

역경사 형태를 가진 방조제 성토층 단면에서의 침출현상 연구

A Study on Seepage Characteristics in Case of Seaward Seepage Through Sea-dike

홍 병 만*
Hong, Byung Man

Abstract

In design and management of sea-dikes, engineers need to study various transient seepage conditions through dikes not only for the sea water infiltration into dikes due to cyclic rises of sea water level also for the seepage flow out from dikes toward the sea due to cyclic drawdown of sea water level. Characteristics of seepage flow toward the sea from dikes are more complicated than as known and remained unclearly. The case of such seepage flows may be explained by figuring out seepage characteristics in filter as a part of sea-dikes. Filters in most sea-dikes in Korea are inevitably placed with reversely inclined shape due to field construction conditions. Most computer programs for seepage analysis based on the various numerical methods give practically acceptable results, but for the case of reversely inclined section of filters any verification to apply them might be needed. In this study, large scaled model tests were executed to verify and understand seepage flows through earth-filled sea-dikes. The results from numerical analysis and model tests show some remarkable differences in pore pressure distribution under cyclic changes of sea water level, and some of the results need to be considered in design and construction practices with further study.

I. 서 론

방조제와 흙댐은 모두 제방의 일종으로서 상하류 또는 내외측에서 서로 다른 수리환경을 제공하는 측면에서는 유사한 기능을 가지고 있으나 축조방법, 단면의 구조, 제체내부에서의 침투류의 흐름 및 간극수압의 분포, 축조후 제방의 역할 등에는 큰 차이점이 있다.

방조제는 통상 해수를 그대로 둔채로 공사를

해야하므로 흙댐의 경우와는 축조방법이 다르며 축조시 사석(riprap) 또는 콘크리트 블록 등을 대량 투하하여 해수의 흐름을 차단하고 사석제 단면을 축조한 후 이에 연하여 필터(filter)층과 성토제를 쌓아서 제체를 형성하므로 흙댐과 구조적으로도 차이가 있다. 방조제의 사석층은 거의 투수층이므로 파랑이나 외측 수위변화에 따른 성토재의 흡출을 방지하기 위해서 사석제와 성토제 사이에 필터층을 두게 되는데 Fig. 1에서와 같이

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : 방조제, 침출특성, 조위변동, 모형시험, 필터

II. 수위강하시 제체내 간극수 유출

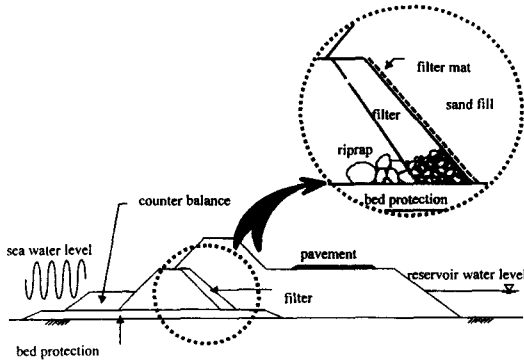


Fig. 1. Sea-dike Cross Section and Water Level

방조제 외측사면에 대하여 역경사 형태를 취하게 된다. 필터층과 인접한 성토층 내부에서는 파랑이나 조위의 변화에 의한 간극수두차에 의하여 간극수가 필터층을 통하여 유출과 유입을 반복하게 되는데 간극수의 유출속도가 과다한 경우 성토재료의 계속적인 유실로 인하여 제체의 안전에 손상을 주는 경우도 있다. 특히 입경이 작은 사질토를 성토재료로 사용하는 경우, 입자간의 응집력이 약하므로 이와같은 문제에 매우 취약하다. 방조제 성토층에서 필터층으로 간극수가 유출되는 상황은 성토단면의 경사도에 따라 달라지게 되는데 성토층 사면이 바닥과 이루는 각이 90°보다 큰 정상경사인 경우, 간극수의 유출은 외해측수위, 수위 강하속도 등에 따라 간극수의 최대유출 위치가 달라지게 된다. 특히 이 경우에는 정상경사의 경우와는 달리 수심이 깊은 곳에서도 간극수의 유출이 크게 발생될 수도 있다.

본 연구에서는 외측 사면경사에 대하여 역경사 형태를 이루는(역경사) 성토층단면에 대한 모형 실험을 통하여, 외측 사면과 나란한 경사형태를 취하는(정상경사) 경우와는 다른 간극수 유출현상을 파악하여 방조제의 성토제, 필터, 필터매트의 시공에 필요한 자료를 제공하는데 연구의 목적이 있으며, 현재 시공중인 새만금 방조제를 모델로하여 분석하였다.

흙댐에서 내측 사면이 수평면과 이루는 각도는 대부분 30° 이하의 값을 가지며 구조적으로 안정된 경사형태를 취하게 되는데, 이와같은 정상경사단면에서의 간극수의 유출에 대한 추정방법은 여러가지 다양한 경우에 대하여 연구결과가 발표되었다. 수위 강하시 제체내 토립자 사이를 이동하는 부정류 흐름에 대한 간극수압의 변화에 대하여 Charles et al.(1967) 및 Arthur et al.(1971)은 투수계수, 유효간극율, 평균저수위, 간극수위, 시간 등을 사용하여 다음과 같이 표시하였다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{kH}{n_e} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, k 는 투수계수, n_e 는 유효간극율, H 는 평균저수위, h 는 (x, y) 지점에서의 간극수두, 그리고 t 는 시간을 나타낸다. 그러나 이식은 실제 현장의 경계조건과 차이가 있어서 적용이 어려우며, 유선망을 작도하여 간극수의 흐름을 추정하는 경우(Cedegren, 1967) 많은 유선망을 정밀하게 작도하여야 하므로 정확한 결과를 얻기가 어렵다. 또한 Shannon(1948)은 Casagrande가 비행장 활주로에서 부정류흐름의 배수현상을 연구하기 위하여 적용한 근사적인 해석방법을 균질의 소단이 없는 흙댐에 대하여 적용하였으며, Charles et al. (1967)은 모형실험을 통하여 Shannon의 결과를 검증하여 유로선이 쌍곡선 형태와 유사한 것을 밝혀냈다. 일반적으로 제체 성토층이 균질하고 정상경사단면인 경우에는 수위강하시 저수위 부근에서 간극수가 다량 유출되고 수심이 깊어짐에 따라 유출은 줄어들게 되는데 이러한 현상은 제체사면과 바닥면이 이루는 각도에 따라 정도의 차이가 있다. 경사각이 작은 경우 수심이 깊은 지점에서는 간극수의 유출이 보다 작아지고 반대로 경사각이 커지는 경우 간

극수의 유출은 증가하게 된다.

방조제 단면에서는 사석체를 시공한 후 필터층과 성토층을 시공하게 되므로 성토층과 필터재의 접속부 사면은 흠뻑과는 달리 역경사 형태가 되는데 역경사 사면에서 수위강하시 간극수 유출특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 것으로 조사되었으며, 다만 내측사면이 수직인 경우에 대한 연구결과에 의하면(Kovacs G., 1981), 간극수의 유출은 정상적인 경사단면과는 달리 유출면 전체에서 깊이에 관계없이 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 역경사 단면인 경우 수위강하시 간극수 유출특성은 정상경사 단면의 유출특성과는 많은 차이가 있을 것으로 추정된다.

III. 모형시험 및 수치해석

1. 재료특성

가. 재료의 입도

Fig. 2는 성토재인 해사와 자갈필터재의 입도분포를 나타낸 것이다. 새만금지구 방조제 성토재는 인근지역 바다의 해사로 준설하여 성토하므로 준설시 세립자의 유실이 예상되는데 본 실험에 사용한 성토재는 현재 시공된 성토재를 채취한 것으로서 #200번체 잔류량은 97%이며 D_{10} 은 0.09mm, 간극비(e_0)는 0.5(현장간극비=0.46)이다. 자갈필터재의 경우 현장에서는 3.0~70.0mm의 입도를 포설하였으나 모형에서는 3.0~14.0mm의 입도를 사용하였다. 사석재는 현장에서 all

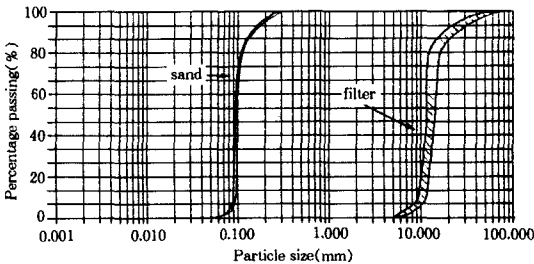


Fig. 2. Gradation curve for sand and gravel filter

size 재료를 이용했지만 투수성이 다른 구성재료와 비교할 때 매우 크기 때문에 모형내에서는 완전투수성이 될 수 있도록 10.0cm 이상되는 석재(갯돌)만을 사용하였다.

나. 재료의 투수계수

실내 변수위투수시험결과 성토재의 투수계수(k)는 $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 이며, 자갈필터재의 투수계수(k)는 정수위투수시험 결과 $6.54 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 이고 부직포 필터매트의 투수계수는 $3.0 \sim 7.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 로서 자갈필터재의 투수계수와 비슷한 것으로 측정되었다. 사석재의 투수계수는 모형시험을 통하여 측정하였는데 사석재 내에서 흐름을 층류로 가정할 경우 53.0cm/s인 것으로 나타났다.

2. 모형시험

가. 모형제원

방조제 단면내의 간극수의 2차원적 흐름(2-dimensional flow)으로 가정할 때 외수위(조위) 강하시 간극수는 방조제 수직 단면상에서 이동하며 방조제 종단방향의 흐름은 없는 것으로 가정할 수 있다. 모형실험에서는 역경사 단면에 대한 침투현상을 보다 정확하게 파악하기 위하여 비교적 큰 축척의 모형을 제작 설치하였으며, 외수위의 변화는 개폐속도 조절이 가능한 가동웨어(movable weir, Fig. 3의 A)를 통하여 재현하였다. 이와 같은 가정하에서 높이 1.5m, 폭 0.8m, 길이 12.0m, 두께 18cm의 콘크리트 구조물을 제작하여 그 내부에 방조제 모형을 설치하였으며 방조제 모형의 단면제원은 현재 축조중인 새만금

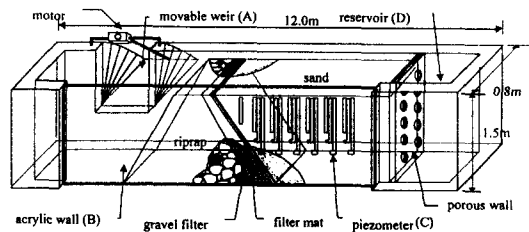


Fig. 3. Model tank

1호 방조제(전북 군산)단면의 대조위차에 대하여 약 1/10 정도의 축척을 갖도록 하였다. 필터매트는 현장의 일반 물막이 구간에서는 3.0tf/m의 인장응력의 필터를 사용하였지만 모형시험에서는 인장응력이 1.0tf/m인 필터매트를 사용하였다. 해서는 현장의 준설에 의한 축조와 같은 다짐상태가 되도록 모형내에서 물다짐을 하면서 성토하였다. 모형의 전면에는 두께 2.0mm의 아크릴판(Fig. 3의 B)을 설치하여 모형 내부의 상황을 파악할 수 있게 하였으며 방조제 외측 측면 상에 가동웨어를 설치하여 수위조절 속도를 자유로이 할 수 있게 하였다.

방조제 단면중 필터층 및 성토층에는 간극수두의 변화를 육안으로 관찰할 수 있도록 일정한 간격(20cm, 필터재와 성토재 접촉부위는 10cm)으로 격자를 구성하여 각 격자점마다 아크릴 벽체에 구멍을 뚫고 이곳을 통하여 내경 4.0mm의 투명한 관(piezometer, Fig. 3의 C)을 성토층 내부에 삽입하여 관 주위를 물이 새지 않도록 밀봉하였다. 모형에서 성토제 내측에 수직벽면(다공판)을 세우고 물을 채울 수 있는 공간(Fig. 3의 D)을 확보하여 이곳의 수위를 일정하게 유지함으로써 성토제 내측 깊숙한 곳에서의 일정한 간극수두를 모형상에서 재현할 수 있도록 하였다.

나. 시험방법

토조내에 방조제 단면을 설치한 후 내외측 수조에 물을 채우고 수시로 물을 보충하여 약 24시간 경과하면 성토층을 포화시킬수 있는데 시험에서는 piezometer내의 수두위치를 명확히 식별하기 위하여 수성물감으로 착색하였으며 내외수위는 성토제 높이와 같이 하였다. 성토제를 포화시킨후 가동웨어의 강하속도를 결정하여 외수위를 강하시키는데 외수위가 강하함에 따라 성토제 내부의 간극수가 성토층 외부로 유출되며 각 piezometer내의 수위도 각 지점에서의 간극수두의 변화에 따라 감소하게 된다. 가동웨어의 강하속도는 새만금 방조제 외수위인 군산 외항 조위장

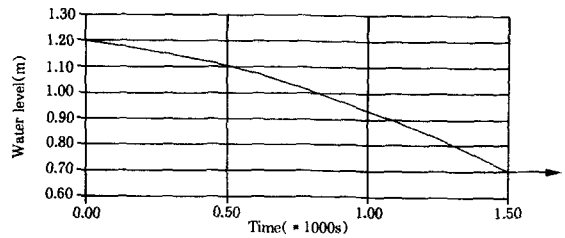


Fig. 4. Drawdown of sea water level

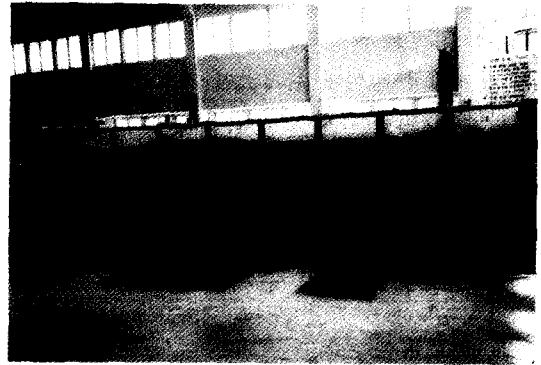


Photo 1. Model tank

속하속도와 동일하게 수조내 수위가 하강하도록 조절하였다(Fig. 4 참조). 또한 성토층내의 필터층과 인접한 지점에서의 간극수두는 외수위와 거의 동일한 속도로 변화하므로 많은 수의 piezometer에 대하여 동시에 기록할 수가 없어서 미리 예정한 시간에 사진촬영을 실시하여 결과를 분석하였다(Photo. 1 참조).

다. 모형시험조건

모형의 상사성은 상사법칙에 의하여 정의되며 이것은 모형(model)과 원형(prototype)사이의 데이터를 상호 변환할 수 있는 근거를 제공한다. 수리적인 특성의 상사성을 만족시키기 위한 조건으로는 기하학적(geometrical), 운동학적(kinematic) 및 동역학적 상사성(dynamic similarity) 등을 들수 있는데 이 세가지 상사성으로부터 원형과 모형사이의 길이, 시간, 외력에 대한 비를 결정할 수 있다. 본 모형시험의 경우 현장의 성토제와 같은 입도의 재료를 모형에 사용함으로써 모형과 원형의 간극율은 거의 같으며 따라서 모

형의 법칙에 의하여 시험에 적용한 유속값은 원형에서의 동일하고 모형에서의 외수위 강하속도는 현장에서의 해수면 강하속도와 1:1의 관계를 가진다. 따라서 본 시험은 유출량이나 침투력 보다는 필트재와 인접한 성토단면에서의 유출현상을 파악하기 위한 것으로서 모형에서의 외수의 강하속도는 현장과 같이 하여야 하며 제체내 간극수의 변화는 현장에서의 실제값과 동일한 것으로 간주할 수 있다. 모형에서의 외수위 강하속도는 새만금방조제의 대조시 평균조차를 6.0m로 가정할 때 1일 2회 조석이 발생하므로 만조에서부터 간조시까지의 시간은 6시간이므로 평균강하속도는 약 1.0m/h로 하였다. 모형시험은 평균강하속도를 1.0m/h로 하여 Fig. 4에서와 같이 1.2m에서 0.7m까지 30분 동안에 수위강하를 0.5m로 하여 제체에서의 간극수두의 변화를 5분 간격으로 piezometer의 사진을 찍은 후 분석하였다.

3. 수치해석

가. 해석개요

본 연구에서는 역경사 형태를 가진 방조제 성토층 단면에 대한 모형실험을 통하여 정상경사의

경우와는 다른 간극수 유출현상을 파악하고 수치해석 결과와 비교하였다. 분석에 사용된 수치해석 Program은 SEEP/W(Geoslope사, Canada V3.0)로써 포화상태의 흐름뿐만 아니라 간극수압-함수비 관계를 이용한 불포화상태 흐름도 해석이 가능하고 포화 및 불포화 흐름에 대하여 Darcy 법칙을 적용하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad \dots (2)$$

여기서 H : 전수두

k_x : 방향 투수계수

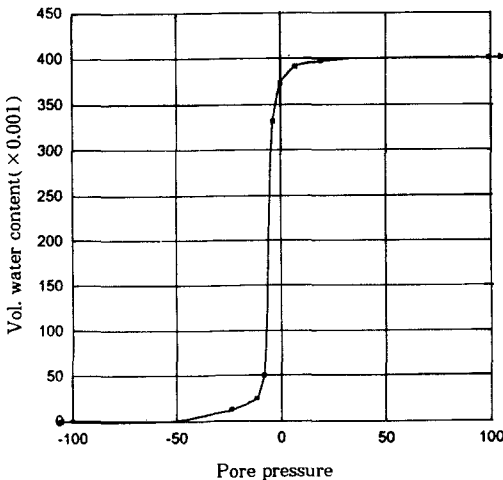
k_y : 방향 투수계수

Q : 경계면에서의 유입 또는 유출량

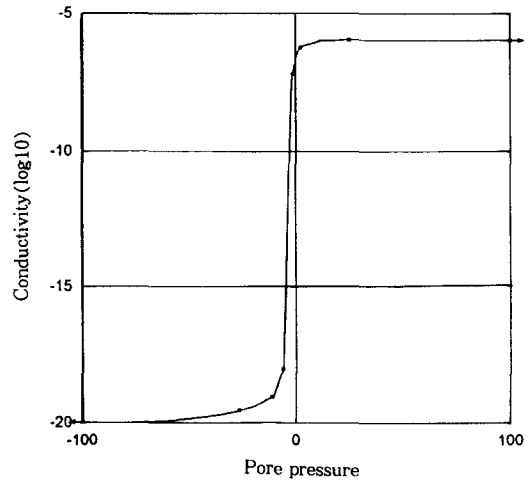
Θ : 체적함수비

t : 시간

일반적으로 침투해석에 기본적으로 고려해야 할 인자로서는 간극수압과 체적함수비 및 투수계수의 관계로서, 흙속을 흐르는 물의 일부는 흙입자사이의 간극에 저류되고 그 저류량은 간극수압과 흙의 골격특성에 관계되며 간극 전체 체적



(a) Volumetric water content-pore pressure



(b) Conductivity-pore pressure

Fig. 5. Relationship of conductivity-volumetric water content-pore pressure

(V)에 대한 비로서 나타낼 수 있는데 이 비를 체적함수비(volumetric water content)라 하며, 여기서 적용한 성토재료의 체적함수비와 간극수압의 관계는 투수계수와 입도 등을 고려하여 기존의 시험자료 중에서 물리성이 비슷한 것을 발췌하여 이용하였으며 그 관계는 Fig. 5(a)와 같다. 또한 투수계수는 함수량에 의존하여 변하고 함수량은 간극수압의 함수이므로 투수계수는 간극수압의 함수로 표시할수 있는데 이 관계는 프로그램에 내장되어 있는 Green과 Corey의 방법에 의하여 결정하였으며 성토재에 대하여 추정된 결과는 Fig. 5(b)와 같다.

나. 입력자료

사석재와 필터 및 필터매트는 성토재에 비하여 투수계수가 상대적으로 커서 성토단면내에서의 침투현상에 대한 영향은 미미할 것으로 판단되어 수치해석에서는 성토재의 물성 및 투수계수($k_x = k_y$)만을 입력하여 분석하였다. 이 때 사석부위와 필터부위는 단지 성토단면의 경사형태를 실제와 동일하게 구성해주는 역할만을 하게된다. 성토단면의 체적함수비-간극수압, 투수계수-간극수압의 관계는 Fig. 5의 관계를 그대로 이용하였다. 외수위는 모형시험의 가동웨어에 의한 수위강하속도인 Fig. 4의 강하속도를 그대로 적용하여 분석하였으며 경계면 내외수위 변화 이외의 물의 유출입은 없는 것으로 가정하였다. 해석방법은 내외측 수위를 고정시켜 성토재를 포화시킨 후 30분 동안 외측수위를 강하시켜 5분 간격으로 제체내의 흐름상태를 분석하였다.

IV. 수치해석 및 시험결과

1. 수치해석결과

Fig. 6(a)~(d)은 역경사 형태의 새만금방조체 단면에 대하여 30분간 1m/h 속도로 간극수두 변화 및 유출현상을 5분 간격으로 수치해석에 의하여 추정된 결과이다. 그림에서 등수두선

(equipotential line)은 시간이 경과하면서 필터부와 성토부의 경계면을 향하여 일정한 간격으로 분포되는 것으로 나타났으며, 특히 접속부 상단과 하단부 바닥보호 경계부에서의 유속은 중간부위보다 훨씬 크고 수위가 강하되는 조건에서 유속이 더 커지는 것으로 분석되었다. 이것은 필터재의 경사가 90°보다 작은 정상경사와는 다른 양상으로서 일반적으로 정상경사 단면에서는 수위강하시 수위부근에서 가장 크고 하단으로 내려갈수록 유속이 점차 감소하는 현상과 비교된다. 유출동수경사(exit hydranlic gradient, I_e)의 경우 유속 분포와 동일하게 접속부 상하단면에서 가장 큰 것으로 나타났으며 동수경사는 상단에서 $I_e=1.0$, 하단에서 $I_e=0.8$ 로 상단부가 약간 크다. 따라서 전반적인 유출동수경사가 매우 커서 파이핑에 대하여 매우 취약한 것임을 알 수 있다.

2. 모형시험 결과

가. 간극수압의 강하

모형시험에 의한 침윤선과 간극수압의 분포는 모관압력(capillary pressure)의 영향을 무시하고 모형에 부착된 piezometer의 수두를 읽어서 결정하였는데 Fig. 7의 침윤선과 등수두선은 동일한 경계조건으로 시험을 5회 실시하고 평균값을 계산한 결과로서 비교분석을 위하여 Fig. 6의 수치해석결과 함께 표시하였다. 그림에서 시험초기에는 침윤선의 기울기가 수치해석의 결과와 유사하지만 가동웨어의 작동이 시작되고 수위가 하강하기 시작하여 10분이 경과한 후에는 두 개의 침윤선이 서로 다른 형태를 보이며 변하는 것으로 나타났다. 이것은 모형시험의 경우 외수위의 상부에 있는 성토단면의 역삼각형 구역의 간극수는 외수위의 강하와 함께 빠른 속도로 연직방향으로 유출되는 반면 수평방향으로의 이동은 상대적으로 느리기 때문에 발생하는 것으로 추정되는데 그 이외의 구역에서는 정도의 차이가 다소 있지만 수치해석 결과와 모형시험결과의 간극수압의 강하형태는 유사하다.

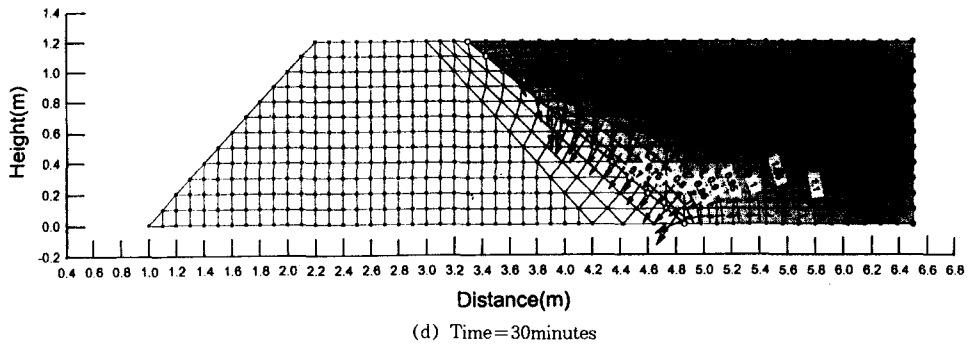
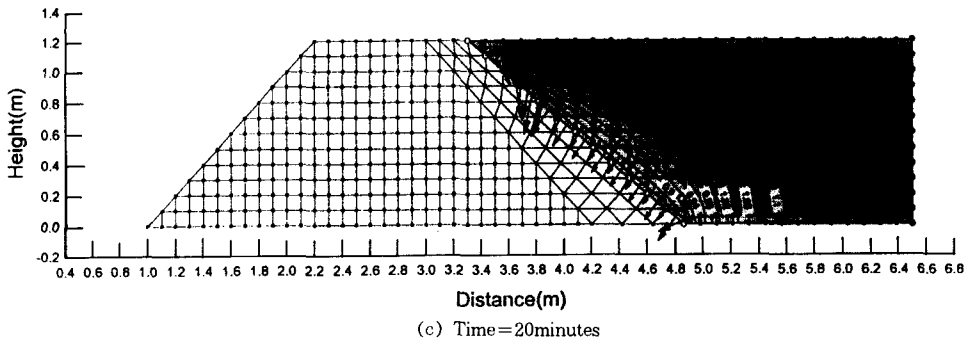
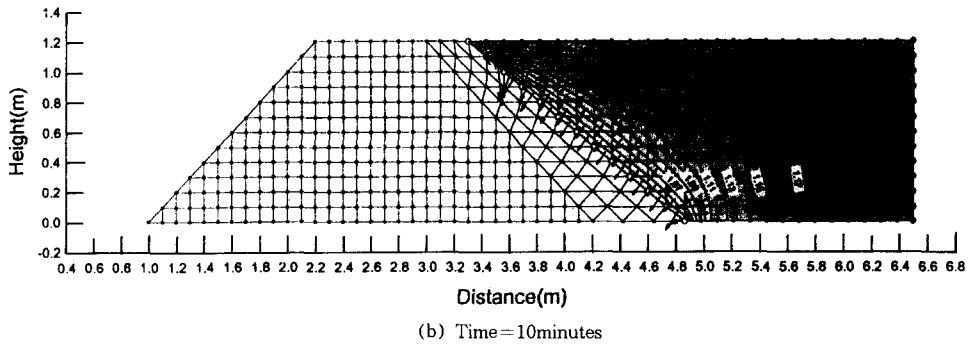
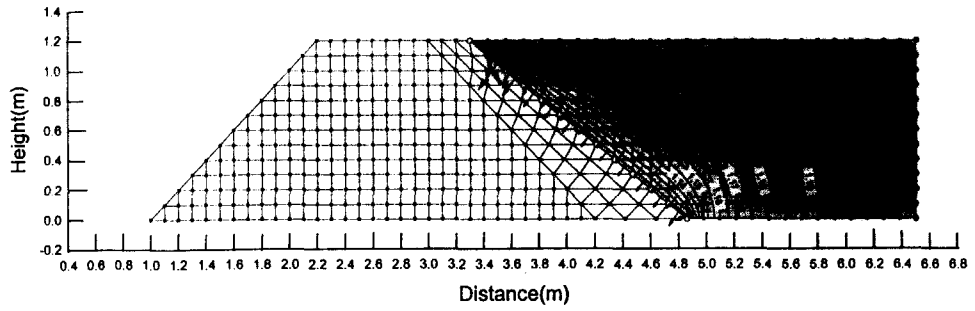
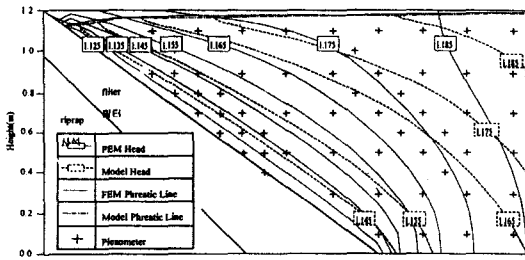
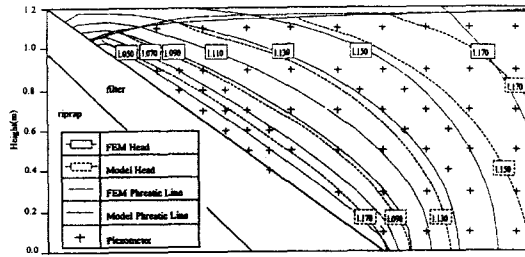


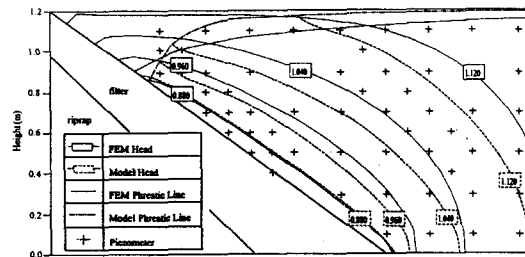
Fig. 6. FEM analysis



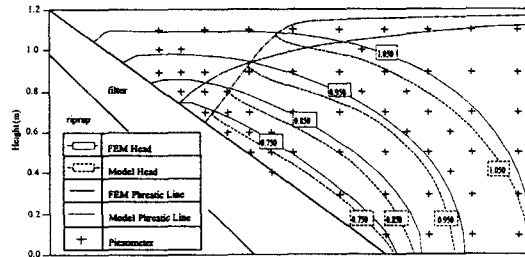
(a) Time=5minutes



(b) Time=10minutes



(c) Time=20minutes



(d) Time=30minutes

Fig. 7. Comparison of FEM and model test results

나. 유출유속 분포

Fig. 7의 등수두선은 piezometer의 사진판독에 의해 작성한 것으로서 유출유속은 등수두선을 이용하여 유선망을 작도하여 구하였다. 그림에서

필터부와 성토부 경계면 하단부에서 등수두선의 간격이 중간부위보다 더욱 조밀하여 수치해석결과와 같이 유출유속이 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있으며 이 것은 전술한 바와같이 정상경사 단면과는 전혀 다른 간극수 유출형태를 나타내는 것으로서 바닥보호공과 성토부 경계면에서 수위 하강시 큰 유출유속이 발생한다는 것을 나타낸다. 분석결과 경계면 하단에서의 최대유출유속은 수위하강이 다 끝날무렵인 30분 경과시에 발생하며 그 크기는 약 $1.21 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로서 수치해석결과와 $5.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 와 비교된다.

V. 결 론

본 연구에서는 역경사 형태를 가진 방조제 성토층 단면에 대한 모형실험을 통하여 정상경사의 경우와는 다른 간극수 유출현상을 파악하고 수치해석결과와 비교하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 성토층 단면이 수평면에 대해 역경사를 이루는 방조제의 경우 조수의 영향으로 외수위가 변하는 조건에서는 성토단면내부의 간극수압은 일정한 주기로 변하며 간조시 조위가 하강하는 조건에서는 성토단면내의 간극수압의 변화는 정상경사인 경우와는 다른 형태로 나타난다.
2. 필터와 성토단면의 경계면에서 간극수의 유출속도는 집속부상단과 하단부가 중간층보다 크게 나타나며 그 크기는 모형시험의 경우 $1.21 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 인 것으로 계산되었으며 수치해석결과보다는 다소 작은 것으로 나타났다.
3. 성토단면내에서의 간극수압은 수위가 하강함에 따라 감소하며 초기에는 수치해석결과와 모형시험결과가 유사한 것으로 나타나지만 시간이 경과할수록 두가지 결과가 차이를 보이고 특히 경계면 하단보다는 상단에서 그 정도가 심하다.
4. 성토재료의 유출단면인 경계면 전체길이를 통하여 상하단에서의 유출유속은 중간층보다 커서 유속에 의한 토립자 유출이 우려되며 특히 시

공시에는 하단부 바닥보호공과의 접 속부는 필터 매트와 포설이 어려워 이 부위를 통한 토립자 유출에 대한 대책 수립이 요구된다.

향후 모형대상 방조제의 실제 침투현상계측을 통해 모형시험 및 수치해석결과를 비교함으로써 역경사면에 대한 침투현상을 확인하고 침투현상에 유리한 방조제 단면의 설정을 위한 지속적인 연구와 현장계측이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Shannon, W. L. 1948, "Discussion of 「Investigation of Drainage Rates Affecting Stability of Earth Dams,」by F. H. Kellong," Transactions, A.S.C.E., Vol. 113.
2. Casagrande, A., W. L. Shannon. 1952, "Base Course Drainage for Airport Pavement," Transactions, A. S. C. E., Vol. 77, pp. 792-820.
3. Cedergren, Harry R. 1962, "Seepage Requirement of Filters and Pervious Bases." Transactions, A. S. C. E., Vol. 87, Part I, pp. 1090-1113.
4. Kovacs, G. 1971, Characterization of Non-laminar Seepage(in German), Sympogium on investigations of Seepage by Models, Varna.
5. Cedergren, Harry R. 1962, "Drainage of Highway and Airfield Pavements." Wiley, New York, pp. 174-180, pp. 136-141.
6. SEEP/W MANUAL, V.3 1993, Geoslope, Canada.
7. Embankment Dams, Design Standard 1987, No.13, Seepage Analysis and Control (Ch.8), USBR.
8. Arthur H. Dvinoff, 1971, "Phreatic Surface Location after drawdown", A. S. C. E., Vol 97. SM1.
9. Charles. W. N. et al. 1976, Embankment Drainage after Instantaneous, Drawdown, A. S. C. E., Vol 93, SM6.