

## 제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석

### Suitability Analysis of Numerical Models Related to Seepage through a Levee

임 동 균\* / 여 흥 구\*\* / 김 규 호\*\*\* / 강 준 구\*\*  
Im, Dongkyun / Yeo, Hongkoo / Kim, Kyu-Ho / Kang, Jungu

#### Abstract

Numerical models for seepage analysis are useful tools to analyze problems and design protection techniques that are related to seepage through a levee. Though every model may have its own limitations and shortcomings, there were no generalized verifications or calibrations for the commercial models. It means that users can run the model and get the result without understanding nor taking any enough training. This paper investigates applicability and suitability of some seepage numerical models by comparing analytical solutions with experiments in the user's viewpoint. The results showed that it is more desirable to use analyses with unsaturated-unsteady condition rather than those with saturated-steady conditions, since seepage phenomenon of real levees are changed according to water level and soil property. This study also compared the calculated unsteady solutions with the calculated steady solutions for the levee at Koa of the Nakdong River. The comparison revealed that as the result, the safety factor of 2.0~3.5 has the same effects for seepage protection techniques when they are designed on the basis of steady-state analysis.

**keywords** : levee, seepage, experiment, numerical model

#### 요 지

침투 해석 수치모형은 제방 침투와 관련된 문제 해석과 방지기법 설계에 있어 매우 유용한 방법이나, 각각의 수치 모형은 적용상 한계와 문제점을 내포하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 상용 프로그램은 적용하는 다양한 문제에 대해서 검증이나 보정이 이루어 지지 않을 뿐 아니라, 사용자가 침투현상에 대한 정확한 지식이나 교육 없이도 결과를 도출할 수 있게 되어 있다. 본 연구에서는 해석해와 실험을 통해 침투 수치모형의 적합성과 적용시 고려사항을 사용자적 입장에서 검토하였다. 실제 제방의 경우 수위와 토질조건 등에 따라 침투현상이 변화하기 때문에 정상 침투해석이 아닌 비포화 비정상 침투해석을 시행하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한 낙동강 고아지구 제방에 대해 정상 및 비정상 침투해석 결과를 비교하였다. 검토 결과 정상 침투해석 결과를 토대로 침투보강공법을 설계할 경우 안전계수를 2.0~3.5 정도 적용한 것과 동일한 효과를 가지는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 제방, 침투, 실험, 수치모형

\* 한국건설기술연구원 연구원  
Researcher, Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, Korea  
Tel: +82-31-910-0516, (e-mail: himdk@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원  
Senior Researcher, Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수석연구원  
Research Fellow, Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, 411-712, Korea

## 1. 서 론

국지성 및 돌발 호우와 같은 기상여건과 도시화로 인하여 하천내 유출량 및 홍수위 지속시간은 급격히 증가하고 있다. 또한, 연질 또는 투수층(과거 하천 및 하천부지 등)을 수반하는 지반에 제방을 건설하여야 하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 수리 및 지반조건의 악화는 제방 안정성을 저해하는 원인으로 작용하고 있다. 과거 하천제방은 월류에 의한 붕괴가 대부분이었으나, 최근에는 하천제방이 정비됨에 따라 월류에 의한 붕괴보다 강우와 하천수의 복합요인에 의한 침투파괴가 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나 국내에서 제방 침투 설계 및 평가기술에 대한 검토는 다른 수공학 분야에 비해 상대적으로 중요하게 검토되지 않았다.

침투양상은 구조물의 기하학적 형상, 기초지반 및 제체의 토질 및 수리조건, 그리고 수위조건 등의 자료를 바탕으로 해석한다. 침투 해석은 현장측정, 해석해(analytical solution), 모형실험, 그리고 수치해석 등에 의한 방법으로 분류할 수 있으며, 침투구조물의 설계자는 침투양상을 해석하기 위해 다양한 방법을 적용한다. Chapuis(1990)는 현장측정을 실시하여 구조물 내부의 침투흐름을 해석할 수 있는 해석해를 개발하였으며, 이와 같은 해석해는 기존의 다양한 연구문헌 및 검증을 토대로 개발되었다. 그러나 이와 같은 해석해를 이용하는 침투해석방법은 비포화 조건(unsaturated condition)을 고려하지 못하는 등 다양한 제약조건을 내포하고 있다.

침투이론에 근거한 침투 수치해석기법은 Shaw and Southwell(1941)의 유한차분법(FDM) 적용과 Taylor and Brown(1967)의 유한요소법(FEM) 도입을 필두로 Neuman and Witherspoon(1970)이 Double Iteration Scheme을 개발하였고, Desai(1973)는 FDM을 적용한 비피압 비정상 침투해석을 제안하였으나, 비포화 영역에 대한 적용성 및 사용자 편의성 등과 같은 문제점으로 인해 실용화 되지 못하였다. 최근 이러한 문제점을 개선한 연구(Cividini and Gioda, 1990; Billstein et al., 1999; Bardet and Tobita, 2002)가 진행되었으며, 개선된 연구를 바탕으로 다양한 상용 프로그램이 개발되고 있다.

국외에서는 실제 침투현상을 규명하기 위해 실험제방에서 침투실험을 시행하는 연구가 진행 중에 있으며, 이러한 연구를 통해 강우, 피복재료, 그리고 포화도 등이 침투에 미치는 영향을 분석하여 다양한 차수대책을 제시하였다(中島秀雄, 2003). 그러나 국내에서는 실험제방에서의 침투실험을 시행한 사례는 거의 없으며, 실험

실에서의 모형실험을 통해 다양한 침투거동을 분석한 사례가 보고되고 있다(김상규, 김영목; 1991, 신방웅, 이봉직; 1993, 신방웅, 강종범; 1999).

실제 침투현상을 정확히 파악하기 위해서는 실험 및 모형실험에 의한 방법을 적용하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 대상 제방의 토질 및 다짐도 등 현장 조건을 정확히 구현하기 어려울 뿐 아니라, 실험에 필요한 공간 확보 등 다양한 제약조건을 가진다. 따라서 비포화 영역의 침투거동을 포함하여 실제 물리현상을 비교적 손쉽고 유사하게 해석하기 위해서는 수치해석기법을 이용하는 것이 가장 효과적이다.

그러나 각 수치해석기법은 적용상 주의점 및 한계조건을 가지고 있으므로, 정확한 침투해석을 위해서는 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 특히 최근 실무에서 적용하고 있는 상용 프로그램은 사용자가 적용하는 문제에 대해 검증을 수행한 프로그램이 아닐 뿐 아니라, 사용자가 침투현상에 대한 정확한 지식이나 교육 없이도 결과를 도출할 수 있게 되어 있어 해석결과에 대한 불확실성 및 위험요소가 내재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 해석해와 실험을 통해 국내 적용 중인 침투 수치모형의 적합성과 적용시 유의사항을 검토하였다.

## 2. 침투해석 방법

제체누수로 표현되는 침투는 일반적으로 제방 비탈 끝 부근에서 침투수가 유출하는 것을 의미하며, 침투는 하천의 외수위가 상승하여 제체내로 유수가 침투하여 발생하는 것이다. 즉, 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하면 누수가 시작되고, 그 양이 많으면 파이핑 현상에 의해 제방붕괴위험을 내포하게 된다. 이와 같은 침투는 제방과 같은 토질구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 침투해석은 Darcy(1856)법칙과 Dupuit(1863)의 가정이 발표된 이후 Forchheimer(1886)의 2차원 침투의 해석법 등이 제안되었다. 뒤이어 Buckingham (1907)의 간극수압과 체적함수비의 관계와 Terzaghi(1925)의 유효응력개념이 제시되어 비포화 영역의 침투해석을 고려할 수 있는 침투해석 이론이 마련되었다. 이와 같은 침투류 해석은 현장측정, 해석해, 모형실험, 그리고 수치해석 등에 의한 방법으로 분류할 수 있다.

### 2.1 해석해에 의한 방법

침투와 같은 지하수 흐름은 매우 복잡한 수학적 및 물리적 관계를 가지고 있으므로, 대부분의 지하수 흐름 문제에 대해 정확해를 알지 못한다. 특히 실제 지하수 흐름 양상을 정확히 해석하는 것은 거의 불가능 하다.

따라서 기존의 연구자는 해석해를 이용하여 지하수 문제를 해결하고자 하였으나, 이와 같은 연구는 이상적인 조건에 대한 침투해석을 시행한 것으로 많은 제약조건을 내포하고 있다.

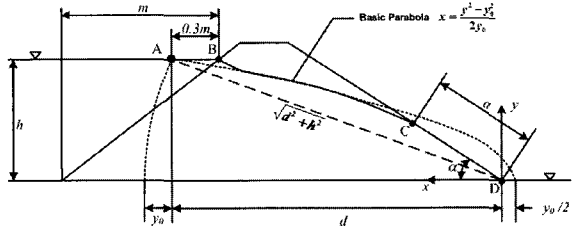


Fig. 1. Nomenclature for analytical solution

US Army Corps of Engineers(1986)는 제방 내부의 침투량과 침윤선 위치를 결정하기 위하여 기존의 연구자들이 제시한 해석해 방법을 정리하였다. Fig. 1과 같이 제방 단면자료, 상류단 경계(h), 그리고 유출경계면(a)이 정의되면, 제방 내부의 침윤선은 포물선이라는 기본 가정으로부터 침윤선을 해석적으로 결정할 수 있다. 즉, 미지경계조건(unknown boundary)인 유출경계면 a를 결정하면, 침윤선을 해석할 수 있다. 또한 유출경계면으로부터 유출량을 해석적으로 결정할 수 있으며, 유출경계면 및 유출량을 결정하는 방법은 다양한 연구자에 의해 Table 1과 같이 제시되었다.

2.2 수치해석에 의한 방법

지하수 흐름 지배방정식은 일반적으로 Darcy 법칙(Eq. (1))과 질량보존의 법칙(Eq. (2))에 의해 구성된다.

$$V = -k \text{grad}(h) \tag{1}$$

$$\text{div}(k \text{grad} h) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{2}$$

여기서 V는 유속, k는 투수계수, h는 수두, Q는 경계 내의 유량, t는 시간, 그리고  $\theta$ 는 체적함수량(volumetric water content)이다. Eqn. (2)는 수직 2차원 평면(x, z)에 대하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$k_x \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + k_z \left( \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{3}$$

지배방정식은 정상조건의 경우 Eq. (3)의 우변이 제거된 Laplace 방정식 형태를 취하며, 비정상조건의 경우 Fourier 방정식 형태를 취하게 된다. 또한 비포화조건을 고려할 경우 투수계수와 체적함수량은 간극수압의 함수이다. 이와 같은 지배방정식을 해석하는 수치모형들은 적용이론, 수치해석기법, 전개과정, 입력요소, 사용자 편의성을 위한 부가기능, 그리고 처리속도 등에 따라 다양한 상용 프로그램이 개발되어 있다. 또한 침투 해석 프로그램은 크게 정상상태 침투해석과 비정상상태 침투해석이 가능한 프로그램으로 구분할 수 있으며, 현재 일반적으로 사용되는 프로그램을 소개하면 Table 2와 같다.

3. 침투 해석

실제 지하수 흐름은 간극률, 입자형상 및 크기, 포화도 등과 같은 토질특성, 내부침식과 같은 역학적 특성, 점성과 동결융해 같은 열역학적 특성, 그리고 화학적 특성 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 그러나 개발된 상용 프로그램은 다양한 조건의 문제를 해석하기 위해

Table 1. Determination of seepage exit face and flow per unit length of levee

$\alpha$	researcher	Equation
$< 30^\circ$	Schaffernak-Van Iterson (1917)	$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$ $q = k a \sin \alpha \tan \alpha$
$\leq 90^\circ$	L. Casagrande(1937)	$a = S_0 - \sqrt{S_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$ $\alpha \leq 60^\circ, S_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$ $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ, S_0 = \overline{AC} + \overline{CD}$ $q = k a \sin^2 \alpha$
$180^\circ$	Kozeny(1927)	$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + h^2} - d)$ $q = 2 k a_0 = k y_0$

주: k is hydraulic conductivity and other variables are shown in Fig. 1

Table 2. Comparison with numerical models for seepage analysis

Model	Scheme	Application	Limitation
SEEP2D	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• saturated-steady condition</li> <li>• easy-to-use methodology and short simulation time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• difficulty of application to unsaturated-unsteady condition</li> </ul>
UNSAT2	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consideration of osmotic action by roots and natural evaporation</li> <li>• consideration of unsaturated-unsteady condition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• difficulty of application to unsaturated-unsteady condition</li> <li>• hard-to-use methodology</li> </ul>
TRUST	IFDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• making free use of grid expression</li> <li>• consideration of interaction with inhomogeneous soils</li> <li>• use of explicit and implicit scheme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• necessary of geometric input data</li> <li>• hard-to-use methodology</li> </ul>
SEEP/W	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• saturated-steady and unsaturated-unsteady condition</li> <li>• consideration of inhomogeneous and anisotropic soil</li> <li>• easy-to-use methodology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• not-published source code</li> <li>• can not change the sources code according to each case</li> </ul>
Z_SOIL	FEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• analysis of soil, rock, underground structure, interaction of soil and structure, and groundwater</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• not-published source code</li> <li>• lack of application examples</li> </ul>

필요한 모든 인자를 고려하지는 못하므로, 적용하고자 하는 침투문제에 대한 기본적인 검증(주로 계수검증, 격자간격, 시간간격 등) 과정을 걸쳐 적용하여야 한다. 이상적인 조건에 대한 검증은 기존 연구결과와의 비교를 통해 검토하며, 실제물리 현상과 같이 복잡한 조건에 대해서는 수리실험을 토대로 검토한다.

### 3.1 정상 침투조건

국내 침투해석에 가장 활용도가 높은 프로그램은 SEEP/W, Z\_SOIL, 그리고 GMS 패키지에 포함되어 있는 SEEP2D 이다. 본 연구에서는 활용도가 높은 침투해석 프로그램의 해석결과와 상관관계를 검토한다. 수치

및 해석모형에 적용한 단면은 Fig. 2와 같으며, 해석모형과의 결과 비교를 위하여 제방하단의 지반은 불투수성으로 가정하였다. 각 수치모형의 해석결과를 비교하기 위하여 동일한 격자 및 경계조건(Table 3 참조)을 적용하였으며, 해석모형은 Schaffernak-Van Iterson과 L. Casagrande 해석법을 적용하였다. 제시된 해석모형은 다양한 가정 아래서 개발되었으므로, 이러한 가정사항을 고려하여 해석조건을 설정하였다. 해석모형에 적용된 조건은 정상침투, 포화 투수계수, 대칭단면, 그리고 단일토양 조건이며, 수치모형 중 SEEP2D의 경우 모든 조건이 동일하나, SEEP/W와 Z\_SOIL의 경우에는 비포화 투수계수 조건을 적용하였다.

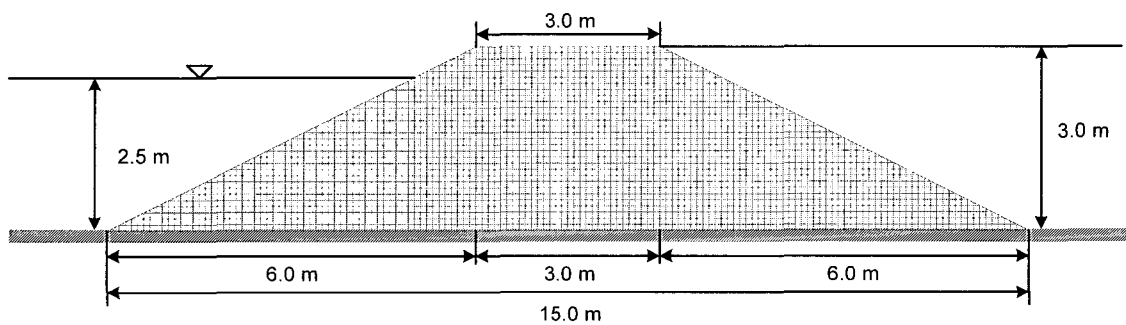


Fig. 2. Applied model and FEM elements

Table 3. Boundary conditions

Application models	Number of elements ( $dx, dy=0.1$ m)	Boundary condition (saturated-steady)	permeability coefficient (silty sand)
SEEP/W, Z_SOIL, SEEP2D	quadrilateral elements : 2700 triangular elements : 60	water height : 2.5 m impermeable foundation	$k_x : 5.0 \times 10^{-7}$ m/sec $k_y : 5.0 \times 10^{-7}$ m/sec

Fig. 3은 각 침투해석에 의한 침윤선 결과를 도시한 것이다. 정상 침투조건인 경우, 침투모형과 해석모형 모두 제방내부로의 침윤선 위치는 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 제내지 측에서 해석모형의 침윤선이 높게 나타났으며, 이러한 원인은 해석해의 경우 포물선방정식을 적용하여 침윤선 위치를 결정하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 4는 바닥면 압력수두 결과를 이용하여 해석모형과 수치모형간의 상관관계를 도시한 것이다. 모형간의 상대 RMS(Root Mean Square)오차는 각각 0.76 %(해석모형-SEEP/W), 1.24 %(해석모형-Z\_SOIL), 그리고 3.04 %(해석모형-SEEP2D)로 해석모형과 수치모형의 결과는 전반적으로 일치하였다. 즉, 정상 침투조건인 침윤선 수치모형 해석결과는 매우 높은 정확도를 가지는 것으로 나타났다.

침투해석 비교에 있어 중요한 인자는 유출면 길이와 유출량이다. 유출면 길이와 유출량은 각각 수두(압력)와 동수경사에 지배되어지는 인자이며, 이러한 인자를 이용하여 침투해석 결과의 적합성을 분석할 수 있다. Table 4에 제시된 유출면 길이와 단위 유출량 결과를 살펴보면, SEEP/W와 Z\_SOIL은 해석모형보다 30~50 %정도 과대평가하고 있으며, 포화조건을 적용한 SEEP2D가 해석모형과 가장 유사한 결과를 도출하고 있다. 기존의 연구에서도 유사한 결과가 도출되는 것을 확인할 수 있다. Bowles(1984)은 일반적인 제방에 대해 2가지 개략방법(approximate method)을 적용하여  $1.10 \times 10^{-3}$ 과  $1.28 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ 과 같은 침투유출량을 산정하였다(비포화 조건 무시). Crespo(1993)과 Chapuis et al.(2001)은 각각 295개와 1145개의 격자를 구성하여  $1.41 \times 10^{-3}$  과  $1.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ 의 침투유출량을 산정하였다(비포화 조건 고려).

이와 같이 해석모형이나 개략방법에 의한 결과가 비포화 조건을 고려한 수치모형 결과보다 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이러한 오차의 원인은 해석모형과

수치모형의 적용조건의 차이(포화-비포화)와 격자간격 및 형상에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 격자를 조밀하게 구성함으로써 간극수압( $p_w$ )의 함수인  $k(p_w)$ 와  $\theta(p_w)$ 의 수렴문제를 해결하여 보다 정확한 침투해석이 가능할 것으로 판단된다.

최대 유속과 최대 동수경사는 제방의 침투 안정성 평가에 있어 중요한 인자이다. Table 4에서 각 수치모형에 의한 최대 유속과 동수경사는 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 세립토의 경우 한계동수경사가 0.5~0.8(한국수자원학회, 2005)인 것을 감안하면, 수치모형의 결과는 양호한 제방재료( $k=5.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ )를 적용하였음에도 불구하고 매우 크게 산정되었다. 이러한 원인은 제방에서 실제 발생하는 물리조건인 비정상 침투조건을 적용하지 않고, 정상 침투조건을 적용하여 발생된 문제이다. 즉 제방에서의 침투해석을 위해서는 SEEP/W와 Z\_SOIL과 같이 비정상 침투조건을 모의할 수 있는 수치모형을 적용하는 것이 바람직하며, 댐과 같이 정상 침투조건인 경우 SEEP2D와 같은 정상 침투조건인 수치모형을 적용하는 것이 효율적일 것으로 보인다.

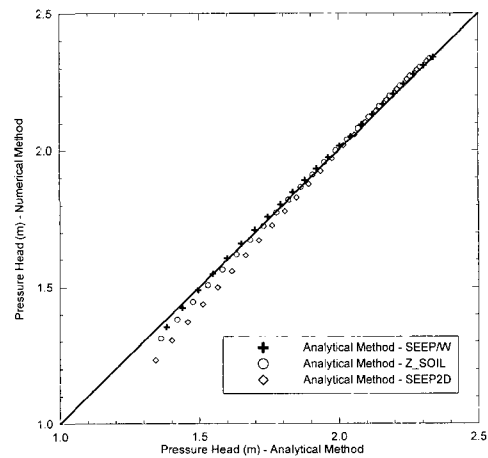


Fig. 4. Correlation of numerical models

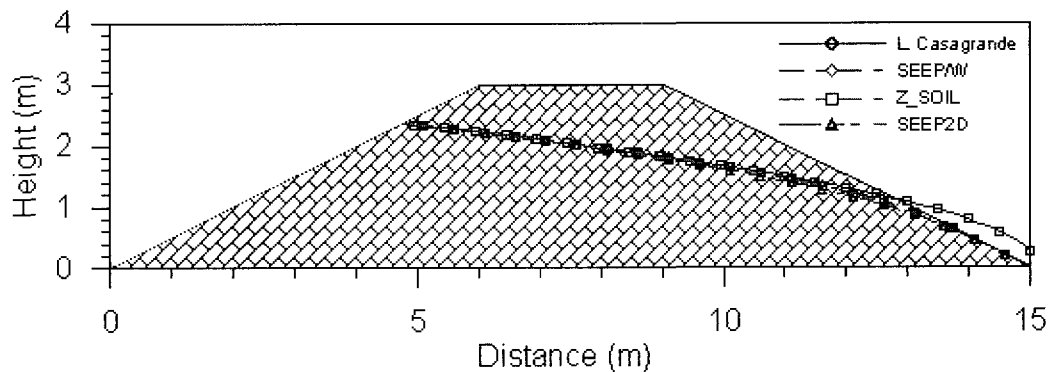


Fig. 3. Lines of seepage

Table 4. Results of steady-state seepage analysis

Model	SEEP/W	Z_SOIL	SEEP2D	Schaffernak	Casagrande
Length of seepage exit face(m)	2.12	2.12	1.68	1.41	1.28
Flow per unit length (m <sup>2</sup> /sec)	1.8×10 <sup>-7</sup>	1.8×10 <sup>-7</sup>	1.5×10 <sup>-7</sup>	1.4×10 <sup>-7</sup>	1.2×10 <sup>-7</sup>
Max. velocity (m/sec)	2.9×10 <sup>-7</sup>	3.1×10 <sup>-7</sup>	2.9×10 <sup>-7</sup>	N.A.	N.A.
Max. hydraulic gradient	0.58	0.62	0.58	N.A.	N.A.

3.2 비정상 침투조건

홍수시 실제 침투현상은 수위가 변화하는 비정상 침투조건이며, 비정상 침투해석은 정상 침투해석에 비해 많은 인자를 필요로 한다. 이러한 비정상 침투해석에 적용되는 인자의 영향을 분석하는 연구와 수치모형의 적합성을 검증할 필요가 있다.

3.2.1 침투실험

실험장치는 흐름이 없는 상태에서 소규모 정상 및 비정상 침투실험을 시행할 수 있는 수로를 제작하였다. 주요 실험장치로는 계측용 컴퓨터, 수조 저면에서 압력 변화량을 측정할 수 있는 반도체식 간극수압계, 그리고 계측한 측정치를 자동으로 기록할 수 있는 자동기록장치(data logger: Datataker DT500-S3, Australia), 그리고 유량공급장치로 구성되어 있다(Fig. 5 참조). 실험수로의 제원은 길이 5 m, 폭 0.8 m, 그리고 높이 0.3 m이며, 수로 중앙에 제방을 설치하여 침윤선 변화를 계측할 수 있도록 구성하였다(Fig. 6 참조). 수로에는 5개의 간극수압계를 위치시켰으며, 각 계측기기의 간격은 0.1~0.2 m이다. 제방법선 방향으로의 흐름은 없는 것으로

가정하였으며, 제외지의 유량공급 조절이 가능한 파이프를 사용하여 비정상 침투조건을 모의할 수 있도록 하였다. 침투 수리실험에 적용한 재료는 하천설계기준·해설(한국수자원학회, 2005)에서 제시한 양호한 재료기준에 부합하도록 선정하였다. 제방모형 축조 후 단위중량 및 함수비 등을 측정하였으며, 투수계수는 동일조건에서의 시료를 성형하여 측정하였다. Table 5는 침투 수리실험에 적용한 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

침투 수리실험을 위해 적용한 제방모형은 높이는 0.12 m, 하부 폭 0.6 m, 둑마루 폭 0.12 m로 설치하였으며, 제방 하단부에 0.1 m 간격으로 4개의 간극수압계를 설치하여 제방내부의 간극수압(침윤선)을 계측하였다. 침투조건은 최대 0.12 m 수위를 가지는 비정상 침투조건을 적용(Fig. 7 참조)하였으며, 실험에 적용한 제방모형 및 계측기 설치 위치 개요도는 Fig. 8과 같다.

3.2.2 침투 수치모형

본 연구에 적용한 수치모의는 실무에서 가장 널리 사용되고 있는 SEEP/W와 Z\_SOIL로 제방단면은 수리실험 조건과 동일하게 적용하였으며, 삼각 및 사각 격자 456개로 격자를 구성하였다. 사각격자의 경우 크기

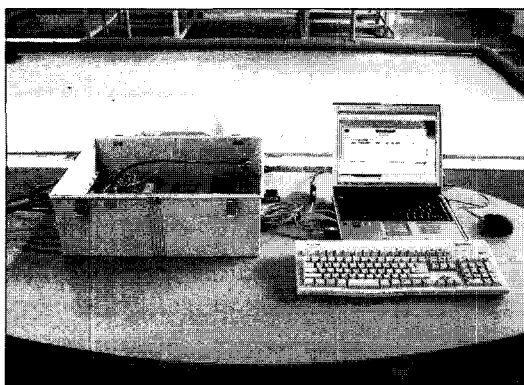


Fig. 5. Automatic measuring system

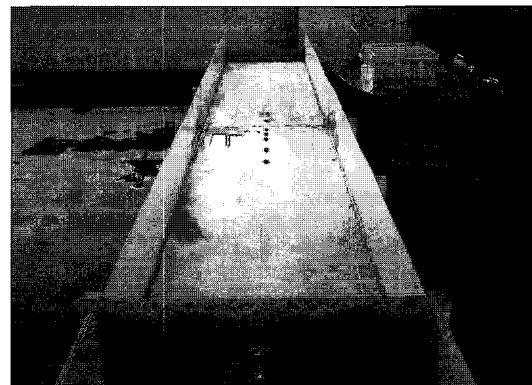


Fig. 6. Experimental equipment

Table 5. Material properties

USCS	D <sub>50</sub>	wet unit weight	dry unit weight	porosity	saturated hydraulic conductivity
SM	0.42 mm	2.046 g/cm <sup>3</sup>	1.689 g/cm <sup>3</sup>	0.37	8.9×10 <sup>-8</sup> m/s

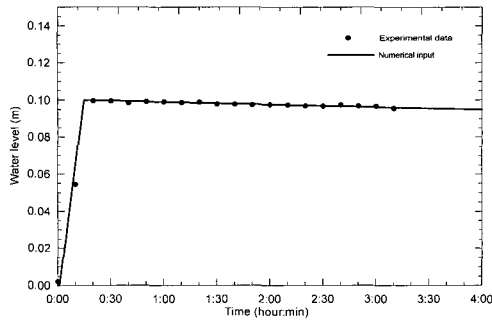


Fig. 7. Water level

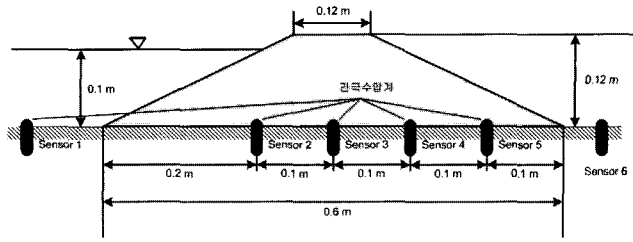


Fig. 8. Schematic sketch of experiment

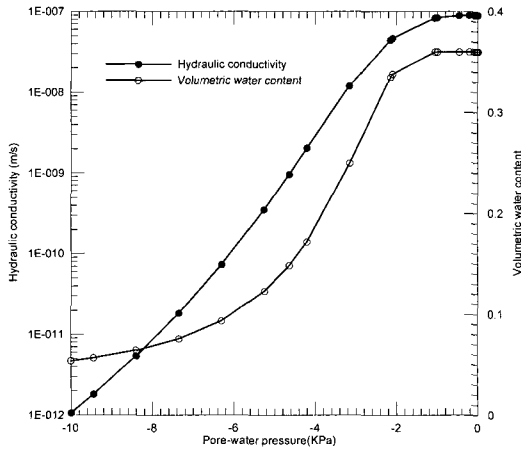


Fig. 9. Hydraulic conductivity and volumetric water content functions

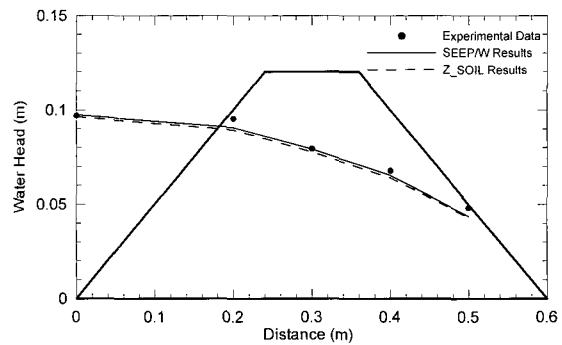


Fig. 10. Result of water head(t=180min)

는 가로와 세로가 각각 0.01 m가 되도록 구성 하였다. 수치모의 시간간격은 1분을 설정하였으며, 총 4시간 동안 침투가 발생하도록 설정하였다. 또한 수위조건은 Fig. 7과 같이 침투실험과 동일한 조건을 적용하였다. 체적함수량은 간극률과 포화도의 곱으로 정의되며, SEEP/W에서는 Fig. 9와 같은 간극수압의 함수로 설정하였고 Z\_SOIL에서는 물성치를 고려한 간극률을 적용하였다. SEEP/W의 체적함수량 설정은 재료의 입도분포를 고려한 MK-Modified Kovacs기법(Geo-slope International Ltd., 2001)을 적용하였다. 투수계수는 포화도인 경우 재료실험 결과인  $8.9 \times 10^{-8}$  m/s를 적용하였으며, 비포화도의 경우에는 van Genuchten(1980)이 제시한 투수계수 추정기법을 적용하였다(Fig. 9 참조).

### 3.2.3 결과 비교

Fig. 10은 침윤선의 변화가 없는 시간(t=180분)에서의 바닥면 수두를 도시한 것이다. 수치모형에 의해 계산된 수두는 실험결과보다 다소 작게 산정되었으나, 오차범위(10 % 이내)가 크지 않아서 그 차이는 미미할 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 10은 정상 침투조건에 해석결과를 의미하는 것으로 실제 물리현상을 파악하는 데

는 한계를 가지고 있다. 즉, 실제 제방 침투의 경우 수위와 토질조건 등에 따라 침투현상이 변화하기 때문에 정상 침투조건이 아닌 비정상 침투조건에 해석결과를 이용하여 시간에 따른 침투양상을 분석하는 것이 바람직하다.

Fig. 11은 실험 및 SEEP/W에 의해 산정된 바닥면에서의 시간에 따른 수두변화를 도시한 것이다. 전술한 바와 같이 수두변화가 없는 시간(150분 이후)에서의 수치모의 결과는 매우 높은 정확도를 나타내고 있다. 수두가 변화하는 구간(0~150분)에서의 수치모의 결과는 상대적으로 낮은 정확도를 나타내고 있는 것으로 파악되나, 수치모의 입력자료를 보정하지 않고 재료의 물성치를 근거로 설정한 해석결과임을 감안하면 매우 높은 정확도를 보이는 것이다. 시간에 따른 수두값의 오차가 발생한 원인은 재료실험 결과와 격자간격 및 형상 등에 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 재료실험 결과는 직접적으로 투수계수와 체적함수량에 영향을 미치게 되어 수치해석 결과를 크게 변화시키는 것으로 파악된다. 그러나 현재 실무에서 적용하고 있는 현장 재료실험 결과는 불확실성이 높으며, 이러한 불확실성을 보완하기 위해 소규모 모형실험을 통한 계수검증이 필요하다.

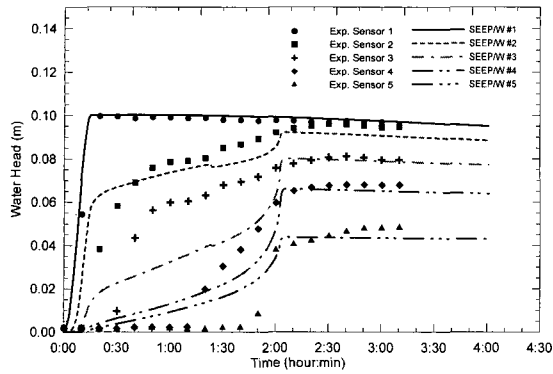


Fig. 11. Numerical analysis by SEEP/W

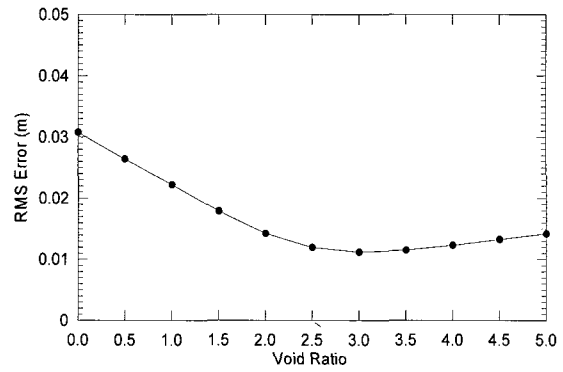


Fig. 12. Sensitivity analysis of void ratio

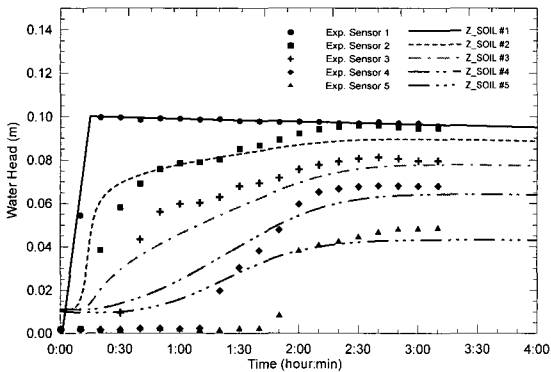


Fig. 13. Numerical analysis by Z\_SOIL

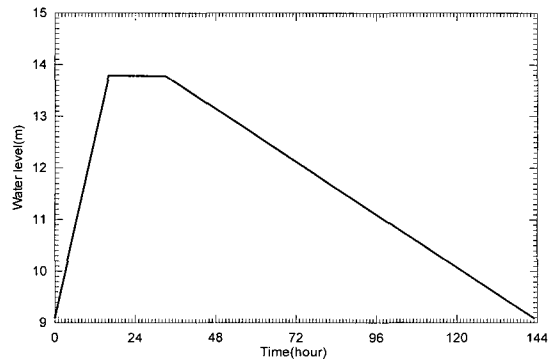


Fig. 14. Flood wave

Z\_SOIL은 간극수압의 함수인 투수계수와 체적함수량을 설정하는 대신 포화 투수계수, 간극비, 잔여 포화도, 그리고 침투계수(seepage parameter) 등을 입력하여 침투양상을 모의한다. 침투계수는 물리적 의미가 없는 계수로 간극수압에 따른 포화도 형상을 변화시켜 투수계수에 영향을 미친다. 이러한 투수계수는 토질특성을 반영한 값으로 각 토질에 따라 적절한 값이 설정되어야 한다. 그러나 각 토질특성에 따라 제안된 값의 범위가 존재하지 않으므로 Z\_SOIL에서 제시하는 기본값을 적용하였다. 본 연구에서는 침투계수에 대한 민감도를 배제하고 적절한 비정상 침투조건을 해석을 시행하기 위해 체적함수량과 상관관계를 가지고 있는 간극률에 대한 민감도 분석을 시행하였다. Fig. 12는 Sensor5의 간극률에 따른 수두오차를 도시한 것이다. 그림에서 최소 오차가 발생하는 간극률은 0.3으로 재료 실험 결과의 간극률 0.37과는 다소 차이가 있다. 이러한 오차는 입도분포 등 재료 물성치를 고려하지 못하였고, 특히 부정확한 침투계수의 설정에 기인하는 것으로 판단된다. Z\_SOIL을 적용하기 위해서는 침투계수 등 다양한 계수에 대한 분석 및 검증이 절실히 요구된다. Fig. 13은 수정된 간극률을 적용하여 산정된 바닥면의 수두 결과이다. SEEP/W의 해석결과에 비해 실제 물리

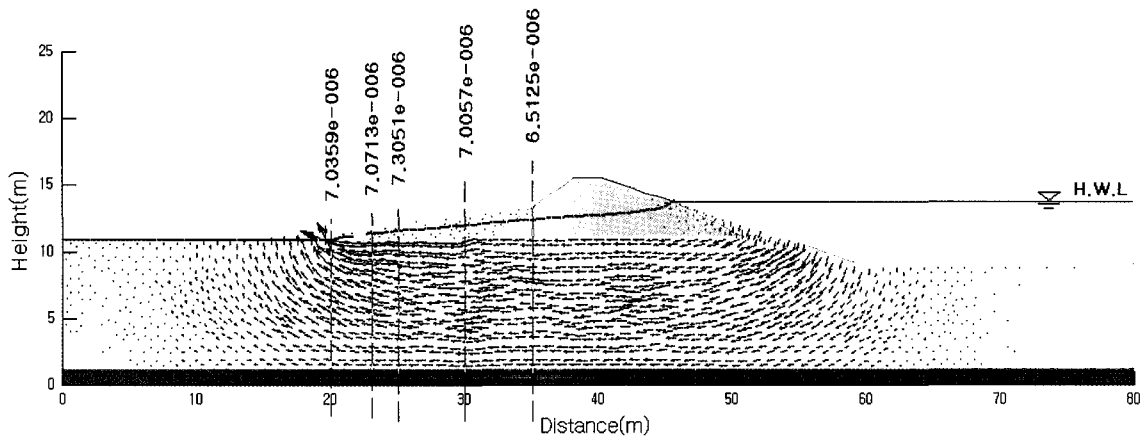
현상을 적절히 모의하고 있는 것으로 판단되나, 초기 시간에서의 수두값은 실험결과와 차이를 나타내고 있다. 이러한 영향은 초기상태(initial state) 설정 오류에서 기인하는 것으로 판단된다.

### 3.3 정상-비정상 침투조건 비교

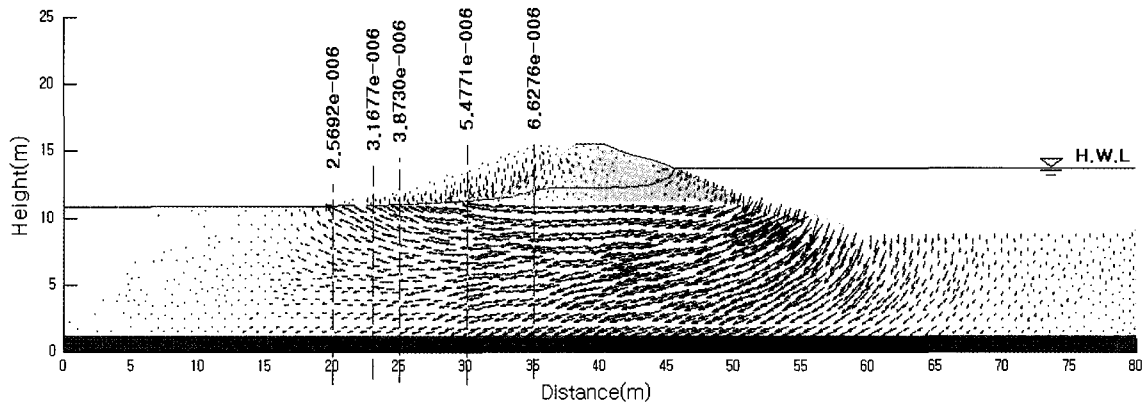
하천설계기준·해석(한국수자원학회, 2005)에서는 비정상 침투조건에 의해 제방 침투 안정성 해석을 시행하도록 규정하고 있으며, 실제 홍수시 침투현상 역시 비정상 침투조건 이다. 이러한 비정상 침투해석은 정상 침투해석에 비해 상대적으로 작은 설계 외력을 도출하여 경제적인 설계를 가능하게 하는 반면, 안전측면에서는 불리하다. 이러한 정상 및 비정상 침투조건에 의해 해석된 결과가 어느 정도 편차를 나타내는지 검토하여, 적절한 설계 안전을 설정에 도움이 되도록 한다.

실제 낙동강 고아지구 제방을 대상으로 침투해석을 시행하였으며, 해석 단면은 Fig. 15와 같다. 본체와 성토체의 투수계수는 각각  $2.92 \times 10^{-7}$ 과  $1.00 \times 10^{-6}$  m/s이며, 지반 상하층의 투수계수는 각각  $8.80 \times 10^{-6}$ 과  $1.15 \times 10^{-5}$  m/s이다. 비정상 침투조건을 적용하기 위해서는 홍수과형을 설정하여야 하며, 윤광석과 여규동(2004)의 연구결과를 활용하여 Fig. 14와 같은 홍수과형을 설정하였다.





(a) Steady condition



(b) Unsteady condition

Fig. 15. Numerical analysis results

홍수과정은 홍수기간이 대략 6일정도이며, 최대 홍수위가 17시간 동안 지속되도록 설정되었으며, 이러한 조건은 실제발생할 수 있는 사상보다 극한조건이다.

Fig. 15(a)는 정상 침투조건에 의해 산정된 침윤선, 유속, 그리고 각 단면을 통과하는 유량을 도시한 것이며, Fig. 15(b)는 가장 극한의 비정상 침투조건을 나타내는 시간( $t=33$ 시간)에서의 해석결과이다. Fig. 15의 침윤선 해석결과를 살펴보면, 정상 침투조건에서는 제내지측 사면까지 침윤선이 발생한 것을 알 수 있으나, 비정상 침투조건에서는 제내지측 사면까지 침윤선이 진행되지 못하였다. 뒷비탈기슭 부근 단면에서의 침투유출량은 각각  $7.07 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{sec} \cdot \text{m})$ 와  $3.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{sec} \cdot \text{m})$ 로 산정되었다. 또한 제내지측 최대 유속은 각각  $1.20 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ 와  $3.71 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 로 산정되었으며, 최대 동수경사는 각각 0.18과 0.05로 산정되었다. 즉, 정상 침투조건에 의해 해석된 결과는 비정상 침투조건에 의해 해석된 결과보다 200~350%정도 크게 산정되었

다. Fig. 16은 시간에 따른 동수경사와 유속의 변화를 도시한 것이다. 초기부분의 진동은 초기강우에 의해 제내지측에서 제외지측으로 침투되는 현상에 의해 발생하는 것으로, 24시간 후에는 제외지측으로의 침투가 서서히 시작되는 것을 알 수 있다. 또한 비정상 침투해석 결과가 정상 침투해석 결과와 유사해 지는 시기는 Fig. 16에 제시된 것과 같이 6일 이상 최고 홍수위를 지속시켰을 때 발생하는 사상이다. 즉, 비정상 침투해석에 최고 홍수위 조건을 6일 이상 지속시키면 정상 침투해석과 유사한 결과를 도출할 것이나, 실제사상에서 6일 이상 최고 홍수위가 지속될 가능성은 극히 희박할 것으로 판단된다. 따라서 정상 침투해석 결과를 토대로 침투보강 공법을 설계할 경우 안전계수는 대략 2.0~3.5를 적용한 것과 동일한 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

따라서 침투 안정성 수치해석을 시행할 때에는 현장 및 실내실험을 토대로 정확한 인자를 도출하고, 적절한 격자간격과 형상 및 경계조건을 적용할 필요가 있다.

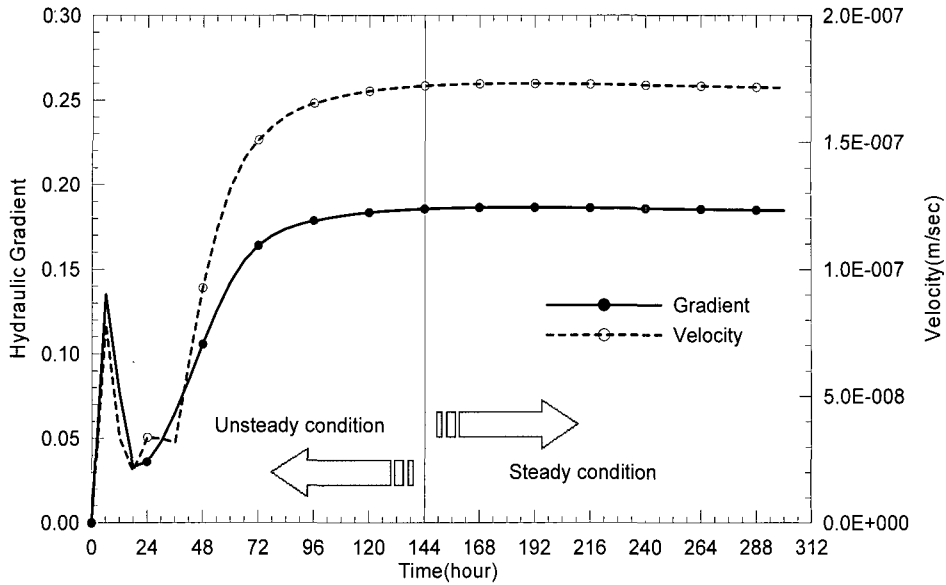


Fig. 16. Variation of hydraulic gradient and velocity by time

또한 정상 및 비정상조건 모두에 대한 침투해석을 시행하여 그 결과를 비교하도록 하며, 비교된 결과와 현장 여건 등을 토대로 침투에 대한 설계 안전율을 설정하여 침투 해석 및 보강기법을 적용하도록 한다.

#### 4. 결 론

비포화 영역의 침투거동을 포함하여 실제 물리현상을 비교적 손쉽고 유사하게 해석하기 위해서 수치해석기법을 이용한다. 그러나 각 수치해석기법은 적용상 주의점 및 한계조건을 가지고 있으므로, 정확한 침투해석을 위해서는 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 국내 적용 중인 침투 수치모형의 적합성 검증과 수치모형을 적용할 때의 유의사항을 사용자적 입장에서 검토하였다.

- (1) 정상 침투조건인 수치해석 결과는 해석해 결과에 비해 다소 높은 값을 나타내었으나, 적용한 모든 수치모형의 적합성은 양호한 것으로 판단된다. 그러나 제방 침투해석을 시행할 때에는 실제 수위변화 현상을 고려할 수 있는 SEEP/W와 Z\_SOIL과 같은 비정상 침투해석 모형을 적용하는 것이 바람직하며, 댐과 같은 구조물에는 SEEP2D와 같이 비교적 적용이 용이한 정상 침투해석 모형을 이용하여 침투해석을 시행하는 것이 효율적이다.
- (2) 비정상 침투조건 실험 및 수치모의 결과 적용한 수치모형 모두 최종 침투시간과 침윤선 높이와

같은 물리현상을 적절히 모의하는 것으로 나타났으나, 수두가 변화하는 시간에서의 해석결과는 상대적으로 낮은 정확도를 나타내고 있다. 이러한 원인은 SEEP/W의 경우 비포화 조건에서의 간극수압에 따른 투수계수와 체적함수량 설정에 기인하는 것으로 나타났으며, Z\_SOIL의 경우 간극비, 잔여 포화도, 침투계수 등에 기인한다. 이러한 오차를 제거하기 위해서는 재료실험과 모형실험을 통한 인자검증이 필요한 것으로 판단된다.

- (3) 정상 침투해석 결과는 비정상 침투해석 결과보다 200~350%정도 크게 산정되었으며, 침투에 대한 보강기법 설계를 시행할 때에는 정상 및 비정상 침투해석 결과를 비교하여 적절한 안전율을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 침투해석 수치모의의 유의사항을 검토하여 해석결과에 대한 불확실성과 위험요소를 제거하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

김상규, 김영목 (1991). "강우로 인한 사면 불안정",

- 대한토질공학회 논문집, 대한토질공학회, Vol 7 (1), pp. 53-64.
- 신방웅, 강종범 (1999). “모형실험에 의한 토공구조물의 침투거동 특성”, **한국산업안전학회지 논문집**, 한국산업안전학회, Vol 14(4), pp. 158-167.
- 신방웅, 이봉직 (1993). “수평흐름에 의한 토체체의 비정상침투에 관한 실험적 연구”, **대한토목학회 학술발표회 논문집(I)**, 대한토목학회, pp. 397-400.
- 윤광석, 여규동 (2004). “하천제방 침투해석을 위한 한강 수계 설계홍수과형 결정”, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회.
- 한국수자원학회 (2005). 하천설계기준·해설.
- 中島秀雄 (2003). 圖說 河川堤防, 技報堂.
- Bardet, J. P. and Tobita, T. (2002). “A practical method for solving free surface seepage problems”, *Computers and Geotechnics*, 29(6), pp. 451 - 475.
- Billstein, M., Svensson, U., and Johansson, N. (1999). “Application and validation of a numerical model of flow through embankment dams with fractures: Comparison with experimental data”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 36, pp. 651 - 659.
- Bowles, J.E. (1984). *Physical and geotechnical properties of soils*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- Buckingham, E. (1907). *Studies on the movement of soil moisture*, Bull. 38, United States Department of Agriculture, Bureau of Soils, Washington D.C., 61.
- Casagrande, A. (1937). “Seepage through dams”, *Journal of the New England Water Works Association*, Vol 51, pp.131 - 172.
- Chapuis, R.P. (1990). “Sand-bentonite liners: field control methods”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 27, pp. 216-223.
- Chapuis, R.P., Chenaf, D. Bussiére, B. Aubertin, M., and Crespo, R. (2001). “A user’s approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 38, pp. 1113 - 1126.
- Cividini, A. and Gioda, G. (1990). “On the variable mesh finite element analysis of unconfined seepage problems”, *Geotechnique*, Vol 40(3), pp. 523-526.
- Crespo, R. (1993). *Modélisation par éléments finis des écoulements à travers les ouvrages de retenue et de confinement des résidus miniers*. M.Sc.A. thesis, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, V. Dalmont, Paris.
- Desai, C.S. (1973). “Approximate solution for unconfined seepage”, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol 99, pp. 71-87.
- Dupuit, J. (1863). *Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, Dunod, Paris.
- Forchheimer, Ph. (1886). “Über die ergebigkeit von brunnen anlagen und sickerschlitzen”, *Zeitschrift des Architekten-und Ingenieur Vereins zu Hannover*, Vol 32, pp. 539-564.
- Kozeny, J. (1927). “Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden”, *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, Vol 136(2a), pp. 271-306.
- Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A. (1970). “Finite element method of analyzing steady seepage with a free surface”, *Water Resources Research*, Vol 6(3), pp. 889-897.
- Schaffernak, F. (1917). *Über die Standsicherheit durchlässiger geschütteter damme*, Allgem, Bauzeitung.
- Shaw, F.S. and Southwell, R.V. (1941). “Relaxation methods applied to engineering problems;VII. Problems relating to the percolation of fluids through porous materials”, *Proceedings of the Royal Society A*, Vol 178, pp. 1-17.
- Taylor, R.L. and Brown, C.B. (1967). “Darcy flow with a free surface”, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, pp. 25-33.

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik*, Franz Deuticke, Vienna.

US Army Corps of Engineers (1986). *Seepage analysis and control for dams*, EM 1110-2-1901.

van Genuchten, M.Th. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic

conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol 44, pp. 892 - 898.

(논문번호:05-135/접수:2005.10.17/심사완료:2006.01.24)