

토사면의 한계상태 설계법에 관한 연구

A Study of Limit State Design Method in Soil Slope

정기훈¹⁾, Gi-Hun Joung, 김종민²⁾, Jong-Min Kim, 장범수³⁾, Bum-Su Jang

¹⁾세종대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sejong University

²⁾세종대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Sejong University

³⁾한국시설안전기술공단 기술개발부 부장, Department Manager, Research and Development Dept. of Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

SYNOPSIS : The deterministic analysis method has generally used to evaluate the slope stability and it evaluates the slope stability with decision value that is a representative value of design variables. However, one of disadvantages in the deterministic approach is there is not able to consider the uncertainty of soil strength properties, even though it is the biggest influential parameter of the slope stability. On the other hand, the limit state design(LSD) can take a consideration of uncertainties and computes both the reliability index and the probability of failure. LSD method is capable of overcoming the disadvantages of deterministic method and evaluating the slope stability more reliably. In this study, both the mean value and standard deviation of the internal land's representative soil strength properties applied to process the LSD method. The major purpose of this study is to gauge the general applicability of the limit state design in soil slope and to weigh the comparative validity of the proposed partial safety factor. In order to reach the aim of this study, the partial safety factor and resistance factor which totally satisfied the slope's overall safety factor were calculated by the load and resistance safety factor design (LRF).

Key Words : Limit State Design, Reliability Design, Partial Safety Factor, Reliability Index, Slope stability

1. 서 론

전 국토의 70%이상이 산지로 구성되어진 우리나라에서는 사회기반 시설 건설시 사면의 발생은 필연적 일수밖에 없으며 사면의 붕괴로 인한 인명피해 및 경제적 손실이 빈번히 발생하고 있다. 따라서 사면 붕괴로 야기될 수 있는 피해를 방지하기 위해서는 보다 합리적이고 경제적인 사면안정해석 기법의 적용이 요구된다. 현재 일반적으로 적용되는 사면안정해석 방법은 한계평형 해석을 수행하여 사면의 전체 안전율을 산정하는 방식으로서 해석 시 입력 변수의 대푯값을 하나의 확정값으로 선정하는 결정론적 해석법을 적용하고 있다. 그러나 미국, 캐나다, 영국등과 같은 유럽 국가들에서는 이미 입력 변수의 불확실성을 반영하는 확률론적 해석법에 근거한 한계상태 설계의 필요성을 인식하고 이에 대한 설계 기준을 마련하고 있다. 따라서 국내에서도 국제적 설계 기준에 부합하며 보다 정확하고 신뢰성 높은 설계 기준을 조속히 마련해야 될 것으로 판단된다.

자연 상태의 지반은 본질적으로 공간적 변동성이 크고 지반강도 정수를 산정하는데 있어 많은 불확실성을 내포하고 있으며 또한 안전을 산정에 적용되는 안정해석 기법의 편향성이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 불확실성 요소중 안정 해석에 가장 큰 영향을 미치는 지반강도정수(점착력, 내부마찰각)를 확률론적 변수로 취급하고 한계상태 해석을 수행하여 확률 변수에 대한 부분안전계수 및 저항계수를 토질별로 제안하고자 한다.

2. 한계상태 설계법

2.1 기본이론

2.1.1 파괴확률 (The probability of Failure, P_f)

구조물의 안전성과 관련된 문제는 저항능력(Resistance)과 하중(Load)의 문제로 귀착된다. 즉, 구조물의 신뢰성에 대한 문제는 하중에 대한 구조물 저항능력의 문제로 식 (1)과같이 공식화될 수 있다.

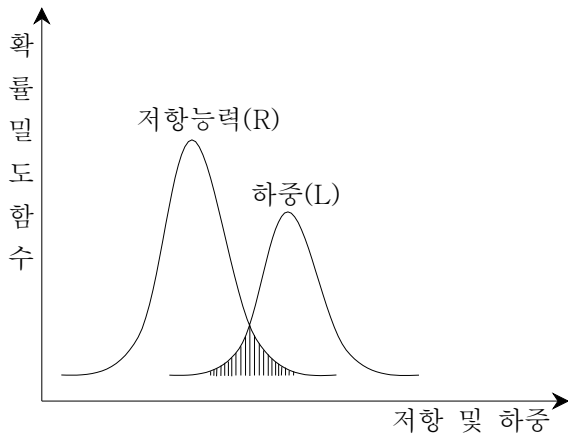


그림 1 구조물의 저항능력

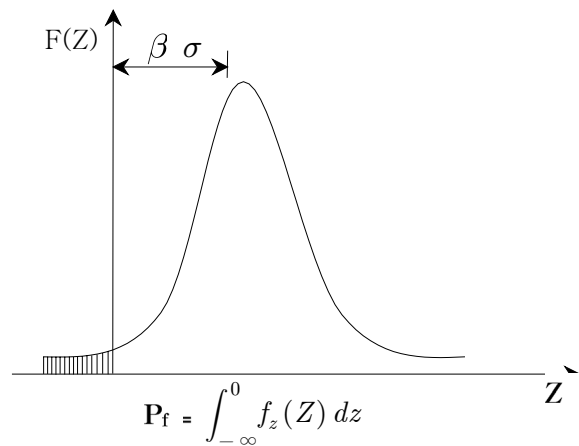


그림 2 파괴확률 개념도

$$Z = R - L, Z < 0 : \text{파괴상태} \quad (1)$$

$$R = \text{저항함수}, L = \text{하중함수}, Z = \text{파괴함수}$$

저항함수와 하중함수를 구성하는 변수들을 확률 변수로 취급할 경우 안전 상태의 확률 분포는 그림 1의 빗금 부분으로 나타낼 수 있으며, 식 (1)의 안전여유 역시 확률변수가 되어 파괴확률은 그림 2와 같이 도출할 수 있다. 따라서 한계상태 해석은 구조물에 있어서 파괴($Z < 0$) 가능성 또는 확률을 분석하는 것이며, 반대의 경우 즉 Z 가 0 보다 클 경우는 구조물이 그 기능을 정상적으로 수행하는 것을 의미하며 $Z = 0$ 인 상태는 구조물의 한계 상태를 의미한다. 따라서 구조물의 파괴 확률은 R 이 L 보다 작을 경우의 확률을 계산한 값으로서 정의할 수 있다.

2.1.2 신뢰지수 (Reliability Index, β)

신뢰 지수는 구조물 성능의 기대치에 대한 정량적인 판단 지표로서 상대적인 신뢰도를 평가할 수 있는 척도로 사용될 수 있다. 즉, 다음의 그림 3과같이 높은 β 값을 보이는 구조물은 낮은 β 값을 보이는 구조물에 비해 상대적으로 안전하다.

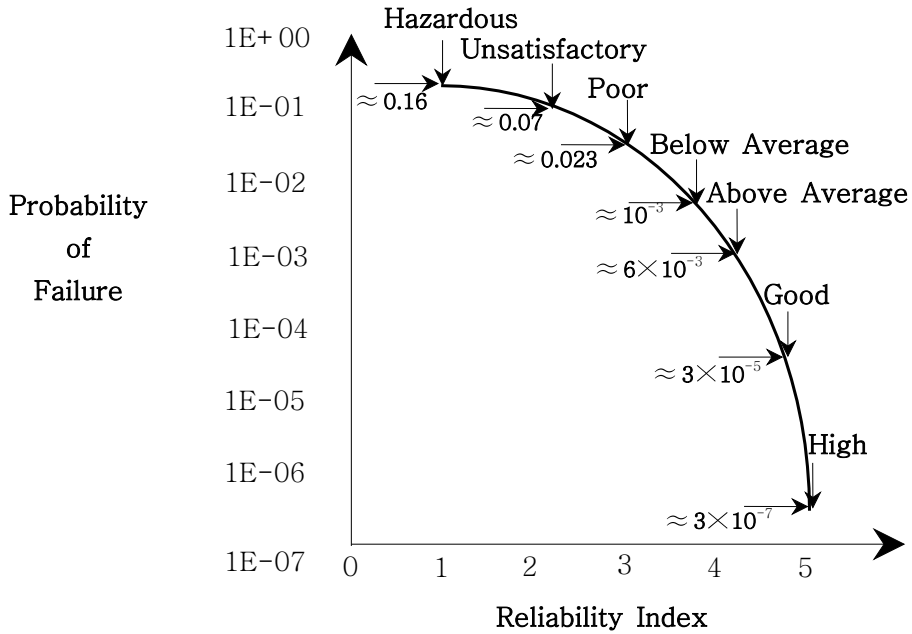


그림 3 신뢰지수와 파괴확률의 관계 (US Army Corps of Engineers, 1997)

신뢰 지수는 식(2) 와같이 β 로 표기되며 한계상태를 상회하는 파괴함수의 표준편차 값으로 정의한다.

$$\beta = \frac{\mu_Z - Z @ Limit State Value}{\sigma_Z} \quad (2)$$

만일 한계 상태를 파괴함수가 0 인 경우로 가정한다면 신뢰지수는 파괴함수 $Z(x_i)$ 의 평균값에 대한 표준편차의 비로 계산할 수 있으며, 식(3)과 같다.

$$Z(x_i) = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (3)$$

2.1.3 지반강도정수의 불확실성

지반공학적 문제에 있어서 불확실성은 다양한 원인에 기인하며 그 중에서 중요 요소를 네 가지로 분류해보면 다음의 그림 3과같이 공간적 변동성(Spatial Variation), 측정오차(Measurement Error), 통계오차(Statistical Error), 그리고 모델의 불확실성(Model Uncertainty)으로서 분류할 수 있다.

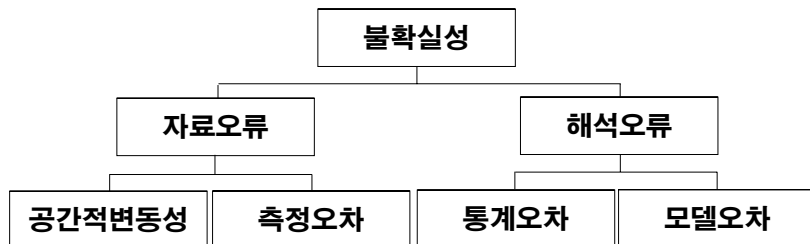


그림 4 지반강도 정수의 불확실성(John T. Christian, 1994)

지반의 공간적 변동성은 지반의 형성과정과 형성 후의 변화과정에서 지반구성 물질의 차이, 지반의 응력, 함수비 등 지반 조건에 따라 지반의 성질이 위치마다 다르고 또 수직 및 수평방향에 따라 차이가 나타나는 현상을 의미한다. 측정오차는 측정장비, 측정방법, 측정 인력의 차이에 의해 발생하는 불확실성을 의미하며 이 오차는 측정장비 자체의 부정확성이나 일상적으로 사용되는 장비의 형상 및 시스템이 서로 다른 이유 등으로부터 기인한다.

한편 통계오차는 측정자료의 부족에서 발생하는 오차이며 통계적인 의미에서 모집단에 비해 표본숫자가 너무 적기 때문에 발생하는 오차이다. 모델오차는 경험적 또는 다른 관련식을 이용하여 현장 및 실내 실험값을 설계지반정수로 변환하는 과정에서 발생하는 것이다. 일반적으로 현장 및 실내실험에서 획득된 측정치를 설계지반상수로 직접 적용할 수 있는 경우는 매우 드물기 때문에 설계지반 정수를 시험 결과로부터 추정 및 변화하는 과정에서 발생하는 불확실성이다.

결과적으로 이러한 불확실성으로 인해 설계 시에 고려된 절대적인 안정성을 획득하는 것은 불가능하며 따라서 일정 부분 구조물의 안정성이 확보되지 못할 수 있는 위험을 감수하여야 한다. 이러한 위험성을 최소화하기 위해 현재의 안정해석방법은 안전율 개념을 적용하여 설계정수의 불확실성을 반영하고 있다. 그러나 전체안전율을 모든 해석정수에 일률적으로 적용함으로써 비효율적인 해석이 되고 있는 실정이다. 따라서 보다 합리적이고 효율적인 해석을 위해서는 해석정수 각각의 확률분포 특성을 반영한 신뢰성 해석 개념이 도입되어야하며, 한계상태 설계법은 이러한 개념적 접근방법을 통해 해석정수 각각의 부분안전계수를 산정하고 적용하는 기법이다.

2.2 하중저항계수 설계법 (Load and Resistance Fatctor Design, LRFD)

설계변수의 공칭값에 부분안전계수를 적용하거나 혹은 하중함수와 저항함수에 각각 하중계수 저항계수를 적용하여 안정성을 평가하는 방법은 신뢰성 해석의 I 단계 해석에 해당하며 전자의 방법을 부분안전계수 설계법, 후자의 방법을 하중저항계수 설계법이라 한다. 다음의 식 (4) 그리고 그림 5는 부분안전계수설계법과 하중저항계수 설계법의 개념을 나타내고 있다.

$$\Phi R_N \geq \Sigma r_i Q_i \quad , \quad R_D \geq \Sigma r_i Q_i \quad (4)$$

여기서 R_N = 공칭저항력, R_D = 설계변수의 공칭값에 부분안전계수를 적용하여 산정된 저항력
 Q_i = 공칭하중, r_i = 하중계수, Φ = 저항계수

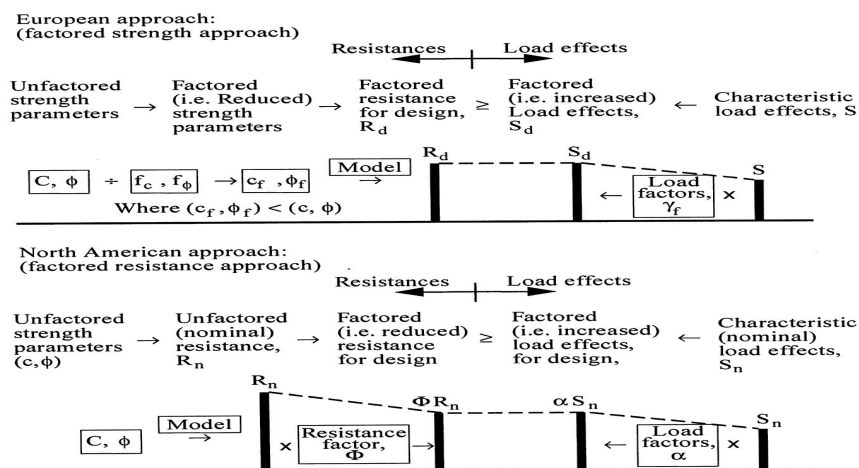


그림 5 부분안전계수설계법과 하중저항계수설계법의 비교

그림 5에서와같이 일반적으로 부분안전계수 개념은 유럽에서 하중저항계수 개념은 북미에서 선호되어 왔으나 최근에는 유럽지역에서도 점차 하중저항계수 개념의 적용이 확산되고 있는 추세이며 부분안전계수의 적용대상은 저항함수 전체가 될 수도있고 저항함수를 구성하는 지반정수 각각이 될 수도 있다. 사면안정 해석의 경우에는 안정성 평가에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지반정수의 불확실성이므로 지반강도 정수에 부분안전계수를 적용하는 것이 합당할 것이다.

부분안전 계수를 적용하는 하중저항계수설계법이나 부분안전계수 설계법 모두 구조설계 분야에서 최초로 적용되기 시작하였으며 지반 및 기초설계 분야에는 EC7(Eurocode7), CFEM (Canadian Foundation Engineering Manual), 홍콩의 Geoguide1, BS8002 (British Standard 8002), 그리고 AASHTO LRFD Bridge code 등에서 적용되기 시작하였다. 상기의 설계지침 혹은 편람들은 AASHTO 지침만 제외하고 모두 부분안전계수 개념을 채택하고 있다. AASHTO 지침은 하중저항계수 개념을 채택하고 있는데, 최근 제안된 EC7-1의 개정판인 Draft prEN 1997-1에서는 부분안전율 개념과 하중저항계수 개념을 모두 적용할 수 있도록하여 설계자가 재량권을 갖도록 되어있다. 다음의 표 1은 EC7, CFEM, Geoguide1 그리고 BS8002 에서 지반정수에 대한 부분안전계수를 정리한 것이다.

표 1 각 기관별 지반강도정수에 대한 부분안전계수

EC7 (Draft pr EN 1997-1)의 부분안전계수				
$\tan\phi'$	C'	C_u	q_u	γ
0.80	0.80	0.71	0.71	1.00
CFEM(Canadian Foundation Engineering Manual)의 부분안전계수				
$\tan\phi'$	C'		C_u	
0.80	0.65		0.65	
Geoguide1의 부분안전계수				
$\tan\phi'$	C'		C_u	
0.83	0.83		0.50	
BS 8002(British Standard 8002)의 분안전계수				
$\tan\phi'$ (Peak ϕ')	C'	$\tan\phi'$ (Critical ϕ')	C_u	
0.83	0.83	1.00	0.67	

3. 한계상태 설계법 적용사례

3.1 개요

본 절에서는 통일분류법에 의한 지반종류별 강도정수의 확률적 분포에대한 기존자료와 절토 사면의 경사값을 설계 변수로 결정하여 해석대상 사면모델을 구성하고 지반별 내부마찰각과 점착력에 대한 부분안전 계수와 저항계수를 산정하였다. 한계상태 방정식으로는 Fellenius의 절편법을 이용하였으며 전체 안전율 1.5를 만족하는 사면의 임계 활동면의 탐색은 SLOPE/W 프로그램을 이용하였다.

3.2 해석조건

해석대상 사면의 형상은 그림 6과 같으며 그림 7은 임의의 절편에 작용하는 절편력을 나타내고 있다. 그림 7에서와같이 Fellenius의 절편법에서는 $E1(E2) = X1(X2)$ 라는 가정하에서 각 절편의 합력을 통해 사면의 전체 안전율을 산정한다.

본 연구에서는 사면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 점착력(C)과 내부마찰각($\tan\phi$)를 확률 변수로 결정하였으며 평균값과 표준편차와 같은 확률적 자료는 다음의 표 1과 같으며, 각 지반별로 전체안전율 1.5를 나타내는 임계 활동면에 대하여 한계상태 해석을 수행하였다.

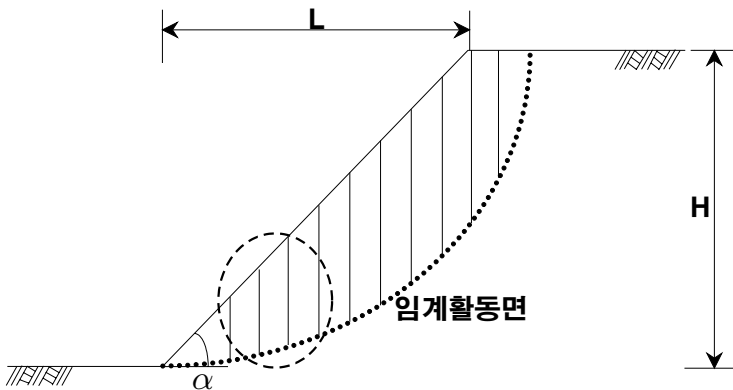


그림 6 해석대상 사면형상

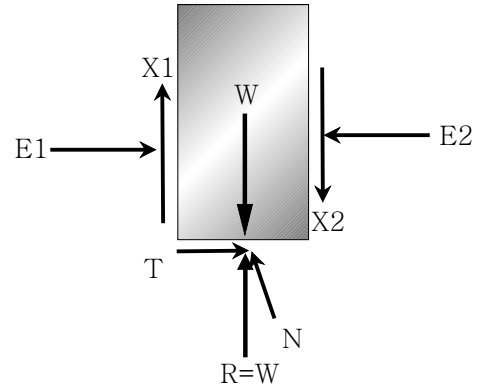


그림 7 Fellenius 절편력

표 2 해석대상 사면형상 및 지반강도정수의 확률적 자료 (출처:대한주택공사)

사면형상									
토질종류	ML			CL			CH		
사면높이(H)	14m								
사면경사(°)	40.70°			24.52°			17.9°		
사면길이(L)	16.28m			30.69m			43.22m		
전체안전율(FS)	1.50			1.50			1.50		
지반강도정수 확률적 자료(정규분포)									
지반강도정수	평균	표준편차	변동계수	평균	표준편차	변동계수	평균	표준편차	변동계수
점착력(C),t/m ²	2.8	1.1	0.39	2.8	1.1	0.39	1.7	0.9	0.53
내부마찰각(ϕ), °	20.37	6.95	0.34	8.42	3.46	0.41	7.11	2.30	0.32

3.3 해석방법

사면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 점착력과 내부마찰각을 확률변수로서 취급하였으며 동일한 전체안전율을 만족하는 사면에 대해 각 지반종류별로 신뢰지수, 파괴확률 그리고 부분안전계수 및 저항계수를 산정하여 비교 검토 하였다. 다음의 그림 8은 부분안전계수의 산정 과정과 관련식을 나타내고 있으며 본 연구에서는 확률분포 형태가 정규분포할 경우에 대해 저항계수 및 부분안전계수의 산정이 이루어졌으며 확률 변수의 공칭값과 평균값은 동일하다고 가정하였다.

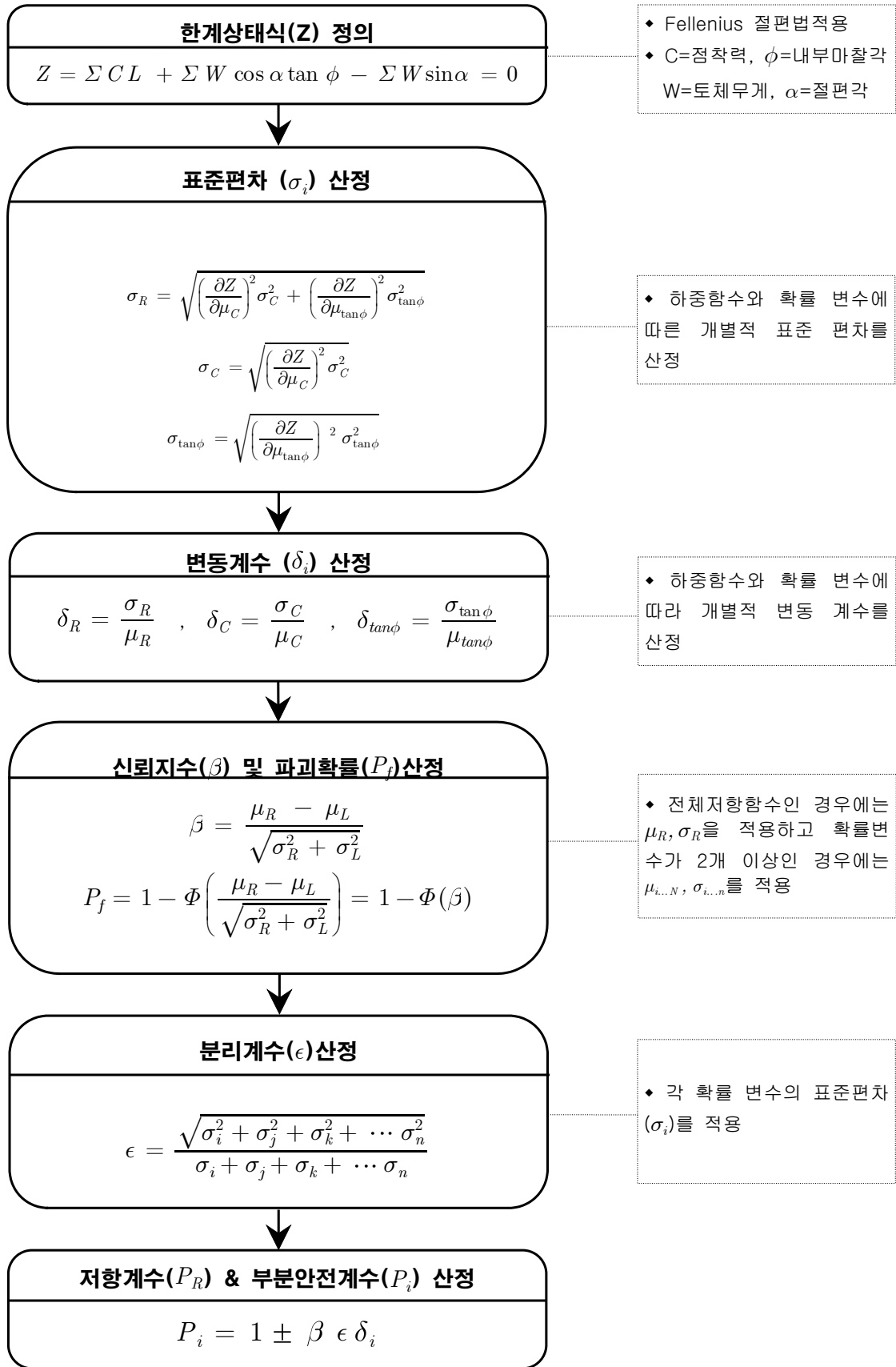


그림 8 부분안전계수 산정법 순서도

4. 결론 및 제언

표 3 저항계수 및 부분안전계수 산정결과

지반종류	ML	CL	CH
저항계수(P_R)	0.662	0.657	0.667
부분안전계수(P_C)	0.636	0.661	0.622
부분안전계수($P_{\tan\phi}$)	0.696	0.647	0.770
신뢰지수(β)	1.281	1.114	0.873
과피확률(P_F)	10.419 %	13.738 %	19.798 %

표 3은 우리나라 국토 전반에 분포하는 토질별 점착력 과 내부마찰각을 확률 변수로 취급하여 한계상태 설계 개념에 근거하여 산정된 부분안전계수와 저항계수 산정 결과를 정리한 것이며, 다음은 본 연구를 통해서 얻어진 연구 결과를 요약한 것이다.

1) 동일한 전체 안전율을 만족하는 사면을 대상으로 지반 종류별로 한계상태 해석을 실시하여 산정된 부분안전계수를 토질별로 살펴보면 점착력(C)에 대한 부분안전계수는 ML = 0.636 ,CL = 0.661, CH = 0.662 로 나타나고 있으며, 내부 마찰각($\tan\phi$)의 경우 ML = 0.696, CL = 0.647, CH = 0.770 으로서 산정 되었다. 이러한 부분안전계수의 산정결과 일반적으로 적용하고 있는 결정론적 해석 개념은 지반의 불확실성 및 가변성에 대한 불확실성 요소들을 고려하지 못하여 보수적인 설계 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 저항측 저항계수의 경우에는 지반 종류별로 $P_R = 0.662 \sim 0.667$ 으로서 산정되었으나 보다 안정적이며 신뢰성 높은 설계를 위해서는 사면의 안정성에 영향을 미치는 요소별로 부분안전계수를 달리 적용하여 설계를 수행해야 할 것으로 판단된다.

2) 한계상태 설계법에 의해 산정된 부분안전계수 및 저항계수는 확률변수의 불확실성을 고려함으로써 강도정수의 대푯값을 이용하는 결정론적 해석법의 단점을 극복할 수 있으며 보다 신뢰성 높은 설계를 수행할 수 있다. 반면 본 연구에서는 Fellenius 절편법에 의한 단순 사면의 해석이 수행되었지만 실제 사면은 다층 지반 및 간극수압 등과같은 많은 불확실성 요소들이 존재하고 있으므로 이들을 고려하기 위한 연구가 더욱 활발히 이루어져야 하며 지반강도 정수의 충분한 확률적 자료의 축적이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김진만(2003), “제 2 장 지반의 불확실성 및 정량화기법 ; 지반조사 결과의 해석 및 이용”, 지반공학 시리즈(1), 한국 지반 공학회.
2. 윤길림(2004), “확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구”, 지반조사위원회 학술논문집, 한국 지반 공학회, pp73~81
3. 정철호(2003), “제1장 흙의 종류별 설계토질정수의 실무적용기술”, 지반실무적용, 구미서관, pp11~79
4. Achintya Haldar and Sankaran Mahadevan(2000), Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley and Sons, New York, pp181~120
5. John T. Christian, Charles C. Ladd and Gregory B. Baecher(1994), "Reliability Applied to Slope Stability Analysis", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120, No12, Dec. 1994, pp2189