

단일모드 구간해법을 이용한 보강토옹벽 설계의 신뢰성해석

Reliability Analysis in Designing of Reinforced Soil Structures using Uni-Modal Bounds

김 현 기^{1*} Kim, Hyun-Ki
이 성 혁² Lee, Sung-Hyouk
최 찬 용³ Choi, Chan-Yong

ABSTRACT

Evaluation of stability in traditional designing of reinforced soil structures is executed by examination of internal and external stability. Analysis of internal stability is for pull-out and ductile strength. Analysis of external stability is for settlement, overturning and sliding. To minimize inherent uncertainties of soil properties and analytical model, reliability analysis was developed recently. In this study, reliability analysis method considering simultaneous failure probability for various failure mode of internal and external stability is proposed. By applying uni-modal bounds, Stability of system reliability of reinforced soil structures is evaluated by integrating multi failure mode for various analytical model. Because of complex consideration for various failure shapes and modes, it is possible to secure advanced safety by using simultaneous failure probability. And evaluation of reinforced soil structure is executed by representative index, simultaneous failure probability, than previous method.

요 지

전통적인 보강토옹벽 설계에서의 안정성 검토는 내적·외적 안정으로 구분하여 평가하며, 내적 안정은 보강재의 인발, 파단을 대상으로 하고 외적 안정은 구조체의 침하, 전도, 활동을 대상으로 한다. 최근 지반물성과 해석모델이 갖는 고유 불확실성을 최소화하기 위하여 신뢰성해석이 개발되어져 왔다. 본 연구에서는 내적·외적 안정이라고 정의되는 다양한 파괴모드에 대한 동시 파괴확률의 산정할 수 있도록 체계 신뢰성해석을 제안하였다. 단일구간 모드해법을 적용함에 의해 여러 안정해석에 대한 파괴모드를 통합하여 보강토옹벽 전체 시스템의 안정성을 평가할 수 있도록 하였다. 동시 파괴확률을 이용하면 대상으로 하는 안정해석모델과 파괴형상 및 파괴확률을 복합적으로 고려할 수 있기 때문에 개선된 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 안정해석모델별로 여러 지표를 이용하여 평가되었던 보강토옹벽의 설계를 대표 지표를 통하여 평가할 수 있다.

Keywords : Reinforced soil structures, System reliability, Multi-failure mode

1. 서 론

최근 보강토 옹벽의 공법이나 보강재의 종류가 다양해지면서 설계법이 복잡해지고 있지만, 기술자들이 보강토 옹벽의 설계개념을 정확히 이해하지 못하고 부적절한 계수들을 적용하여 옹벽의 안정성이 저하되고 시공 완료 후

에 다시 보강을 실시해야 하는 경우가 발생하여 경제적 손실 등을 야기하고 있다. 특히, 연약한 지반 위에 보강토 옹벽이 시공될 경우 침하로 인하여 벽체에 균열이나 변형이 발생하는 경우가 있다. 이러한 피해를 예방하기 위해서는 보강토 옹벽 시공 전에 지지력을 확보할 수 있는 조치를 취해야 한다.

1* 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI, E-mail: hkkim@krri.re.kr)
2 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI)
3 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Railway Structure Research, KRRI)

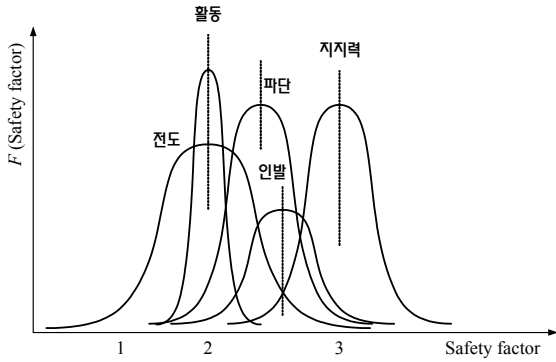


그림 1. 보강토옹벽의 안전율

이상과 같은 불안정성을 최소화하기 위하여 전통적인 보강토옹벽 설계에서 안정성 검토는 내적·외적 안정으로 구분하여 평가하며, 내적 안정은 보강재의 인발, 파단을 대상으로 하고 외적 안정은 구조체의 침하, 전도, 활동을 대상으로 하게 된다. 항목별 안정성 평가는 안전율을 기반으로 시행되며, 국가별 또는 기관별로 별도의 기준 안전율이 제안되어져 있다. 하지만, 안전율은 불확실성을 포함하고 있으며, 대표 값을 이용하여 산출된 평균적인 개념이기 때문에(그림 1), 부분적으로 과다설계 또는 과소설계가 될 가능성이 있다.

한편 최근 안전율 기반의 허용응력설계기법과 지반정수가 갖고 있는 불확실성의 최소화를 위하여 신뢰성해석기법이 개발되어져 왔다. 특히, 허용응력설계는 여러 가지 안정해석모델 즉, 다양한 파괴모드에 대한 고려가 불가능하기 때문에 여러 가지 파괴양식에 대하여 종합적으로 안정성을 평가할 수 있는 방법으로 체계 신뢰성석기법이 개발되어져 왔다(Zevgolis 등, 2006; Castillo 등, 2004). 이상의 연구자는 방파제를 대상으로 체계 신뢰성해석기법을 적용한 사례이며 대상으로 하는 안정해석모델도 3가지에 대하여 수행하였다(그림 2).

이와 같이 체계 신뢰성해석을 이용하면 기존에 독립적으로 시행되고 검토되었던 안정해석결과를 하나의 지표로 관리하고 평가할 수 있다. 본 연구에서는 보강토옹벽의 설계에 있어서 검토되는 내적·외적 안정성 평가에 있어서, 다양한 파괴모드에 대하여 동시에 파괴확률을 산정할 수 있도록 체계 신뢰성해석을 제안하였다. 단일모드 구간해법을 적용함으로써 여러 안정해석에 대한 파괴모드를 통합하여 보강토옹벽 전체 시스템의 안정성을 하나의 지표로 평가할 수 있도록 하였다. 동시 파괴확률을 이용하면 대상으로 하는 안정해석모델과 파괴형상 및 파괴확률을 복합적으로 고려할 수 있기 때문에 개선된 안전성을 확보

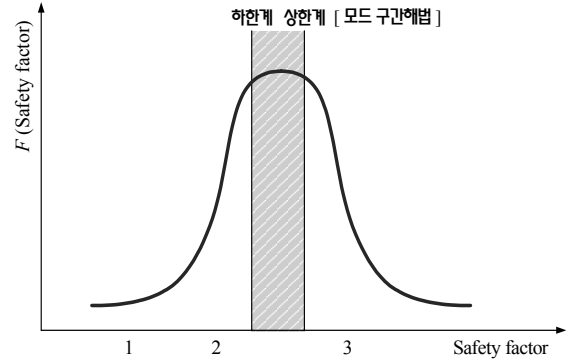


그림 2. 모드 구간해법에 의한 상한계외 하한계

할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 안전율과 파괴확률

전통적인 지반의 안정해석에서의 안정성은 지반정수의 대표 값을 적용한 안전율 개념을 사용하고 있어 지반내에 존재하는 불확실성을 반영하기 어렵지만, 신뢰성해석에서는 지반정수의 확률분포를 반영한 해석이 가능하고, 이를 이용하여 지반정수, 해석모델의 불확실성을 최소화할 수 있는 기법으로 최근 많은 연구가 수행되고 있다(김기영 등, 2006; 김진만, 2007).

신뢰성해석은 한계상태에 대한 파괴확률을 산출하여 안전성을 평가하며, 안전율의 확률밀도함수가 기준 안전율을 하회하는 한계상태함수 구간의 확률밀도 면적을 통해 결정한다. 하지만, 신뢰성해석의 확률밀도함수를 정확히 구하는 것은 매우 어렵고 보통 사용되는 실용적인 방법은 안전율의 기대값과 표준편차를 통한 것이다. 파괴확률은 신뢰지수에 의해 간접적으로 산정할 수 있으며, 기준안전율이 1.0인 경우 다음과 같이 산정한다(김형배 등, 2002).

$$\beta = \frac{E[FS] - 1.0}{\sigma_{FS}} \quad (1)$$

여기서, β 는 신뢰지수이며, $E[FS]$ 는 안전율의 기댓값, σ_{FS} 는 안전율의 표준편차를 나타낸다.

한편, 지반의 안정해석결과인 안전율이 정규확률분포를 따른다고 가정하면 파괴확률은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_r(f) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} g(z) dz \quad (2)$$

여기서, $P_r(f)$ 는 파괴확률, $\Phi(-\beta)$ 는 표준정규분포 상의 $-\infty$ 에서 $-\beta$ 까지의 확률면적, 그리고 $g(z)$ 는 사면안정에서 안전율에 대한 한계상태함수로 정의된다.

2.2 다중파괴모드에 대한 체계 신뢰성해석

파괴양식이 하나로 주어진 경우에 대한 신뢰성해석은 하중저항설계법(Level I), 신뢰지수법(Level II) 및 모사법(Level III)을 이용하여 산출할 수 있다. 하지만, 대상 구조물의 안전성을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 여러 가지 파괴양식에 대한 종합적인 안전성 평가가 수행되어야 한다. 따라서 개별 파괴양식에 대해 얻어진 신뢰성 해석결과를 이용하여 발생 가능한 모든 파괴양식에 대한 총체적인 안전성 평가를 하기 위한 방법이 필요로 된다. 안정해석모델에 따라 다르게 나타나는 파괴모드는 서로 독립적이라기보다, 상호 연관된 개연성을 최소한 부분적으로라도 갖고 있다고 할 수 있다. 잠재적으로 존재하는 여러 가지 파괴모드를 체계로 구성하여 해석하는 방법을 체계신뢰성해석(System reliability analysis)라고 한다. 체계신뢰성해석은 파괴모드간의 연관관계에 따라 직렬계 구조 또는 병렬계 구조 또는 이 두 가지의 혼합의 형태로 구분할 수 있다. 또한, 보강토옹벽의 설계에 있어서 내적·외적 안정성에 문제가 발생하여 파괴가 발생하면, 보강토옹벽 시스템이 파괴되기 때문에 가외성(Redundancy)이 없는 시스템으로 직렬계 구조를 갖는다고 판단할 수 있다.

여러 가지 구성요소로 이루어진 체계의 신뢰성은 다중 파괴모드의 형태를 갖게 된다. k 개의 파괴모드로 구성되어 있는 시스템이 있다고 가정하면, 각 파괴모드는 식 (3)과 같이 서로 다른 k 개의 한계상태함수로 표현할 수 있다.

$$g_j(X) = g_j(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (3)$$

$; i=1, 2, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, k$

여기서, $g_j(X) = j$ 파괴모드에 대한 한계상태함수이며, X_i 는 파괴 구성요소를 나타낸다.

복수의 한계상태에 의한 영향을 고려하는 경우에 m 개의 직렬계 구조의 파괴모드에 대한 파괴사건을 정의하면, 각각의 한계상태에 대한 파괴확률은 면적분을 사용해서 구할 수 있다. 하지만, 각 파괴모드 사이에 상호 연관성이 존재한다면, 체계의 파괴확률 계산은 매우 어렵기 때문에 Cornell(1967)의 단일모드 구간해법과 Ditlevsen(1979)의

이중모드 구간해법 등이 근사적 해법으로 개발되어져 왔으며, 최근에는 선형계획법에 의한 구간해법이 개발되었다.

3. 단일구간해법을 이용한 보강토옹벽의 체계 신뢰성해석 기법 개발

3.1 다중 파괴모드 정의

보강토옹벽의 안정성 평가항목은 내적·외적 안정을 대상으로 시행한다. 본 연구에서 정의한 다중 파괴모드는 내적 안정성에 대하여 보강재의 인발, 파단에 대하여 정의하고, 외적 안정은 보강토옹벽 구조체의 침하, 전도, 활동을 선정하였다. 따라서 총 5개의 다중 파괴모드에 대한 안정성 평가를 동시에 시행할 수 있도록 하였다(표 1).

3.2 단일모드 구간해법(Uni-modal bounds)을 이용한 체계 신뢰성해석기법 개발

체계 신뢰성해석에서 직렬계 구조는 모든 요소가 독립적이며 상관성이 없다고 가정하고 있다. 반면, 전체 또는 임의의 요소사이에 상호 연관성이 존재한다면, 체계의 파괴확률 계산은 일반적으로 매우 어렵게 된다. 이에 단일모드 구간해법이 구성요소의 쌍(pair) 사이의 양의 상관성을 갖는 직렬구조 시스템에 대하여 유도되었다. 다시 말해, 이러한 경계는 상관계수 ρ_{ij} 가 0과 같거나 또는 상당히 큰 경우에 적용할 수 있다. 양의 상관성을 갖는 직렬계 구조 체계에 대하여 파괴확률은 다음 식을 만족시켜야 한다.

$$\max_i \{P[F_i = 1]\} \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P[F_i = 1]) \quad (4)$$

여기에서 $P[F_i]$ 값이 작은 경우, 식 (5)의 우측 항을 다음과 같이 근사화하여 사용할 수 있다.

$$1 - \prod_{i=1}^n (1 - p[F_i = 1]) \approx \sum_{i=1}^n P[F_i] \quad (5)$$

하한계는 모든 요소가 완전 상관($\rho_{ij} = 1$)인 경우의 파괴확률이다. 완전 상관이라면, 모든 요소는 하나의 요소가 파괴되었을 때 파괴되는 경향을 보일 것이며, 파괴확률은 구성요소 사이의 가장 큰 파괴확률에 상응하게 될 것이다. 상한계는 모든 요소가 상관성이 없을 때의 파괴확률로 정

표 1. 해석대상 안정해석모델

항목	정의	안정해석모델	개요	비고
전도	전면블록을 포함한 보강토체가 옹벽 선단을 중심으로 회전하려는 모멘트와 이에 대해 저항하려는 모멘트에 근거한 안정검토	$g_1(x) = \frac{M_o}{M_R}$		외적 안정
지지력	보강토 옹벽의 자중 및 토압으로 인한 수직응력과 지반의 허용지지력과의 관계에 근거한 안정검토	$g_2(x) = \frac{q_{ult}}{\sigma_v}$		외적 안정
활동	보강토체와 지반 사이에서 발생하는 활동력과 이에 대한 저항력에 근거하여 안정검토	$g_3(x) = \frac{\sum R_v \cdot \tan \phi \cdot GL}{P_{sh} + P_{qh}}$		외적 안정
인발저항	각 보강재에 유발되는 인장력에 대하여 보강재의 유효길이에 따른 인발저항력에 근거하여 안정검토	$g_4(x) = \frac{T_{pull}}{T_{max.k}}$		내적 안정
파단저항	보강재에 유발되는 인장력에 대한 보강재가 견딜 수 있는 최대 허용인장력에 근거한 안정검토	$g_5(x) = \frac{T_{a.k}}{T_{max.k}}$		내적 안정

P_{sh} : Coulomb 수평토압

P_{qh} : 상재하중에 의한 수평토압

$\sum R_v$: 총 연직하중, L : 보강재 길이

c, ϕ : 지반 강도정수,

M_o : 저항 모멘트 ($M_o = P_{ah} \cdot y_o + P_{qh} \cdot y_q$),

M_r : 전도 모멘트 ($M_r = \sum R_v \cdot x_v$),

q_{ult} : 한계 허용지지력

σ_v : 접지압 = $\frac{\sum R_v}{B}$

B' : 편심 환산길이(=L- 2e)

e : 편심 (= $\frac{M_o + M_r}{\sum R_v}$)

T_{pull} : 보강재 인발저항력

$T_{pull} = P_{bear}$

$T_{max.k}$: 축방향 최대인장력,

P_{bear} : 수동저항력

$T_{max.k}$: 최대인장력

$T_{a.k}$: 보강재의 허용인장강도

의된다(Cornell, 1967).

단일모드 구간해법의 정의를 위해 상기 5개의 안정해석 모델을 파괴모드를 대상으로 한다. 먼저, 각 안정해석모델을 적용하여 해석모델에 따른 단위 파괴확률을 산정하도록 한다. 단위 신뢰성해석은 U.S. Army Corps of Engineers

(1997)에서 제안한 실용적 해석기법인 평균값 일계이차모멘트법(Mean Value First Order Second Moment Method)을 사용하였다. 각 안정해석모델에 대하여 산정되는 단위 파괴확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표 2. 분산계수

지반정수	분산계수	문헌
점착력	0.1~0.4	Fredlund and Dahllman(1981) Baecher et al.(1987) Lacasse et al.(1996)
마찰각	0.02~0.12	Schultze(1975)
단위중량	0.03~0.08	Harr(1984)
보강재 파단강도	0.05~0.1	篠田昌弘 등(2004)

표 3. 지반 및 재료의 물성

구 분	단위중량(γ)	내부마찰각(Φ)	점착력(C)	비고
뒤채움토(Reinforced soil)	19.0kN/m ³	30°	0.0kpa	
배면토(Retained soil)	19.0kN/m ³	30°	0.0kpa	
기초지반(Foundation soil)	19.0kN/m ³	30°	0.0kpa	

제 품 별	재 원	재 질	설계절단강도
GRID 6T	6T/3T	폴리에스터(PET)	60kN/m이상
GRID 8T	8T/3T	폴리에스터(PET)	80kN/m이상
GRID 10T	10T/3T	폴리에스터(PET)	100kN/m이상
GRID 15T	15T/3T	폴리에스터(PET)	150kN/m이상

- 전도 : $P[F_{g_1(x)}]$ for $e \leq L/6$
- 지지력 : $P[F_{g_2(x)}]$ for $F.S < 2.5$
- 활동 : $P[F_{g_3(x)}]$ for $F.S < 1.5$ (6)
- 인발저항 : $P[F_{g_4(x)}]$ for $F.S < 2.0$
- 파단저항 : $P[F_{g_5(x)}]$ for $F.S < 1.5$

안정해석모델에 대한 단위 파괴확률을 산정하면 식 (5) 또는 식 (6)을 이용하여, 단일모드 구간해법(Uni-modal bounds)를 찾을 수 있고, 이것이 보강토옹벽의 안정성을 종합적으로 평가할 수 있는 상한계와 하한계로 정의된다. 본 기법을 적용하면, 내적·외적 안정이라고 정의되는 다양한 파괴모드에 대한 동시 파괴확률의 산정할 수 있다.

한편, 확률분포 형태가 결정되면, 평균 및 표준편차와 같은 지반정수를 분포에 맞도록 정의하여야 한다. 대부분의 경우에서 표준편차는 분산계수에 의해 평가된다. 문헌결과를 근거로 하여 각 지반정수에 대한 분산계수를 표 2에 정리하였다.

4. 적용성 분석

4.1 해석대상

해석 단면은 높이 5m의 보강토옹벽을 대상으로 하였으며, 세부사항은 아래의 그림 3에 보였다. 사용된 지오그리드는 6T이고, 길이 3.5m, 60cm 간격으로 시공되어 있는

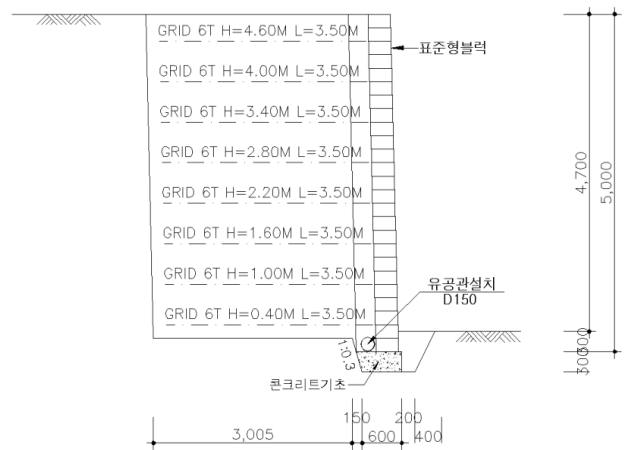


그림 3. 해석대상 보강토옹벽

구조물이다. 안정해석 프로그램은 미국 국가콘크리트구조물협회(NCMA)와 AASHTO98/Demo의 설계지침을 따르는 MSEW(3.0)을 사용하였다. 본 프로그램은 구조적으로 고장된 옹벽에 대한 설계와 분석을 위한 프로그램이다. 본 프로그램과 U.S. Army Corps of Engineers(1997)에서 제안한 실용적인 해석법인 일계이차모멘트법을 이용하여 단위 신뢰성해석을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 단일모드 구간해법을 적용하여 보강토옹벽 설계에 있어 체계 신뢰성을 정의하였다. 뒤채움토와 배면토 및 기초지반으로 구분하여 대상 지반의 물성과 재료의 특성을 다음 표 3과 같다.

각 확률변수의 분포형태는 정규분포한다고 가정하였으

표 4. 적용 분산계수

지반정수	분산계수(Coefficient of Variance)
마찰각	0.1
단위중량	0.05
보강재 파단강도	0.1

표 5. 일계이차모멘트법 적용을 위한 안정해석 Case 및 물성값

Case	변수	뒤채움재			배면토			기초지반			보강재강도
		γ	c	ϕ	γ	c	ϕ	γ	c	ϕ	TR
1		19	0	30	19	0	30	19	0	30	60
2-1		19,95	0	30	19	0	30	19	0	30	60
2-2		18,05	0	30	19	0	30	19	0	30	60
2-3		19	0	33	19	0	30	19	0	30	60
2-4		19	0	27	19	0	30	19	0	30	60
3-1		19	0	30	19,95	0	30	19	0	30	60
3-2		19	0	30	18,05	0	30	19	0	30	60
3-3		19	0	30	19	0	33	19	0	30	60
3-4		19	0	30	19	0	27	19	0	30	60
4-1		19	0	30	19	0	30	19,95	0	30	60
4-2		19	0	30	19	0	30	18,05	0	30	60
4-3		19	0	30	19	0	30	19	0	33	60
4-4		19	0	30	19	0	30	19	0	27	60
5-1		19	0	30	19	0	30	19	0	30	66
5-2		19	0	30	19	0	30	19	0	30	54

표 6. 단위 신뢰성해석 결과

항목	활동	전도	지지력	파단	인발
평균 안전율	2.4	4.41	4.87	1.62	3.34
안전율 표준편차	3.921E-01	6.232E-01	2.296E+00	3.347E-01	1.410E+00
안전율 분산계수	1.634E-01	1.413E-01	4.715E-01	2.066E-01	4.222E-01
신뢰지수	2.295E+00	4.669E+00	1.032E+00	3.585E-01	9.504E-01
파괴확률(%)	1.086E-02	1.511E-06	1.510E-01	3.600E-01	1.710E-01

며, 지반물성과 보강재의 확률특성을 반영하는 분산계수는 다음의 표 4에 제시한 값을 적용하였다.

4.2 해석결과

보강토옹벽 설계의 신뢰성해석을 위하여 일계이차모멘트법을 적용하였다. 총 5개의 안정해석모델에 대하여 안정해석결과를 이용하여 파괴확률을 산출하였다. 표 5는 신뢰성해석의 적용을 위한 안정해석 케이스와 물성값을 나타낸 것이다. 이 물성값을 적용하여 안전율을 이 결과를 이용하여 각 안정해석모델에 대한 신뢰성 파라미터와 신뢰지수 및 파괴확률을 산정하면 표 6과 같이 산정된다.

안전율을 기반으로 한 전통적인 설계기법을 기반으로

하면 표 6과 그림 4에 보인 것과 같이 항목별로 독립적으로 안정성을 평가하고 확보하게 된다. 각 안정해석모델에 대한 단위 신뢰성해석도 마찬가지로 그림 5와 6과 같이 신뢰지수와 파괴확률을 비교해 보면, 안전율이 크고 안전율의 표준편차와 분산계수가 작을수록 신뢰지수는 식 (1)에 의해서 커지게 되며 파괴확률은 작아지는 경향을 갖는 것을 알 수 있다.

산정된 안전율은 모든 항목에서 기준값을 상회하고 있어 안정적으로 판단된다. 각 안정해석모델에 대하여 수행한 신뢰성해석결과는 신뢰지수가 최대 4.669에서 최소 0.9504로 산출되었으며, 파괴확률은 최대 0.36%, 최소 1.511E-06%로 산정되었다.

U.S. Army Corps of Engineers(1997)에 의하면 목표 신

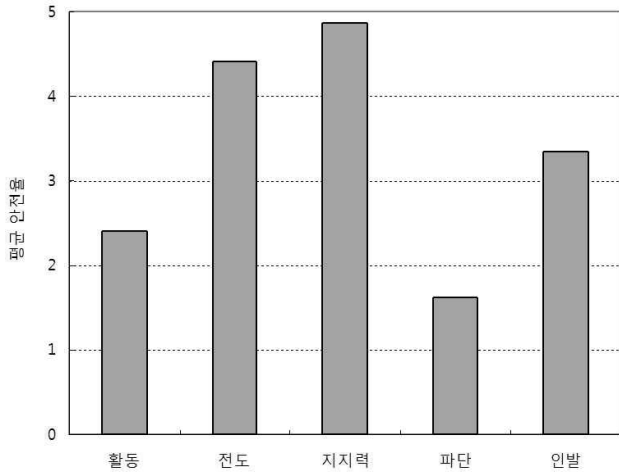


그림 4. 파괴모드별 안전율

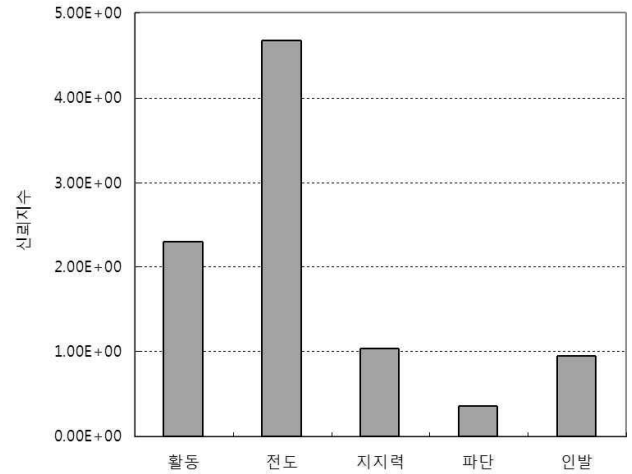


그림 5. 파괴모드별 신뢰지수

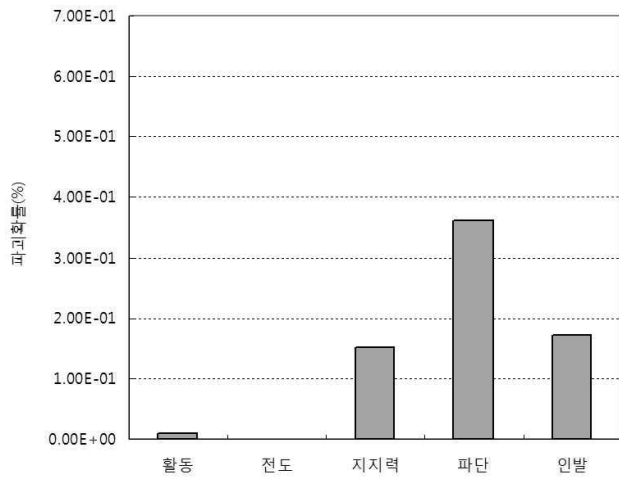


그림 6. 파괴모드별 파괴확률

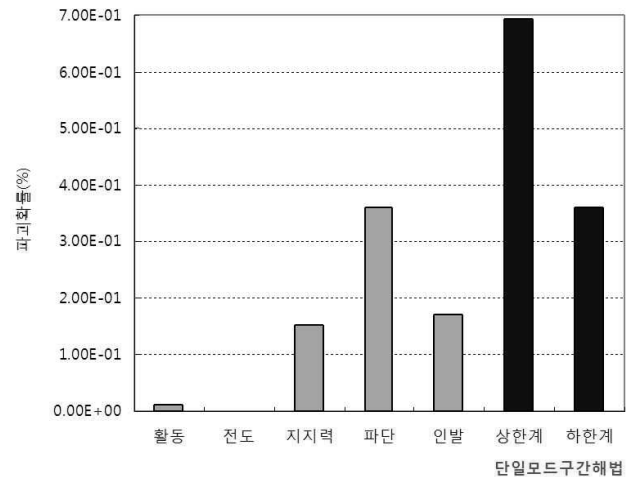


그림 7. 단일모드 구간해법에 의한 체계 신뢰성

표 7. 목표 신뢰지수(U.S. Army Corps of Engineers, 1997)

기대 성능수준	신뢰지수	파괴확률(%)
높음(High)	5	0.00003
좋음(Good)	4	0.003
평균 이상(Above average)	3	0.1
평균 이하(Below average)	2.5	0.6
나쁨(Poor)	2.0	2.3
불만족(Unsatisfactory)	1.5	4.0
위험(Hazardous)	1.0	16

뢰지수를 7단계로 구분하고 있으며, 각 단계는 기대 성능 수준으로 나누어 표 7과 같이 제안하고 있다. “평균 이상 (Above average)”를 기준으로 하면, 신뢰지수 3 이상 그리고 파괴확률 0.1% 이하이어야 안정성이 만족된다. 따라서, 안전을 기반의 전통적인 안정성 평가에서는 모든 항목에 대한 안전이 확보된다고 판단되었으나, 신뢰성 해석결과 “전도”를 제외한 항목에서 기대 성능수준을 만족시키지

못하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 신뢰성해석이 기반정 수와 해석모델이 가지는 불확실성을 반영함에 의해 발생한 결과이다.

여러 가지 안정해석 결과에 의해 확인되는 보강토옹벽 시스템의 안정성 평가를 하나의 지표로 관리하고 평가하기 위하여 본 연구에서 제안한 단일모드 구간해법을 적용하였다. 각 안정해석모델에서 얻어진 파괴모드별 파괴확

표 8. 단일모드 구간해법에 의한 체계 신뢰성해석 결과

항목	상한계(%)	하한계(%)
보강토옹벽 시스템 신뢰도	6.928E-01	3.600E-01

률과 식 (5)와 (6)을 이용하여 보강토옹벽 시스템에 대한 신뢰도를 산출한 결과, 상한계 6.928E-01%, 하한계 3.600E-01%로 산출되었다(표 8). 이와 같이 체계 신뢰성해석기법을 적용함에 의하여 여러 가지 안정해석에 대한 파괴모드를 통합하여 보강토옹벽 전체 시스템의 안정성을 하나의 지표로 평가할 수 있음을 확인하였다. 그림 7은 단일모드 구간해법에 의한 체계 신뢰성해석 결과와 파괴모드별 파괴확률을 함께 도시한 것이다. 하한계는 식에서 정의한 바와 같이 최대 파괴확률과 동일한 값을 나타내지만, 상한계는 최대파괴확률의 약 2배에 해당하는 값을 나타내고 있다. 이상과 같이 체계 신뢰성해석의 도입으로 여러 가지 안정해석모형을 하나로 통합하여 전체 시스템의 안정성을 평가할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존에 수행되었던 전통적인 보강토옹벽의 설계에 대하여 지반물성과 해석모델이 갖는 고유 불확실성을 최소화하기 위하여 신뢰성해석을 도입하였다. 특히, 지금까지 내적 및 외적 안정성 분석에서 항목별로 각기 독립적으로 검토되었던 안전율 기반의 평가를 하나의 지표로 동시에 평가할 수 있도록 보강토옹벽 설계에 대한 단일모드 구간해법을 제안하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보강토옹벽의 설계의 안정성 검토는 보강재의 인발, 파단과 구조체의 침하, 전도, 활동을 대상으로 하고, 항목별로 기준 안전율 확보 여부를 판단하기 때문에 과다설계의 개연성이 존재한다. 또한 대표 값에 의한 평균적인 개념이기 때문에 예기치 않은 불안정성에 도달할 우려가 있다. 본 연구에서는 지반물성과 해석 모델이 갖는 불확실성을 반영하고, 설계에 있어서 안정성 검토기준으로 통일된 하나의 지표를 제안하기 위하여 단일모드 구간해법을 적용하였다. 그 결과 보강토옹벽에 전체 시스템에 대한 안정성을 평가할 수 있었다.
- (2) 예제를 통한 적용성 분석에 따르면 안전율은 모든 안

정해석모델에 대하여 만족하고 있지만, 신뢰성 파라미터는 부분적으로 만족하지 못하고 있고 이는 신뢰성해석을 통하여 불확실성을 반영하였기 때문이라고 판단된다. 단일모드 구간해법을 적용하여 보강토옹벽의 시스템 신뢰도를 평가한 결과, 상한계 6.928E-01%, 하한계 3.600E-01%로 산출되었으며, 여러 가지 안정해석모델을 이용하여 평가되었던 보강토옹벽의 설계를 대표 지표를 통하여 평가할 수 있었다.

향후에 본 논문에서 제안한 단일모드 구간해법을 이용한 보강토옹벽 설계의 신뢰성해석의 완성도를 높이기 위하여 보강토옹벽의 붕괴사태에 대한 분석을 시행할 예정이며, 열차속도에 따른 하중조건 변화에 대한 연구도 추진하여 범용성을 확보하고자 한다.

참고문헌

1. 김기영, 조성은 (2006), “확률론적 사면안정 해석기법에 관한 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제22권, 11호, pp.101-112.
2. 김진만 (2007), “통계오차를 고려한 사면안정 신뢰성해석”, *Jour. of the KGS*, Vol.23, No.3, pp.51-59.
3. 김형배, 이승호 (2002), “실용적인 확률론적 사면안정해석 기법 개발”, *한국지반공학학회논문집*, 제18권, 5호, pp.271-280.
4. 篠田昌弘, 正 館山 勝, 米澤豊司, 古關潤一 (2004), “補強土壁構造物の信頼性解析による荷重係數と抵抗係數”, *第39會 地盤工學研究發表會*.
5. Baecher, G. B. and Ingra, T. S. (1981), “Stochastic FEM in settlement predictions”, *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol.107, No.4, pp.449-464.
6. Castillo, C., Minguez, R., Castillo, E. and Losada, M. A. (2004), “An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters”, *Coastal Eng.*, Vol.53, pp.1-25.
7. Cornell, C. A. (1967), “Bounds on the reliability of structural systems”, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.93, No.1, pp.171-200.
8. Ditlevsen, O. (1979), “Narrow reliability bounds for structural systems”, *Journal of Structural Mechanics*, Vol.7, No.4, pp.453-472.
9. Fredlund, D. G. and Dahlman, A. E. (1972), “Statistical Geotechnical Properties of Glacial Lake Edmonton Sediments”, in *Statistics and Probability in Civil Engineering*. Hong Kong

University Press (Hong Kong Int. Conf.), distributed by Oxford University Press, London.

10. Harr, M. E. (1984), *Reliability-based design in civil engineering*, 1984 Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
11. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in Characterising Soil Properties", *Uncertainty in the Geologic Environment, Proceedings of Uncertainty 96*, madison, Wisconsin. pp.49-75.
12. Schultze, E. (1975), "Frequency Distribution and Correlations of Soil Properties", *Proc. of the 1'st International Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Vol.1, pp.371-387.
13. U.S. Army Corps of Engineers (1997), *Engineering and design, introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical eng.* Tech. Letter No.1110-2-547, Department of the Army, Washington.
14. Zevgolis, Ioannis E. and Bourdeau, Philippe L. (2006), "System reliability of cantilever retaining walls with correlated failure modes", *Geo-congress 2006*.

(논문접수일 2010. 11. 12, 심사완료일 2010. 12. 18)