KSCE magazine

지반 및 지반구조물 내진설계 현황 및 개선방향

Current Practice and Recommendations for Improvements of Seismic Design of Free-field Site and Soil Structures

박두희 | Duhee Park | 한양대학교 건설환경공학과 교수, 우리 학회 이사
조성민 | Sungmin Cho | 우리 학회 이사
이진선 | Jinsun Lee | 원광대학교 토목환경공학과 교수, 한국지반공학회 지반진동위원회 위원장
유제남 | Jae Nam Yoo | ㈜유신 부사장

1. 서론

시설물의 내진설계는 설계지반운동 산정과 액상화 평가로부터 시작되며 이를 기초로 다양한 시설물의 내진성능평가를 수행하게 된다. 본 원고에서는 내진설계의 근간이 되는 지반조사와 설계지반운동 산정 방법, 그리고 대표 지반구조물인 지하구조물, 지중구조물(터널과 공동구 포함), 흙막이 구조물 (옹벽과 사면) 등의 시설물에 대한 내진성능평가 방법과 관련 설계기준들을 소개하였다. 본 고에서는 특히 설계기준별 주요 내용과 더불어서 잠재적 기술적인 문제점을 중점적으로 기술하였다. 나아가 국내 설계기준과 국외 기준간의 상호 비교·분석을 통하여 설계기준과 내진성능평가 실무의 개선 방향을 제시하였다.

2. 지반조사

건설공사에 필수적인 지반조사에 대한 기준은 건설기준코드 중 공통편에 속하는 '지반설계기준(KDS 11 00 00)'의 구성항목인 '지반조사(KDS 11 10 10)'에 규정되어 있다. 이는 기존의 구조물기초 설계기준, 건축구조기준, 건설공사 비탈면 설계기준을 중심으로 공동구 설계기준, 도로교설계기준, 댐 설계기준, 터널 설계기준, 철도 설계기준, 항만 및 어항 설계기준, 조경 설계기준 등의 지반조사에 해당되는 부분을 통합 정비하여 2016년에 제정한 것이다. 2018년 7월에 개정된 이 기준은 도로, 철도, 댐, 하천, 교량, 터널, 방파제, 호안, 원자력 등 토목구조물, 농업생산기반시설, 건축구조물 및 공작물 등과 그 기능을 보조하는 부대시설 등의 설계 및 시공에 필요한 지반정보 획득에 적용하며, 지반조사 절차를 예비조사, 본조사,

추가조사로 구분하여 시추, 현장시험, 시료채취, 실내시험, 물리탐사의 내용을 규정하고 있다. 이 기준에서는 내진설계를 위한 지반의 대표적 동적 물성치로 전단파속도, 전단탄성계수, 감쇠비 등을 명시하고, 대상 부지의 지진응답특성 평가를 위해 시추조사, 물리탐사, 검층 및 실내시험을 시행하여 지층별 동적물성을 정량화하도록 하고 있다.

그리고, 지진 · 화산재해대책법에 따라 2018년 12월에 제정된 공통편 건설기준코드인 '내진설계 일반(KDS 17 10 00)'에서는 내진설계를 위한 지반조사에 대해서 다음과 같이 더욱 구체적으로 규정하고 있는데, 설계지반운동 결정과 액상화 평가를 위하여 지반의 층상구조와 물리적 특성, 기반암 깊이, 전단파속도, 전단탄성계수 등을 조사하도록 하고 있다. 이 중 지반조사 자체에 대한 부분은 향후 'KDS 11 10 10(지반조사)'편으로 옮겨 기술하는 방안을 검토할 필요가 있다.

한편, 건설기준코드 중 사업분야편에 속하는 '건축설계기준(KDS 41 00 00)'의 구성항목인 '건축구조기준(KDS 41 10 00)'은 그 총칙(KDS 41 10 05)에서 참조기준으로 '지반설계기준(KDS 11 00 00)'을 명시하고 있으나, 기존의 건축 구조물 및 공작물 등의 구조설계에 해당하는 부분을 통합 정비하여 2019년 3월에 새로 제정한 '건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)'에서는 '4.1.2 지반조사' 절에서 '대규모 건물, 경사지에 건설되는 건물, 또는 토사지반의 분포가 일정하지 않은 지반에 건설되는 건물에서 지반조사의 위치는 최소한 3곳 이상을 선정하고 지반조사를 수행한다'라고만 간략하게 기술하고 있다. 또한 건축구조기준 중 하나인 '건축물 기초구조 설계기준(KDS 41 20 00)'에서는 '2. 조사 및 계획' 장에서 예비조사와 본조사로 구분한 지반조사에 대하여 평판재하시험과 말뚝재하시험 외에는 일반적인 항목과 종류에 대하여 매우 개략적이며 정성적으로만 기술하고 있다. 민간발주가 대부분인 건축 현장에서 적정하고 충분한 지반조사가 이루어지고 있지 못하다는 지적이 많은 현실을 고려할 때, 구체성이 결여된 기준에 따른 우려가 제기된다. 시추조사를 예로 들면, 'KDS 11 10 10(지반조사)' 기준에서는 시추공 규격으로 NX(내경 76mm)를 사용하고, 풍화대나 파쇄대 등에서는 삼중 코아배럴 등을 사용하게 하고 있으나, 많은 건축 현장에서는 이보다 공경이 작은 BX(내경 60mm)를 사용하고, 코어 회수도 부실한 사례가 적지 않다. 소형 장비에 의한 BX 시추로는 지반 시료 채취가 어렵고, 지층 구분 정도만 가능하다. 다양한 이유로 최소한의 조사인 시추조사마저 생략하고 인근 자료를 활용하는 경우도 있다. 건축 관련 기준들에서 'KDS 11 10 10'이나 'KDS 17 10 00' 등 현행 지반조사 기준 준용의 명확화 등 보완이 매우 시급하다.

이러한 점은 건설기준 외의 내진설계 기준들에서는 더 심각한 데, '학교시설 내진설계기준(교육부)'의 경우 '5.2 지반조사' 절에서 시추조사, 탄성파 탐사, 실내시험, 시험굴 조사, 평판재하시험 항목만을 열거하는 데에 그치고 있다. 그 하위 규정인 '학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼'은 비교적 구체적인 내용들을 담고 있으나, 시추조사의 최소수량을 특등급 구조물은 2개소, 그 외에는 1개소로 정하여 과소하다는 지적을 받고 있다. 이 매뉴얼에서는 그마저도 '조사가 여의치 않은 경우에 한하여 기존자료를 이용'할 수 있게 하여 부실한 지반조사의 명분을 제공할 우려가 있다.

지반조사는 이러한 기준들 외에도 실제 성과의 신뢰성을 확보하기 위한 절차나 조치가 중요한데, 실제 현장에서는 잘 지켜지지 않는 경우가 드물지 않다. 이를테면, 지반계수 분류에 필요한 지반의 전단파속도(Vs)를 구했다 하더라도 다운홀시험 등과 같은 탄성파시험 자체가 부실하게 행해져 그 값을 신뢰할 수 없는 경우와 앞서 언급한 시추공의 규격 등에서 비롯된 부실한 시추조사 등이 대표적인 사례이다. 앞으로 Peer Review 절차를 의무화하는 등 지반조사 결과를 엄격하게 검수하기 위한 체계화된 프로세스를 시급하게 도입해야 할 것으로 판단된다.

3. 설계지반운동 산정

설계지반운동은 구조물 건설 이전 부지 정지작업이 완료된 지면에서의 지반운동으로 정의된다. 설계지반운동은 내진설계의 가장 기초 정보인 지진 요구수준(Demand)를 나타내며 구조물에 작용하는 지진하중을 산정하거나 액상화 발생여부를 평가하는 데 사용된다. 구조물의 종류와 평가 목적에 따라 지표면 또는 기초저면에서의 가속도 시간이력을 산정해야 하는 경우가 있으며 지표면의 가속도스펙트럼만이 필요한 경우도 있다. 지표면의 가속도스펙트럼을 산정하는 경우, '내진설계 일반(KDS 17 10 00)'에 따라 국가지진위험지도 또는 지진구역계수(Z)와 위험도계수(I) 곱으로부터 유효수평지반가속도(S)를 결정한 후 여기에 지반증폭계수(와)를 곱하여 표준설계가속도스펙트럼을 산정할 수 있다. 이외에 암반 노두(등급) 스펙트럼에 부합되는 시간이력을 생성한 후 이를 입력지반운동으로 사용하여 지반(지진, 부지)응답해석(Site response analysis)를 수행해서 결정할 수도 있다. 국외의 경우 지반응답해석을 수행하여 설계지반운동과 설계스펙트럼을 산정하는 것이 일반적인 절차임에 반해 국내에서는 표준설계스펙트럼이 대부분 사용되고 있다. '건축설계기준(KDS 41 00 00)'에는 지반응답해석을 수행할 수 있다고 제시되었지만 적용방법과 범위에 대한 설명이 전무하다. 'KDS 17 10 00'에는 기반암에 대해 작성된 시간이력을 사용하여 지반응답해석을 통해 결정할 수 있다고만 제시되었지만 마찬가지로 상세한 설명은 기술되지 않았다. 본 원고에서는 설계지반운동 산정 현황의 문제점을 정리하고 이의 개선 방향을 제시하였다.

1) 표준설계가속도스펙트럼

'KDS 17 10 00'에 제시된 스펙트럼은 유효수평지반가속도(S)만이 확률론적인 재해분석을 통하여 산정되었으며 이를 제외한 스펙트럴 가속도는 추정된 값이므로 대표성이 있다고 볼 수 없다. 국외에서는 등재해스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum), Conditional Mean Spectrum 등의 진보된 스펙트럼이 사용되고 있다. 이들은 최대지반가속도(PGA)에 추가적으로 다양한 주기에서의 스펙트럴 가속도를 확률론적 재해분석을 통하여 계산하여 결정된 설계스펙트럼이다. 국내 내진설계기준에도 유효수평지반가속도(S)와 더불어서 최소한 0.01s, 0.2s, 1.0s 스펙트럴 가속도를 제시하여야 한다.

2) 지반응답해석

지반응답해석은 국지적인 지반조건과 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 수행되며 부지 고유의 지반증폭 특성을 정밀하게 예측할 수 있으므로 국내외에서 모두 널리 수행된다. 지반응답해석에서 가장 중요한 입력변수는 가속도시간이력이다. 액상화 평가 및 지반구조물 내진설계를 위하여 주로 사용되는 Ofunato 및 Hachinohe 지진파는 모두 토층 지표면에서 계측된 기록으로 표준스펙트럼과도 맞지 않으며 이를 암반에 적용할 가속도시간이력으로 사용하는 것은 적절하지 않다. 최근 들어 국외의 관행을 따라서 스펙트럼 매칭을 적용해서 계측기록을 표준스펙트럼에 맞추는 절차가 도입되었다. 시간영역에서 수행되는 스펙트럼 매칭은 원 지진기록의 주파수 특성을 잘 보존하기에 입력 가속도시간이력 산정 시 권장되는 방법이지만 부지 인근의 기록을 활용한다는 의미 없는 목적에 의거해서 부지에서 가장 가까운 위치에서 2016 경주 또는 2017 포항 지진 시 계측된 가속도시간이력을 표준스펙트럼에 매칭하는 오류를 범하기도 한다. 우리나라 설계지진규모가 6.5인 반면 경주와 포항 지진의 지진규모는 5.5 미만으로 지진강도가 현저하게 작으며 주파수 특성이 상이하므로 이를 상향조정해서 사용하는 것은 적절하지 않다.

국내에서는 주파수 영역 해석 방법 중에서 지반의 비선형을 간접적으로 모사하지만 본질적으로 선형해석방법인 등가선형해석방법이 대부분 사용되는 반면 국외에서는 등가선형해석보다는 지반의 비선형성을 보다 정확하게 모사할 수 있는 비선형해석방법이 주로 수행되고 있다. 최근 들어 사용자 편리성이 크게 개선된 비선형 해석 프로그램들이 개발되어 이들의 실무 적용이 용이하게 되었으며 더 이상 등가선형해석을 수행하는 의미가 사라졌다. 최근 들어 국외에서는 과잉간극수압의 영향을 모델링하는 유효응력해석법까지도 내진설계에 널리 사용되고 있다. 국내에서도 전세계적인 트렌드에 부합되는 전응력 및 유효응력 비선형 해석이 주요 해석 방법으로 사용되어야 할 것 이다. 또한 지반 물성의 불확실성과 임의성을 고려해서 부지 고유의 동적 지반 물성을 산정하는 가이드라인이 제시되어야 하며 이를 실무에서 해석 및 설계에 반영해야 한다.
위와 같이 지반응답해석의 수행 및 해석결과 분석에는 지진공학과 지반공학 분야 모두에서 특화된 기술이 필요하지만 등가선형해석의 해석적 편리성과 해석 방법 및 입력지진파/동적 물성의 적절성을 종합적으로 평가하는 Peer review 절차가 엄격하게 작동되지 않아 지반응답해석 관련 전문지식이 없는 비전공자들이 명확한 가이드라인 없이 해석을 수행하고 있는 상황이다. 추후 국제적 기준에 맞는 해석 가이드라인이 시급히 제시되어야 할 것이며 Peer Review 시스템의 구축이 필요하다고 판단된다.

4. 지중구조물 내진설계

지중구조물은 터널, 공동구, 지하차도 등 지반에 묻힌 구조물을 나타낸다. 지중구조물은 지상 구조물과 다르게 지반과 구조물의 상호작용을 고려해서 내진성능을 평가해야 한다. 관련된 설계기준은 '터널 내진설계(KDS 27 17 00)', '공동구(KDS 11 44 00)', 도시철도 내진설계 기준(2017) 등이다. 지중구조물 내진성능평가법은 응답변위법, 동적해석법, 유사정적해석법 3가지이다. 유사정적해석법은 옹벽형식의 터널 갱구부 구조물에만 국부적으로 적용한다. 지중구조물의 평가에는 지반에서 발생하는 자유장 변위를 지중구조물 주변을 둘러싸고 있는 지반에 적용하여 지반–구조물 상호작용을 고려해서 구조물에 발생하는 상대변위를 산정하는 응답변위법이 가장 널리 사용된다. 이를 위해서 지반의 비선형성을 고려한 지반변위, 지반–구조물의 상대강성 및 상대변위 예측 등이 이루어져야 한다. 특히 지반의 거동을 정확하게 예측해야 하기에 지반공학자의 설계 참여가 필수적이다. 동적해석법도 마찬가지로 지반의 비선형과 지반–구조물 경계요소를 포함한 상호작용이 해석의 중요한 요소이므로 지반공학 전문가의 역할이 중요하다.
'터널 내진설계(KDS 27 17 00)'에는 응답변위법과 동적해석법 수행 방법에 대한 상세는 기술되지 않았으며 무엇보다 성능목표수준 만족여부를 평가하기 위한 정량화된 방법이 제시되지 않았기에 실무에서 이를 평가하기 애매한 부분이 있다. '공동구 KDS 11 44 00'과 '도시철도 내진설계 기준'에는 응답변위법의 개념도와 지반변위를 산정하여 측벽토압과 벽체와 지반 경계에 작용하는 전단력을 적용하는 방법까지 상세하게 제시되었다. 지반변위는 기준에 제시된 대로 설계스펙트럼으로부터 산정할 수도 있으며 지반응답해석으로부터 부지 고유의 응답을 계산할 수도 있다. 지반응답해석을 수행하는 경우 설계기준에 기술된 성능수준에 따라 표준관입시험 N치로부터 지반반력계수를 추정할 필요가 없어지며 보다 정확하게 지반의 비선형성을 고려한 산정이 가능하다. 'KDS 11 44 00'에는 터널 기준 대비 상대적으로 상세한 설계거동한계가 제시되었다. 기능수행수준 지진에 대해서는 허용변위를 초과하는 변위와 편토압에 의한 시설물의 절대위치 변화는 허용되지 않으며 붕괴방지수준의 경우 구조물 내부의 피해와 지반침하에 의한 주변시설물의 붕괴나 과도한 침하가 허용되지 않는다고 제시되었다. 하지만 이도 정성적인 한계로서 터널과 마찬가지로 이를 정량적으로 평가하기 어려운 상황이다.

설계한계에 대해서 참고할 국외 기준으로는 NCHRP Report 611(Anderson et al., 2009)와 LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications(AASHTO, 2017)을 꼽을 수 있다. 국외에서는 지반을 스프링으로 모사하는 대신 자유장 운동과 지반-지중구조물 상대 강성을 나타내는 유연도비(Flexibility ratio)를 사용하여 지중구조물의 변형을 예측하는 방법이 널리 사용되고 있다(그림 1). 이 방법은 동적해석법과도 비교되었으며 정확도가 우수한 것으로 입증되었다.

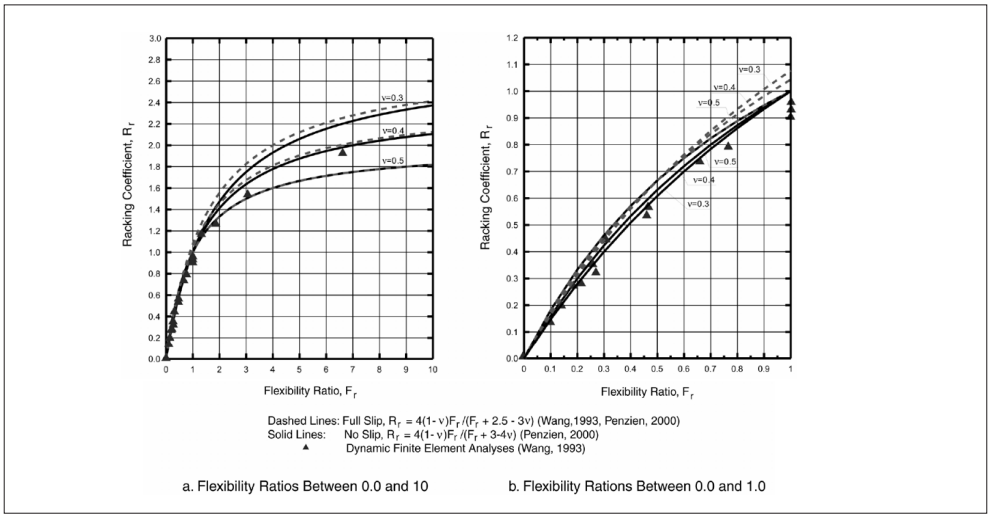

그림 1. 유연도비와 Racking ratio 관계식(Anderson et al., 2009)

해석방법에 관한 상세 내용은 소개되지 않았지만 중요한 설계거동한계가 표 1과 같이 터널 형식(굴착 또는 개착) 그리고 성능수준에 따라 허용되는 압축변형률로 제시되었다. 이와는 다르지만 관련된 연구에서는 설계거동한계를 M/My(M=탄성해석으로 계산된 모멘트, My는 항복모멘트)로 제시하였다(Argyroudis and Pitilakis, 2012; Lee et al., 2016)다. M/My는 성능목표수준에 따라 1.0 ~ 2.0 범위로 제안되었다. 추후 위와 같은 방법을 종합적으로 평가하여 국내설계기준에서도 정량화된 설계거동한계를 제시할 필요가 있다.

종합하면 지중구조물의 지진해석 및 내진설계를 수행하기 위해서는 지반의 비선형성과 지반-구조물 상호작용을 정확하게 모사해야 하며 지반공학 전문가의 주도적인 참여가 필수적이다. 나아가 설계기준의 업그레이드를 위해서는 지속적인 연구와 토의를 통하여 목표성능수준별 정량적 설계거동한계까지 도출되어야 할 것이다.

5. 지하구조물 내진설계

본 원고에서 지하구조물은 상부가 지표면에 노출된 경우나 토피고가 매우 낮은 구조물을 나타내며 이에 해당하는 구조물로는 지하역사나 지하주차장, 건축물과 연결된 지하구조물 등이 있다. 건축물과 연결된 지하구조물은 건축공학자가 설계하고 있으며 지하역사 등 철도부속구조물은 토목 전공자가 설계에 참여하고 있다. '도시철도 내진설계 기준(2017)'에서는 지하구조물은 지중구조물과 마찬가지로 응답변위법 또는 시간이력해석법으로 평가할 수 있다고 제시되었다. 지하구조물도 지중구조물과 마찬가지로 지반-구조물 상호작용이 작동하지만 성격이 상이한 부분이 있으므로 응답변위법의 적용 가능성은 추후

Design Earthquake	Mined/Bored Tunnel Liner		Cut-and-Cover Structure Linings	
	Concrete	Steel	Concrete	Steel
FEE	0.002	0.002	0.003	0.002
SEE	0.0033	0.02	0.006	0.02

표 1. AASHTO(2017)에 제시된 터널 성능수준별 한계변형률

연구에서 평가되어야 할 것이다. '도시철도 내진설계 기준(2017)'에는 지하구조물 내진등급이 제시된 반면 '건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)'에는 지하구조물은 지상층의 중요도를 따르며 지하층의 용도에 따라 중요도계수를 다르게 적용할 수 있다고 기술되었지만 상세한 방법이 제시되지 않았다.
'건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)'에서는 지표면으로부터 기반암까지 토사의 깊이가 15 m 이내이고, 지표면으로부터 지하구조물 기초의 저면까지의 깊이가 토사 깊이의 2/3 이하인 경우 지진토압은 등가정적법을 적용하여 구할 수 있다고 제시하고 있다. 등가정적법에 의한 지진토압은 지표면에서 지하구조물 저면까지 깊이가 증가함에 따라 선형으로 증가하는 토압분포를 가지며 식 (1)~식 (3)으로 구한다.

$$P_{ae} = \frac{1}{2}\gamma H^2 K^2 K_{ae} \qquad (1)$$

$$K_{ae} = 0.75 \text{ x } \mathrm{EPGA}_{ff} \qquad (2)$$

$$\mathrm{EPGA}_{ff} = S \text{ x } F_a \text{ x } \frac{1}{2} \qquad (3)$$

여기서, P_{ae} : 등가정적법에 의한 지하구조물의 지하외벽에 작용하는 지진토압의 합력
γ : 지하외벽과 접하는 토사지반의 평균 단위중량
H : 지표면에서 지하외벽의 저면까지의 깊이
K_{ae} : 지진토압계수
EPGA_{ff} : 해당지반 지표면에서의 최대유효지반가속도
S : 유효지반가속도
F_a : 단주기 지반증폭계수

최대가속도의 깊이에 따른 감소를 고려하기 위하여 0.75배로 조정된다. 유의해야 할 것은 위는 Yielding wall에 대해서 1920년대 일본에서 실험결과로 제안된 Mononobe-Okabe(이하 M-O, Okabe, 1926) 식이라는 점이다.

지하구조물 벽체에 작용하는 지진토압에 관한 연구는 아직 진행 중이며 연구자 별로 상반되는 결과를 보고하고 있다. 지하구조물은 변위 발생여부에 따라 Yielding wall과 Non-yielding wall로 분류된다. NEHRP Recommended Seismic Provisions(FEMA, 2009)에서는 Yielding wall에 대해서는 '건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)'과 동일한 방법으로 토압을 계산할 것을 제안하였다. 등가하중 작용점은 Seed and Whitman(1970)의 연구결과를 토대로 0.6H로 토압분포는 역삼각형으로 가정하였다. 단, 깊이가 15 feet을 초과하는 벽체에 대해서는 정밀해석을 수행할 것을 권장하였다. Non-yielding wall에 대해서는 Wood(1973)의 방법 사용을 제안하였다. Wood(1973)은 균질 지반에 위치한 U자형 강체

벽체에 작용하는 토압을 산정하는 해석해를 제안하였다. 이때 U자형 벽체는 단단한 지반위에 위치하여 Rocking이 허용되지 않는다. Wood(1973)의 식은 구조물의 폭(L)와 높이(H)의 비인 L/H에 대해서 제시되었다(그림 2). 이는 L/H가 없으며 H만을 정의할 수 있는 Yielding wall과 다른 부분이다. 단점으로는 지반은 탄성 거동하며 벽체는 강체로 가정되었다. 위와 같은 제한 사항을 가지고 있지만 위의 식은 Yielding wall 토압식에 비해서는 Non-yielding wall에 적합한 것으로 알려져 있어 사용을 권장하고 있다. 참고로 Non-yielding wall에 작용하는 토압은 Yielding wall에 비하여 높으며 그 차이는 L/H와 지반 최대가속도에 따라 결정된다.

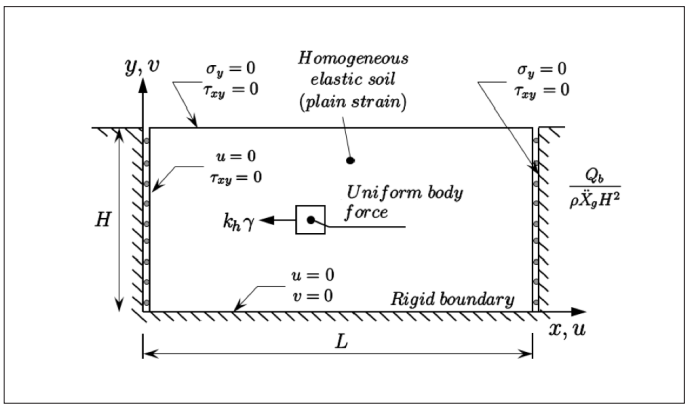

그림 2. Wood(1973)의 Non-yielding wall 토압 산정 개념도

미국에서 고층 건물 설계에 사용되는 설계지침서 Tall Building Initiative(TBI) 2017(PEER, 2017)에는 지하구조물에 작용하는 토압을 산정하는 다양한 연구가 소개되었다. Yielding wall의 경우 M-O 또는 이와 유사한 방법들은 Al Atik and Sitar(2010)과 Mikola et al.(2016) 등의 예를 들어 보수적이므로 적절하지 않다고 보고하였다. 반면 기초 저면이 단단한 지반일 경우에는 Ostadan(2005)와 Vrettos et al.(2016) 등의 예를 들어 Yielding wall에 적용되는 토압식은 보수적이지 않으므로 권장되지 않으며 하한식으로 고려해야 하며 Non-yielding wall의 토압식을 상한식으로 사용할 것을 권장하였다. 단, Ostadan(2005)와 Vrettos et al.(2016)의 방법은 벽체는 강체로 모사하되 지하구조물의 형상비(L/H)를 고려하지 않았으므로 적절한 식이라고 볼 수 없다. 여기서 TBI 2017에서 Yielding wall에 대한 해를 지하구조물 벽체에 작용하는 토압 산정에 권장하지 않는다고 강조한 것을 주목해야 한다.

종합하면, 지하구조물을 지반-구조물 상호작용을 고려하는 응답변위법으로 평가하는 것은 적절하다고 평가된다. 지진토압으로 구조물의 안정성을 평가하는 등가정적해석법의 경우, 지진토압으로 Yielding wall의 해를 사용하는 것은 적절하지 않으며 Non-yielding wall의 해를 사용해야 한다. Non-yielding wall의 토압으로는 Wood(1973)의 해가 제시되었지만 이는 탄성지반 강체벽체에만 적용가능하며 Ostadan(2005)와 Vrettos et al.(2016)는 벽체가 바닥과 고정된 강체에 대해서 제시되었으며 지하구조물의 형상비(L/H)를 고려할 수 없으므로 적절하지 않다. 추후 지하구조물의 형상(L/H), 지하벽체의 유연도비와 지반의 비선형성을 고려한 지진토압 산정에 관한 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 상부 구조물과 연결된 지하구조물의 경우 상부 구조물의 관성력 상호작용을 고려해서 토압을 산정하는 방법도 연구되어야 한다. 위와 같은 어려움을 인지하여 TBI 2017에서는 지하구조물의 내진설계는 구조기술사와 토질 및 기초 기술사가 협업할 것을 권장하고 있다. 아직 명확한 설계지침이 도출되지 않은 현 상황에서는 시간이력해석이 좋은 대안이 될 수 있다.

6. 흙막이 구조물 내진설계

1) 옹벽의 내진설계

옹벽 내진설계 방법은 '콘크리트 옹벽 설계기준(KDS 11 80 05)'에 제시되었다. 지진 시 지진하중에 대한 옹벽의 활동, 전도, 지지력, 전체 안정성에 대한 안전율을 유사정적해석기법으로 계산하여 안정성을 평가한다. 'KDS 11 80 05'에는 각각에 대한 기준 안전율이 제시되었다. 기준 안전율은 붕괴방지수준 지진에 대한 값이라고 추정되나 성능목표수준에 관한 설명이 부재하다. 현업에서는 지진하중은 M-O의 동토압식으로 계산한다. M-O 방법에서는 지진하중은 옹벽에 작용하는 뒷채움 토사의 관성력을 나타내며 이는 지진계수(Seismic Coefficient, kh)로 나타낸다. 이때, kh는 단순히 옹벽에 작용하는 최대지반가속도가 아닌 옹벽과 지반의 상대변위, 옹벽이 위치하는 지반의 부지응답효과 등이 종합적으로 고려되어 그 크기와 작용점의 위치가 결정되어야 하는 중요한 가장 중요한 설계 변수라 할 수 있다. 하지만 'KDS 11 80 05'에는 최대지반가속도 및 kh 산정 방법, 그리고 지진토압 산정식마저 제시되지 않았다. 실무에서는 행정구역과 지반증폭계수를 적용하여 계산된 지표면 최대지반가속도가 kh 산정에 일반적으로 사용된다. 반면, '해양수산부 내진설계기준 및 해설 KDS 64 17 00' 기준에는 중력식 안벽의 내진설계를 위한 kh 산정 시, 지반응답해석으로부터 계산된 옹벽 깊이에 대해서 계산된 최대지반가속도 평균을 적용하도록 제시되었다. 지하구조물 내진설계에서 기술한 바와 같이 M-O 지진토압은 매우 보수적이므로 지표면 최대지반가속도를 사용할 경우, 지진하중을 과대예측하게 된다.
위와 같이 kh 및 지진 토압 산정에 대한 불확실성이 존재하며 옹벽 내진설계를 위한 합리적인 kh 및 지진토압 산정 가이드라인이 제시되어야 할 것이다. 옹벽 내진설계에는 지반공학자가 참여하여 지반물성과 지반증폭의 불확실성을 고려하여 합리적으로 지진하중을 결정하는 것이 필요하다고 판단된다.

2) 사면의 내진설계

사면의 내진설계방법은 '비탈면 내진설계기준(KDS 11 90 00)'과 '기초 내진설계기준(KDS 11 50 25)'에 제시되었다. 비탈면 내진설계기준에 제시된 사면의 성능수준은 붕괴방지수준이다. 사면의 안정성 평가방법은 유사정적해석법, Newmark(변위)법, 그리고 동적해석법이다.
옹벽의 내진설계와 유사하게, 사면의 내진설계 역시 유사정적해석(Pseudo static analysis) 기법이 가장 널리 사용된다. 지진하중은 지진 시 활동이 예상되는 원호활동블럭에 작용하는 토사의 수평방향 관성력이며 이는 지진계수(Seismic Coefficient, kh)로 표현된다. 하지만, 'KDS 11 90 00'에는 kh를 산정하는 방법이 제시되지 않았다. 사면은 수평지반과는 상이하므로 옹벽과 같이 행정구역과 지반증폭계수를 적용하여 최대지반가속도를 산정할 수 없다. 최대지반가속도가 결정되어도 이 값을 온전하게 적용시키는 것은 문제가 있다. Hynes-Griffin and Franklin(1984)는 최대지반가속도의 1/2을 적용할 것을 제안하였으며 국내 기준 및 지침서 중에서는 유일하게 토목구조물 내진설계지침(대한주택공사, 1999)에서 이를 사용할 것을 제시하고 있다. 'KDS 11 90 00'에는 명시되지 않았지만 대부분 실무에서 최대지반가속도에 1/2을 적용하여 사면의 안정성을 평가한다. 단, 최대지반가속도 산정방법은 아직 통일되지 않았다. Saygili and Rathje(2008) 등의 연구에서 사면은 강체가 아니므로 공간적으로 변이하는 지진파 특성으로 인하여 실제 발생하는 관성력은 최대지반가속도 대비 크게 작은 것으로 보고되었다. 이를 고려하기 위하여 활동면에 작용하는 전단응력을 모두 적분하여 안전율을 계산해야 한다. 이와 같이 사면 내진설계를 위한 kh 산정은 설계기준만으로는 불가하며 사면에 발생하는 가속도 증폭 또는 감폭 현상에 대한 지반공학 기술자의 평가를 통하여 이루어져야 한다.

사면이 허용 안전율을 만족하지 못하는 경우 Newmark 변위법이나 동적해석법을 사용하여 안정성을 평가할 수 있다. 특히 최근 적용되고 있는 성능기반 내진설계에서는 지진 후 신뢰성 있는 사면의 영구변위 예측결과를 필요사항으로 규정하고 있으며 이는 Newmark의 활동블록법 또는 변위법(Newmark, 1965)으로 산정할 수 있다. 하지만 Newmark 법은 개념적 의미만을 나타내며 이를 기반으로 하여 제시된 변위식은 매우 다양하다. 국내에서는 Ambraseys and Menu(1988)식이 널리 사용되는 반면 국외에서는 Jibson(2007)과 Bray and Travasarou(2007) 등의 식들이 보다 빈번하게 사용되고 있다. 하지만 설계기준에는 이와 같은 내용이 소개되지 않아 많은 기술자들은 Ambraseys and Menu(1988)의 식을 기준값으로 사용하고 있다. 설계기준의 또 다른 문제는 허용변위이다. 허용변위는 사면고의 1%로 정의되어 있으나 이는 국제적으로 통용되지 않은 값이며 이는 특히 절토사면에는 적용 가능하지 않은 기준이다. 추후 보다 합리적인 허용변위 기준이 제시되어야 할 것이다.
설계기준에는 비선형 시간이력해석의 수행을 허용하지만 이의 결과를 어떻게 분석하여 사면의 안정성을 평가할 수 있는 지에 대한 설명이 부재하다. 추가로, 댐, 제방, 저수지 등 일부 포화된 성토사면의 경우 지진 시 발생하는 반복전단변형에 의한 간극수압의 변화양상 또한 지진 시 사면안정해석에 반영되어야 하며, 암반사면의 경우 페이스 맵핑을 통한 절리면의 구조와 충진물의 특성 등에 대한 이해가 사면안정해석에 고려되어야 하지만 이에 대한 가이드라인도 현재 전무한 상황이다.
우리나라는 산지가 대부분인 지형 특성에 따라 대규모 토목공사, 단지개발 및 건축공사 시 많은 경우에서 절개면(사면)이 발생되고 있다. 특히 대부분의 건축사업 과정에서 형성되는 사면은 전체공사의 일부 단순 공종으로 간주되어 내진설계의 중요성이 간과되고 있는 현실이다. 지반공학 기술자의 의견이 배제되어 설계·시공된 사면의 붕괴는 지진 시 연관된 2차 피해를 야기할 수 있음에 따라, 지반공학 기술자의 참여가 중요하다고 판단된다.

7. 결론

본 고에서는 지반조사, 설계지반운동 산정과 대표 지반구조물인 지하구조물, 지중구조물, 흙막이 구조물의 내진성능평가 방법과 관련 설계기준을 소개하였으며 국내 설계기준과 국외 기준간의 상호 비교·분석을 통하여 내진설계 현황의 문제점과 개선 방향을 제시하였다. 본 원고에서 제시된 결론은 아래에 정리하였다.

- 건축 현장에서 적정하고 충분한 지반조사가 이루어지고 있지 못하는 이유는 건축 관련 기준들에서 지반조사에 관한 내용이 포함되었지만 구체성이 결여되었기 때문이라는 지적이 제기되고 있다. 건축 관련 기준들에서 'KDS 11 10 10'이나 'KDS 17 10 00' 등 현행 지반조사 기준을 인용하여 지반조사 과정을 명확화하는 보완 작업이 시급하다.

- 유효지반가속도만을 토대로 도출된 표준설계스펙트럼은 지진재해분석을 통하여 다양한 주기의 스펙트럴 가속도에 대한 결과를 반영하여 새롭게 계산되어야 할 것이다.

- 지반응답해석은 지진공학뿐만 아니라 지반공학 분야의 특화된 기술을 요하지만 현재는 비전문가가 명확한 가이드라인 없이 해석을 수행하고 있으며 Peer Review 절차도 엄격하게 작동되지 않고 있다. 추후 지반응답해석 수행 절차 상세 가이드라인이 제시되어야 하며 전문가만이 해석을 수행하도록 법제화하는 것이 필요할 것이다.

- 지중구조물은 설계방법론 자체는 잘 정립되었으나 지반반력계수와 동적지반물성을 산정하는 방법론이 개선되어야 하며 성능목표수준별 설계거동한계가 제시되어야 하는 것으로 판단된다.

- 지하구조물의 내진설계방법론이 아직 명확하게 규명되지 않았으며 국외 설계기준에도 다양한 참고문헌을 소개하는 수준에 머무르고 있다. 하지만 '건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)'에 제시된 지진토압 산정방법은 Yielding wall에만 적용되는 내용으로 적절하지 않은 것으로 조사되었으며 Non-yielding wall의 식으로 대체되어야 할 것으로 판단된다.

- 흙막이 구조물인 옹벽과 사면은 최대지반가속도에 대한 정의와 산정방법에 대한 명확한 가이드라인이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

- 검토 결과 지반과 지반구조물의 내진설계기술의 고도화를 위하여 앞으로 전문가들의 지속적인 연구와 논의를 통하여 설계기준과 지침서의 업그레이드가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 지반조사부터 지반공학자가 참여하여 지반과 지진의 불확실성을 합리적이며 체계적으로 반영하는 시스템적 접근방법을 확립해야 하며 조사 및 해석/설계 결과를 검증할 엄격한 Peer Review 절차의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

WRITER INTRODUCTION

박두희 교수는 U of Illinois에서 비선형 지반응답해석과 확률론적 지진재해분석으로 박사학위를 취득한 후 2005년부터 한양대학교 건설환경공학과 교수로 재직하고 있다. 주요 관심 연구 분야는 지진재해분석, 지반응답해석, 지반구조물 내진설계 및 해석 기술 개발, 해양구조물 설계, 발파 엔지니어링 등이며, 현재 우리학회에서 이사를 맡고 있다.

dpark@hanyang.ac.kr

조성민 박사는 서울대학교 토목공학과를 졸업 후 동대학원에서 지반공학 박사학위를 취득하였으며, 한국도로공사에서 인천대교 건설사업 기술지원팀장, 베트남 고속도로 설계평가PM, 미래전략연구실장, 연구기획실장을 역임하였고, 유엔의 아시안하이웨이 컨설턴트로 활동하였으며, 현재 우리 학회 이사를 맡고 있다.

chosmin@ex.co.kr

이진선 교수는 KAIST 건설 및 환경공학과에서 지진시 지반증폭현상 해석을 위한 지반의 반복경화/연화 모델개발에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 삼성물산(주)건설부문, 행정안전부 소방방재청, 현대엔지니어링에서 근무 후 2011년부터 원광대학교 토목환경공학과 교수로 재직하고 있다. 주관심 연구분야는 지반공학 내진설계이며, 한국지반공학회 지반진동위원회 위원장을 맡고 있다.

blueguy@wku.ac.kr

유제남 부사장은 한국과학기술원에서 구조동력학으로 석사과정을 수학하였으며, LG엔지니어링에서 석유화학 플랜트 엔지니어링 설계를 비롯하여, (주)삼안, (주)도화에서 도시철도, 철도 분야 구조설계를 담당하여 왔으며, 현재는 ㈜유신에서 도시철도 설계 및 건설사업관리사업을 담당하고있다. 국내 도시철도내진설계기준을 2003년 최초 수립 할 때 총괄간사를 담당하였으며, 2012년 철도설계기준(노반편) 수립 시 지하구조물편을 담당하였다. 서울 도시철도 9호선과 인천, 대구 등 7개 광역시 및 여러 지방 도시를 비롯하여 해외의 알제리, 베트남 등에서의 도시철도 설계 및 건설사업관리사업을 25 여 년동안 수행해 오고 있다.

stryoo@gmail.com

기획 | 정원석 편집부위원장 wschung@khu.ac.kr