

확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석

강기민*, 김지용*, 김홍석*, 김래현*

1. 머리말

연약지반 설계과정 중 엔지니어가 접하게 되는 구조물의 인정해석은 현장지반에 대한 불충분한 자료와 파괴 매커니즘의 가변성으로 인하여 그 결과에 불확실성을 내포하고 있다.

안전율(factor of safety)의 개념을 기초로 하는 결정론적 방법(deterministic analysis)의 경우 어느 정도의 안전여유를 갖고 있는가를 파악하기 위하여 경험적인 안전계수(safety factor)를 도입하고 있다. 이 경우 분산(variability)을 고려하지 않은 채 단일 대표값만을 이용하여 안전성을 판단하므로 가변성과 불확실성을 효과적으로 정량화하여 해석에 적용할 수 없는 단점이 있다. 반면에 확률론적인 해석 방법에서는 지반정수의 분산성 및 인위적인 오차에서 나타나는 불확실성을 보다 합리적으로 고려할 수 있다. 이 중 신뢰성해석(reliability analysis)이란 확률론적

접근방법에 의한 해석으로 토질 정수들이 갖고 있는 불확실성을 고려하기 위하여 각 정수들을 분산성을 갖는 확률변수적인 파괴확률(probability of failure)로서 산정하게 되며, 확률변수의 민감도에 따른 파괴확률의 변화도 알 수 있어 불확실성을 정량적으로 나타내는 신뢰성 해석은 안전계수를 이용하는 결정론적인 해석을 보완할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

본 고에서 소개할 확률론적 접근법을 이용한 신뢰도 분석은 연약지반에 연직배수공법 적용시 지반의 압밀거동을 해석하는데 있어 고려되는 변수들이 일정한 범위의 값을 갖는다는 가정을 반영하여 설계결과를 산정하는 분석법이다. 지반의 침하와 압밀시간에 영향을 미치는 지반정수들은 고정된 어떤 값을 갖는다고 보다는 평균값을 중심으로 분산특성에 따라 분포하게 되므로 지반정수를 고정된 값으로 대표하는 기존의 설계방법은 한계가 있다고 하겠다. 연직배수공법의 설계에 영향을 미치는 설계인자를 고려하여 이미 조사된 지반정수를 통계분석하고, 여러 파라미터들을 확률론적 시뮬레이션 기법으로 다양하게 검토하여 보다 합리적인 연직배수공법 설계가

*1 (주)평원엔지니어링 이사(kmkang@pweng.co.kr)

*2 (주)평원엔지니어링 지반/터널부 부장

*3 (주)평원엔지니어링 지반/터널부 부장

*4 (주)평원엔지니어링 기술연구소 대리

이루어지도록 하고자 하였다.

2. 신뢰성 해석이론

2.1 신뢰성의 개념

공학문제에 필연적으로 내재될 수밖에 없는 임의성(randomness), 불확실성(uncertainty)에 대한 대비를 위해 기존의 결정론적 방법에서는 주로 경험에 입각한 안전율(safety of factor)을 사용하여 여유강도를 두어 이론상 파괴의 위험이 없는 것으로 가정 하지만 실제 현실에서는 붕괴사고가 일어나는 등 모순이 있다. 이에 반해 불확실성 자체를 정량적으로 고려하는 신뢰성 이론에서는 작지만 0이 아닌 파괴의 가능성을 고려하여 공학문제에서의 안전성 평가를 수행하는 것이다. 신뢰성 해석에 따른 설계는 다음의 3단계 Level이 있다.

Level 1의 방법은 구조물이 한계상태를 넘는 확률이 허용치 이하로 되도록 각 변수의 변동계수를 고려한 특성치와 안전율을 정해서 안정성을 조사한다. 이러한 방법들을 이용함으로써 극단적으로 안정측이나 극단적인 위험측 설계가 이뤄지는 것을 방지할 수 있다. Level 1의 방법은 이미 각종의 설계 코드로서 도입 되었는데 국제 표준화 기구(ISO)에 제정된 ISO규격의 경우, 구조물 설계법의 기본으로서 Level 1의 설계법이 확립되어 있다. (ISO 2394 : General Principles on Reliability for Structures) Level 2의 방법은 각 변수의 확률분포를 자료의 분석이나 추론에 의거하여 정규분포 등 적절한 분포로 가정하여 내력 및 하중의 평균치와 표준편차로부터 구해지는 안정성 지표인 신뢰지수(reliability index)

가 목표치를 상회하는 지를 확인하는 방법이다. 즉, 신뢰지수값 자체를 판정기준으로 한다고 하겠다. Level 3은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산, 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작아지는 파괴확률(probability of failure)을 보다 정확하게 산정하는 방법이다. Level 3은 설계에 사용되는 모든 확률변수분포가 명확하게 규명되어야 하나 Level 1, 2의 방법은 그렇지 않아도 비교적 쉽게 적용할 수 있다. 신뢰성 해석방법에서 중요한 의미를 가지는 것이 신뢰지수(β)인데 이를 계산하기 위하여 구조물의 안전(safe)과 파괴(failure)를 판단할 수 있는 설계기준(design criterion) Z 는 구조물에 가해지는 하중요소(load factor) S 와 그에 저항하는 구조물의 저항요소(resistance factor) R 로 표시한다.

신뢰지수는 확률밀도함수(Z)의 중심에서 파괴영역까지 거리를 표준편차(σ_z)로 정규화하여 표현한 것이며 이것은 시스템의 안전도를 나타내는 지수로 사용한다. 즉, 그림1에서 신뢰지수 β 가 커질수록 시스템의 파괴확률은 더 작아지게 되며 통상의 토목구조물이 가지는 신뢰지수 값은 대략 1.5~4.0 범위에 있다.

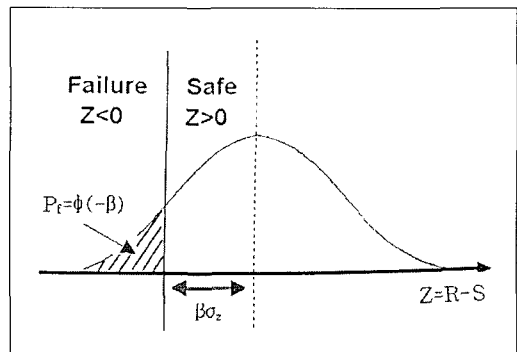


그림 1. 신뢰지수와 저항(R), 하중(S)의 관계

2.2 Monte Carlo Simulation(MCS)

MCS는 파괴확률을 근사적으로 추정하는 가장 보편적인 기법중 하나이다. 확률변수들의 결합 확률밀도함수를 이용하여 각 확률변수들의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수위 확률변수의 표본집단(set)을 생성한 후, 생성된 각 확률변수들을 한계상태식에 대입하여 파괴확률을 산정한다.

Monte Carlo Simulation의 장점은 한계상태식에 어떠한 변형도 가하지 않고 원래의 형태를 그대로 보존하며 파괴확률을 구할 수 있다는 점과 한계상태식이 확률변수의 수학적함수의 형태로 주어지지 않은 경우에도 파괴여부에 대한 판단을 내릴 수만 있다면 파괴확률 산정이 가능하다는 점이다.

2.3 신뢰성 해석의 평가기준

Meyerhof(1982)는 토질 및 기초공학에서의 안전율을 재조명하였으며 기초와 지반구조 평가에 있어서 극한한계상태(슬라이드에 대한 불안정, 용기, 침투 및 침식)와 허용한계상태(균열, 진동)에 대하여 충분한 안전율의 필요성을 제안하였다. 각 구조물의 적용 가능한 허용최대 파괴확률은 토공의 경우는 10^{-2} , 옹벽과 호안구조물은 10^{-3} , 해양구조물은 10^{-4} 이하로 제안하였다.

Priest et al.(1983)은 절토사면의 거동을 판단하기 위한 하나의 가이드 라인으로 인명피해를 기준으로 하여 절토사면을 3가지로 분류하였는데 Case별로 절토사면에 대해 허용할 수 있는 최소안전율과 허용최대 파괴확률을 가지고 사면의 안정성을 판단할 것을 제안하였다.

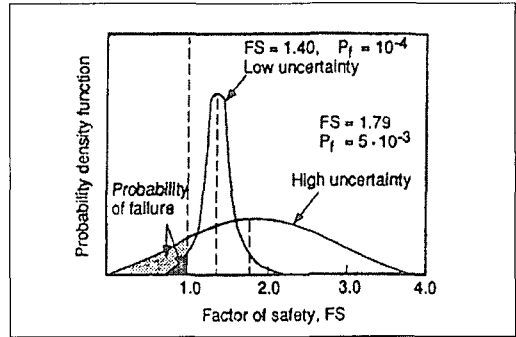


그림 2. 안전율과 파괴확률의 결과차이

Lacasse et al(1996)은 공간변수(Spatial variability)와 측정방법을 포함한 지반정수의 불확실성에 대해 연구를 하였다. 그림 2는 안전율(Safety factor)과 파괴확률(Probability of failure)사이의 관계에 대하여 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 두가지 모두 안전측이지만 지반정수의 표준편차 차이에 따라 파괴확률이 크게 차이가 나는 것을 보여주고 있다. 지반 정수에 대한 불확실성이 파괴확률에 크게 영향을 미치기 때문에 안전율만으로는 구조물의 안

정성을 평가하는데 한계가 있고 불확실성을 고려한 신뢰성해석이 필요하다는 것을 보여준다.

3. 연직배수재를 이용한 압밀침하 이론

연직배수공법은 점토지반의 압밀시간은 배수거리의 제곱에 비례한다는 것과 지반 퇴적특성상 수평방향 투수계수(k_h)가 연직방향투수계수(k_v)보다 크다는 특성을 이용하여 단기간에 압밀을 종료하고 지지력을 증대시키는 방법이다.

배수재가 타설된 지반은 연직배수재를 중심으로 방사형 압밀의 형태를 나타내며 이에 대해 Barron(1948)은 스미어존(smear zone)과 배수저항(well

resistance)의 영향을 고려하지 않은 이상적인 조건 하의 수평방향 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right)$$

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)\left(\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}\right)$$

여기서, U_h : 수평방향 평균 압밀도

$F(n)$: 배수재 간격에 대한 요소

n : 타설 간격비

T_h : 시간계수

이후 Hansbo(1981)는 Barron(1948)이 제안한 $F(n)$ 을 드레인의 간격에 의한 영향, 스미어존의 영향, 그리고 배수저항에 의한 영향을 고려한 상태에서의 수평방향에 대한 평균 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{\mu_{sw}}\right)$$

여기서, μ_{sw} : 교란영역에 대한 요소

본 고에서는 Hansbo를 비롯하여 Barron, Yoshikuni(1979), Onoue(1988)의 제안식을 모두 적용하여 압밀도를 산정하였으며, 이를 통해 교란영역(Smear Zone)과 배수저항(well Resistance)이 목표 압밀도 도달을 위한 신뢰수준에 미치는 정도를 분석해 보았다.

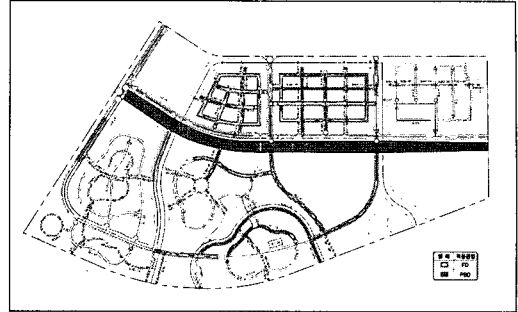


그림 3. 검토구역 및 배수공법 적용현황

4. 연직배수재의 설계

4.1 검토구역

본 검토구간은 시화 멀티테크노벨리 00공구 조성 공사로서 크게 외곽간선도로와 단지 내부도로 구역이 구분되어 있으며, 소요기간내에 압밀침하를 종료하기 위해 1.8×1.8m의 사각형 배치로 연직배수재를 타설하는 것으로 설계되었다. (그림 3, 4참조)

4.2 신뢰성 검토조건

검토구간 내에서 단계별 침하량이 가장 큰 곳을 대표단면으로 선정하였으며, 단계별 성토에서 가장 큰 침하량을 보이는 단계에서의 개량기간에 대해 최종단계 및 단계별 압밀도가 80%이상인 조건으로 목표 압밀도를 90%로 선정하였다. (표 2 참조)

연직배수공법 적용에 있어 가장 영향을 많이 미치는 수평압밀계수 등의 압밀관련 정수는 실내시험에

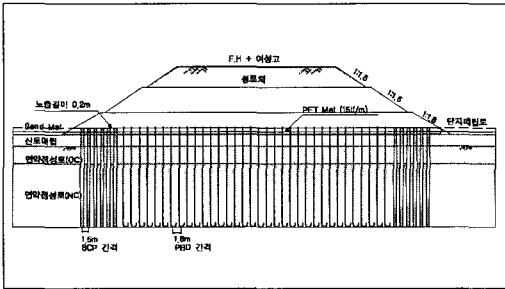
표 1. 연직배수재 설계

구 분	연약층후(m)	개량기간(개월)	요구 압밀도	타설간격(m)
외곽간선도로	10.0~21.7	3.9~11.5	80%이상	1.8×1.8
단지내부도로	10.0~20.4	4.5~15.0	80%이상	1.8×1.8

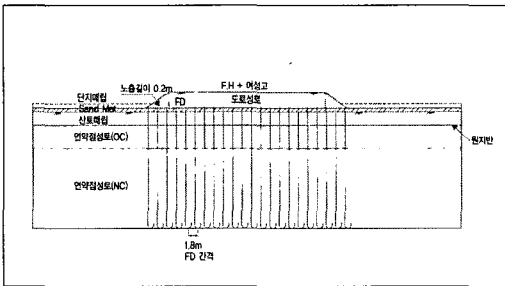
확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석

서 획득한 자료를 기초로 하여 지반의 불확실성을 고려하기 위해 Monte-Carlo Simulation을 수행하

였다.(그림 5 참조) 각 정수에 대한 MCS분석 결과는 표 3과 같다.



(a) 외곽간선도로 구간



(b) 단기내부로 구간

그림 4. 구간별 연직배수재 적용 단면도

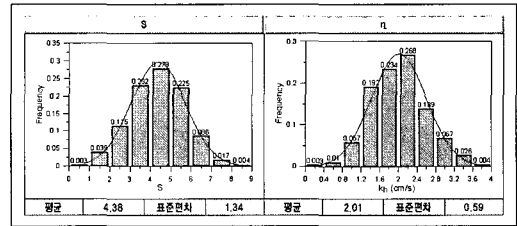
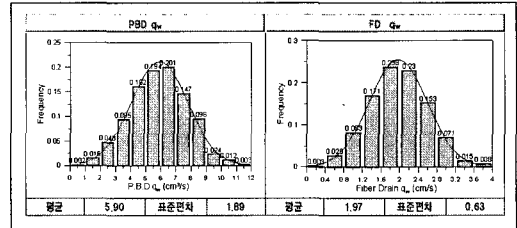
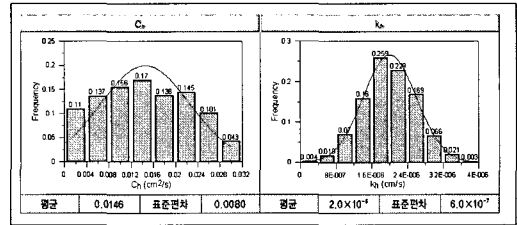


그림 5. 지반정수에 대한 MCS분석결과

표 2. 대표단면 조건

해석구간	해석단면	연약층후(m)	배수재 종류	배수재 간격	압밀기간(개월)	목표압밀도(%)
외곽간선도로	외곽4구간	21.7	PBD	1.8×1.8	5.2	90
단기내부로	M-1-38구간	17.5	FD	1.8×1.8	4.5	90

표 3. 지반의 압밀정수 조건

해석 조건	외곽 4구간					M-1-38구간				
	C_h (cm^2/s)	k_h (cm/s)	q_w (cm^3/s)	S (= ds/dw)	η (= kh/ks)	C_h (cm^2/s)	k_h (cm/s)	q_w (cm^3/s)	S (= ds/dw)	η (= kh/ks)
평균 값	0,0146	2.0×10^{-6}	5,9	4,4	2,0	0,0146	2.0×10^{-6}	1,97	4,4	2,0
표준편차	0,008	6.0×10^{-7}	1,89	1,34	0,59	0,008	6.0×10^{-7}	0,63	1,34	0,59

5. 배수재 설계인자 분석

5.1 분석 개요

연직 배수재가 타설된 지반의 압밀도에 영향을 미치는 주요 설계인자를 확률론적 설계인자로 두고 그 외 시공조건, 타설간격, 타설형태등을 결정론적 설계인자로 하여 확률론적 설계인자에 따라 목표압밀도에 도달할 수 있는 가능성이 얼마인지를 분석하고자 한다.

민감도 분석을 통해 확률론적 설계인자 중 가장 크게 영향을 주는 인자를 선택하고, 그 설계인자에 대한 등가 통계분석을 통해 확률론적 분석을 위한 입력자료로서의 적합도를 검증한 후, 본 고에서 검토하고자 하는 배수재 타설간격의 신뢰성 분석을 실시하게 된다. 이러한 일련의 분석과정은 그림 6의 흐름도에 따라 실시되었다.

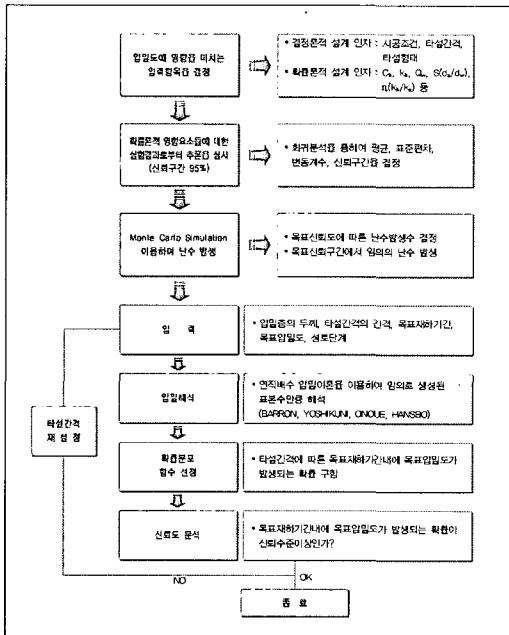


그림 6. 신뢰성 분석 설계흐름도

름도에 따라 실시되었다.

일반적으로 통계분석에서 사용되는 확률분포함수는 지진이나 암반의 불연속면 분포 분석에 활용되는 Exponential분포와 암반의 점하중시험의 결과와 같이 국부적으로 변수가 발생하는 분포 표현을 위한 Weibul 분포, 암사면에서 발생하는 낙석이 사면에 부딪혀 작은 암편으로 각기 다른 속도로 떨어지는 것과 같은 불규칙한 분포형태를 표현하는 Log normal 분포가 있다. 본 분석에서는 Gaussian 분포라고 하는 가장 대표적인 확률분포 형태인 정규분포 함수를 따랐다.

5.2 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

민감도 분석에 적용된 요소는 수평압밀계수, 수평 투수계수, 스미어존의 범위, 투수계수 감소비, 배수재 통수능력 등 5가지 설계인자로서 분석 결과는 그림 7과 같다. 분석범위는 동일한 상태에서 각 영향요소의 300%까지 20단계로 나누어 증가시키면서 단계별 압밀도를 계산하였다.

연직배수재에 의한 방사형 압밀에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 수평압밀계수(C_h)로 나타났으며 이에 연직배수공법의 설계를 위해서는 수평압밀계수의 정확한 산정이 중요하다 하겠다. 그 이외에 투수계

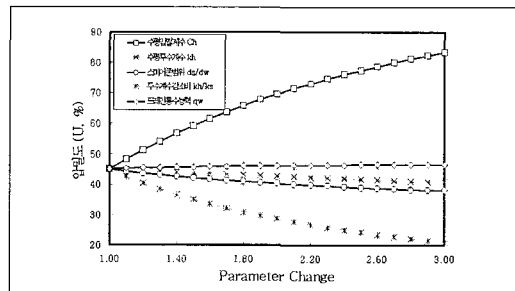


그림 7. 방사형 압밀의 민감도분석 결과

확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석

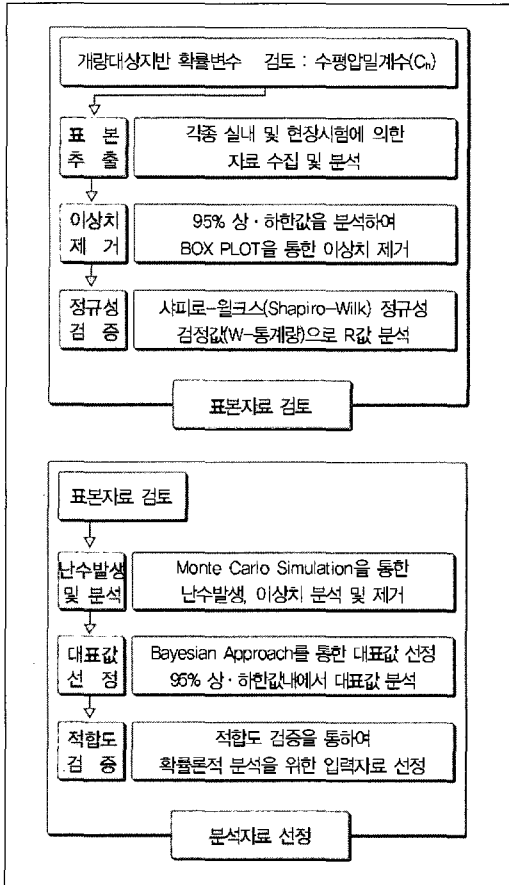


그림 8. 설계인자의 등가 통계분석 흐름도

수 감소비와 스미어존의 영역도 압밀도에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 신뢰도 검토에서

는 확률론적 설계인자 중 가장 민감도가 큰 수평압밀계수를 타설간격 검토를 위한 입력자료로 선정하였다.

5.3 설계인자에 대한 등가통계분석

입력자료로 결정된 설계인자에 대한 등가통계분석은 그림 8과 같은 순서에 따라 수행되었으며 확률변수인 수평압밀계수는 평균 $0.0146\text{cm}^2/\text{s}$, 표준편차 0.008 로서 Box plot을 통해 이상치를 제거한 후 샤피로 윌크스(Shapiro-Wilk) 정규성 검증을 실시한 결과 $R=0.909$ 의 정규밀도 함수를 보이는 것으로 나타났다.

MCS와 Bayesian Approach를 통한 대표값 산정 결과, 평균은 $0.0267\text{cm}^2/\text{s}$, 표준편차는 0.0134 인 표본 자료가 결정되었다. (그림 9~11 참조)

6. 타설간격에 대한 신뢰도 분석결과

압밀기간내에 허용잔류침하량을 만족하도록 배수제 간격을 결정론적 해석방법으로 결정하고, 이에 신뢰성 해석에서 목표압밀도에 도달하는 확률(P_s)은 다음과 같이 평가되었다.

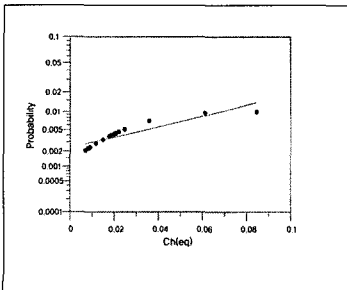


그림 9. Shapiro-Wilk 정규성 검증

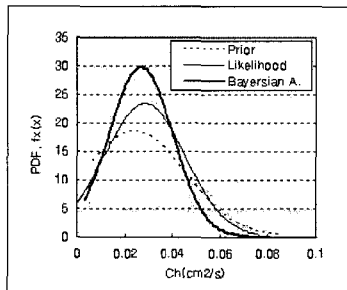


그림 10. Bayesian Approach 대표값 산정

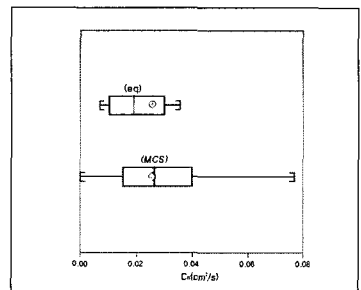


그림 11. 적합도 검증

Barron(1948) 제안식				Yoshikuni(1979) 제안식토				
외곽간선도로 구간		단지내부도로 구간		외곽간선도로 구간		단지내부도로 구간		
평균	99,2	SD	4,96	평균	99,6	SD	2,86	
도달확률	98,1%		도달확률	98,6%		도달확률	97,7%	
평균	99,1	SD	5,16	평균	99,5	SD	3,06	
도달확률	98,1%		도달확률	98,4%		도달확률	98,4%	

Hansbo(1981) 제안식				Onoue(1988) 제안식				
외곽간선도로 구간		단지내부도로 구간		외곽간선도로 구간		단지내부도로 구간		
평균	98,9	SD	5,68	평균	99,4	SD	3,22	
도달확률	96,4%		도달확률	98,1%		도달확률	96,0%	
평균	98,7	SD	5,87	평균	99,4	SD	3,41	
도달확률	96,4%		도달확률	97,8%		도달확률	97,8%	

7. 분석결과 및 결론

지반의 불확실성을 고려한 연직배수공법(PBD, FD)의 타설간격에 대한 신뢰성 검증을 위해 Monte-Carlo Simulation을 이용하였다. 외곽간선도로와 단지내부도로 구간에 각각 4가지 방사형 압밀이론을 적용하여 목표압밀도 도달 가능성을 신뢰도 분석으로 판단하였으며 그 결과는 표 4, 5와 같이 정리된다.

외곽간선도로 구간의 전체압밀진행에 대한 신뢰도는 96.0~98.1%로서 목표압밀도 달성에 대한 높은 신뢰성이 확보된 것으로 나타났다. 즉, 1.8m로 타설된 PBD공법은 비교적 안정된 설계임을 알 수 있다.

단지내부도로 구간은 1.8m 간격의 FD타설이 계

획된 구역으로 전체압밀진행에 대한 신뢰도는 97.8~98.6%로 나타나 외곽간선도로 구간과 비슷한 높은 신뢰도가 확보된 것으로 분석되었다.

또한 Barron, Hansbo, Yoshikuni, Onoue가 제안한 방사형 압밀식에 대한 목표압밀도 도달 신뢰도를 비교한 결과, 스미어존과 배수저항을 고려하지 않는 Barron의 제안식이 두가지 요소를 고려하는 Hansbo, Onoue의 제안식보다 압밀도 도달 신뢰도가 큰 것으로 나타났다. 이는 Barron의 제안식 자체에 대한 신뢰도가 높은 것이 아니라 타 제안식에 비해 상대적으로 많은 변수를 고려하지 못하는 제안식의 특성으로 나타난 결과라 하겠다.

지반공학은 여타 토목분야보다도 불확실성에 많이 노출된 분야라 할 수 있으며, 그만큼 엔지니어의

확률론적 접근법을 이용한 연직배수공법 설계의 신뢰성 분석

표 4. 외곽간선도로 구간 분석결과

제안자	특 성		신뢰도 (%)
	Smear Effect	Well Resistance	
Barron (1948)	미고려	미고려	98.1
Yoshikuni (1979)	미고려	고려	97.7
Hansbo (1981)	고려	고려	96.4
Onoue (1988)	고려	고려	96.0

표 5. 단지내부도로 구간 분석결과

제안자	특 성		신뢰도 (%)
	Smear Effect	Well Resistance	
Barron (1948)	미고려	미고려	98.6
Yoshikuni (1979)	미고려	고려	98.4
Hansbo (1981)	고려	고려	98.1
Onoue (1988)	고려	고려	97.8

판단력이 주요하게 작용한다. 최근 들어 지반정수 분석에 확률론적 방법을 적용하여 불확실성 요소를 제거하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있으나 지반설계분야에서의 접근은 미흡한 것이 사실이다. 이에 기존의 결정론적 설계법에 확률론적 설계법을 잘 조합하여 신뢰성이 높은 설계가 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다.

2. 부산신항 남컨테이너부두 (2-2단계, 하부)축조공사 대안 설계보고서, 2004
3. 해양수산부, 2002, 차세대 항만 설계기술개발, II : 한계 상태설계법/신뢰성 설계법을 중심으로.
4. 한국토지공사, 1999, 연약지반의 압밀특성에 관한 연구.
5. 우형택, 2005, '신뢰성 해석을 이용한 근사 최적설계', 부산대학교 석사논문
6. 한석열, 2005, '몬테카를로 시뮬레이션에 의한 교량 강재부의 피로신뢰성 해석모델', 전남대학교 박사논문
7. 조래청, 도덕현, 1996, '확률유한요소법을 이용한 균질 사면의 신뢰성 해석', 한국농공학회지 vol.38, pp 125~139

참 고 문 헌

1. 시화 멀티테크노벨리 제1공구 조성공사 대안설계보고서, 2003.

