

# I. 국내 지반구조물 내진설계 현황과 개선방향

김동수\*1, 윤종구\*2

## 1. 서 언

국내는 오랫동안 지진에 대한 안전지대로 인식되어 지진에 대한 대비태세가 미약하였으나, 원자력발전소(1972년), 건축물(1988년), 교량(1992년) 등에 내진설계가 제한적으로 실시되어왔다. 1997년 건설교통부에서 내진설계 상위개념인 '내진설계기준(II)'을 제정한 이후 본격적인 내진설계가 실시되기 시작되었으나, 당시에는 현업에서 활동하는 공학자들이 지반지진공학에 대한 인식 및 개념정립이 미

비하여 대부분의 기준이 상부구조물에 집중되어 있었고 지반구조물 관련 내진설계기준이 거의 없는 실정이었다. 1999년 해양수산부에서 "항만 및 어항시설의 내진설계표준서"를 제정한 이후 지반구조물 중심의 내진설계기준이 작성되기 시작하였고 액상화 현상까지 설계에 반영할 수 있는 계기가 되었다. 근래에 들어서는 여러 관공서나 기관 또는 공기업을 중심으로 각 분야에서 필요한 내진설계기준을 세부적으로 작성하여 설계에 반영하고 있다.

우리나라의 경우 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역이고, 내진설계기준 제정을 위한 실지진 기록 및 피해사례가 부족하여, 대부분의 내진설계기준이 미국의 내진설계기준을 준용하고 있

\*1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수  
(dskim@kaist.ac.kr)

\*2 한국과학기술원 박사과정

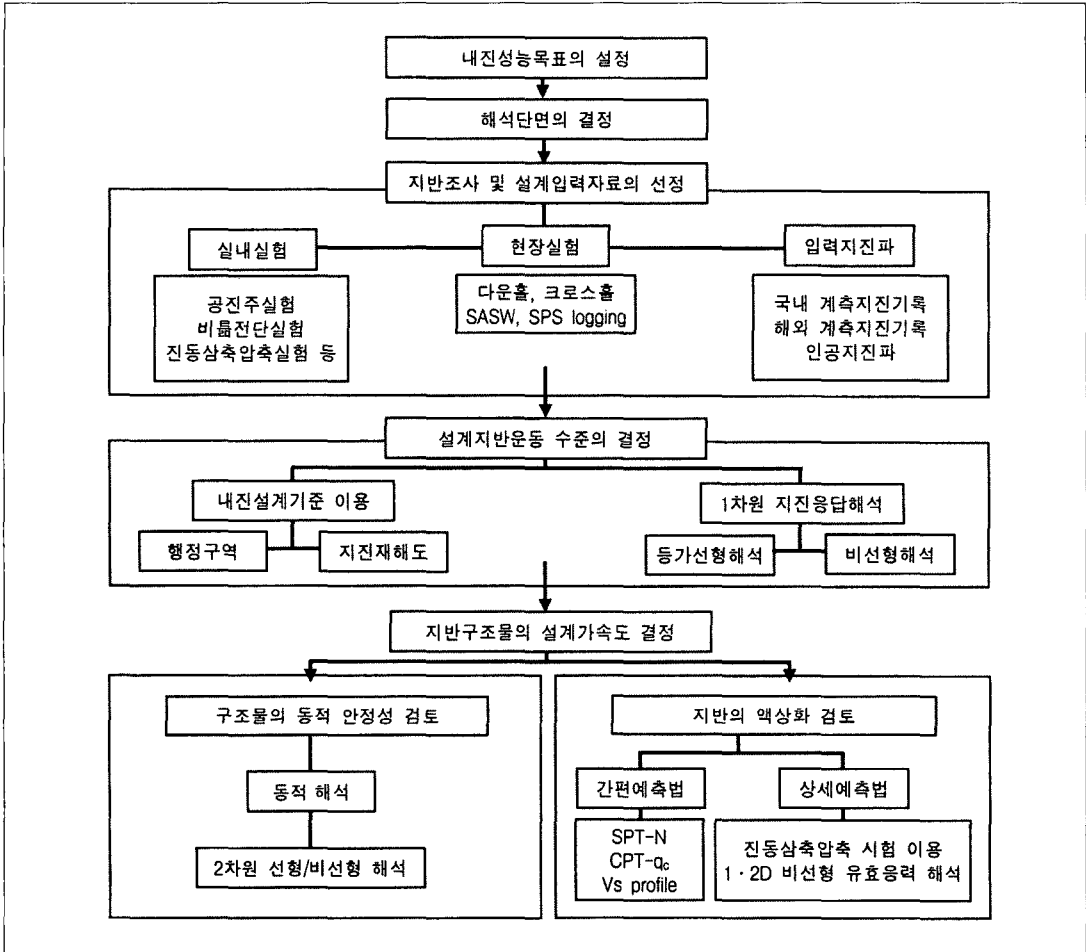


그림 1. 지반구조물의 내진설계 흐름도

다. 따라서, 국내 지반의 일반적인 특성과 내진설계 기준에는 많은 차이가 있어, 지반분류 방법이 국내 일반적인 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 또한, 국내 내진설계 역사가 오래되지 않아 많은 시행착오를 바탕으로 설계기술이 발전하고 정립되어 나가고 있는 실정이고, 아직도 내진설계 세부항목별로 개선해야 할 여러 가지 문제점이 드러나고 있다.

지반구조물에 대한 일반적인 내진설계 절차는 그림 1에 나타난 바와 같이 구조물의 중요도에 따른

내진성능목표의 설정과 해석단면을 우선적으로 결정하고, 지반조사 및 입력물성의 산정, 지반구조물 내진해석을 위한 설계지반운동 수준의 결정 및 설계 지반가속도의 결정, 지반구조물의 동적 안정성 검토, 그리고 액상화 평가 등 세부항목별로 설계가 진행된다. 여기에서는 현장에서 이용되고 있는 지반구조물 내진설계의 전반적인 현황을 살펴보고, 세부항목별 문제점 및 개선사항에 대하여 논의하였다.

## 2. 지반조사 및 설계입력자료 선정의 현황 및 개선사항

내진설계를 위해서는 그림 2와 같이 기반암의 위치와 지반의 층상구조를 파악하고, 각 층의 전단파속도 및 지반의 동적물성치를 구해야 한다. 현업에서 기반암 위치 파악을 위하여 표준관입시험(SPT)이 주로 이용되지만, 시추조사가 연암 또는 보통암 지반까지 수행되지 못하고 풍화대에서 중단되는 경우가 있다. 그러나, 내진설계를 위한 기반암 깊이는 풍화도나 풍화암 지대를 통과하여 전단파속도를 기준으로 760~1,500m/sec 정도의 연암 또는 보통암 지반까지 조사하는 것을 원칙으로 한다. 따라서, 모든 시추위치에서 연암 또는 보통암 지반까지 조사할 필요는 없으나 대표적인 위치에서는 연암 또는 보통암의 위치까지 지반조사를 실시해야 한다.

각 층을 이루고 있는 지반재료의 동적 물성치와 전단파속도 추상도를 구하기 위하여 실내시험과 현장시험을 실시한다. 지진시 지반은 변형 정도에 따라 비선형 거동특성을 보이는데, 이러한 지반의 비선형 거동특성을 제대로 평가하기 위하여 지반재료의 변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비 변화곡선

이 필요하다. 이를 위하여 공진주실험 또는 비틀전단실험 등 실내시험을 실시하는 것이 일반적이다. 또한, 액상화 평가를 위한 지반계수 산정을 위하여 진동삼축압축실험 등이 주로 수행된다. 깊이에 따른 지반의 전단파속도 추상도를 획득하기 위한 현장시험 방법으로는 다운홀, 크로스홀, 서스펜션 PS logging test, SASW 기법과 같은 현장 탄성파시험 기법이 이용된다.

현재 국내에서 수행되고 있는 공진주 및 비틀전단실험의 결과에 대한 신뢰성은 세계적인 수준으로 평가되고 있어 일반적인 토사지반의 경우 특별한 문제가 없는 것으로 판단된다. 현장 탄성파시험의 경우 동일한 지반에서 시험기법에 따라 서로 다른 결과가 나타나는 경우가 있는데, 이러한 경우 대표 전단파속도 추상도를 합리적으로 산정하는 것이 중요하다. 한편, 항만구조물과 같이 구조물 하부 및 주변지반이 사석으로 강제치환 하거나 SCP(Sand Compaction Pile) 공법, 준설매립공법 등 지반개량 전·후 지반물성이 달라지는 경우에는 신뢰성 있는 지반물성치를 구하기가 매우 어렵다. 따라서, 시공 전·후의 지반물성에 대한 데이터베이스(D/B)를 확보하여, 차후 비슷한 건설공사가 있을 경우 설계자료로 활용하

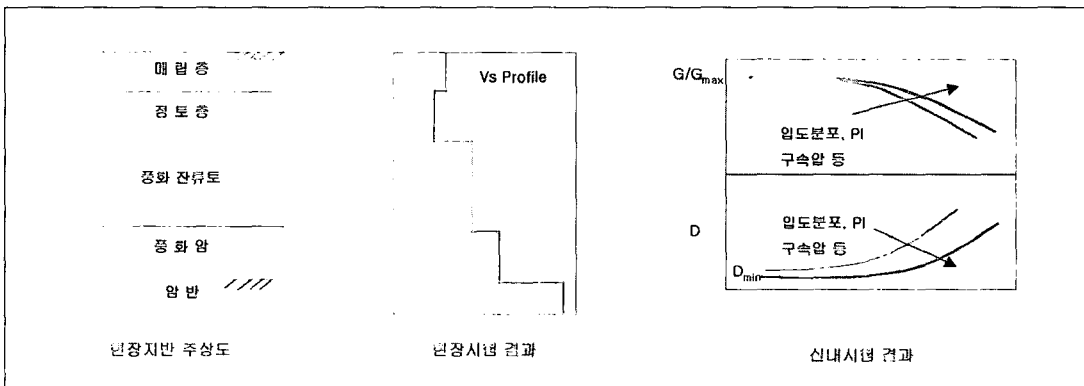


그림 2. 내진설계에 필요한 지반의 동적 물성치

여 내진설계의 신뢰성을 향상시키는 방안이 필요하다. 최근 턴키와 같은 경쟁입찰 공사를 중심으로 현장 및 실내실험이 많이 수행되고 있어 D/B를 확보하려는 노력이 있다면 좋은 데이터의 획득이 가능하리라 생각된다.

지진응답해석을 실시할 경우 실지진과 인공지진을 함께 사용하여 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 최근 국내에서 규모 5.0 정도의 지진기록이 계속되었기 때문에 이를 설계에 반영하는 것도 가능해졌다. 국내 계기 지진기록이 부적합할 경우 해외 지진기록을 이용해야 하는데, 이때 실지진파의 주파수 영역특성을 고려하여 장주기 및 단주기 지진파를 구분하여 사용하고 계측된 위치가 지표면에서 계측된 것인지 암반에서 계측된 것인지 판단해야 한다. 여기에서는 해외 계측지진을 이용할 경우 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>) 센터의 데이터 베이스를 이용할 것을 추천한다.

### 3. 설계지반운동 수준의 결정방법 현황 및 개선사항

구조물이 설치되는 위치에 따라서 설계지반운동 수준을 결정하는 방법은 달라진다. 일반적인 내진설계에서는 지표면 최대가속도의 산정이 가장 중요하나, 도시철도 구조물과 같은 지중구조물의 경우 지중변위가 상대적으로 더 중요하기 때문에 설계지반운동 수준의 결정방법이 달라진다. 지표면 최대가속도를 산정하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 내진설계기준이나 시방서 등에 제시되어 있는 행정구역과 위험도계수 및 재현주기를 고려한 지진재해도를 이용하여 지표면 최대가속도

를 산정할 수 있고, 두 번째는 해석프로그램을 이용한 지진응답해석을 수행하여 설계지반운동 수준을 결정한다.

지진응답해석을 이용하여 설계지반운동 수준을 결정할 경우 주로 1차원 등가선형해석을 이용하고, 국내에서는 SHAKE91 프로그램을 주로 사용하고 있다. SHAKE91 프로그램은 개발된 이후 미국의 강진지역에서 30년 이상 검증되어 현재도 사용되고 있고, 입력물성치를 구하기 위한 실험기법이 잘 정립되어 있어 해석결과에 대한 신뢰성이 높다. 그러나, 등가선형 주파수영역 해석이란 단점을 가지고 있어 강진해석을 할 경우 지반의 비선형을 제대로 묘사할 수 없고 지반의 공진주기 영역에서 응답값이 크게 산정되는 단점이 있어, 결과해석에 있어 주의 를 해야 한다.

전술한 바와 같이 국내 내진설계기준의 경우 미국의 과거 또는 현재의 기준을 대부분 준용하고 있다. 미국 UBC 기준의 경우 기반암이 지하 100m~300m 정도에 존재하는 미국 서부해안지역에서 기반암 깊이까지 지반조사를 일반적으로 할 수 없기 때문에 지진운동과 상관성이 큰 상부 토층 30m의 평균 물성치를 이용하여 내진설계를 하는 개념이다. 따라서, 기반암이 대부분 30m 이내에 존재하는 국내 지반에 그대로 적용할 경우 지반의 고유주기 영역이 다르고 구조물에 영향을 미치는 주파수 대역이 달라지게 되어, 경우에 따라서 과소 또는 과다 설계의 요인이 될 수 있다.

국내 일반적인 지반의 고유주기와 미국 ROSRINE 프로젝트의 고유주기를 비교한 그림 3을 살펴보면, 국내 지반의 경우 고유주기 영역이 매우 좁게 나타난 반면, 미국 서부해안지역의 경우 고유주기의 폭이 매우 넓게 분포되어 있는 특징을 보인다. 이와 같은 차이가 나는 이유는 지반의 고유주기가 기반암

# I. 국내 지반구조물 내진설계 현황과 개선방향

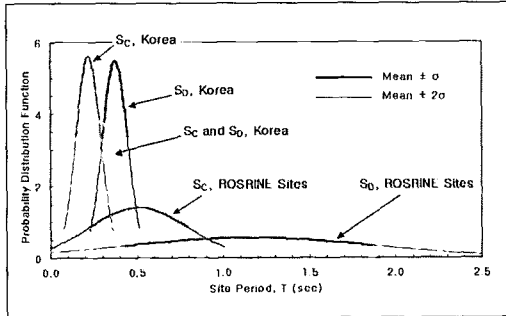
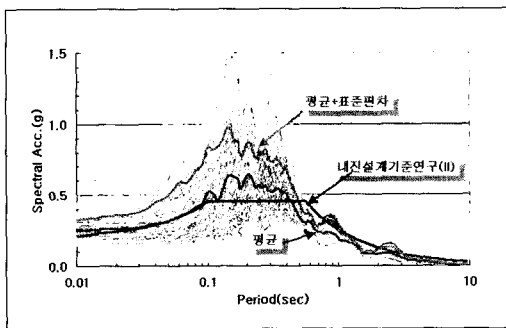


그림 3. 국내 지반과 ROSRINE 현장 지반의 고유주기 비교

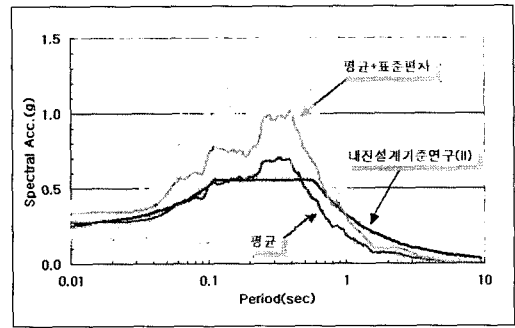
깊이에 영향을 받기 때문이다. 따라서, 미국 서부해안지역의 지반조건에 적합하도록 작성된 미국 UBC 기준을 대부분 그대로 이용하고 있는 국내 내진설계

기준의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

국내의 일반적인 지반에 해당하는  $S_C$  지반과  $S_D$  지반에 대한 지진응답해석을 수행하여 해석결과의 평균값 및 평균값 + 표준편차 값과 내진설계기준연구(II)의 응답스펙트럼을 비교한 결과는 그림 4에 나타나 있다. 또, 해석결과와 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 단주기 및 장주기 증폭계수(지진계수)와 비교 분석하였으며, 국내 일반적인 지반특성에 적합한 증폭계수를 산정하여 그림 5에 나타내었다. 그림 4와 그림 5의 결과를 살펴보면  $S_C$  지반과  $S_D$  지반의 응답스펙트럼과 국내 내진설계기준의 값에 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 특히, 해석

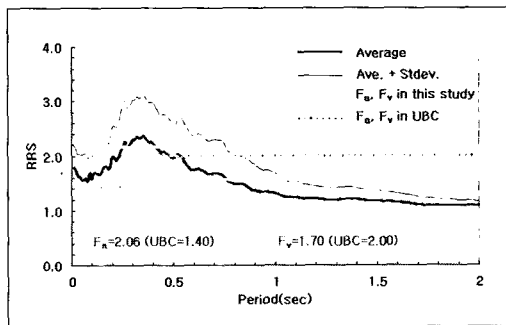


(a)  $S_C$  지반

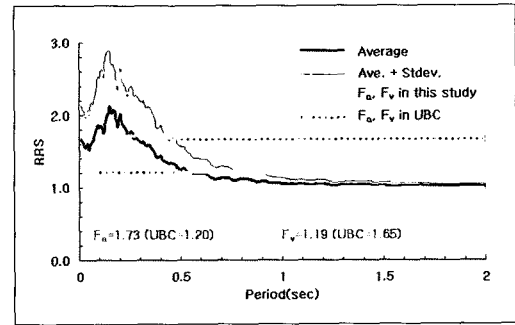


(b)  $S_D$  지반

그림 4. 해석결과 지반 종류별 응답스펙트럼



(a)  $S_C$  지반



(b)  $S_D$  지반

그림 5. 해석결과에서 얻어진 증폭계수( $F_a$ ,  $F_v$ )

에서 얻은 응답스펙트럼의 경우 단주기 영역에서 응답값의 증폭이 크게 발생하는 반면, 장주기 영역에서는 내진설계기준의 값보다 작은 값을 가진다. 해석결과를 바탕으로 산정된 단주기·장주기 증폭계수에서도 미국의 증폭계수와 다른 현상을 보이고 있다.

요약하자면, 암반지반을 제외할 때 국내 지반특성은 미국 지반보다 단주기 영역에서 응답스펙트럼의 증폭이 상대적으로 크게 발생하고, 장주기 영역에서는 작게 발생함을 알 수 있다. 이는 국내 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼은 지반특성에 적합하도록 개선할 필요성이 있다.

## 4. 구조물의 동적 안정성 검토 현황 및 개선사항

설계지반운동 수준이 결정되면 구조물의 동적 안

정성을 검토한다. 구조물의 동적 안정성 검토는 허용변위를 이용하여 검토하고, 허용변위는 구조물의 내진성능목표 및 중요도에 따라 별도로 정해진 규정에 따른다. 항만구조물의 케이슨위에 설치되는 크레인과 같이 상부구조물의 종류에 따라 허용변위가 엄격하게 제한될 경우도 있다. 구조물의 동적 안정성을 검토하는 기법으로는 프로그램을 이용한 동적해석법과 정적초기응력상태에 지진시 증가된 하중을 등가의 하중으로 산정하여 한계평형해석법을 이용한 유사정적해석법 등이 있다. 여기에서는 프로그램을 이용한 동적해석에 주안점을 두어 논의하기로 한다.

일반적으로 구조물의 동적 안정성 검토는 그림 6에 나타난 바와 같이 구조물의 종류와 해석단면의 위치 또는 검토하고자 하는 목적에 따라서 해석방법을 달리해야 한다. 구조물의 허용변위를 검토하기 위하여는 2차원 전응력해석 또는 유효응력해석을 이용한다. 유효응력해석은 변위 검토와 더불어 액상

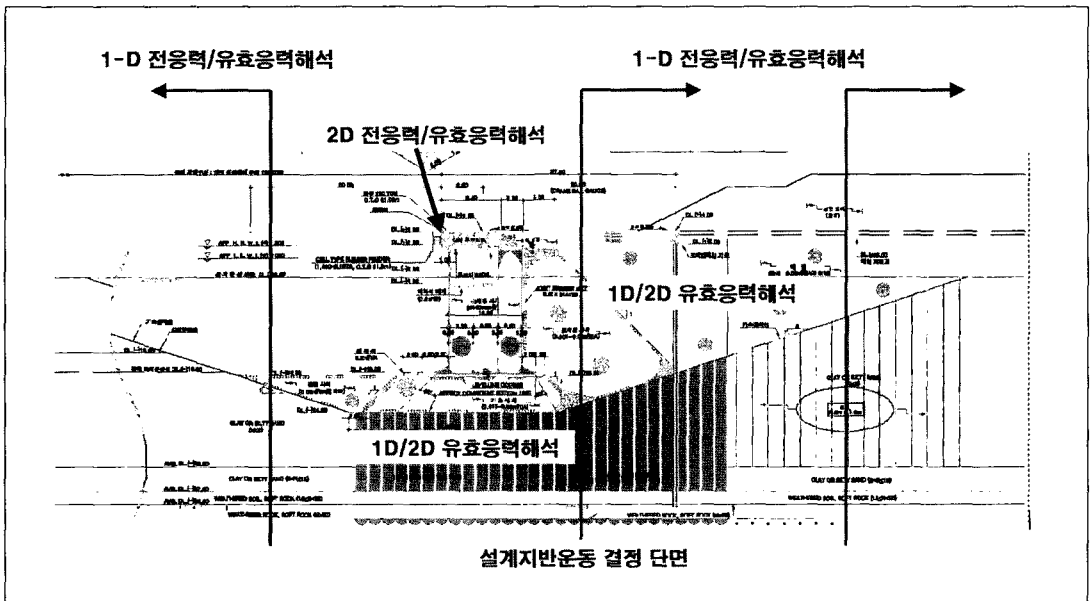


그림 6. 구조물의 동적안정성 검토를 위한 해석단면

## 1. 국내 지반구조물 내진설계 현황과 개선방향

화에 대한 안정성 검토를 포함하고, 전응력해석의 경우 선형해석과 비선형해석으로 나눌 수 있다.

선형해석의 경우 지진시 지반재료는 변형률에 따라 전단탄성계수가 변하는 것을 고려하면 지반조사에서 얻어진 최대값을 그대로 사용하는 것은 무리가 따른다. 따라서, 설계지반운동 수준을 결정할 때 등가선형해석 결과 중에서 변화된 전단탄성계수를 이용하여 2차원 선형해석의 입력물성으로 이용하는 것이 합리적이다. 2차원 비선형 해석을 수행할 경우 해석모델변수의 정의에 적합한 실내실험을 정확히 수행하여야 한다. 현업에서는 대부분의 실내실험이 1차원 지진응답해석을 위해 수행되고 있다. 따라서, 2차원 비선형 해석을 위한 입력물성치로 변환할 경우 해석모델변수에 적합하도록 재산정하는 작업이 필수적이다.

1차원 해석의 개선사항과 마찬가지로 2차원 해석에서도 지반조사는 원지반에서 했지만, 치환공법이나 개량공법이 사용되어 원지반 물성이 완전히 바뀔 경우 정확한 입력자료의 산정에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현실적인 대안으로 시공 전후의 데이터베이스를 확보하여 향후 비슷한 건설공사가 있을 경우 해석의 신뢰는 높이는 방안을 생각해볼 수 있다.

최근의 내진설계 현황을 살펴보면, 국내 내진설계 역사가 오래되지 않았음에도 불구하고 여러 해석프로그램을 이용하여 다양한 2·3차원 전응력 또는 유효응력해석이 이용되고 있다. 그러나, 지반 지진공학분야에서 2·3차원 해석의 신뢰성 있는 결과는 세계적으로도 찾아보기 힘들다. 현재 세계적인 추세를 살펴본다면 큰 지진이 발생한 곳의 피해사례에 대한 조사를 이용하여 역해석을 수행한 후 지반물성을 추정하여 검증단계를 거친 다음 본 해석을 수행하는 형태로 진행되고 있다. 그러나, 국내의 경우 이

러한 설계사례는 찾아보기 힘들고 검증단계를 대부분 생략하고 있는 실정이다. 따라서, 현재 수행되고 있는 2·3차원 해석의 경우 대부분 보여주기 위한 해석으로 오해를 일으킬 소지가 있으므로, 향후 검증작업을 수행한 이후 본 해석에 이용하는 형태로 발전해 나가야 할 것이다. 특히, 유효응력의 경우 이러한 절차가 절실히 요구된다.

## 5. 액상화 검토 현황 및 개선사항

지반의 액상화는 포화된 사질토에 지진하중이 작용할 경우 간극수압의 증가에 따른 전단응력 감소로 지반강도를 상실하는 현상으로 지반의 과도한 변형 및 토압을 유발하여 사면, 지반구조물, 기초 등의 파괴 원인이 된다. 이러한, 지반의 액상화 가능성은 지진시 지진파에 의한 반복전단응력비와 지반의 액상화 저항전단응력비를 산정하여 안전율로 평가한다.

일반적으로 지진파에 의한 반복전단응력비는 1차원 등가선형해석 결과에서 얻어진 깊이별 지반의 최대가속도를 이용하여 산정하고, 액상화 저항전단응력비의 경우 SPT-N값이나 CPT- $q_c$  값 등을 이용한 간편예측법과 진동삼축압축시험을 이용한 상세예측법을 통해서 산정할 수 있다. 또한, 1·2차원 비선형 유효응력해석을 이용하여 지진시 간극수압의 증가현상으로 검토할 수 있다.

대부분의 현장에서 시추조사와 표준관입시험을 동시에 실시하기 때문에 SPT-N값을 이용한 간편예측법이 주로 이용되고 있다. SPT-N값의 경우 장비 및 햄머의 종류에 따라서 전달되는 에너지의 비가 다르기 때문에 N값 산출에 많은 편차가 발생한다. 따라서, 각 장비별 에너지 효율을 측정 N값을 보정

하는 것이 바람직하다. 간편예측법을 이용할 경우 지진규모에 따른 보정을 하기 위해 규모보정계수 (Magnitude Scaling Factor, MSF)를 이용하는데, 국내에서는 주로  $M=6.5$ 에 대한 보정을 위하여  $MSF=1.19$ 를 이용한다. 그러나, 국내 지반조건을 고려하면 규모보정계수는 1.4를 이용하는 것이 적절하다.

1차원 또는 2차원 유효응력해석을 이용하여 간극수압의 증가현상을 평가할 경우 입력물성의 산정에 어려움이 있다. 특히, 비선형 유효응력해석을 수행할 경우 해석프로그램에서 이용되고 있는 모델변수에 적합한 실험을 수행하기 쉽지 않아 역해석을 통한 검증작업을 수행한 후 실무에 적용해야 설계의 오류를 줄일 수 있다.

## 6. 결 론

지금까지 지반구조물 전반적인 내진설계 절차 및 현업에서 이용되고 있는 현황을 살펴보고, 세부항목별 개선해야할 사항에 대하여 살펴보았다. 현재 국내에서 수행되고 있는 대부분의 설계방법은 신뢰성 있게 수행되고 있는 것으로 판단되나, 일부 지반조사 및 입력자료의 산정에 어려움이 있고, 동해석수행시 모델변수에 적합한 실험과 해석기법의 검증에 부족한 면이 있었다. 과거에는 지반지진공학에 대한 이해가 미비하여 외국의 내진설계기준을 이용하여 국내 기준을 작성할 때 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못한 측면이 있었으나, 최근 들어 현업에서 내진설계가 적극적으로 수행되면서 설계기법에 많은 발전을 한 것으로 판단된다. 향후 신뢰성 있는 내진설계를 위하여 각 해석 목적에 적합한 정확한 지반조사를 수행해야 하고, 해석기법을 검증한

후 실무에 반영해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 내진설계 기준연구 (II), 1997.
2. 해양수산부, "항만 및 어항시설의 내진설계 표준서", 1999.
3. 윤종구, 김동수, "국내 지반특성에 적합한 설계지반 운동 결정 방법에 대한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제3호, 2004년 6월.
4. BSSC, 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council. Washington, D.C.
5. BSSC, 1997 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Commentary, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council. Washington, D.C.
6. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B.(1972), "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites," Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
7. <http://peer.berkeley.edu>.
8. Dobry, R. and Martin G. "Development of Site-Dependent Ratio of Elastic Response Spectra(RRS)", Proceeding of the Workshop on Earthquake Site Response and Seismic Code Provisions, 1999.



9. Borchardt, R. D., "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design(Methodology and Justification)", Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 4, 1994.

10. Bardet, J.P., Nielsen, E., Villacorta, R., 1998. ROSRINE data dissemination. <http://geoinfo.usc.edu/rosrine>. Accessed 12 June 2001.

## 제 42회 Rankine Lecture 초청강연 안내

지반수치해석분야의 세계적 권위자이며, 영국지반공학회의 제 42회 Rankine Lecture로서 명성이 널리 알려져 있는 D. M. Potts 교수님을 초청하여 다음과 같이 서울과 부산에서 2회에 걸쳐 강연회를 개최하고자 하오니 관심 있는 분들의 많은 참여를 바랍니다.(참가등록비 무료)

### **Numerical Analysis in Geotechnical Engineering : a virtual dream or practical reality?**

Professor D.M. Potts - Imperial College, London, UK

>>> 1차 강연(서울) : 2005.4. 21(목) 15:00 : 건국대학교 새천년관 국제회의실

>>> 2차 강연(부산) : 2005.4. 22(금) 15:00 : 동아대학교 승학캠퍼스(산학협력관)

주 최: 한국지반공학회 정보화기술위원회

한국터널공학회 지하공간 건설기술 연구단

동아대학교 건설기술연구소, ISSMGE ATC-7

후 원: 한국과학재단, 영국문화원, 건국대학교, (주) 대우, (주)마이디스아이티

문의처: (서울) 02-450-4105 (부산) 051-200-7520