 82.*
 23. Sills, G.C. and Nageswaran, S.(1984). Compressibility of Gassy Soil. *Oceanology Int. Exhib. Conf.*, Brighton, Soc. Underwater Tech., 0. 1. 2. 6.
 24. Thomas, Stephen D.(1988), "The Consolidation Behaviour of Gassy Soil.", D. Phil. Thesis, Oxford University.
 25. Wheeler, S.J.(1986). The Stress-Strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles. D. Phil Thesis, Oxford University.
 26. Whelan, T. III, Coleman, J.M., Roberts, H.H. and Suhayda, J.N.(1976). The Occurrence of Methane in Recent Deltaic Sediments and its Effect on Soil Stability. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, No. 14, pp.55-64.
 27. Wyckoff, R.D. and Botset, H.G.(1936). The Flow of Gas-Liquid Mixtures Through Unconsolidated Sands. *Physics*, Vol. 7.

(접수일자 1989. 11. 11)