

사다리꼴 개수로에서 동수두를 고려한 제방 침투에 관한 실험연구

Experimental Study on Levee Seepage Considering Dynamic Head in a Trapezoidal Open-Channel

임동균* · 김규호**

Im, Dongkyun · Kim, Kyu-Ho

Abstract

Levees, the hydro-engineering structure, are similar to earth dams in aspects of shape and structure. However, they are different from earth dams in the external force conditions. As a levee is the structure that is complexly affected by the flow and the water stage in the river, it may be unreasonable to analyze the seepage safety as previous studies derived from the neglect of river flow. In this study, an experiment was conducted to investigate flow structures in a trapezoidal open-channel and the influence of the channel flow on the seepage through a levee. Flow structures in a trapezoidal open-channel were distinguished from a rectangular open-channel such as velocity and bottom shear stress distributions. In case with the flow velocity of 0.5 m/s, seepage water heads were higher 10 percent as compared with the stagnant case. This result is caused by dynamic heads, secondary currents, turbulent fluctuation forces, and various physical factors. It is suggested that external force boundary considered in terms of the flow as well as the water stage is proper to seepage analyses.

Keywords : *experiment, trapezoidal open-channel, levee, seepage, flow structure*

요 지

제방은 형태 및 구성이 중력댐과 유사한 수리구조물이나, 외력조건에서 중력댐과 다른 특성을 가진다. 제방은 제외지의 수위와 흐름의 영향을 복합적으로 받는 구조물로서 하천의 흐름조건을 무시한 기존 연구와 같이 침투 안전성 해석을 시행하는 것은 바람직하지 않다. 본 연구에서는 하천제방 주변의 흐름인 사다리꼴 개수로 흐름구조와 제외지 흐름이 제방침투에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 사다리꼴 개수로 흐름구조는 유속분포 및 바닥면 전단응력에 있어 직사각형 개수로 흐름과 상이하였다. 또한 유속이 0.5 m/s인 경우에 침투 수두는 흐름이 없는 경우와 비교하여 10%정도 크게 나타났다. 이러한 현상은 동수두, 이차류, 난류 변동성분에 의한 인자, 그리고 다양한 물리적 영향에 기인한다. 따라서 침투해석의 외력조건은 수위뿐만 아니라, 흐름에 의한 영향을 고려할 필요가 있다.

핵심용어 : 실험, 사다리꼴 개수로, 제방, 침투, 흐름구조

1. 서 론

일반적으로 사다리꼴 형태를 가지는 하천제방은 홍수로부터 제내지를 보호하는 기본적인 하천구조물이다. 과거 하천 제방은 월류에 의한 붕괴가 대부분이었으나, 최근에는 하천 제방이 정비됨에 따라 월류에 의한 붕괴보다 강우와 하천수의 복합요인에 의한 침투과괴가 중요한 문제로 대두되고 있다(임동균 등, 2006). 침투에 의한 사면붕괴가 발생하는 원인은 침윤면의 증대로 인해 제체내 간극수압이 증대되고, 이러한 간극수압의 증대는 토질의 전단강도를 감소시키기 때문인 것으로 알려져 있다(日本 建設省, 2000). 따라서 제방 단면의 침투 안전성 검토를 위해서는 토질 특성뿐만 아니라, 흐름 특성과 단면 조건 등과 같은 다양한 인자를 검토할 필

요가 있다.

흐름구조에 대해 Keulegan (1938)가 대수법칙(logarithmic law)을 제안한 이후, 실험 및 현장 계측을 통해 흐름구조를 분석하는 다양한 연구가 진행되고 있다. Nezu and Nakagawa(1993)는 직사각형 개수로의 흐름특성 연구를 통해 바닥 와(渦; bottom vortex)와 자유수면渦(free surface vortex)와 같은 2개의 큰 이차류가 바닥면과 자유수면 근처에서 발생한다고 제시하였다. 그러나 사다리꼴 형태를 가지는 하천제방 주변의 흐름특성은 기존에 연구되고 있는 직사각형 개수로의 흐름특성과는 상이한 구조를 가진다. 강형식과 최성욱(2006)은 3차원 레이놀즈응력모형(Reynolds stress model)을 이용하여 사다리꼴 개수로의 평균유속 및 난류구조를 분석하였다. 연구결과, 사다리꼴 개수로에서는 자유수

*정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 연구원 (E-mail : himdk@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 책임연구원 (E-mail : khkim1@kict.re.kr)

면渦가 직사각형 개수로 보다 감소하여 두渦영역 사이에 새로운 이차渦류가 형성된다고 제시하였다. 또한 직사각형 개수로 흐름에서는 자유수면渦의 영향으로 인해 최대 유속이 수면아래에서 발생되지만, 사다리꼴 개수로에서는 이와 같은 현상이 뚜렷이 발생되지 않는다고 언급하였다.

Knight *et al.*(2007)은 통수능, 유사 이동, 제방 침식, 생물 서식처 등 다양한 공학적 문제를 해결하기 위해서는 사다리꼴 개수로에서 발생하는 흐름특성(이차류, 유속, 전단응력 등)을 정확히 분석할 수 있어야 한다고 제시하였다. 따라서 이러한 흐름특성은 하천제방의 침식 및 침투 안정성 해석 등에 반영되어야 한다. 지금까지의 침투 안정성 해석 연구(Nedriga *et al.* 1978; Cartwright *et al.* 2004; 임동균 등, 2006)는 댐과 같이 구조물 주변에 흐름이 정지된 경우에 국한하여 진행되어 왔으며, 하천제방과 같이 흐름이 존재하는 경우에 대한 연구는 미미한 실정이다. 그러나 실제 하천제방은 제외지의 수위와 흐름의 영향을 복합적으로 받는 구조물로서 흐름이 존재는 조건의 연구결과를 활용하여 안전성 해석을 시행하는 방법이 바람직할 것이다. 보다 높은 정확도의 제방 안전성 해석을 위해서는 사다리꼴 개수로 흐름특성을 고려하는 등 실제 물리 현상을 반영한 연구가 필요하다.

본 실험연구에서는 하천제방 주변의 흐름인 사다리꼴 개수로 흐름에 의해 발생하는 동수두, 이차류, 난류 변동성분 또는 바닥면 전단응력 등이 제방침투에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 사다리꼴 개수로에서 micro ADV를 이용하여 3차원 흐름구조를 계측하였으며, 동시에 제방 저면부에는 간극수압계를 이용하여 흐름이 제방내부의 간극수압에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험조건

2.1 실험 장치

실험 장치는 수평흐름을 재현하여 제방의 비정상 침투현상을 측정할 수 있도록 제작되었다. 유량공급장치는 최대 0.5 m³/sec 공급할 수 있는 규모이며, 수로 끝부분은 수위를



Fig. 1 Experimental Trapezoidal Open-Channel

조절할 수 있는 수문이 설치되었다. 흐름방향 중앙에 제방을 축조할 수 있도록 수로를 설계하였으며, 수로의 제원은 길이 10 m, 폭 1 m, 그리고 비탈경사 1:3이다(Fig. 1 참조). 실험에 적용한 제방모형은 높이 0.3 m의 기초지반 위에 제방 높이 0.3 m, 하부 폭 2.1 m, 둑마루 폭 0.3 m, 그리고 비탈경사 1:3으로 설치되었다. 침투실험을 위해 0.25 m 수심을 가지는 침투 외력조건을 적용하였으며, 실험에 적용한 제방 모형 및 계측기 설치 위치 개요도를 Fig. 2에 도시하였다. 또한 제방 축조 수로는 제방내부의 침투선을 관찰할 수 있도록 벽면이 투명하게 제작되었다.

유속 측정은 미국 Sontek 사의 3차원 micro ADV가 사용되었다. micro ADV는 초당 최대 50개의 신호를 측정할 수 있다. micro ADV의 측정부피(sampling volume)는 0.1 cm³ 이내이고 유속의 허용오차는 0.1 mm/sec이며, 신호를 50 Hz로 측정할 때 무작위성 잡음(random noise)은 1% 정도이다. 본 연구에서는 사다리꼴 개수로의 흐름특성 분석을 위해 265지점(횡방향으로 12지점, 종방향으로 5-30 지점)의 3차원 유속성분을 micro ADV를 이용하여 50 Hz의 속도로 30 sec동안 측정하였다. Fig. 3은 3차원 유속성분을 계측한 위치를 도시한 것이다. 일반적으로 난류량의 측정 속도에 대

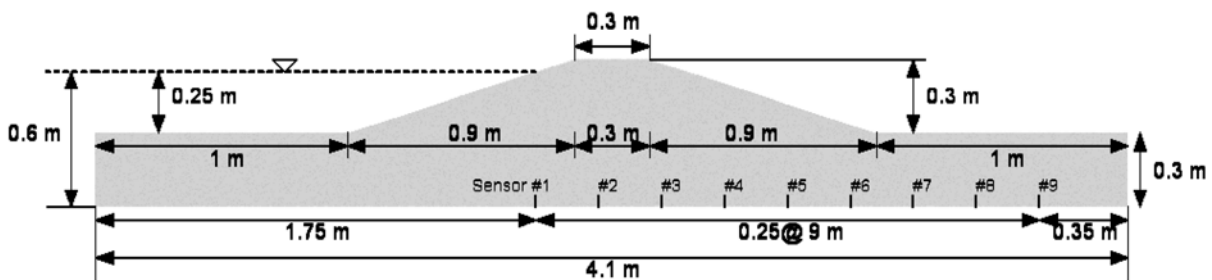


Fig. 2 Schematic Sketch of Experimental Levee

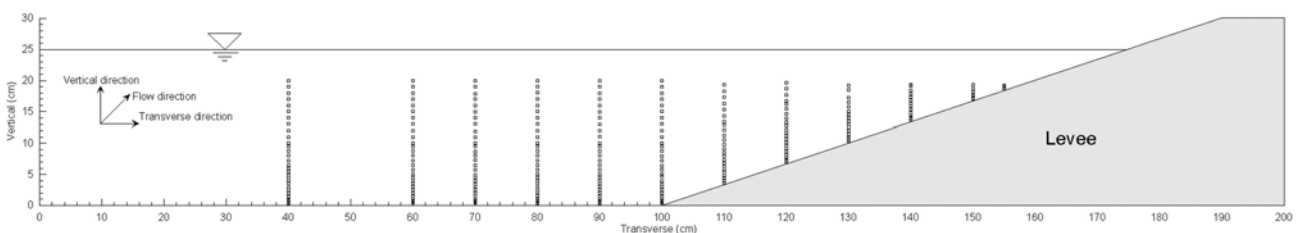


Fig. 3 Velocity Measurement Points

Table 1. Properties of Material

Density of Soil Particle	2.673 g/cm ³	Screening Rate on No.4 Sieve	96.2%	
Natural Water Content	7.9%	Screening Rate on No.10 Sieve	83.2%	
Maximum Diameter	9.52 mm	Screening Rate on No.40 Sieve	51.9%	
60% Particle Diameter	0.7 mm	Screening Rate on No.200 Sieve	31.2%	
10% Particle Diameter	0.017 mm	Liquid Limit	N.P	
Coefficient of Uniformity	41.2	Plastic Limit	N.P	
Classification	SM	Plastic Index	N.P	
Solidity Test	Wet Density	Maximum Dry Density	Minimum Water Content	Coefficient of Permeability
	2.053 g/cm ³	1.762 g/cm ³	16.5%	4.6×10 ⁻⁶ m/s

Table 2. Experimental Conditions

CASE	$Q(m^3/sec)$	$U_m(m/sec)$	$R(m)$	Fr	Remark
I	0	0	0.168	0	stagnant condition
II	0.172	0.5	0.168	0.39	flow condition
III	0.103	0.3	0.168	0.23	flow condition

한 유속계의 적합성을 살펴보기 위하여 다음과 같은 기준을 적용할 수 있다(Nezu and Nakagawa, 1993).

$$f_{max} = 50 \frac{U}{\pi h} \quad (1)$$

여기서 f_{max} 는 최대응답속도, U 는 시간에 대한 평균유속, 그리고 h 는 수심이다. 바닥으로부터 일정한 높이의 한 지점에서 시간 평균한 유속이 0.5 m/sec 라고 하면, Eq. (1)에 의한 $f_{max}=47$ Hz이므로 본 연구에서 적용한 micro ADV의 신호처리 응답속도(50 Hz)는 적절함을 알 수 있다.

2.2 실험 재료 및 조건

일반적으로 제방은 흙으로 축조된다. 이때 사용되는 제방 재료로서 흙은 일반 도로에서와 달리 흙의 강도뿐만 아니라 물의 제체 침투방지를 고려한 흙의 투수성을 고려하여야 한다. 따라서 통상 제방 재료의 최대치수는 100 mm 이내로 하여야 하며, 재료는 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등과 같이 일정 정도 세립분 함유를 권장하고 있다. 제방 재료의 투수성은 이러한 세립분 효과를 고려하여 투수계수(k)가 10⁻⁵ m/s 이하인 것이 적당하다. 본 연구에 적용한 재료는 실트질 모래(silty sand)에 해당하는 재료로 하천설계기준·해설(한국수자원학회, 2005)에서 제시한 양호한 재료기준에 부합하도록 선정하였다. 적용한 재료는 USCS분류에 의하면 SM에 해당된다. 또한 제방모형 축조 후 밀도 및 함수비 등을 측정하였으며, 투수계수는 동일한 조건의 시료를 성형하여 실험실에서 측정되었다. Table 1은 침투 수리실험에 적용한 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

제외지 흐름이 제방 침투에 미치는 영향을 분석하기 위해서 적용한 실험조건을 정리하면 Table 2와 같다. 여기서, U_m 는 단면평균유속, R 는 동수반경, 그리고, Fr는 Froude 수이다. 본 연구에서 각 조건에 대한 흐름과 침투의 계측은 동시에 수행되었으며, Case I은 기존 연구자들에 의해 적용

되어 실험방법이며, Case II와 III은 흐름이 침투에 미치는 영향을 분석하기 위해 제안된 실험이다.

3. 실험 결과

3.1 사다리꼴 개수로 흐름 특성

사다리꼴 개수로 흐름 특성을 파악하기 위한 실험은 Table 2의 Case II에 제시한 실험조건을 이용하였다. 본 연구에서 적용한 micro ADV는 방향성을 가지고 있기 때문에 유속의 계측에 있어 흐름 및 연직방향에 대해 정확한 설치를 하여야 하지만, 계측기의 정확한 설치는 거의 불가능하다. 흐름방향의 유속성분은 상대적으로 크기 때문에 계측기의 방향성 오차에 대해 민감하지 않으나, 이차류의 유속성분은 매우 작은 값을 가지기 때문에 이러한 오차의 영향을 크게 받는다. 이와 같은 계측 오차를 제거하기 위하여, Muller and Studerus (1979)는 Eq. (2)를 제시하였다. 본 연구에서도 계측된 이차류 유속성분을 Eq. (2)에 적용함으로써 질량평형(mass balance)을 만족시키면서 위에서 제기된 오차를 제거하였다.

$$V' = V - \frac{1}{B} \int_0^B V dz \quad (2a)$$

$$W' = W - \frac{1}{h} \int_0^h W dy \quad (2b)$$

여기서 V 와 W 는 횡방향(y)과 연직방향(z)으로의 계측된 유속, V' 와 W' 는 각 방향으로 수정된 유속, 그리고 B 는 수로 폭이다.

Fig. 4는 사다리꼴 개수로에서 와 에 의해 도시된 단면 이차류 벡터도이다. 비탈면 경계부근을 기준으로 두개의 큰渦가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 직사각형 개수로의 이차류 구조와 다른 것으로, 직사각형 개수로의 경우에는 자유수면과 바닥면에서渦가 발생하는 것으로 제시된 바 있다(Tominaga *et al.*, 1989; Nezu and Nakagawa, 1993). 즉, 사다리꼴 개수로에서는 비탈면에 의해 새로운 비탈면渦가 형성되며, 새로이 형성된渦에 의해 자유수면渦가 약화되고 바닥면渦가 전 수심범위로 확장되는 흐름특성을 나타낸다.

일반적으로 개수로 흐름은 바닥경계로부터의 거리에 따라 내부영역(inner region)과 외부영역(outer region)으로 나누어지며, 이들 두 영역 사이에는 중간영역(intermediate region)

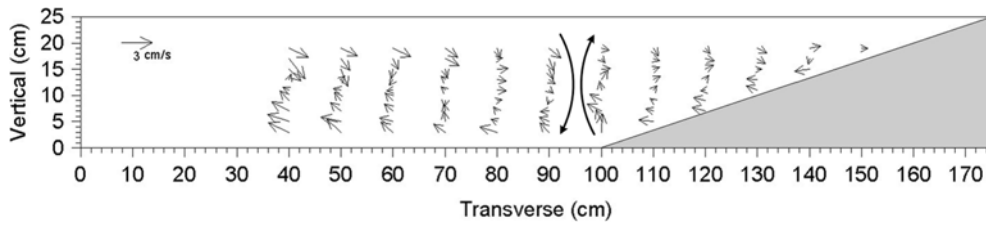


Fig. 4 Secondary Current Vectors in a Trapezoidal Open-Channel

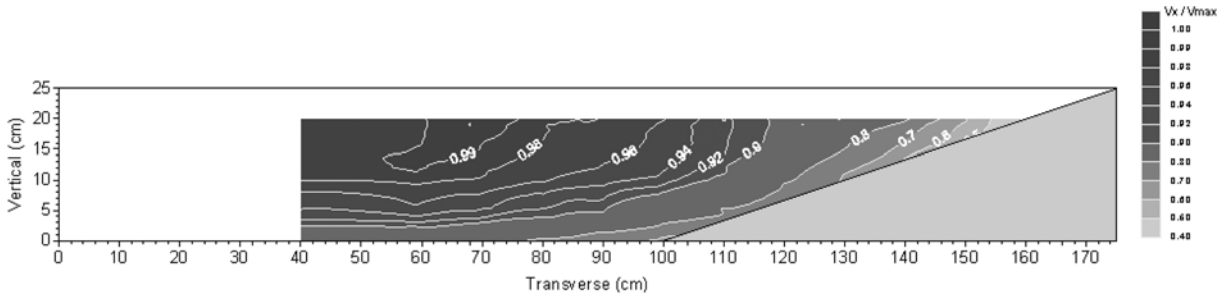


Fig. 5 Isovels in Trapezoidal Open-Channel

이 존재하게 된다. Fig. 5는 최대 유속으로 무차원된 흐름방향의 유속분포도를 도시한 것이다. 직사각형 개수로에서 수심에 대한 폭의 비가 5미만($b/h < 5$)일 경우, 자유수면渦에 의해 최대유속은 자유수면의 $0.2h \sim 0.3h$ 아래에서 발생된다. 그러나 본 연구에서 적용한 사다리꼴 개수로의 경우 최대유속이 자유수면에서 발생하는 양상을 나타낸다. 이러한 현상은 제방 비탈면의 경사로 인해 자유수면渦가 악화되고, 직사각형 개수로와는 달리 비탈 경계면에서 새로운 이차류가 발생되기 때문인 것으로 분석되었다. 기존연구(Tominaga *et al.*, 1989)에 의하면, 45° 이상의 사다리꼴 개수로의 경우에는 일반적인 직사각형 개수로의 흐름특성과 유사하게 수로 중앙에서 최대유속이 발생하는 것으로 제시되어 있다. 본 연구에서 적용한 비탈경사는 $1:3$ ($\theta = 18^\circ$)으로 최대유속이 수로 중앙부에서 발생하지 않고, 비탈면으로 편향되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Tominaga *et al.* (1989)의 실험결과와 일치하는 흐름특성으로 45° 이하의 사다리꼴 개수로의 경우 최대유속은 수로 중앙에서 비탈면으로 이동하는 것으로 제시되어 있다. 이와 같은 원인은 수로 중앙부근에서 수직방향으로의 이차류가 강하게 발생되어 나타나는 현상이다.

개수로 흐름에서 등류상태의 전단응력은 바닥에서 최대값을 가지며 수면에서는 영이 되는 선형분포를 보인다. 즉,

$$\tau = \tau_b \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (3)$$

여기서 τ_b 는 바닥에서의 전단응력이다. 일반적으로 전단응력은 유체점성에 의한 전단응력과 난류에 의한 레이놀즈 응력의 합으로 표현되는데, Eq. (3)의 좌변에서 유체점성에 의한 전단응력을 무시하고 우변의 τ 를 전단속도 u^* 의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$-\rho \overline{uw} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도이고 \overline{uw} 는 레이놀즈 응력이다.

Fig. 6은 사다리꼴 개수로의 바닥면 전단응력을 도시한 것이다. Fig. 6에서 가로축은 횡단방향의 거리이고, 세로축은 각 횡단방향의 바닥면 전단응력을 평균 바닥면 전단응력으

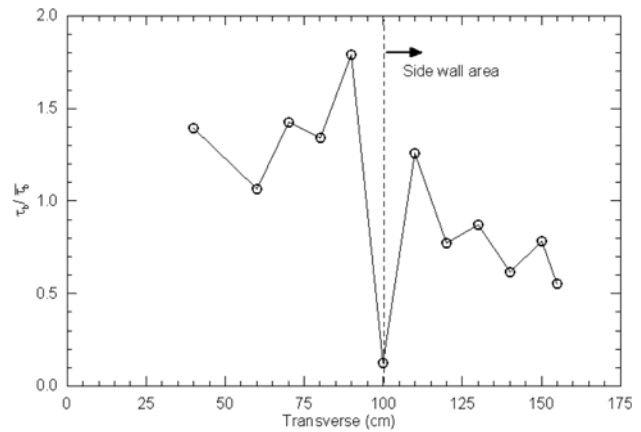


Fig. 6 Bottom Shear Stress Distributions

로 무차원시켜 나타낸 것이다. 바닥 전단응력은 수로 중앙부로부터 서서히 증가다가 평평한 면과 비탈면 경계에서 급격히 감소하는 양상을 나타낸다. 이러한 원인은 비탈면 경계면에서 발생하는 상향의 이차류에 기인한다. 즉, 상향의 이차류는 비탈면 경계면의 운동량을 수면방향으로 이동시킴으로써 경계면 바닥에서 전단응력이 상대적으로 작게 나타나고, 운동량이 좌우측으로 이동하여 좌우측 바닥면에서 상대적으로 크게 나타난다. 또한 비탈경사 구간에서의 바닥 전단응력도 전술한 평평한 구간에서의 흐름특성과 동일한 현상이다.

3.2 침투 특성

본 연구에서는 실제 물리현상에서 발생하는 하천내 흐름이 제방 침투에 미치는 영향을 검토하기 위해 흐름을 고려한 침투실험을 시행하였다. Case I은 흐름이 없는 상태에서 비포화 비정상 침투조건을 적용하였으며, 이러한 조건은 제외 지층의 흐름이 없는 댐 및 저수지 등에서 발생할 수 있는 현상이다. 이러한 실험은 흐름을 주었을 때 흐름의 영향을 파악하기 위한 기초실험이다.

Fig. 7은 시간에 따른 수두변화를 도시한 것이다. 계측을 위해 Fig. 2와 같이 제방 저면에 9개의 간극수압계를 0.25 m 간격으로 설치하였으나, 6번 간극수압계는 기기 결함으로

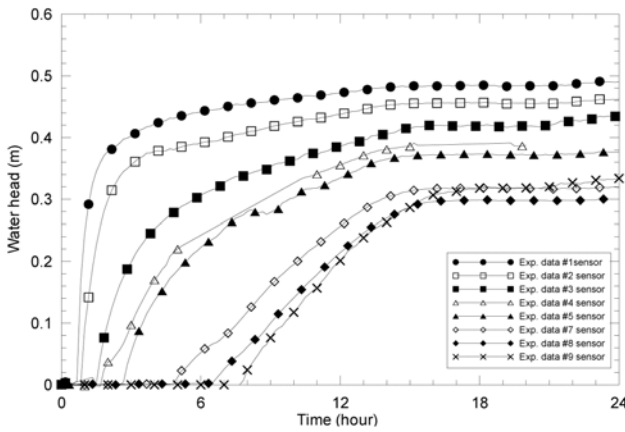


Fig. 7 Variance of Water Head in Time Length (Case I)

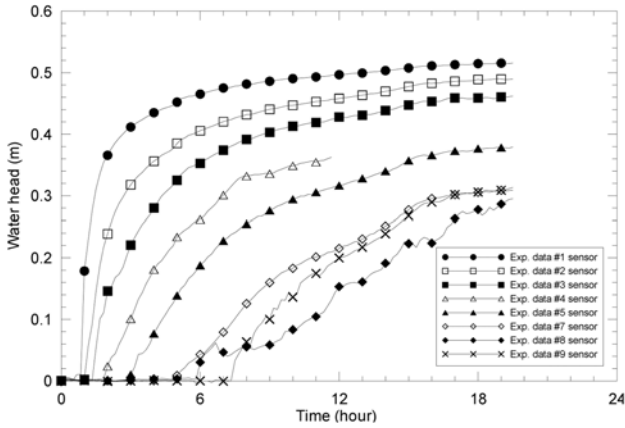


Fig. 8 Variance of Water Head in Time Length (Case II)

인해 측정 되지 못하였다. 제외지 사면으로부터 떨어질수록 수두가 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 8번 계측기 수두의 경우 7번 계측기의 수두보다 높은 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 제내지 기초지반의 포화 높이에 기인한 것으로 무시될 수 있다.

Case II에서는 제외지 흐름을 0.5 m/s로 유지시킨 상태에서 비포화 비정상 침투조건을 적용하였다. 즉, Case I의 실험은 기존 연구에서 적용한 조건으로 제외지 흐름이 없는 경우이며, Case II의 실험은 제외지 흐름이 존재하는 경우로 구분될 수 있다. 실제 제방에서 발생하는 물리현상은 Case I과 같은 경우가 아니라, Case II에서 적용한 외력조건이다. Case II의 실험결과를 바탕으로 보다 정확한 제방 침투 및 사면 안전성 해석을 시행할 수 있을 것으로 기대되며, 제방과 평행한 흐름이 침투에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

Fig. 8은 흐름이 존재하는 경우 시간에 따른 수두변화를 도시한 것이다. 각 계측기의 위치 등 제외지의 흐름 유무를 제외한 모든 실험조건은 Case I과 동일하다. Fig. 8에 제시되어 있는 실험결과와 흐름이 없는 조건의 결과를 전반적으로 비교하여 보면, 두 실험결과 양상은 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 그러나 각각의 조건에 대한 실험결과를 같이 도시하여 보면, 제외지에 흐름이 존재하는 경우의 수두가 높은 것을 확인할 수 있다.

4. 분석 및 고찰

Case I($U_m = 0.0$ m/s)은 저수지 댐과 같은 구조물에서 발생

할 수 있는 현상을 재현하기 위해 구조물과 평행한 흐름을 주지 않고 시행한 실험이며, Case II($U_m = 0.5$ m/s)와 III($U_m = 0.3$ m/s)는 하천 제방에서 나타나는 현상을 재현하기 위해 구조물과 평행한 흐름을 고려한 실험이다. 비정상 침투해석에 있어서 지금까지의 연구는 구조물과 평행한 흐름이 없는 Case I과 같은 경우에 국한하여 많은 연구가 진행되었다. 그러나 하천제방과 같이 흐름방향이 구조물과 평행한 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 하천제방의 침투 현상을 정확히 분석하기 위해서는 구조물과 평행한 흐름을 재현하여 흐름이 침투 현상에 미치는 영향을 파악할 필요가 있었다.

Fig. 9는 구조물과 평행한 흐름이 제방 침투에 미치는 영향을 파악하기 위해 흐름이 없는 경우(Case I)와 흐름이 있는 경우(Case II와 III)의 실험결과를 도시한 것이다. Fig. 9(a)는 제외지 비탈끝으로부터 0.75 m 떨어진 1번 계측기의 결과이다. Case II와 III에서 침투선 변화가 없는 구간(12시간 이후)의 수두가 Case I에 비해 각각 7%와 2%정도 크게 나타났다. 즉, 침투에 의한 수두는 흐름의 강도 또는 유속이 증가함에 따라 비례하여 상승하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 9(b)와 (c)는 2번과 3번 계측기의 결과이며, 흐름이 0.5 m/s로 존재하는 경우에 수두가 각각 7%와 10%정도 크게 계측되었다. 마지막으로 Fig. 9(d)는 제내지에 위치한 9번 계측기의 측정 결과이며, 모든 조건에서 측정된 수두가 동일하게 계측되었다. 이러한 원인은 제외지 흐름 유무와 상관없이, 제내지측 비탈면에서 흘러나온 침투 유량이 제내지를 완전히 포화시켜 발생한 현상이다.

이와 같은 실험결과로부터 제방과 평행한 흐름은 제방 침투현상에 일정부분 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 침투에 의한 수두는 Eq. (5)와 같은 상관관계를 가질 것으로 판단된다.

$$h_{seepage} \propto f(h_d, h_s, h_t, \dots) \quad (5)$$

여기서 $h_{seepage}$ 는 침투수두, h_d 는 동수두, h_s 는 이차류에 의한 수두, 그리고 h_t 는 난류에 의한 수두이다. Fig. 10은 흐름변화에 따른 침투수두 상승량을 도시한 것이다. 가로축은 흐름 크기이며, 세로축은 흐름이 존재하지 않는 경우와 비교해 흐름에 의해 침투수두가 상승된 크기를 나타낸다. Fig. 10에서 사각형 기호는 중간값을 나타내며, 닫힌 선은 각 간극수압계에서 계측된 침투수두 차이의 범위를 나타낸다. 동수두에 의한 수두 상승은 Case II와 III에서 각각 $1.3 (\cong 0.5^2 / (2 \times 9.8))$ cm와 $0.5 (\cong 0.3^2 / (2 \times 9.8))$ cm로 산정되었으며, Fig 10에서 나타나는 침투수두 상승의 50% 정도를 설명하여 준다. 나머지 침투상승에 기여한 흐름특성은 Eq. (5)에서 제시한 것과 같이 이차류, 난류 변동성분에 의한 힘(turbulent fluctuation force), 그리고 다양한 물리적 영향이 존재할 것으로 파악된다. 본 연구에서는 흐름에 의해 침투수두가 상승하는 모든 흐름 영향을 파악하지 못하였으며, 전술한 동수두, 이차류, 그리고 난류영향에 대해 검토하였다.

이차류는 모든 난류흐름에서 생성되는 것은 아니라, 벽이나 자유수면의 존재에 의한 비균일한 방향(inhomogeneous direction)이 두 방향 존재하는 난류흐름에서만 이차흐름이 생성된다(정영훈과 최성욱, 2006). Demuren(1991)에 의하면, 이

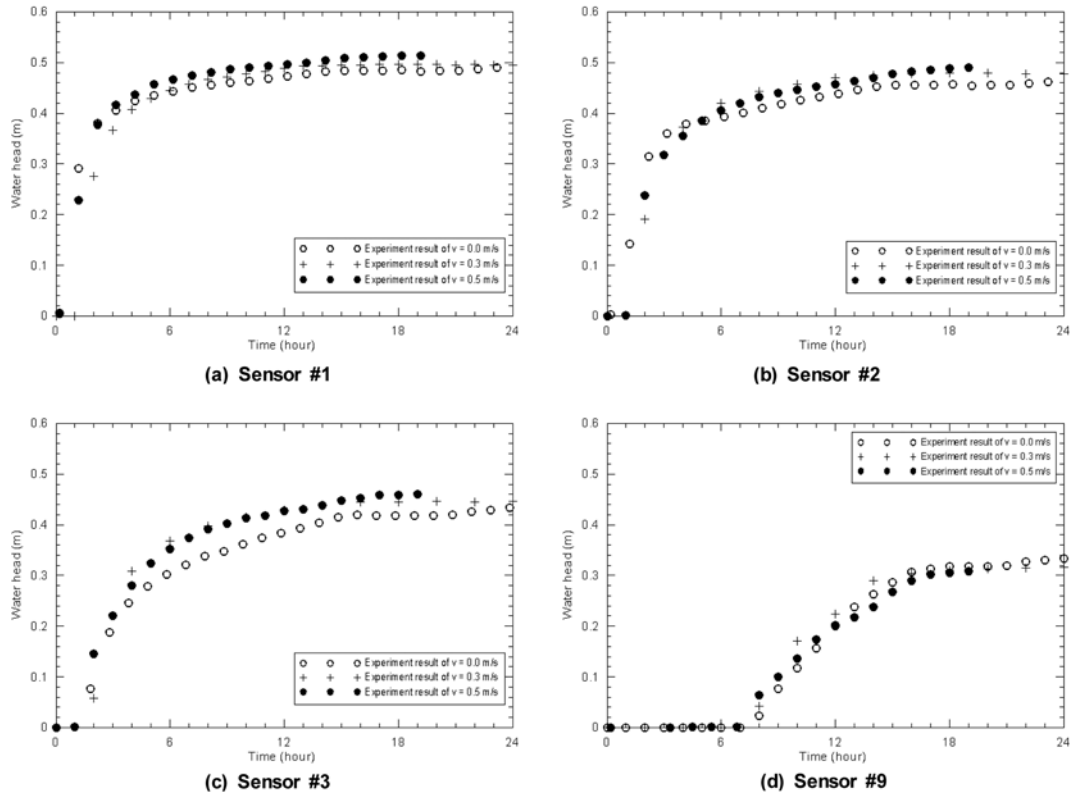


Fig. 9 Variances of Water Heads with Effect of Flows

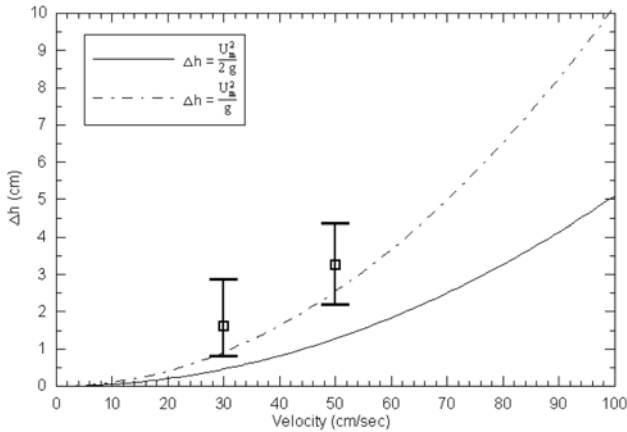


Fig. 10 Variation of Seepage Water Heads by Flow Influence

차류는 단면 평균된 주 흐름방향 유속의 약 2~5%로 제시 되었으며, 본 연구에서 적용한 사다리꼴 개수로에서도 이와 유사한 0.01~11.0%의 범위를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 4 참조). 이와 같은 결과에 따르면, 이차류가 침투수두에 미치는 영향은 1% 미만으로 매우 작을 것으로 판단된다.

난류 변동성분에 대한 영향을 검토하기 위해 흐름방향으로의 Reynolds 방정식에서 난류변동 항을 나타내면 Eq. (6)과 같다. 또한 수심과 횡단방향으로의 Reynolds 방정식 난류변동 항은 흐름방향의 인자에 비해 상대적으로 작으므로 무시될 수 있다.

$$-\rho \left(\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} \right) \quad (6)$$

여기서 x, y, z 는 각각 흐름, 횡단, 수심방향이고 u, v, w 는 각 방향으로의 변동유속(fluctuation velocity)이다. Eq. (6)

에서 $-\rho \overline{uw}$ 는 Eqs. (3)과 (4)에 의해 $\tau_b(1-z/h)$ 이며, 수심 방향으로 적분하면 Eq. (7)과 같다. 또한 Eq. (6)에서 $\overline{u^2}$ 과 \overline{uv} 는 \overline{uw} 보다 작으므로 무시할 수 있다.

$$\frac{h}{2} \tau_b \quad (7)$$

Fig. 6에 제시한 바닥면 전단응력 실험결과로부터 평균 바닥면 전단응력 $\overline{\tau_b}$ 는 $4.6 \times 10^{-4} \text{ t/m}^2$ 이고, 난류 변동유속이 침투수두에 미치는 영향은 $5.8 \times 10^{-5} \text{ m}$ 이다. 따라서 난류 변동유속에 의해 침투수두 상승에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서 검토한 흐름인자인 동수두, 이차류, 그리고 난류변동에 의한 영향만으로는 실험결과가 충분히 설명되지 않을 수 있다. 본 연구에 사용한 실험 계측기의 검정과 실험 조건의 동질성은 다양한 선행 실험과 반복을 통하여 확보하였으므로, 이에 대한 실험 오차는 배제할 수 있다. 그러나 흐름을 고려한 침투실험을 시행할 경우 자유수면의 진동현상이 1 cm 이내에서 발생되었으며, 이러한 영향에 의해 침투수두가 증가되었을 가능성은 배제할 수 없다. 이러한 자유수면 진동현상은 실제 하천에서도 나타나는 현상으로 본 연구에서 나타난 흐름과 침투수두의 상관관계는 여전히 유효할 것으로 판단된다. 따라서 향후 침투해석을 시행할 때에는 수위 또는 정수두에 의한 외력조건만을 고려할 것이 아니라, 실제 물리현상을 반영함과 동시에 제방 안정성 확보를 위해서 흐름에 의한 외력조건을 반영하는 것이 바람직하다. 본 연구는 실험여건의 제약으로 인해 다양한 실험조건을 적용하지 못하였으나, 수행된 실험조건을 통해서도 흐름과 침투수두는 일정한 경향을 가지고 있는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 제방 침투해석의 외력설정시 $h + V^2/g$ 와 같이 정수두에 2배의 동수두를 추가한 값을 제안한다.

제안된 식은 흐름이 침투에 미치는 모든 인자를 각각 정량화 시킨 것이 아니라, 본 연구에서 수행한 실험자료를 바탕으로 분석한 결과이다. 침투수두를 상승시키는 흐름 인자의 파악이나, 흐름과 침투의 상관관계를 개선하기 위해서는 다양한 실험조건과 이에 대한 상세 분석이 추가적으로 필요하다. 제방 침투에 정수학적인 특성이외에 동수학적인 특성이 작용하는 현상을 확인하였으며, 제방 설계나 관련 응용분야의 연구에 사전 정보를 제공함에 있어 중요한 의의를 가진다.

5. 결 론

지금까지의 제방 침투 안정성 해석은 제방과 평행한 흐름을 배제하여 외력조건으로 정수두(하천 수위)만을 고려하여 왔다. 그러나 실제 하천제방은 수위와 흐름의 영향을 복합적으로 받는 구조물이므로 흐름에 대한 영향을 고려하여 침투 안정성 해석을 시행하는 것이 적절하다. 본 연구에서는 실험을 통해 제방과 동일한 형태인 사다리꼴 개수로에서의 흐름 특성과 흐름이 제방 침투에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 직사각형 개수로에서는 자유수면과 바닥면에서渦가 발생하는 것으로 제시되어 있으나, 사다리꼴 개수로에서는 직사각형 개수로와 다르게 비탈면 경계부근을 기준으로 두 개의 큰渦가 발생한다. 이러한 영향으로 인하여 사다리꼴 개수로에서의 최대유속은 비탈면과 자유수면 부근으로 이동하는 특성을 가진다. 또한 상향의 이차류에 의해 바닥면 전단응력은 비탈면 경계부근에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
2. 흐름 유무에 상관없이 침투양상은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 제외지 흐름이 빠를수록 침투수두가 높게 형성되었다. 침투수두의 상승원인은 주 흐름에 의한 동수두, 이차류, 난류 변동성분에 의한 인자, 그리고 다양한 물리적 영향에 기인한다. 동수두는 침투수두 상승 결과의 50%정도를 설명할 수 있으며, 이차류와 난류 변동성분에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
3. 침투해석을 시행할 때에는 수위에 의한 외력조건만을 고려할 것이 아니라, 실제 물리현상을 반영함과 동시에 안전을 향상을 위해서 흐름에 의한 외력조건을 추가하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 침투해석의 외력조건으로 정수두에 2배의 동수두를 추가한 $h + V^2/g$ 제안한다. 제안된 식은 향후 보다 많은 조건의 실험을 통해 침투에 미치는 흐름인자 별로 분리되어 수정될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03 산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 강형식, 최성욱(2006) 사다리꼴 개수로 흐름에서 이차흐름의 3차원 수치모의. *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, pp. 1631-1635.
- 임동균, 여흥구, 김규호, 강준구(2006) 제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 241-252.
- 정영훈, 최성욱(2006) DNS 자료를 이용한 개수로에서 이차흐름의 생성메커니즘 분석. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 139-144.
- 한국수자원학회(2005) *하천설계기준 · 해설*.
日本 建設省(2000) *河川堤防設計指針*.
- Cartwright, N., Nielsen, P., and Li, L. (2004) Experimental observations of watertable waves in an unconfined aquifer with a sloping boundary. *Advances in Water Resources*, Vol. 27, No. 10, pp. 991-1004.
- Demuren, A.O. (1991) Calculation of turbulence-driven secondary motion in ducts with arbitrary cross-section. *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 531-537.
- Keulegan, C.H. (1938) Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 21, pp. 707-740.
- Knight, D.W., Omran, M., and Tang, X. (2007) Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 1, pp. 39-47.
- Muller, A. and Studerus, X. (1979) Secondary flow in an open channel. *Proceedings of 18th IAHR Congress*, Cagliari, Italy, Vol. 3, pp. 19-24.
- Nedriga, V.P., Korchevskii, V.F., Pokrovskii, G.I., and Petrov, G.N. (1978) Full-scale investigations of seepage in an experimental blast-fill dam. *Hydrotechnical Construction*, Vol. 12, No. 7, pp. 679-683.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993) *Turbulence in open-channel flows*. A.A. Balkema, Brookfield, VT.
- Tominaga, A., Nezu, I, Ezaki, K., and Nakagawa, H. (1989) Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 27, No. 1, pp. 149-173.

(접수일: 2008.12.4/심사일: 2009.1.19/심사완료일: 2009.2.15)