

지하굴착지반에서의 지하수흐름에 관한 신뢰성 해석

Reliability approach to groundwater flow analysis in underground excavation

장연수¹⁾, Yeon-Soo Jang, 김홍석²⁾, Hong-Seong Kim, 박정용³⁾, Jeong-Yong Park,
박준모⁴⁾, Joon-Mo Park

1) 동국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-Guk University

2) SOC건설(주), SOC Construction & Engineering Co., Ltd

3) (주)삼보기술단, SAMBO Engineering Co., Ltd

4) 건일엔지니어링(주), Keon-IL Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : In this paper, a reliability-groundwater flow program is developed by coupling the 2-D finite element numerical groundwater flow program with first and second order reliability program. From the parametric study of hydraulic conductivity of soil layers, the increase of both mean and variance of hydraulic conductivity results in the increase of probability of exceeding the threshold hydraulic head. The probability of failure was more sensitive to parameters of weathered granitic soil and rock located at the middle and bottom of the excavation than those at the other locations. It can be recommended from this study that the reliability method, which can include the uncertainty of soil parameters, should be performed together with the deterministic analysis to compensate the weakness of the latter analysis for the groundwater flow problem of underground excavations.

Keywords : underground excavation, reliability analysis, groundwater drawdown, deterministic model, uncertainty

1. 서 론

굴착공사에서 지하수 영향을 고려한 안정성을 평가하는 데 있어서 해석시 지반정수들은 항상 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각한 확정론적 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 지반정수는 지반의 형성당시 또는 현재의 외부환경적인 요인에 따라서 위치 및 시간에 따라 그 특성이 다르며 또한 시험방법과 표본개수에 의해서도 인위적인 오차를 내포하게 된다. 이러한 불확실성은 우리가 대상지반에 대한 지반조사 자료의 분산특성을 살펴보다도 쉽게 확인할 수 있는데 고정된 평균값만을 이용하는 기존의 확정론적 이론에 의한 지하수 흐름해석은 지반정수들의 분산성을 고려할 수 없어 정확도에서 한계가 있다.

본 논문에서는 제작된 지하수-신뢰성 연계 해석 프로그램을 이용하여 토사구간에서 굴착으로 인한 지하수위 저하문제에 대해 확정론적 해석과 신뢰성 해석을 실시하였다. 제작된 프로그램의 정확성 검증을 위하여 2차원 지하수 흐름해석프로그램인 SEEP/W와 비교하여 적정성을 검증하였다. 또한 신뢰성 해석시 지반 투수계수와 지하수위를 확률변수로 취급하였으며, 확정론적 해석에 의한 굴착단면의 유입수량을 초과할 확률을 일계 및 이계 신뢰성 해석을 이용하여 해석을 수행하고 Monte-Carlo Simulation의 해석결과와 비교·검토하고 민감도를 분석하였다.

2. 신뢰성 해석프로그램

지하수 흐름에 대한 신뢰성 해석프로그램은 유한요소법을 이용한 지하수 흐름해석과 신뢰성 해석을 각각 수행하는 두 개의 routine으로 구성되어 있다(그림 1).

신뢰성 해석프로그램은 일계 및 이계신뢰성 해석법, Monte-Carlo Simulation을 이용하여 파괴확률을 산정하고, 일계 및 이계신뢰성 해석 과정에서 민감도 분석을 동시에 수행할 수 있도록 제작하였다.

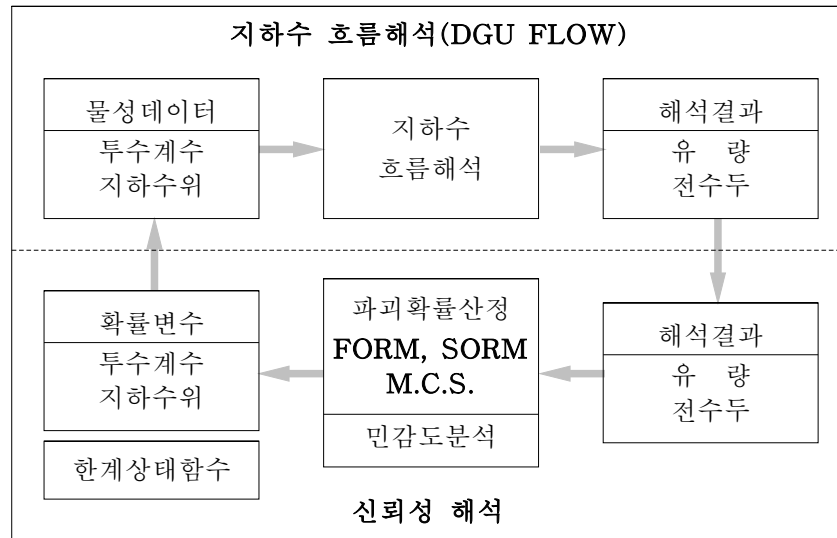


그림 1. 지하수 흐름해석에 관한 신뢰성 해석 흐름도

지하수 흐름에 관한 신뢰성 해석과정을 신뢰성 해석법에 따라 간단하게 설명하면 다음과 같다.

1) 일계 및 이계신뢰성 해석법

- ① 해석대상 문제에 대한 확률변수(투수계수, 지하수위)와 한계상태함수를 정의한다.
- ② 한계상태함수를 확률변수 공간상의 한계상태면으로 구성한다.
- ③ 확률변수의 확률분포특성을 고려하여 지하수 흐름해석 routine의 입력자료로 대입하고, 유한요소법을 이용한 지하수 흐름해석을 수행한다.
- ④ 지하수 흐름해석 결과(유입수량 및 전수두 등)를 신뢰성 해석 routine의 한계상태함수에 대입하여 해석대상의 파괴여부를 결정한다.
- ⑤ 해석대상이 안전한 것으로 판정될 경우에는 확률변수의 값을 변화시켜 한계상태면에 수렴할 때까지 해석과정을 반복 수행한다. 반복 수행과정에서 확률변수 변화량에 대한 한계상태함수 값의 변화량으로부터 확률변수의 민감도를 분석한다.
- ⑥ 확률변수가 한계상태면에 수렴하였을 경우, 확률변수의 평균값으로부터 한계상태면 사이의 최소거리인 신뢰지수를 산정하고, 신뢰지수와 파괴확률의 관계로부터 파괴확률을 계산한다.

2) Monte-Carlo Simulation

- ① 해석대상 문제에 대한 확률변수(투수계수, 지하수위)와 한계상태함수, Simulation의 반복횟수를 정의한다.
- ② 확률변수의 확률분포특성을 고려하여 확률변수 집단을 추출한다.추출된 확률변수를 지하수 흐름해석 routine의 입력자료로 대입하고, 유한요소법을 이용한 지하수 흐름해석을 수행한다.
- ③ 지하수 흐름해석 결과(유입수량 및 전수두 등)를 신뢰성 해석 routine의 한계상태함수에 대입하여 해석대상의 파괴여부를 파악한다.
- ④ 추출횟수만큼 반복 수행하고, 전체 반복횟수에 대한 파괴된 횟수의 비인 파괴확률을 산정한다.

3. 지하수 흐름해석 및 검증

3.1 검증을 위한 흐름영역과 검증방법

제작된 수치해석프로그램의 검증에 이용된 흐름영역은 그림 2와 같이 두께가 40m인 대수층에 폭 20m, 심도 15m로 굴착된 단면이다. 대수층의 해석영역은 굴착에 의한 지하수위 영향반경을 고려하여 굴착깊이의 5H 이상인 100m로 결정하였다. 굴착단면의 벽면은 흙막이를 설치하여 흐름이 없는 것으로 가정하였으며, 해석영역은 경제성과 대칭성을 고려하여 1/2 단면으로 모델링 하였다.

표 1에 해석에 사용된 입력물성치들을 요약·정리하였으며, 신뢰성 해석시 지하수위의 분포형태는 정규분포로, 투수계수는 로그정규분포로 가정하였다(Lumb(1966), Meyerhof(1970), Turnbull et al.(1966)). 지반굴착 바닥면과 흐름영역의 경계면에는 정수두 경계조건으로 각각 25m 와 35m의 전수두를 부여하였다.

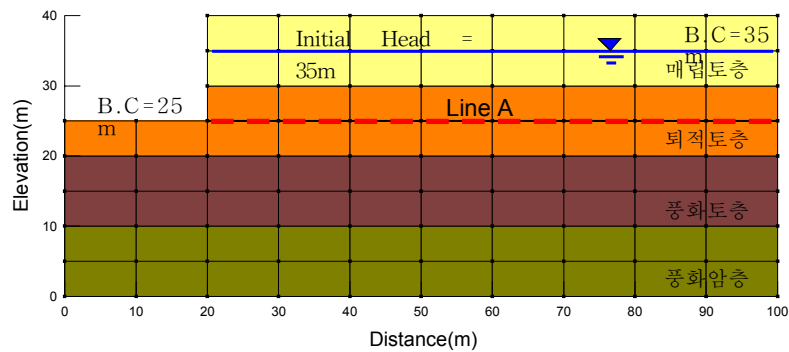


그림 2. 프로그램 검증에 이용된 비균질대수층 해석단면

표 1. 해석에 사용된 입력물성치

확률변수		평균 (μ)	표준편차 (σ)	분산계수(COV)	분포형태
지표면 지하수위 (H, m)		35.00	3.50	0.10	정규분포
투수계수 (K, m/sec)	매립토층	1.00×10^{-5}	5.0×10^{-6}	0.50	로그정규분포
	토사층	5.00×10^{-6}	2.5×10^{-6}	0.50	로그정규분포
	풍화토층	1.00×10^{-6}	5.0×10^{-7}	0.50	로그정규분포
	풍화암층	1.00×10^{-7}	5.0×10^{-8}	0.50	로그정규분포

본 수치해석 프로그램의 해석결과를 검증하기 위하여 현재 가장 범용되는 지하수흐름 수치해석프로그램인 SEEP/W를 이용하였다. SEEP/W는 간극이 있는 흡입자를 통한 지하수의 유동은 식 (1)과 같은 2차 편미분방정식(partial-differential equation) 이론에 기초하고 있으며, 다음과 같은 지배방정식으로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} : x, y 방향의 투수계수(LT⁻¹), h : 전수두(L), t : 시간(T), S_s : 비저류계수(L⁻¹),

W : 물의 유원(source)과 유입(sink)을 나타내는 단위체적당 체적 흐름 (T⁻¹) 이다.

정량적인 검증결과를 나타내기 위하여 해석결과 값의 차(H_{DGUFLOW} - H_{MODFLOW})인 잔류치(residual)을 이용하여 식 (2)와 같이 평균오차(mean error) 및 절대평균오차(absolute mean), 평균제곱근오차(root

mean square), Normalized mean 및 표준편차를 계산한 후 이를 scatterdiagrams로 나타내었다.

$$\text{평균오차(ME): } R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2a)$$

$$\text{평균제곱근오차(SE): } SE = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2 / n} \quad (2b)$$

$$\text{Normalized Mean(RN): } RN = SE / (H_{\max} - H_{\min}) \quad (2c)$$

$$\text{표준편차: } S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - R)^2 / (n - 1)} \quad (2d)$$

3.2 프로그램 검증결과

(1) 유입수량에 의한 검증

굴착단면의 지하수 유입량을 DGU FLOW와 SEEP/W를 이용하여 비균질대수층에 대하여 해석을 수행하고, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 상부층의 투수계수가 균질대수층보다 상대적으로 큰 이유로 유입수량이 3.9배 정도 큰 값을 보였으며, 유입수량은 DGU FLOW와 SEEP/W에서 각각 1.457m³/day, 1.429 m³/day로 계산되었다.

표 2. 시간에 따른 굴착단면의 지하수 유입량(m³/day)

구 분	DGU FLOW	SEEP/W	오 차(%)
비균질대수층	1.457	1.429	1.92

2) 전수두 분포 비교

비균질대수층에서는 그림 3과 같이 SEEP/W와 DGU FLOW의 수두분포는 유사하게 나타났다. 굴착단면의 상단부에서 전수두가 1m정도 증가하였으며, 굴착단면 하부 대수층에서는 약 1m의 전수두 감소를 보였다. 굴착단면 주변의 전수두는 26~28m로 계산되었으며, 동수경사는 흐름영역 내에서 0.10~0.26으로 산정되었고, 굴착단면 배후에서 0.26으로 가장 크게 나타났다.

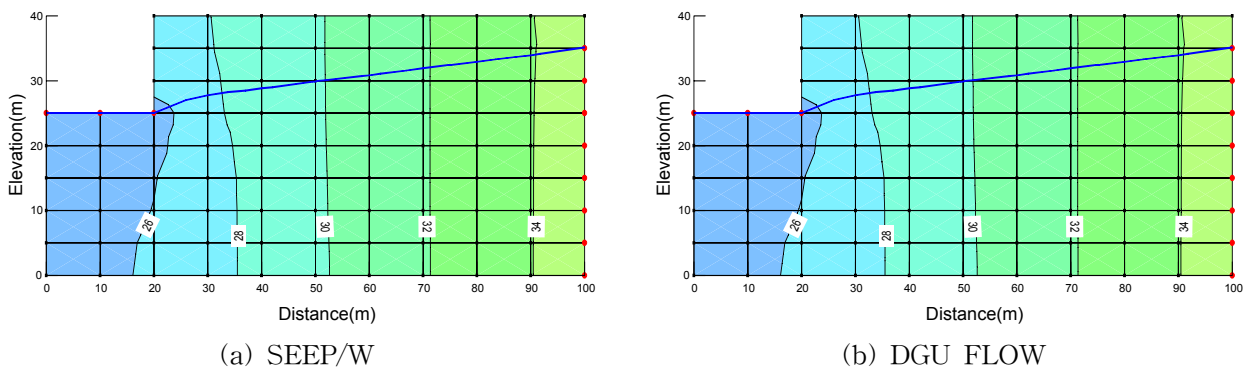


그림 3. 비균질대수층의 전수두 분포

비균질 대수층의 검증(그림 2)에서 A선상의 전수두를 측정하여 굴착단면으로부터 거리별 전수두 분포를 그림 4에 나타내었으며, 수치해석프로그램(DGU FLOW, SEEP/W)의 전수두 분포에 대한 산포도를 보였다(그림 5). 정량적인 오차량을 산정한 결과(표 3) 비균질대수층에 대한 전수두 오차는 거의 없는 것으로 나타났으며, 따라서 본 연구에서 이용하고 있는 지하수 유동에 관한 수치해석프로그램(DGU FLOW)은 지하수 유동문제 해석에 정확도와 적용성이 유효한 것으로 평가되었다.

표 3. 2차원 지하수 흐름해석 수치해석프로그램의 오차분석

구 분	오 차(m)	기준치
평균오차	0.0003(0.001%)	-
평균제곱근오차	0.006	2% 이하(0.610)
Normalized mean	0.001	10% 이하(3.060)
표준편차	0.041	-

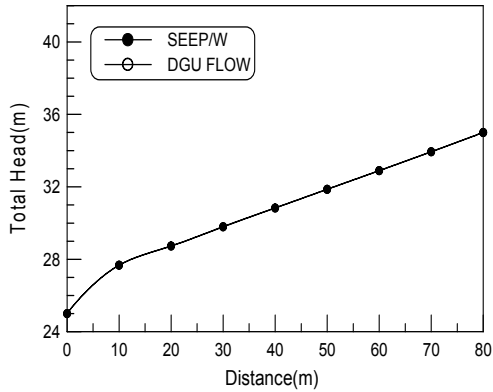


그림 4. 굴착단면으로부터 거리별 전수두 분포(Line A)

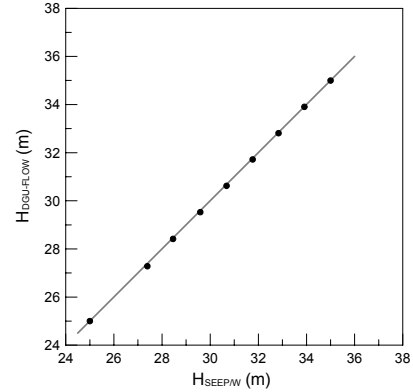


그림 5. 수치해석프로그램의 전수두 산포도

4. 신뢰성 해석을 이용한 지하수흐름 평가

4.1 개요

굴착지반에 대한 지하수 배수공법 설계시, 지반의 투수계수나 계절에 따른 지하수위 변화 등 여러 조건이 현장과 일치하지 않아 정확한 유량산출이 곤란하기 때문에 계산된 유입수량에 안전율을 적용하여 설계에 반영한다. 따라서 식 (3)과 같이 한계상태함수를 정의하고 굴착단면으로의 유입수량이 수치해석에 의한 유입수량을 초과할 파괴확률을 식 (4)와 같이 정식화하였다.

$$G(x) = Q_{\text{target}} - Q_{\text{model}} \quad (3)$$

여기서, $Q_{\text{target}} = Q_{\text{analytical}} \times F_s$

$$P_f = P[G(X) \leq 0] = \int_{G(x) \leq 0} f_X(X) dX \quad (4)$$

신뢰성 해석의 유효성을 검증하기 위하여 확률변수(투수계수, 지하수위)의 값을 한계상태식에 대입하여 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률을 산정하였다. Monte-Carlo Simulation로 추정된 파괴확률의 정확성을 보장하기 위하여 Shooman(1968)이 제안한 오차 추정식(식(5) 참조)을 이용하였다. 유의수준 5%의 오차 추정식으로 파괴확률이 10^{-3} 일 경우에 대하여 표본추출횟수(N)를 10,000회로 결정하였다.

$$\text{error in \%} = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{N \cdot P_f}} \quad (5)$$

여기서, N : 표본추출횟수, P_f : 파괴 확률

4.2 안전율에 따른 파괴확률

비균질대수층에 대한 지하수 흐름해석 결과로부터 굴착단면으로의 유입수량($1.457\text{m}^3/\text{sec}$)을 안전율 1.0으로 할 때, 안전율을 증가시키면서 신뢰성 해석을 수행하여 그림 6에 나타내었다.

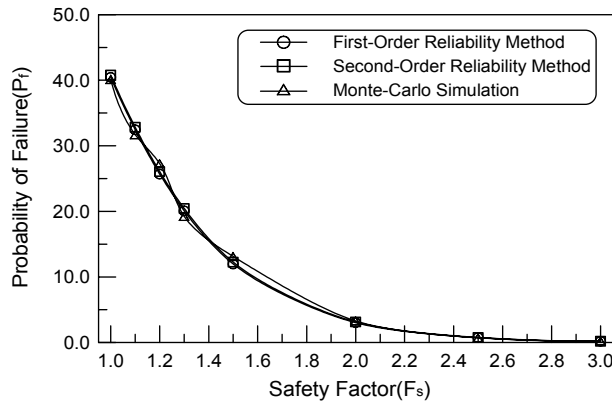


그림 6. 비균질대수층에서 안전율과 신뢰성 해석법에 따른 파괴확률

안전율이 1.0일 때, 일계 및 이계신뢰성 해석법에 의한 파괴확률은 각각 40.43%와 40.78%로 산정되었으며, Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률은 40.10%로 산정되었다.

일반적으로 굴착공사시 지하수 변동에 의한 인접 구조물의 안정성을 고려하여, 확정론적 해석으로부터 안전율을 1.5~2.5 정도로 산정하고 있다. 그러나, 신뢰성 해석 결과에서 볼 수 있듯이 일반적인 안전율 하에서 파괴확률은 13.13~0.72%로 불안정한 결과를 나타내고 있다.

이와 같이 일계 및 이계신뢰성 해석에 의한 파괴확률과 추출법을 이용한 Monte-Carlo Simulation의 결과가 거의 일치하고 있으므로, 본 신뢰성해석프로그램은 해석결과가 비교적 정확하며, 지하수 유동문제에 관한 신뢰성 해석에 유효한 수치해석프로그램인 것으로 판단된다.

최확치는 일계신뢰성 해석에서 한계상태면과 가장 최단거리를 가지며, 파괴 영역상에서 가장 큰 확률 밀도를 가지고 있는 설계점에 대한 확률변수의 값이다. 한계상태에 이르는 값을 산정하기 위하여 민감도가 큰 확률변수를 검토하고, 이에 대한 확률분포 특성에 맞추어 확률변수 값을 변화시키는 신뢰성 해석의 메커니즘의 결과로 비균질대수층에 대한 확률변수의 최확치를 표 4에 나타내었다. 매립토층과 토사층의 투수계수의 변화가 103.20%와 99.22%로 비교적 크며, 지표면 지하수위 변화량은 16.43%로 계산되었다. 풍화토층과 풍화암층의 변화량은 각각 5.27%와 10.12%로 계산되었다.

표 4. 확률변수의 최확치

(단위 : m)

확률변수	평균값 (μ)	최확치 (X^*)	변화율(%)
지표면 지하수위	35.00	40.75	16.43
매립토층	1.00×10^{-5}	2.032×10^{-5}	103.20
토사층	5.00×10^{-6}	9.661×10^{-6}	93.22
풍화토층	1.00×10^{-6}	9.473×10^{-7}	5.27
풍화암층	1.00×10^{-7}	8.988×10^{-8}	10.12

4.3 민감도 분석

확률변수의 평균 및 표준편차의 변화에 대한 파괴확률의 변화를 해석하는 민감도 분석(sensitivity analysis)은 정규화된 무차원계수로 확률변수의 상대적인 중요도를 파악할 수 있는 기준이다.

신뢰성 해석으로부터 파괴확률이 약 0.25%일 경우에 대하여 파괴확률의 민감도 분석을 수행하고, 그 결과를 표 5에 나타내었다. 여기서, $dP_f/d\mu$ 와 $dP_f/d\sigma$ 는 확률변수 X(수두)나 자연대수 $\ln X$ (투수계수)가 정규분포 확률변수인 경우, 확률변수 X의 평균과 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도이며, $dP_f/d\lambda$ 와 $dP_f/d\zeta$ 는 $\ln X$ 의 평균과 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도이다.

표 5. 파괴확률의 민감도 분석($P_f = 0.25\%$, $F_s=3.0$)

확률변수	$\frac{dP_f}{d\mu}$	$\frac{dP_f}{d\sigma}$	$\frac{dP_f}{d\lambda^*}$	$\frac{dP_f}{d\zeta^{**}}$
지표면 지하수위	9.724×10^{-4}	1.599×10^{-3}	9.724×10^{-4}	1.599×10^{-3}
매립토층	$3.532 \times 10^{+2}$	$8.147 \times 10^{+2}$	7.605×10^{-3}	1.321×10^{-2}
토사층	$7.275 \times 10^{+2}$	$1.400 \times 10^{+3}$	7.137×10^{-3}	1.164×10^{-2}
풍화토층	$6.111 \times 10^{+2}$	$-1.518 \times 10^{+2}$	5.321×10^{-4}	6.474×10^{-5}
풍화암층	$5.428 \times 10^{+2}$	$-1.776 \times 10^{+2}$	4.540×10^{-5}	4.713×10^{-7}

※ $\lambda^* = \mu_{\ln X}$, $\zeta^{**} = \sigma_{\ln X}$

평균 및 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도는 모든 확률변수에서 양(+)의 값으로 산정되어 지표면 지하수위와 지반의 투수계수가 증가할수록 굴착단면의 유입수량(Q)도 증가하는 것으로 평가되었다. 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 매립층의 투수계수이며, 토사층의 투수계수, 지표면의 지하수위, 풍화토층과 풍화암층의 투수계수 순으로 나타났으며, 확률변수의 평균값과 표준편차 모두 동일한 결과를 보였다. 따라서, 굴착공사시 굴착단면으로 유입되는 지하수량을 감소시키기 위해서는 매립토층과 토사층에 대한 지수대책이나 지표면 지하수위를 감소시키는 것이 효과적인 것으로 평가할 수 있다.

4.4 분산계수에 따른 파괴확률의 변화

지반 투수계수의 분산계수가 파괴확률에 미치는 영향을 분석하기 위하여 안전율이 3.0 ($Q_{target}=4.371m^3/day$)일 때, 투수계수의 분산계수를 변화시키며 파괴확률을 계산하였다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이 투수계수의 분산특성이 증가함에 따라 파괴확률도 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 굴착단면의 지하수 유입량에 대한 안정성 평가에 있어서 투수계수의 확률분포와 분산을 정확하게 평가하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

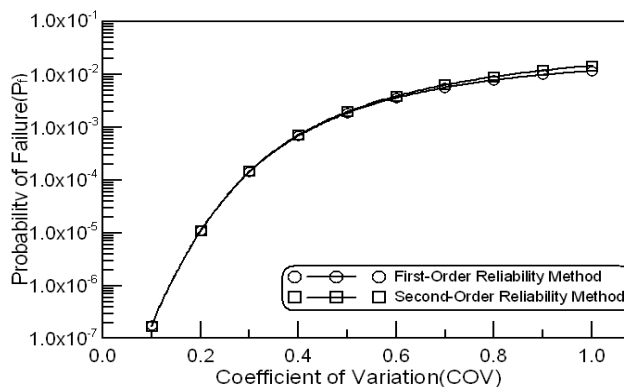


그림 7. 분산계수에 따른 파괴확률

5. 결론

본 논문에서는 차원 지하수 흐름해석이 가능한 수치해석 프로그램을 제작 검증하고 신뢰성 해석프로그램과 연계하여 지하수 흐름에 관한 신뢰성 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지반물성치들의 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있도록 지하수 흐름해석 프로그램에 일계 및 이계 신뢰성 이론을 이용하여 지하수 흐름에 관한 신뢰성 해석을 수행하고 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률과 비교하여 적정성을 검증하였다. 그 결과 일계 및 이계신뢰성 분석법을 이용한 파괴확률과 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률이 거의 유사하게 평가되어 지하수 유동에 관한 신뢰성 해석프로그램이 유효한 것으로 분석되었다.
2. 확정론적 해석에서 안전율이 1.5~2.5로 안전하게 평가된 경우도 확률변수의 분산특성을 고려한 신뢰성 해석에서는 파괴확률이 0.72~13.13%로 불안정한 결과를 나타내었다.
3. 지표수위와 층별 투수계수의 평균 및 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도 분석결과 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 매립층의 투수계수이며, 토사층의 투수계수, 지표면의 지하수위, 풍화토 층과 풍화암층의 투수계수 순으로 나타났다. 확률변수들(지하수위, 투수계수) 중에서 투수계수가 지하수위보다 더 민감한 것으로 나타났다. 또한 확률변수의 파괴확률에 미치는 민감도를 검토한 결과 평균값이 미치는 민감도가 표준편차의 경우보다 큰 것으로 나타났다. 이를 볼 때 지반물성치에 대한 정확한 평균값의 산출이 중요한 것으로 사료된다.
4. 안전율 변화에 따른 파괴확률 평가결과, 안전율이 증가할수록 파괴확률이 점차 감소하는 경향을 나타냈으며 안전율이 2.0이상일 때 1%미만의 파괴확률을 보였다. 분산계수에 따른 파괴확률의 영향성 평가 결과, 분산계수가 증가할수록 파괴확률도 증가하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비 지원(과제번호 : 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김홍석(2004), *지하굴착지반에서의 지하수 흐름해석에 관한 신뢰성 연구*, 144p.
2. Lumb, P.(1966), "The Variability of Natural Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 74~97
3. Meyerhof, G. G.(1970), "Safety Factors in Soil Mechanics," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 140~148.
4. 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.