

불확실한 지반의 N값이 지중구조물의 내진성능평가에 미치는 영향

박 지 환 (건국대학교 토목공학과 석사과정)
이 태 형 (건국대학교 토목공학과 교수/교신저자)

Effect of Uncertain N-values to Seismic Performance Evaluation of Underground Structures

Park, Ji-hwan
Lee, Tea-hyung

Abstract

There has been tighten up the need of seismic retrofit about 31 public facilities since published "Korean Earthquake Damage Prevention Law". Therefore, seismic studies have been developed and enforced the studies. Measuring dynamic stiffness of subsurface materials influence on seismic performance evaluation to build up seismic retrofit. The soil dynamic properties for seismic performance evaluation are N-value from using SPT(standard penetration test), dynamic shear elastic modulus and dynamic deformation modulus using laboratory tests. The most unscientific element in ground dynamic properties involved uncertainties is obviously N-value using SPT.

This study shows that effect of N-value included natural and artificial uncertainties to seismic performance evaluation of ground structures is not only approached probabilistic analysis using FOSM method and tornado diagram, but also review how to spread effect of seismic performance evaluation of ground structures.

[Key words : probability, N-value, seismic retrofit, seismic performance evaluation, seismic]

I. 서론

21세기에 들어와서 세계적으로 지진 활동이 다시 활발해지고 있고 그에 따른 인적·물적 피해가 커지고 있다. 2008년 5월, 중국 쓰촨성에서는 규모 8.0의 강진으로 인해 7만여 명의 사망자와 22조원의 경제적 손실이 발생하였으며, 최근 이탈리아 중부 라퀼라 지역에서 발생한 규모 6.2의 지진으로 인해 약 300명의 인명피해와 유서 깊은 여러 문화재의 파손은 지진으로 인한 피해의 심각성을 여실히 보여주었다. 우리나라는 일반적으로 지진에 대해 안전 지대로 생각하고 있지만, 2005년 3월 20일 일본 후쿠오카에서 발생한 규모 7.0의 지진은 우리나라의 전역에서 진동이 감지되었다. 그리고 2007년 1월 20일 "오대산 지진", 2008년 10월 29일 "공주 지진", 2010년 2월 9일 "시흥 지진"에 의해 한반도가 더 이상 지진 안전구역이 아니라는 의식이 확산되고 있다. 지진으로 인한 재난은 피해규모가 크고 피해지역이 광범위하여, 특히 우리나라와 같이 지진에 대한 예방 조치나 지진 발생 시의 대처가 낮은 수준에서는 지진이 발생할 경우 사회·경제적, 인적으로 큰 피해가 발생할 우려가 있다. 우리나라에서도 최근 "지진재해대책법"의 제정 후 31가지 시설물에 대한 내진보강의 필요성이 대두

되어가고 있다. 이에 따라 내진에 대한 연구가 시행되고 있고, 또한 이를 바탕으로 보강이 시행 되고 있다. 서울시 등 여러 지역에서 교량, 항만, 지중구조물 등 기존 시설물에 대한 내진 보강이 이루어지고 계획이 증가하는 추세이다.

일반적으로 지속적으로 연구되고 발전된 내진보강기준에 비하여 오래된 기준 혹은 기준이 미비한 시절에 시공된 시설물에 대해서는 설계도면 및 지반조사가 충분하지 못하거나 없는 경우가 흔하다. 이런 경우 부족한 지반정보에 대해서는 지반 재조사가 이루어지거나, 설계자의 판단에 의해 부족한 부분이 결정 되는 경우가 있다. 전자의 경우 경제적, 시간적, 환경적 문제로 인해 시행이 어려운 경우가 많다. 후자의 경우는 엔지니어의 경험 등에 따른 주관적 경향이 강하여 객관적이지 못하는 경우가 많다. 이에 따라 많은 부분에 예측할 수 없는 불확실성을 내포하고 있다.

본 논문에서는 자연적 인위적인 이유로 지반동적특성에 내재한 불확실성이 지중구조물의 내진성능상세평가에 미치는 영향을 확률적으로 접근해보고, 이러한 지반의 불확실성이 성능평가 과정에서 다른 부분으로 전파되는지를 도시철도의 지중구조물에 적용하여 검토하고자 한다.

II. 지중구조물의 내진성능평가 및 불확실성

1. 내진성능평가 절차

“기존 터널의 내진성능 평가요령”(한국시설안전기술공단, 2004)에서 제시하는 터널 구조물에 대한 내진성능평가 절차는 그림 2.1과 같이 예비평가, 상세평가와 액상화평가 3단계로 구분하여 단계적으로 수행한다.

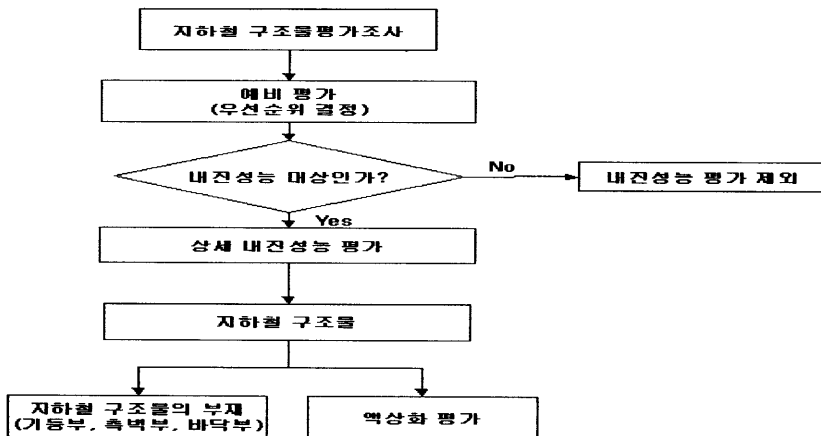


그림 2.1 내진성능 평가흐름도 (한국시설안전기술공단, 2004)

내진성능 상세평가를 위한 자원이 한정된 경우에는 예비평가를 통해 결정된 우선순위가

높은 시설물 순으로 상세평가를 수행할 수 있다. 시설물 관리 주체의 정책적 판단에 의거하여 예비평가를 생략하고 상세평가만을 실시할 수 있다. 또한, 액상화 평가의 경우 액상화 발생가능 지반에 대해서만 조사하도록 되어 있고 평가방법에 대해서는 제시하지 않는다.

본 연구에서는 불확실한 지반요소가 내진성능평가에 미치는 영향을 상세평가를 통하여 확인하고자 하기 때문에, 적용례에서 예비평가 및 액상화 평가에 대한 절차는 생략하도록 한다.

2. 불확실성의 발생

지반, 교량이나 건물과 같은 여러 구조물 등은 계획, 설계, 측량 및 시공을 행함에 있어 많은 인자 또는 요소들이 불확실성(uncertainty)을 갖고 있다. 불확실성은 어느 양에 대해서 관측하거나 계산한 값이 그 양의 참값에서 벗어나 있다고 추정되는 것으로써 이는 보통 확률적 접근에 의해 확률오차 등으로 표현된다. 문제는 이러한 불확실성의 발생은 발생지점으로부터 다음단계를 수행할 때 포함되어 전파된다는 점이다. 이는 결과적으로 어떠한 영향을 미칠지 예측하기 어렵다. 이처럼 근래에는 불확실한 인자에 대해서 통계적, 확률적으로 접근하여 설계/분석을 위하여 많은 연구가 이루어지고 실제로 적용되고 있다. 내진성능평가에서도 지진에 의한 지반의 변화로부터 구조물에 미치는 영향까지의 전체적 과정에서 발생할 수 있는 불확실한 인자에 대하여 확률적으로 고려하는 연구들이 많이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 지반동적물성값 중에서도 표준관입시험(SPT)에 의한 N값의 불확실성을 인지하고 확률적으로 접근하여 내진성능평가의 과정에서 지진하중 산정까지 어떠한 영향을 미치는지를 확인하고자 한다.

3. 지반동적특성의 불확실성

내진성능평가에 필요한 지반의 동적특성은 “도시철도 내진설계기준”(건설교통부, 2005)의 응답변위법을 수행할 때 필요한 지반의 변위 및 지진하중 산정에 필요한 표준관입시험을 통한 N값, 탄성파시험을 통한 전단파속도, 실내시험을 통한 지반동전단탄성계수, 지반동변형계수 등이 있다(그림 2.2).

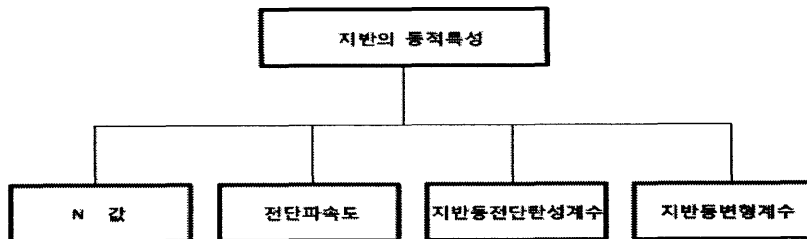


그림 2.2 지반의 물성값

그림 2.2에서 언급된 내진상세평가를 위한 대표적인 지반 물성값 중에서 가장 비과학적이

고 불확실성을 발생 및 내포할 수 있는 요소로는 표준관입시험에 의한 N값 추정 방법이다. N값 이외의 물성값은 다른 시험에 의해 측정 할 수 있지만, 이미 여러 해외 여러 논문 및 설계기준에서도 확인되었던 것처럼 N값만을 이용하여 다른 값을 매우 정확하게 산술적으로 계산할 수 있으므로 본 연구에서는 N값의 불확실성을 이용하여 내진상세평가에 미치는 영향을 확인하고자한다. (Brandenberg 외, 2010; RTRI, 1999).

지진에너지는 기본적으로 발생지점으로부터 지반을 따라 흐르게 되어 주변에 영향을 미치게 된다. 이러한 지진에 대한 보강을 하기 위해서는 우선적으로 지진에너지가 흐르는 매개체인 지반을 이해할 필요가 있다. 따라서 지중, 지상 구조물들의 안전성을 평가하기 위해서는 구조물이 위치한 곳의 지반침하 및 수평변위의 크기를 산정해야할 필요가 있다. 지반침하의 경우 액상화 평가를 통하여 이루어진다. 그러나 우리나라의 “도시철도 내진설계기준”(건설교통부, 2005) 및 “기존 터널의 내진성능 평가요령”(한국시설안전기술공단, 2004)에서는 액상화 평가의 경우 내진해석에서 필요시에만 고려하도록 명시되어 있고, 지반조사 부분에서 고려하도록 되어있다. 일반적으로 내진성능평가에서 탄성과 탐사 등을 통하여 전단파속도 등을 측정하기를 장려하나 이는 N값을 이용하여 산술적으로 계산할 경우 고려하지 못할 갑작스러운 변화부분 등을 정밀하게 측정하여 정확한 값을 구하기 위함이다. 즉, 액상화가 발생 할 수 있는 부분 등을 고려하기 위함이다. 구조적 내진성능평가로 접근하는 본 논문에서는 액상화에 대하여 고려하지 않겠다. 지반에 발생하는 단면의 횡방향의 지반변위는 구조물에 미치는 지진하중을 결정하므로 변위량의 증감 형태를 파악은 내진 보강을 하기 위한 자료로써 매우 커다란 영향을 미치게 된다. 표 2.1을 통하여 N값이 지반변위산정에 미치는 영향의 과정을 확인할 수 있다. 이러한 지반변위는 표와 같이 지진하중 분석에 전파되고 결국 지중 및 지상 구조물 전체의 내진성능평가에 영향을 미친다.

표 2.1 N값이 지반변위에 전파되는 과정식

지반의동적물성값	적용식	비 고
표준관입시험(SPT)	N값 산정	
전단파속도	$V_{sod} = 0.85 \times (80N^{1/3})$	
지반동전단탄성계수	$G_D = \gamma_t/g \times (\alpha_g V_S)^2 / f_g^2$	성능수준계수 $f_g=0.85, \alpha_g=0.5$
지반동변형계수	$E_D = 2(1+\nu)G_D$	
지반의 고유주기	$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{sodi}}$	$T_s = 1.25 T_G$
기반암속도응답 스펙트럼	$S_v = 1.25 T_G / (2\pi) \cdot S_a$	
지반 변위산정	$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s} x\right)$	

III. 불확실성의 확률적 접근

1. 개요

지진에 의한 지반 영향에 대하여 확률적으로 접근하여 해석하는 방법으로는 여러 방법이 있다. 최근 연구자들에 의해 지반의 지진계수 분석을 확률적으로 접근하는 논문이 발표되고 있다. 이 연구에서는 지진재해분석(PSHA, Probabilistic Seismic Harzrd Analysis¹⁰)과 지반 응답해석을 융합하여 확률론적인 지진계수를 도출하였다. 즉, 지반이 갖는 물성값 값과는 별개로 지반의 종류에 따른 지진재해도를 생성하여 “내진설계기준연구(Ⅱ)”(건설교통부, 1997)와 일치시키는데 목적을 둔다(곽동엽 외, 2009).

본 연구에서는 다른 논문에서는 다루지 않았던 지반동적물성값인 N값에서 불확실성을 찾고 지반에 의한 불확실성이 전파되는 과정에서 내진성능평가에 어떠한 영향을 미치는 지를 확률적으로 확인해보고자 한다.

2. 확률적 분석방법

여러 확률적 접근방법론 중에서 본 연구에서는 FOSM 방법과 토네이도 도표(tornado diagram)를 이용하고자 한다. 이 2가지 방법론은 다음과 같다.

1) FOSM방법(First-Order Second-Moment Method)

일차확률변수(single random variable) X 를 갖는 함수 $Y=g(X)$ 가 있고, 이때 평균(mean)은 μ_x , 분산(variance)은 σ_x^2 이라 가정한다. 주어진 함수 $g(X)$ 를 x 에 대하여 미분하고, 테일러급수(Taylor Series Expansion)를 이용하여 비선형함수 혹은 복잡한 함수를 간단한 선형함수로 바꾸면 식(3.1)과 같다.

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx}\right)_0 (X - x_0) \quad (3.1)$$

이때 Taylor 전개를 하는 x_0 는 각 변수의 평균 $x_0 = \mu_x$ 으로 한다. 이러한 약산식을 First Order Approximation라 한다. 이때, 평균 μ_Y 는 식(3.2)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_Y \approx g(\mu_X) \quad (3.2)$$

10) Cornell(1968)에 의해서 최초로 제안된 후 많은 수정과 보완을 거쳐 현재 전 세계적으로 지진 재해예측에 가장 널리 사용되는 방법이다. 지진위험도에 대한 설계지반운동변수를 지진재해도로 나타내는데 이용된다.

Y 의 이차모멘트(The second-moment)에 대하여 분산 σ_Y^2 은 식(3.3) 처럼 유도할 수 있다.

$$\sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx} \right)_0^2 \sigma_X^2 \quad (3.3)$$

본 연구에서 유한요소법(FEM)은 EDP(Engineering Demand Parameters)를 검토하기위해 위에서는 함수 g 를 미분하여 이용되었다. 또한, 함수 g 의 기울기는 수학적으로 식(3.4)에서 처럼 유한차등법을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\frac{\partial g}{\partial x_i} = \frac{g(\mu_i + \Delta x_i) - g(\mu_i - \Delta x_i)}{2\Delta x_i} ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.4)$$

여기서, $\Delta x_i = a_p \sigma_i$ 로 가정된다. σ_i 는 i 번째 확률변수의 표준편차이고, a_p 는 수렴조건에 의한 비례계수이다.

본 연구에서는 FOSM method를 이용하여 산출한 확률분포는 정규분포를 가정하도록 하겠다.

2) 토네이도 다이어그램(Tornado Diagram Analysis)

토네이도 다이어그램은 최근 내진공학에서 민감도 분석에 사용되는 결정분석(decision analysis) 방법이다(Porter 외, 2002). 토네이도 다이어그램은 수평기둥을 의미하는 스윙(swings)과 각각의 확률변수로 이루어져 있다. 각각의 스윙의 길이는 확률변수의 변화에 따라 다른 결과 값을 갖는다. 또한 토네이도 다이어그램에서 스윙은 위에서부터 아래로 스윙 크기가 내림순으로 표현된다. 즉, 위로 갈수록 스윙의 폭이 커지고 아래로 갈수록 스윙의 폭이 좁아지는 것을 의미한다. 이러한, 스윙의 넓고 좁은 배열은 토네이도 모양을 보이는데 이를 토네이도다이어그램(tornado diagram)이라 한다.

각각의 스윙은 확률변수의 민감도를 의미한다. 스윙의 크기가 크다는 것은 민감도가 높게 작용하여 결과값에 큰 영향을 미치는 것을 뜻한다. 신뢰도가 높은 스윙분포와 스윙의 값을 얻기 위해서 입력확률변수가 전체적인 확률분포를 포함할 필요가 있다. 즉, 각각의 입력확률변수는 확률분포를 대표하는 양 끝단에 높고 낮은 2가지의 상응하는 값(최대상계와 최소상계 값)을 결정함수에 입력해야 한다. 예를 들어 백분율에서 10%와 90%의 값을 의미한다. 그림 3.1은 양 끝단의 변수를 입력하여 결정분석을 통해 스윙이 산출되는 과정을 보여주고 있다.

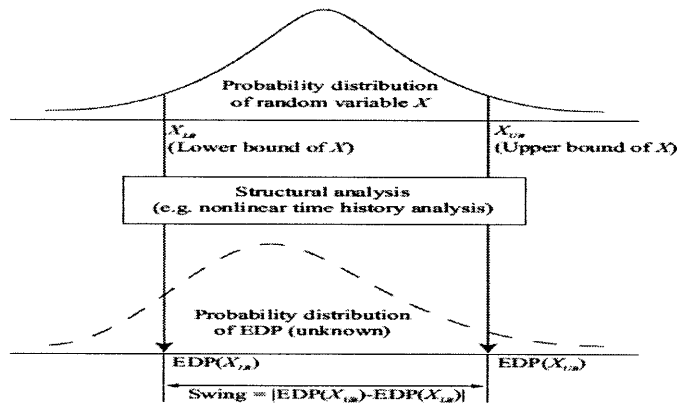


그림 3.1 토네이도 다이어그램의 스윙의 전개과정 (Lee and Mosalam, 2006)

확률분포에서 여러 입력확률변수는 결정론적 함수에 따라 결과 값이 평가된다. 이 과정에서 서로 다른 입력변수들에 의해 나온 결과값들은 각각 스윙으로 표현되고, 결국 결과값으로 나온 스윙을 큰 스윙부터 작은 스윙으로 내려가면서 하나의 토네이도 다이어그램을 완성한다(그림 3.2). 토네이도 다이어그램은 각각의 확률분포를 대표하는 입력변수의 수 만큼 스윙이 생성되고 이러한 스윙의 분포를 통하여 토네이도다이어그램의 모양을 확인할 수 있다. FOSM method의 경우 확률분포의 모양을 확인 할 수 없다는 단점을 보완하는 방법으로 좋은 방법이라 하겠다. 이러한 장점들을 이용하여 최근 연구자들에 의해 연구되어지고 있다.(Lee and Mosalam, 2006) 또한, 스윙의 폭은 민감도를 의미하며 폭이 클수록 민감도가 큼을 보인다. 민감도를 이용하여 확률적으로 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 확률변수를 확인할 수 있다

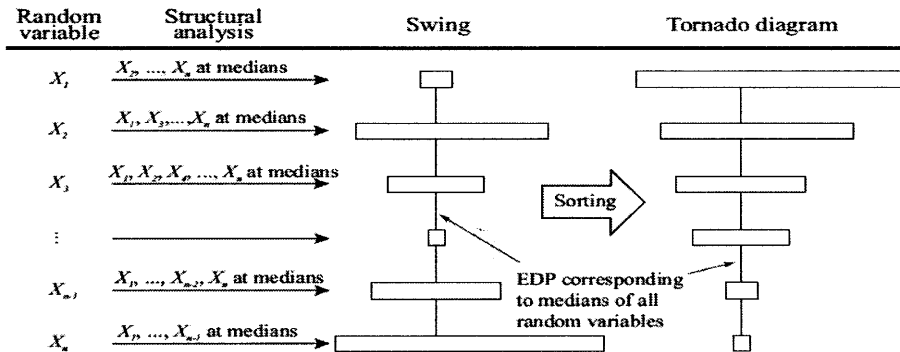


그림 3.2 토네이도 다이어그램의 생성과정(Lee and Mosalam, 2006)

IV. 내진상세평가 적용례

1. <CASE1>

본 장에서는 실제 “분당선 왕십리-선릉간” 제 3공구 구간의 지반(그림 4.2)을 이용하여 6.8×6.9m 1단1련 박스 구조물(그림 4.1)의 내진성능을 평가하였다. 해석방법은 “도시철도 시설물내진설계기준(안) 개정을 위한 기초연구(II)”(한국철도기술연구원, 2010) 및 “기존 터널의 내진성능 평가요령”(한국시설안전기술공단, 2004)에서 제시한 응답변위법을 사용하였다.

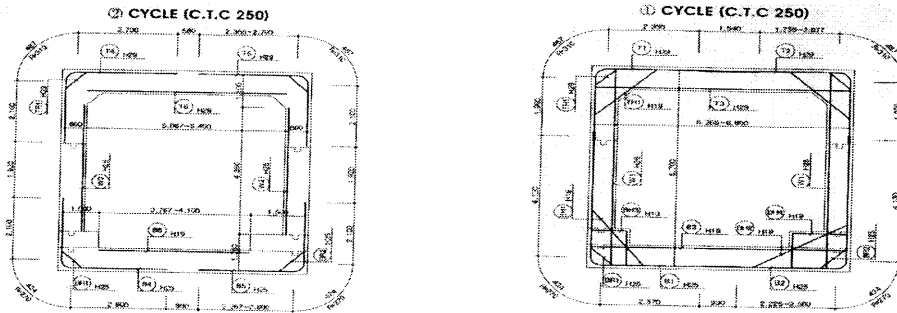


그림 4.1 6.8×6.9m 박스 구조물의 단면도

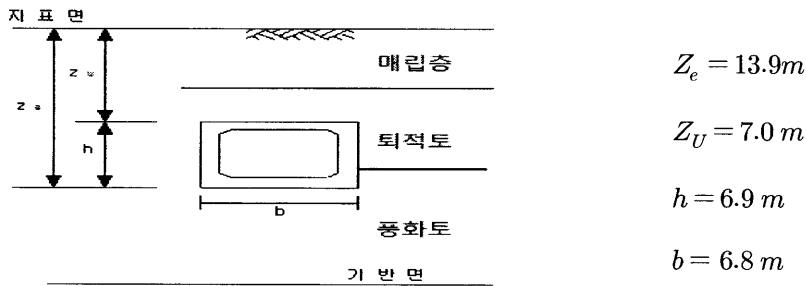


그림 4.2 CASE1 지반 형상

1) 지반정보

표 4.1은 구조물 본선구간의 지반조사를 통해 얻어진 견본이 되는 N값의 평균, 분산 및 단위중량 등 기본적인 지반 정보를 표기하고 있다.

표 4.1 지반 조건

구간		본선 및 정거장 구간					
구분	깊이 (m)	$\gamma_t (KN/m^3)$	γ_{SUB}	$\psi(^{\circ})$	포아송 비(ν)	N값 평균	N값 분산
매립층	0-4	18.0	9	28	0.35	11.59	7.13
퇴적층	4-11	19.0	10	32	0.35	13.0	12.36
풍화토	11-21	21.0	11	32	0.33	29.33	49.88
기반암	21-	26.59	16.59		0.23		

2) 지반조건결정 및 변위산정

표 4.2에서 제시된 적용식을 이용하여 지반조건을 결정하고 지반의 동적물성값을 산정하였다.

표 4.2 지반동적물성값 산정

동적물성값	적용식	매립토	퇴적토	풍화토
전단파속도(m/s)	$V_{sod} = 0.85 \times (80N^{1/3})$	155.7	159.9	208.9
지반동전단탄성계수(KN/m ²)	$G_D = \gamma_t/g \times (\alpha_g V_S)^2 / f_g^{2.11}$	15404	17151	32363
지반동변형계수(KN/m ²)	$E_D = 2(1 + \nu)G_D$	41590	46306	86085
지반고유주기(s)	$T_G = 4 \sum (H_i / V_{sodi})$	0.349		
기반암속도응답스펙트럼(m/s)	$S_v = 1.25 T_G / (2\pi) \cdot S_a$	0.380		

표 4.2의 값을 이용하여 상세평가에서 응답변위법에서 제시하는 이중코사인이론을 이용하여 지반변위를 구한 결과 지표면으로부터 심도에 따라 표현한 것은 그림 4.3과 같다..

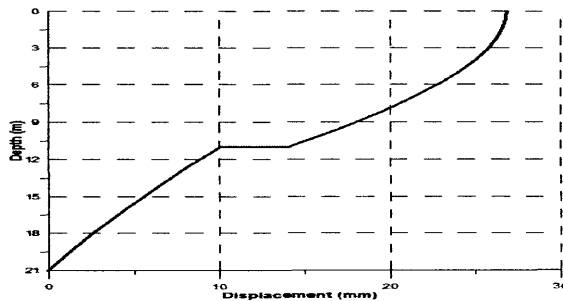


그림 4.3 깊이에 따른 지반변위 그래프

11) Imai(1997)에 의해 제시된 식으로 sand에 적용하도록 하고 있다. 실제 일본 “철도구조물등 설계표준 동해설 내진설계”(RTRI, 1999)에서 사용되고 있다.

3) FOSM method를 이용한 해석

(1) 변위에 대한 확률분포

지반 변위에 대한 확률 분포를 분석한 결과 분산(σ_y^2) 및 COV(%)는 각 지반층의 중심과 지표면인 심도 0, 2.5, 8, 16m에 적용한 결과는 표 4.3과 같다.

표 4.3 변위의 심도에 따른 확률분석

구분	심도			
	지표면	2.5m	8m	16m
평균변위(mm)	26.89	26.17	19.82	4.49
표준편차(σ_y)	2.68	1.67	1.98	0.45
COV(%)	9.96	6.39	9.97	9.96

(2) 휨강도

지반에 따라 N값에 $\pm \Delta N_i$ 에 대하여 구한 지진하중 및 지진하중과 상시하중을 붕괴방지 수준으로 하중조합하여 작용모멘트 수치해석 하였다. 이때 단면은 가장 큰 탄성지진모멘트 (M_E)가 작용할 것으로 예상되는 좌벽체슬라브 하부(단면A), 우벽체슬라브 하부(단면C), 상부슬라브 좌단부(단면B)/우단부(단면D)로 구분하여 분석하여 실시하도록 하였다(그림 4.4). 이러한 탄성지진모멘트에 대하여 확률 분석한 결과는 표 4.4와 같다. 탄성지진모멘트를 단면 A부터 D를 항복강도와 비교하여 정규분포로 가정하였을 때 확률분석한 결과는 그림 4.5와 같다.

-기능수행수준 하중조합 : $U = 0.75(1.54D + 1.7L + 1.8H + 1.8E)$

-붕괴방지수준 하중조합 : $U = 1.0(D + L + H + E)$

여기서, 고정하중(D), 활하중(L), 수압(H), 지진하중(E)

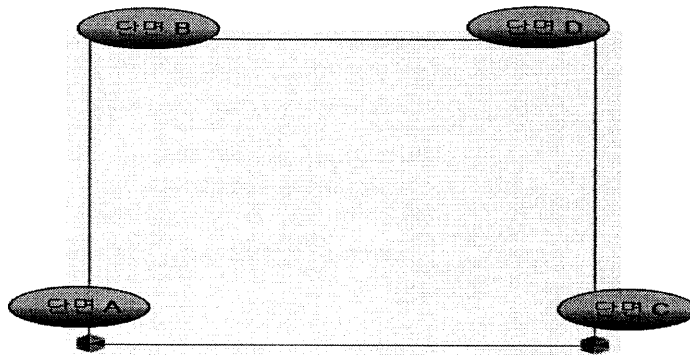
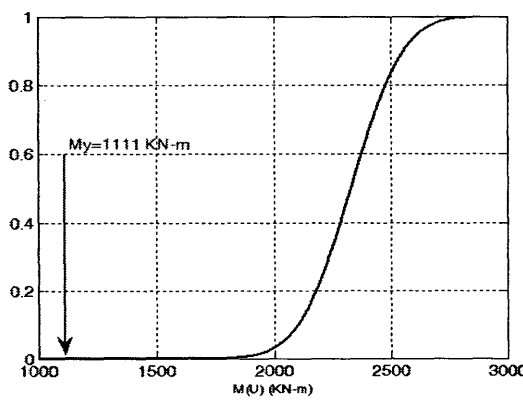


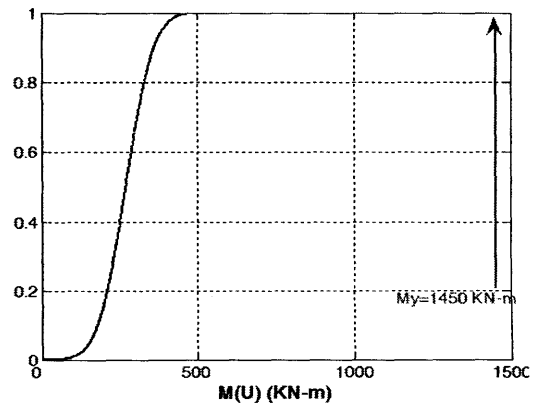
그림 4.4 구조물의 단면구분

표 4.6 지진하중모멘트에 대한 확률분석결과

구분		단면A	단면B	단면C	단면D
지진하중 단면모멘트	평균	1717.3	642.2	1760.8	649.1
	표준편차	176.60	71.23	180.67	72.02
	COV (%)	10.24	11.09	10.24	11.09
탄성지진모멘트	평균	2328.5	268.7	1149.7	1023.9
	표준편차	176.60	71.23	180.67	72.02
	COV (%)	7.56	26.51	15.72	7.03

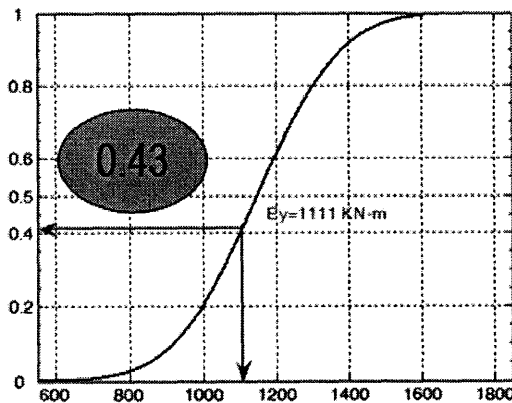


단면 A

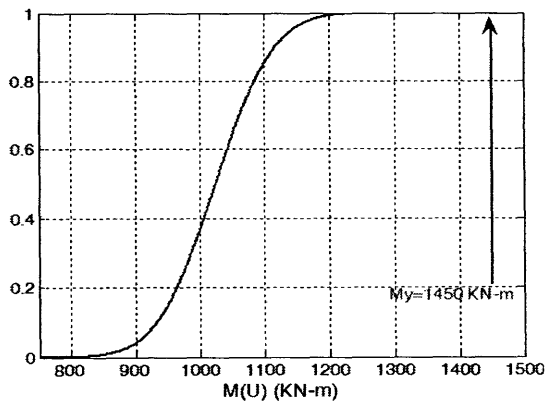


단면 B

그림 4.5 하중조합된 단면과 항복강도의 정규분포 CDF 결과



단면 C



단면 D

그림 4.5 하중조합된 단면과 항복강도의 정규분포 CDF 결과(계속)

(3) 비탄성거동해석

박스 구조물 단면의 가로와 세로를 x-y축으로 정하였을 때, z축에 대하여 단위 길이에 따른 측벽부와 상부슬라브의 단면을 UCfyber를 이용하여 비선형단면해석을 실시한 결과 항복 모멘트(M_y)는 그림 4.6과 같다.

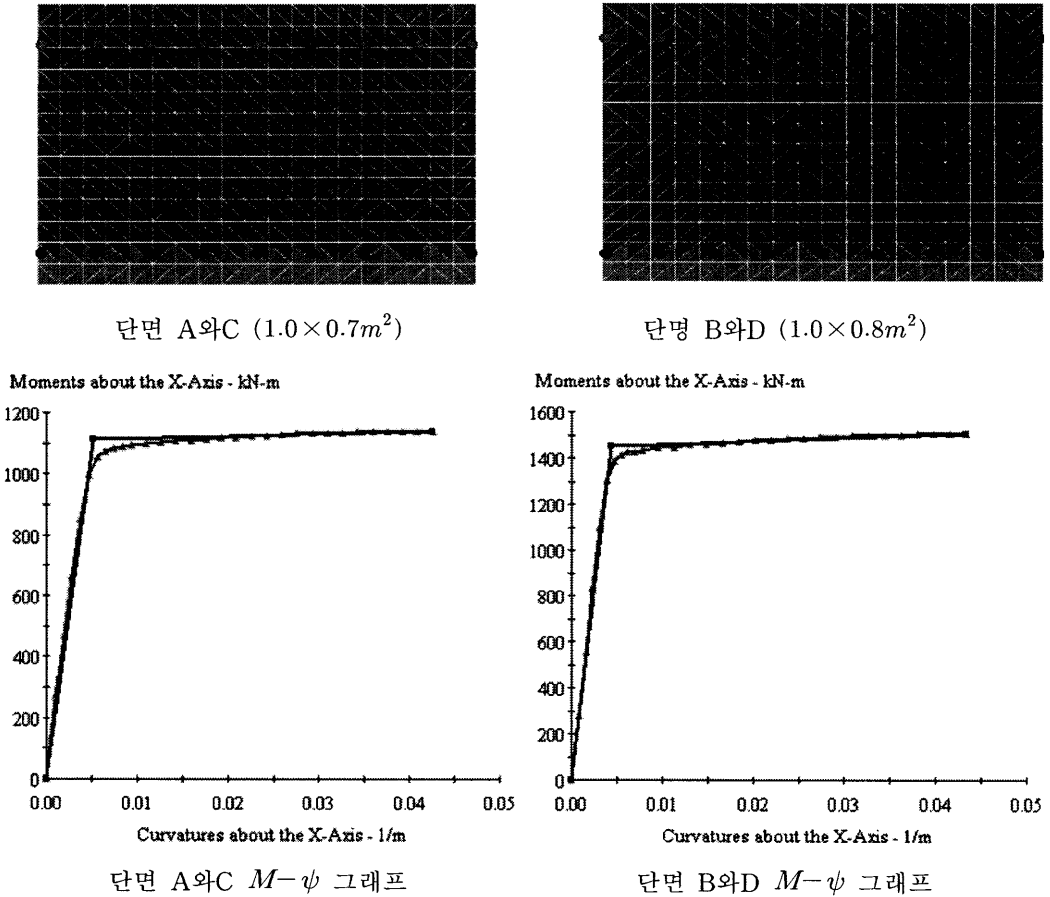


그림 4.6 단면비선형 해석 결과

해석결과 단면 A와 C의 항복모멘트(M_y)는 $1111\text{KN}-m$ 이고, 단면 B와 D의 항복모멘트는 $1450\text{KN}-m$ 이다. 결론론적으로써 단면 B와 D는 붕괴방지수준 지진동에 대하여 탄성 거동하는 것으로 평가되며, 내진성능이 충분히 확보된 것으로 평가된다. 반면에 단면 A와 C는 항복모멘트가 하중조합모멘트보다 작음으로써 비탄성거동을 나타내므로 충분한 연성확보 여부를 평가하여야한다. 비탄성거동에 대한 평가는 “도시철도 시설물내진설계기준 개정을 위한 기초연구(II)”(한국철도기술연구원, 2010)에서 제시하는 상세평가법을 따르도록 한다. 각 부재의 소요응답수정계수($R_{req-member}$)을 식(4.1)를 이용하여 산정한다.

$$R_{req-member} = \frac{M_{el}}{\phi M_n} \quad (4.1)$$

여기서, M_{el} : 각 부재의 탄성지진모멘트

ϕM_n : 강도감소계수로 1.0을 적용한 각 부재의 설계휨강도

구조계의 소요 응답수정계수 ($R_{req-system}$)은 각 부재의 소요 응답수정계수 중 최소값 $R_{req-system} = 1.03$ 이고, 구조물의 고유주기 $T_G = 0.349s$ 일 때 변위연성도계수(μ)는 식(4.2)과 같다.

$$\mu = \frac{R_{req-system}^2 + 1}{2} ; T_G < 1.0sec \quad (4.2)$$

여기서, $R_{req-system} = \min(R_{req-member})$

T_G : 개착식 구조물의 고유주기

구조계의 소요 비탄성 변위(u_m)는 식(4.3)를 사용하여 산정한다.

$$u_m = \mu \cdot u_y \quad (4.3)$$

여기서, u_y 는 구조계의 항복 수평변위.

구조계 비탄성 변위는 $M-\psi$ 에서 ψ_{yield} 일 때 $M_y = 1111KN-m$ 를 이용하여 하중 $P = 490KN$ 을 가하였을 때 구조물의 변위값을 산출하면 $u_y = 15.84 \times 10^{-3}m$ 이다

본 상세평가에서는 소성힌지의 길이가 벽체슬라브 길이의 10% 일 때의 경우를 사용하여 공 급비탄성 변위를 구하였다. 단면A와 C에 대하여 비선형해석 결과를 바탕으로 $\psi_u = 42.5 \times 10^{-3}m^{-1}$ 이고, 이때의 구조물 총 높이 6.9m에서 하단 우각부1.4m를 제외한 유효 높이(H)는 5.5m이다. 캔틸레버에서의 변위 산정을 이용하여 식(4.4)과 같이 θ_p 를 구하여 공 급비탄성변위를 산정한다(식4.5).

$$\theta_p = \int_{L_p} \psi_u dx = \psi_u \times L_p \quad (4.4)$$

이 때 $L_p = H \times 0.05$
 (h: 유효높이, 소성힌지 10%의 1/2: 0.05)

$$u_m^l = \theta_p \times (H - L_p/2) \quad (4.5)$$

붕괴방지수준에 대해 비탄성거동해석에서 내진성능 확보여부를 평가하기 위하여 다음과 같은 식(4.6)을 검토해야한다.

$$u_m \leq u_m^l \quad (4.6)$$

소성힌지	θ_p (rad)	u_m^l (m)	u_m
10%	0.011685	62.66×10^{-3}	$16.3 \times 10^{-3}m$

위에서 산정한 결과 값을 이에 대입 한 결과 본 예제는 결정론적인 면에서 내진성능을 확보 하였다고 볼 수 있다. 단면 C에 대하여 확률적으로 접근하여보면 평균 및 표준편차를 가지고 함수 $u_m = h(M_n)$ 에 적용하여 위 "(2)휨강도"에서와 같은 방법으로 확률분석 한 결과 표 4.7과 같다.

표 4.7 소요비탄성 변위에 대한 확률분석결과

구분	u_m
평균소요비탄성변위(m)	16.32×10^{-3}
표준편차(σ_{u_m})	26.66×10^{-4}
COV(%)	16.34%

4) 토네이도 다이어그램을 이용한 확률분석

FOSM method의 경우 평균과 표준편차를 이용한 확률분석방법이다. 그러나 실제 확률분포의 모양을 예측하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 토네이도 다이어그램을 이용하여 실제 확률분포의 성격을 파악하고자 한다. 또한, 이를 이용하여 확률분석 한 결과를 FOSM method에서 나온 결과와 비교, 보완하고자 한다.

각각의 지반에 N값에서 $\pm 2\sigma_i$ 만큼의 차이를 두고 평균지진하중으로 부터 차이를 통해 전체적인 스윙의 변화를 확인하고자 하였다.(그림 4.7)

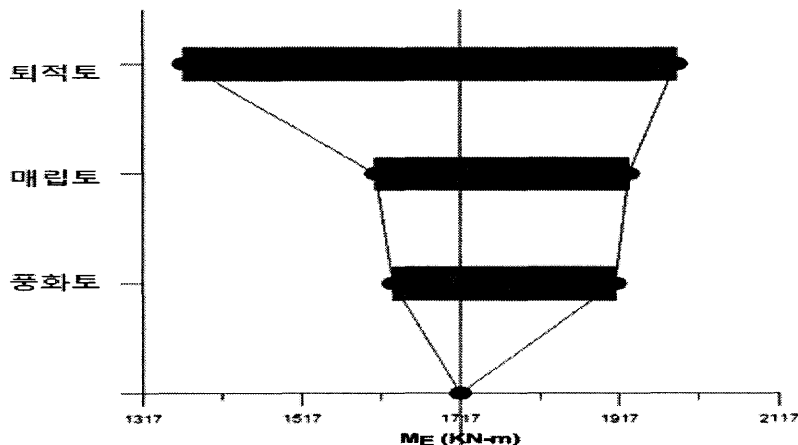


그림 4.7 단면A 지진하중의 토네이도 다이어그램

그림 4.7에서의 토네이도 다이어그램의 형상으로부터 대수정규분포(Log-normal distribution)을 확인하였다. 또한 퇴적토의 민감도가 가장 큼을 확인할 수 있다.

FOSM method를 통하여 산출한 정규분포(Normal distribution)에서의 평균, 표준편차값을 이용하여 토네이도 다이어그램을 통해 분석한 대수정규분포에 적용하여 대수정규 CDF를 산출하였다. 식(4.6)과 식(4.7)을 이용하여 정규분포의 평균, 표준편차를 대수정규분포의 평균과 표준편차로 환산하였다. 또한, 식(4.8)을 대수정규CDF(Lognormal Cumulative Distribution Function)에 적용한다.

$$E(X) = \exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right) \quad (4.6)$$

$$Var(x) = E^2(x)(e^{\sigma^2} - 1) \quad (4.7)$$

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) / t dt \quad (4.8)$$

대수정규CDF 결과는 식(4.9) 같이 표준편차(σ)와 COV(%)를 비교함으로써 정확도를 판단할 수 있다(ANG, 1975).

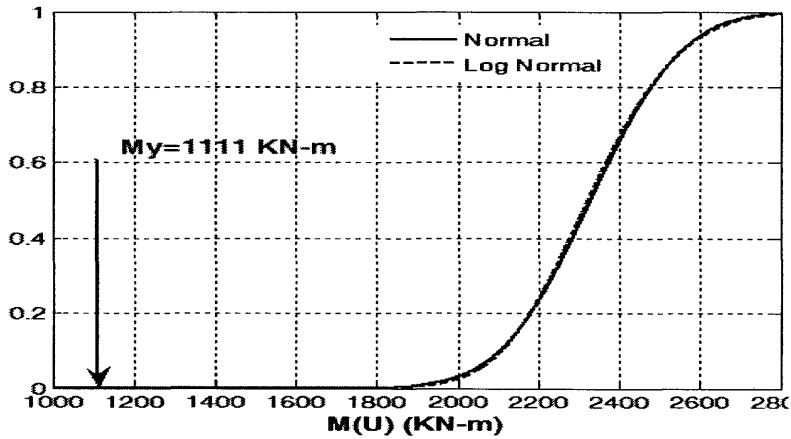
$$\sigma_{\lognormal} \approx \frac{\sigma_{normal}}{\mu_{normal}} = COV \quad (4.9)$$

5) 해석 결과

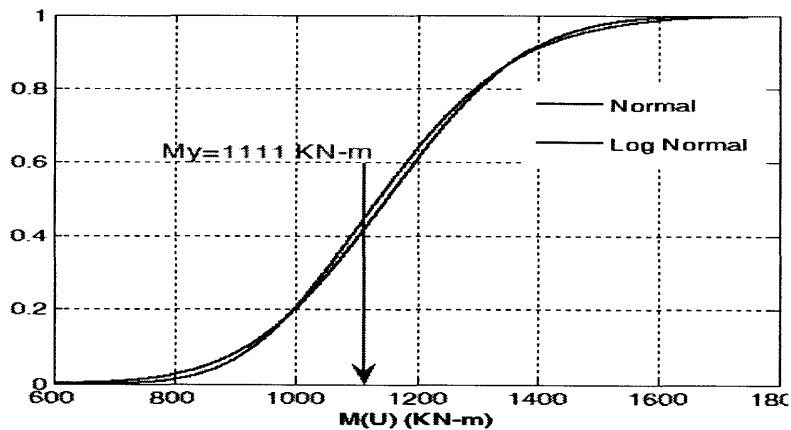
결정론적인 면에서는 본 예제의 구조물은 내진성능을 확보하였다고 볼 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 확률론적으로 접근하였을 때 어떠한 결과를 보일지 분석해 보겠다.

FOSM method를 이용하여 정규분포라 가정하여 확률분포를 분석하였다. 지진하중과 상시

하중으로 하중조합된 붕괴방지수준의 하중을 적용하여 그림 4.5와 같이 CDF에 대하여 항복 강도와 의 확률분석을 하였다. 그 결과 단면 B와 D에 대해서는 결정론적으로 탄성 거동하는 것으로 평가될 뿐만 아니라 확률론적으로도 CDF분석표와 비교하였을 때 M_n 이 1450 KN-m 이므로 99.9% 신뢰할 수 있음을 보인다. 반면에 단면 A와 C에 대해서는 결정론적으로는 항 목모멘트가 하중조합모멘트보다 작음으로써 탄성거동에 대하여 내진성능을 확보하였다고 볼 수 없으나 확률적으로는 단면 C에 대해서 43%에 대하여 항복될 확률이 있고, 57%의 항복 하지 않을 확률이 존재한다. 그러나 이는 확률적으로는 항복하지 않을 확률이 높으나 안정 성을 고려하였을 때 바람직한 현상은 아니다. 또한, 단면 A와 C에 대하여 비탄성거동해석을 통하여 내진성능을 분석하였을 때 탄성거동해석과는 다르게 결정론과 확률론적으로 모두 내 진성능을 확보하였음을 보였다.

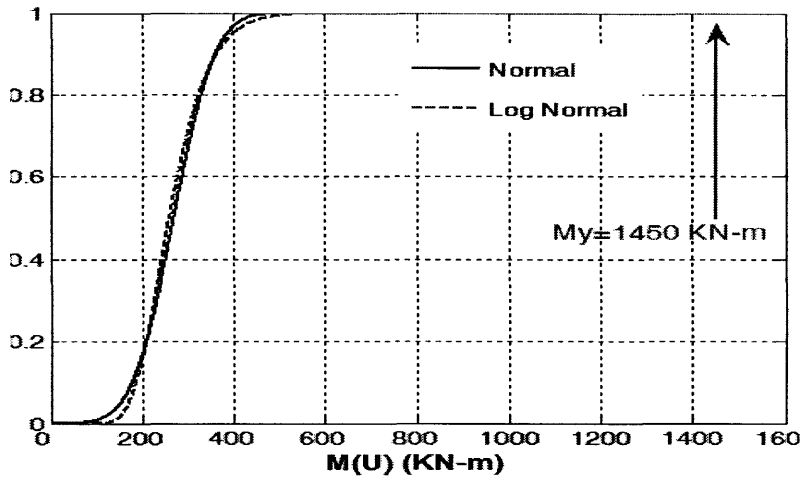


단면 A

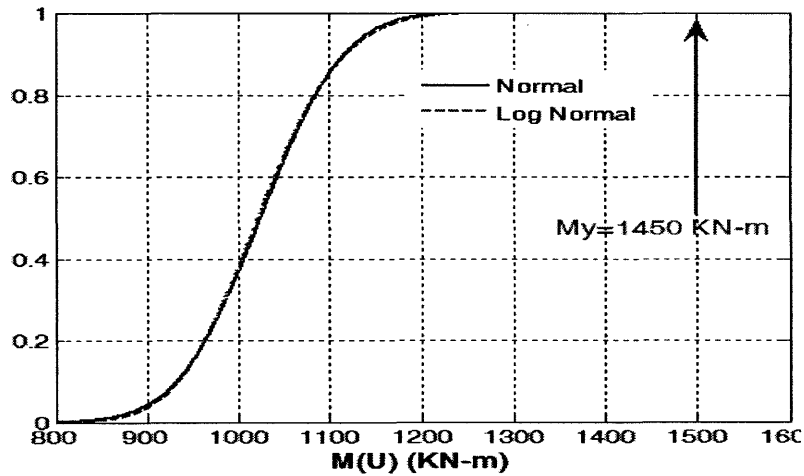


단면 C

그림 5.8 하중조합된 단면A부터D 정규와 대수정규 CDF 결과 비교



단면 B



단면 D

그림 5.8 하중조합된 단면A부터D 정규와 대수정규 CDF 결과 비교(계속)

또한 토네이도 다이어그램을 통하여 FOSM method 로는 예측할 수 없었던 확률분포의 모양을 해석한 결과 본 CASE의 경우 대수정규분포형태를 보인다. FOSM method를 통해 정규분포로 가정하여 분석하였으나 실제 분포모양은 대수정규분포임을 확인할 수 있다.

대수정규분포형태와 정규분포형태를 비교한 결과는 그림 5.8 과 같다. 그림에서 일반적인 정규분포 그래프와는 달리 두 그래프가 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 특히 단면 A와 D에서는 아주 작은 차이를 보인다. 그 이유로는 대수정규CDF의 기울기는 표준편차에 의해 결정되기 때문이다. 식(5.8)과 같이 표준편차는 정규분포의 COV(%)와 매우 유사 하다. 이를 이용하여 대수정규분포 그래프의 정확도를 간접적으로 확인할 수 있다. 또한, COV가

상대적으로 높은 단면 B의 경우 그래프 차이가 더 두드러지는 것을 확인할 수 있다. FOSM method를 이용하여 분석한 평균과 표준편차를 이용하여 대수정규분포를 CDF 해석결과 단면 B의 경우 FOSM method에서는 43%의 항복확률을 도출하였으나 대수정규분포에서는 44.5프로의 항복될 확률을 보였다. 본연구의 경우 COV의 수치가 즉, 대수정규분포의 표준편차 값이 작았을 경우 이런 차이를 나타내었으나 COV가 큰 값을 보이는 경우 확률적으로도 큰 차이를 나타낼 수 있을 것이다.

V. 결론

본 연구는 지반의 불확실성을 바탕으로 불확실성을 내포한 지반 물성값을 산정하였고, 이를 토대로 이미 연구된 자료를 토대로 지반물성값간의 산술적 계산을 통하여 지반의 동적물성값을 산출하고 내진상세평가를 시행 및 분석하였다. 지반의 물성값으로는 시험과정에서 가장 비과학적이고 인위적, 자연적 불확실성을 내포하는 일축압축시험을 통해 산출되는 N값을 이용하였다. 국내 내진상세평가법 혹은 설계기준을 바탕으로 주로 제시되어지는 응답변위법을 이용하여 확률론적 분석을 위해 FOSM method와 토네이도 다이어그램을 이용하였으며, 이를 근거로 불확실성의 전과, 결정론적 분석결과와 확률론적 분석결과와의 차이를 비교 하고자 하였다.

CASE 1을 통하여 심도에 따른 지반의 변위부터 비탄성변위산정까지를 평가하였다. 이 과정에서 지진하중과 상시하중으로 하중조합된 붕괴방지수준의 하중을 적용하여 단면의 모멘트를 확률분석을 한 결과 단면 B와 D에 대해서는 99.99% 신뢰할 수 있음을 보인다. 반면에 단면 A와 C에 대해서는 결정론적으로는 소요모멘트가 공급조합모멘트보다 작음으로써 탄성거동에 대하여 내진성능을 확보하였다고 볼 수 없으나 확률적으로는 단면 C에 대하여 43%의 항복될 확률이 있고 57%의 항복되지 않을 확률이 존재한다. 그러나 이는 확률적으로는 항복되지 않을 확률이 높으나 구조적으로 안정성을 고려하였을 때 바람직한 현상은 아니다. 또한, 비탄성거동해석을 하였을 때 결정론적으로 내진성능을 확보하였고 확률론적으로도 99.99% 확보하였다. 또한 토네이도 다이어그램을 통하여 FOSM method 로는 예측할 수 없었던 확률분포의 모양을 해석한 결과 본 CASE의 경우 대수정규분포형태를 보인다. FOSM method를 통해 정규분포로 가정하여 분석하였으나 실제 분포모양은 대수정규분포임을 확인할 수 있다.

FOSM method를 이용하여 분석한 평균과 표준편차를 이용하여 대수정규분포를 CDF 해석결과 단면 B의 경우 FOSM method에서는 43%의 항복확률을 도출하였으나 대수정규분포에서는 44.5%의 항복될 확률을 보였다. 본연구의 경우 COV의 수치가 즉, 대수정규분포의 표준편차 값이 작았을 경우 이런 차이를 나타 내었으나 COV가 큰 값을 보이는 경우 확률적으로도 큰 차이를 나타낼 수 있을 것이다.

본 연구는 N값만을 확률변수로 결정하여 분석하였기 때문에 몇 가지 한계점이 나타났다.

더 많은 변수를 사용하여 분석할 경우 좀 더 정확하고 다양한 결론을 나타낼 수 있을 것이다. 지진재해대책법으로 내진보강이 두드러지는 가운데 본 연구를 바탕으로 지중구조물 뿐만 아니라 교량, 공항, 항만시설 등 다양한 지상구조물 등에 대해서도 확률적으로 접근하여 좀 더 경제적이고 실용적인 보강이 이루어지길 바란다.

[참고문헌]

- 한국시설안전기술공단(2004). 『기존 터널의 내진성능 평가요령』 .
- 한국철도기술연구원(2010). 『도시철도 시설물내진설계기준(안) 개정을 위한 기초연구(II)』 .
- 건설교통부(2005). 『도시철도 내진설계기준』 .
- 건설교통부(1997). 『내진설계기준연구(II)』 .
- 곽동엽, 박두희, 정찬균, 이홍성(2009). "국내 확률론적 지진계수 생성", 『한국지반 공학회논문집』 , Vol.25, No.10, 87-97.
- RTRI(1999). 『철도구조물등설계표준.동해설 내진설계』 .
- Brandenberg(2010). 『Shear Wave Velocity as a statistical Function of Standard Penetration Test Resistance and Vertical Effective Stress at Caltrans Bridge Site』 , Pacific Earthquake Engineering Research Center, March 2010 .
- Melchers, R. E.(1999). 『Structural reliability analysis and prediction』 , John Wiley and Sons.
- Porter, K. A., J. L. Beck, and R. V.(2002). 『Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables』 , Earthquake Spectra 18 (4), 719-743.
- Tae-Hyung Lee · Khalid M. Mosalam(2006). 『Probabilistic Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Structural Components and Systems』 Pacific Earthquake Engineering Research Center, August 2006.
- Alfredo H-S. ANG and Wilson H TANG(1930). 『Probability Concepts Engineering Planning and Design』 , Woley and Sons, 1930.

논문접수일 : 2010년 10월 5일
 심사의뢰일 : 2010년 10월 11일
 심사완료일 : 2010년 12월 14일