

# 붕적층내의 간극수압 반응에 관한 실험적 연구

An Empirical Study on the Characteristics of Pore Water Pressure  
Reaction in Colluvium Model

정 두 영\*1

Jeong, Doo-Young

최 길 렬\*2

Choi, Gil-Ryal

---

---

## Abstract

This work is to study experimentally the measurement of pore air pressure according to rainfall in colluvium model and the characteristics of pore water pressure according to increasement of artesian ground water head.

After modeling a geological feature of the Tertiary formation, the experiment was performed about sixty times on three kinds of soil.

This experimental results showed the variation of pore water and pore air pressures with time, the change of void ratio and applying pressure head in the nonsaturated soil. It can be also expressed by the final pore water and the air reaction ratios and then formularizing the relationship between the permeability coefficient and the void ratio.

In the results of this experiment, the patterns of the pore water pressure reaction are classified by the step-type and the wave-type, and the time-lag to reach final point of pore water pressure is in order sand, sandy silt and clayey sand.

## 요 지

지질구조의 일례를 모형화하여 3종류 시료에 대해 간극수압계를 사용하여, 가압수두와 간극비 변화에 따른 간극수압 변화측정을 60회의 실험을 통하여 실시하였다.

본 연구는 불포화 붕적토층에서 간극비와 가압수두 변화에 따른 간극수압의 변화를 기록하여 최종간극수압  $U_w$ 와 공기간극수압  $U_a$ 를 구하여 이들의 변화를 최종반응률과 공기반응률로 나타냈으며, 시료별로 투수계수와 간극비의 관계를 수식화 하였다. 실험결과 시료에 따라 간극수압

---

\*1 정희원, 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 전북산업대학 토목공학과 부교수

변화 형태가 계단형과 파형으로 나타났으며, 최종간극수압까지의 시간 지체는 모래, 사질실트, 점토질 모래 순이었다.

## 1. 서론

자연사면이나 성토재, 또는 절취면 등에서 발생하는 붕괴의 유인으로 강우, 융설, 지진 등이 거론되고 있으나 강우에 의한 붕괴가 대부분이다.

우수의 지층내 침투로 붕괴토는 자중의 증가, 점착력의 감소, 간극수압증가에 따른 강도의 저하 등으로 전단파괴에 의한 붕괴 현상이 일반적이다.

붕괴에 관한 역학적 해석이나 안전도에 관한 연구는 많이 진행되어있고, 또한 불포화토층의 간극수압에 관한 연구로서 흙의 보수력과 강도의 역학적 관계에 대한 실험적연구도 많이 진행되고 있다.

그러나 붕괴층내의 간극수압 측정은 시추공 설치위치 및 방법의 어려움과 경제성 때문에 연구진전은 적은 편이다.

따라서 현장계측에 앞서 실내 모형실험도 바람직하다고 생각된다.

본 연구에서는 불포화토층에서 강우 침투에 따른 침윤면 형성과정과 간극수압의 반응을 토성별로 모형화하여 실험적으로 관찰한 것이다. 아울러 붕괴토가 사질층인 경우 간극수압의 변화형태에 따라 간극수압의 반응률을 간극비와 투수성의 상관관계로서 정식화 하였다.

## 2. 붕괴면의 형성과 간극수압 발생기구

### 2.1 붕괴면의 형성과정

붕괴지역의 일례로서 지질구조는 지표면으로부터 제1층(붕괴층)과 풍화층인 제2층(강풍화층)과 제3층(파쇄대층), 그리고 제4층(미풍화층) 순으로 형성되어 있다고 볼때, 붕

괴면의 형성의 주유인은 앞에서 언급한 바와 같이 강우침투로서, 자연사면의 균열면이나 파쇄대부위에 침투한 강우는 침윤전선을 수반하면서 침윤면(wetting front)을 형성하고 풍화층내의 피압지하수대에 이른다.

강우가 붕괴층에 침투되는 과정에서 풍화로 인해 연약해진 곳과 파쇄부위에 수막(water film)이 생긴다. 또한 수막면은 선행강우에 의해 파쇄대내의 저류수원으로서도 형성되어지고 이들 저류수원의 발달로 인해 붕괴면이 형성되어진다.

그림 2.1 (a)는 지질구조의 일례이며, 그림 2.1 (b)는 이 지질구조 형태를 모형화한 것이다.<sup>1), 3), 8)</sup>

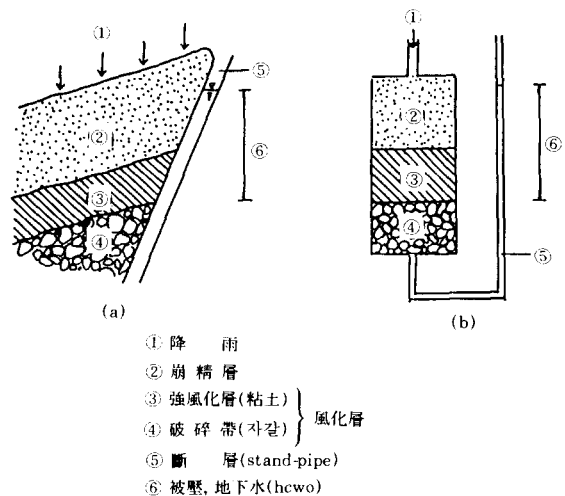


Fig 2.1. 지층단면과 실험 모형도

### 2.2 간극수압의 발생기구

붕괴층내부의 파쇄대나 단층으로 빗물이 침

투하면서 침윤면이 형성되는데 이 침투수는 자유지수로서 강풍화층에 도달하여 피압지하수대에 이른다.

그림 2.2에서 불포화토층내의 간극으로 침투하는 침투수는 간극중의 공기를 압축하면서 하강하는 경우 공기와 더불어 간극수압이 발생하고 침투수는 공기의 압축과 배기의 순환을 반복하면서 하강한다.

이러한 과정을 3단계로 구별하여 나타낸 것이 그림 2.2이다.

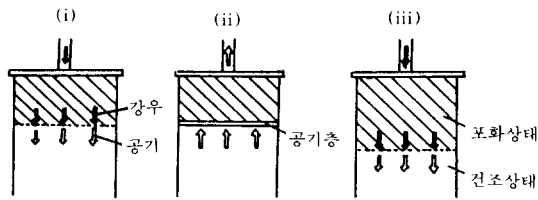


Fig 2.2. 공기간극수압 발생과정

침윤면의 하강에 따라 불포화토층은 포화상태로 되며 흙의 일반적인 물리적 성질( $r_d$ ,  $e$ ,  $n$ )에서 붕적토층의 간극체적  $V_v = n \cdot V$ 이고 포화도  $S_r$ 에서 간극수 체적  $V_w$ 는

$$S_r = V_w / V_v \times 100 = G_s \cdot w / e$$

$$V_w = n \cdot V \cdot G_s \cdot w / 100 \cdot e$$

이 된다. 그리고 공기 체적  $V_a$ 는  $V_a = V_v - V_w$ 이다.

토층에 침투한 침투수에 의해 간극중의 공기를 압축하면서 하강하는 경우, 포화부분의 전체적을  $V_{ws}$ 라 하면 침윤부분의 공기체적  $V_{as}$ 는

$$V_{as} = n \cdot V_{ws} (1 - G_s \cdot w / 100 \cdot e)$$

이 된다.

불포화 층내의 공기체적  $V_a'$ 는  $V_a' = V_a - V_{as}$ 로 감소한다.

측정중 공기 온도가 일정하다고 보고 물에 용해되는 공기를 무시하면 Boil의 법칙에 의해

$$P_c \cdot V_a = p_a \cdot V_a'$$

$$P_a = V_a / V_a' \times P_c = V_a / (V_a - V_{as}) \times P_c$$

로 된다. 여기서  $P_a$ 는 침투한 물에 의해 발생하는 이론공기압이다.  $P_c$ 는 측정시 대기압이고, 실험중 대기압이 1mb 이하의 변화가 있으면 이것을 기준으로

$$P_a' = P_c \left[ \frac{V_a}{V_a - V_{as}} - 1.0 \right] \dots\dots\dots (2.1)$$

이 된다. (2.1) 식은 수두증가로 표시할 수 있고,  $P_c$ 는 측정시 대기압을 수두로 나타내면  $P_c = h_c \cdot \gamma_w$ 와 같으며, (2.1) 식은  $P_a' = P_a - P_c$ 로 대기압과 불포화층내의 이론 공기압과의 차이이다. 침투수에 의해 간극공기를 압축하는 경우, 침투수에는 수압  $P_w (= h_w \cdot \gamma_w)$ 가 가해지지만,  $P_w$ 와  $P_a$ 와의 사이에는 간극공기의 배제 등의 이유로  $P_a < P_w$ 의 관계가 된다.

따라서 침윤면이 간극수압계를 설치한 위치까지 도달하지 않은 상태에서 간극수압계가 나타나는 수압을 공기간극수압  $U_a$ 라 정의하며 이 공기간극수압은 불포화층인 붕적토층내에서 발생하므로 이것을 공기반응률  $R_a$ 로 표시하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = \frac{U_a}{h_w \cdot \gamma_w} \times 100(\%) \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서  $h_w$ 는 가해주는 압력을 수두로 표시한 것으로 가압수두라 정의한다. 또한 강우침투가 붕적토층내의 간극수압에 미치는 영향을 알기위해 가압수두  $h_w$ 와 기록계에 기록된  $U_a$ 의 최종 값을 수두로 표시한 최종간극수압  $U_{wr}$ 과의 비를 최종 반응률  $R$ 이라 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>2), 4), 5), 6)</sup>

$$R = \frac{U_{wr}}{h_w \cdot \gamma_w} \times 100(\%) \dots\dots\dots (2.3)$$

공기 반응률과 최종반응률의 관계는 그림 2.3에서 볼 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험개요

강풍화층내에 침윤면이 생겼을때 침윤과정에서 발생하는 간극수압의 변화는 간극비나 투수계수 등에 따라 다르다.

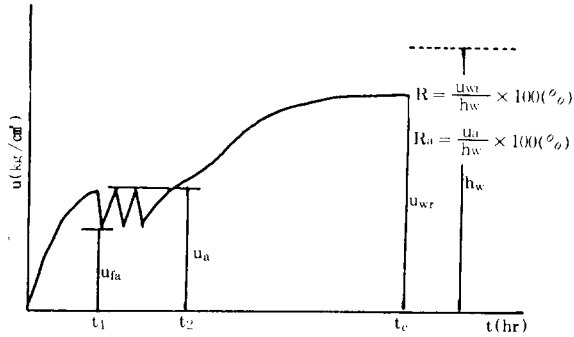


Fig 2.3. 최종반응물과 공기반응물과의 관계

실험 모형은 제3기층 붕괴면의 일레인 지질 형태를 모형화하였고 강우조건은 가압수두를 이용하여 연속강우로 가정하였고, 가압수두가 변화할때 간극비와 투수계수의 변화에 따른 간극수압의 반응특성을 검토하고자 하였다.

### 3.2 실험에 이용한 시료토

본 실험에 이용된 시료는 앞에서 언급된 모형에서, 붕적층은 모래(SW), 점토질 모래(SC), 사질실트(SM)를 사용하였으며 피압지하수대(하부실린더)는 포화상태로하였고, 붕적층은 로건조시켜 상부 실린더에 채우고, 붕적층은 편의상 S-1, S-2, S-3의 기호로 표시하였다. 또한 붕적토의 물리적 성질은 표 3.1과 같고, 연약면(하부 실린더)에 사용한 실트질 점토(CL)의 물리적 성질은 자연함수비,  $w = 35.71\%$ , 비중  $G_s = 2.727$ , 습윤단위중량  $\gamma_t = 1.367 \text{ gf/cm}^3$ , 건조 단위중량  $\gamma_d = 1.007 \text{ gf/cm}^3$ , 투수계수는 시료별로 정수위 투수시험을 하였다. 실험 종료후 점토의 포화도는  $S_r = 59.95\%$ , 간극비  $e = 1.637$  이었다.

### 3.3 실험장치

본 실험장치에 사용된 실험장치는 자연사면의 붕괴형태를 지질구조 형태와 유사하게 제작하였으며 실험장치의 개략도는 그림 3.1과 같다. 그림에서 하부실린더는 자갈과 콘크리트

표 3.1 붕적토로 이용한 사질 흙의 물리적 성질

시료	간극비 e	투수계수 k(cm/sec)	비중 Gs
S-1	0.846	$4.73 \times 10^{-2}$	2.690
	0.723	$1.93 \times 10^{-2}$	
	0.615	$1.24 \times 10^{-2}$	
S-2	1.674	$2.14 \times 10^{-3}$	2.675
	1.448	$1.45 \times 10^{-3}$	
	1.191	$1.67 \times 10^{-4}$	
S-3	1.151	$2.94 \times 10^{-3}$	2.700
	0.972	$1.75 \times 10^{-3}$	
	0.718	$4.45 \times 10^{-4}$	

판을 설치한 상태에서 물을 상부까지 채운 다음 점토를 서서히 침전시킨 후 약 5시간 경과 후 무거운 콘크리트 판으로 압밀시켜 포화시킨 것이다.

사용된 간극수압계는 용량이  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의 KYOWA 제품이며 기록계는 SOKISA 228-1P-500 형을 사용하였다.

투수방법은 하부 저면에 설치한 피압수  $h_{cw}$ 가 점토층 하부에서 피압수압을 가하며, 물탱크 수위  $h_w$ 는 195, 235, 325 cm로 변화시켜 투수하였다. 또한 여기서 얻어진 관계식에 가압수두  $h_w$ 를 변화시켜( $100 \text{ cm} \leq h_w \leq 1000 \text{ cm}$ )대입하여 가압수두 변화에 따른 반응율의 변화를 검토하였다.

## 4. 결과 및 고찰

붕적토내에서 강우침투로 인한 간극수압의 발생과정에 따른 간극수압 반응 특성을 실험적으로 연구하여 자유수 침투에 의한 간극수압 반응특성에 대해 논하고자 한다. 앞서 언급한 바와같이 붕적토의 침투특성은 토층의 밀도, 간극비, 투수계수 등과 관계가 있으므로 붕적토층의 불포화대를 침투하는 침투수의 간극수압을 예측하여, 가압수두와 간극비 변화에 따른 최종반응물과 공기반응물의 변화와 간극비에 따른 투수계수 관계도 검토하였다.

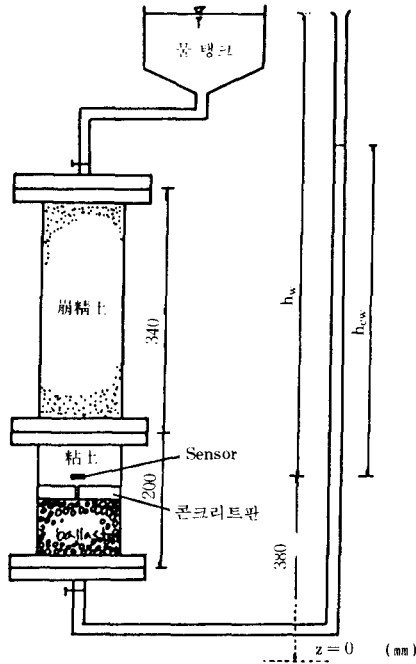


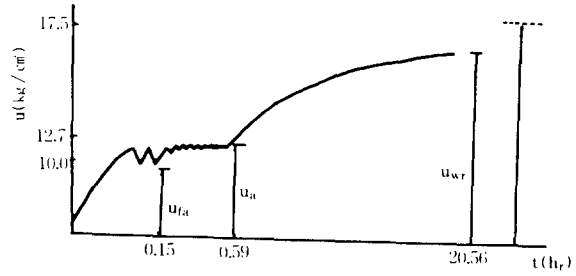
Fig 3.1. 실험 장치 상세도

#### 4.1 간극수압계측과 시간적 변화

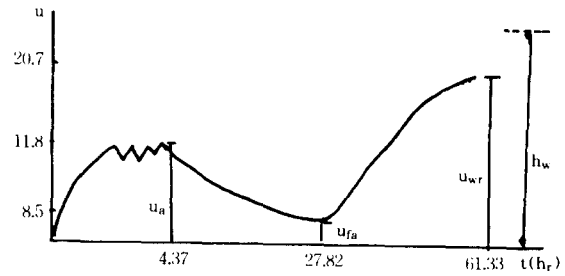
침투수가 붕적토층을 침투하는 과정에서 발생하는 간극수압은 그림 3.1의 장치에서 가압수두를 가하므로써 발생하는 공기간극수압이고, 이들의 변화관계를 형태별로 구분하면 그림 4.1 (a)-(c)와 같다.

측정시 경과 시간을  $t_1, t_2, t_c$ 로 구분하여  $t_1, t_2$ 는 붕적토가 포화되기 전의 경과 시간이며  $t_c$ 는 포화후 최종 간극수압까지의 경과 시간이다. 실험회수는 S-1은 25회 S-2는 20회, S-3는 15회 실험하였다. 그림 4.1에서  $t_1, t_2, t_c$  값은 표 4.1의 경과 시간을 평균하여 나타낸 것이고, 가압수두  $h_w$ 와 간극비는 표 4.1에서 각시료의 중간 값을 표시한 것이다.

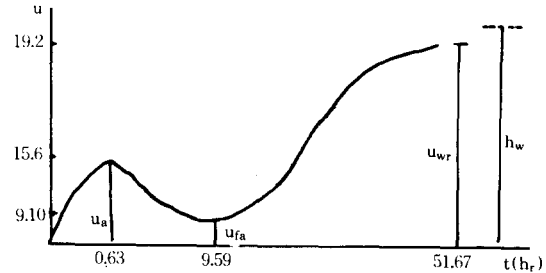
측정결과, S-1의 경우는 가압수두가 가해짐에 따라 초기공기 간극수압은 급격히 상승하고  $t_1-t_2$  사이에서는 일정한 공기 간극수압을 유지한 후 서서히 증가하여 최종간극수압  $U_{wr}$ 에



(a) 계단형(S-1)



(b) 과형 I(S-2)



(c) 과형 II(S-3)

Fig 4.1. 기록계에 나타난 시료별 간극수압 변화

도달하며 경과시간은 평균 20 시간정도 소요되었다. 그림 4.1(a)의  $t_1$ 에서 공기 간극수압  $U_a$ 가 진동상태를 나타내는데 이러한 현상은 공기가 배제 될 때의 충격으로 침투수와 공기의 치환이 빠름을 나타내며 이같은 변화를 계단형(step-type)이라 할 수 있다.

여기서  $U_{fa}$ 는 최소공기간극수압을 나타낸다. S-2의 경우, 그림 4.1(b)에서 초기 공기간극수압은  $t_1$ 에서 서서히 감소하다가  $t_2$ 에서 점

차 상승하여 최종간극수압  $U_{wr}$ 으로 되며 경과 시간은 평균 60시간 정도 소요되었다. 이는  $t_1$ 에서부터 공기간극수압 감소현상이 서서히 나타남은 공기와 침투수의 치환이 늦기 때문이라 생각되며 이러한 변화형태를 파형(wave-type)이라 할 수 있다.

S-3경우, 그림 4.1(c)에서 S-2에 비해 비교적 공기와 물의 치환이 빠르며 공기간극수압의 변화는 S-2와 같은 양상을 보였고, 경과시간은 가압수두와 간극비에 따라 다르나 평균 50 시간정도 소요되었음을 표 4.1로부터 알 수 있다.

이상과 같은 측정결과에서 고찰해보면 S-1은 모래로서 공기배제율이 양호하고 비교적 공기체적이 적으며 투수성이 크므로 공기배제시 심한 진동상의 움직임을 나타냈다고 볼 수 있으며, S-2의 경우는 점토질 모래로서 S-1과는 달리 공기배제가 시간적으로 매우 길며 투수성도 낮아 공기배제시 약간의 진동을 보이고

S-3은 사질실트로서 공기배제가 S-2에 비해 약간 빠르고 공기 간극수압 변화는 S-2와 거의 같았다.

따라서 간극수압의 시간적 변화는 흙의 물리적 성질에 따라 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. Sweeney<sup>6)</sup> 등은 홍콩의 잔적층 사면에 대한 연구에서 강우시 지하수위 상승으로 인한 간극수압의 변화와 강도와와의 관계를 검토한바 있고 TAMADA<sup>5)</sup> 등은 피압수두가 작용하는 점토층에 간극수압계를 설치한 실험연구에서 간극수압과 시간지체(time-lag)의 반응특성을 검토한 바 있다.

#### 4.2 간극비와 반응률관계

앞절에서 측정한 간극수압을 시료, 가압수두, 시료의 체적, 간극비, 간극률, 단위중량, 공기체적, 공기간극수압 등을 정리하여 종합한 결과를 간략히 정리하면 표 4.1과 같이 된다.

표 4.1 시료별 실험 결과

시 료	가압수두 $h_w$ (cm)	간 극 비 $e$	최종간극수압 $U_{wr}$	최종반응률 $R(\%)$	경과시간(hr)		
					$t_1$	$t_2$	$t_c$
S-1	195.0	0.606	124.42	63.81	0.25	1.19	24.15
		0.723	157.80	80.92			
		0.825	290.72	86.88			
	235.0	0.621	175.41	74.64	0.15	0.59	20.56
		0.723	193.61	82.39			
		0.856	206.36	87.81			
	325.0	0.616	257.65	79.28	0.29	0.82	20.04
		0.723	284.65	87.58			
		0.859	290.72	89.45			
S-2	195.0	1.191	134.71	69.08	2.75	17.33	73.70
		1.448	173.68	89.07			
		1.674	161.40	82.77			
	235.0	1.100	178.77	76.07	4.37	27.82	61.33
		1.365	224.09	95.36			
		1.656	206.73	87.97			
	325.0	1.128	254.17	78.21	2.21	13.71	43.06
		1.391	258.83	79.64			
		1.635	301.19	92.67			

S-3	195.0	0.720	153.86	78.90	1.28	28.68	69.75
		0.958	158.71	81.39			
		1.121	175.41	89.95			
	235.0	0.715	154.47	65.73	0.63	9.59	51.67
		0.958	192.70	82.00			
		1.150	208.79	88.85			
	325.0	0.720	245.81	75.63	1.15	2.10	41.88
		0.999	282.23	86.84			
		1.183	285.26	87.77			

#### 4.2.1 간극비와 최종반응률

표 4.1에서 최종반응률 R과 간극비 e와의 관계를 정리하면 식 (4.1)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\log R = \log A_e + N_e \log e$$

$$R = A_w \cdot e^{N_e} \dots\dots\dots(4.1)$$

윗식에서 계수  $A_e$ , 지수  $N_e$ 를 시료별로 정리하면 표 4.2와 같이 되었다.

표 4.2 최종반응률을 구하기 위한 계수와 지수

시 료	가압수두 h <sub>w</sub> (cm)	계 수 A <sub>e</sub>	지 수 N <sub>e</sub>	상관계수
S-1	195.0	108.17	1.019	0.953
	235.0	95.62	0.504	0.976
	325.0	95.74	0.360	0.863
S-2	195.0	65.19	0.574	0.563
	235.0	76.98	0.369	0.434
	325.0	72.54	0.440	0.770
S-3	195.0	85.26	0.273	0.803
	235.0	82.36	0.646	0.983
	325.0	84.65	0.316	0.925

이상의 결과에서 보면 S-1 및 S-3은 상관관계가 좋으나 S-2는 비교적 낮다. 그 이유로서는 S-2의 간극비가  $1.1 \leq e \leq 1.7$ 이고, 침윤면이 하강해도 간극 공기가 불규칙적으로 잔류하며 봉입공기가 형성되기 때문이라 생각된다.

가압수두  $h_w$ 와  $A_e$ ,  $N_e$ 와의 관계를 식 (4.2),

식 (4.3)으로 나타내면 표 4.2에서와 같이  $A_e$ ,  $N_e$ 는 가압수두  $h_w$ 가 증가함에 따라 모두 감소함을 알 수 있다.

$$A_e = A_{zs} \cdot h_w^{-nzs} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$N_e = A_{ns} \cdot h_w^{-nns} \dots\dots\dots(4.3)$$

반응률과 간극비, 가압수두의 관계를 알기위해 윗식을 식(4.1)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$R = A_{zs} \cdot h_w^{-nzs} \cdot e^{(A_{ns} \cdot h_w^{-nns})} \dots\dots\dots(4.4)$$

#### 1) S-1의 간극비 가압수두 및 반응률관계

모래는 표 4.1에서 간극비가 크게되면 반응률도 거의 크게 되는데 이것은 공기간극이 커지면 투수계수가 커지고 공기배제가 용이하기 때문에 잔류공기량이 적게되어 간극수압이 상승하기 때문이라 생각된다.

식(4.4)에 S-1에 대한 계수와 지수를 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = 318.4 h_w^{-0.21} \cdot e^{23019 h_w^{1.93}} \dots\dots\dots(4.5)$$

식(4.5)에 가압수두의 영향을 좀더 알아보기 위해  $100 \text{ cm} \leq h_w \leq 1000 \text{ cm}$ ,  $0.4 \leq e \leq 1.0$ 의 각수치를 변화시켜 이들의 관계를 그림으로 나타낸 것이 그림 4.2이다.

이상의 결과에서 간극비의 실험 범위는  $0.6 \leq e \leq 0.9$ 이지만 이 범위에서 계산된 반응률과 실험치는 거의 일치함을 볼 수 있으며,  $e=1.0$ 에서는 가압수두가 낮을 때 반응률은 큰 값을 나타냈으나 가압수두가 클때는 그 값이 작아졌다. 표 4.1에서  $0.4 \leq e \leq 0.8$  범위를 보면, 가압

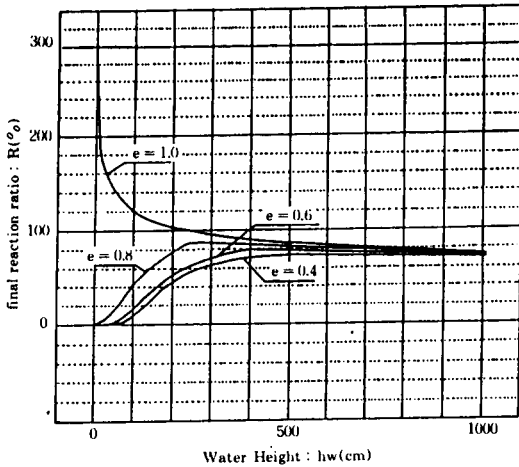


Fig 4.2. S-1의 최종 반응률과 가압수두관계

수두 증가에 따라 반응률도 증가하며  $e=0.4$  일때는  $h_w=600$  cm에서 최대반응률을 보였다.  $e=0.6$  일때는  $h_w=400$  cm,  $e=0.8$  일때는  $h_w=300$  cm 일때 각각 최대반응률을 보여 간극비가 클수록 작은 가압수두에서 최대반응률을 보였다. 이는 모래의 특성을 잘 반영한 것으로 초기부터 가압수에 의해 이미 포화상태가 됨을 나타낸다고 볼 수 있다. 그림 4.2에서 간극비  $0.4 \leq e \leq 0.8$  에서 반응률은 가압수두 증가에 따라 증대한 후  $R_{max}$ 에 도달하고, 그 후 서서히 감소하였다. 그러나  $e=1.0$ 에서 계속 감소 경향을 보인 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 간극비가 크면 공기배제가 쉽기 때문에 낮은 가압수두에서 높은 반응률을 보인다고 생각된다.

## 2) S-2의 간극비, 가압수두 및 반응률 관계

S-2에서는 간극비가 증가함에 따라 반응률도 같이 증가하는 경향이 있으며 실험결과에 의하면  $A_e$ ,  $N_e$ 와 가압수두와의 관계는 식(4.2), 식(4.3), 식(4.4)와 같으나 이들의 상관관계는 비교적 낮아 실험적으로 사용하기는 곤란하나 일반적 경향을 알기위해 반응률과 간극비, 가압수두의 관계식을 구하면 식(4.6)과 같다.

$$R = 28.7 h_w^{0.17} \cdot e^{4.2 h_w^{-0.4}} \dots\dots\dots (4.6)$$

상기식에  $100 \text{ cm} \leq h_w \leq 1000 \text{ cm}$ ,  $1.0 \leq e \leq 1.6$ 의 각 수치를 대입하여 정리하면 그림 4.3과 같이 나타낼 수 있다.

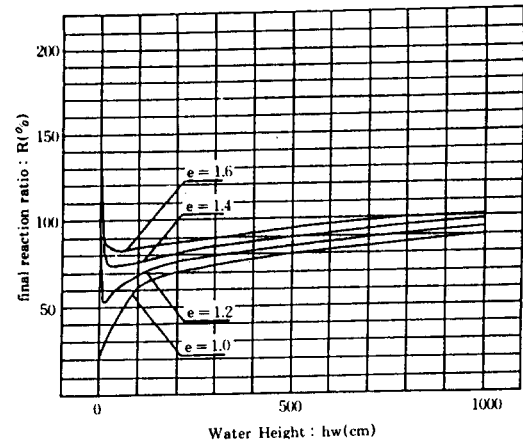


Fig 4.3. S-2의 최종 반응률과 가압수두관계

위의 경우,  $1.2 \leq e \leq 1.6$ ,  $195 \text{ cm} \leq h_w \leq 325 \text{ cm}$  범위에서 실험하였지만 식(4.6)에 의하면  $h_w=195$  cm에서 계산치가 실험치보다 큰 반응을 보이거나 비교적 일치하며, S-2보다 간극비가 큰 흙에 대해서는 일반적으로 반응률과 간극비, 가압수두와의 관계는 더 많은 실험적 자료가 필요하다고 생각된다.

## 3) S-3의 간극비, 가압수두 및 반응률 관계

같은 방법으로 S-3 시료에 대해 실험한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$R = 85.4 h_w^{-2.875} \times 10^{-3} \cdot e^{0.36 h_w^{9.86 \times 10^{-3}}} \dots\dots\dots (4.7)$$

식(4.7)에  $100 \text{ cm} \leq h_w \leq 1000 \text{ cm}$ ,  $0.6 \leq e \leq 1.2$ 의 조건으로 각 수치를 대입하여 정리하면 그림 4.4와 같이 된다.

S-3에서는  $0.7 \leq e \leq 1.2$  범위에서 실험하였으나 표 4.1과 그림 4.4에서 보면, 간극비가 작은 시료에서 계산치가 실측치를 상회하고  $e \geq 1.0$ 의 경우는 거의 일치하였다. 이것은 S-2과



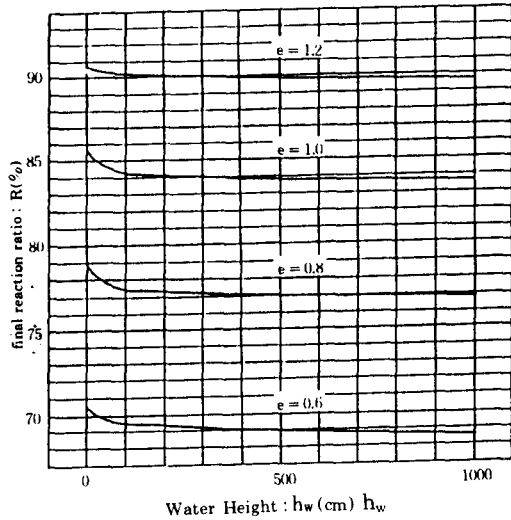


Fig 4.4. S-3의 최종 반응률과 가압수두관계

같이 간극비가 작을때는 시료중에 공기 박층이 발생하여 수압상승을 일시적으로 방해하는 것으로 생각되며 반응률은 간극비에 비례하여 증가하나 가압수두에 대해서는 반비례하고 그 변화는 극히 작아 거의 일정하다고 볼 수 있다. TAMADA<sup>5)</sup>는 간극비가 증대하면 반응률도 증가하고 반응율은 붕괴도의 물리적 성질과 침윤면 하강상태에 따라 달라짐을 언급하였고, Wang<sup>9)</sup> 등도 간극비와 침투특성에 대한 관계를 제시한 바 있다.

#### 4.2.2 간극비와 공기 반응률

간극비와 공기반응률  $R_a$ 에 대한 관계는 앞에서 언급한 이론식으로부터 표 4.3과 같이 되며 이들의 관계를 식을 나타내면 다음과 같다.

$$\log R_a = \log A_a + N_a \log e \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

$$R_a = A_a \cdot e^{N_a} \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

윗식에서  $A_a$ ,  $N_a$ 를 시료별로 정리하면 표 4.4와 같다.

표 4.4에서 상관관계를 보면 S-2 및 S-3에 대해서는 식(4.9)가 적용되기 어렵다. 이것은 침윤면의 하강이 일정하지 않아 공기배제가 불규칙적으로 행하여 진 것으로 추측된다. 따

라서 S-1의  $h_w \leq 235\text{cm}$ 에 대해서 상관관계가 비교적 잘 성립되므로 식(4.9)를 적용시켜 보기로한다. 실험결과에 의하면  $195\text{cm} \leq h_w \leq 235\text{cm}$ 에 대해  $R_a$ ,  $e$   $h_w$ 와의 관계식은

$$R = 1.46h_w^{0.73} \cdot e^{1.59 \times 10^{-4} \cdot h_w^{1.6}} \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

이 된다.  $0.6 \leq e \leq 0.8$ ,  $195\text{cm} \leq h_w \leq 235\text{cm}$  범위에서  $R_a$ 와 간극비는 비례 관계를 보였고,  $h_w \geq 235\text{cm}$ 를 경계로  $R_a - e$  관계를 구별할 필요가 있다고 본다.

표 4.3 시료별 간극비와 공기반응률 관계

시료	가압수두 $h_w(\text{cm})$	간극비 $e$	공기간극수압 $U_a(\text{cm})$	공기반응률 $R_a(\%)$
S-1	195.0	0.606	101.66	52.13
		0.723	110.77	56.81
		0.825	166.91	62.25
	235.0	0.621	127.15	54.11
		0.723	150.22	63.92
		0.856	162.66	69.22
	325.5	0.616	185.42	57.05
		0.723	189.97	58.45
		0.859	166.91	51.36
S-2	195.0	1.191	114.38	58.66
		1.448	130.47	66.91
		1.674	107.18	54.56
	235.0	1.100	127.09	54.08
		1.365	132.17	56.24
		1.656	118.61	50.47
	325.5	1.128	219.86	67.65
		1.391	160.55	49.40
		1.635	164.36	50.57
S-3	195.0	0.720	118.35	60.69
		0.958	115.32	59.14
		1.121	103.18	52.91
	235.0	0.715	118.35	50.36
		0.958	156.29	66.51
		1.150	135.95	57.85
	325.5	0.720	215.46	66.30
		0.999	218.61	57.26
		1.183	209.39	64.43

표 4.4 공기반응률을 구하기 위한 계수와 지수

시료	가압수두 h <sub>w</sub> (cm)	계수 A <sub>e</sub>	지수 N <sub>e</sub>	상관계수
S-1	195.0	65.060	0.5703	0.990
	235.0	79.163	0.7619	0.947
	325.0	50.100	-0.322	0.604
S-2	195.0	63.115	-0.145	0.060
	235.0	56.244	-0.162	0.366
	325.0	71.494	-0.719	0.757
S-3	195.0	56.100	-0.283	0.861
	235.0	59.515	0.353	0.371
	325.0	65.831	-0.044	0.255

표 4.5 투수계수를 구하기 위한 계수와 지수

시료	계수(A <sub>k</sub> )	지수(N <sub>k</sub> )
S-1	8.800 × 10 <sup>-2</sup>	4.191
S-2	0.376 × 10 <sup>-3</sup>	3.455
S-3	1.773 × 10 <sup>-3</sup>	4.062

식(4.12)로 부터 간극비는

$$e = A_k^{N_k} \cdot k^{\frac{1}{N_k}} \dots \dots \dots (4.13)$$

이 되고 식(4.1)과 식(4.9)에 윗식을 대입하면

$$R = A_e \cdot (A_k^{N_k} \cdot k^{\frac{1}{N_k}})^{N_e} \dots \dots \dots (4.14)$$

$$Ra = Na \cdot (A_k^{N_k} \cdot k^{\frac{1}{N_k}})^{Na} \dots \dots \dots (4.15)$$

이 되어 반응률과 투수계수 관계를 유도할 수 있다. 이상과 같이 사질토에서 간극비와 투수계수가 비교적 크므로 지층을 흐르는 투수량은 Darcy 법칙에 의존하고 물이 흐르는 곳은 간극부분이므로 투수계수는 반응률에 큰 영향을 준다. Sweeney<sup>6)</sup>, Sugden<sup>7)</sup> 등은 지층의 투수계수를 간극비와 입도조성 등의 조건으로 투수시험을 실시하여 이들의 상호 관계를 설명하였으며, 간극이 클 때 투수계수도 이에 상응하여 최종반응률과 공기 반응률도 간극비에 비례함을 입증한 바 있다.

### 4.3 투수계수와 반응률 관계

투수계수와 간극비 관계를 알기위해 간극비를 각 시료별로 변화시켜 측정된 결과는 표 3.1과 같으며 이들의 관계를 나타낸 것이 그림 4.5이다.

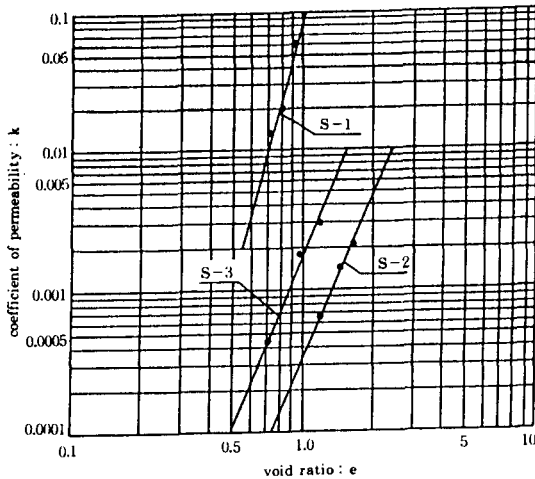


Fig 4.5. 시료별 간극비와 투수계수와 관계

이들 관계로 부터

$$\log k = \log A_k + N_k \log e \dots \dots \dots (4.11)$$

$$k = A_k \cdot e^{N_k} \dots \dots \dots (4.12)$$

와 같이 되며 여기서 A<sub>k</sub>, N<sub>k</sub>에 대해 정리하면 표 4.5와 같이 된다.

## 5. 결 론

모형 실험에서 봉적토층내에 간극수압 계측 결과 간극비와 가압수두에 따른 간극수압 반응을 요약하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 봉적층이 모래인 경우 시간적 변화에 따른 간극수압의 변화 형태는 계단형(step-type)으로 나타났으나 점토질 모래 및 사질실트의 경우는 파형(wave-type)으로 나타났고 간극수압 반응에서 가압수두 및 간극비 변화에 따라 시가 지체(time-lag)는 모래가 가장 짧고 사질실트, 점토질 모래순으로 되었다.
- 2) 봉적토층의 간극비가 크면 상대적으로 최종

반응률과 공기 반응율이 증대하고  $R = A_e \cdot e^{N_e}$ ,  $R_a = A_a \cdot e^{N_a}$ 와 같이 간극비와 반응률관계를 정식화 할 수 있으며 이들의 관계는 불포화토층에서 침투수와 흡수공기의 치환관계를 의미한다.

3) 붕적토층이 모래나 사질실트의 경우 투수계수와 간극비의 관계를  $k = A_k \cdot e^{N_k}$ 와 같이 정식화 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 鄭斗永, 崔吉烈, 李廣俊, (1990), "崩積土의 風化도가 自然斜면의 進行性 崩壞에 미치는 影響" 全北大學校 論文集, 제 32輯, pp. 197-200
2. 西 恒 誠, 楠見和紀, (昭和 62年 12月), "不飽和土의 有交應力의 吟味", 不飽和土의 工學的 性質 研究의 現象 シンポジウム, 土質 工學會, pp. 55-58
3. Tamada Bungo and Fukuda Junji(1989), "The variation of pore water pressure on the landslide slip surface due to seepage of rain", Journal of Japan Landslide Society, 26-3, 19-27
4. Tamada Bungo(1990), "Relation between caprock and landslide", Technical Reports of the Geotechnical Research Institute, Nishinipon Institute of Technology, No.6, April, pp.1-17
5. Tamada Bungo, Fukuda Junji, Okinaga Hiroshi(1986), "The Reaction characteristics of a Piezometer Sets on the Landslide Surface", Technical Reports of the Geotechnical Research Institrte, Nishinipon Institute of Technology, No.2, March, pp.1-12
6. Sweeney, D.J. and Robertson, P.K(1982), "Slope Stability in Residual Soils in Hong Kong", Can Geotech Vol.19, p.521-525
7. Sugden, M.B.(1977), "Slip Failures in Bedded Sediments", IX-ICSMFE 2, 3/29, pp. 155-160
8. Chowdhury, R.N.(1978), "Slope Analysis", elsevier scientifi Publishing company, pp. 8-29
9. Wang Sijing,(1981), "On The Mechanism and Process of Slope Deformation in an Open Pit Mine", Rock Mechanics 13, pp. 145-156

(접수일자 1991. 11. 20)