도시철도 개착터널의 확률적 내진성능평가

Probabilistic Seismic Performance Evaluation of Open-Cut Tunnels for Subway Systems

박지환* · 강윤석** · 이태형***

Park, Jihwan · Kang, Yun Suk · Lee, Tae-Hyung

Abstract

In addition to recent strong earthquakes in neighboring countries, mid-size earthquakes in Korea have brought up attention. Since the Earthquake Disaster Measures Act has been established, the needs for researches on the seismic performance evaluation and seismic retrofit techniques have increased in Korea. Dynamic soil properties affect the seismic performance of underground structures. Therefore, uncertain soil properties will cause an uncertain seismic performance of underground structures. The objective of this study is to investigate the effect of uncertain soil properties to the seismic performance evaluation of underground structures using the First-Order Second Moment method. Uncertain soil properties are considered as random variables and uncertainty is propagated to the decision variable of the performance evaluation process. The proposed methodology is applied to an open-cut tunnel of a part of Seoul Metropolitan Subway system where the N-value is considered as a random variable. The example shows that the proposed methodology is simple, and yet practical.

Key words : FOSM method, seismic performance evaluation, underground structures, soil properties

요 지

최근 한반도 주변국들이 강진으로 인해 큰 피해를 입었고, 국내에서도 중진이 몇 차례 발생하여 우리나라에서도 지진재해에 대한 관심이 높아졌다. 특히 지진재해대책법의 제정으로 사회기반시설물의 내진대책이 의무화되어 내진성능평가 및 내진보강기술이 절실히 필요하게 되었다. 지중구조물에 대한 내진성능평가는 지반 동특성의 영향을 받게 되는데, 만일 지반의 동특성이 불확실하면 내진성능평가의 결과도 불확실하게 된다. 본 연구에서는 불확실한 지반의 동특성이 지중구조물의 내진성능평가에 미치는 영향을 분석하기 위해 FOSM방법을 이용하는 방법을 제시하였다. 불확실한 지반 동특성을 확률변수로 가정하고 FOSM방법을 통해 불확실성이 전파되어 구조물의 내진성능평가 결과가 확률변수로 계산되도록 하였다. 이 방법을 서울시 도시철도 개착터널의 일부구간에 적용하고, N값의 불확실성을 고려한 결과 설계하중에 대한 구조물의 내진성능 만족여부를 확률로 계산할 수 있었다.

핵심용어 : FOSM방법, 내진성능평가, 지중구조물, 지반특성

1. 서 론

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, 2011년 일본 동북부해안에서 발생한 규모 9.0의 동일본대지진은 지진과 쓰나미로 인한 사망자만 14,000여 명에 이르고 후쿠오카 원자력 발전소에서는 방사능이 누출되는 사고가 발생하는 등 현대 역사상 유래 없는 재난을 야기했다. 우리나라는 일반적으로 지진에 대해 안전지대로 생각하고 있지만, 2007년

1월 20일 “오대산 지진”, 2008년 10월 29일 “공주 지진”, 2010년 2월 9일 “시흥 지진”, 그리고 가장 최근에 2012년 5월 11일 “무주지진”에 의해 한반도가 더 이상 지진 안전구역이 아니라는 의식이 확산되고 있다. 지진으로 인한 재난은 피해규모가 크고 피해지역이 광범위하여, 우리나라와 같이 지진에 대한 예방 조치나 지진 발생 시의 대처가 선진국에 비해 낮은 수준에서는 지진이 발생할 경우 사회·경제적, 인적으로 큰 피해가 발생할 우려가 있다. 이에 따라 정부에서는 2008년 “지진재해대책법”을 제정하여 31가지 시설물에 대한 내진설계 및 보강을 의무화하였다. 특히 내진설계가 고려되지 않은 기존 시설물에 대한 내진성능평가와 보강을 의무화함에

*정회원 · 한국철도기술연구원 주임(급)연구원(E-mail : hwan3053@krrri.re.kr)

**한국철도기술연구원 책임연구원

***정회원 · 건국대학교 토목공학과 부교수(교신저자)

따라 다양한 시설물에 대한 내진성능평가 연구가 진행되기 시작했다. 서울시 등 여러 지역에서 교량, 항만, 지중구조물 등 기존 시설물에 대한 내진 보강이 이루어지고 계획이 증가하는 추세이다.

도시철도는 지진발생에 의한 경제적·사회적 파급효과로 볼 때 매우 중요한 시설물이다. 구조공학적 관점에서 볼 때, 도시철도는 개착터널, 교량, 정거장으로 구성되는데 이 중 개착터널은 지중구조물로서 지진공학의 주요 대상인 교량과 건축물(정거장)에 비해 관련연구가 상대적으로 적게 진행되고 있는 현실이다. 지진공학 연구가 활발히 진행되고 있는 미국에서도 지중구조물에 대한 연구는 그리 활발하지 않고, 일본에서 연구가 제한적으로 진행되고 있다. 지진에 의한 지표면 진동의 영향을 받는 지상구조물과는 달리 지중구조물은 기반암부터 지표면까지 지반층의 영향을 받는다. 따라서 지반의 동적특성을 불확실하게 파악하고 있는 경우 지중구조물의 거동분석 또한 불확실하게 된다.

구조물을 계획, 설계, 측량 및 시공을 행함에 있어 많은 인자 또는 요소들이 불확실성(uncertainty)을 갖고 있다. 공학에서의 불확실성은 어떤 물리량에 대해서 관측하거나 계산한 값이 그 양의 참값에서 벗어나 있다고 추정되는 것으로써 이는 보통 확률적 접근에 의해 확률오차 등으로 표현된다. 문제는 이러한 불확실성의 발생은 함수관계에 따라 발생지점으로부터 다음단계를 수행할 때 포함되어 전파된다는 점이다. 이는 결과적으로 최종 결정인자에 어떠한 영향을 미칠지 예측하기 어렵다. 이처럼 근래에는 불확실한 인자에 대해서 통계적, 확률적으로 접근하여 설계/분석에 적용할 수 있는 방법이 많이 연구되고 있다. 내진성능평가에서도 지진에 의한 지반의 변화로부터 구조물에 미치는 영향까지의 전체적 과정에서 발생할 수 있는 불확실한 인자에 대하여 확률적으로 고려하는 연구들이 이루어지고 있다(Phoon 등, 1999; Song 등, 2011).

본 연구의 목적은 자연적·인위적인 이유로 지반동적특성에 내재한 불확실성이 지중구조물의 내진성능평가에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 지반동적특성의 불확실성을 고려하기 위해 지반 물성값을 확률변수로 가정하였고, First-Order Second-Moment(FOSM) 방법을 이용하여 구조물의 확률적 내진성능평가를 수행하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 이용하여 서울시 도시철도 일부구간의 개착터널에 대한 확률적 내진성능평가를 수행하고 결과를 분석하는 과정을 통해 제안된 방법론을 검증하였다.

2. 지중구조물의 내진성능평가

2.1 내진성능평가 절차

국내 지중구조물의 내진성능평가는 ‘기존 터널의 내진성능평가요령’(한국시설안전기술공단, 2004)에 따라 수행하는 것이 일반적이다. 이 요령에 따르면, 터널 구조물의 내진성능평가 절차는 예비평가, 상세평가와 액상화 평가의 3단계로 구분하여 단계적으로 수행한다. 내진성능 상세평가를 위한 자원이 한정된 경우에는 예비평가를 통해 결정된 우선순위가 높은 시설물 순으로 상세평가를 수행할 수 있다.

그림 1. 내진성능 상세평가 절차 (한국시설안전기술공단, 2004).

그림 2. 변위응답법의 개념도 (한국시설안전기술공단, 2004)

구조물의 성능을 구조공학의 관점에서 평가하는 단계는 상세평가 단계로, 지중구조물의 설계기준에서 정하는 수준의 지진하중에 대한 구조물의 성능을 확보하고 있는지를 평가한다. 내진성능 상세평가의 절차는 그림 1과 같이 특정한 지진하중으로부터 지반의 변위를 구하고, 이를 지중구조물에 작용하는 하중으로 환산한 후 단면에 발생하는 하중을 계산하여 이를 단면의 능력과 비교하는 것으로 구성된다.

여기서, 지반조건에 따른 지반계수 결정과 지반변위폭 산정 및 지반반력계수 산정은 지진하중을 결정하는데 가장 중요한 절차인데, 이 방법은 응답변위법에 따라 수행한다(한국시설안전기술공단, 2004). 그림 2에서와 같이, 지반변위로부터 발생하는 지중구조물의 하중은 횡방향 측벽토압과 상판과 저판에 작용하는 주면전단력이 있고, 여기에 관성력이 더해져서 하중 조합을 구성한다. 따라서 지반의 변위를 정확히 결정하는 것이 정확한 구조물 내진성능평가의 중요한 요소가 된다. 반면에 지반의 변위를 결정하는 인자들이 불확실한 경우, 이들의 영향이 구조물의 내진성능평가 절차를 통해 전파되어 최종적으로 내진성능평가의 결과도 불확실하게 된다.

2.2 지반동적특성의 불확실성

지중구조물의 내진성능평가에 필요한 지반의 동적특성은 ‘도

표 1. N값을 이용한 지반변위산정 절차

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

시철도 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. 이와 같은 지반 물성값 중에서 절차상 가장 불확실성을 발생 및 내포할 수 있는 요소는 표준관입시험에 의한 N값이다. N값 이외의 물성 값들은 다른 시험에 의해 측정할 수 있지만, 이미 여러 해외 여러 논문 및 설계기준에서도 확인되었던 것처럼 N값만을 이용하여 다른 값을 비교적 정확하게 산술적으로 계산할 수 있으므로 본 연구에서는 N값의 불확실성을 이용하여 내진성능평가에 미치는 영향을 확인하고자 한다. (Brandenberg 등, 2010; RTRI, 1999). 표 1은 N값으로부터 지반변위를 계산하기 위한 중간식들을 보여주고, 이를 통하여 N값이 지반변위산정에 미치는 영향의 과정을 확인할 수 있다. 이러한 지반변위는 지진하중 분석에 이용되고 결국 지중 및 지상 구조물 전체의 내진성능평가에 영향을 미친다.

3. FOSM 방법

불확실한 물리량에 따른 물리현상을 다루는 확률적 방법에는 몬테카를로 방법(Monte Carlo Simulation), FORM(First-Order Reliability Method), SORM(Second-Order Reliability Method), FOSM 방법 등이 있다. 연구의 목적에 따라 이들 방법들이 다양하게 사용되는데, 몬테카를로 방법은 가장 정확한 결과를 도출할 수 있지만 계산비용이 매우 많이 소요되는 단점이 있다. FORM과 SORM은 특정한 한계상태함수(limit-state function)에 대한 파괴확률을 구하는 방법인데, 적용범위가 매우 제한적인 단점이 있다. 반면에 FOSM 방법은 입력 확률변수의 평균과 표준편차로부터 출력변수의 평균과 표준편차를 계산하는 간단한 방법으로, 계산비용과 결과의 정확성을 비교할 때 매우 효율적인 방법으로 알려져 있다(Lee 외, 2005). 본 연구에서는 FOSM 방법을 사용하여 지반의 불확실한 N값에 의한 지중구조물의 내진성능평가를 수행하였다. FOSM 방법의 개요를 설명하면 다음과 같다.

평균과 분산이 각각 μ_X, σ_X^2 인 확률변수 X 를 변수로 하는 확률함수 $Y = g(X)$ 를 가정하자. 이 함수 $g(X)$ 를 x 에 대하여 미분하고, 테일러급수를 이용하여 비선형함수 혹은 복잡한 함수를 간단한 선형함수로 바꾸면 식 (1)과 같다.

$$Y \approx g_0 + \left(\frac{dg}{dx} \right)_0 (X - x_0) \quad (1)$$

이때 테일러급수 전개를 하는 x_0 는 각 변수의 평균 $x_0 = \mu_X$ 으로 한다. 이때, Y 의 평균 μ_Y 와 분산 σ_Y^2 는 각각 식 (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_Y \approx g(\mu_X) \quad (2)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \left(\frac{dg}{dx} \right)_0^2 \sigma_X^2 \quad (3)$$

본 연구에서는 지반의 동적특성을 확률변수로 하여 유한요소법을 통해 구조물의 거동을 계산하므로 함수 g 의 기울기는 식 (4)와 같이 유한차등법을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\frac{\partial g}{\partial x_i} = \frac{g(\mu_i + \Delta x_i) - g(\mu_i - \Delta x_i)}{2\Delta x_i}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

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

FOSM방법은 확률변수의 1차와 2차 모멘트만을 고려할 뿐 확률분포의 형태를 고려하지 못하는데, 이에 따라 확률분포가 한쪽으로 치우치거나 분포의 꼬리부분이 두꺼운 확률분포 형태의 경우 부정확한 결과를 도출할 수도 있는 단점이 있다. 따라서 확률분포가 특이하게 예측되는 경우에는 FOSM방법의 사용을 제한할 필요가 있다. 본 연구에서 고려한 지반의 N값은 특이한 분포의 형태를 띠거나, 꼬리부분이 두꺼운 분포가 아니라고 가정하고 해석하였다. 이는 수치적으로 검증된 것이 아니므로, 보다 정밀한 해석을 위해서는 N값의 분포에 대한 검증이 필요하다.

4. 내진성능 상세평가 적용례

4.1 응답변위법에 의한 지반변위

본 연구에서 제시하는 바와 같이, 불확실한 N값이 도시철도 개착터널의 내진성능평가에 미치는 영향을 분석하기 위해 ‘분당선 왕십리-선릉간’ 일부 구간의 개착터널에 대한 확률적

그림 3. 해석대상 구조물 주변의 지반 형상

그림 4. 6.8m×3.9m 박스 구조물의 단면도

내진성능평가를 수행하였다. 그림 3과 같은 지반을 이용하여 6.8×6.9 m 1단-1련 박스 구조물(그림 4)의 내진성능을 평가하였다. 이 구조물은 철근콘크리트 단경간 박스의 형식으로, 경암을 지지층으로 하고 토파가 10 m인 조건으로 설계되었다. 콘크리트의 설계기준압축강도는 $f_{ck} = 27 \text{ MPa}$, 주철근의 설계기준항복강도는 $f_y = 400 \text{ MPa}$ 이다. 해석방법은 ‘도시철도 시설물내진설계기준(안) 개정을 위한 기초연구’(한국철도기술연구원, 2010) 및 ‘기존 터널의 내진성능 평가요령’(한국시설안전기술공단, 2004)에서 제시한 응답변위법을 사용하였다.

표 2는 구조물 본선구간의 지반조사를 통해 얻어진 견본이 되는 단위중량과 포아송 비 등 기본적인 지반정보와 N값의 평균, 표준편차 및 COV(Coefficient of variation, 변동계수)를 나타낸다. 여기서, N값의 변동계수는 23.04%~27.08%로 추후 이 변동계수가 전파되어 내진성능지표의 변동계수가 얼마로 계산되는지 주목할 필요가 있다. 표 3은 표 1에 제시된 절차에 따른 지반의 동적 물성값을 나타낸다. 한편, 응답변위법에서 제시하는 이중코사인이론을 이용하여 지반변위를 계산한 결과를 지표면으로부터 심도에 따라 표현한 것은 그림 5와 같다.

그림 5. 깊이에 따른 지반변위

표 2. 예제의 지반 물성값

구분	깊이 (m)	γ (kN/m ³)	γ_{SUB}	ψ (°)	ν	$\mu_{N_{Bk}}^{(1)}$	$\sigma_{N_{Bk}}^{(2)}$	$COV_{N_{Bk}}^{(3)}$
매립층	0-4	18.0	9	28	0.35	11.59	2.67	23.04%
퇴적층	4-11	19.0	10	32	0.35	13.0	3.52	27.08%
풍화토	11-21	21.0	11	32	0.33	29.33	7.06	24.07%
기반암	21-	26.59	16.59		0.23			

¹⁾N값의 평균, ²⁾N값의 표준편차, ³⁾변동계수, coefficient of variation = σ/μ

표 3. 지반동적물성값 산정

동적물성값	적용식	매립토	퇴적토	풍화토
전단파속도	$V_{sod} = 0.85 \times (80 N^{1/3})$	155.7	159.9	208.9
지반동전단탄성계수	$G_D = \gamma/g \times (\alpha_g V_s)^2 / f_g^2$	15,404	17,151	32,363
지반동변형계수	$E_D = 2(1 + \nu)G_D$	41,590	46,306	86,085
지반고유주기(s)	$T_G = 4 \sum (H_i / V_{sodi})$	0.349		
기반암속도응답 스펙트럼	$S_v = 1.25 T_G / (2\pi) \cdot S_a$	0.380		

4.2 FOSM 방법을 이용한 내진성능평가

표 2에서 제시한 지층별 N값의 평균과 표준편차를 FOSM 방법에 적용하여 지반 변위에 대한 평균과 표준편차를 계산하였다. 표 4는 지표면과 각 지반층의 중심깊이인 심도 0, 2.5, 8, 16 m에서의 평균지반변위와 표준편차, 그리고 변동계수를 보여준다.

응답변위법에 따라 표 4의 지반변위로부터 지진하중을 산정하고, 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 개착터널 박스 구조물의 구조해석을 수행하였다. 이 두 가지 성능수준은 도시철도 내진설계기준(건설교통부, 2005)에서 제시하는, 구조물이 보유해야 할 성능수준으로 각각의 하중조합에 대한 구조물의 성능을 탄성거동과 붕괴방지로 정의하고 있다. 이들 성능수준에 대한 하중조합은 각각 다음의 식 (5), (6)과 같다.

기능수행수준 하중조합 :

$$U = 0.75(1.54D + 1.7L + 1.8H + 1.8E) \quad (5)$$

붕괴방지수준 하중조합 :

$$U = 1.0(D + L + H + E) \quad (6)$$

여기서, D, L, H, E는 각각 고정하중, 활하중, 수압, 지진하중을 나타낸다. 구조해석을 통하여 각 부재에 작용하는 지진하중에 의한 모멘트(M_E)와 하중조합을 고려한 탄성지진모멘트(M_{el})를 계산하였는데, 그 중 가장 큰 모멘트가 발생할 것으로 예상되는 좌·우벽체 하부(단면A와 단면C)와 상부슬래브 좌·우단부(단면B와 단면D)로 구분하여 관찰하였다(그림 6). 이들 단면에 대한 지진하중 단면모멘트와 탄성지진모멘트의 평균과 표준편차, 그리고 변동계수 값을 표 5에 나타내었다. 단, 여기서는 붕괴방지수준에 대한 값들만 표시하였다.

소요모멘트(moment demand)와 공급모멘트(moment capacity)를 비교하기 위해 단면 A, B, C, D에 대한 비선형 단면해

표 4. 심도에 따른 지반변위의 확률분석

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

그림 6. 박스구조물의 주요 단면 위치

표 5. 각 부재단면의 지진모멘트에 대한 확률 특성값

구분		단면A	단면B	단면C	단면D
지진하중 단면모멘트 (M_E)	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
탄성지진모 멘트 (M_{el})	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

석을 수행하였다. 일반적으로 단면해석은 도시철도 개착터널의 설계 및 내진성능평가 시 단면의 항복모멘트와 항복곡률, 그리고 연성도(ductility)를 계산하기 위해 필요하다. 본 연구에서는 상업용 단면해석 프로그램인 UCFyber를 이용하였고, 그림 7은 각 단면의 UCFyber 모델과 모멘트-곡률 곡선을 나타낸다. 여기서, 단면 A와 C, 단면 B와 D는 각각 같은 단면으로 설계되어 있음을 확인할 수 있다. 단면 A와 C, 단면 B와 D의 항복모멘트(M_y)는 각각 1,111 kN-m와 1,450 kN-m로 계산되었다. 단면해석은 구조재료의 물성값이나 단면의 치수 등의 불확실성을 고려하지 않았으므로 소요모멘트와 달리 결정론적인 값으로 계산되었다.

각 단면에 대한 탄성지진모멘트가 정규분포를 갖는다고 가정하면 표 5의 평균과 표준편차로부터 그림 8과 같이 탄성지진모멘트의 확률누적함수(CDF, cumulative distribution function)를 그릴 수 있다. 그림 8에는 각 단면의 공급모멘트를 함께 표시하였는데, 단면 B와 D는 붕괴방지 지진동에 대해 내진성능이 충분히 확보된 것으로 평가된다. 그 이유는 단면의 공급모멘트가 소요모멘트보다 클 확률이 99.99%로 단면이 탄성거동하기 때문이다. 반면에 단면 A와 C는 공급모멘트가 소요모멘트보다 클 확률이 각각 0.0%와 43%로 분석되어, 두 단면은 비탄성거동을 할 확률이 높은 것으로 평가된다. 따라서 추가적으로 단면이 충분한 연성을 확보하고 있는지 여부를 평가해야 한다.

비탄성거동에 대한 연성확보 여부는 “도시철도 시설물내진 설계기준 개정을 위한 기초연구(II)”(한국철도기술연구원, 2010)에서 제시하는 상세평가법에 따라 평가하였다. 이 평가법은 소요응답수정계수(R_{req})의 개념을 이용하여 연성도를 평가하는 방법으로, 각 부재의 소요응답수정계수($R_{req-member}$)는 식 (7)을 이용하여 계산한다.

$$R_{req-member} = \frac{M_{el}}{\phi M_n} \quad (7)$$

여기서, ϕM_n 은 강도감소계수로 1.0을 적용한 각 부재의 설계 휨강도를 나타낸다.

구조계의 소요응답수정계수($R_{req-system}$)은 각 부재의 소요응답수정계수 중 최소값으로 취하는데, 본 예제에서는 $R_{req-system} = 1.03$ 으로 계산되었다. 구조물의 고유주기 $T_G = 0.349$ s 일 때 변위연성도계수(μ)는 식 (8)과 같다.

$$\mu = \frac{R_{req-system}^2 + 1}{2}; T_g < 1.0 \text{ sec} \quad (8)$$

(a) 단면 A와C의 해석모델 ($1.0 \times 0.7m^2$)

(b) 단면 B와D의 해석모델 ($1.0 \times 0.8m^2$)

(c) 단면 A와C 모멘트-곡률 곡선

(d) 단면 B와D 모멘트-곡률 곡선

그림 7. 비선형 단면해석모델과 모멘트-곡률 곡선

(a) 단면 A

(b) 단면 B

(c) 단면 C

(d) 단면 D

그림 8. 부재단면 별 소요모멘트와 공급모멘트의 비교

구조계의 소요 비탄성 변위(u_m)는 식 (9)를 이용하여 계산한다.

$$u_m = \mu \cdot \mu_y \quad (9)$$

여기서, μ_y 는 구조계의 항복 수평변위로, 단면 모멘트-곡률 곡선의 항복모멘트 $M_y = 1,111 \text{ kN-m}$ 에 해당하는 구조물의 수평 변위를 나타내며, 본 예제에서는 $\mu_y = 15.84 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이므로 $u_m = 16.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ 로 계산되었다.

한편, 공급 비탄성변위는 부재의 일정 부분(소성힌지)이 소성변형을 일으키는 것으로 가정하여 계산하는데, 본 예제에서는 소성힌지의 길이가 벽체슬라브 길이의 10%라고 가정하였다. 단면 A와 C의 극한곡률 $\phi_u = 42.5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 과 이중곡률 변형을 고려하면 단면 A와 C를 포함한 부재의 공급비탄성변위를 식 (10)과 (11)에 따라 계산할 수 있다.

$$\theta_p = \int_{L_p} \phi_u \, dx = \phi_u \times L_p \quad (10)$$

$$u_m^l = \theta_p \times (H - L_p/2) \quad (11)$$

이 때, θ_p 는 소성회전각을, L_p 는 소성힌지의 길이를 나타내는데, L_p 의 경우 이중곡률을 고려하여 박스구조물 벽체 높이에서 우각부를 제외한 높이의 5%로 산정하였다. 식 (11)에서 u_m^l 는 구조물의 공급비탄성변위를, H 는 부재의 높이를 나타낸다. 이와 같이 계산된 u_m^l 과 u_m 을 표 6에 정리하였다.

마지막으로, 붕괴방지수준에 대한 내진성능 확보여부를 평가하기 위하여 다음과 같은 식(12)를 검토해야한다.

$$u_m \leq u_m^l \quad (12)$$

표 6의 결과 값들을 식 (12)에 대입하면 결정론적인 관점에서 예제 구조물이 붕괴방지수준에 대해 내진성능을 충분히 확보하고 있다고 할 수 있다. 이를 확률론적인 관점에서 분석하기 위해 FOSM 방법으로 소요 비탄성변위의 평균과 표준편차를 구할 수 있고, 표 7에 이를 정리하였다. 소요 비탄성변위가 정규분포를 갖는다고 가정하면 그림 9와 같은 확률누적함수를 그릴 수 있는데, 이 그림에 표시된 바와 같이 소요 비탄성변위(u_m)가 공급 비탄성변위(u_m^l)보다 작은 확률이 99.99%이므로, 붕괴방지 수준의 지진에 의한 변위성능이 충분히 확보되어 있다고 평가할 수 있다.

표 6. 공급 및 소요 비탄성변위

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

표 7. 소요 비탄성변위의 확률분석

구분	u_m
평균 소요비탄성변위	$16.32 \times 10^{-3} \text{ m}$
표준편차	$2.666 \times 10^{-3} \text{ m}$
COV	16.34%

그림 9. 소요 비탄성변위의 확률누적함수

5. 결 론

본 연구는 불확실한 지반의 동적 물성값이 지중구조물의 내진성능평가에 미치는 영향을 파악하고, 확률적인 방법으로 내진성능평가를 수행하는 절차를 제시하는데 목적이 있다. 여기서는 지중구조물의 내진성능평가에 사용되는 지반의 동적 물성값을 확률변수로 가정하고, 이들 확률변수들이 내진성능평가 절차를 통해 전파되어 최종 계산값이 확률변수로 평가될 수 있도록 FOSM 방법을 이용하였다. 이와 같은 확률적 내진성능평가 절차를 국내 도시철도 개착터널에 적용하여 그 실효성을 검증하고, 구조물의 내진성능 분석방법을 제시하였다. 지중구조물의 내진성능평가에 필요한 지반의 동적 물성값들 중 가장 불확실성이 높은 N값을 대표적인 확률변수로 설정하고 응답변위법에 따라 구조물에 작용하는 붕괴방지수준의 지진하중을 산정한 후 비탄성변위에 대한 내진성능을 평가하였다. 이와 같은 확률적 내진성능평가 절차를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 세 가지 지반에 대한 N값의 변동계수가 23.04%~27.08%인 경우 이로부터 계산된 개착터널 벽체와 슬라브단면의 소요 모멘트는 변동계수가 10.24%~11.09%로 계산되어, 지반 물성값의 불확실한 정도가 구조물의 내진성능평가 시에는 감소하는 것으로 나타났다.
- 붕괴방지 수준의 지진 발생 시 개착터널의 슬래브는 탄성 거동을 하지만, 벽체는 비탄성거동을 할 확률이 43%~99%인 것으로 나타났다. 이에 따른 벽체의 변위연성도 평가결과, 99.99%의 확률로 내진안전성을 확보하고 있는 것으로 분석되었다.

여기서 제시한 결론은 특정 지반조건에 위치한 특정 구조물에 대한 것으로, 일반화시키기엔 한계가 있다. 특히 이 예제에서는 지반의 동적 특성값 중에 N값만을 확률변수로 가정하여 계산하였기 때문에, 전단파속도, 지반동전단탄성계수, 고유주기 등 다른 지반 동적 물성값의 불확실성의 영향을 고려하면 내진성능의 평가결과가 더 불확실하게 계산될 수도 있다. 또한, 다른 물성값들을 동시에 고려하고 물성값들의 상호관계를 알면, 각 특성값들이 각각 어느 정도 내진성능의 불확실성에 영향을 미치는지 등 다양한 연구결과를 도출할 수 있다.

본 연구는 지진재해대책법으로 의무화된 시설물의 내진보강에 필수 절차인 내진성능평가를 보다 현실적이고 합리적인 방법으로 수행할 수 있는 절차를 제시한다. 이 방법론을 적용하면 지중구조물 뿐만 아니라 교량, 공항, 항만시설 등 다양한 지상구조물 등에 대해서도 확률적인 내진성능평가가 가능하고, 이에 따른 합리적인 내진보강이 이루어 질 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0028552).

참고문헌

건설교통부 (1997) 내진설계기준연구(II).
 건설교통부 (2005) 도시철도 내진설계기준.
 박동엽, 박두희, 정찬균, 이홍성 (2009) 국내 확률론적 지진계수 생성, **한국지반공학회논문집**, 제25권, 제10호, pp. 87-97.
 한국시설안전기술공단 (2004) 기존 터널의 내진성능 평가요령.
 한국철도기술연구원 (2010) 도시철도 시설물내진설계기준(안) 개정을 위한 기초연구(II).

Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (1975) *Probability Concepts Engineering Planning and Design*, Wiley and Sons.
 Brandenburg, S., Bellana, N. and Shantz, T. (2010) Shear wave velocity as a statistical function of standard penetration test resistance and vertical effective stress at Caltrans bridge site, *PEER Report 2010/02*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, March 2010.
 Lee, T.-H. and Mosalam, K.M. (2005) Seismic demand sensitivity of a reinforced concrete shear-wall building using FOSM method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 14, pp. 1719-1736.
 Melchers, R.E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*, John Wiley and Sons.
 Phoon, K.-K. and Kulhawy, F.H. (1999) Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 612-624.
 RTRI (1999) 철도구조물등설계표준 및 동해설 내진설계 (일본어).
 Song, K.-I, Cho, G.-C. and Lee, S.-W. (2011) Effect of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 26, No. 3, pp. 413-426.

© 논문접수일 : 2012년 05월 04일
 © 심사의뢰일 : 2012년 05월 08일
 © 심사완료일 : 2012년 05월 14일