

## 신뢰성해석을 이용한 호안제체의 안정성에 관한 연구 A Study on Stability of Marine Embankment Using Reliability Analysis

박준모<sup>1)</sup>, Joon Mo Park, 장연수<sup>2)</sup>, Yeon-Soo Jang, 오세웅<sup>3)</sup>, Se Woong Oh

<sup>1)</sup> 동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk University

<sup>2)</sup> 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk University

<sup>3)</sup> 대우건설 토목설계팀, Daewoo Engineering & Construction Co., Ltd.

**개요(SYNOPSIS)** : A reliability analysis is performed to investigate the influence of the uncertainty from the limited in-situ samples and the inherent heterogeneity of the ground on the probability of piping for the marine embankment near shore. The result are compared with those of the deterministic piping stability analysis performed using the finite element flow analysis. The random variables used are hydraulic conductivity of the ground subsurface and embankment, and the waterlevel of both internal and external side of the embankment. The probability of piping is most sensitive to the mean and standard deviation of internal water level of the embankment among the random variables included in the reliability analysis. It is found that the lower limits of internal water level which satisfies the allowable probability of piping failure for the embankment studied were E.L(-) 1.83m and E.L(-) 1.48m during and after the construction of the embankment, respectively.

**주요어(Key words)** : Deterministic analysis, Marine embankment, Reliability analysis, Piping, Sensitivity

### 1. 서론

본 연구에서는 호안제체를 축조할 때에 외측의 유수가 수평방향으로 제방의 하류경사면을 침투할 때에 누수로 인하여 파이프(piping)이 발생(Sherard, et al., 1963) 할 수 있어 이에 대한 제체의 안정성을 검토하였다. 제체축조 시 사용되는 여러 가지 재료에 대한 불충분한 시험자료와 원지반의 비균질한 지반특성, 호안제체의 내측, 외측의 수위변화에서 오는 불확실성이 파이프가 발생할 수 있는 확률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 신뢰성 해석을 실시하였고, 이를 확정론적 해석결과와 비교하였다.

확정론적 해석에서는 각 재료의 평균값을 이용하여 유한요소법(FEM)을 이용한 흐름해석을 실시한 후, 제체의 최대 동수경사( $i$ )를 산정하고 한계동수경사( $i_{cr}$ )와 비에 의해 안전율을 산정하는 방법으로 파이프에 대한 안정성을 검토하였다. 신뢰성해석에서는 각 재료특성과 수위에 대한 분산특성을 고려한 평균 및 표준편차를 이용하여 1계 및 2계 신뢰성해법(first and second order reliability method)을 적용하였다. 또한 신뢰성해석시 입력되는 확률변수가 파괴확률에 미치는 민감도를 구하여 파이프에 대한 안정성에 영향을 미치는 인자에 대하여 고찰하였다.

호안제체의 수위변화에 대한 파이핑의 발생확률을 검토하여 최소 파괴확률 기준에 부합하는 한계수위를 산정하고 이를 공사관리에 참고 할 수 있도록 하였다.

## 2. 모델의 해석한계와 입력정수의 통계처리

### 2.1 해석단면

제체의 파이핑에 대한 안정성 해석에 사용된 표준단면을 그림 1에 나타내었다. 제체 중앙부와 외측부에는 0.01~0.3m<sup>3</sup> 급의 사석으로 축조되고, 제체 내측부에는 배면토석의 유실을 방지하기 위하여 직경 100mm 이하의 필터사석으로 축조되는 것으로 설계되어 있다. 또한 제체의 하부에는 강제치환공법을 사용하여 상부 제체와 동일한 사석으로 약 3.0m 깊이까지 분포하고 있다.

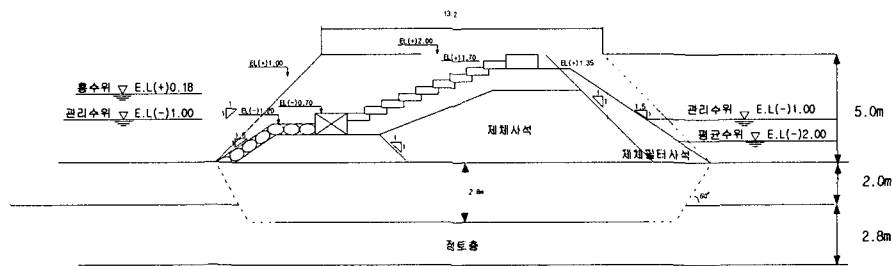


그림 1. 호안제체 표준단면도

### 2.2 입력정수 선정과 통계처리

흐름해석을 실시하기 위한 입력정수는 제체사석, 필터사석, 점토층의 투수계수와 제체 내측, 외측의 수위가 있다. 유한요소해석시 투수계수는 재료의 물성으로 입력되고 제체의 수위는 경계조건으로 입력되었다.

제체사석에 대한 투수계수는 현장 또는 실내시험을 실시하지 못하여 기존 호안제체에 적용한 경험치  $2.0 \times 10^{-3}$  m/sec로 결정하였으며, 점토층의 투수계수는 지반조사시 수행된 실내 압밀시험의 결과로 얻어지는 평균투수계수  $3.1 \times 10^{-9}$  m/sec로 결정하였다. 필터사석의 투수계수는 사석을 구(sphere)라고 가정하고 투수계수가 입자의 제곱에 비례한다는 원리(Taylor, 1948)를 적용하여 제체사석의 투수계수를 환산하여  $6.7 \times 10^{-4}$  m/sec로 산정하였다.

표 1. 확정론적해석 및 신뢰성해석에 이용된 입력자료

확률변수	통계치	평균 ( $\mu$ )	표준편차 ( $\sigma$ )	분산계수 (COV)
투수계수	제체사석	$2.00 \times 10^{-3}$	$1.70 \times 10^{-3}$	0.85
	점토층	$3.10 \times 10^{-9}$	$2.33 \times 10^{-9}$	0.75
	필터사석	$6.70 \times 10^{-4}$	$5.70 \times 10^{-4}$	0.85
수위	제체외측(시화호)	E.L.(+)0.18	0.018	0.10
	제체내측(매립지)	>E.L.(-)2.00	0.400	0.20

수위의 가변성과 투수계수의 불확실성을 체계적으로 고려하기 위하여 각 재료의 투수계수와 제체의 수위를 확률변수로(random variable) 취급하여 신뢰성해석을 흐름해석에 적용하였다. 신뢰성해석에 필요한 투수계수의 분산계수(COV)는 표 1과 같이 제체사석의 체적(0.01~0.3m<sup>3</sup>)과 필터사석(직경 100 mm

이하)이 인위적으로 조성되었기 때문에 이에 대한 분산특성을 고려하여 분산계수를 0.85로 결정하였다. 원지반 점토의 투수계수는 75개의 지반조사 지점에서 산정된 225개의 투수계수 값을 통하여 투수계수가 로그정규분포의 형태를 보였다. 이와 같은 방법으로 투수계수의 평균값은  $3.10 \times 10^{-9}$  m/sec, 표준편차와 분산계수는 각각  $2.33 \times 10^{-9}$  m/sec와 0.75로 결정하였다.

제체 내측과 외측의 수위는 시화방조제의 관문이 관리하고 있어 평상시에는 관리수위 E.L(-)1.00m, 홍수시에는 E.L(+).0.18m의 범위 내에서 수위가 유지되고 있다. 확정론적 해석에서는 보수적인 해석관점에서 제외지(시화호)측의 수위를 홍수위로 설정하고, 제내지측(매립지)의 수위를 공사 중 수위강하를 고려하여 원지반 바닥면과 관리수위의 평균값을 평균수위로 가정하였다.

제외지측의 수위는 시화호 방조제의 관문관리로 수위변화가 적은 것으로 보고 분산계수를 0.1로 결정하였으며, 제내지측의 수위는 공사로 인한 수위변화가 제외측에 비하여 클 것으로 판단하여 분산계수를 0.2로 산정하였다.

### 3. 파이핑에 대한 확정론적 해석

호안제체의 파이핑에 대한 검토는 먼저 흐름해석을 실시 한 후에 제체 뒷굽부분에서 최대동수경사( $i_{max}$ )를 산정하여 한계동수경사( $i_{cr}$ ) 보다 클 경우 파이핑 현상이 발생할 수 있는 것으로 하였다. 호안제체 축조 공사 중에는 공사로 인한 여러 가지 요인에 의해 제체 내측에서 수위가 일시적으로 관리수위 이하로 하강할 수 있으며, 이때 제체 외측의 수위가 급격하게 상승하여 홍수위에 도달한 극한 상황에 대한 흐름해석을 실시하였다.

#### 3.1 흐름해석에 사용된 프로그램

흐름해석에 사용된 수치해석 기법은 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)를 이용한 유한요소법으로 SEEP/W(Geo-Slope, 1998)와 SAT(Cawfield, 1987) 프로그램을 이용하였다. SEEP/W와 SAT은 Darcy의 법칙을 따르는 포화-비포화 흐름에 근거를 둔 해석 프로그램으로 지배방정식은 식 1과 같으며, 정상침투조건에서는 한 요소의 체적안에 들어오는 양과 나가는 양이 시간변화에 관계없이 항상 일정하므로 식 3.2와 같이 우변의 항이 0이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} \quad (1.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (1.b)$$

여기서, H : 전수두,  $k_x, k_y$  : x와 y방향의 투수계수, q : 외부 유입량  
 $V_w$  : 한 요소 안에 존재하는 물의 체적, V : 요소의 체적  
 $V_w/V$  : 체적함수비, t : 시간 이다.

#### 3.2 입력자료 및 유한요소 모델

호안제체를 구성하는 재료는 제체사석, 필터사석, 원지반 점토층의 3가지로 구성하였으며, 흐름해석을 위한 입력자료(투수계수)는 표 1에 나타낸 바와 같이 경험치와 실내시험 결과자료의 평균값( $\sigma$ )을 이용하였다. 흐름해석을 위한 유한요소는 그림 2와 같이 170개의 절점 142개의 요소로 구성하고, 각 요소에 재료의 특성값(투수계수)을 부여하였다. 호안제체 모델의 경계조건으로 제체 외측과 내측의 수위를 정수두 경계조건으로 부여하였다.

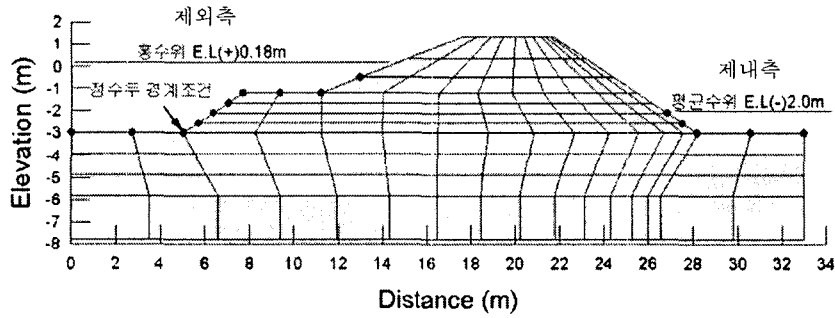


그림 2. 호안제체의 유한요소 모델

### 3.3 흐름해석 결과

파이핑에 대한 확정론적인 해석을 위하여 흐름에 관한 2차원 유한요소법을 이용하여 수치해석을 실시하였으며, 제체내측의 수위에 따른 안전율을 산정하였다.

제체외측의 유체는 그림 3과 같이 대부분 제체를 통한 수평흐름이 발생하고 있으며, 원지반 점토층에서는 투수계수가 제체에 비하여 매우 낮기 때문에 유체의 흐름이 거의 발생하지 않고 있다. 흐름은 수위차에 의해 제체중앙부에서 제체내측 하단으로 하향침투가 일어나고 있으며, 강제치환부에서는 수평침투가 일어나고 있다. 경계조건부를 통한 침투유량은  $1.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 비교적 많은 양의 침투유량이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 제체내측 하류경사면에 가까울수록 필터사석층의 영향으로 등수두선이 조밀하게 밀집되어 있고, 이 부분의 최대 동수경사는 0.623로 나타났다. 최대동수경사( $i_{max}$ )에 대한 한계 동수경사( $i_{cr}=1.0$ ) 비에 의한 안전율( $F_s$ )로 환산하면 1.60로 나타났다. 제체내측의 수위가 관리수위일 경우 최대 동수경사는 0.232로 평균수위일 경우보다 약 2.7배 증가하였으며, 이 때 안전율은 4.31을 보였다 (표 2). 최대 동수경사와 안전율은 수위강하에 대하여 대체로 선형적인 변화를 보이는 것으로 나타나 제체내측의 수위가 0.1m 하강할 때마다 최대 동수경사는 약 0.04정도 증가하며, 안전율은 약 0.3정도 감소하는 것으로 나타났다.

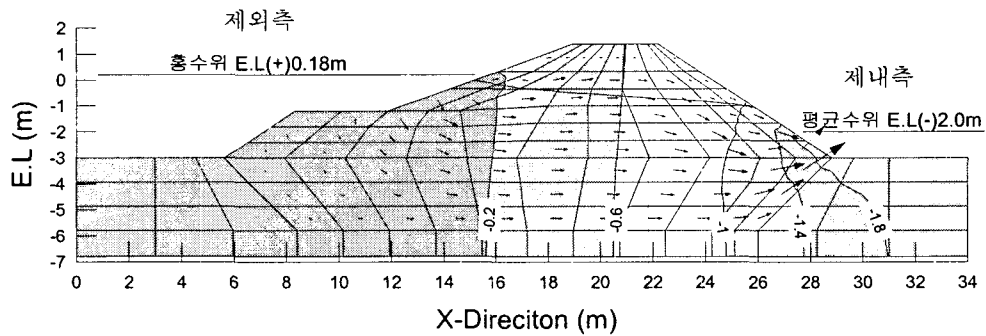


그림 3. RB-7 단면의 흐름해석 결과

표 2. 제체내측 수위변화에 따른 동수경사와 안전율의 변화

제체내측 수위 (m)	RB-7 단면		비 고
	최대동수경사 ( $i_{max}$ )	안전율 ( $F_s$ )	
-1.00	0.232	4.310	관리수위
-1.20	0.325	3.077	
-1.40	0.360	2.778	
-1.60	0.419	2.387	
-1.80	0.567	1.764	
-2.00	0.623	1.600	평균수위

### 3.4 제체의 파이핑에 대한 안정성 평가

파이핑에 대한 제체의 확정론적인 해석에서는 유한요소법을 이용한 흐름해석을 통하여 제체내측의 수위가 평균수위(표 2 참조)일 경우 안전율이 1.60로 나타났다. Meyerhof(1982)는 실험에 의한 값으로 제체시공중(Earthworks)에 허용안전율을 1.3~1.5로 제안하고 있어 가정된 평균수위에서 공사중에는 제체가 파이핑에 대하여 안정성이 떨어지는 것으로 나타났으나, 그림 4와 같이 제체내측의 수위가 E.L(-) 1.00~2.00m 인 범위 내에서는 파이핑에 대하여 안정한 것으로 판단된다.

한편 Meyerhof는 공사 종료 후 파이핑에 대한 허용안전계수를 3.0~5.0으로 제안하고 있다. 따라서 공사 종료 후 제체내측의 수위는 관리수위를 유지할 것이므로, 이 때 제체의 파이핑에 대한 안전율은 4.31로 나타나 공사 종료 후 파이핑에 대하여 제체는 안정한 것으로 나타났다.

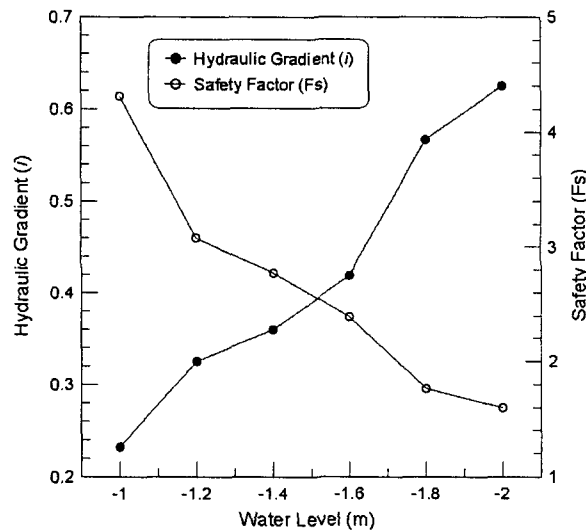


그림 4. 제체내측 수위강하에 따른 동수경사 및 안전율의 변화

## 4. 신뢰성해석

해석단면에 대한 확정론적 안정성해석 수행결과를 토대로 투수계수와 제체의 수위를 확률변수로 적용하여 신뢰성해석을 실시하였다. Lumb(1966), Meyerhof (1970)와 Turnbull et al.(1966)에 의하면 투수계수(permeability)는 로그분포(log-normal distribution)를 따르며, Hooper and Butler(1966), Schultze (1971)와 McGuffey et al.(1981)는 간극수압 등의 토질정수에 대한 통계적 분포가 일반적으로 정규분포(normal distribution)의 양상을 나타낸다고 발표하였다. 이에 본 신뢰성해석에서는 투수계수와 수위에 대한 확률변수를 로그정규분포와 정규분포로 각각 가정하고 신뢰성 해석으로부터 1계와 2계 파괴확률 및 신뢰지수, 확률변수의 토질정수들에 대한 민감도를 분석하였다. 또한 확정론적 해석에 사용된 입력정수들의 평균값과 신뢰성해석으로부터 나온 최확치(most likely value)값을 비교, 분석하였다.

### 4.1 한계상태함수

본 해석에서의 파이핑에 대한 한계상태함수(limit state function)는 대상 단면의 재료별 투수계수( $K_G$ ,  $K_C$ ,  $K_F$ )와 제체의 수위( $H_{EXT}$ ,  $H_{INT}$ )를 확률변수로 하여 식 5.5와 같이  $G(x)$ 로 정의된다.

$$G(x) = Fs (K_G, K_C, K_F, H_{EXT}, H_{INT}) - 1.0 \quad (2)$$

여기서,  $K_G, K_C, K_F$  : 제체사석, 원지반점토, 제체필터사석의 투수계수(m/sec)

$H_{EXT}, H_{INT}$  : 제체외측, 제체내측의 수위(m) 이다.

식 2에서  $G(x)=0$ 일 때는 한계상태면을 나타내며, 파이핑이 발생하는 안전율 1.0의 상태를 나타낸다. 이 면을 기준으로  $G(x)>0$ 일 때의 안전율은 파이핑이 발생하지 않는 안전한 상태가 되고  $G(x)<0$ 이면 파이핑이 발생하는 상태가 된다.

#### 4.2 신뢰성해석 결과

제체내측의 수위변화에 따른 신뢰성해석 결과를 표 3에 나타내었다. 제체내측의 수위가 관리수위일 때 일계 신뢰분석법(FORM)에서는 신뢰지수( $\beta$ )는 4.46, 파이핑 발생확률( $P_f$ )은  $4.168 \times 10^{-6}$ 로 나타났다. 이계 신뢰분석법(SORM)에서 신뢰지수는 4.50, 파이핑 발생확률은  $3.384 \times 10^{-6}$ 로 나타났다. 제체 시공 중으로 가정된 평균수위의 경우 확정론적 해석에서는 안전율이 1.60으로 Meyerhof (1982)의 기준 ( $F_s=1.5$ )에 만족하였고, 신뢰성해석에서도 파이핑 발생확률이 2.02%로 낮은 파괴확률을 보였다(표 4.1).

Meyerhof(1982)가 제안한 제체시공(Earthworks) 중 허용최대 파괴확률( $P_f = 10^{-2}$ 이하)을 만족하는 제체내측의 수위는 E.L(-) 1.00 ~ 1.80m이며, 신뢰지수( $\beta = 2.33$  이상)을 만족하는 수위는 E.L(-) 1.00 ~ 1.80m로 산정되었다. 이 때 신뢰지수는 통상 토목구조물이 가지는 신뢰지수 값인 1.5~4.0의 범위에 있다. 따라서 제체내측의 수위가 관리수위(시공 후 안정수위)를 유지하는 경우 Meyerhof의 허용최대 파괴확률( $10^{-3}$  이하)과 신뢰지수(3.10 이상)를 모두 만족하여 제체가 파이핑에 대하여 안전한 것으로 판단되었다.

표 3. 수위변화에 따른 신뢰지수와 파괴확률

제체내측수위 (E.L, m)	안전율 ( $F_s$ )	FORM		SORM	
		신뢰지수( $\beta$ )	파괴확률( $P_f$ )	신뢰지수( $\beta$ )	파괴확률( $P_f$ )
-1.00	4.310	4.456	$4.168 \times 10^{-6}$	4.501	$3.384 \times 10^{-6}$
-1.20	3.077	4.000	$3.174 \times 10^{-5}$	4.038	$2.695 \times 10^{-5}$
-1.40	3.058	3.276	$5.269 \times 10^{-4}$	3.304	$4.767 \times 10^{-4}$
-1.60	2.387	2.779	$2.728 \times 10^{-3}$	2.767	$2.827 \times 10^{-3}$
-1.80	1.764	2.377	$8.737 \times 10^{-3}$	2.400	$8.221 \times 10^{-3}$
-2.00	1.600	2.018	$2.178 \times 10^{-2}$	2.050	$2.018 \times 10^{-2}$

각 확률변수에 대한 파괴확률의 민감도는 제체내측의 수위가 파이핑 발생확률에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 원지반 점토층의 투수계수는 파괴확률에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다.

확률변수의 평균에 대한 파괴확률 민감도에서 제체사석과 제체내측의 수위는 부(negative)의 민감도를 나타내었으며, 원지반점토, 제체필터사석, 제체외측 수위는 정(positive)의 민감도를 나타내었다. 또한 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도는 5개의 확률변수 모두 정의 민감도를 나타내 표준편차가 클수록 파괴확률은 증가함을 알 수 있다. 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도가 크게 나타나는 확률변수는 제체사석(필터사석)의 투수계수와 제체내측의 수위이며, 평균에 대한 파괴확률의 민감도가 크게 나타나는 확률변수는 원지반 점토의 투수계수와 제체외측의 수위로 나타났다.

#### 4.3 허용최대 파괴확률에 대한 제체내측의 한계수위

Meyerhof(1982)가 제안한 허용최대 파괴확률 기준에 부합하는 제체내부의 한계수위를 산정하기 위하여 실시한 신뢰성해석 결과를 그림 5에 나타내었다. 제체시공 중 파이핑에 대한 제체의 안정성을 확보하기 위한 허용최대 확률( $10^{-2}$ 이하)과 신뢰지수기준(2.3이상)을 만족하는 한계수위는 E.L(-) 1.83m이며,

제체시공 후 제체내측의 안정성을 확보하기 위한 허용최대 확률( $10^{-3}$ )과 신뢰지수기준(3.1이상)을 만족하는 한계수위는 E.L(-) 1.48m로 제체내측의 수위를 한계수위 이상으로 확보해야 할 것으로 사료된다.

이와 같이 신뢰성해석으로부터 산정된 제체내측의 한계수위는 제체외측의 수위가 극한상태(홍수위시)일 때를 기준으로 평가하였으므로, 제체외측의 수위가 관리수위(E.L(-) 1.0 m)를 유지할 경우에는 홍수위와 한계수위의 수위차를 고려하여 제체내측의 수위가 제체시공 중에는 E.L(-) 2.9m, 제체시공 후에는 E.L(-) 2.7m 이하가 되지 않도록 주의를 요구한다.

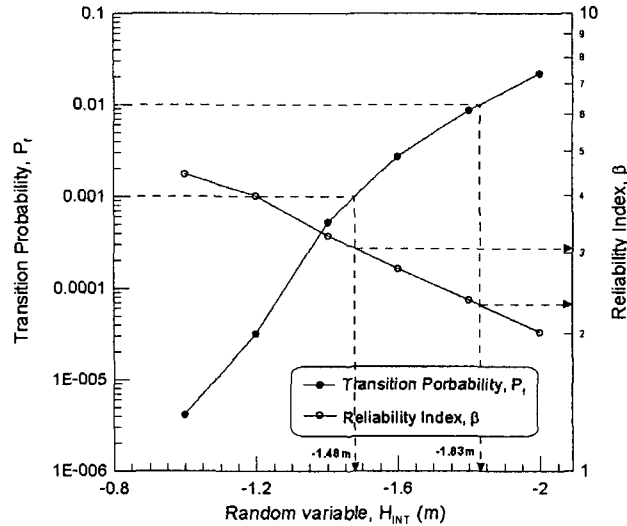


그림 5. 제체내측 수위변화에 따른 신뢰지수와 파이핑 발생확률

## 5. 결론

호안제체의 시공시 발생할 수 있는 수위변화를 고려하여 확정론적 흐름해석과 신뢰성해석을 통한 제체의 안전율, 신뢰지수와 파괴확률을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 호안제체의 파이핑에 대한 확정론적 해석을 통하여 제체내측의 수위가 관리수위일 경우 파이핑에 대한 안전율은 4.31으로 나타났으며, 신뢰성해석으로부터 파이핑 발생확률이 거의 0으로 산정되어 제체가 파이핑에 대하여 안정함을 보였다. 또한 제체내측의 수위가 제체시공 중 수위가 하강할 것으로 가정한 평균수위에서는 파이핑에 대한 안전율이 1.60으로 Meyerhof의 최소안전율을 만족하였다.
- (2) 신뢰성해석으로부터 민감도를 측정한 결과 제체내측의 수위가 파이핑 발생확률에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 제체내측의 수위변화를 고려한 신뢰성해석으로부터 허용최소 파괴확률과 신뢰지수를 만족하는 제체내측의 한계수위를 검토하였다. 제체시공 중의 한계수위는 E.L(-) 1.83m로 나타났으며, 제체시공 후에는 E.L(-) 1.48m로 산정되었다.
- (3) 한계수위 산정은 제체외측의 수위가 극한상태(홍수위)일 경우를 가정하여 해석한 결과이므로 제체외측의 수위가 관리수위를 유지할 경우에는 제체내측의 수위를 평상시 한계수위 이하가 되지 않도록 주의를 요한다.

## 참고문헌

1. Cawlfeld, J. D. and Sitar, N. (1987), *Application of First-Order Reliability to Stochastic Finite Element Analysis of Groundwater Flow*, Report No. UCB/GT/87-01, University of California, Berkeley.
2. Geo-Slope(1998), Computer Software, SEEP/W, Ver. 4.0.
3. Hooper, J. A., and Butler, F. G.(1966), "Some Numerical Results Concerning the Shear Strength of London Clay," *Geotechnique* , Vol. 16, No. 3, pp. 282-304.
4. Lumb, P.(1966), "The Variability of Natural Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 74-97
5. McGuffery, Iori, V.J., Kyfor, Z., and Grivas, D.A.(1981), "Statistical Geotechnical Properties of Lockport Clays," *Transportation Research Board*, No. 809, pp. 54-59.
6. Meyerhof, G. G.(1970), "Safety Factors in Soil Mechanics," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 140~148.
7. Meyerhof, G. G.(1982), "Limit States Design in Geotechnical Engineering," *Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, Vol. 1, pp. 67-71.
8. Schultze, E.(1971), "Frequency Distributions and Correlations of Soil Properties," *Proceedings of the First International Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Vol. 1, pp. 371-387.
9. Sherard, J. L.(1963), *Earth and Earth Rock Dam*, John Wiley & Sons, New York.
10. Taylor, D. W.(1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
11. Turnbull, W. J., Compton, J. R., and Ahlvin, R. G.(1966), "Quality Control of Compacted Earthwork," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM5, pp. 142~145.