

피압지하수에 의한 자연사면 연약층내의 간극수압 반응에 관한 모형 실험 연구

A Laboratory Model Study on the Reactions of the Pore Water Pressure in the Weakened Layer of a Natural Slope by the Confined Groundwater

정두영* · 이광준**

Jeong, Doo Young · Lee, Kwang Joon

Abstract

One of the major elements of a natural landslide is the increase of the pore water pressure in a weakened layer. Therefore, the measurement of the pore water pressure in the layer is important. This work is a laboratory model study of the measurement of the pore water pressure with regard to the confined groundwater level, the permeability of the crack zone and the weathering degree of the weakened layer. By the model of the Tertiary period failure type and the Colluvium failure type, the reactions of the pore air pressure and the pore water pressure were measured in the weakened layer according to the permeability of the filter on the condition of the confined groundwater states. On the reaction phase of the pore pressure according to the during time, the Tertiary period failure type proved to be a step type and the Colluvium failure type turned out to be a wave type. The reaction ratios of the pore water pressure in the Tertiary period failure type are higher than the Colluvium failure type, decrease according to increasing of the weathering degree of the weakened layer.

요 지

자연사면 붕괴의 주요인의 하나는 연약층에서의 간극수압 상승이다. 따라서 이 연약층내의 간극수압 계측이 중요하다. 본 연구는 피압지하수위, 풍화압반 파쇄대의 투수성 그리고 연약층의 풍화정도를 고려한 간극수압 계측의 실내모형 실험이다. 제3기층 붕괴형과 붕괴성 붕괴형의 모형으로 피압지하수 상태에서 filter의 투수성에 따른 연약층내에서의 간극공기압 및 간극수압의 반응을 측정하였다. 간극압의 반응양상에 있어서 제3기층 붕괴형은 시간 변화에 따라 반응양상이 계단형(step type)으로 나타났고 붕괴성 붕괴형은 파형(wave type)으로 나타났다. 간극수압 반응율은 제3기층 붕괴형이 붕괴성 붕괴형보다 크며, 연약층의 풍화도의 증가에 따라 간극수압 반응율은 감소하였다.

* 정회원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과, 교수

** 정회원 · 전북대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

1. 서론

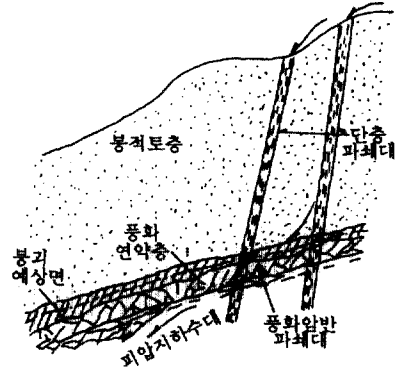
자연사면 붕괴의 가장 큰 원인은 주로 강우로 인한 사면내 붕괴 예상면의 간극수압 상승을 들 수 있으며 지질, 지형 등 자연적인 상태 또는 절토 등 인위적인 문제도 사면 붕괴의 요인이 되고 있다. 강우량 증가에 따른 자유지하수 또는 피압지하수의 상승이 사면 붕괴에 크게 기여하고 있음은 일반적인 연구의 결과이다.

피압지하수의 상승을 고려하는 경우 절리 또는 단층 구열면을 통한 강우 침투로 인하여 파쇄대내에 형성된 피압지하수위가 상승하여 붕괴 예상면인 연약면 즉 점토화된 강풍화층 내의 간극수압을 증가시킨다. 이로 인해 지층내 유효응력이 감소하여 흙의 전단강도 저하를 초래하며 붕괴에 이른다. 이때문에 지반 파쇄대내의 피압지하수위의 측정과 연약면내의 간극수압 계측이 사면붕괴의 실체를 파악하는데 중요한 요소이다. 강우로 인한 사면내의 연직침투에 대한 간극수압 계측에 관한 연구가 많이 실시되어 오고 있으나 본 연구는 자연사면에서 절리 또는 단층 파쇄대를 통한 강우 침투시 생기는 피압지하수의 상승으로 인해 사면내 붕괴예상면인 연약층에서 발생하는 간극 공기압과 간극수압의 반응 양상을 모형 실험을 통해 검토한 것이다.^(1,2) 붕괴 예상지에서의 현장계측이 장비 및 경제성 등으로 어렵기 때문에 실내 모형 실험을 선행한 것으로서, 특히 피압지하수가 형성되는 풍화암반 파쇄대층의 여러 형태를 투수계수가 각각 다른 filter로 적용하여 규명해 보고자 한다. 모형실험에서 filter의 투수계수별로 측정된 간극수압의 반응 양상은 실제 현장 계측시 비교되는 자료가 되리라 본다.

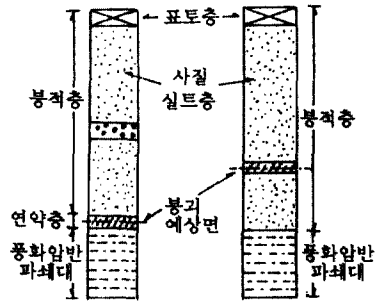
2. 지질구조 및 간극수압 발생 기구

2.1 붕괴면의 지질구조

자연사면 붕괴는 주로 붕적토층의 강우 침투, 지하수의 형성 등과 밀접한 관계를 가지고 있다는 것이 일반적이다. 또한 Skempton⁽³⁾은 자연 사면의 붕괴 재해를 실용적인 형태로 크게 나누어 崩落(Fall), 崩壞(Slide), 流動(Flow) 등으로 분류하고 지질구조나 지형상의 조건도 붕괴형태에 따라 간접적인 요인으로 지적하고 있다.



a) 지질 단면의 모식도



제3기층 붕괴형태 붕괴성 붕괴형태

b) 붕괴형태에 따른 지질주상 모식도

그림 1. 지질단면의 모식도.

靑木 등⁽⁴⁾은 지질구조상 붕괴면의 형성에 있어서 그림 1에서와 같이 붕괴예상면이 형성되는 위치에 따라서 第3紀層 붕괴형과 崩壞性 붕괴형으로 분류하고 있는데, 第3紀層 붕괴형(Tertiary period failure type)은 花崗岩質岩의 풍화특성으로 발달한 것으로서 지질柱狀으로 볼 때 지표면으로부터 崩積層(퇴적층 또는 잔적층), 연약층(強風化層, heavy weathered layer), 풍화암반 파쇄대층 등의 지층 단면상을 보이며 붕괴 예상면은 붕적층과 풍화암반 파쇄대 사이의 강풍화된 연약층(점토화층)에서 존재하고 있다. 이때 被壓地下水⁽¹⁾은 파쇄대(또는 단층 파쇄대)등을 통한 강우의 침투로 형성되는 경우가 많으며, 외국의 경우 이 형태에 속하는 것중 70% 정도의 붕괴 활동면은 붕적토와 그 바로 아래있는 제3기층 강풍화층과의 경계면에 있다고 보고한 바

있다. 또한 붕괴성 붕괴형(Colluvium failure type)은 變成岩質岩의 풍화특성으로 발달한 것으로서 지질 柱狀으로 볼 때 지표면으로부터 붕적층(퇴적층 또는 잔적층), 풍화암반 파쇄대층등의 지층 단면상을 보이며 붕괴면 예상면인 연약면은 붕적층 내부에 존재하고 있다. 중생대의 화강 편암질암의 풍화잔적층의 붕괴는 거의 붕괴성 붕괴형에 속하며 대체로 지하수는 풍화암반 파쇄대에서 형성되어지는 것이 일반화로 되어 있다.⁽⁵⁾

일반적인 붕괴면의 지질단면의 모식도와 붕괴형태에 따른 지질주상 모식도는 다음 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.^(1,4)

2.2 지하수위 형성과 간극수압 발생 기구

호우기의 집중호우나 연속강우 또는 다량의 선행강우로 인하여 토층으로 침투하는 강우는 지층의 파쇄대와 같은 투수성이 양호한 층을 통하여 지하수대를 형성한다. 지표면으로부터 붕적토층으로 직접 침투하여 발생하는 지하수를 “자유 지하수”라 하고 절리 또는 단층파쇄대를 통해서 풍화암반 파쇄대 부근에서 발생하는 지하수를 “피압 지하수”라 한다.^(6,7,8,9) 이러한 피압지하수는 難透水性인 연약층 하부에 있는 풍화암반 파쇄대에서 지류된 지하수이다. 신윤식⁽¹⁰⁾은 산사태 다발지역으로 알려져 있는 일본은 boring에 의한 조사를 해보면 90% 이상이 피압지하수 상태를 지니고 있다고 제시하였다.

집중 호우시 발달된 피압지하수가 붕괴층이라 할 수 있는 강풍화 연약층까지 상승하여 도달하는 과정에서 불포화토층의 간극 공기를 압축함으로써 발생하는 공기압을 “間隙 空氣壓(pore air pressure)”이라 한다.^(2,11,12) 이러한 간극 공기압의 작용과정은 -i) 피압지하수에 의한 침투수의 상승 -ii) 공기압의 발생 -iii) 공기 배출 등과 같은 작용이 침투수가 연약층에 도달될 때까지 반복하게 된다. 또한 이러한 과정을 거치면서 침투수가 연약면에 도달하여 형성된 수압을 “간극 수압(pore water pressure)”이라 한다. 따라서 불포화 토층의 간극 공기압은 피압지하수의 상승으로 인해 소멸되면서 간극수압으로 발전한다고 한다.⁽²⁾ 간극공기압은 불포화 토층에서 포화토층으로 발전하는 과정에서 형성되는 것으로 균열면이나 파쇄대 부근의 투수성의 크기, 연약면의 풍화정도(입도분포상태의 차이), 선행강우에 의한

초기 체적함수비 또는 피압지하수의 상승고 등에 의해 좌우되게 된다.^(13,14) 玉田 등⁽²⁾은 간극공기압의 발생에 대한 이론적인 관계를 모형 실험을 통해 보고한 바 있으며 침투수가 상승하는 과정에서 발생하는 간극수압은 간극 공기압을 내포하고 있다고 지적하였다.

본 연구에서 언급하고자 하는 간극압에 대한 과정은 피압지하수에 따른 것이므로 파쇄대에서 형성되어진 피압지하수가 간극수압계를 설치한 연약층의 위치까지 도달하는 과정에서 불포화토층의 간극공기압축으로 인해 연약층내의 간극수압계가 나타내는 값을 간극공기수두로 표시하여 h_a 라 하고 이때 풍화암반 파쇄대에서 주어지는 피압지하수두를 h_{cw} 라 하면, 연약층 내부에서 발생하는 간극공기수두를 주어진 피압지하수두에 대한 백분율로 나타내어 간극공기압 반응을 R_a 로 표시하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = \frac{h_a}{h_{cw}} \times 100(\%)$$

피압지하수위 h_{cw} 는 강풍화된 연약층의 난투수성으로 인해서 일정한 수두를 가진 지하수이므로 간극수압의 측정대상어되는 연약층 하단면을 기준선으로하여 피압지하수위의 값으로 정하였다. 이러한 피압지하수는 강우침투 초기에는 파쇄대로부터 형성되어지고 점점 상승하여 수두상으로 볼 때 연약층보다 높은 수두를 지닌 상태로 유지된다. 또한 상승 침투된 피압지하수가 연약면내에 직접 도달하여 간극수압계에 최종적으로 나타내는 값을 최종간극수두 h_w 라 하고 이때 풍화암반 파쇄대에서 주어지는 피압지하수두와 간극수압계에 나타나는 최종간극수두와의 비를 백분율로 표시하여 간극수압 반응을 R_w 로 표시하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_w = \frac{h_w}{h_{cw}} \times 100(\%)$$

여기서 사용되어지는 간극압의 단위는 기록계에 나타내는 수압의 값을 실제로 간극수압계에 주어지는 정수위 수두값과 대비시켜서 정수위 상태의 수두의 단위(water head)로 환산하여 사용하기로 한다. 따라서 간극수압과 간극수두는 정수두상으로 볼 때 같은 값을 나타내는 것이므로 두 용어를 같은 의미로

사용기로 한며 간극공기압도 간극수압계에서 반응하는 값이므로 수압(수두)의 단위를 취하기로 한다.

2.3 간극 수압계측의 모형화

본 실험은 제3기층 붕괴형과 붕괴성 붕괴형의 지질구조를 모형화하여 연약층의 풍화정도와 파쇄대의 투수계수에 따른 피압지하수 침투에 의한 간극공기압과 간극수압 등의 변화특성을 검토하기로 한다.^(4,15) 따라서, 간극수압의 계측에 관한 모형화를 다음과 같이 가정하여 실험하기로 하고 한다.

1) 실험 장치는 그림 1의 지질구조의 주상과 같이 모형화 하였으며 강우에 의해 지층의 단층파쇄대를 통하여 풍화암반 파쇄대에 침투수가 도달하여 피압지하수가 형성된다고 본다. 풍화암반 파쇄대의 투수성은 투수계수가 각각다른 filter를 사용하고 이러한 파쇄대에서 피압지하수위가 형성된 조건에서 연약층 내의 간극수압을 모형 실험장치를 통해 계측한다.^(1,2)

2) 모형 실험에서 사용된 시료의 함수비나 단위 체적 중량은 시료 채취시의 자연 상태 범위를 유지시켜 주었으며, 간극수압 계측대상인 연약층의 시료는 풍화 정도에 따라 구분하였다.

3. 시료 및 실험

3.1 사용된 시료토의 물리적 성질 및 풍화도

본 실험에 이용한 시료는 그림 1과 유사한 지층 형상을 하고있는 지역(전주시 동부 우회도로 공사 지역)의 절삭지대에서 채취하였으며, 시료를 채취한 지역은 중생대 화강편암질암의 분포지역으로서 붕괴 형태상 붕괴성 붕괴형을 띠고 있지만 제3기층 모형 실험의 연약층으로 적용한 시료는 절삭지대중 풍화암반 파쇄대 상부에 풍화가 상당히 진행되어 연약

화된 층에서 채취하여 연약층 시료로 사용하였다. 실험에 사용된 각 시료토의 입도 및 물리적 성질은 그림 2 및 표 1과 같다. 여기서 붕괴 예상면인 연약층은 풍화 정도에 따라 W-1, W-2로, 붕적층은 S-1 시료로 구분하였다.

W-1, W-2 시료는 절삭지대중 풍화암반 파쇄대중 바로 위층에서 형성된 풍화로 인해 연약화된 시료이며 입도조성 상태로 분류하여 채취하였으며 S-1 시료는 절삭지대 표층부에서 채취하였다. 연약층시료 W-2는, W-1 시료보다 입도분포상 풍화되어가는 단계로 보고 모형실험에 적용하였다.

또한, 모형 실험에 이용한 시료토의 풍화정도를 파악하기 위하여 화학조성을 분석하여 풍화의 진행에 관한 지수적 표현으로 화학적 풍화지수(CWI: Chemical Weathering Index)를 백분율로 표시한 것으로 다음과 같다.^(16,17)

$$CWI = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(+)}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + H_2O(-) + CaO + K_2O + FeO + MgO + SiO_2} \times 100(\%)$$

시료토의 화학조성 및 풍화도는 다음 표 2와 같다. 여기서 H₂O(+), H₂O(-)는 시료토의 흡착 및 결정수이고, Ig-loss는 시료토의 유기물 함량을 강열감량

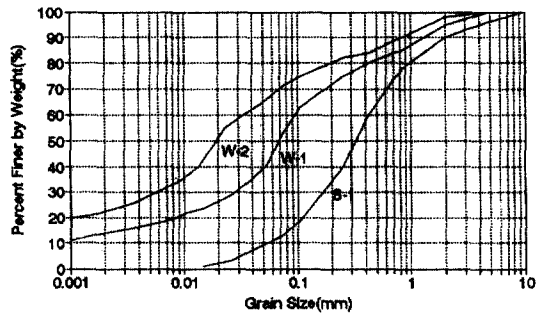


그림 2. 시료토의 입도 분포 곡선.

표 1. 시료토의 물리적 성질

시료종류	시험항목	비중	건조단위중량 (t/m ³)	함수비 (%)	투수계수 (cm/sec)	액성한계 (%)	소성한계 (%)
대 상	W-1	2.64	1.56	19.8	9.29 × 10 ⁻⁴	26.20	19.10
	연약층 W-2	2.67	1.57	20.2	4.45 × 10 ⁻⁵	39.10	24.60
붕적층	S-1	2.64	1.54	15.2	3.51 × 10 ⁻³	NP	NP

표 2. 시료토의 화학조성 및 풍화도

시료	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	H ₂ O (+)	H ₂ O (-)	SUM	Ig-loss	CWI
W-1	59.10	12.70	6.19	0.08	0.11	13.9	3.0	0.63	0.82	0.23	0.53	2.7	4.1	104.09	3.8	22.38
W-2	58.60	21.50	6.70	0.32	0.32	0.30	1.80	2.62	tr	0.07	0.77	7.0	2.1	102.1	7.0	36.1
S-1	76.00	13.20	1.83	0.17	1.74	0.30	0.60	4.07	tr	0.07	0.22	1.8	1.1	101.10	1.5	17.35

시험으로 측정된 값이다. 위 그림 2와 같이 W-1, W-2 시료토의 입도분포는 대체로 사질점토(SC)로서 점토함유량이 각각 18%, 29% 정도이며, X-선 분석 결과 주점토광물은 kaolinite이다. 화학적 풍화지수는 각각 22%, 36% 정도로 나타났다.

3.2 실험장치 및 방법

3.2.1 실험장치

본 실험에 이용한 모형장치는 연직 침투시험장치로서⁽¹²⁾ 다음 그림 3과 같으며 제 3기층 붕괴형태와 붕괴성 붕괴형태로 크게 구분하였다. 지질구조 형태에서 편의상 제 3기층 붕괴 형태를 Type A, 붕괴성 붕괴 형태를 Type B로 칭하여 사용하기로 한다. Type A와 Type B 모형 실험 장치의 주요 구성은 피압 지하수위부(수위 tank), 파쇄대부(filter), 간극수압 측정 대상인 연약층, 그리고 간극수압 기록장치 등 4개 계통으로 구성되어 있다. 간극수압 측정 대상인 연약층의 위치는 Type A와 Type B가 상이하다. 간극공기압 발생을 명확히 보기 위하여 Type A 모형에서는 풍화암반 파쇄대의 공극상태를 재현하기 위해서 투수계수가 0.8 cm/sec 정도의 다공질 판(pore stone)을 filter 위에 설치하였고, Type B 모형에서는 S-1 시료를 삽입하였다. 모형장치는 아크릴 원통을 사용하여 토층에서 침투하는 상황을 외부에서 관측할 수 있게 하였으며 붕적토부, 연약층부, 필터부를 각각 분리할 수 있게 flange 이음으로 제작하였다. 피압지하수의 상승은 미동승강 장치를 제작하여 filter 위치에서부터 상승시켜 연약층을 기준으로해서 일정한 피압지하수위가 되도록 유지시켰다.

특히 풍화암반 파쇄대층의 투수성은 파쇄대의 입도, 간극비 등의 인자에 의해 크게 좌우되므로 간극율, 입경 등이 규격화되어 있는 다공질판 형상의 filter로 대체해서 쓰기로 한다.

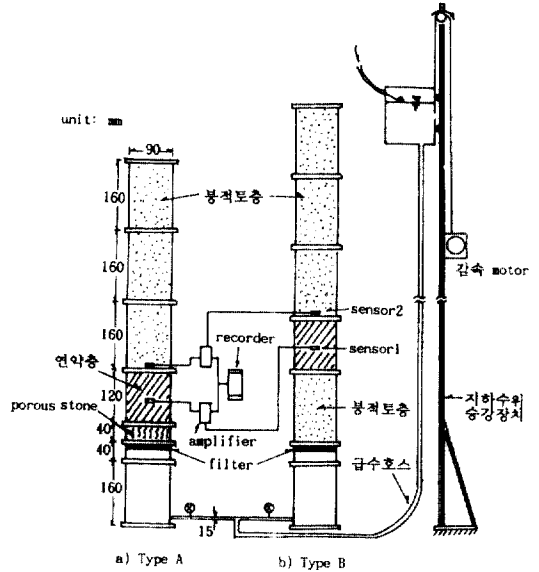


그림 3. 실험장치의 상세도.

본 실험에서는 지질주상층 피압지하수를 형성하는 풍화암반 파쇄대의 투수 상태를 투수계수별로 구분하여 실험하기 위하여 투수계수가 각각 다른 독일제(WITEG사) glass filter를 사용하였으며 각 filter의 제원은 다음 표 3과 같다.

3.2.2 실험방법

그림 3과 같은 침투시험 장치에서 하단에 연결된 지하수위 tank로부터 피압지하수가 filter를 거쳐 상승 침투하도록 설정한 수두까지 상승시킨다. 이는 강우로 인해 단층 파쇄대를 통해 풍화암반 파쇄대에 형성되는 피압지하수의 상태를 재현하기 위한 방법이다. 피압지하수가 가해지면 filter를 거쳐 토층으로 상승하고 결국 시간이 경과함에 따라 비교적 難透水性 상태인 연약층에 도달하게 된다.

Type A, Type B의 붕적토층인 S-1 시료를 각 실험마다 일정한 단위체적 중량과 함수비로 유지시

표 3. 사용된 filter의 제원

필터 구분 항 목	P0	P1	P2	P3	P4
두께(mm)	7.2	8.3	7.0	6.7	6.3
직경(mm)	90	89	90	90	90
투수계수(cm/sec)	0.329	1.52×10^{-2}	3.5×10^{-3}	6.5×10^{-4}	5.85×10^{-5}

키기 위하여 한번 실험에 사용된 붕적토층의 시료는 함수비가 약 15%~16% 정도가 될 때까지 진공 펌프를 사용하여 시료중의 간극수만을 제거시켜 사용하였다. 또 피압지하수가 연약층과 아크릴 원통의 내벽 사이에서 새는것을 방지하기 위하여 시료를 다짐하는 아크릴 원통 내벽에 4 mm 두께의 띠 모양 요철을 붙여 사용하였고 filter는 실리콘을 사용하여 아크릴 원통과의 사이를 물이 새지않도록 접착시켰다. 실험진행은 모형을 Type A와 Type B로 구분하고, 연약층은 W-1, W-2의 2개 종류, 풍화암반 파쇄대에 주어지는 피압지하수위는 실험에 사용된 간극수압계의 capacity 범위에 있는 3가지(hcw=120 cm, 90 cm, 60 cm)로 조절하였으며 풍화암반 파쇄대의 투수상태를 나타내는 filter는 5개(P0, P1, P2, P3, P4)로 구분하여 총 60개의 경우에 대하여 실험을 실시하였다.

피압지하수위 hcw는 연약층 하단을 기준하여 설정된 값이고 피압지하수위 Tank는 filter 위치에서부터 출발하여 설정된 수두까지 상승시켰다. 본 모형 실험에 사용된 간극수압계는 PM-s(ST제품, 0.1 kg/cm², d=12 mm, t=6 mm)로서 소형의 모델시험용 sensor이고, Indicator는 BS-300 형식의 Strain meter, recorder는 hybrid type(HR-100N)을 사용하였다. 특히 sensor는 소형이기 때문에 시료를 다짐할 때 생기는 충격이나 토압의 영향을 최소화하여 순수한 간극수압만을 측정하기 위해 투수성이 양호한 보호 cap을 씌워 사용하였다. sensor 1은 연약층 내부에 설치한 간극수압계이고 sensor 2는 침투수가 연약층을 통과하였는지를 확인하기 위하여 붕적토층(S-1)의 하단에 설치한 간극수압계이다.

기록계에서 나타낸 값을 실제로 주어지는 수두로 환산하기 위한 방법으로 높이 100 cm의 아크릴 실린더를 사용하여 간극수압계를 실린더 저면에 놓고 간극수압계 상단을 기준으로 수위를 상승시켜가며

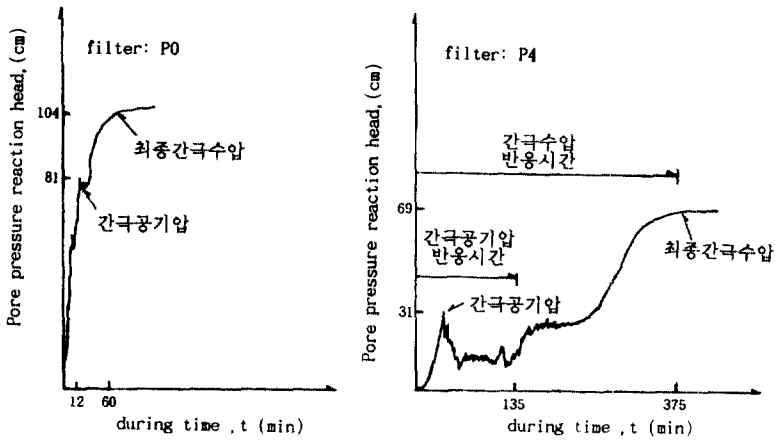
기록계의 반응치를 기록 검증하였다. 따라서 기록계에 나타내는 값과 간극수압계에 주어지는 실제의 수두를 대비시켜서 간극수압을 정수위 상태의 수두의 단위(water head)로 환산하여 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

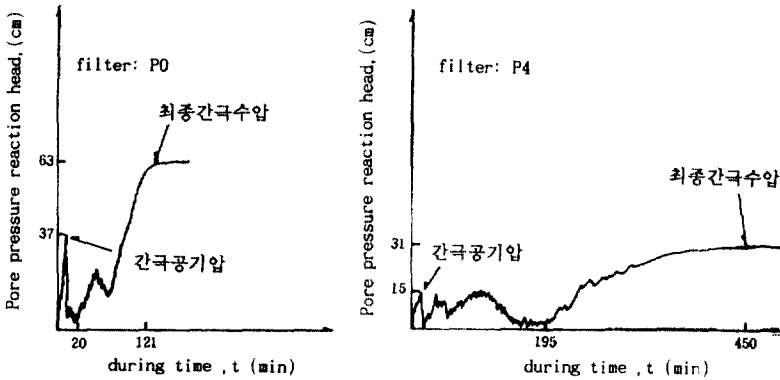
4.1 간극 공기압 및 간극수압 반응 양상

제3기층 붕괴형과 붕괴성 붕괴형 모형실험에서 투수성이 각각 다른 filter를 통해 피압지하수위가 상승했을 때 filter의 투수성이 연약층 내부에서 발생하는 간극 공기압(ha) 및 간극수압(hw)에 어떤 영향을 미치는지를 중점적으로 측정하여 간극압 반응 양상을 검토하였다. 다음 그림 4는 측정된 간극수압 반응의 대표적인 형태이다.

그림 4에서 볼 때 filter를 통한 피압지하수가 상승하면 연약층내에 설치된 간극수압계 sensor 1에 간극공기압이 peak 형태로 증가하는 양상을 보이다가 감소하면서 피압 지하수에 의한 침윤과 토층의 간극 공기의 배제 등의 반복작용으로 미소하게 진동하는 파형을 나타내게 된다. 이러한 파형이 계속되다가 침윤선이 상승하여 연약층에 직접 도달하게 되면 간극수압계는 시간경과에 따라 상승하다가 일정한 값을 나타내는 양상을 띠게 된다. 연약층에 도달한 침투수는 상부 붕적층으로 소량으로 침투되지만 연약층이 난투수성 상태이기 때문에 침투수가 상부 붕적층에 설치된 간극수압계 sensor 2에 도달한 후에도 sensor 1의 간극수압은 일정한 값을 지속적으로 나타내게 된다. Type A 모형실험에서는 연약층 바로 아래층이 파쇄대층이기 때문에 투수계수가 큰 필터 P0에서는 간극공기압의 반응이 일시적으로 크게 나타난 후 줄어들었다가 간극수압으로 발전되고 반응시간도 짧았으나, 투수 계수가 작은 필터 P4로 갈수록 간극공기압 peak는 P0에 비해서



a) Type A 형 모형의 경우



b) Type B 형 모형의 경우

그림 4. 간극수압 반응형태

작으나 반응시간이 길고 진동하는 양상이 지속적으로 나타나고 있다. 또한 Type B 모형 실험에서는 Type A보다 간극 공기압이나 최종간극수두가 대체로 적은 값으로 나타났으나 반응시간들은 공히 더 길게 나타나고 있으며 Type A에 비해서 간극공기압이 더 큰 폭으로 감소하다가 간극수압으로 발전하는 양상을 보이고 있는데 이는 연약층 바로 아래 토층의 수분 보수능의 영향으로 보여진다.

대체적으로 Type A는 계단형(step type)으로 반응하였고 Type B는 파형(wave type)으로 반응함을 볼 수 있었다. 玉田 등^(1,18)도 Cap Rock 조건에서 봉적토층의 상부 가압실험에서 침윤면의 하강의 경우 연약면 내에서의 간극수압의 반응양상이 Wave type, Peak type, Step type으로 나타났다고 제시한 바 있다. Cap rock의 가압에 의한 간극수압 반응 양상과

피압지하수에 의한 반응양상이 전체적인 type으로는 유사하나 피압지하수에 의한 실험에서 간극공기압의 발생 빈도수가 더 크다. 이는 Cap rock의 경우보다 토층에서의 공기배제 현상이 원활했기 때문이라고 생각 된다.

4.2 filter의 투수성에 따른 간극공기압 및 간극수압 반응 특성

본 모형실험에서 5개의 투수계수별 filter와 3개의 피압지하수위를 적용하여 최종간극수압이 발생할 때까지 침투시켰을 때 연약층 내부에서의 간극수압의 생성 및 변화 과정을 보았고 간극 공기압은 각 실험에서 공기압 반응을 나타내는 값중에서 가장 크게 기록되어지는 값을 간극공기수두(ha)로 취하였으며 간극수압은 간극수압 발생후 시간이 경과하

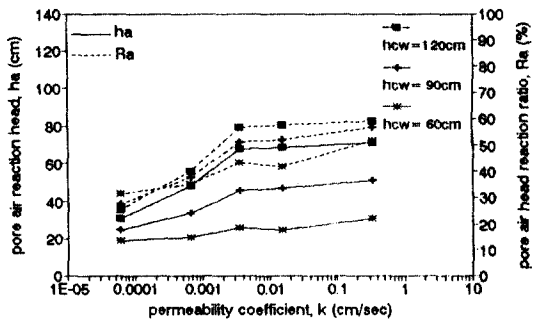


그림 5. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극공기압 반응수두(ha) 및 반응률(Ra)(W-1 시료).

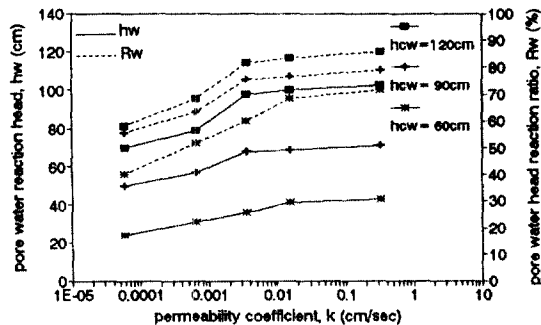


그림 7. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 반응률(Rw)(W-1 시료).

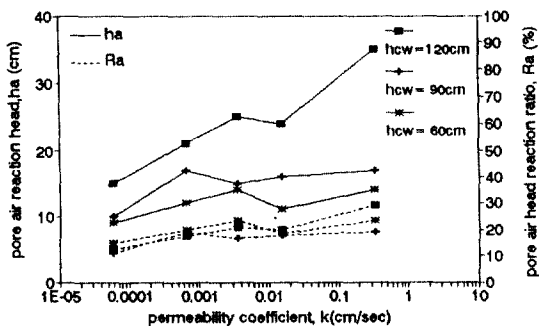


그림 6. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극공기압 반응수두(ha) 및 반응률(Ra)(W-1 시료).

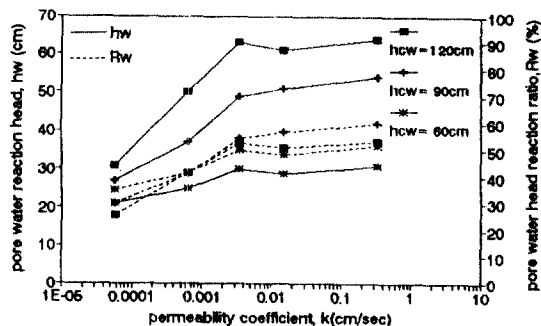


그림 8. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 반응률(Rw)(W-1 시료).

여도 기록계가 일정한 값을 나타내는 최종 간극수두 (hw)를 나타내고 있다. 각 시료에 대한 간극공기압 반응율(Ra)과 간극수압의 반응율(Rw)의 비교는 최대반응율을 나타내는 filter P0에서의 값을 기준으로 하여 다음과 같이 시료별로 검토하였다.

4.2.1 W-1 시료의 경우

1) 간극공기압 반응 특성

W-1 시료에서 Type A, Type B형 모형에서 filter의 투수계수 특성에 따른 간극공기압의 반응수두 (ha) 및 그의 반응율(Ra)은 각각 다음 그림 5, 그림 6과 같다.

위 그림에서와 같이 filter의 투수계수 증가에 따른 간극공기압 반응율(Ra)은 Type A에서는 비교적 규칙적으로 증가하는 양상을 보이며 최대 반응율은 가장 투수성이 좋은 filter P0에서 53%~60%의 반응율을 나타냈고 Type B는 투수성이 낮은 filter P

4~P3 사이에서는 투수계수 증가에 따라 규칙성 있게 증가되는 양상을 보이나 P3~P0 사이에서는 약간 불규칙적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 최대반응율(Ra)은 P0에서 18%~29%의 범위이다. 대체로 Type B에 비해서 Type A가 보편적으로 큰 값을 보이고 있다. filter의 투수성의 증가에 따라 불규칙적인 양상을 보이고 있는 것은 압축되는 간극공기가 단속적이고 불규칙하게 배제되는 현상으로 본다. 玉田 등(2,18)은 간극공기압 반응율(Ra)과 간극비와의 사이를 Cap Rock의 모형의 가압식 연직 침투실험을 통해 검토한 결과 간극비가 큰 시료에 대해서는 전면침윤인 경우 최대 83%, 측면 침윤인 경우 최소 16%가 반응하였다고 했으며 불포화토층에서 간극공기압이 발생하기 위해서는 지질구조와 강우강도와의 사이에 특별한 관계가 있다고 제시하

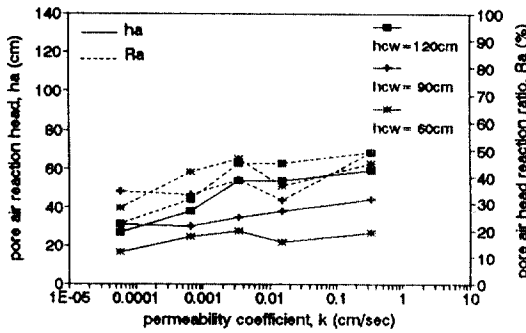


그림 9. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극공기압 반응수두(ha) 및 반응률(Ra)(W-2 시료).

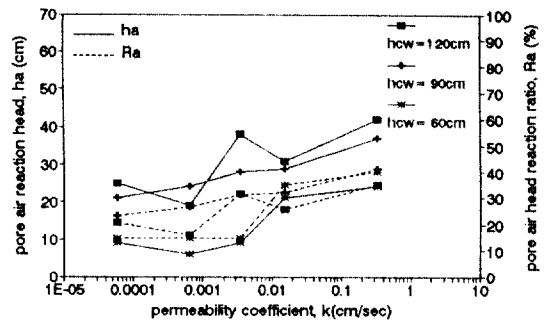


그림 10. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극공기압 반응수두(ha) 및 반응률(Ra)(W-2 시료).

었다. 본 실험의 Type A는 전면 침윤시의 반응형태를 보이며 Type B는 측면 침윤시의 반응형태를 보이고 있다.

2) 간극수압 반응 특성

W-1 시료에서 Type A, Type B 모형에 대한 filter의 투수계수 증가에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 그 반응율(Rw)은 각각 다음 그림 7, 그림 8과 같다.

그림에서와 같이 Type A에서는 P4~P2 사이의 투수계수에서는 간극수압 반응율(Rw)은 대체적으로 완만히 상승하여 증가하다가 P2~P0 사이에서는 거의 일정한 값을 보이며 최대반응율은 P0에서 70%~87% 정도이다. Type B에서는 P4~P2 사이에서는 비례적으로 반응율이 커지다가 P2~P0 사이에서는 거의 변동폭이 적게되며 P0에서의 반응율은 52%~60% 정도이다. filter의 투수계수 증가에 따른 간극수압 반응율은 filter P2를 경계로 해서 이보다 큰 투수계수의 filter에서는 반응율이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었다. Type A는 붕괴 예상면인 연약층이 파쇄대에 인접하게 존재하고 있는 반면 Type B는 Type A에 비해서 연약면이 filter로부터 떨어져 있어 피압지하수에 대한 반응이 적게 마친다고 보며 반응율이 클수록 붕괴발생 예상이 상대적으로 커진다고 본다. 丸山⁽¹⁹⁾은 파쇄대의 투수성의 양호한 정도가 간극수압의 변동 type에 영향을 미치며 간극수압의 변동량이 붕괴면의 이동량에 영향을 미치는 관계를 지적하였다.

4.2.2 W-2 시료의 경우

1) 간극공기압 반응 특성

W-2 시료에서 Type A, Type B형 모형에 대한 filter의 투수계수 특성에 따른 간극공기압의 반응수두(ha) 및 그 반응율(Ra)은 각각 다음 그림 9, 그림 10과 같다.

위 그림에서 보면 간극공기압 반응율 Ra는 Type A에서는 전체적으로 반응율의 진폭이 크고 불규칙적으로 증가하며 최대 공기압 반응율은 P0 filter에서 45%~50% 정도이고 반면 Type B는 피압지하수 증가와 투수계수의 증가에 따라 비례적으로 Ra도 증가하지만 P0에서의 공기압 반응율은 33%~40% 정도로서 Type A에 비해 비교적 적다.

2) 간극수압 반응 특성

W-2 시료에서 Type A, Type B형 모형에 대한 filter의 투수계수 증가에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 그 반응율(Rw)은 각각 다음 그림 11, 그림 12와 같다.

위 그림에서 보면 간극수압 반응율 Rw는 Type A에서는 투수계수 증가에 따라 P3를 경계로 해서 비교적 급격히 상승하는 현상을 보이며 P0에서의 반응율 값은 62%~72% 정도로 나타났으며 Type B에서는 투수계수 증가에 따라 비교적 비례적으로 증가하며 P0에서의 Rw는 38%~58% 정도이다. 역시 간극수압 반응율 Rw도 Type A에서 더 크게 반응하고 있음을 알 수 있다. filter의 투수계수 증가에 따른 간극수압 반응율은 filter P2를 경계로 해서 이보다 큰 투수계수의 filter에서는 반응율이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었다. W-1 시료도와 W-2 시료도에 대한 전체적인 결과에서 W-1 시료, W-2 시료 공히 Type A가 Type B에 비해서 간극

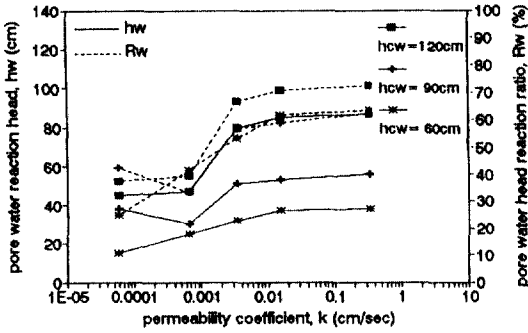


그림 11. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 반응률(Rw)(W-2 시료).

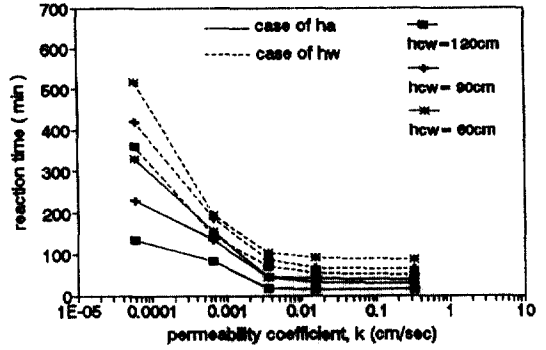


그림 13. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응시간(W-1 시료).

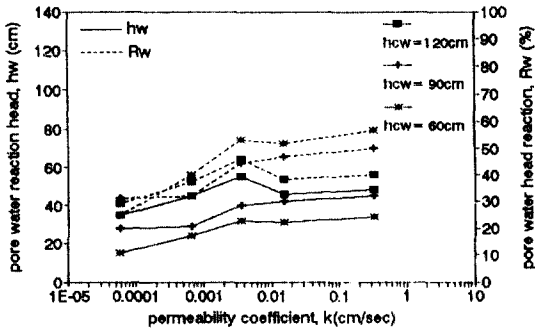


그림 12. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응수두(hw) 및 반응률(Rw) (W-2 시료).

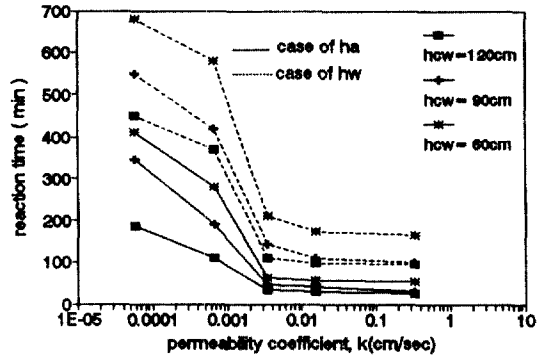


그림 14. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극수압 반응시간(W-1 시료).

공기압 반응율(R_a)과 간극수압의 반응율(R_w)이 더 큰 값을 보이고 있다. 그리고 각각의 모형 Type에서 볼때 간극공기압의 반응율(R_a)은 항상 간극수압 반응율(R_w)보다 작은 값으로 나타나고 있다. R_a 를 W-1 시료와 W-2 시료로 비교해서 보면 Type A에서는 W-1 시료의 반응이 크고 Type B에서는 W-2 시료에서 반응이 크다. 이는 Type A에서는 파쇄대에서 올라오는 간극공기의 배제가 W-2보다 W-1이 더 좋았기 때문이고 Type B에서는 S-1시료 위에 설치된 연약층의 난투수성의 효과로 인한 S-1 시료내의 간극공기 구속에 의해 W-2 시료에서 더 큰 값을 보이고 있다. 또 R_w 를 W-1 시료와 W-2 시료별로 비교해보면 Type A Type B 공히 W-1 시료가 W-2 시료보다 간극수압 반응율(R_w)이 크게 나타났다. 이는 연약층내의 점토 함유량이 클수록 간극수압의 전달이 적게 됨을 알 수 있었다. 또한 Type A에서는

Type B에 비해 연약층이 filter에 가깝게 있기 때문에 Type A가 Type B에 비해 간극수압 반응율(R_w)이 크게 나타났으며 또 W-1 시료보다 W-2 시료가 투수성이 작기 때문에 filter에서 올라오는 피압지하수에 의한 간극수의 유지상황이 더욱 양호한 W-1 시료에서 더 큰 값을 보이고 있다. Type B에서도 연약층이 난투수성일수록 피압지하수의 상승 속도가 느려지기 때문에 W-2 시료에 비해 투수성이 조금더 양호한 W-1 시료에서 더 큰 값을 보이고 있다. 따라서, 사질점토로 구성된 연약층내에서 제3기층 붕괴형(Type A)에서의 최대 간극공기압 반응율(R_a)은 대략 45%~60% 범위이고 최대 간극수압 반응율(R_w)은 62%~87% 범위이며, 붕괴성 붕괴형(Type B)의 최대간극공기압 반응율은 18%~40% 범위이고 최대간극수압 반응율은 38%~60%로 나타났다. 대체로 제3기층 붕괴형의 간극수압 반응율이

붕괴성 붕괴형의 간극수압 반응율보다 크게 나타났다. 또한 filter P2의 투수계수 3.5×10^{-3} cm/sec 이상의 투수계수를 가진 filter에서의 반응율은 큰 차이를 보이지 않고 있다.

4.3 파쇄대의 투수성과 간극압 반응시간 특성

4.3.1 W-1 시료의 경우

W-1 시료에서 Type A와 Type B 모형에 대한 filter 투수계수 증가에 따른 간극공기압 반응시간과 최종간극수압의 반응시간은 다음 그림 13, 그림 14와 같다.

위 그림에서 주어진 피압지하수위 상에서 볼 때 Type A의 경우 P0~P2의 범위에서 간극수압 반응시간은 큰 변동없이 대략 60분~108분 사이로 나타났으며 투수계수가 작은 P4에서의 간극수압 반응시간은 375분~515분 정도로 길어졌다. 이때 P0~P2의 범위에서 간극수압 반응시간과 간극공기압 반응시간과의 간격이 그리 크지 않다. Type B의 경우에는 P0~P2 사이에서 간극수압 반응시간은 대략 121분~211분 사이로 나타났으며 투수계수가 작은 P4 범위에서의 간극수압 반응시간은 상당히 길어지는 양상을 보이며 대략 455분~690분 정도의 반응시간을 보였다. 특히 Type B에서는 각 filter에서 간극공기압 반응시간과 간극수압 반응시간이 큰 시간차를 보이고 있다. 대체로 Type A에 비해 Type B의 반응 시간이 길어짐을 알 수 있고 filter의 투수계수가 약 3.5×10^{-3} cm/sec 이상에서는 반응시간이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었다.

4.3.2 W-2 시료의 경우

W-2 시료에서 Type A와 Type B 모형에 대한 filter 투수계수 증가에 따른 간극공기압 반응시간과 최종간극수압의 반응시간은 다음 그림 15, 그림 16과 같다.

위 그림에서 주어진 피압지하수위 상에서 볼 때 Type A의 경우 P0~P2의 범위에서는 간극수압 반응시간은 투수계수의 증가에 따라 큰 변동이 없이 대략 65분~190분 정도로 나타났으며 투수계수가 작은 P4에서는 간극수압 반응시간이 315분~645분 정도로 길어졌다. 이때 P0~P2의 범위에서 간극수압 반응시간과 간극공기압 반응시간과의 간격이 그리 크지 않다. Type B에서 P0~P2 사이에서의 간극수압 반응시간은 185분~465분 정도이며 투수계수

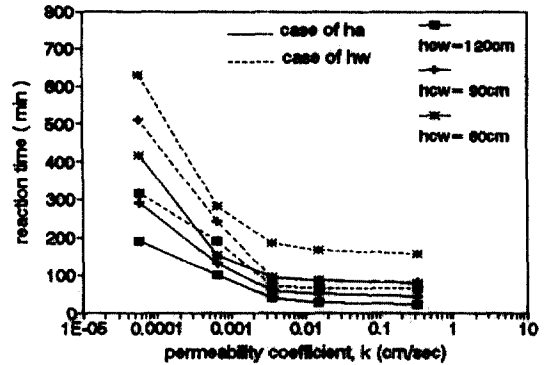


그림 15. Type A 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극압 반응시간(W-2 시료).

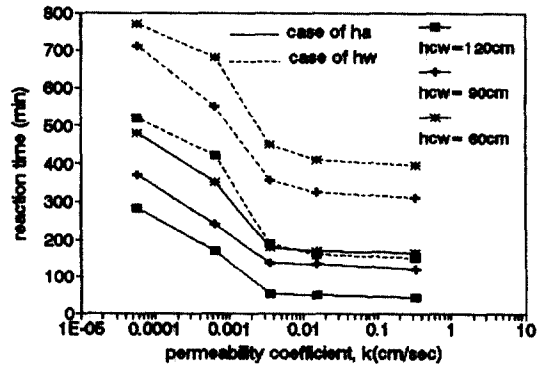


그림 16. Type B 모형에서의 filter 투수계수에 따른 간극압 반응시간(W-2 시료).

가 작은 P4 범위에서 515분~780분 정도로 길어졌으며, 각 filter에서 볼 때 간극공기압 반응시간과 간극수압 반응시간의 간격이 큰 폭을 유지하게 된다.

대체로 제 3기층 붕괴형(Type A)에서는 filter의 투수계수 변화에 따라 간극공기압과 간극수압 반응시간의 차이가 그리크지 않으나 붕괴성 붕괴형(Type B)에서는 두 반응시간의 차가 큰 폭으로 나타났으며, 대체로 filter의 투수계수가 약 3.5×10^{-3} cm/sec 이상에서는 반응시간이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

자연사면 붕괴 발생의 원인의 하나로서 붕괴면내의 간극수압 작용을 들 수 있다. 풍화암반 파쇄대의 투수계수 측정은 boring을 통한 지하수 양수법등으

로 측정되는 경우가 많으며 피압지하수의 발생 및 상승시 지층내 파쇄대의 투수계수가 연약층내에서 발생하는 간극수압의 반응에 어느정도 영향을 미치는지 예측하는 것이 사면 붕괴 대책을 강구하는데 필요로 할 것으로 본다. 간극공기압은 간극수압 발생의 전단계에서 발생한 현상으로 사면붕괴에 있어서 큰 영향은 없지만 본 연구에서는 피압지하수위의 상승시 제3기층 붕괴형 및 붕괴성 붕괴형 모형에서 풍화암반 파쇄대의 투수성을 filter의 투수계수로 대체하여 연약층내의 간극공기압 및 간극수압의 반응 양상을 다음과 같이 검토 요약하였다.

1. 사질점토의 연약층내에서의 간극수압 반응 양상은 제3기층 붕괴형에서는 시간변화에 따라 계단형(step type)을 보이며, 붕괴성 붕괴형은 파형(wave type)으로 나타남을 알 수 있다.

2. 사질점토의 연약층내에서 제3기층 붕괴형에서의 최대 간극공기압 반응율(Ra)은 45%~60% 범위이고 최대 간극수압 반응율(Rw)은 62%~87% 범위이며, 붕괴성 붕괴형의 최대간극공기압 반응율은 18%~40% 범위이고 최대간극수압 반응율은 38%~60%로 나타났다. 대체로 제3기층 붕괴형의 간극수압 반응율(Rw)이 붕괴성 붕괴형보다 크게 나타나 간극수압에 의한 전단저항력 소실로 사면붕괴의 요인이 큰 것을 의미하며, 실제사면에서 Boring 등으로 피압지하수위가 측정되면 간극수압 반응율을 적용하여 붕괴 예상면내의 간극수압 작용 범위를 예측할 수 있다고 본다.

3. 간극수압 반응율(Rw)은 풍화암반 파쇄대의 투수계수가 약 3.5×10^{-3} cm/sec 이상에서는 거의 일정하게 됨을 알 수 있었으며 연약층의 풍화도 증가에 따라 간극수압 반응율은 감소함을 알 수 있다.

4. 제3기층 붕괴형에서는 풍화암반 파쇄대의 투수성에 따라 간극공기압의 반응시간과 간극수압 반응시간의 차가 그리 크지 않으나 붕괴성 붕괴형에서는 두 반응시간의 차가 큰 폭으로 나타났다.

참고문헌

1. 玉田文吾, 福田順二, 冲永浩, “地すべり面における間隙水壓計の反應特性”, 西日本工業大學 地盤工學研究所 報告, 1986, pp. 1-12.

2. 玉田文吾, 福田順二, “降雨浸透による地すべり面の間隙水壓變化”, 地すべり Vol. 26, No. 3, 1989, pp. 19-27.

3. R.N. Chowdhury, “Slope Analysis”, ELSEVIER, 1978, pp. 1-27.

4. 青木 滋, 中村三郎, “土砂災害の豫知と對策”, 土と基礎 31-4(303), pp. 71-78.

5. 玉田文吾, 南英明, “地すべり面の形成過程について”, 西日本工業大學 地盤工學研究所 報告, No. 1, 1985, pp. 1-12.

6. 河野伊一郎, 松尾新一郎, “土質調査法”, pp. 311-317.

7. Mitsuya Enokida, “Model Analysis of Ground Water Level Fluctuation in Landslide Area”, *Journal of Japan Landslide Society* 29-2, 1992, pp. 28-38.

8. R. Allan Freeze & John A.Cherry, “GROUNDWATER”, Prentice Hall, 1979, pp. 47-62.

9. 吉田昭治, 稻葉一成, 中野俊郎, 佐藤修, “地すべり斜面の自由地下水, 地下水壓の觀測と解析”, 土と基礎 39-12(407), 1991, pp. 29-34.

10. 신윤식, “산사태에 관한 화제”, 1991, pp. 1-11.

11. 仲野昭治郎, 玉田文吾, “浸透水による地すべり面の間隙水壓發生機構”, 西日本工業大學 地盤工學研究所 報告, No. 2, 1986, pp. 20-26.

12. D.G. Fredlund, H. Rahardjo, “SOIL MECHANICS FOR UNSATURATED SOILS”, Wiley-Interscience, pp. 263-279.

13. 調修二, 伊勢田 哲也, “細粒土における雨水浸透特性に関する研究”, 新砂防 Vol. 44-2, 1991, pp. 4-13.

14. IAN K. LEE et al., “Geotechnical Engineering”, 1983, pp. 91- 112.

15. 鄭斗永, 崔吉烈, 李廣俊, “崩積土의 風化度가 自然斜面 進行性 崩壞에 미치는 影響”, 全北大學校 論文集 第32輯, 1990, pp. 187-200.

16. Kandiah Arulandan et al., “Pore and Eroding Fluid Influence on Surface Erosion of Soil”, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101.GT1, 1975, pp. 51-66.

17. 末岡 徹 et al., “NIGERIA.KADUNA 地における花崗岩質 風化殘積土の地盤工學的 考察”, 日本土木學會 論文集 第346號/3-1, 1984, pp. 67-76.

18. 玉田文吾, “キャップロックと地すべりとの關係”, 西日本工業大學地盤工學研究所 報告, No. 6, 1990, pp. 1-17.

19. 丸山清輝, “地すべり地における間隙水壓の變動タイプ” 地すべり 30-1, 1993, pp. 27-35.

(接受: 1994. 2. 17)