



## 지반 진동 및 내진설계의 향후 방향

본 학회 지반진동 위원회가 주관하여 지금까지 7회에 걸쳐 “지반진동과 내진설계”라는 제목으로 강좌를 연재하였습니다. 본 강좌가 실무기술자들에게 지반의 동적물성, 내진설계 기준과 방법, 방진대책에 대한 이해를 증진시키는데 도움이 되었기를 바랍니다. 본 고에서는 강좌를 마치면서 연재된 내용을 정리하고 향후 발전방향에 대하여 살펴보고자 합니다.

### 1. 지반의 동적 물성치

동적 하중을 받는 토목구조물의 설계를 위해 지반의 동적 물성치의 결정은 매우 중요하다. 지반진동 및 내진설계에서 필요로 하는 동적지반계수는 다음과 같다.

- 동적변형계수 : 탄성계수(E), 전단탄성계수(G), 구속탄성계수(M)
- 포아송비( $\nu$ )
- 감쇠비(D) 와 감쇠상수( $\alpha$ )
- 액상화 관련계수

이들 동적지반계수들은 지진하중, 파랑하중, 폭발하중, 건설 및 기계진동에 의한 지반의 동적거동해석 및 지반-구조물 상호작용연구에 사용되고 있다.

이들 동적물성치는 그림 1과 같이 변형률 크기에 따라 변화한다. 선형한계변형률( $\gamma_L^*$ ) 이하에서는 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)가 변형률 크기에 관계 없이 일정한 값을 유지하는 선형거동을 하며 변형률 크기가  $\gamma_L^*$  이상에서는 지반이 비선형 거동을 나타낸다. 일반적으로 지반의 선형한계변형률은 0.001%~0.01% 범위에 존재한다.

저변형률 하에서 지반의 선형거동을 측정하기 위하여 크로스홀 시험, 다운홀 시험, SASW 실험, SPS-Logging 등의 현장시험법이 자주 사용되나 비선형 거동 및 감쇠비 측정이 불가능하여 변형률 변화에 따른 전단탄성계수의 비선형성과 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험이 필요하다. 대표적인 실내시험으로는 진동삼축시험과 공진주/비틀전단(RC/TS) 시험이 널리 사용된다.

지반의 동적 물성치를 측정하는 현장시험에 관해서는 {지반}의 기술강좌로 조성호 등(2000)에 의하여 상세히 소개되었으며, 실내시험에 의한 동적물성치 측정방법과 하중주파수, 구속응력에 대한 영향요 소연구는 강좌(I)를 통해 황선근 등(2000, 6)에 의해 소개되었다.

최근 국내에서는 내진설계에 필요한 지반의 동적 물성치 결정을 위하여 다양한 현장 및 실내 시험이 수행되고 있다. 각종 시험방법을 각 기법에서 적용할 수 있는 신뢰성 있는 측정범위가 있다(그림 1). 지반의 변형 특성이 변형률 크기에 따라 변하므로 이들 시험 결과를 비교할 때 신뢰성 있는 측정영역에서 변

\*1 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수  
 \*2 정회원, 동일기술공사 고문  
 \*3 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

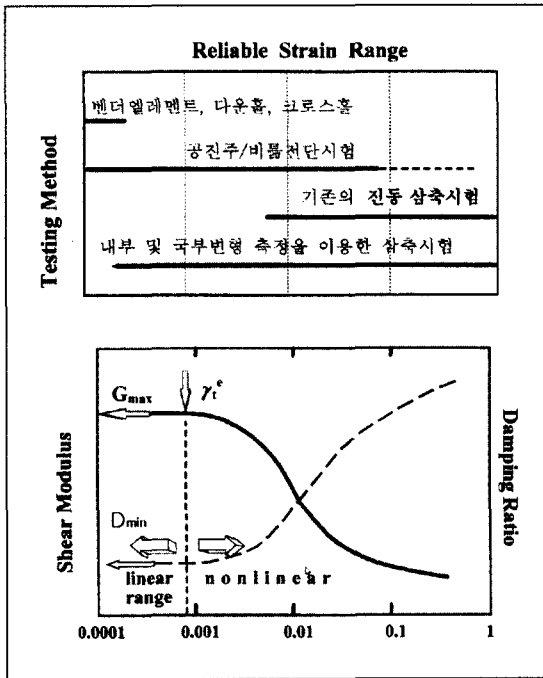
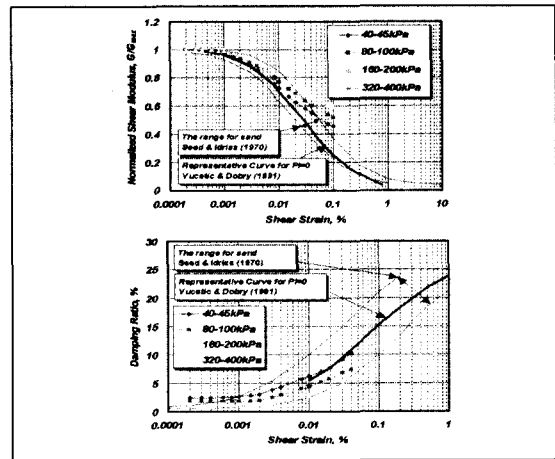


그림 1. 각 시험 기법의 신뢰성 있는 구간 및 변형률에 따른 전단 탄성계수 및 감쇠비

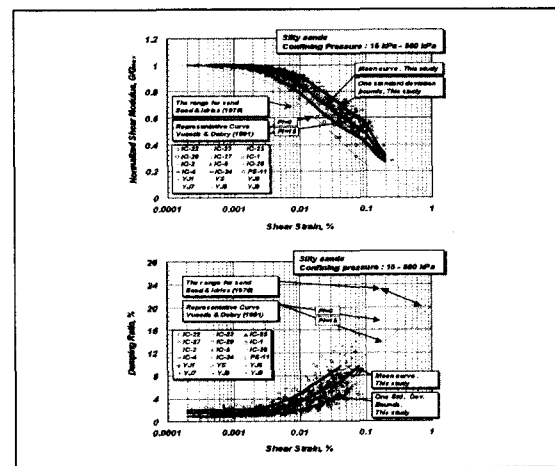
형을 크기를 고려하여 평가하는 것이 필요하다. 또한 하나의 시험 기법에서 얻은 결과만으로 부지의 전체 특성을 신뢰성 있게 평가하기는 어려우며, 복수의 시험을 수행하여 종합적으로 결정하는 것이 바람직하다. 예를 들면, 지반의 전단파 속도 주상도 결정을 위하여 시추공을 이용하는 다운홀, 시추공 없이 실험하는 SASW 기법, 시추 주상도 및 N값들을 적절히 고려하여 대표 주상도를 결정하는 것이 바람직하다. 또한 내진 설계에 필요한 효율적 부지 특성 평가를 위하여 현장 시험과 실내시험 결과를 적절히 결합하여야 한다(항만 및 어항시설의 내진설계표준서, 1999).

최근 동적 물성치 평가를 위한 다수의 현장 및 실내시험이 수행되고 있으므로, 이들 측정 결과를 Data Base로 만들어 지반의 지수물성치와 상관관계를 맺으면 중·소규모의 프로젝트에 적용 가능하리라 판단된다. KAIST에서는 50여종의 비점성토

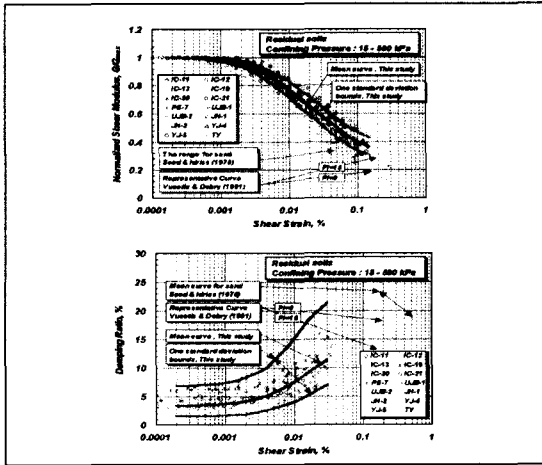
지반의 공진주 시험 결과를 clean sand, 실트, 풍화토 지반으로 구분하여 대표적인 정규화 탄성계수 감소 곡선과 감쇠비 곡선을 그림 2와 같이 제안하였다. (김동수, 추연욱, 2001, 한국지반공학회지 제출중). 또한 현장 탄성과 시험에서 얻은 국내지반의 전단파 속도와 SPT N치의 상관관계를 그림 3과 같이 D/B화 하고 있다. 이들 경험적 상관식의 도출은 아직은 초보적인 수준에 있으나, 더 많은 신뢰성 있는 시험 결과를 바탕으로 지반 종류별 상관식을 얻는다면 설계에 적용할 수 있으리라 판단되며 향후 이에 대한 노력이 지속적으로 이루어지기를 바란다.



a) clean sand

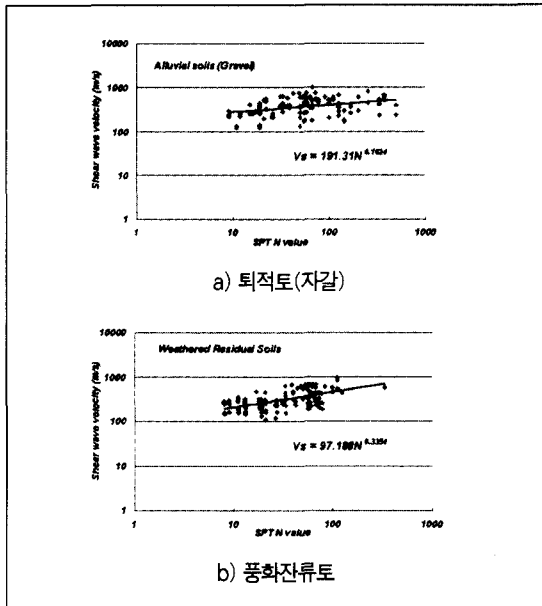


b) silty sand



c) residual soils

그림 2. 국내 비점성토 지반의 정규화 탄성계수 감소 곡선과 감쇠비 곡선



a) 퇴적토(자갈)

b) 풍화잔류토

그림 3. 지반별 전단파 속도와 SPT N값과의 관계

## 2. 설계지반운동

국내 설계지반운동은 부지정리가 완료된 보통암지반의 지표면에서 자유장 운동으로 정의 되고 있으며,

이는 역사지진기록을 바탕으로 한 지진재해도 상에 나타나 있다. 구조물이 놓이는 지반의 지표면이 보통암이 아닐 경우에는 6종으로 분류된 지반종류에 따라 설계지진 계수를 다르게 결정하도록 되어 있다(강좌 II). 설계응답스펙트럼은 우리 나라 고유의 지진 지체구조와 지진 발생 특성에 근거하여야 한다. 그러나, 국내의 경우 계기지진의 규모 및 진도가 소규모이고 국내 내진설계기준에 적합하지 않다. 또, 실지진 계측 자료의 부족과 연구 결과에 대한 검토가 충분하지 못하여 신뢰성 높은 우리나라 고유의 설계응답 스펙트럼의 작성이 어려운 형편이다. 이를 감안하여 1997년 건설교통부에서 제정·배포한 내진설계 기준연구에서는 UBC(Uniform Building Code, 1997)에 제시되어 있는 설계응답 스펙트럼을 약간 변형하여 사용하고 있다. UBC에서 제시하고 있는 지반분류 체계를 따르면 기존의 기준보다 지반이 정량적으로 모호함이 없이 분류될 수 있고 지반의 특성을 고려한 설계응답 스펙트럼을 암반 지반에서의 스펙트럼으로부터 작성하는 방법도 합리적이고 편리하게 제시되고 있으나, 기반암 가속도가 0.1~0.2g로 예상되는 국내 지반의 부지증폭현상에 대한 연구자료가 없는 상황에서 UBC기준을 사용하였으므로 이에 대한 검증이 필요한 실정이다.

UBC 기준은 1992년 Borchardt, Dobry, Seed와 Martin 등을 중심으로 Site Response Workshop을 개최하여 1989년 발생한 Loma Prieta지진 발생지역에 대한 실측데이터와 비선형/등가선형 부지응답 해석을 수행하여 내진설계 기준을 위한 지반의 분류 체계와 지반계수를 상부 30m지반의 전단파속도 평균값을 이용하여 제안하였다. 이러한 일련의 워크샵으로부터 NEHRP 1994가 제정되었고, 이후 NEHRP 1997로 개정된 후 UBC의 기준까지 변경되게 된 것이다.

이러한 과정을 거쳐 제정된 NEHRP 1997에서는 기존의 기준들과는 달리 단주기 영역에서 부지의 증폭정도를 고려하는 변수를 포함하고, 부지증폭현상으로 인한 지표면 자유장 최대 가속도의 증가를 기반

암 노두 가속도의 변수로 제한함으로써 지진 발생시 하부 지반의 동적 특성에 따른 지표면 최대가속도의 변화정도를 설계에 반영하였다. 또, 상부 30m 토층의 평균 전단파 속도를 기준으로 지반 분류 기준을 명확히 한 점, 일반적으로 지반증폭은 장주기에서 일어난다고 알려져 있는 기존의 개념을 극복하고 장주기와 단주기에 증폭영향을 평가할 수 있는 증폭 계수를 도입한 점, 그리고 지반의 비선형 거동을 고려한 점은 새로운 NEHRP에서 바뀐 주요 혁신이라 할 수 있다.

설계지반운동을 엄밀하게 평가하기 위하여는 부지 증폭 현상을 평가할 수 있는 신뢰성 있는 해석기법의 도입이 필요하다. 특히, 캘리포니아나 일본과 같이 암반층이 깊게 위치하지 않은 국내지반에서는 장주기 지반운동이 설계기준보다 작게 산정될 가능성이 있고, 따라서 장대 교량이나 고층건물 설계시 설계기준에 의하여 산정된 지진력이 실제보다 과다하게 평가될 수 있다. 이런 경우, 부지고유의 지진응답해석을 수행하여 설계지반운동을 결정하는 것이 경제적이다. 부지 증폭 현상 예측은 상세 부지특성 평가(현장 지반조사 및 실내시험) 결과를 바탕으로 한 지진응답해석을 통하여 가능하며, 대상 현장의 시간 영역 실지진계측기록을 바탕으로 이루어진다. 국내의 경우 설계에 사용할만한 규모의 실지진 계측 자료가 없으므로, 장주기 및 단주기 특성을 갖고 있는 외국의 실지진 자료와 국내 설계 스펙트럼을 만족하는 인공지진파 등 여러 종류의 지진파를 이용하여 설계지반운동을 분석할 필요가 있다.

지진파의 지반내 전파 중 발생하는 지진운동 크기의 증폭현상 예측을 위하여 Schnabel 등(1972)이 지반의 비선형 응력-변형을 관계를 등가 선형으로 근사화하여 주파수 영역에서 해석하는 1차원 지반증폭 해석 프로그램 SHAKE를 제작하여 내진설계 및 여러 내진기준의 작성에 사용되었다. 그 이후 지반의 비선형 응력-변형을 관계를 정확히 묘사하는 해석을 위하여 지반의 여러가지의 비선형 모델을 이용한 시간영역 지진응답 해석 프로그램이 개발되어 사용중

표 1. 대표적인 시간영역 비선형 지진응답 해석 프로그램

CHARSOIL	Ramberg-Osgood	Streeter et al. (1973)
DESRA-2	Hyperbolic	Lee and Finn (1978)
DYNA 1D	Nested yield surface	Prevost (1989)
MASH	Martin-Davidenkov	Martin and Seed (1978)
NONL3	Iwan-type	Joyner (1977)
TESS1	HDCP	Pyke (1985)
YUSAYUSA	Ramberg-Osgood & Hyperbolic	Towhata(1996)

이다(표 1). 최근까지 등가선형 기법에 근거한 SHAKE 프로그램이 설계지반운동 결정에 주로 사용되어왔다. 최근에는 많은 연구자들에 의해 등가선형보다는 비선형해석이 지진시의 거동을 잘 묘사하는 것으로 알려졌다. 따라서 비선형 해석을 효율적으로 수행할 수 있는 지반모델을 연구하고 이를 해석에 적용함으로써 좀 더 신뢰성 있는 해석기법이 개발될 것으로 판단된다. 또한 국내 대부분의 도시들은 분지 형태의 지반에 건설되어 있으므로, 분지효과를 적절히 고려할 수 있는 2차원 해석기법의 개발 및 도입도 고려할 필요가 있다.

상세 부지특성평가(현장지반조사 및 실내 시험)결과를 바탕으로 한 지진응답해석의 타당성에 대한 평가를 위하여 대상 현장의 실지진 계측 기록을 바탕으로 한 여러 연구가 수행되어졌다. Idriss(1999)는 Loma Prieta지진 기록중 암반 노두(Rock outcrop) 계측기록인 Yerba Buena Island에서의 지진 계측 기록과 지표면 자유장 계측 기록인 Treasure Island에서의 계측 기록을 이용하여 등가 선형 해석기법을 이용한 지반 증폭현상의 예측기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 1994년 발생한 Northridge지진의 미국 캘리포니아 지역 계측기록을 토대로 지진 계측지점에서의 상세 부지특성평가를 수반한 부지증폭현상에 관한 연구가 ROSLINE(ResOLUTION of Site Response Issues from the Northridge Earthquake)라는 이름으로 수행되고 있다. 대만의 경우 Lotung 및 Hualien인근 지역에 지표면을 포함한 지중에 많은 수의 가속도계 및 간극수압계를 매설

하여 지진 발생시 지반 및 구조물의 거동에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서도 자원 연구소의 효동리 계측소에 지진계의 Downhole Array가 암반층 내, 암반층 상부 및 지표면에 설치되어 있고, 영종도 신공항 부지내에 3곳의 깊이에 지진계를 설치하여 향후 국내에서 발생하는 지진기록을 계측하고 이를 바탕으로 상세 부지평가자료와 결합하여 지진응답해석기법의 검증 연구를 수행할 수 있을 것이다. 그림

4는 효동리와 신공항 부지의 탄성과 시험 결과를 나타내었다.

미국에서는 연방재난국(FEMA)이 주관하여 HAZUS 프로그램을 개발하여 지진시 예상되는 지역별 피해를 정량화하고, 최소화 할 수 있는 방안을 수립하며, 구난 계획을 설정하는데 활용하고 있다. 예를 들면 지진 발생 이전에는 지진으로 인한 피해를 줄이는 방안을 마련하고, 재난에 대한 방재 계획을 수립하며, 재난 예상지역의 복구 계획 등 대응계획을 수립하는데 주안점을 둔다. 지진 발생 이후에는 주정부 차원에서 신속하게 경제적인 충격을 산출하여 연방정부에 지원을 요청하고, 신속하게 응급복구를 위한 행동에 들어가며, 장기 복구 계획을 수립한다.

최근 한반도도 지진에 대한 안전한 지역이 아니라는 인식이 점차 높아가고 있는 시점에서 국내 주요 도시지역에 대한 지진시 재해정도를 파악하고 대비할 수 있는 프로그램의 개발이 절실히 요구된다. HAZUS와 유사한 프로그램을 개발하기 위하여는 수많은 자료에 대한 데이터 베이스와 GIS 도구 및 해석을 위한 요소기술들을 필요로 한다. 이러한 요소기술 중에서 토목 및 건축 구조물의 지진시 거동과 성능을 평가하는 해석기법이 매우 중요하나, 필요에 따라서는 선진국에서 개발된 기법을 국내 실정에 맞도록 수정·보완하여 적용할 수 있으리라 판단된다. 그러나, 지진재해도 작성을 위한 설계지반운동의 결정은 국내 지진원의 특성 및 도시지역의 국부적 지반조건(local site condition)에 결정적인 영향을 받는다. 지진원 특성에 대한 연구는 과학기술부의 재정지원을 받아 지진학을 전공하는 연구팀에서 활발하게 진행되고 있으나, 지반공학관련 연구에 대한 지원은 아직까지는 미비한 상황이다. 따라서 설계지반운동 결정을 위한 지반공학분야의 연구가 절실히 요구된다.

현재, 한국과학기술원(KAIST)과 서울대학교 연합 연구팀이 "원자력 연구개발 중장기 계획사업"의 일환으로 경주지역의 지반공학적 지진민감도 분석을 최근 2년간 실시한 바 있다. 경주지역의 유적지와 현 시가지를 포함한 시계내의 10km × 10km의 분석

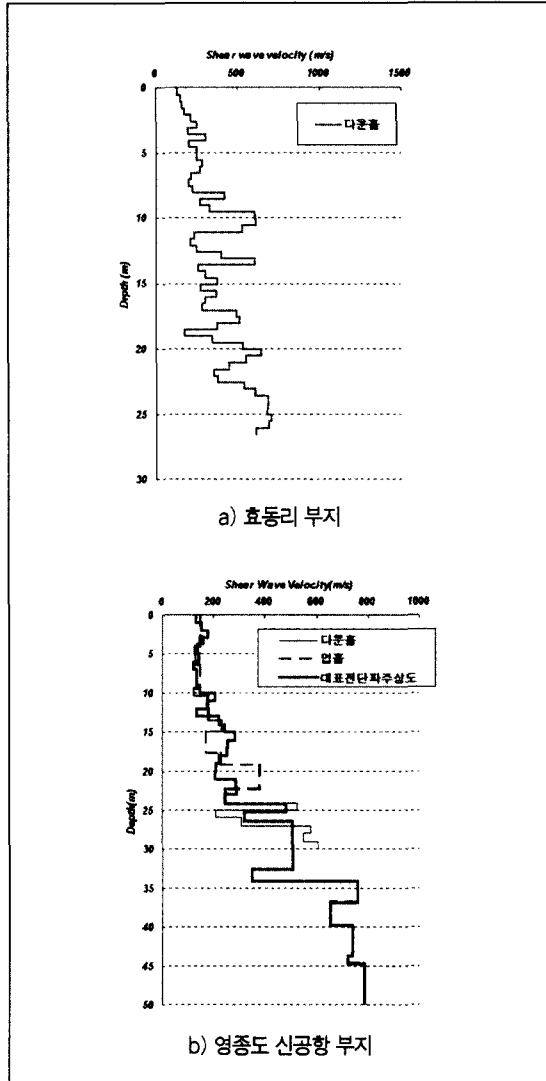


그림 4. 지진계 매설 부지에 대한 탄성과 시험 결과

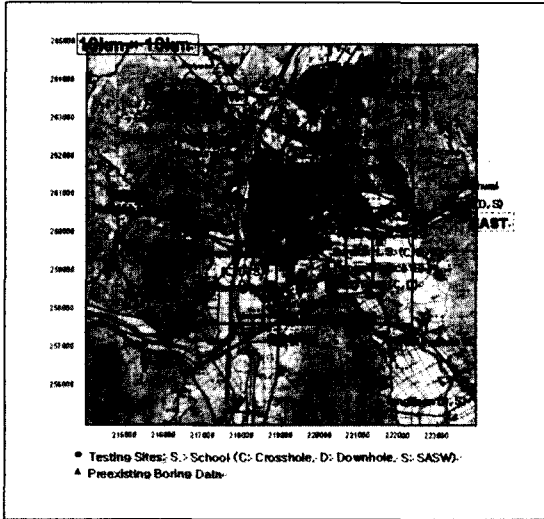


그림 5. 경주지역 지반조사위치 및 수행시험

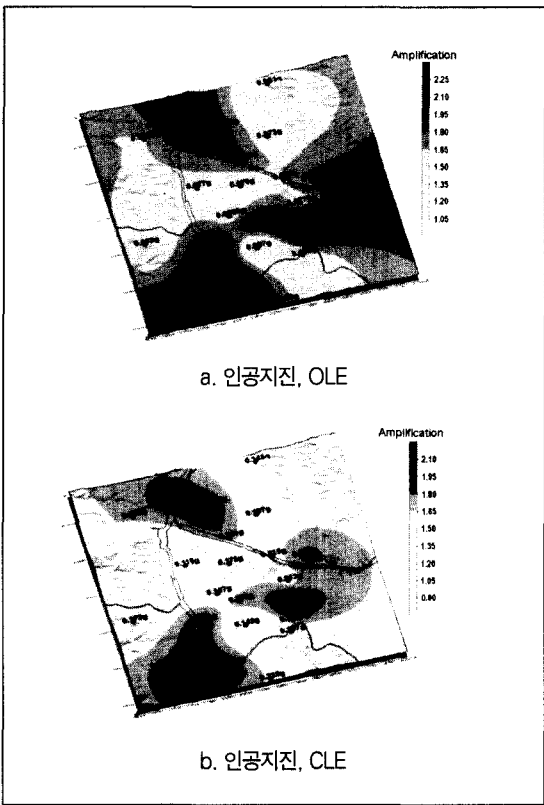


그림 6. GIS를 이용한 부지증폭평가 결과(지표면 가속도)의 도시

대상 지역을 설정하고 대상지역의 국부적 지반조건을 평가하기 위하여 기 수행된 153공의 지반조사자료와 17공의 시추조사, 탄성파시험(다운홀 12개소, 크로스홀 4개소, SASW 20개소) 및 실내시험을 실시하여 대상지역의 지반자료 데이터 베이스를 구축하였다. 그림 5는 1999~2000년도에 수행한 대상지역의 지반조사위치 및 수행시험 내력을 나타내고 있다. 이들 자료를 바탕으로 대상지역의 지층 구성을 파악하고 등가선형 이론에 근거한 지반응답해석을 수행하여 대상지역의 설계지반운동을 그림 6과 같이 결정하였다. 이와 같은 연구는 국내 지진재해도 작성을 위한 설계지반운동 결정의 좋은 모델이 될 수 있으나, 아직까지는 체계적인 연구가 이루어지지 않았다고 판단된다. 따라서 대상지역을 선택하고, 지반조사 및 지진응답을 수행하여 결과를 GIS 시스템을 이용하여 도출하고, 해당지역에 대한 지진위험도에 따른 체계적인 micro-zonation 작업을 수행한다면, 향후 장기 계획으로 필요시 되는 주요 도시별 또는 전국적 규모의 지진재해도 작성을 위한 훌륭한 모델이 설정될 수 있으리라 판단된다.

### 3. 말뚝기초의 내진설계

기초구조물의 내진설계 기법에는 크게 등가정적해석법과 지반-기초 동적상호작용을 고려한 해석방법이 있다(강좌 III). 말뚝기초의 경우, 등가정적해석법은 확대기초의 중심에 작용하는 지진하중을 계산하고, 균말뚝 해석을 수행하여 개별말뚝의 하중분담을 계산하여 가장 큰 하중을 받는 말뚝을 선정한 후, 단일 말뚝 해석을 수행하여 말뚝에 발생하는 변위, 전단력, 모멘트를 만족시킬 수 있도록 말뚝기초의 구성 부재에 대한 응력검토를 실시한다. 이때, 균말뚝 및 단일말뚝 해석기법은 정적인 횡하중을 받는 말뚝기초의 설계법과 동일하므로 등가정적 내진설계시 중요한 사항은 지진하중을 결정하는 방법이 된다. 지반-말뚝 동적상호작용을 고려한 말뚝기초의 내진해석은 주로 수치해석을 통하여 이루어진다. 그러나 해

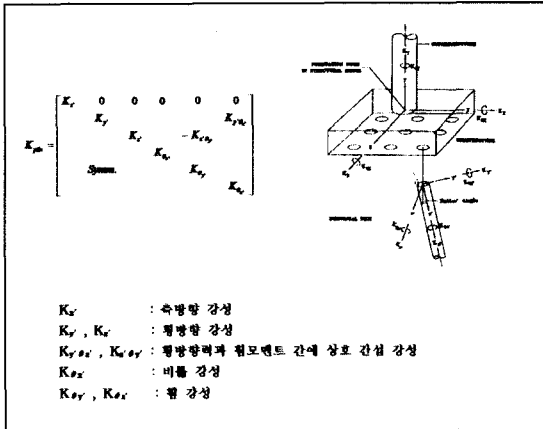


그림 7. 말뚝의 등가선형 스프링으로 모델

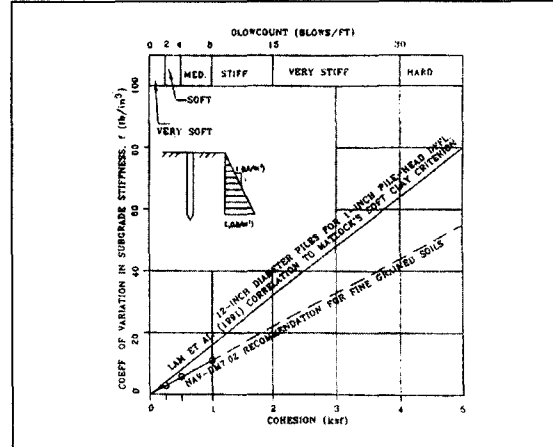


그림 8. 지반반력계수(점성토)

석을 수행하기 위한 지반-말뚝 모델링과 동적지반정수 선정에 매우 신중을 기할 필요가 있으며, 해석의 신뢰성을 입증할 수 있는 검증방법의 도입도 중요하다. 필자의 의견으로는 복잡한 수치해석기법은 기존의 검증된 해석기법의 확인차원에서 도입되는 것이 바람직할 것 같으며, 동적 수치해석기법에 의해 전체 설계가 좌우되는 것은 위험할 수 있다고 생각한다.

등가정적해석법에서 지진하중을 산정하는 방법은 자유장해석을 수행하여 부재의 응답스펙트럼을 결정한 후, 구조물의 주기를 고려하여 스펙트랄 가속도를 결정하고 기초에 작용하는 연직 하중과 곱하여 수평 지진하중을 결정할 수 있다. 이 방법은 사용의 간편성은 있으나 지반과 말뚝의 상호작용을 고려할 수 없는 단점이 있다. 미연방도로국(FHWA)에서는 지반-말뚝 상호작용을 고려하여 기초를 등가 선형 스프링으로 치환하는 방법을 적용하고 있는데 이에 대한 간략한 소개는 아래와 같다(I. PoLam, M. Kapuskar and D. Chaudhuri, 1998)

말뚝을 등가 선형 스프링으로 모델링 하는 방법은 말뚝에 자유도 6(병진방향 3, 회전방향 3)의 말뚝 강성행렬을 사용하여 모델링 하는 것이다(그림 7). 전체적인 말뚝-지반 강성은 지반분류, 강도, 비선형성 등의 지반특성과, 말뚝의 종류, 축방향 강성, 휨강성, 지름, 길이 등의 구조적인 특성을 고려하여 구한다.

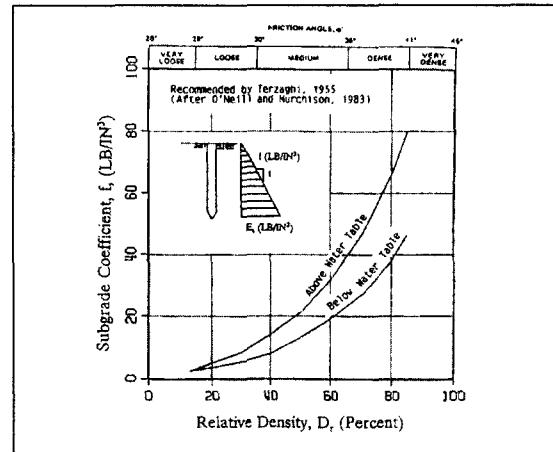


그림 9. 지반반력계수(사질토)

이를 고려한 단말뚝의 강성행렬은 그림 7과 같은 형태를 갖는다.

일반적으로 말뚝의 축방향 강성은 다른 자유도들과 독립적이다. 또한 축방향력에 대한 지반 저항의 대부분이 상대적으로 깊은 심도에서 발현되며, 횡방향 재하와 관계가 있는 지반-구조물이 상호작용하는 얕은 심도에서는 축방향 하중-변위 특성이 상대적으로 크게 중요하지 않다. 따라서 축방향 하중-변위 특성은 횡방향 하중-변위 특성과 독립적으로 고려될 수 있다. 단말뚝 등가스프링의 축방향 강성은 주변마찰

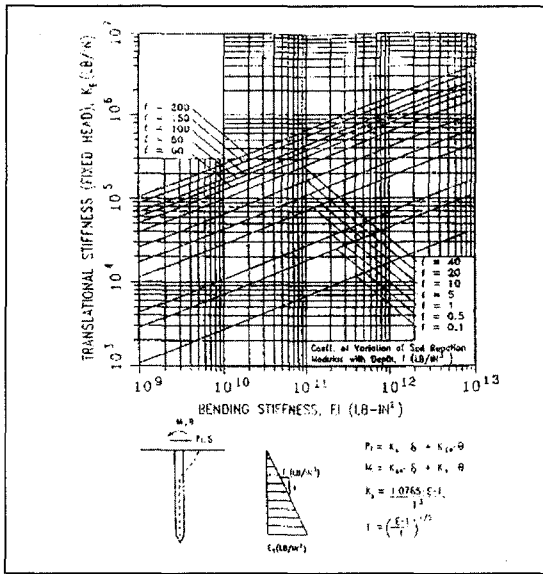


그림 10. 단일뚝 횡방향 강성을 구하는 도표

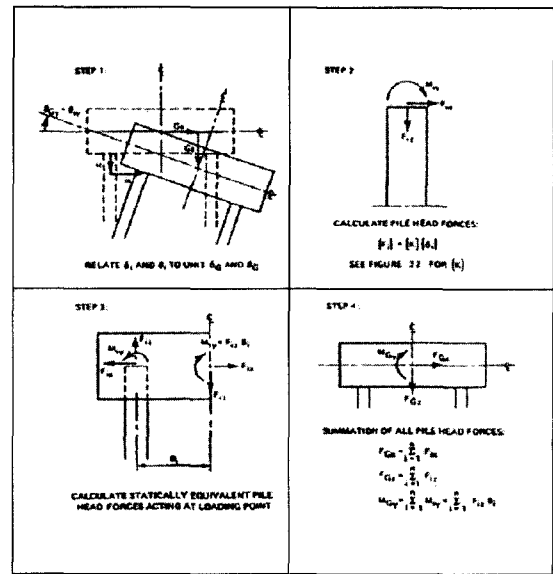


그림 11. 군말뚝 행렬을 구하는 절차

력-변위 관계곡선, 선단지지력-변위 관계곡선, 말뚝 자체의 축하중-탄성변위 관계를 고려하여 구한다. 이러한 관계들은 미연방도로국(FHWA)에서 제안한 방법에 따라 구해질 수 있다.

단말뚝 등가스프링의 횡방향 강성 및 휨 강성, 간섭 강성은 깊이에 따라 선형으로 지반 강성이 증가하는 지반에 대해 말뚝 두부 강성을 제시한 도표를 사용하여 구한다. 이 도표를 사용하여 말뚝 두부 강성을 구하려면 말뚝 자체의 휨 강성(EI) 과 지반반력계수(f)의 두가지 매개변수가 필요하다. 말뚝 자체의 휨 강성은 말뚝의 형상과 탄성계수를 알면 구할 수 있고, 지반반력계수는 표준관입시험 N치, 지반의 마찰각, 상대밀도, 점착력 등을 통해 구할 수 있도록 하였다(그림 8, 그림 9). 이 두가지 매개변수를 그림 10의 도표에 대입하여 단일뚝 등가스프링의 횡방향 강성을 구할 수 있고, 휨 강성, 간섭 강성 또한 이와 유사한 도표를 이용하여 구할 수 있다.

그러나, 등가스프링 모델링 방법은 지반이 단일층으로 되어있고, 깊이에 따라 지반의 강성이 증가하는 경우에 한정된다. 따라서 지반의 층상구조가 복잡하

거나 하중조건이 복잡한 경우에는 비선형 p-y 곡선을 이용한 모델링 방법이 필요하다. 이 방법은 과정이 복잡하고, 대부분 해석프로그램을 이용하여 이루어지므로 여기서는 따로 언급하지 않겠다.

마지막으로 군말뚝의 후팅을 강체로 가정하고 후팅의 중심점의 각 자유도 방향으로 각 자유도 단위변위를 유발시킬 때 개별 단일말뚝에 발생하는 저항력을 그림 11와 같이 중첩시키는 방법으로 전체 군말뚝 시스템의 강성행렬을 구할 수 있다.

말뚝을 등가선형스프링으로 모델링 한 후에는, 이를 전체구조물과 결합시킨 후 전체 구조물에 대한 해석을 수행한다. 이를 수행하기 위해서는 구조 분야의 전문가들과 협동 연구가 필요하다. 전체 구조물에 대한 해석이 끝나면, 군말뚝 후팅 중심에 가해지는 하중이 산출되며, 이를 이용해 기초의 안정성을 평가하는 작업은 등가정적 해석방법에서와 동일하다.

한편, 기건설된 기초구조물의 내진성능검토 및 안정성검토를 위해서는 기초구조물의 품질 및 상태 평가의 선행작업이 필요하다. 기초구조물의 내진성능검토를 위해서는 기초구조물이 설계대로 지정된 깊



이까지 근입되어 있는지의 여부 및 기초구조물 내부의 결함이 존재하는지의 여부를 조사할 필요가 있다. 기초구조물 내의 결함은 구조물의 변형 및 파손을 유발하고, 상부 구조물의 안전에 치명적인 영향을 미치게 된다. 그러나 건설중이거나 이미 건설된 기초구조물의 경우에는 이의 확인이 육안으로 불가능하기 때문에 탄성파, 또는 여러 종류의 전자파를 이용한 비파괴검사기법의 사용이 불가피하다. 따라서 기초구조물의 구조적 결함이나 주변 지반과의 지지 및 접촉 상태를 파악할 수 있는 결함조사법에 대한 관심이 증대되고 있고, 이에 대한 보다 효율적인 방법의 검토가 필요하다.

기초구조물의 비파괴검사방법으로는 크게 검측공을 이용하는 방법과 검측공을 사용하지 않는 비검측공 시험법으로 나눌 수 있다. 기 건설된 깊은 기초의 대표적인 검측공 시험에는 공내 탄성파시험(Parallel Seismic Test)이 있다. 이 방법은 기존 구조물의 결함 및 말뚝 길이 산정등에 이용되며, 특히, 말뚝 전체가 지중에 근입되어 있어 말뚝의 두부나 깊은 기초의 위 부분에 접근이 불가능할 경우에 사용하는 시험법으로, 기초 선단부 이하의 지반상태를 파악하는 데에도 이용한다. 콘크리트와 목재, 암질, 금속제 등의 다양한 재료에 적용할 수 있어, 현장타설말뚝 이외의 기초형식에도 적용될 수 있다. 말뚝 자체에 가속도계를 부착할 필요없이 말뚝에 연결된 부분의 임의 지점에서 타격하여 시험할 수 있고, 시험 결과가 비교적 정확한 반면에 말뚝에서 가까운 위치에

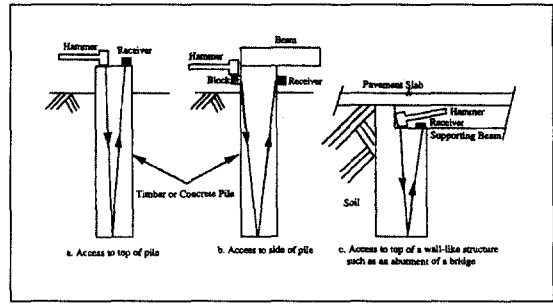


그림 13. 충격반향기법의 개요도

검측공을 시공해야 하는 어려움이 있다. 그림 12에 공내 탄성파시험의 개요도를 나타내었다.

기 건설된 깊은 기초의 두부에 접근이 가능할 경우, 말뚝 내부 혹은 말뚝 근접지반에 별도의 검측공 설치 없이 응력파(stress wave)의 유발 및 감지가 모두 말뚝 두부에서 수행되는 완전한 비파괴 시험 방법을 사용할 있다. 대표적인 비검측공 시험방법에는 충격반향기법과 충격응답기법이 있다. 충격반향기법이란 말뚝의 머리부분이나 중간부에 감지기를 설치하고 말뚝의 머리부분을 햄머로 타격하면 발생한 탄성파가 말뚝을 따라 전파되다가 선단부 및 중간 결함부에서 반사하게 되는데, 이러한 신호를 측정하여 말뚝의 길이 및 품질상태를 파악하는 시험방법이다. 그림 13에 충격반향기법의 개요도를 나타내었다. 본 방법은 말뚝 두부에서 실험이 이루어지므로 말뚝 두부에만 접근할 수 있다면 실험이 언제든지 가능하다. 즉, 검측공이 필요 없으므로 경제적이며 검사가 신속히 이루어진다는 장점이 있다. 하지만, 길이 대 직경(L/D)의 비가 30/1 이상인 긴 말뚝에는 적용하기 어려우며, 전문기술자가 부족한 점 등이 단점으로 지목된다.

충격응답기법의 시험은 충격력을 측정할 수 있는 하중 측정햄머(instrument hammer)로 말뚝의 두부를 타격하면 일시적인 진동이 생기는데, 이 때의 충격력과 발생한 탄성응력파의 신호를 충격반향기법과 마찬가지로 감지기로 얻어 말뚝 내부의 결함을 추정하는 방법이다. 본 방법을 주파수 영역에서 해석

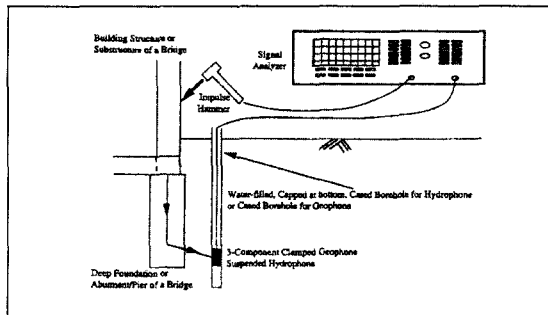


그림 12. 공내 탄성파 시험(Parallel Seismic기법)

할 경우 말뚝의 동적 강성(dynamic stiffness) 및 말뚝의 형상 등을 알아낼 수 있다.

#### 4. 액상화 평가

지진 발생시 지반이 경험하게 되는 가장 대표적인 파괴 현상이 액상화 현상이다. 국내에서도 내진 기준의 제정 및 이에 따른 내진설계시 지반공학 분야에서 심도있게 다루는 분야가 되었다. 액상화 포텐셜을 평가하는 간편법, 상세예측법, 국내상황을 고려한 액상화 평가방법들에 대한 심도 있는 언급이 강좌 VI에서 이루어 졌다.

국내에서 액상화 평가 간편법으로는 SPT N치에 의한 평가방법이 주로 사용되고 있다. 이 방법은 액상화 지역의 지반거동을 해석적이나 물리적으로 모형화하기 어려우므로 Seed와 Idriss(1971)의 간편법에 기초한 방법을 통해 액상화에 대한 안전율을 산정하는 기법이다. Seed 와 Idriss는 지진 시 액상화 발생 유무와 그 지역의 SPT N값과의 상관 Data base를 이용하였으며 각 나라별, SPT 장비별 차이점을 보정하기 위하여  $(N_1)_{60}$ 를 도입하였다. 이는 상재하중 1 ton/ft<sup>2</sup> (100kPa)과 에너지 효율 60%에 보정된 N치를 의미한다. 표준관입시험은 장비가 비교적 간단하고 시험에서 결정되는 관입저항치(N-값)로부터 지반의 강도정수를 추정하는 경험적 상관관계의 활용도가 높아 널리 사용되고 있다. 그러나, 표준관입시험은 명칭이 시사 해주는 것과는 상이하게 표준화되지 못하여 시험결과인 N치를 신뢰성있게 이용하는데에는 많은 문제점이 있다. 즉, 같은 시험법으로 동일한 지반에서 시험을 수행하더라도, 각 장비에 따라 구하는 N값이 차이를 보이고 있기 때문에 측정장비마다 고유한 에너지를 측정하여 특정한 에너지 비에서 결정된 N값으로 환산하여 적용하는 표준화가 필요하다. 일반적인 표준관입시험의 표준화 작업의 일환으로 관입시 타격하는 햄머의 순수 에너지에 대한 전달 에너지의 비(energy ratio)를 측정하여 적용하고 있다. 전달 에너지를 측정하는 방법으

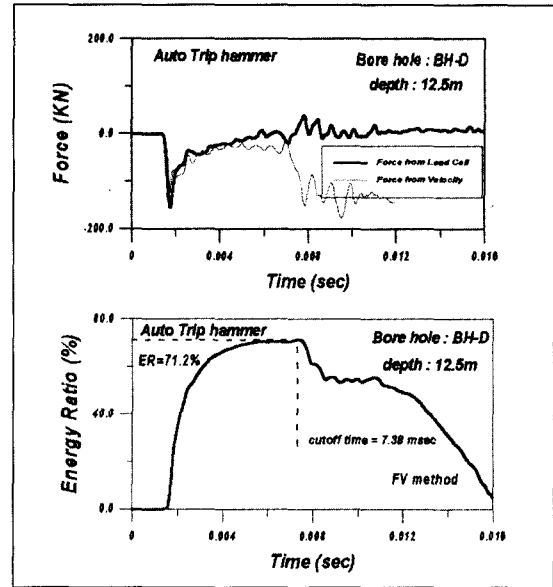


그림 14. 힘-속도 적분방법을 이용한 에너지 효율의 측정

로는 로드셀을 통해 힘 성분만을 측정하는 힘-적분방법(F<sup>2</sup>)과 힘 성분 이외의 속도성분까지 측정하는 힘-속도 적분방법(FV)이 있다. 다음 그림 14에 힘-속도 적분방법으로 에너지 효율을 결정하는 대표적인 예를 나타내었다. 현재 국내에서는 한국도로공사의 주관으로 한국과학기술원, 고려대학교, SK건설연구소 등의 협동연구를 통해 국내에서 사용되는 표준관입 시험 장비의 에너지 효율 측정을 통한 표준화작업 연구가 진행중이다.

또한, 외국에서는 CPT 시험 결과 및 전단파 속도를 이용하는 액상화 간편예측법도 보편화 되고 있다. Stark과 Olson(1996)은 액상화 평가하고자 하는 흙에 대한 입도분포 및 세립분 함량에 대한 자료를 이미 가지고 있는 경우에 유효상재압에 대해 보정된 CPT의 선단지지력 값을 이용하여 그림 15와 같은 도표로부터 액상화를 평가하는 방법을 제안하였다.

대상지반의 액상화에 대한 안전율이  $F < 1.5$  인 경우 또는 중요구조물의 경우에는 지진응답해석과 실내 진동삼축시험으로 액상화를 평가하는 상세예측법을 시행한다. 진동삼축시험에 의해 구해지는 액상화

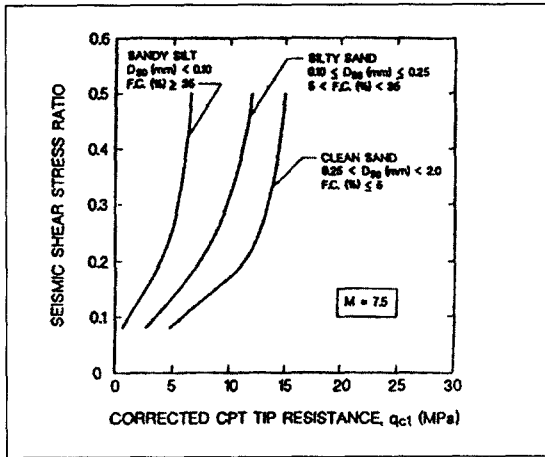


그림 15. CPT 시험결과를 이용한 액상화 평가 (Stark and Olson, 1996)

저항강도는 상대밀도, 응력상태, 결합구조, 변형을 이력등 여러 가지 여건에 의해 영향을 받으나, 실험실에서는 상대밀도와 응력상태만이 재현되므로, 정확한 동적물성을 획득하기 위해서는 대상지반으로부터 비교란 시료를 채취하여야 한다. 비교란 시료의 채취는 block sampling과 freezing의 방법 등이 있으나, 시간과 비용이 많이 들고 일정깊이 이하에서는 비현실적인 단점이 있어 보편적이지 못하다. 대부분의 경우, 시료는 교란 상태로 채취되며, 현장조건에 맞추어 재생형하는 것이 일반적이다. 시료의 재생형 방법은 층다짐법, 진동다짐, 건조모래 침전법, 수중 침강법, 습윤모래 성형법 등이 있으며, 진동삼축시험의 결과가 성형방법에 따라 상당히 다른 결과를 주므로 현장지반이 조성된 형태를 고려하여 성형방법을 선택하여야 한다.

실제 지반에 전달되는 지진하중은 수직으로 전파되어 지반을 순수전단의 모양으로 변형시킨다. 또한, 지반은 층상으로 형성되어 있어 수평층을 따라 균질하고 구속유효응력은  $K_0$ 의 응력비로 이방성을 가진다. 진동삼축시험은 액상화 저항강도를 구하는 보편적인 시험방법이기는 하나, 축방향 변형에 의한 시험이고  $K_0$ 조건을 구현하기 힘든 단점이 있어, 순수전단 변형과  $K_0$ 조건을 비교적 제대로 재현할 수 있는 순수

전단시험과의 비교 연구가 필요한 실정이다.

지반공학 분야의 액상화 판정기법에 있어서 현재 지반의 비선형 유효응력거동모델을 이용한 동적 지진응답 해석에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이러한 해석결과와 지역적인 부지특성 평가작업 결과를 바탕으로 하여 GIS Mapping기법을 이용한 액상화 재해지도를 작성하는 것이 향후 내진 설계를 위한 액상화 피해를 예측하는 중요한 분야가 될 것이다. 또한, 액상화로 인한 지반구조물의 피해를 예측하기 위해서는 지반이 액상화를 겪은 이후 일어나게 되는 변형 및 지반반력계수의 감소를 예측하기 위한 모델 개발이 필요하며 이를 설계에 반영하기 위한 설계절차 및 기법의 개발이 필요하다. 마지막으로 현 시점에서 개발된 여러 액상화 예측기법을 종합적으로 검토하여 액상화가 예상되는 지역에 대하여, 액상화 대책공법을 수립하고 경제적이며 적절한 액상화 방지 공법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

### 5. 지반 - 구조물의 동적 상호작용 해석법

지진이 작용하는 경우 실험, 계측 및 경험 등에 의하면 댐이나 원자력 발전소의 격납구조물과 같은 거대 구조물의 경우의 지진응답은 지진자체의 특성과 구조물이 위치한 지반의 조건, 구조물의 동적거동특성 외에도 지반과 구조물의 동적상호작용에 매우 큰 영향을 받는다. 지진에 의하여 발생된 지진파는 진원으로부터 지반을 매체로 하여 구조물의 기초에 도달하게 되며, 이에 의하여 구조물의 기초와 구조물이 운동을 시작한다. 또한, 기초를 포함한 구조물의 운동에 의하여 유발된 구조물의 관성력은 다시 기초를 통하여 지반에 작용하게 된다. 이와 같이 지반과 구조물이 서로 연관되어 운동하는 현상을 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure interaction, SSI)이라고 한다. 지반-구조물 상호작용은 특히 강성이 크고 부피가 큰 구조물이 상대적으로 연약한 지반에 위치한 경우 큰 문제가 된다.

우리나라의 경우 전반적으로 지반의 조건이 양호

함으로 인하여 구조물의 해석시 일반적인 지진해석만을 수행했지만, 건설부지의 선정이 점점 힘들어지는 현상황을 볼 때 좋지 않은 지반조건에서의 건설이 필요함에 따라 지반-구조물상호작용을 고려한 해석이 필요하게 되었다. 실제로 원자로 격납구조물이나 고정식 해양·항만구조물 등이 많이 건설되고 있는 현상황에서, 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석은 필수적이라 할 수 있다.

강좌 V-1에서는 지반-구조물 동적 상호작용 해석법에 대한 개념과 지반구조물의 동적해석을 위한 여러 가지 기법(정적 해석기법, 수정진도법, 동적해석 기법)에 대한 설명이 이루어졌다. 또한, 강좌 V-2에서는 여러 지반구조물(사면, 댐, 항만구조물, 원자력 구조물 및 지중박스구조물)에 대한 동적해석의 자세한 사례를 담고 있다.

근래 들어 우리나라를 포함하여 전세계적으로 빈발하는 지진 등으로 인해 지반과 구조체의 동적 메카니즘에 관심이 높아지면서 이 분야에의 여러 이론의 개발 및 재해석과 평가가 이루어지고 있으며, 또한, 실무에서는 이와 같은 영향을 받아 해석 패키지들이 정력적으로 개발되어지고 있다. 동시에 지금까지 사용했던 여러 해석 패키지들의 적용방법과 적용한계, 바른 사용방법 및 효율적으로 보다 실제 현상에 가깝게 표현하려고 하는 경향이 높아져 가는 추세를 부인할 수 없다. 그러나, 일반인은 물론 이 분야의 전문인조차 동적 해석에 대해 추상적으로 받아들이는 부분이 많은 것 또한 사실이다.

실제 지진응답해석의 모델링이나 해석은 상당히 어려운 작업이고, 그 결과의 평가도 쉽지 않은 것은 사실이다. 그래서 무조건적으로 지진응답해석에 의해 동적해석을 실시하는 것이 아니라 유사정적해석 등의 기존의 검증된 지진력을 고려할 수 있는 방법으로서의 접근한 후, 해석결과를 평가·검증하는 수단으로 사용하는 것이 필요하다고 여겨진다.

현재까지는 동적해석 및 지반-구조물 상호작용 해석의 경우 대부분의 경우 지반의 정확한 비선형성(유효응력 개념)을 고려하지 못하는 주파수영역에서 선

형 또는 등가선형 해석이 이루어 졌으나, 국·내외적으로 지반의 비선형 거동특성과 동적하중에 의한 간극수압 유발문제 등과 같은 동적하중에 대한 지반의 다양한 거동 특성을 고려할 수 있는 거동모델의 개발 중에 있으며 이를 이용한 시간영역에서의 비선형 지반-구조물 동적 상호작용에 대한 해석이 주류를 이루게 될 것으로 예상된다.

## 6. 지반 진동 및 방진대책

건설 기계 및 교통하중으로 발생한 과도한 지반진동의 전파는 인접 구조물의 손상 및 인근 주민의 생활 불편을 야기할 수 있다. 이에 대한 대책으로 현장 진동 계측자료를 바탕으로한 진동 저감대책을 세우거나 진동 피해 예상 지역으로부터 진동원 이격거리를 두어야 한다. 그러나, 실제 진동 계측은 진동 발생 후 이루어지므로 대상지역이 아닌 지역에서 계측된 자료로부터 대상지역의 진동 특성을 미리 예측하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 진동원의 특성과 지반 조건에 따른 진동 감쇠 특성을 예측하는 것이 효율적인 방법이다.

강좌 VI에서는 철도진동원을 중심으로 철도진동의 특성, 지반진동의 물리적 표현방법, 진동파의 전파 및 감쇠특성, 진동원의 특성 및 방진대책에 대해서 종합적으로 서술하고 있다.

지반진동은 그 수준이 어느 한계를 넘어서면 주위 구조물이나 시설물에 피해를 유발하게 된다. 구조물이나 시설물의 종류가 다양하고 구조적 또는 성능상의 특성이 다양하므로 피해를 미치는 수준에 대하여 일반적으로 적용할 수 있는 기준을 설정한다는 일은 용이하지 않다. 국내의 경우 여러 종류의 지반진동의 허용 기준에 대한 구체적 규정이 제정되어 있지 못하고 지하철 터널굴착 공사에 통상 적용하고 있는 기준안이 있다. 그러나 초기 외국에서 제안된 기준을 참고하여 작성된 것으로 기술적 자료의 배경이 미흡한 상태이고 그동안 현장 적용에 있어서 보수적이라는 지적과 함께 여러 가지 문제점들이 제기되고 있다.

허용 기준에 대한 대표적인 예로 미국과 독일의 경우와 국내 통상 적용하고 있는 기준을 기술하면 다음과 같다.

① 미국

국가규준으로 제정된 것은 없고, 특별히 발파진동과 관련, 잘 알려진 미 광무국(USBM) 및 노천 광산국(OSM)의 기준을 토대로 이른바 "2 ips(inch per second)" 안전치 기준이 통용되고 있다. USBM의 규준을 살펴보면, 주파수 40Hz를 중심으로 40Hz이상의 진동주파수를 갖는 발파진동에 대해서는 5cm/sec가 안전기준치로서 적용될 수 있으나, 40Hz이하의 낮은 진동주파수를 갖는 발파진동에는 손상받을 확률이 높아 안전기준을 1.2cm/sec로 낮추어야 할 것이 보고되었다. 미국의 노천채광청(OSM)은 노천 석탄채광작업에 대한 안전기준으로 미광무국의 기준을 수정하여 제안하고 있다.

② 독일의 표준서 DIN4150

독일은 DIN4150(Structural Vibration in Buildings)을 통하여 국가 규준으로 제정 적용하고 있다. DIN4150은 3개의 별도 규정으로 구성되어 있는데 구조물의 손상에 관한 것은 DIN4150-part 3(Effects on Structures)이다. 독일의 DIN4150-part 3 (1986)은 기본적으로 일시진동과 정상진동을 구분하고, 구조물의 형태를 3종류로 구분하여 구조물전체와 구조물부재에 대해 주파수 대역별로 진동치를 제한하고 있다.

③ 국내 통상 허용기준

국내에서는 발파진동에 대한 구체적인 규제조항은 아직 규정되지 않은 상태이며, 서울시 지하철공사 발파작업에서 통상 적용하고 있는 기준은 독일의 국가 표준서 DIN4150(1971년도)을 기초로 하였으며, 진동주파수에 관계없이 대상구조물 형태를 4종류로 분류하여 0.2cm/sec에서부터 4.0cm/sec까지의 기준을 적용하고 있다.

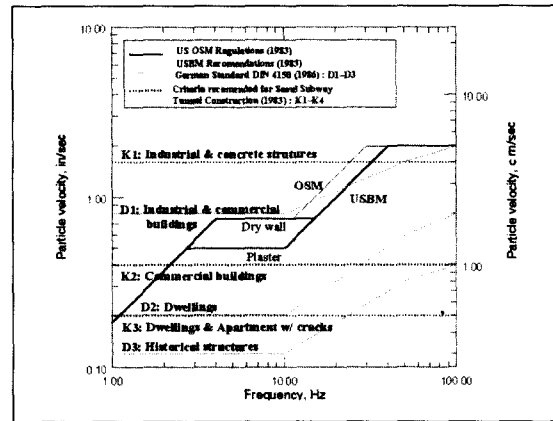


그림 16. 국내의 각종 진동규제 기준의 비교

각각의 기준을 함께 도시하면 그림 16과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 국내 통상 적용하고 있는 수준은 타 기준안보다 보수적임을 보여주고 있다.

매질을 따라 전파하는 응력파는 매질 내부를 따라 전파하는 체적파(P파, S파)와 매질 표면을 따라 전파하는 표면파(R파)로 나눌 수 있다. 이러한 파의 구분은 파의 전파속도와 파의 전파에 따른 매질 입자의 거동 특성에 의해 구분된다.

파가 매질의 표면을 따라 전파할 때 기하학적 감쇠에 의한 진폭의 감소가 발생하는데 이러한 감쇠의 크기는 파가 전파하는 모양(Wave front)에 따라 좌우된다. 구의 형태로 전파되는 체적파(P파, S파)는 진동원으로부터 거리의 제곱에 비례하여 진폭이 감소하나 실린더 형태로 전파되는 표면파는 거리의 제곱근에 비례하여 감소한다.

반무한탄성체에서 발생한 파가 매질을 따라 전파될 때 발생된 파의 종류에 따라 서로 다른 입자운동(Particle motion)으로 전파가 일어난다. P파의 경우 파의 진행방향과 동일 방향으로 입자운동이 일어나며 전파가 되고, S파의 경우 파의 진행방향에 직각 방향으로 입자운동이 일어나며 전파가 된다. S파의 경우 파의 진행방향에 연직방향으로 입자운동이 일어나는 SV파와 수평방향으로 입자운동이 일어나는 SH파로 나뉘어 전파가 일어난다. 또한 R파의 경우

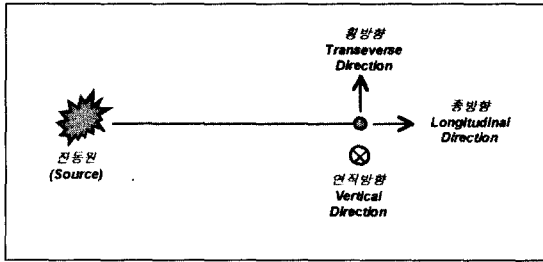


그림 17. 진동방향의 정의

표 2. 진동원의 위치와 형태에 따른 기하감쇠계수

진동원의 위치	하중의 형태	발생파의 종류	기하감쇠계수 n
반무한 탄성체 표면	점진동원 (point source)	체적파	2.0
	무한 선진동원 (infinite line source)	표면파	0.5
반무한 탄성체 내부	점진동원 (point source)	체적파	1
	무한 선진동원 (infinite line source)	표면파	0

진행방향에 대하여 반시계방향의 타원운동을 하며 전파가 일어나게 된다.

공간상에서 전파하는 지반진동의 각 성분별 진동 입자속도의 크기는 연직 좌표계내에서의 3방향(종 : longitudinal direction, 횡 : transverse direction, 연직 : vertical direction) 벡터성분으로 나누어 표시가 가능하며 정의는 그림 17과 같다.

일반적으로 진동의 전파 거리에 따른 감쇠는 기하학적 감쇠(Geometric Attenuation)와 재료감쇠(Material Attenuation)의 두가지 원인으로 발생한다. 현재, 현업에서의 지반진동 계측은 지반 진동의 전파 경로를 고려하지 않고 지표면에서만 이루어지고 있으며, 감쇠 예측 또한 진동원에 따른 지반진동의 전파 특성을 고려하지 않은 경험적인 방법이 사용되고 있는 실정이다. 지반진동에 영향을 주는 변수들을 대별하면 1)진동원에너지 2)지반조건 3)진동원으로부터 측정지점까지의 거리 등이며 지역적 특성과 진동원 조건에 따라 다르므로 대상지역별지반진동특성을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다.

Bornitz(1931)는 진동의 기하감쇠와 재료감쇠를

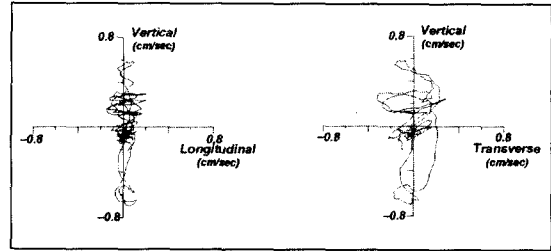


그림 18. 지반진동의 2차원 평면상 도서를 통한 발생파 확인 (강관말뚝 향타, 연직 진동하는 SV파)

동시에 포함하는 진동감쇠식을 다음과 같이 제안하였다.

$$A = A_1 \left( \frac{r_1}{r} \right)^n \exp[-\alpha (r-r_1)]$$

여기서,

A : 진동원으로부터 거리 r에서의 진동의 입자 속도

A<sub>1</sub> : 진동원으로부터 거리 r<sub>1</sub>에서의 진동의 입자 속도

n : 기하감쇠계수

a : 재료감쇠계수

위의 식에서 (r<sub>1</sub>/r)항은 기하감쇠를 나타내며, exp[-α(r-r<sub>1</sub>)]항은 재료감쇠를 나타낸다. 표 2에 응력파의 종류에 따른 기하감쇠계수를 나타내었다. 재료감쇠는 지반내에서의 응력파의 속도, 지반의 감쇠비, 진동주파수 등의 영향을 받는다.

지반진동은 진동원의 위치 및 형태에 따라 주된 발생파의 종류가 다르게 된다. 따라서, 진동원에 따라 발생하는 주된 발생파의 종류 및 크기를 실험적으로 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서 일반적으로 계측이 이루어지고 있는 지표면 연직진동 크기 계측 외 지표면 및 지중에서 진동의 3방향 성분(연직, 종, 횡 방향)계측하여 2차원 평면상에서 지반진동에 의한 지반입자의 운동을 도시하면 주된 발생파의 계측이 가능하다(그림 18).

또한, 지반진동의 거리별 감쇠 특성을 예측하기 위

표 3. 진동원에 따른 진동원 형태 분류 및 주된 발생파의 종류

지표면	점하중	객차량이 짧고 주행속도가 빠른 열차	체적파	2.0
		유압햄머 다짐	표면파	0.5
무한 선하중	무한 선하중	객차량이 길고 주행속도가 빠른 열차	체적파	1.0
		-	표면파	0
지중	점하중	지중 발파 마찰밀뚫 항타	체적파	1.0
	무한 선하중	-		0.5

해서는 진동원의 기하감쇠 특성 및 주된 발생파를 파악하여 이를 이용한 기준에 제안된 감쇠식을 이용하여 진동의 감쇠정도를 예측하여야 한다. 한국과학기술원에서 지난 수년간 여러 지반진동원에 대한 계측 결과를 바탕으로 제안된 진동원에 따른 기하감쇠 특성 및 주된 발생파의 종류는 표 3과 같다(김동수, 이진선, 1999).

최근에는 유한요소법 및 경계요소법을 이용하여 지반진동의 전파 및 감쇠를 예측하는 방법이 국·내외에서 연구가 되고 있으며, 이를 위해서는 신뢰성있는 경계요소의 개발, 진동원의 모델링, 지반의 비선형 동적 거동모델 및 지반조사기법의 발전이 선행되어야 한다. 불가피하게 진동원으로부터 피해 예상지역까지 일정 간격의 이격 거리를 확보하기가 힘든 경우에 대해서는 진동차단벽 및 방진재료를 이용한 진동 감쇠 방법을 사용하여야 하며 이에 대한 연구 또한 진동원 및 지반조건에 따라 지속적인 연구가 필요하다.

### 7. 맺음말

지금까지 본 학회의 지반진동위원회가 주관이 되어 “지반진동과 내진설계”라는 제목으로 여러 분야의 강좌를 연재하였다. 본 글에서 요약 정리한 바와 같이 (1) 지반의 동적물성치, (2) 설계지반운동 및 토구조물, (3) 말뚝기초의 내진설계, (4) 액상화 평가, (5) 지반-구조물 동적 상호작용 해석법, (6) 지반진동 및 방진대책 등의 주제에 대한 포괄적인 내용을

그 분야의 전문가들이 직접 작성하였으며, 각각의 내용은 이 분야에 종사하는 실무 토목기술자들에게 이해하기 쉬울 뿐만 아니라 현업에 바로 적용할 수 있도록 집필이 이루어졌다고 생각된다.

따라서, 지반진동 및 내진설계를 처음 접하는 현업 기술자들에게는 이 분야가 다소 생소하고 어렵게 느껴질지라도 이 분야에 대해 관심을 갖고 계속 접하게 되면 현업에 적용할 수 있는 기본 역량을 갖출 수 있을 것으로 확신한다.

마지막으로 이번 강좌가 훌륭히 마무리 될 수 있도록 힘써 주신 여러 교수님들과 집필위원님들에게 감사드리며, 이번 강좌를 계기로 국내 지반진동 및 내진설계의 분야가 보다 활성화되고, 경제적이며 신뢰성 있는 내진설계가 수행되며, 아울러 이 분야의 저변확대가 지속적으로 이루어지기를 기대한다.

### 참고문헌

1. 김동수, 이진선(1999), “다양한 지반진동의 전파 및 감쇠 특성”, 대한토목학회논문집, Vol. 19, No. III-5, pp. 1021-1032.
2. 조성호, 목영진, 장현삼 (2000), “지반의 동적 물성치 측정을 위한 탄성파 기법과 결과의 이용”, 지반, 지반공학회, Vol. 16, No. 2, pp. 34-42.
3. 해양수산부, (1999), “항만 및 여항시설의 내진설계표준서”.
4. FEMA, NEHRP, Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provisions, 1997.
5. FEMA, NEHRP, Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Commentary, 1997.
6. Idriss, I. M. (1995), “Assessment of Site Response Analysis Procedures”, National Institute of Standards and Technology, NIST GCR 95-667.
7. I. PoLam, M. Kapuskar and D. Chaudhuri, (1998),

"Modeling of Pile Footings and Drilled Shafts for Seismic Design", Technical Report MCEER-98-0018.

8. 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.

9. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, pp.1249-1274.

10. Unified Building Code, Administrative, Fire-and Life-Safety, and Field Inspection Provisions, Volume II. International Conference of Building Officials, 1997.

### 현장기술자를 위한 말뚝기초 워크샵

우리학회 기초기술위원회는 아래와 같이 현장기술자를 위한 워크샵을 개최하오니 많은 참여 부탁드립니다.

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 일시 : 9월 14일(금) 12:00 - 18:10                            | 2. 장소 : 부산광역시청 대회의실 |
| 3. 주관 : 한국지반공학회(기초기술위원회)                                   | 4. 주최 : 부산광역시       |
| 5. 일정 : 12:00 ~ 13:00 등록                                   |                     |
| 13:00 ~ 13:30 개회사 및 내·외빈 축사<br>(위원장, 학회장, 부산광역시장)          |                     |
| 13:30 ~ 14:00 저소음 저진동 말뚝기초의 지지력 산정법<br>(김명학 교수, 인제대)       |                     |
| 14:00 ~ 14:30 부산지역의 대심도 델타지반의 기초공법사례 연구<br>(정성기 박사, 부산광역시) |                     |
| 14:30 ~ 15:00 말뚝의 부주면마찰력 산정 및 허용하중 결정<br>(정상삼 교수, 연세대)     |                     |
| 15:00 ~ 15:30 광섬유센서에 의한 말뚝의 하중전이 측정<br>(이우진 교수, 고려대)       |                     |
| 15:30 ~ 15:50 커피 브레이크                                      |                     |
| 15:50 ~ 16:20 말뚝기초의 차세대 설계법 개발 연구<br>(윤길립 박사, 한국해양연구원)     |                     |
| 16:20 ~ 16:50 타입말뚝의 지지력 증가 효과의 실무적용<br>(조천환 박사, 파일테크)      |                     |
| 16:50 ~ 17:20 암반근입 현장타설말뚝의 비파괴 건전도 평가<br>(김동수 교수, KAIST)   |                     |
| 17:20 ~ 17:50 개정된 도로교 설계기준의 말뚝기초 설계 주요 개념<br>(최용규 교수, 경성대) |                     |
| 17:50 ~ 18:10 질의 및 토의                                      |                     |

6. 참가비 : 회원(일반 10,000원 / 학생 5,000원), 비회원(20,000원)

연락처 : 유한규 교수(031-400-5140) / 최용규 교수(051-620-4753) / 강현욱 과장(02-3474-4428)