

## 바닥보호공의 투수성을 고려한 방조제의 침투류해석

### Seepage analysis on seadike by considering permeability of the rubble base

조재홍<sup>1)</sup>, Jae-Hong Cho, 김서룡<sup>2)</sup>, Seo-Ryong Kim, 장웅희<sup>3)</sup>, Woong-Hee Jang, 노종구<sup>4)</sup> Jong-Koo Ro

<sup>1)</sup>농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief Researcher, Rural Research Institute, KARICO

<sup>2)</sup>농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원, Senior Researcher, Rural Research Institute, KARICO

<sup>3)</sup>농업기반공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO

<sup>4)</sup>농업기반공사 구조·지반연구실장, Director, Rural Research Institute, KARICO

**SYNOPSIS** : The rubble base in the seadike structure is construct with rubble-mound of big size for stability of seadike against a tidal current velocity at the closing. The permeability gives an effect to stability of seadike a lot in The case which rubble base is founded long with a lake direction like objective area of this study. The permeability of the rubble base produced in the model test regarding filling condition and materials of the rubble base, It applied the result which it tests in seepage analysis and it analyzed a stability of piping. In this study, it diminishes the permeability of the rubble base to respect, the pit soil more the dredge soil is effective and it was analyzed with the fact that it increases the stability of lake direction slope against the piping.

**Key words** : Permeability of rubble base, Piping, Seepage analysis

## 1. 서론

일반적으로 간척사업은 방조제 건설로 매립부지 및 수자원의 확보, 토지이용의 합리화, 광역적 재해 방지 및 관광지역으로서의 개발 등 다목적 간척종합개발 효과에 그 목적이 있다. 그러나 방조제 기초지반과 최종체절단면의 안정성, 그리고 세굴방지를 위하여 시공되는 바닥보호공은 입경이 큰 사석재로 시공되기 때문에 투수계수가 커서 방조제 성토단면 하부층에서 해측조위의 변동에 따라 침투로의 역할을 하므로 충분한 두께의 성토단면을 하지 않으면 침투압에 의하여 성토단면의 흩이 세굴되는 파이핑현상이 발생하게 된다. 이러한 파이핑이 점차 진전되면 해수의 침투량이 크게 증가하여 담수호의 기능을 상실하게 되어 수자원을 이용할 수 없으므로 방조제 축조의 의미를 상실하게 된다.

방조제에서 파이핑을 유발하는 많은 요인이 있으나 본 연구의 대상지구인 방조제와 같이 끝막이단면의 안정을 위하여 바닥보호공을 호측의 성토단면까지 길게 연장하여 시공할 경우, 상고공의 투수성이 체체의 안정에 불안요인이 되므로 바닥보호공의 투수특성이 파이핑 안정성에 미치는 영향을 정확히 구명할 필요가 있다. 또한 바닥보호공을 호측 성토단면까지 길게 연장되어 시공한 사례가 없고 바닥보호공의 투수계수 적용범위에 대하여 미정립되어 있는 실정이다. 바닥보호공 투수계수의 적용에 따라 호측 사면에서의 파이핑안정성이 크게 달라지나 설계자에 따라서 달리 적용되고 있어 투수계수 적용에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 바닥보호공의 크기를 축소한 사석재간극내 채움재료에 따른 투수특성 파악을 위한 모형시험과 투수특성을 고려한 침투류해석 결과를 비교 분석하여 바닥보호공 투수계수의 합리적 적용과 성토단면의 파이핑안정성에 미치는 영향성에 대하여 검토하였다.

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 방조제 성토재로 사용되는 산토와 방조제 시공구간 인근의 원지반에서 준설한 준설토를 사용하였으며 입도분석 결과는 그림 1과 같고, 물리적특성은 표1에 나타났다. 모형시험에 사용된 사석재는 현장에서 채취한 사석중 대형투수시험기에서 시험이 가능한 입경 100mm이하의 사석재를 선별하여 사용하였다.

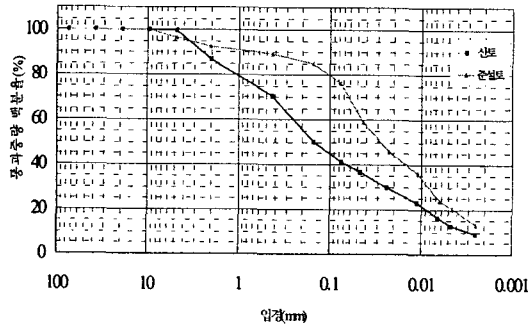


그림 1. 산토 및 준설토의 입도분포곡선

표 1. 사용재료의 실내시험 결과

시료		산토	준설토
Grain size distribution (mm)	Gravel	0.2	3.4
	Sand	58.8	20.6
	Silt	28.4	55.7
	Clay	12.7	20.3
Atterberg limit(%)	LL		37.91
	PL	NP	24.65
	PI		13.26
Specific gravity(Gs)		2.716	2.698
U.S.C.S		SM	CL

## 2.2 시험방법

### 2.2.1 시험장치

침투류해석시 설계자에 따라 임의 적용하고 있는 상고공 투수계수의 합리적 적용과 투수특성을 분석하기 위하여 그림 2와 같이 대형 투수시험기를 제작 사용하였다. 투수시험기는 사석재가 100mm 이하의 입경이므로 工藤(1998)이 제안한 시료최대입경과 공시체 입경비율을 참고하여 내경 50cm, 높이 85cm의 규모로 제작하였으며, 시험중에 시료의 성상과 변화상태의 관측이 용이하도록 아크릴로 제작하였다.

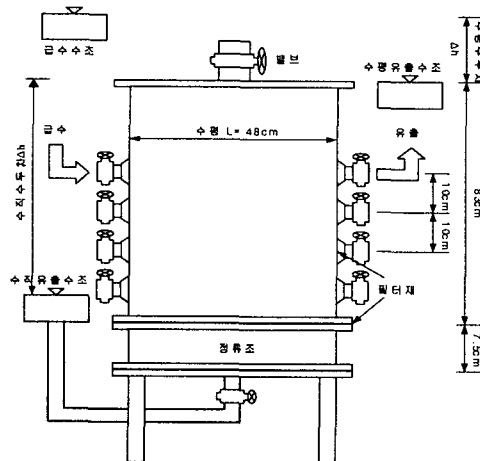


그림 2. 수직·수평 투수시험기 제작도

투수단면을 통과하여 유출된 유출수의 단위시간당의 유량을 정수위투수시험법으로 측정하여 투수계수를 산정하였다. 사석재와 성토재가 놓이는 바닥부에 두께 1cm의 알루미늄판을 설치하고, 물의 유출입이 시료에 영향을 미치지 않도록 직경 1cm의 구멍을 방사형의 등간격으로 천공하였다.

또한, 하부로부터 상부로 물을 주입할 때 수압이나 난류에 의해 시료의 교란방지와 투수계수에 영향을 미치지 않도록 정류조를 두어 시료하부가 전반적으로 균일한 수압을 받을 수 있도록 하였다. 투수시험시 세립자의 하부유출을 방지함과 동시에 물의 유출입에 영향이 없도록 하기 위하여 0.25mm체와 0.074mm 금속망을 설치하여 필터역할을 하도록 하였다.

### 2.2.2 시험방법

시료성형은 방조제 현장의 성토시공조건을 고려하여 사석재위에 성토재를 투입할 때 사석재 사이로 투입된 시료의 균일성과 재료분리를 최소화하면서 투입하였으며 이러한 일련의 작업을 반복하여 투수장(L)이 0.5m가 되도록 하였다. 사석재와 성토재를 투입한 후 3일이상 방치한 다음 시험기내에 잔류된 기포를 제거하였으며 수두변화 단계별로 유출량이 일정한 상태에서 1일동안 일정시간마다 지속적으로 측정하여 투수계수를 산정하였다.

수직투수시험은 수두변화를 75cm, 105cm, 135cm의 3단계로, 수평투수시험은 20, 50, 75cm의 3단계로 수두를 달리하여 시험하였으며, 투수계수는 Darcy의 법칙에 의하여 구하였다.

$$k_{v,h} = \frac{Q}{a \cdot t \cdot i} = \frac{a \cdot l}{a \cdot t \cdot \Delta h} \quad (1)$$

## 3. 시험결과 및 고찰

방조제 최종체절시 성토단면의 시공은 일차사석단면의 시공과 더불어 일정거리 만큼 뒤에서 시공이 진행되며, 일반적인 성토시공 조건과는 달리 방조제 단면은 하루에 2회씩 조석에 의한 수위변동을 겪게 되므로, 바닥보호공 간극내의 성토재 채움상태는 조위의 변동과 조류속에 의하여 채움상태가 크게 달라질 것으로 판단된다. 이렇게 형성되는 바닥보호공은 보링 등의 시추조사가 불가능하여 바닥보호공 간극의 형성상태나, 성토재가 어느 입도 및 밀도로 채워졌는지의 파악은 매우 어렵다. 따라서 대형모형투수시험을 통해 수평·수직투수계수를 산정하고 이를 기초자료로 방조제단면에 대한 침투류해석과 파이핑에 대한 안정성을 검토하였다.

### 3.1 수평투수계수

투수계수시험은 실제 현장에서 발생할 수 있는 현장상황과 유사하도록 사석재 간극내에 토사투입후 안정시켰을 때인 '파이핑 발생전'과 토사투입후 시험토조내에 물을 상향으로 침투시켜 인위적인 파이핑을 발생시킨 '파이핑 발생후'의 2가지 시험조건을 설정하여 산토 및 준설토에 대한 수직·수평투수계수를 측정하였다.

#### 3.1.1 사석층에 산토채움시 수평투수계수

성토재인 산토재로 사석층을 채울 경우 수두변화를 달리하여 시험한 결과는 그림 3과 같으며 수두변화에 따른 파이핑발생전 수평투수계수는  $8.26 \times 10^{-7} \sim 2.88 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 의 범위를 보였으며, No.1, 2층(상부층)이 No.3, 4층(하부층)에 비해 투수계수값이 작게 나타났다. 이는 사석층에 성토재를 투입할 때 각 층별로 입도와 밀도가 일정하지 않게 형성된다는 것을 의미하고 있으며 하부층보다 상부층에서 상부하중으로 인해 밀도가 커지고 세립자가 많이 포함되며 하부층에서는 성토재 투입시 조류변동과 수중에서 침강중에 성토재의 재료분리가 발생하기 때문이라 판단된다. 또한 상부층보다 하부층에 채워지는 성토재의 입경이 조립질로 채워져 투수계수가 커진다는 것을 시험중에 알 수 있었다.

모형시험결과 동수경사의 증가에 따라 큰 차이는 나지 않았으나 약간 감소하는 경향을 나타내 工藤(1997)의 초대형투수시험기를 이용한 조립제의 투수계수를 측정 결과와 유사한 결과를 얻었다. 산토로 성토했을 경우 파이핑 발생전의 평균 수평투수계수값은  $1.55 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 로 분석되었다. 파이핑이 발생되지 않는 상태에서 성토재가 수중에 성토된다면 바닥보호공 간극이 성토재로 잘 채워질 수 있어 성토후 바닥보호공의 투수계수 감소로 침투로가 차단되어 파이핑에 대한 안정성을 증대시킬 것으로 판단된다.

그러나, 최종체결 성토기간중에는 바닥보호공에 큰 유속을 가진 흐름이 조위변동에 따라 지속적으로 발생하기 때문에 파이핑이 일어나지 않는 상태로 바닥보호공 간극속에 성토재가 채워지기 어려우므로 파이핑발생전의 투수시험 결과를 침투류해석에 적용하는 것은 주의할 필요가 있는 것이다.

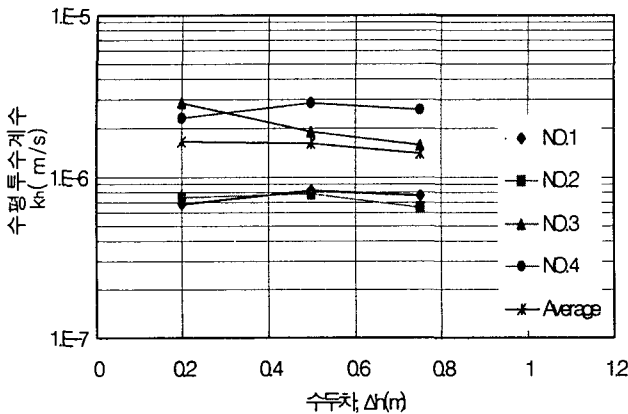


그림 3. 파이핑발생전 사석층의 수평투수계수

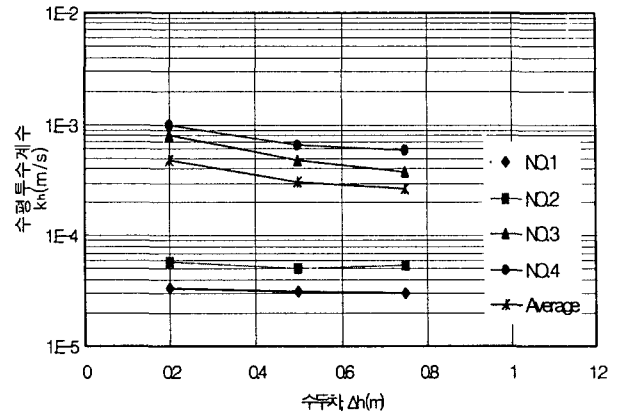


그림 4. 파이핑발생후 사석층의 수평투수계수

조위변동에 따라 수중에 성토되는 성토재는 교란되고 재료분리가 발생하게 되므로 조류의 흐름이 발생하는 현장시공조건을 감안한 파이핑 발생후의 수평투수계수 시험결과를 그림 4에 정리하였다. 수두변화에 따른 수평투수계수값은 큰 차이가 없이 비슷한 값을 나타냈다. 파이핑발생후 사석층의 전체적인 평균수평투수계수는  $3.45 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 로 동일한 위치에서 파이핑발생전의 투수계수값인  $1.55 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 과 비교하면 파이핑발생후의 수평투수계수가 약 100배 이상의 큰 투수성을 보이고 있어 이러한 투수층을 통한 큰 동수경사 발생으로 성토단면에 파이핑 발생이 예측된다.

이로써 실제 현장에서 바닥보호공 상부에 산토가 시공될 때 조위변동에 따라 성토재의 채움상태는 상당히 달라질 것이며 또한, 산토를 이용한 성토는 실내시험 보다 악조건인 조류변동과 성토재의 입경에 큰 차이가 있으며, 빠른 흐름이 있는 수중에서 시공되기 때문에 상공에 산토가 채워지는 조건은 파이핑발생후의 조건에서 형성된다고 보는 것이 합리적일 것이다. 따라서 최종체결구간에 대한 침투류 해석시 바닥보호공 투수계수의 적용은 파이핑발생후의 투수계수로 적용하여야 합리적이며 안정한 평가가 될 것으로 판단된다.

### 3.1.2 사석층에 준설토채움시 수평투수계수

사석층 간극에 준설토가 채워질 경우의 투수특성을 알아보기 위하여 산토에 대한 시험조건과 동일한 방법으로 수두를 변화시키면서 수평투수시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 5, 그림 6과 같다.

파이핑발생전 수평투수계수의 범위는 수두변화와 각 층에 관계없이  $8.01 \times 10^{-6} \sim 1.17 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 로 일정한 범위값을 보였으며, 파이핑발생후에는  $1.47 \times 10^{-5} \sim 7.95 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 의 범위로 측정되었다.

파이핑발생에 따른 투수계수의 변화분포는 산토재에서는 큰 차이를 보인 반면 준설토는 거의 일정하고 변화가 작게 나타났다. 이것은 산토에 비하여 준설토가 세립토의 함유량이 많이 함유하고 있기 때문이며, 사석층에 준설토를 투입하는 경우는 재료분리가 발생하여도 전반적으로 세립으로 구성되었기 때문에 투수계수값에 미치는 영향이 작아지기 때문이라고 볼 수 있다.

또한, 바닥보호공에 산토시공시 상단은 조밀하게 채워지지만 하단은 조위변동에 따라 물의 흐름이 많고 유속이 빨라 성토재 투입시 교란이 발생하므로 산토성토시 하단까지 즉시 조밀하게 메워지지 않는다고 판단할 수 있다. 성토시공중 다짐장비 및 성토자중으로 바닥보호공 상부는 밀도가 하부와 다를 것이므로, 실내모형시험에서 나온 투수계수값보다 현장에 시공된 바닥보호공의 상·하부에서 더 큰 편차를 나타낼 것으로 추정된다.

산토와 준설토의 투수계수시험중 사석재 간극에 채워지는 상태를 관측한 결과 실트함유량이 많은 준설토가 좁은 간극속으로 더욱 잘 채워지는 현상을 보였으며, 준설토를 준설토의 배사관로를 이용하여 바다보호공에 투입할 때, 바다보호공에 채워지는 준설토는 조류속 보다 빠른 유출유속으로 재료분리가 발생하면서 채워질 것이므로 이러한 방조제 현장의 시공조건을 감안한 투수계수는 모형시험에서 얻은 파이핑발생후의 투수계수를 적용함이 합리적이라고 판단된다.

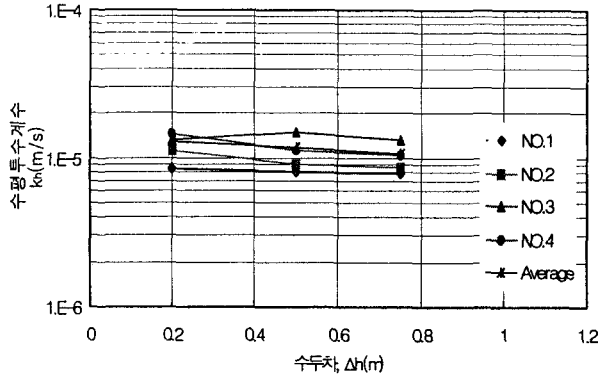


그림 5. 파이핑발생전 사석층의 수평투수계수

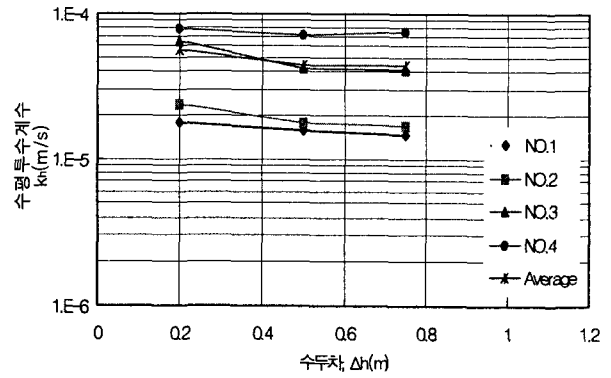


그림 6. 파이핑발생후 사석층의 수평투수계수

### 3.1.3 수직투수계수의 변화

바다보호공을 통한 흐름은 수직 및 수평의 복합적인 방향으로 발생하므로 바다보호공의 투수계수를 보다 명확하게 파악하기 위하여 파이핑발생 전·후의 수직투수계수 측정시험을 실시하였다. 파이핑발생 전·후의 사석재 간극내 산토 및 준설토가 채워진 경우에 대한 수직투수계수 시험결과는 그림 7과 같으며 수직투수계수는 파이핑발생후에 크게 증가하였으며, 산토채움시의 평균투수계수는  $4.62 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 이고, 준설토채움시는  $2.81 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 로 측정되었다. 산토와 준설토의 파이핑발생 전·후의 투수계수값은 유사하였다.

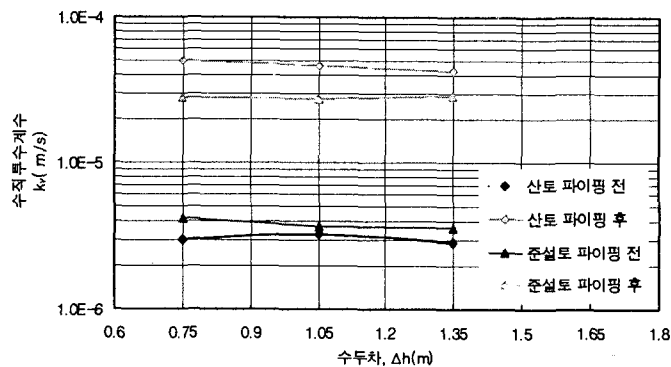


그림 7. 채움재료별 파이핑발생전·후의 수직투수계수

### 3.1.4 바다보호공에 준설토 시험시공

바다보호공에 준설토를 수중시공할 경우 바다보호공 간극에 준설토가 잘 채워지는지를 파악하기 위하여 끝막이 구간에서 준설토를 시공한후 일부구간에서 그림8,그림9와 같이 수중촬영을 실시하였으며 바다보호공 하부의 준설토 채움상태는 육안으로 확인하지 못했다. 상부에서 스타프로 관입시키면서 퇴적준설토의 깊이와 준설토 재료를 확인하였고, 확인결과 준설토가 바다보호공 상부에 일정 두께(약1.0m정

도)로 느슨한 밀도로 퇴적되어 있었으며 모형시험결과와 종합하여 미루어 볼 때 하부도 채워졌을 것으로 판단되었다. 또 준설토 시공구간에서 일주일이상 경과후 수중확인 결과 바닥보호공 상부에 쌓여있는 준설토중 세립자는 조류속에 의하여 유실되고 표면에 남아있는 토사는 모래, 자갈 등만 남아 있음을 확인하였다. 따라서 바닥보호공에 준설토가 밀도있게 채워져 일정한 투수계수가 유지될 수 있다고 판단된다.



그림 8. 준설토시공 수중촬영 전경



그림 9. 바닥보호공 상부의 준설토 퇴적상태

#### 4. 침투류해석

##### 4.1 검토단면 및 해석방법

바닥보호공 투수계수 변화에 따른 파이프 안정성을 검토하기 위하여 그림 10의 방조제 검토단면에 적용하여 침투류해석을 수행하였다. 침투류 해석방법에는 수치해석법 등 여러 가지방법이 있지만 본 연구에서는 Geoslope사(캐나다)에서 개발된 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 이용하여 검토하였다.

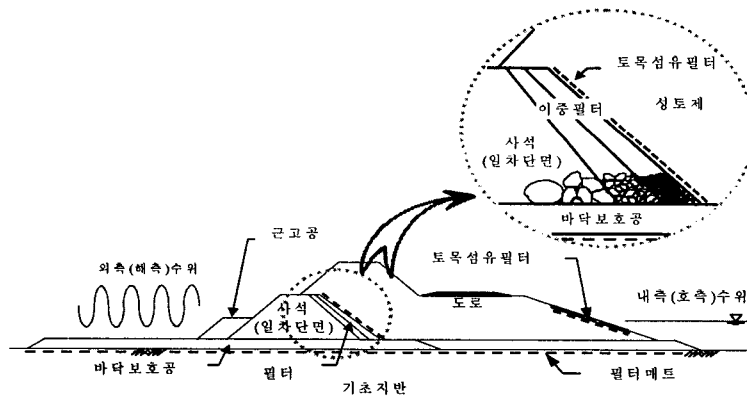


그림 10 방조제 검토단면 구조 및 내·외측 조위조건

유출동수경사에 의한 파이프 안전을 계산식은 (2)와 같으며 농지개량사업설계기준(1991)에서 규정한 파이프 안전율(SF>4)에 대하여 검토하였다.

$$SF = \frac{I_c}{I_e} = \frac{\gamma_b}{\gamma_w} = \frac{G - 1}{1 + e} > 4 \quad (2)$$

## 4.2 침투류해석 결과

바닥보호공 투수계수 적용값의 변화와 체질시 급한 조류속에 의하여 원지반에 깊은세굴이 발생하기 때문에 이러한 세굴심도에 따른 호측사면에서의 파이핑 안전성을 검토하였다. 그림 11은 대조만조위-관리수위 조건에서 바닥보호공 투수계수가  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 일 때의 동수경사분포도를 나타낸 것이다. 일차사석단면과 인접한 바닥보호공에서는 큰 유출동수경사가 집중적인 분포를 나타내 이러한 구간에서는 조류 변동에 따라 해측으로 세립자가 유실되어 나가는 내부파이핑 발생이 예측된다. 또한 바닥보호공의 투수계수값이 클 경우는 바닥보호공을 따라 침투수압이 전달되므로 바닥보호공 말단 상부의 호측사면에서 파이핑이 발생할 수 있을 것이다.

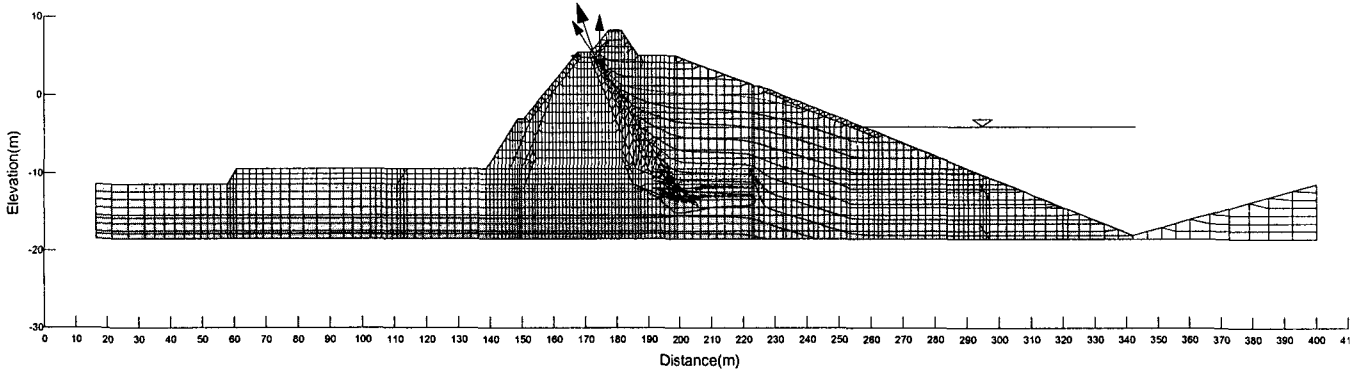


그림 11. 침투류해석 결과(대조만조위-관리수위)

그림 12는 대조만조위-관리수위 조건에서 호측사면에서 바닥보호공 기초지반 세굴심도(바닥보호공의 위치)와 투수계수 변화에 따른 파이핑 안전율을 나타낸 것이다.

바닥보호공 투수계수가 작아짐에 따라 파이핑 안전율은 점차 증가하였고, 기초지반의 세굴심도가 깊어짐에 따라 안전율은 점차 증가하였다. 이는 침투류해석 결과 투수계수가 작아지면 호측사면에서의 유출동수경사값이 작아지기 때문으로 해석되었다. 상고공의 투수계수가  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 에서는 기초지반 세굴심도( $\Delta h$ )가 10m까지도 파이핑에 불안하였으나, 투수계수가  $3.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 보다 작을 경우는 세굴깊이에 관계없이 파이핑에 대하여 안전한 것으로 나타났다. 대조만조위-관리수위 조건에서 호측사면이 파이핑에 안정하려면 상고공 투수계수는  $10^{-5} \text{m/s}$  정도로 유지되어야 파이핑에 안정한 것으로 분석되었다.

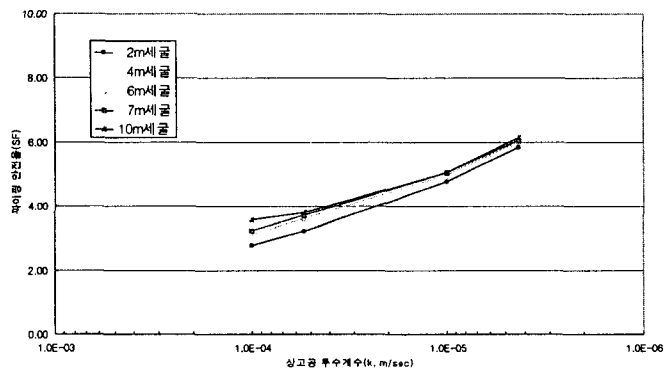


그림 12. 대조만조위-관리수위에서 파이핑 안전율

따라서 본 연구에 적용된 방조제 단면구조와 같이 바닥보호공이 호측까지 길게 연장되어 시공되는 경우에는 안정성 확보를 위해서 바닥보호공의 투수계수를 저감시켜야 할 것이며, 투수계수를 줄일 수 있는 방안으로 모형시험에서 분석되었듯이 바닥보호공간극에 준설토를 채워 시공하는 경우 파이핑발생 후에도 투수계수가  $10^{-5}$ m/s 정도로 유지되고 있으므로 바닥보호공상단에 산토를 직접 성토하는 것 보다 준설토를 바닥보호에 포설하는 것이 간극속으로 잘 채워지고 투수계수가 감소되어 파이핑방지에 효과적인 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 추후 연구방향

본 연구에서는 수중상태에서 시공되는 방조제 바닥보호공의 투수계수를 모형시험을 통하여 분석하고 측정된 투수계수를 침투류해석에 적용하여 방조제의 파이핑안정성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 방조제 바닥보호공의 투수계수 추정을 위하여 사석재를 이용한 모형시험결과 사석재간극을 산토로 채우는 경우 수평투수계수의 범위는  $3.03 \times 10^{-5} \sim 9.78 \times 10^{-4}$ m/s로 측정되었으며, 조위변동에 의한 교란에 의하여 투수계수값이 크게 증가하였다.
- 2) 사석재간극을 준설토로 채우는 경우의 수평투수계수는  $1.47 \times 10^{-5} \sim 7.95 \times 10^{-5}$ m/s로 작게 측정되었으며 조위변동에 의하여 투수계수값의 변화가 작아 바닥보호공 간극을 산토 보다 준설토로 채울 경우, 바닥보호공의 투수계수를 저감시킬 것으로 판단된다.
- 3) 바닥보호공 상부 수중상태에서 준설토를 투입하는 경우 모형시험 결과와 같이 준설토가 사석재 간극에 잘 채워졌으며, 이러한 현상은 현장에서 시험시공하고 수중촬영으로 확인할 수 있었다.
- 4) 모형시험에서 측정된 투수계수를 적용하여 침투류해석 결과 투수계수가 파이핑에 안정한  $3.0 \times 10^{-5}$  m/s 이하로 유지되어야 파이핑에 안정한 것으로 분석되어 상고공에 산토를 직접 성토하는 것 보다 준설토를 채운 후 성토하는 경우가 파이핑안정에 효율적인 것으로 분석되었다.

바닥보호고공 간극내 채움재료에 따른 파이핑 방지효과의 검증을 위한 수리모형시험과 방조제의 파이핑방지대책방안 강구를 위하여 추가적인 시험을 수행하여 파이핑방지방안을 제시하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 2001년도 농림부 국고 연구과제 연구비지원에 의해 수행된 결과의 일부로 당 기관에 감사를 드립니다

## 참고문헌

1. 강예목, 박춘수, 유능환, 이달원 (1999) 新制 土質力學, 형설출판사.
2. 工藤(1998), ロック材(實立度相当)の 透水係數設定法の提安, 日本地盤工學研究發表會, 제33회, pp.1865~1866.
3. 工藤(1997), 定水位超大型透水試驗機による粗立材の透水係數の側定, 日本地盤工學研究發表會, 제32회, pp.1961~1962.
4. 농지개량사업설계기준(1991), 농림수산부, 해면간첩편.
5. SEEP/W "User's Manual" (1997), V 4.23, Geoslope, Canada.