

지반진동 분야 연구 및 기술동향

지반진동기술위원회

1. 개요

최근 들어 우리나라도 지진에 결코 안전한 지역이 아니라는 의식이 확산되면서 지반진동 및 내진설계에 대한 학계와 업계의 관심이 고조되고 있다. 현재까지 학계에서는 꾸준한 연구를 거듭하여 이제는 어느 정도 이 분야의 연구에 대한 기반이 형성되고 있는 것으로 사료된다. 그러나 향후 이 분야의 기술자립도를 현재 수준보다 높은 수준으로 제고하고 우리 실정에 걸맞은 설계기준 등을 제시할 수 있는 정도의 연구성과를 얻기 위해서는 아직도 꾸준한 연구와 투자가 계속 되어야 할 필요가 있다. 업계에서도 많은 프로젝트 수행을 통해서 다양한 구조물에 대한 내진설계를 이미 수행하고 있는 실정이다. 그러나 아직도 내진설계 기술의 향상과 실무자들의 이해를 보다 증진시켜야 할 필요가 있으며 이를 위해서는 산학공동의 노력이 요구되고 있다. 이러한 배경에서 본 고에서는 국내외의 지반진동 및 내진분야의 연구 및 기술동향을 간략히 정리하여 봄으로써 내진실무 및 연구동향의 정보로서 제공하고자 하였다.

이병식, 공주대학교

2. 지반의 동적물성치 산정을 위한 연구 및 기술동향

2.1 개요

지반진동 해석 및 내진설계를 위하여는 신뢰성

있는 지반의 동적 물성치 산정이 매우 중요하다. 국내의 내진설계시 턴키 제도와 같은 경쟁입찰로 인하여 설계시 다양한 첨단 지반조사기법이 적용되고 있는 상황이나, 이러한 지반조사 결과의 신뢰성과 결과를 설계변수에 적용하는 면에 있어서는 미흡한 점이 많은 실정이다.

본 절에서는 현재 국내외에서 부지특성평가 및 내진설계에 사용되고 있는 현장 및 실내 시험기법을 종합적으로 검토하고 최근 연구동향을 언급하고자 한다. 또한, 지진시 지반운동의 실증적 연구를 위해 수행되고 있는 미국의 ROSRINE 프로젝트와 Downhole Seismic Array의 적용에 대해 간략히 기술하고자 한다.

2.2 부지특성평가를 위한 시험기법

지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파 특성을 고려한 설계응답스펙트럼의 작성, 지진시 지반의 변형률 및 전단응력의 예측, 지반구조물의 안정성 확보를 위한 지진에 의한 동적하중의 산정을 위해 부지 응답특성평가가 수행되어진다.

이를 위하여 지반의 층상구조, 지하수위, 기반암까지의 깊이, 각 층의 밀도, 지반의 응력상태, 전단파속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성의 평가가 필요하다. 시추를 하며 표준관입시험을 수행하여 지반의 층상구조 등을 결정하며, 깊이에 따른 지반의 강성을 평가하기 위해 크로스홀, 다운홀, SASW 기법 등의 현장 탄성파 시험을 수행하여 대상지반의 전단파속도(V_s) 주상도를 결정한다. 그리고 각 층에서 시료를 채취하여 공진주/비틀전단

시험, 미소변형 삼축압축시험, FFRC, 벤더엘리먼트 시험과 같은 실내시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 등의 지반의 변형특성을 평가한다. 이러한 지반조사기법들은 건설되는 구조물의 중요성, 시험장비의 가용성, 지반조사비용 등을 고려하여 수행하는 지반조사기법의 조합이 결정된다.

본 고에서는 지반의 변형특성을 평가하는데 사용되는 현장 및 실내시험 기법에 관해 언급하고자 한다. 한편 이러한 시험방법들로 구해지는 지반의 강성은 각 시험의 하중주파수 등에 따라 정적(static) 강성, 반복(cyclic) 강성, 동적(dynamic) 강성 등으로 구분할 수 있다. 삼축시험과 같은 정적시험에서는 하중을 시간에 따라 비교적 천천히 단조증가시키며 시험이 수행되어 정적강성이 획득된다. 반면 반복재하 및 동적시험에서는 하중이 반복재하되어 강성이 획득되며, 시험하중주파수에 따른 관성효과의 유무에 따라 반복강성과 동적강성이 구분된다. 통상적으로 정적물성치와 동적물성치는 다른 물성치라고 인식되었으나, 최근들어 정적시험에서 계측의 정확도 증가로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들었다. 하중이 정적 혹은 동적, 어떤 방식으로 유발되든 변형률 크기, 재하속도, 하중반복회수 등을 고려할 경우 동일한 물성임이 밝혀졌다. 대표적인 현장 및 실내시험으로부터 획득 가능한 변형률 범위는 그림 1에 나

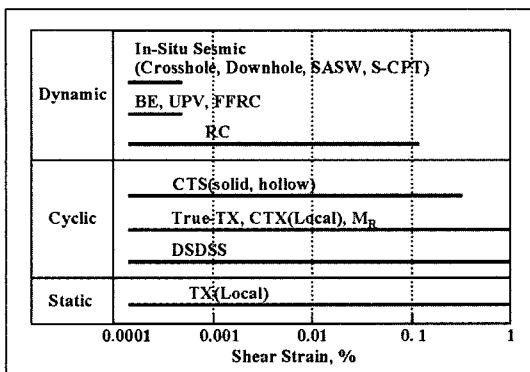


그림 1. 시험별 신뢰성 있는 변형률 구간

타내었다.

(1) 현장시험

지반의 최대 탄성계수를 도출하기 위해 현장 탄성과 시험이 수행된다. 현장 탄성과 시험을 통해 지반의 평균적인 속도 주상도를 획득할 수 있다. 현장 탄성과 시험은 크게 시추공탐사법과 표면파 탐사법으로 나뉜다.

시추공 탐사법은 시추를 통해 조성된 시험공을 이용하는 것으로 크로스홀(Crosshole) 시험, 다운홀(Downhole) 시험, 인홀(Inhole) 시험, SPS(Suspension PS) 검층, 업홀(Uphole) 시험 등이 있다. 크로스홀 시험은 가진원용 시험공 1개와 감지기용 시험공 1개 이상을 이용하여, 시험공 사이 지반의 전단파 속도를 측정하는 시험으로 해석이 간단하며 신뢰성이 매우 높다. 다운홀 시험은 감지기용 시험공 1개와 지표면 가진원을 사용하여 층별 속도를 도출하는 것으로 시험공 1개로 시험이 가능하다는 장점이 있지만 지표면 가진원 사용으로 인한 시험 심도의 한계가 있다. 인홀 시험은 1개의 시험공내에 종열로 연결된 가진원과 감지기를 삽입하여 구간별 속도를 측정하는 시험이다(Mok 등, 2003). SPS 검층은 인홀과 유사하나 시험공내에 가진원과 감지기가 유수 내에 부유된 상태에서 시험을 수행한다. 업홀은 지표면 감지기와 공내 가진원을 이용한 실험으로 최근에 SPT 가진원을 이용한 업홀시험이 국내에 적용된 바 있다(김동수 등, 2003). 효율적인 시추공 탐사법의 수행을 위해서는 시추시 지반의 교란을 적게 하고, 시추 종료후 지반과 시험공과의 접촉을 확실하게 하는 것이 중요하다. 업홀 시험은 별도의 시험공 제작이 필요 없이 시추와 동시에 수행할 수 있으므로 앞으로 국내 현장에서 효율적인 적용이 기대된다.

표면파 시험은 지표면 감지기와 지표면 가진원을 사용하여 지층의 속도 주상도를 비파괴적으로 획득하는 기법이다. 실험 방법 및 해석 기법의 차이에 따라 SASW(Spectral Analysis of Surface

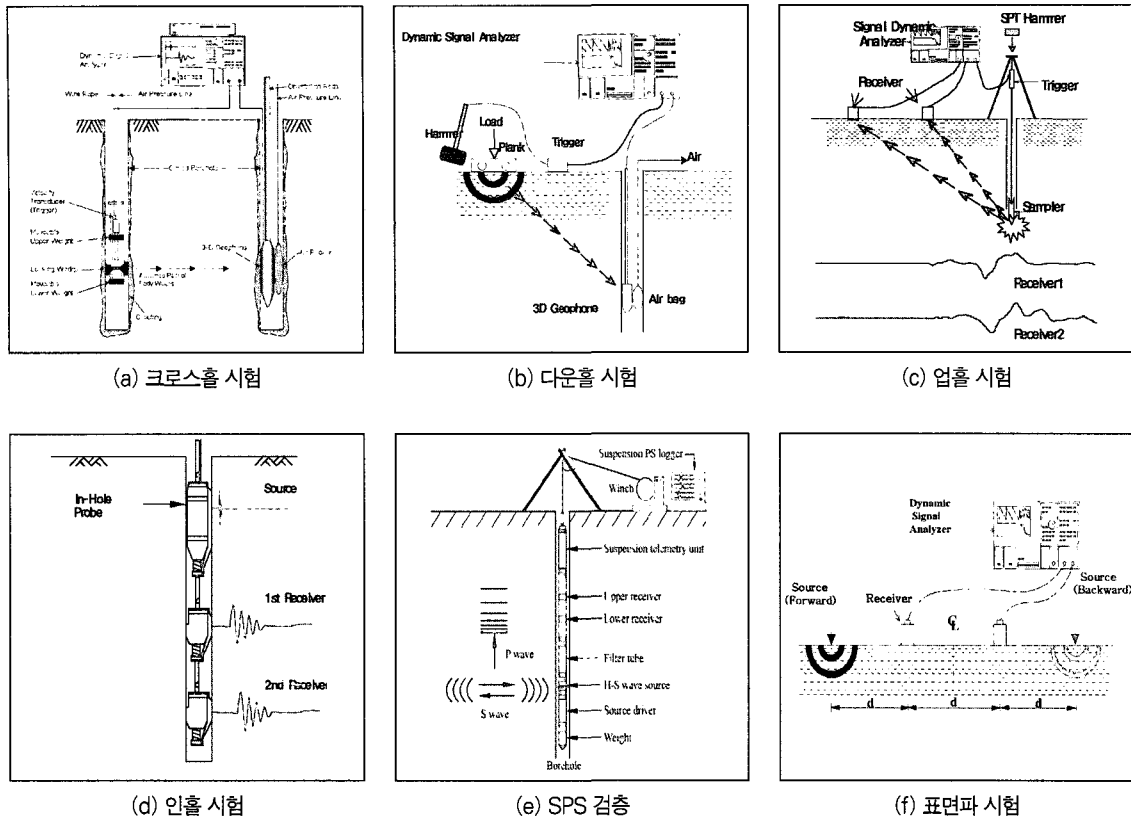


그림 2. 현장 탄성과 시험

Waves), MASW(Multichannel Analysis of Surface Waves), HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 등이 있다(Jianghai 등, 2002). 표면파 시험은 지표면에서 P파와 SV파의 간섭에 의해 발생하는 표면파를 감지기 2개 이상에서 획득하여 위상차나 파수(Wave Number, K) 분석을 통하여 지반의 물성치를 대변하는 분산곡선을 도출할 수 있다. 역산 과정을 통하여 분산곡선은 지반의 속도 주상도로 변환 되어진다. SASW는 지난 수십년 동안 여러 공학적 문제에 성공적으로 적용되어 왔으며 다채널 SASW를 통해 결과의 2차원 영상화를 구현하기도 하였다. 최근에는 주파수-파수(F-K) 변환을 이용하여 분산곡선을 도출하는 MASW, 하모닉 웨이블릿을 이용하여 위상속도를

신뢰성 있게 도출하는 HWAW가 개발되어 사용되고 있다(그림 3). 이 중 웨이블릿 변환(시간-주파수 해석)을 이용하는 HWAW는 주파수 해석의 단점을 극복하며, 주변잡음의 영향을 최소화하여 좁은 공간에서 두 개의 감지기만으로 간단히 실험 수행이 가능하여 매우 효율적이다(Kim 등, 2002).

(2) 실내시험

대상현장에서 채취한 시료를 이용하여 실내시험을 수행하여 지반의 변형특성, 곧 변형률에 따른 지반의 전단탄성계수(G-logγ)와 감쇠비(D-logγ)를 획득한다.

이러한 시험기법으로는 공진주(RC)시험, 비틀전단(CTS)시험 등이 널리 이용되고 있다. 공진주

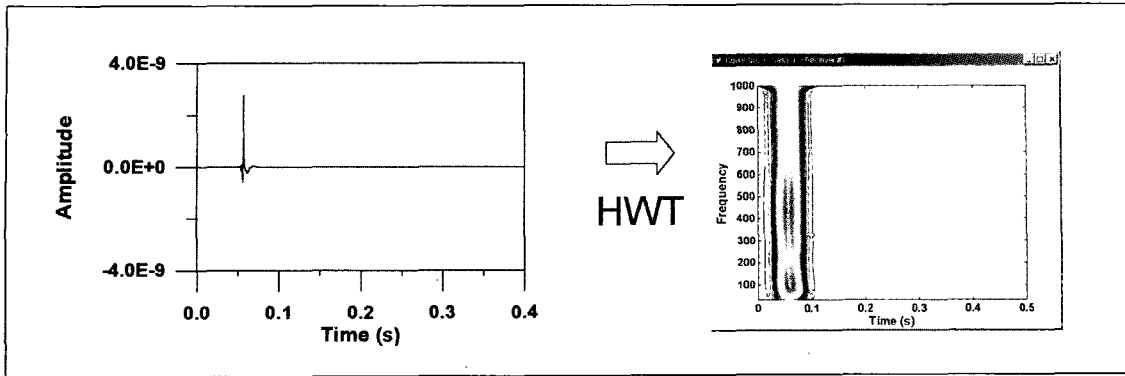


그림 3. 하모닉 웨이블릿 변환을 통한 Time-Frequency 해석

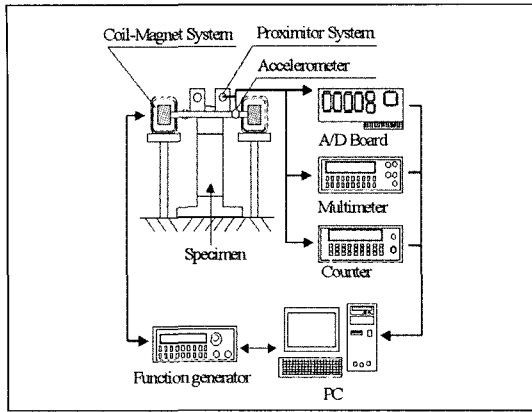
시험에서는 시료에 주파수를 바꾸어 가며 비틀진동을 주어 주파수 응답곡선을 획득하여 지반의 변형 특성을 획득한다. 비틀진단시험에서는 보통 공진주 시험과 동일한 시험기를 사용하여 시료에 반복하중을 재하하며, 재하되는 비틀력과 비틀각을 측정하여 응력-이력곡선을 획득하여 지반의 변형특성을 획득한다. 보통 널리 이용되는 공진주/비틀진단 시험기는 시료에 비틀력을 가하기 위해 코일-자석 시스템을 이용하며, 이러한 코일-자석을 이용한 구동 시스템은 자석이 코일 내부에서 움직일 때, back EMF(back electro mechanical force)가 생성되어 자석의 움직임을 저지하게 되는 시스템 감쇠(Equipment generated damping)가 발생하게 되어 감쇠비를 과다하게 산정하게 된다. CTS시험의 경우 통상적인 시험주파수에서 시스템 감쇠값이 작아 무시할 수 있지만, 공진주 시험의 경우 이를 고려하여야 한다. 이러한 시스템 감쇠비는 시험결과 감쇠비로부터 주파수에 따라 미리 산정되어있는 시스템 감쇠비를 차감하여 고려되거나, 자유진동감쇠시 코일에 가해지는 전류를 차단하는 방법, 또는 입력하중을 전압으로 조정하며 가진하지 않고, 전류로 조정하며 가진하는 방법을 사용함으로써 제거될 수 있다(Hwang, 1997, Meng 등, 2003).

그리고 앞서 기술한 바와 같이 시료의 변형을 삼축셀의 내부에서 측정하여 단부오차(bedding error) 등을 제거함으로써 미소변형영역에서도 지반

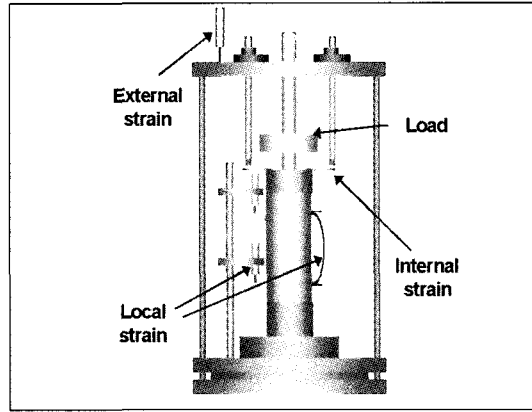
의 변형특성 평가가 가능한 미소변형 삼축압축시험을 통해 지반의 변형률에 따른 탄성계수를 평가할 수 있다.

이밖에 실내시험으로부터 지반의 최대전단탄성계수를 산정할 수 있는 방법으로 양단 자유 공진주 시험(FFRC), 벤더엘리먼트 시험(BE) 방법이 널리 이용되고 있다. 양단 자유 공진주시험은 시편에 발생시킨 탄성파에 대한 공진특성으로부터 미소변형률 영역의 지반의 최대강성과, 포아송비를 결정할 수 있는 시험방법이다. 벤더엘리먼트 시험은 탄성파의 가진 및 수신의 측정이 가능한 벤더엘리먼트를 이용하여 시편의 탄성파 속도를 직접 측정하여 이로부터 최대강성을 측정하는 시험방법이다. 벤더엘리먼트 시험은 다양한 시험기에 부착되어 시편의 교란 없이 비교적 간편하게 시료의 강성을 측정할 수 있어 널리 이용되고 있다. 그러나 정확한 전단파 속도 측정을 위해, 전단파의 전파시간 결정시 전단파의 도달시점의 결정에 있어 여러 가지 문제점이 존재하여 아직까지 이를 해결하기 위한 여러 시험방법 및 분석방법이 이용되고 있다.

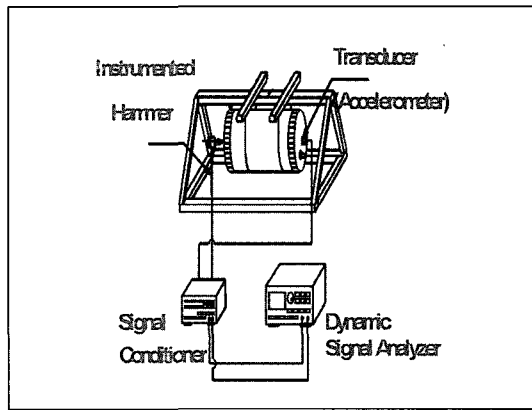
한편 국내외적으로 지반의 비등방성(Anisotropy)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 시료에 벤더엘리먼트를 수직방향 또는 횡방향으로 부착하여 시편의 VH, HV, HH파의 속도를 측정하거나, 다양한 응력경로의 실험을 수행함으로써 비등방성 연구가 진행되고 있으며, 또한 True Triaxial 장비,



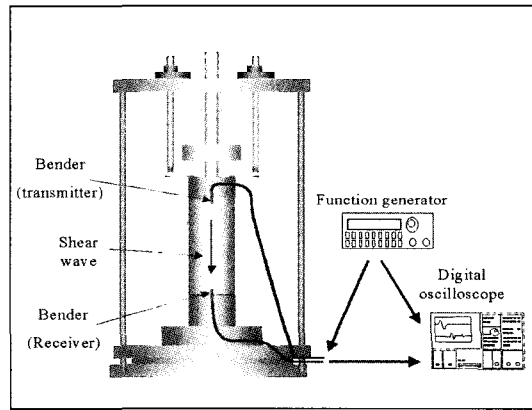
(a) 공진주/비틀림전단시험



(b) 미소변형 삼축압축시험



(c) 양단 자유 공진주시험



(d) 벤더엘리먼트 시험

그림 4. 실내 시험장비

Hollow cylinder 시편을 이용한 시험장비 등이 이용되고 있다.

2.3 설계지반운동 결정을 위한 실증연구

내진설계 기술개발에 있어서 설계값 검증은 매우 중요한 역할을 한다. 특히, 구조물은 지반운동의 고유주기에 따라서 응답값이 매우 크게 변함을 고려할 때 지반의 특성을 제대로 파악하는 것은 내진설계의 초석이라고 할 수 있다. 지진관련 선진국에서는 부지특성평가와 관련된 연구로 지반공학시험장을 설치하여 각종 지반조사기법을 적용하여 부지특성을 정확히 평가하여 이를 모델링하고,

Downhole Seismic Array와 같은 지진계측시스템을 설치하여 지진시 지반의 거동을 계측하여 분석하는 실증적 연구를 수행하고 있다. 대표적인 현장으로는 미국의 NGES(National Geotechnical Experimentation Site), ROSRINE 현장, 대만의 Lotung, Huallien현장, 일본의 Port Island현장을 들 수 있다. 특히 ROSRINE 현장의 경우 1994년 미국 캘리포니아 Northridge에서 발생한 지진 기록과 주변의 50여개 지반에 대한 현장 및 실내 지반조사를 실시하여 많은 지진공학자들이 실증연구를 하는데 큰 도움을 주고 있다(<http://geoinfo.usc.edu/rosrine/>).

우리 나라의 경우 부지증폭현상을 정확히 평가할

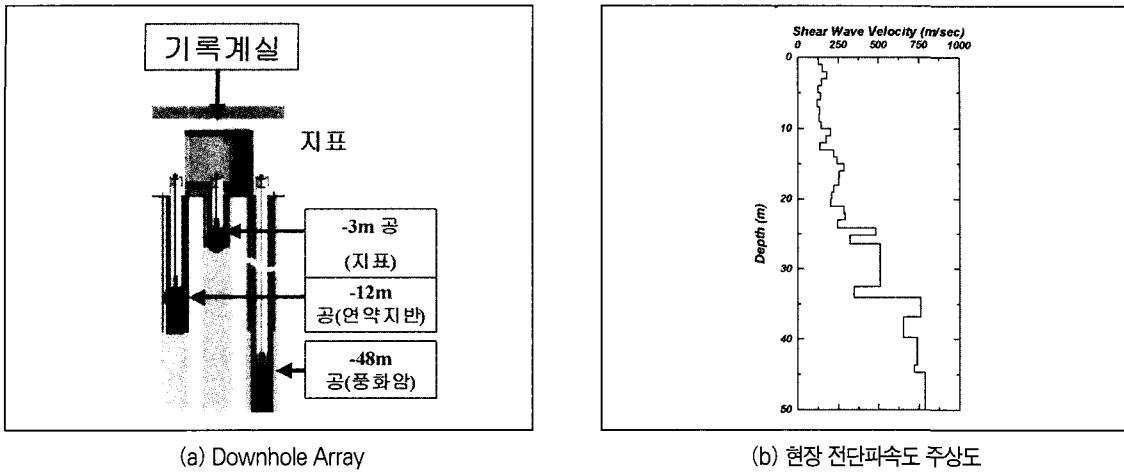


그림 5. 인천국제공항 지진계측 시스템 및 현장 지반 주상도

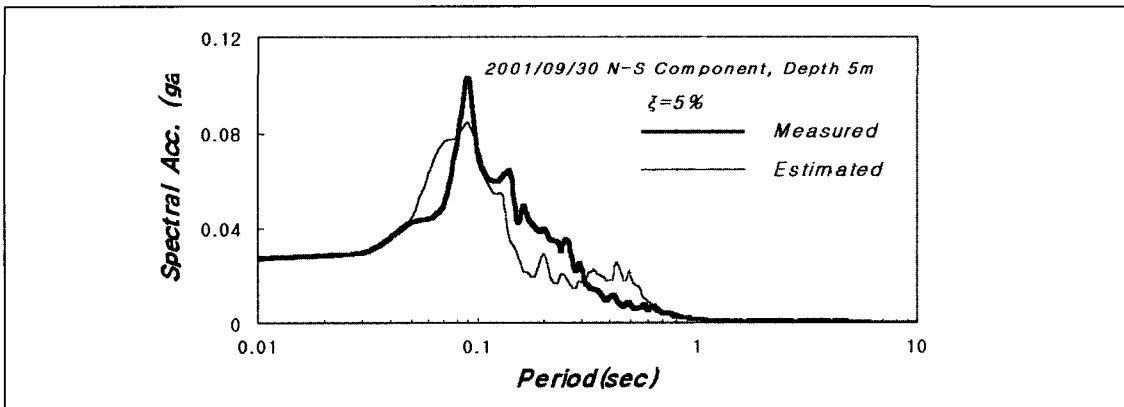


그림 6. 지표면의 계측 및 해석결과 비교 (지하 5m, 응답스펙트럼)

수 있는 계측시스템이 제대로 갖추어 지지 않아서 부지응답해석을 통해 얻어진 설계 값을 검증할 수 없었던 것이 현실이었다. 그러나, 최근 국내에서도 지반공학적 지진응답특성 규명을 위하여 인천국제공항 및 경주 효동리 등에 깊이별 지진계를 매설하여 운영하고 있고, 최근 인천국제공항 지진계측 시스템에서는 국내·외에서 발생된 지진이 기록된 사례도 있다. 인천국제공항에 설치된 지진계측 시스템의 배치도 및 하부 지반의 지반조사 결과는 그림 5와 같다. 지진계측 시스템의 검증을 위하여 2001년 9월 30일에 중국에서 발생한 지진기록과 등가선

형해석 프로그램인 SHAKE91을 이용하여 추정된 응답스펙트럼의 결과는 그림 6에 예시하였다. 비록 지진의 규모 및 세기가 미약하여 내진설계에 이용하기엔 적절하지 않은 결과이지만, 지진계측 시스템에서 얻어진 결과와 현장 및 실내실험에서 얻어진 지반조사 결과를 이용하여 해석한 결과는 유사함을 보이고 있어, 이러한 연구가 지속적으로 수행된다면 그 동안 국내에서는 검증하기 힘들었던 부지응답해석 결과로부터 얻어진 설계값을 검증하는데 큰 도움이 될 것이다.

김동수, 한국과학기술원

3. 내진설계 기술동향

3.1 개요

토류구조물이나 기초구조물 등을 비롯한 지반공학에 관계 깊은 구조물의 내진설계에서는 진도법으로 대표되는 유사정적해석에 근거한 종래의 내진설계법의 한계를 개선하기 위하여 내진성능을 고려한 설계체계의 도입에 대한 시도가 각 방면에서 행해지고 있다. 여기에서는 최근 빈번한 지진으로 인해 내진설계의 중요도가 부각되고 있는 일본의 내진설계의 기술동향을 중심으로 언급하고자 한다.

3.2 내진성능설계의 흐름

토류구조물이나 기초의 내진설계에 있어서는 설계에 있어서 주요한 평가대상으로서 지반 및 구조물기초의 변형과 이에 동반되는 구조물의 변형 및 응력상태를 설계 parameter로서 고려한 설계법의 도입이 필요하다. 그때 설계지진동 강도레벨을 적절하게 정의하고 그 레벨에 맞는 허용피해정도를 명확하게 규정할 필요가 있다. 설계지진동 강도로서는 아래와 같은 2단계 레벨의 지진동을 설계 참조레벨로서 이용하는 경우가 많다.

- 레벨 1 지진동(L1) : 구조물의 설계공용 기간 중에 한두번 발생할 확률이 있는 지진동
- 레벨 2 지진동(L2) : 구조물의 설계공용 기간 중에 발생할 확률은 낮으나 큰 강도를 갖는 지진동

L1 및 L2를 갖는 2단계설계법은 1) L1에 대한 설계에서 규정한 레벨의 사용성을 확보하고 2) L2에 대한 피해형태 및 피해정도를 명확하게 하는 것을 목표로 하고 있다. 이 2단계설계법은 L2에 대한 피해정도기준을 만족하는 것만으로는 L1에 대한 사용성을 확보할 수 없는 경우, 또는 L1에 대한 설계만으로는 L2에 대한 내진성능이 확보되지 않는 등의 상황을 가정하는 경우에 유용하며, 세계적인

로 지진의 활동이 평균이나 그 이상인 지역에 해당된다.

허용피해정도는 대상시설의 이용형태, 구조물 시스템 전체로서의 기능확보 등의 제조건을 반영하여 규정하고, 표 1에 나타난 것처럼, 먼저 구조피해와 기능피해를 나누어서 검토하고, 최종단계에서 이들을 종합적으로 판단하여 허용피해정도를 설정하므로써 허용피해정도의 의미부여에 있어서의 혼란을 피할 수 있을 것으로 생각된다.

이러한 설계지진동 레벨 및 허용피해 레벨에 근거하여 대상구조물에 요구되어지는 내진성능 레벨은 표 2에 정의한 내진성능정도 S,A,B,C에 의해 규정하는 것이 적당하다. 내진설계성능에 있어서는 구조물을 이들 내진성능정도의 요건을 만족하도록 설계하는 것이다.

내진성능설계에 있어서는 주요 수순은 그림 7과 같다.

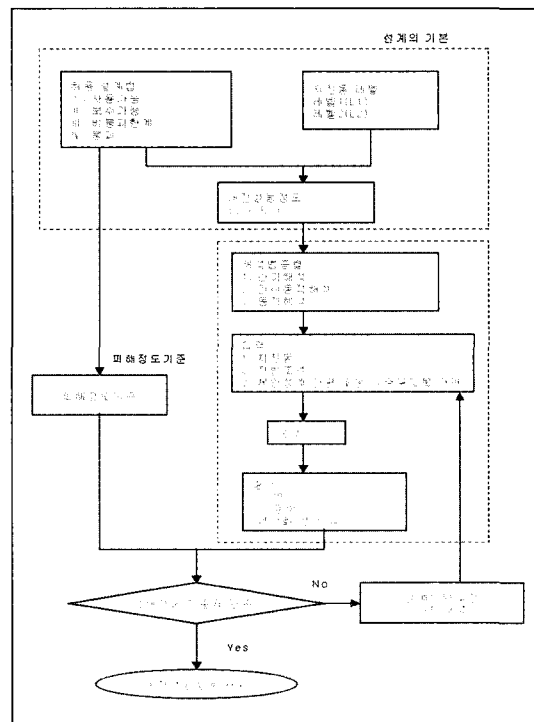


그림 7. 내진성능설계에 있어서는 주요 수순

표 1. 내진성능설계에 있어서 허용피해정도*

허용피해정도	구조피해(직접피해)	기능피해(간접피해)
피해정도 I : 사용가능	무피해 내지 경미한 피해	기능유지 내지 경미한 기능저하
피해정도 II : 보수가능	한정피해**	단시간의 기능정지***
피해정도 III : 비붕괴한계	현저한 피해(비붕괴)	장시간 기능정지 내지 기능상실
피해정도 IV : 붕괴****	기능상실	기능상실

* 인명이나 재산의 보전, 재해복구 내지 긴급방화거점, 유해물이나 위험물 취급등의 기능을 갖고 있는 시설의 경우에는 위의 표에 나타난 일반적인 항목에 추가하여 이들 시설 특유의 기능의 관점으로부터 허용 피해정도를 고려해야 한다.

** 한정된 소성응답 내지 잔류변위

*** 단기간의 응급복구완료까지의 기능상실

**** 구조물붕괴시의 주변에의 영향은 현저하지 않다

표 2. 내진성능정도 S,A,B,C

내진성능정도	설계지진동	
	레벨1(L1)	레벨2(L2)
정도 S	피해정도 I : 사용가능	피해정도 I : 사용가능
정도 A	피해정도 I : 사용가능	피해정도 II : 보수가능
정도 B	피해정도 I : 사용가능	피해정도 III : 비붕괴한계
정도 C	피해정도 II : 보수가능	피해정도 IV : 붕괴

1) 내진성능정도 S,A,B,C의 선정 : 우선 제1단계로서 표 1, 표 2를 참조하여 설계대상시설의 이용형태 및 전체적인 기능확보등의 제 조건을 검토하고 허용피해정도를 고려하여 대상 구조물에 적합한 내진성능정도를 선정한다. 이와는 별도로, 구조물의 중요도에 근거하여 내진성능정도를 선정하여도 좋다. 구조물의 중요도는 설계기준류에 많이 나타나 있다.

이용형태, 구조물시스템 전체로서의 기능확보등의 제 조건에 의해서는 필요에 부합되는 내진성능정도 S,A,B,C 이외의 내진성능을 도입하여도 좋다. 일반적으로 직렬시스템으로 기능을 하는 구조물계에 있어서는 정도A 또는 B에 해당하는 설계가 적당한 경우가 많은데 비하여 병렬시스템의 경우에는 정도S 또는 C에 해당하는 성능레벨의 것도 적절히 도입함으로써 전체적으로 합리적인 설계가 가능하게 될 것으로 생각된다.

2) 피해정도 기준의 설정 : 허용피해정도를 변위, 극한응력상태, 소성률등의 공학적 parameter에 의해 규정한다.

3) 내진성능조사 : 지진성능조사는 구조물의 지진응답해석결과로서 얻어지는 공학적 parameter와 앞서 설정한 피해기준정도와의 비교에 의해 행한다. 1차적으로 해석한 결과가 피해정도기준을 만족하지 못하는 경우는 원설계 단면이나 기존구조물을 개량한다. 액상화대책으로서의 지반개량도 이 단계에서 필요하다.(SEAOC, 1995)

3.3 지반 내진공학에 있어서의 온라인 실험의 적용

최근 지반 내진공학분야에 있어서는 수치해석에 의해 지반의 응답해석이나 토류구조물의 피해 변형량을 구하는 연구가 많이 행해지고 있다. 여기에는 컴퓨터의 성능향상과 수치해석기법의 발전이 크게 기여하고 있다. 그러나 수치해석을 실무설계에 이용하려고 하는 경우의 신뢰성에 있어서는 수치해석기법의 강력함보다도 오히려 예측하려고 하는 흙의 역학적거동의 모델화에 크게 의존하고 있다고 말할 수 있다. 온라인 실험방법은 토질시험으로부터 얻

어지는 결과를 수치해석에서 사용하는 흙의 모델에 이상화하기 위해 사용하지 않고, 토질시험으로 얻어지는 특정한 흙의 거동을 직접적으로 수치해석에 이용하는 기법이다.

온라인 실험의 특징은 첫 번째로 동적인 관성력에 기인하는 전단응력을 정적인 힘으로 바꾸어 작용시키는 것과 두 번째로 흙의 이력변형특성을 흙의 공시체 그 자체로부터 구한다는 것이다. 특히 두 번째의 특징을 살릴 경우 지배방정식이 진동방정식이 아닌 경우에도 이 방법을 이용하는 가치가 있다. 더욱이 이 방법은 연직방향의 침하만을 대상으로하는 점토의 압밀침하해석에도 응용가능하다. 점토의 경우에는 압밀도의 진전에 따라 변화하는 투수계수나 체적압축계수를 그때그때 평가하여 해석에 적용할 수 있다는 점이 특징이며, 따라서 매우 압축성이 큰 고유기질토나 초연약점토에도 매우 유용할 것이다. 자세한 내용은 참고문헌 참조(山口 晶, 2002)

이 방법은 수치해석법, 요소시험법, 실험장치의 제어법등을 종합적으로 이용한 기법으로, 흙의 구성모델의 고도화에 이용 가능하며 원위치의 흙의 특성을 그 모델이 어느정도 정확하게 표현할 수 있는가를 검증할 수 있다. 콘크리트 등의 인공재료와는 달리 각 지역마다 다른 특성을 갖는 흙을 대상으로 하기 때문에 이러한 방법의 이용가치는 높다고 판단된다.

3.4 액상화를 고려한 지반구조물의 설계법

(1) 토류구조물의 설계법

도로성토에 있어서는 평가방법으로서 진도법과 활동면법을 적절히 조합하여 사용하는 것이 일반적이다. 원호활동면계산에 있어서는 액상화층의 전단강도를 발생과잉간극수압의 크기에 맞춰 저감시키는 방법 및 반복전단강도로 표현하는 방법이 있다. 이중 전자는 예전부터 관용적으로 이용되고 있는 것이지만 평가결과가 너무 안전측으로 계산되는 것으로 알려져있다. 그로인해 이 방법은 개략검토의

방법으로 이용되고 있다. 후자의 방법은 초기전단응력이 작용되고 있는 상황에서 소정의 전단변형률을 일으키는데 필요한 반복전단응력의 크기를 반복전단강도로 정의하여 활동면 계산에 이용하는 것으로 몇몇 사례검토가 행해지고 있다.

도로옹벽에 있어서는 기초지반이 액상화할 가능성이 있는 경우에는 위에서 기술한 성토법면 안정의 검토를 행하여 필요에 따라 지반개량을 실시한다.

철도성토에 있어서는 기초지반이 액상화할 가능성이 있는 경우에는 지반개량을 통해 성토의 침하를 방지하던가 또는 지반개량을 실시하지 않는 경우에는 액상화에 의한 성토의 침하량을 산정하는 것으로 되어있다. 그 침하량을 추정하기 위한 참고로서 기존의 모형실험결과를 근거로 침하량을 기초지반의 액상화지수PL과의 관계도를 이용한다.

철도옹벽에 있어서는 액상화저항률 FL이 1.5이하의 경우에는 직접기초 방식을 피하는 것으로 한다.

하천제방에 대해서는 설계계산법이 규정되어 있지는 않지만 실무상 위에서 기술한 도로성토에 적용되는 방법이 많이 사용되고 있다.

(2) 액상화 경감을 위한 설계법

지반이 액상화하여 구조물에 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우에는 액상화 피해를 경감시키기 위한 검토가 행해진다. 액상화대책의 기본적인 고려방법은 크게 아래의 2가지로 구분될 수 있다.

- ① 액상화의 발생을 방지하는 대책
- ② 액상화의 발생은 인정하고 피해를 경감하는 대책

또한 액상화대책 공법원리로부터 다짐, 간극수압 소산, 고결, 치환, 지하수위 저하, 전단변형 억제, preload, 구조적대책 등이 있다.

액상화대책 공법의 설계에 있어서는 소정의 목적을 달성하기 위하여 지반개량공법에서 어느 범위까지 개량할 것인가 및 슈트파일등의 구조적배치에서 그 배치 및 단면성능의 선택이 주요 설계항목으로 된다.

실무적인 설계방법으로 다짐공법, 드레인공법, 혼합처리공법, 프리로딩공법, 강재를 이용한 공법 등이 있는데, 이들은 대부분 정적인 힘의 균형에 근거한 것으로 비교적 간단하게 지반개량의 범위등을 계산할 수 있는 큰 이점이 있다. 반면 정량적으로 대책효과를 평가한다거나 지반개량의 범위나 강재 단면의 크기를 줄이기 위해서는 보다 면밀한 해석이 실시되어야 한다(地盤工學會1999)

황대진, 삼성건설

4. 미국의 NEES 프로젝트

4.1 개요

최근 들어 대학 및 연구기관에서 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 따라 관련된 연구도 많이 수행되고 있다. 연구성과의 시너지 효과를 거두기 위해서는 연구자 및 기관 간의 협조체제 구축이 중요할 것이다. 이러한 목적을 위한 참고자료로 현재 미국에서 수행되고 있는 NEES project의 골격을 협동연구의 사례로 살펴보고자 한다 (<http://www.nees.org/components/index.html>).

NEES(George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation)은 미국과학재단(National Science Foundation)이 지원하는 지진공학에 대한 협동연구체제이다. 이 연구의 목적은 원격참여와 원격조정, 공동사용이 가능하고 지역적으로 안배된 차세대 실험 및 연구장비 사이트를 제공하여 협동실험, 해석, 이론연구, 데이터베이스 구축, 모델 시뮬레이션 등의 지진공학연구 및 교육 환경을 확보하고 이를 통해 구조물의 내진설계방법 및 성능을 개선함에 있다. 연구의 초기과업은 주요 연구시설(MRE, Major research equipment)의 확충으로서 1994년부터 2004년까지 총 8190만불의 예산이 투입되었다. 2004년까지 실험장비 기반 구축과정이 완성되면 NEES 협조체제는

2014년까지 가동기간에 들어가게 된다. 2004년에 NEES 프로그램이 완전히 가동되기 시작하면 전례 없이 확고한 지진공학 관련 연구 및 교육기반이 제공될 것이다. NSF는 프로그램의 연구 및 교육자원을 한곳에 집중하지 않고 미국전역에 걸쳐서 14개 대학에 분산하였으며 이들 자원은 국가의 전 연구자가 효과적으로 활용할 수 있도록 공동자원으로 운영하도록 하였다. 이를 위해서 NEES 프로그램은 네트워크로 연결된 협조체제를 가동한다. 이를 통해서 지진공학 연구자들이 상호 간에 교류하고, 독창적인 차세대 장비와 시설들을 지역적 제한 없이 활용하게 된다.

4.2 NEES 프로그램의 구성

NEES프로그램은 다음과 같은 세 가지 프로젝트로 구성되어 있다.

(1) 컨소시엄 개발 프로젝트

NEES 협동연구를 관리하는 비영리법인이다. NEES 컨소시엄은 지진공학연구를 위한 대학들의 컨소시엄으로 2004-2014년 기간동안 NEES의 협동 사업을 관리한다.

(2) 장비 사이트

NSF가 연구비를 지원하는 장비 사이트들은 NEES협동사업에 사용될 장비를 만들거나 개선한다. 15개 대학이 지원을 받았으며 이들 대학은 진동대, 쓰나미 파동 장비, 원심가속기, 현장시험장비, 대형 구조실험 장비 등을 구축하였다. NEES 장비사이트는 지진과 관련한 현상들에 대한 실험을 수행하기 위한 광범위한 공동 실험 기반을 제공한다. 각 사이트의 장비들은 다음과 같다.

Shake Table Research Equipment

- Versatile High Performance Shake Tables Facility towards Real-Time Hybrid

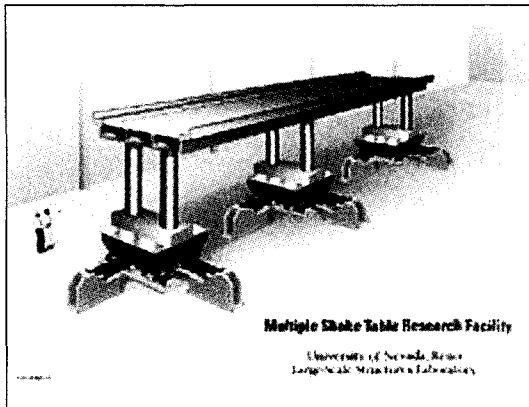


그림 8. Multiple Shake Table Research Facility

- Seismic Testing - University at Buffalo, State University of New York
- Development of a Biaxial Multiple Shake Table Research Facility - University of Nevada, Reno
 - Large High Performance (LHP) Outdoor Shake Table - University of California, San Diego

Centrifuge Research Equipment

- A NEES Geotechnical Centrifuge Facility - University of California, Davis
- Upgrading, Development and Integration of Next Generation Earthquake Engineering Experimental Capability at Rensselaer's 100 g-ton Geotechnical Centrifuge - Rensselaer Polytechnic Institute

Tsunami Wave Basin

- Upgrading Oregon State's Multidirectional Wave Basin for Remote Tsunami Research - Oregon State University, Corvallis, Oregon

Large-Scale Laboratory Experimentation Systems

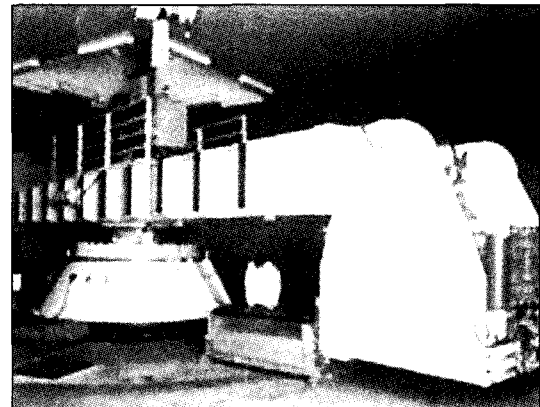


그림 9. Geotechnical Centrifuge Facility

- Large-Scale High Performance Testing Facility towards Real-Time Hybrid Seismic Testing - University at Buffalo, State University of New York
- Reconfigurable Reaction Wall-Based Earthquake Simulator Facility - University of California at Berkeley
- Fast Hybrid Test Platform for the Seismic Performance Evaluation of Structural Systems - University of Colorado, Boulder
- A System for Multi-Axial Subassemblage Testing (MAST) - University of Minnesota-Twin Cities
- Real-time Multi-directional Testing Facility for Seismic Performance Simulation of Large-Scale Structural Systems - Lehigh University
- Multi-Axial Full-scale Sub-Structuring Testing & Simulation Facility - University of Illinois, Urbana-Champaign

Large-Scale Lifeline Testing

- Large Displacement Soil-Structure Interaction Facility for Lifeline Systems - Cornell University

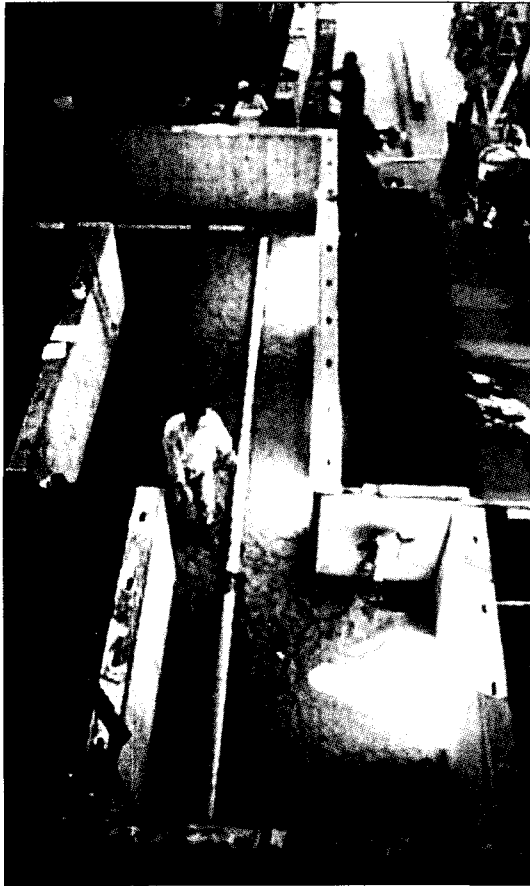


그림 10. Soil-Structure Interaction Facility

Field Experimentation and Monitoring Installations

- Field Testing and Monitoring of Structural Performance - University of California, Los Angeles
- Large-Scale Mobile Shakers and Associated Instrumentation for Dynamic Field Studies of Geotechnical and Structural Systems - University of Texas at Austin
- Permanently Instrumented Field Sites for Study of Soil-Foundation-Structure Interaction - Brigham Young University

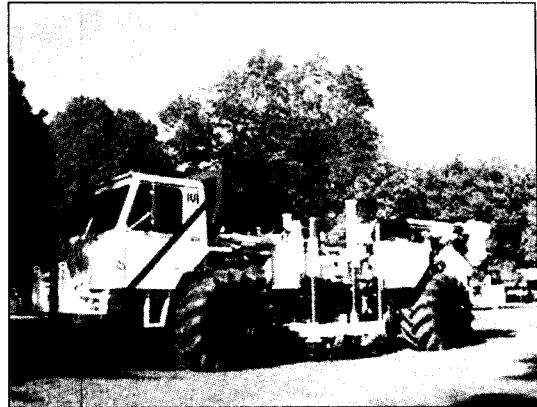


그림 11. Large-Scale Mobile Shakers



그림 12. Soil-Foundation-Structure Interaction

(3) 시스템 통합

고도의 네트워크와 컴퓨터 기반장비를 설치하여 미국전역의 연구자들과 연구장비들을 연결하는 기반인 NEESgrid를 구축하는 과업으로 일리노이 대학이 지원을 받아 담당하고 있다. 이 시스템은 고속 인터넷 네트워크이며 지진공학관련자를 위한 연구 및 교육, 협동실험, 모델링, 시뮬레이션이 가능한 매우 시너지 효과가 큰 자원으로 구축된다. NEESgrid를 통해서 연구자들은 다음과 같은 활동을 한다.

- 실험의 원격수행과 원격참여
- 규격화한 방법을 사용하여 정련된 데이터 저장소를 사용하고 논문을 발표
- 전자계산 자원과 소스가 개방된 해석도구들을

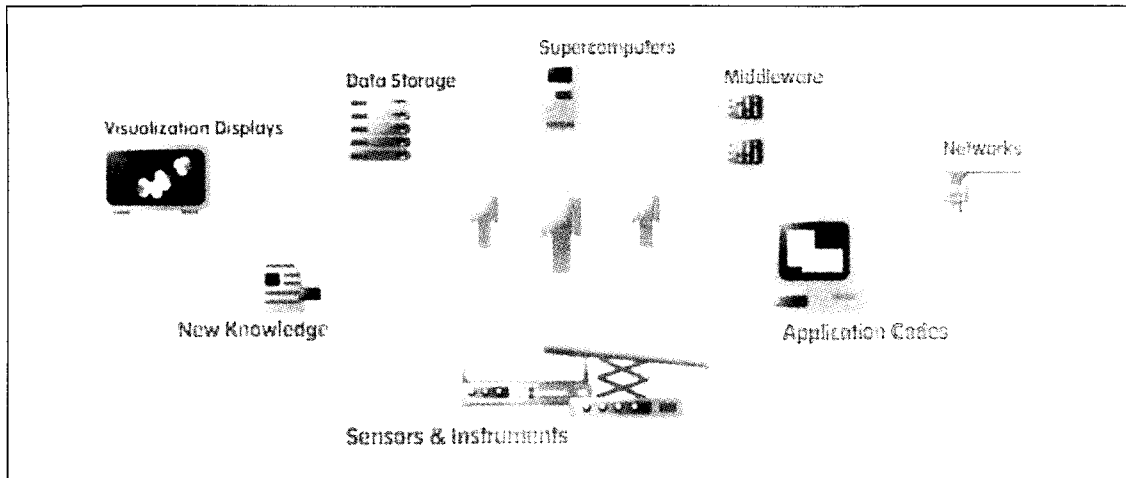


그림 13. NEESgrid 구축 개요

접속

NEESgrid는 지진실험과 모사를 위한 광범위한 가상 실험실이 될 것이다. 이를 바탕으로 한 협동체제를 통해서 전역의 연구자들이 원격으로 공유된 실험장비와 데이터를 얻을 수 있다. 따라서 연구자간에 효과적인 정보교환을 가능하게 하며, 모델링과 시뮬레이션을 위한 강력한 협동공간을 제공한다. 이 시스템의 구축개요는 그림 13과 같다.

이병식, 공주대학교

참고 문헌

1. 김동수, 방은석, 서원석(2003), "표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출," 한국지반공학회논문집, 제19권, 2호, pp. 135-146
2. Dong-Soo Kim, Hyung-Choon Park(2002), "Determination of Dispersive Phase Velocities for SASW method using Harmonic Wavelet Transform," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, pp. 675-684
3. Jianghai, Xia, Richard D. Miller, Choon B. Park, James A. Hunter, James B. Harris, Julian Ivanov(2002), "Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements," Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, pp. 181-190
4. Meng, J., Rix, G. J.(2003), "Reduction of Equipment-generated Damping in Resonant Column Measurements," Geotechnique 53, No. 5, pp. 503-512
5. Mok Young-Jin, Kim Jung-Han, Kang Byung-Soo(2003), "A Pilot Study of In-hole Seismic

4. 결론

지반진동과 관련한 연구 및 기술 동향으로서 부지특성 평가를 위한 시험법, 설계지반운동 결정을 위한 실증연구 결과, 내진성능설계법, 온라인 실험법, 액상화를 고려한 지반구조물의 설계법 등에 대해 알아보았으며 NEES프로젝트의 개요를 살펴보았다. 보다 광범위한 범위에서의 동향이 정리되었다면 하는 아쉬움이 남지만 독자 여러분의 양해를 구하며 미력하나마 본 고의 내용이 실무와 연구에 도움을 드릴 수 있기를 바란다.

Method," Jour. of the KGS, Vol. 19, No. 3, pp. 23-31

6. Seon-Keun Hwang(1997), "Dynamic Properties of Natural Soils," Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
7. SEAOC : Performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, 1995

8. 山口 晶,仙頭紀明,風間基樹,飛田善雄 : 原位置試料を用いた埋立人工島のHybrid地震応答実験, 第11回日本地震工学シンポジウム, paper No.151, CD-ROM, 2002

9. 液状化メカニズム予測法と設計法に関する研究委員会 : 液状化メカニズム予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集'地盤工学会, 1999

10. NEES Consortium Inc, //www.nees.org/components/index.html

회비 납부 안내 (지로 및 온라인)

학회 사무국에서는 연중 수지로 학회비를 수납하고 있으나, 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드립니다. 문의사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

• 은행 무통장(타행) 입금

국민은행 계좌번호 : 534637-95-100979 예금주 : 한국지반공학회

• 지로용지 납부

2003년 5월 20일부터 금융결제원에 승인을 받아 한국지반공학회 회비도 지로용지 납부를 할 수 있게 되었습니다.

• 지로용지 기입시 유의점

- 지로 장표상의 금액과 납부자 관련정보(회원번호, 성명, 납입금 종류 등)는 흑색볼펜으로 글씨체는 정자로 표기해 주시기 바랍니다.
- 납부금액란에는 정확한 위치에 정자로 아라비아 숫자만 기입합니다.
납부금액 앞뒤에 특정기호(W, -, * 등)를 표시 할 수 없습니다.)

* 지로용지를 못 받으신 분은 지반공학회 사무국(02-3474-4428/양윤희)으로 전화주세요