

규칙적인 수위 변화시 제체내의 자유수면

Free Surface into an Embankment during
the Regular Variation of Water
Level.

조선대학교 교수 임병대

○군산수전 부교수 장인규

I. 서론

본연구는 방조제와 같은 토공구조물에서 조위변화와 같은 규칙적인 수위변화로 인한 제체내 자유수면의 변화를 추적하고 실험모델을 이용하여 해석함으로써 보다 올바른 침투거동에 대한 자료를 제시하고자 한다.

실험모델은 2가지 토질로 구성된 제체가 사용되었으며 실험시 수위변화는 규칙적으로 급상승및 급강하를 반복적으로 행하였다.

II. 이론 및 방정식

2.1 흙의 함수특성

포화영역 및 비포화영역에서의 간극내 흐름은 물 또는 물과 공기의 흐름이다. 비포화영역에서 이러한 흐름을 지배하는 투수계수 및 간극수압은 함수비의 함수이나 이 관계는 단순하지 않고 과거의 함수경력에 의존하고 있다. 즉 포화도가 상승하느냐 하강하느냐에 따라 달라진다. 포화도가 하강하게되어 젖은 상태에서 함수비가 적어짐에 따라서 그 변화는 Fig.1와 같이 Drying곡선을 그리나 수위가 상승하여 마른상태에서 젖은상태로 되면 Wetting곡선을 따른다. 이에 대한 두드러진 특성은 아래와 같다.

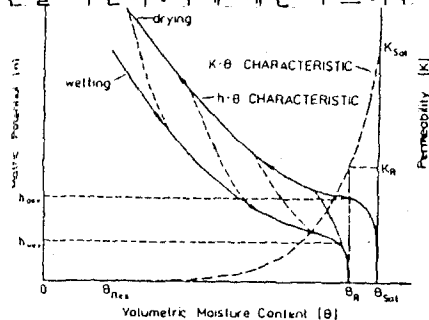


Fig.1. Soil Moisture Characteristics.

1) 부수성은 간극수압에 의존하는 유효응력의 함수이며 간극수압은 또한 함수비와 비선형적 함수관계이다.

2) 간극수압에 의한 압력수두와 함수비의 관계는 Hysteric의 관계를 보이는데 이는 초기함수비 및 Wetting 또는 Drying상태에 의존한다.

3) 포화된 흙이 배수가 진행되어 소위 "Air Entry"값 이하가 되면 부의 간극수압은 크게 증가하게 되며 부수성은 급격히 감소하게 된다. 이는 배수가 진행됨에 따라 우선 큰 간극에서 부터 배수가 되기 때문인데 간극이 클수록 실제 모관력이 작아 먼저 배수가 진행된다.

4) 건조한 흙이 재포화될때 간극내에 갇힌 공기가 존재하여 재포화 함수비 θ_R 를 포화함수비 θ_{sat} 보다 작게 된다.

5) 재포화시 흙은 "Water Entry"값에 근접할수록 함수비는 급격히 증가하게 된다. 그러나 "Water Entry"에 도달하면 함수비는 거의 변하지 않는다. 일반적으로 "Water Entry"에 해당하는 압력수두 h_{ve} 는 "Air Entry"에 해당하는 압력수두 h_{ea} 의 절반 정도의 크기이다.

6) Drying 상태에서 부의 모관압력에 크게 작용하면 함수비는 일정한 크기에 도달하게 되는데 이를 Residual Water Content θ_r 이라 한다. 역학적으로 θ_r 이하로 함수비를 감소시키기는 어렵다.

7) 부수계수와 압력수두의 관계도 함수경력에 따라 Hysteric의 관계를 보인다. 이러한 특성에도 불구하고 실제 설계시 흙의 Hysteric 거동을 전부 포함시키기에는 적용상 어려움이 많다. 통상 수치해석에서 간편화를 위해 Wetting곡선 또는 Drying곡선만 고려하여 해석한다.

2.2 지배 방정식

2.2.1 비포화 Transient Flow에 대한 가정

- (1) 흐름은 Darcy법칙을 따른다.
- (2) 비포화영역내의 공기의 흐름은 무시하며

또한 공기의 압축성도 무시한다.

- (3) 유체는 균질하며 비압축성이다.
- (4) 침투압, Absorption Pressure의 효과는 무시하며 경우에 따라 이들을 모관압력으로 취급한다.
- (5) 공극수압 투수계수 및 포화도의 관계는 시간에 따라 변하지 않는다.

2.2.2 지배방정식의 전개

비포화지반내 임의의 미소입자를 흐르는 2차원 흐름에 대한 연속방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \cdot n \cdot S_w) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w \cdot q_i) = 0 \quad \text{-----(1)}$$

여기서 ρ_w : 물의 밀도

n : 지반의 공극율

S_w : 포화도 ($0 \leq S \leq 1$)

q_i : Specific flux

x_i : 2차원 (X,Z)의 좌표

Darcy법칙으로부터

$$q_i = -k_{ij} \cdot k_r \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad \text{-----(2)}$$

여기서 K_r : 상대투수계수 ($0 \leq K_r \leq 1$)

K_{ij} : 포화시 투수계수

ϕ : 전수두

식(2)를 식(1)에 대입하면

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w k_{ij} k_r \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \cdot n \cdot S_w) \quad \text{-----(3)}$$

식(3)의 우측을 전개하면

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w k_{ij} k_r \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) = \rho_w S_w \frac{\partial n}{\partial t} + \rho_w \cdot n \frac{\partial S_w}{\partial t} + n \cdot S_w \frac{\partial \rho_w}{\partial t} \quad \text{-----(4)}$$

물리적 관점에서 분석하면 식(4)는 다음의 3가지 현상에 의해 지배되고 있음을 알수있다.

첫째. 시간에 따른 흙의 골격의 변화이다. 즉 시간이 흐름에 따라 물과 공기가 점유하고 있는 간극의 체적이 변한다.

둘째. 간극내 포화도의 시간에 따른 변화이다.

셋째. 간극내를 흐르는 물의 밀도의 변화이다. 즉 유체의 시간에 따른 체적의 변화를 의미한다.

유체는 균질하고 비압축성이라고 가정하였으므로 유체의 압축성을 무시하면 식(4)는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (\rho_w k_{11}^* k_r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_1}) = \rho_w (S_w \frac{\partial n}{\partial t} + n \cdot \frac{\partial S_w}{\partial t}) \quad \text{-----}(5)$$

여기서

$$S_w \frac{\partial n}{\partial t} = S_w \frac{\partial n}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = S_w \cdot S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{-----}(6)$$

이때 S_s 를 Specific Storage라 한다. 식(5)와 식(6)을 정리하면

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (k_{11}^* \cdot k_r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_1}) = n \cdot \frac{\partial S_w}{\partial t} + S_w \cdot S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{-----}(7)$$

실질적인 목적에서는 전수두 ϕ 와 포화도 S_w 로 표시하는 것보다 압력수두와 함수비 θ 로 표시하는 것이 편리하다. 또한 여기에 Specific Moisture Capacity C 를 도입하면 식(7)은 다음과 같이 기술된다. 여기서 $\phi = \frac{1}{\gamma} \theta$ 이고 $\theta = S_w \cdot n$ 이므로

$$\frac{\partial}{\partial x_1} (k_{11}^* \cdot k_r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + k_r \cdot k_{11}^*) = n \frac{\partial(\theta/n)}{\partial t} + \frac{\theta}{n} \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{-----}(8)$$

식(8)의 우측항을 정리하면

$$n \frac{\partial(\theta/n)}{\partial t} + \frac{\theta}{n} S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\theta}{n} S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} = (C + \frac{\theta}{n} \cdot S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{-----}(9)$$

여기서

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \quad \text{-----}(10)$$

Specific Moisture Capacity C 는 함수비 θ 와 압력수두 ϕ 의 관계곡선의 기울기이다. 단, 이때 Hysteric의 성향은 고려하지 않고 ϕ 는 단지 θ 의 비선형적 함수로 간주한다.

III. 실험결과 및 고찰

초기 및 경계조건으로 외제체에서는 수위의 규칙적인 상승 및 하강의 반복으로 하

고 내제체에서는 하류측 수위면의 위치에 따라서 다음과 같은 3가지로 설정하였다.

1) 내제체수위가 $H_2=0\text{Cm}$ 인 경우.

승강에 따른 자유수면의 흐름은 외제체에서 내제체측으로 유출하였으며 이를 Fig. 2에 도시하였다.

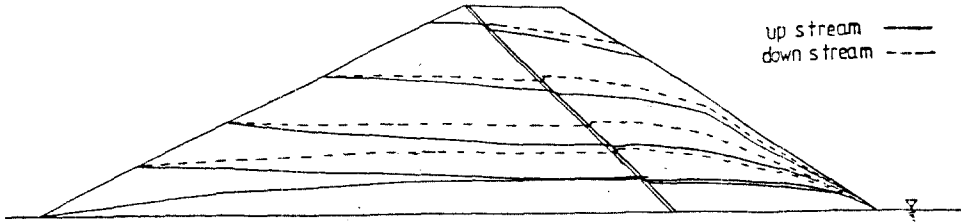


Fig.2 Aspect of Free Surface in $H_2=0\text{(Cm)}$.

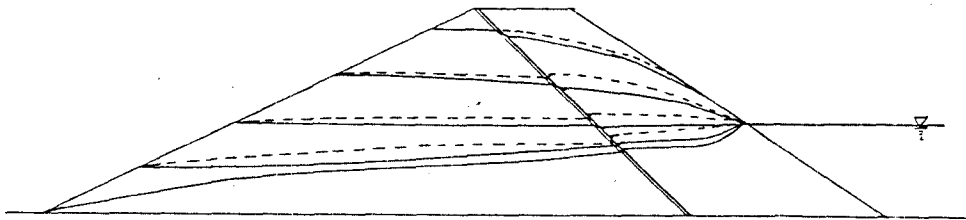


Fig.3 Aspect of Free Surface in $H_2=20\text{(Cm)}$

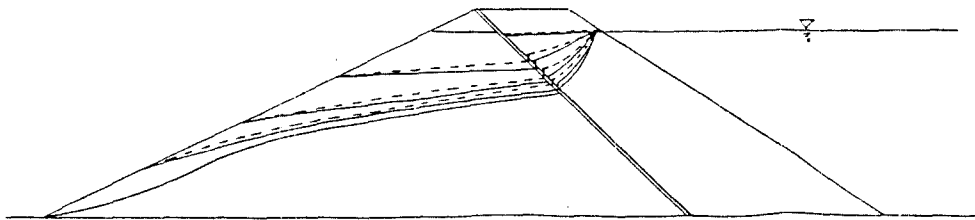


Fig.4 Aspect of Free Surface in $H_2=40\text{(Cm)}$

2) 내제체수위가 $H_2=40\text{Cm}$ 인 경우

승강에 따른 자유수면의 흐름은 내제체에서 외제체측으로 유출하였으며 이를 Fig.4.에서 도시하였다.

3) 내제체수위가 $H_2=20\text{Cm}$ 인 경우

외수위 H_1 에 따라서 다음과 같이 2가지 경우로 구분 할 수 있으며 이를 Fig.3.에 도시하였다.

$H_2 < H_1$ 인 경우 : 승강에 따른 자유수면의 흐름은 외제체측에서 내제체측으로 유출하였다.

$H_2 > H_1$ 인 경우 : 승강에 따른 자유수면의 흐름은 내제체측에서 외제체측으로 유출하였다.

3.2. 분석결과

1) 내제체수위 $H_2=0(\text{Cm})$ 인 경우

초기 및 경계조건으로 모델 외제체측 및 내제체측 바닥에 $H_1=H_2=0(\text{Cm})$ 로 수위를 유지시킨 결과 Fig.2과 같이 제체 중심부가 상승되어 나타났다. 이는 고속의 물의 모관 현상에 의한 것으로 보인다. 외제체수위가 상승과 하강됨에 따라 부수계수가 다른 K_1 과 K_2 의 영역에서 수위차가 커지는데 이는 동수경사의 증가에 의한 것으로 보인다. 최상부의 자유수면에서는 그 폭이 감소되었는데, 이는 내제체사면으로 유출되기 때문으로 실제흐름에 영향을 미치는 동수경사가 작기 때문이다.

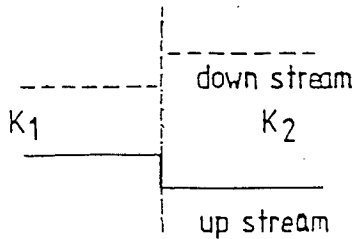


Fig.5 Boundary Domain in $H_2 < H_1$

2) 내제체수위 $H_2=40(\text{Cm})$ 인 경우

외제체의 수위가 상승 및 하강의 경우인 Fig.3에서 흐름방향은 내제체에서 외제체로 향하였다. 특히 K_1 과 K_2 의 경계부근에서 Fig.2과 같은 현상이 일어났다. 상승시

에는 K_1 과 K_2 의 경계 수위차가 작은 반면 하강의 경우에는 크게 나타났다. 그리고 외제제수위가 작을수록 동수경사는 증가함을 보였다. 그럼에도 불구하고 내제제수위 $H_2=0\text{Cm}$ 의 경우와 같이 나타나지 않은 것은 내제제수위가 높은 것과 침투거리가 짧기 때문이다. 이와같은 현상은 실제 만수의 방조제에서 간조의 경우에 일어날것이다.

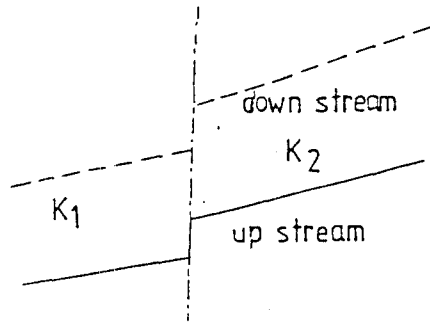


Fig.6 Boundary Domain in $H_2 > H_1$

3) 내제제수위 $H_2=20(\text{Cm})$ 인 경우

초기 및 경계조건으로 $H_2=20(\text{Cm})$ 의 경우에는 H_1 의 수위에 따라 Fig.5와 Fig.6의 2가지 현상이 일어났다. 먼저 H_1 이 20Cm 보다 작을 때에는 외수위상승에 따라 K_1 과 K_2 의 경계부근에서 Fig.6과 같은 침투현상이 일어났다. 또한 H_1 이 20Cm 보다 큰 경우에는 외제제 수위의 승강에 K_1 과 K_2 의 경계부근에서 Fig.5와 같은 침투현상이 나타났다. 그리고 $H_1=H_2$ 의 경계조건에서는 수위상승의 경우 거의 수평에 가까운 자유수면을 나타내고 수위하강시에는 높은 자유수면을 유지하였다. 이는 물과 흙입자 사이의 Hysteric현상으로 보인다.

외수위의 상승 및 강하와 내수위의 일정한 변화에 있어서 포화, 포화-비포화, 비포화영역으로 구분하면 포화-비포화, 포화, 비포화영역의 크기순서로 면적이 변화였다. 이와같은 영역의 변화는 안정해석시 각 영역별로 유효응력 및 간극수압의 분포를 고려한 해석으로 실재와 맞는 제제거동 및 안정해석이 될 것이다.

IV. 결 론

방조제는 조위변화로 인하여 제체내의 자유수면의 영향을 받아 제체의 거동이 발생하게 되고, 또한 안정성에 변화가 예상된다. 외제체측 조위변화는 제체내에 포화영역, 포화-비포화영역 그리고 비포화영역으로 나뉘어 진다. 이와같은 제체의 규칙적인 수위변화로 인한 제체의 자유수면의 변화를 추적하고자 모형실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 내제체측 수위가 저수위인 경우 흙속의 물에 의한 모관현상으로 제체중심부가 상승되었다.

2. 내제체측 수위가 저수위이고 외제체측 수위가 승강의 경우 동수경사의 증감에 의해 K1과 K2의 경계부근에서 Fig.5와같은 현상이 일어났다.

3. 내제체수위가 고수위이고 외제체측의 수위가 승강의 경우 K1과 K2의 경계에서 Fig.6과 같은 현상이 일어났다. 이는 내수위가 높고 침투거리에 의한 영향으로 생각된다.

4. 내제체측 수위가 중위의 수위인 경우 물과 흙입자사이에 Hysteric현상이 일어났다.

5. 내수위의 위치에 따른 포화, 포화-비포화, 그리고 비포화영역별로 구분한 영역의 변화는 제체의 거동 및 안정해석에서 고려하여야 할 것이다.

본 논문은 제체의 침투에 관한 연구중 실험논문의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. Richards, L.A.(1931):Capillary Conduction of Liquids through Porous Media. Physics,1.pp.318-333
2. Wallace,K.(1975):The Analysis of Infiltration into Earth Structures.4th South East Asian Conference on Soil Engineering,Malaysia.
3. Freeze,R.A. and Chery,J.A.(1979):Ground Water,Prentice Hall,inc.
4. Mualem,Y.(1976):A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media.Water Resource Research,Vol.12,pp.513-522.