

파괴 확률론을 이용한 양압력을 받는 지하구조물의 안정성 평가

Evaluation of Stability of Underground Structure subjected to Hydraulic Uplift Pressure using the Probability of Failure

하익수* · 윤현석** · 정영훈*** · 박찬훈**** · 정충기***** · 김명모*****

Ha, Ik Soo · Yoon, Hyun Suk · Jung, Young Hoon · Park Chan Hoon · Chung, Choong Ki · Kim, Myoung Mo

1. 서 론

양압력을 받는 지하 구조물에 대한 기존의 안정성 평가 방법은 고려되는 변수들이 일정한 물변의 값을 갖는다는 가정에 입각한 확정론적(deterministic) 방법이다. 그러나 안정성 평가에 주된 영향인자가 되는 구조물에 작용하는 하중이나 구조물과 지반의 물성치들은 고정된 어떤 값을 갖는다고 보다는 평균값을 중심으로 각각 변수의 분산 특성에 따라 분포하는 통계적인 특성을 가지고 있다. 따라서 기존의 확정론적 해석 방법에서는 이러한 불확실성을 고려하여 안전여유를 가지도록 일정한 값의 안전율을 도입하여 사용하고 있다.

양압력을 받는 구조물의 안정성을 평가함에 있어 구조물과 지반의 물성치나 작용하는 외부 하중의 임의성을 보다 합리적으로 고려하여 기존 안전율 방법보다 체계적이며 논리적으로 확률·통계 이론을 적용하는 방법이 파괴확률론을 이용하는 확률론적(probabilistic) 방법이다.

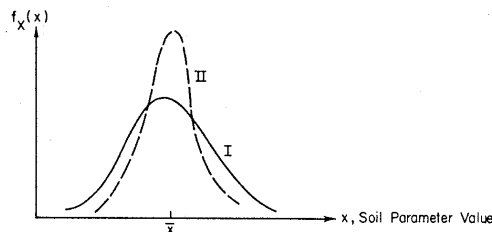


그림 1. 임의 토질 정수의 확률론적 분포

특히 지반 구조물의 경우는 기존의 안전율에 입각한 확정론적 안정성 평가 방법은 이러한 재료의 분산 특성을 고려하지 못한다. 예로, 그림 1에서와 같이 토질 정수(soil parameters)의 불확실성은 확률변수(random variable)의 확률밀도함수(probability density function), $f(x)$ 로 나타내며, 이러한 확률밀도함수는 임의 토질 정수의 상대적 기능성의 다양한 값으로 정의되고, 확률변수의 통계적 특성은 토질정수의 가중치 평균값인 평균과 분산으로 나타낼 수 있다.

2. 파괴확률해석

구조물의 신뢰도를 구함에 있어 구조물의 안전과 파괴를 판단할 수 있는 설계기준(design criterion)은 구조물에 가해지는 하중요소(load factor)와 이에 저항하는 구조물의 저항요소(resistance factor)로 나타난다. 구조물의 신뢰도는 다음과 같이 파괴확률로 정의될 수 있다.

$$R_o = P_s = 1 - P_f \quad (1)$$

여기서 P_s 는 안전확률, P_f 는 구조물의 파괴확률을 나타낸다.

* 전라북도대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-7354(E-mail:molefrog@snu.ac.kr)
** 서울대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-8737(E-mail:yoons@kong.snu.ac.kr)
*** 서울대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-8730(E-mail:kekka@kong.snu.ac.kr)
**** 서울대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-8701-402(E-mail:p4208@shinbiry.com)
***** 서울대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-7347(E-mail:geolabs@kong.snu.ac.kr)
***** 서울대학교 지공학과 교수 · 공학박사 · 02-890-7348(E-mail:geotech@kong.snu.ac.kr)

구조물의 저항(Resistance) R , 하중(Load) S 는 수많은 변수들의 확률분포함수로 나타나며, 이때 구조물의 파괴는 R 이 S 보다 작을 때 일어난다. 구조물의 설계기준은 다음의 식으로 정의된다.

$$Z = R(X) - S(X) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (2)$$

$R(X)$: 구조물의 저항력 (본 연구의 경우 상재중의 무게, 박스의 무게, 박스 측면의 마찰저항 등)

$S(X)$: 구조물에 작용하는 하중 (본 연구의 경우 상승 양압력)

여기서 $Z = 0$ 은 구조물의 안전과 파괴의 경계인 설계 기준식이 되며 이는 해석 대상이 되는 구조물의 파괴양식(failure mode)에 따라 유도된 식으로 파괴방정식(failure equation), 혹은 한계상태식(limit state equation), 안전여유(safety margin) 등으로 불려진다.

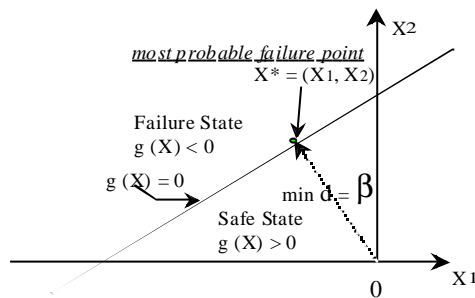


그림 2 파괴곡면과 신뢰도지수 (변수가 2개인 경우)

그림 2에서와 같이 기하학적으로 한계상태, $g(X) = 0$ 은 "파괴곡면"으로 불리는 n -차원 표면이며, 파괴곡면의 안쪽은 안전상태, $g(X) > 0$ 이고, 파괴곡면의 다른 면은 파괴상태, $g(X) < 0$ 이다. 파괴곡면의 변수공간 원점으로부터의 상대적인 위치는 구조물 신뢰도의 대소를 결정하며, 이는 파괴표면에서 원점까지의 최소 거리의 함수로 표현된다.(Hasofer & Lind, 1974; Ditlevsen, 1979). 여기서 최소거리를 신뢰도 지수(β)로 정의하며 식(3)과 같다.

$$\beta = \frac{-\sum_j x_j \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right)}{\sqrt{\sum_j \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right)^2}} \quad (3)$$

파괴확률은 변수의 분포가 정규분포를 형태를 갖는다면 다음과 같이 신뢰도지수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

여기서, $\Phi(\beta)$ 는 표준정규분포의 분포함수이다.

3. 해석 결과 및 분석

양압력을 받는 구조물에 대한 안정성을 평가하는데 있어서 기존의 안전율을 이용하는 방법과 파괴확률론에 의한 평가 방법을 서로 비교하기 위해 4가지 경우의 예제를 선정하여 해석을 수행하였다. 해석 대상이 되는 구조물의 형태는 4가지 경우 모두 지층 내에 위치한 박스형 구조물로 하였다. 구조물의 위치, 각 지층별 지층 구성과 지층별 지반의 물성치는 같게 하였고(표 1참조), 다만 각 경우별로 지하수위의 위치는 0m(case#1, case#3), -6m(case#2, case#4)로 구조물의 두께는 3.1m(case#1), 0.3m(case#2), 3.45m(case#3), 0.5m(case #4)로 변화시켜서 이를 case #1, case #2, case #3, case#4 로 구분하였다.

그림 3은 해석 단면의 한 예들, 표 2는 두가지 해석방법에 의한 결과를 나타낸다. 또한, 각 경우에 대해 파괴확률론 해석을 통한 영향인자분석을 실시하여 분석결과를 표 2와 그림 5에 나타내었다. 영향인자 분석

표 1. 지층 구조

지층	두께 (m)	물성치
지층 1 (매립토)	4.2	전체 단위 중량 (γ_j): 1.8 t/m ³ , 마찰각 (ϕ): 30°, 점착력 (c): 0 t/m ² 흙/구조물 마찰각 (δ): 10°, 흙/구조물 점착력 (c_u): 0 t/m ²
지층 2 (사질토)	5.4	전체 단위 중량 (γ_j): 2.0 t/m ³ , 마찰각 (ϕ): 27°, 점착력 (c): 5.4 t/m ² 흙/구조물 마찰각 (δ): 9°, 흙/구조물 점착력 (c_u): 2.7 t/m ²
지층 3 (사질토)	5.0	전체 단위 중량 (γ_j): 2.0 t/m ³ , 마찰각 (ϕ): 30°, 점착력 (c): 0 t/m ² 흙/구조물 마찰각 (δ): 10°, 흙/구조물 점착력 (c_u): 0 t/m ²

표 2. 해석 결과 정리

	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
안전율	1.12	1.12	1.2	1.2
신뢰도지수(β)	2.13	1.62	3.0	2.65
파괴확률(P_f)	1.66%	5%	0.135%	0.4%
최대영향인자	콘크리트의 단위중량	지층1(레이어1)의 흙의 단위 중량	콘크리트의 단위중량	지층1(레이어1)의 흙의 단위 중량

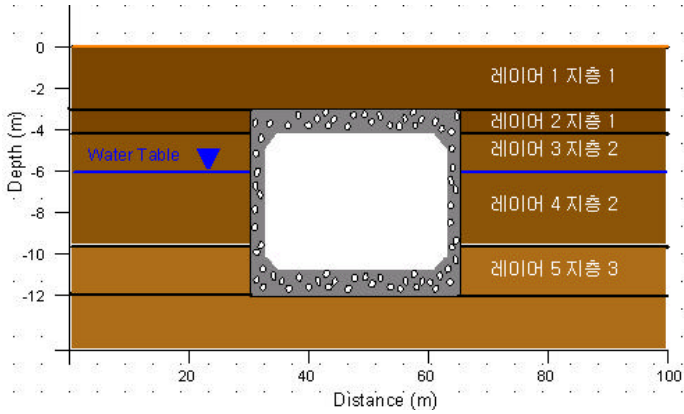


그림 3. 해석단면 예

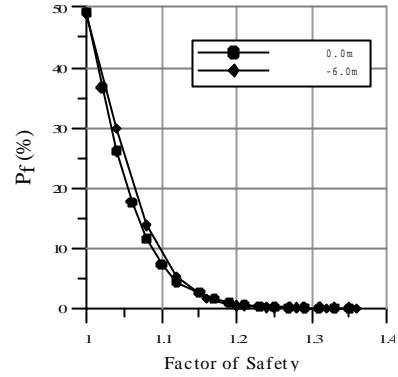
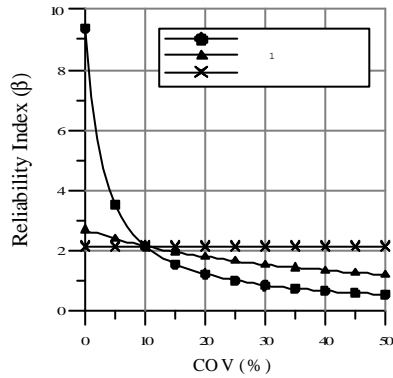
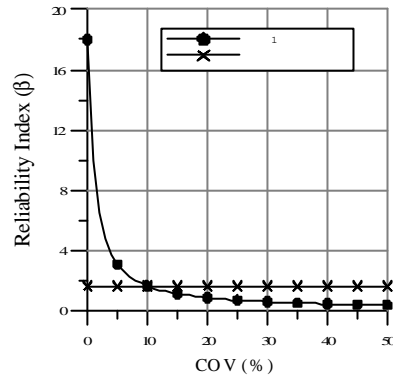


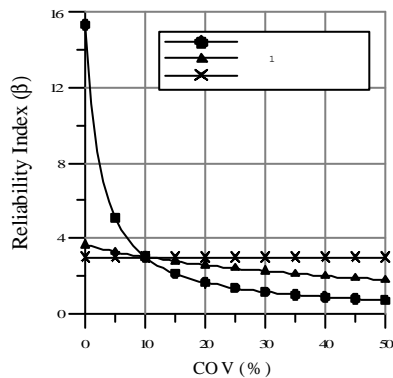
그림 4. 지하수위에 따른 안전율과 파괴확률 관계



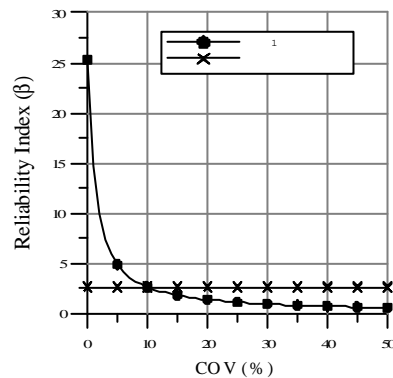
(a) case#1



(b) case #2



(c) case #3



(d) case#4

그림 5. 각 case별 민감도 평가 결과

시 모든 영향인자들의 변동계수값(표준편차/평균)을 10%로 고정시킨 후, 한 영향인자의 변동계수 값만을 0%에서 50%까지 변화시키면서 그 민감도를 평가하였다. 그림 4는 그림 3과 같은 해석단면에 대해 지하수위가 0m, -6m일 때의 양압력을 받는 박스형 구조물의 안전율과 파괴확률의 관계를 나타내는 그림이다.

표 2의 내용을 토대로, case #1 과 case #2의 경우를 비교해보면 지하수위의 위치와 구조물의 단면이 서로 다를지라도 기존 안전율에 의한 방법으로는 똑같은 1.2의 안전율이 나온다. 하지만 파괴확률론에 의한 결과는 서로 상이하다. 즉, 신뢰도에 따른 파괴확률이 case #1인 경우는 1.66%, case #2인 경우는 5%로 서로 다른 결과를 갖는다. 즉, 양압력을 받는 구조물의 안정성 평가에 있어서 파괴확률론에 의한 방법은 기존방법(안전율 평가법)으로는 똑같은 안정성을 보이는 결과로 판단되더라도 구조물의 파괴확률은 지하수위의 위치나 구조물의 단면 변화 등 해석단면의 기하학적인 모양에 따라서 서로 다른 결과를 나타낼 수 있음을 보여준다. 또한 영향인자분석을 통해서 같은 안전율을 갖는 해석단면에 대해 구조물의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 최대영향인자들이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다.

case #3과 case #4는 도로교 표준 시방서에 명기되어 있는 양압력을 받는 구조물에 대한 기준 안전율인 1.2를 만족하도록 한 조건에서 지하수위와 구조물 단면을 달리한 경우에 대해 파괴확률을 구해 본 것이다.

비교 결과, case #1과 case #2에서와 마찬가지로의 결과를 갖는다. 또한 그림 4를 통해서 알 수 있듯이 제한적인 경우에 대한 분석이기는 하나 안전율에 대한 파괴확률이 안전율이 1.15 이상인 경우에는 파괴확률의 변화가 거의 없으며 안전율이 1.2이상인 경우에는 파괴확률이 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 분석한 특정한 경우에 한해 도로교 표준 시방서에 명기된 안전율 1.2는 어느 정도 타당한 값으로 여겨진다.

4. 결 론

본 연구에서는 양압력을 받는 지하구조물의 안정성을 평가하는 방법으로 기존 안전율 방법보다 체계적이며 논리적으로 확률·통계 이론을 적용하는 파괴확률론에 의한 방법을 사용하였으며 기존 방법과의 비교와 함께 영향인자들에 대한 민감도 평가를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

양압력을 받는 구조물에 대한 안정성 평가에 있어서 기존의 안전율 방법에서는 구조물과 지하수위의 상대적인 위치가 변함에도 같은 안전율이 얻어지는 구조물일지라도 신뢰성평가를 통해 얻어진 파괴확률은 서로 다르게 나타남을 확인하였다. 또한 민감도분석을 통해서 구조물의 안정성에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 영향인자들 정량적으로 평가할 수 있었다. 따라서 기존의 안전율과 함께 파괴확률론에 의한 구조물의 안정성 평가 방법을 병용하는 것이 더욱 합리적인 구조물 설계 방법일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구결과는 1998년 9월부터 2000년 7월까지 시행된 과학기술부의 특정연구개발사업에 참여하여 나온 결과이며 본 연구를 가능케한 과학기술부에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ayyub, B.M and McCuen, R.H. (1997). *Probability, Statistics, & Reliability for Engineers*. CRC Press.
2. Hasofer, A.M and Lind, N. (1974). "An Exact and Invariant First-Order Reliability Format." *J. of Engrg Mechanics*, ASCE, Vol. 100, No. EMI, February, pp.111-121.
3. Ditlevsen, O. (1979). "Generalized Second Moment Reliability Index." *J. of Structural Mechanics*, Vol. 7, No. 4, pp.435-451