

지반진동 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 이제 이 분야의 연구를 위한 기반이 어느 정도 구축되고 있는 것으로 사료된다. 그러나 향후 이 분야의 기술자립도를 현재 수준보다 높은 수준으로 제고하고, 우리 실정에 걸맞은 설계기준 등을 제시할 수 있는 수준의 연구 성과를 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 보다 나은 설계를 위해서는 내진설계 기술의 향상과 실무자들의 이해를 보다 증진시켜야 할 필요가 있으며 이를 위한 산학공동의 노력이 요구되고 있다.

지반진동 분야는 동하중이 지반과 토구조물에 미치는 영향을 공학적으로 규명하여 궁극적으로 동적 하중으로부터 안전한 구조물을 설계하고 시공하기 위한 이론적 바탕을 다루고 있다. 진동을 발생시키는 동적하중으로는 크게 지진, 파랑 및 바람과 같은 자연적인 동하중 그리고 발파, 항타, 진동다짐, 차량 및 기계진동 등과 같은 인위적인 진동하중으로 나눌 수 있다. 지진하중은 지반진동과 관련된 가장 대표적인 동하중으로 우리나라에서는 1990년대 이후 이와 관련한 연구의 빈도가 급속히 증가되고 있으며 이와 관련한 많은 연구자들이 배출되고 있다. 지진 동하중과 관련된 대표적인 세부 분야로는 구조물의 내진설계에 필요한 즉 설계진동하중의 규모와 형태를 규명하기 위한 지반의 동적 물성치 평가, 설계지반운동의 결정, 그리고 이를 바탕으로 하여 안전한 토구조물을 설계하기 위한 지반의 안정성 평가 방법과 수치해석적인 설계법 개발 등의 분야들을 들 수 있겠다. 또한 지반진동과 탄성체를 통한 파동 특성의 원리를 응용한 비파괴 시험법, 차량 및 기계진동의 인위진동에 대한 방진기법 및 설계법 등은 인위적인 진동과 관련한 세부 분야로 구분할 수 있겠다. 이와 같이 지반진동 분야의 연구 및 기술은 적용범위가 다양하고 구조 및 기계 분야 등 여러 관련 연구자들의 협동연구가 요구되는 영역이다.

2. 지반의 동적 물성치

2.1 개요

지반진동 해석 또는 내진설계를 할 경우 신뢰성 있는 지반의 동적물성치 산정과 현장지반을 분류

검토항목	요구되는 설계 변수	수행되는 실험
지반 진동 문제	<ul style="list-style-type: none"> • 각 층의 밀도 및 전단파 속도 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장 탄성과 시험(크로스홀, 다운홀, 업홀, 인홀, SPS 검층) • 진동 시험
설계지반운동 결정	<ul style="list-style-type: none"> • 지반의 층상구조 • 기반암까지의 깊이 • 각 층의 밀도 및 전단파 속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성 • 지하수위 • 지반응력상태 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장 탄성과 시험 • 공진주/비틀림전단 시험(RC/TS) • 양단 자유 공진주 시험(FF-RC) • 미소변형 삼축압축 시험
액상화 평가 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 간편예측법 • SPT-N값에 기반 	<ul style="list-style-type: none"> • SPT N • SPT 에너지 효율
	<ul style="list-style-type: none"> • 상세예측법 • 반복삼축시험 결과 및 유효응력해석에 기반 	<ul style="list-style-type: none"> • 반복삼축 시험

하는 일은 매우 중요하다. 지반진동 및 내진설계에 이용되는 지반의 동적물성치로는 탄성계수(E), 전단탄성계수(G), 구속 탄성계수(M)와 같은 동적 변형계수와 포아송비(ν), 감쇠비(D)와 감쇠상수(α) 및 액상화 관련계수 등이 있다. 근래에 들어 터키와 같은 경쟁입찰로 인하여 다양한 첨단 지반조사기법이 수행되고는 있으나, 지반조사 결과를 설계에 적용하는데 있어 많이 미흡한 실정이다. 필요한 설계정수를 획득하는데 있어 적합한 실험 기법을 신뢰성 및 적용성을 고려해서 적절히 선택하여 수행하여야 할 것이며 실험을 수행하는 기술자들은 책임감을 가지고 실험에 임해야 할 것이다. 현장 및 실내 실험을 통하여 신뢰성 있는 설계변수를 획득하는 것도 중요하지만 획득한 지반 물성치를 시험 시점과 시공과정에서의 가변조건을 고려하여 설계에 적절히 반영하는 것도 중요한 문제이다.

본 절에서는 현재 국내에서 부지특성평가 및 내진설계에 사용되고 있는 현장 및 실내 시험기법을 종합적으로 검토하고 문제점을 파악하며, 현황에 대해 살펴보고 앞으로 나아가야 할 방향에 대해 언급하고자 한다.

2.2 내진 설계를 위한 부지특성 평가

지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파특성을 고려한 설계응답 스펙트럼의 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. 시추조사 및 표준관입시험을 수행하여 지반의 층상구조 등을 결정하며, 깊이에 따른 지반의 강성을 평가하기 위해 현장 탄성과 탐사를 수행하여 대상지반의 전단파속도(V_s) 주상도를 결정한다. 그리고 각 층에서 시료를 채취하여 실내시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 등의 지반의 변형특성을 평가한다. 이러한 지반조사기법들은 건설되는 구조물의 중요성, 시험장비의 가용성, 지반조사 비용 등을 고려하여 수행하는 지반조사기법의 조합이 결정된다. 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 시추공

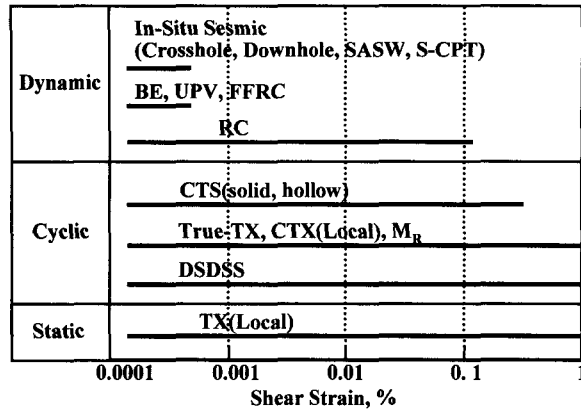


그림 1. 시험별 신뢰성 있는 변형률 구간

을 이용하는 다운홀, 시추공 없이 실험하는 SASW기법, 시추 주상도 및 N 값들을 적절히 고려하여 대표주상도를 결정하는 것이 바람직하다. 또한 내진 설계에 필요한 효율적 부지 특성 평가를 위하여 현장 및 실내시험 결과를 적절히 결합하여야 한다

최근 국내에서는 내진설계에 필요한 지반의 동적 물성치 결정을 위하여 다양한 현장 및 실내 시험이 수행되고 있다. 이러한 시험방법들로 구해지는 지반의 강성은 각 시험의 하중주파수 등에 따라 정적(static) 강성, 반복(cyclic) 강성, 동적(dynamic) 강성 등으로 구분될 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 유발되는 변형률 크기, 재하속도, 하중반복횟수 등을 고려할 경우 동일한 물성을 나타낸다고 인식되고 있다. 대표적인 현장 및 실내시험으로부터 획득 가능한 변형률 범위를 그림 1에 표시하였다.

2.2.1 현장시험

지반의 최대 탄성계수를 도출하기 위해 현장 탄성과 탐사가 수행된다. 현장 탄성과 타맛을 통해 지반의 평균적인 속도 주상도를 획득할 수 있다. 현장 탄성과 시험은 크게 시추공탐사법과 표면과 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. 국내에서는 시추공 탐사법은 업계에서 상용화 된 제품으로 실무에 적용되고 있다. 근래에 가진원·감지기 일체형 인홀 시스템 개발(Mok 등, 2003)이 진행중이며 업홀은 최근에 SPT 가진원을 이용한 업홀 시험이 국내에 적용된 바 있다(김동수 등, 2003). 시추공 탐사법을 효율적으로 수행하기 위해서는 시추시 지반의 교란을 적게 하고 시추 종료후 지반과 시험공과의 접촉을 확실하게 해 주는 것이 중요

하다.

표면파 시험은 지표면 감지기와 지표면 가진원을 사용하여 지중의 속도 주상도를 비파괴적으로 획득하는 기법이다. 실험 방법 및 해석 기법의 차이에 따라 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves), MASW(Multichannel Analysis of Surface Waves), HVAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 등이 있다(Jianghai 등, 2002). 표면파의 분산 특성을 이용, 위상차나 파수(K) 분석을 통하여 지반의 물성치를 대변하는 분산곡선을 도출하고 역산 과정을 통하여 지반의 속도 주상도로 변환되어진다. 시추공 탐사법과는 달리 표면파 탐사법은 해석과정에서 전문가적 판단이 요구되어 현장에 널리 사용되고 있지는 않다. 이런 해석의 어려움을 극복하기 위하여 표면파 탐사법은 해석과정의 자동화 및 2차원 3차원 영상화 구현에 초점이 맞추어져 연구가 수행중이다. SASW는 지난 십여년 동안 여러 공학적 문제에 성공적으로 적용되어 왔으며 다채널 SASW를 통해 결과의 2차원 영상화를 구현하기도 하였다. 하지만 SASW는 실험 시간이 오래 걸리고 특정한 경우에 해석의 오류의 범할 수 있어 그 단점을 보완하고자 주파수-파수(F-K) 변환을 이용하여 분산곡선을 도출하는 MASW, 하모닉 웨이블릿을 이용하여 위상속도를 신뢰성 있게 도출하는 HVAW가 개발되었다. 이 중 웨이블릿

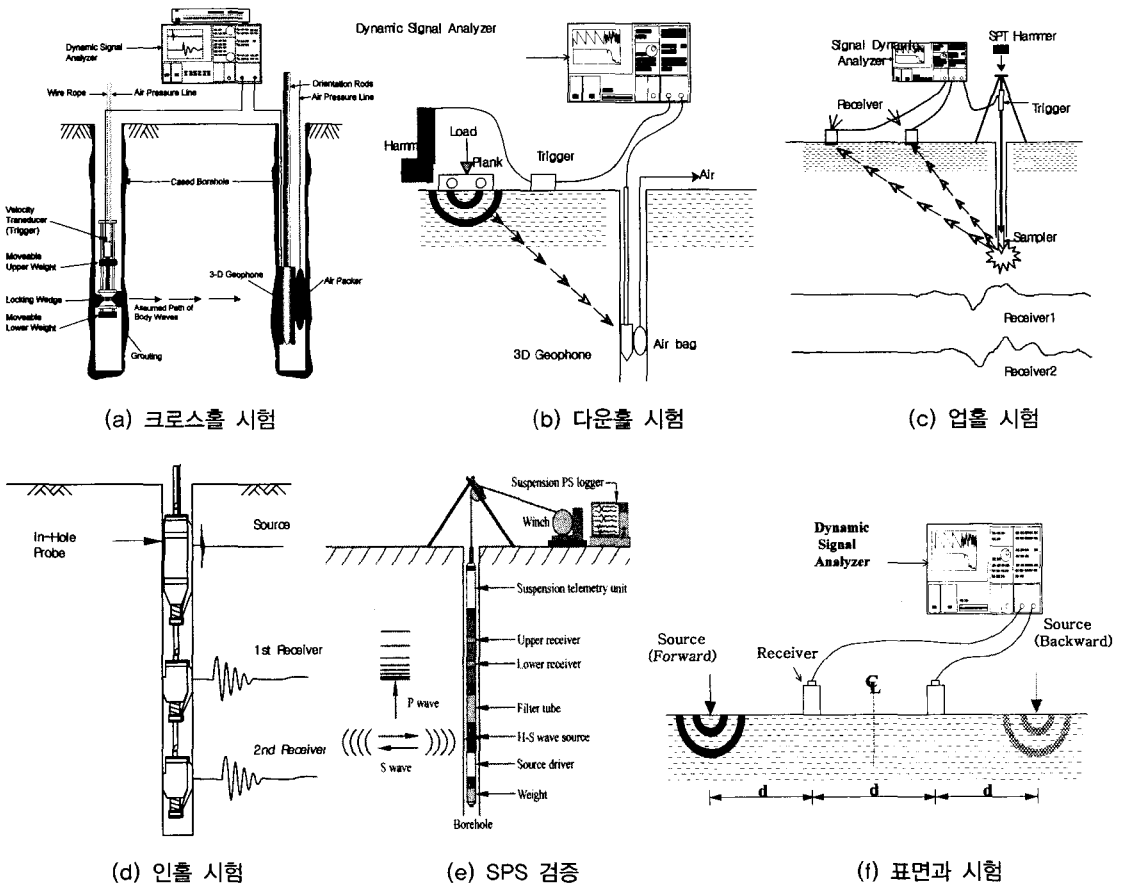


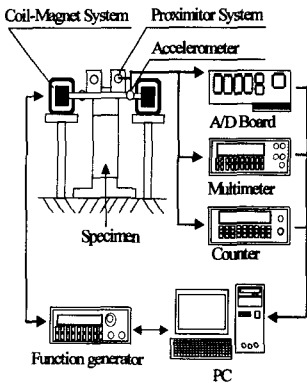
그림 2. 현장 탄성파 시험

변환(시간-주파수 해석)을 이용하는 HVAW는 주파수 해석의 단점을 극복하며, 주변잡음의 영향을 최소화하여 좁은 공간에서 두 개의 감지기만으로 간단히 실험 수행이 가능하여 매우 효율적이다 (Kim 등, 2002).

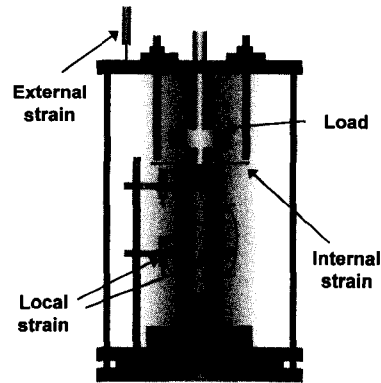
현장 탄성과 시험과는 별도로 액상화 간편 예측시 사용되는 N값의 신뢰성 있는 산정을 위해서 SPT 에너지 효율 측정을 실시하는 것이 중요하다. 국내에 상용화된 에너지 효율 측정 장비를 바탕으로 현업에서 널리 사용되고 있으며 턴키 설계시 적절히 고려되고 있다.

2.2.2 실내시험

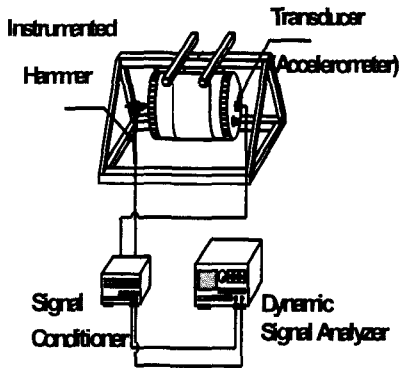
대상현장에서 채취한 시료를 이용하여 실내시험을 수행하여 지반의 변형특성, 곧 변형률에 따른 지반의 전단탄성계수($G\text{-log } \gamma$)와 감쇠비($D\text{-log } \gamma$)를 획득한다. 이러한 시험기법으로는 공진주(RC)시험, 비틀전단(CTS)시험 등이 널리 이용되고 있다. 보통 널리 이용되는 공진주/비틀전단 시험기는 시료에 비틀력을 가하기 위해 코일-자석 시스템을 이용하며, 이러한 코일-자석을 이용한 구동시스템은 자석이 코일 내부에서 움직일 때, back EMF(back electro mechanical force)가 생성되어 자석의 움직임을



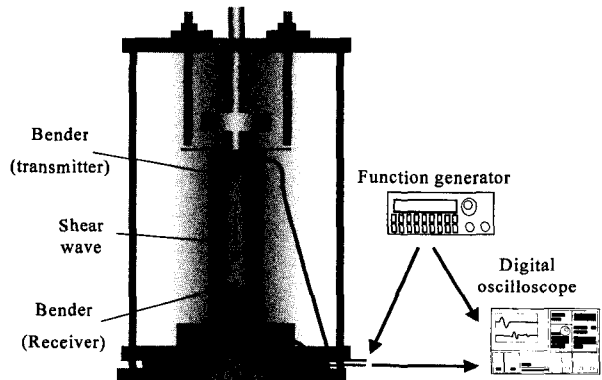
(a) 공진주/비틀전단시험



(b) 미소변형 삼축압축시험



(c) 양단 자유 공진주시험



(d) 벤더엘리먼트 시험

그림 3. 실내 시험장비

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). 시료의 변형을 삼축셀의 내부에서 측정하여 단부오차(bedding error) 등을 제거함으로써 미소변형영역에서도 지반의 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. 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, Hollow cylinder 시편을 이용한 시험장비 등이 이용되고 있다. 그리고 입자가 큰 시료에 대한 효율적 연구를 수행하기 위하여 실내 시험 기구들이 대형화 되고 있는 추세이며 대형 시료에 대해 양단 자유 구속 조건으로 공진주 시험을 수행하는 시험 장비가 국내에 도입, 개발 중이다.

2.3 동적 지반물성과 관련된 향후 방향

최근 우리나라에 있어 내진설계시 턴키 제도 등으로 인하여 설계시 다양한 현장 및 실내 시험이 수행되고 있는 상황이나, 대부분의 실험 결과들은 설계 종료후 폐기되거나 타 설계 적용에 있어 정보가 공유되고 있지 않는 실정이다. 이들 측정 결과를 Data Base로 만들어 지반의 지수 물성치와 상관관계를 맺으면 중·소규모의 프로젝트에 적용 가능하리라 판단된다. 국내 50여종의 비점성토 지반의 공진주 시험 결과를 clean sand, 실트, 풍화토 지반으로 구분하여 대표적인 정규화 탄성계수 감소 곡선과 감쇠비 곡선을 제안된 바 있다(김동수, 추연옥, 2001). 또한 현장 탄성과 시험에서 얻은 각 지반의 전단파 속도 주상도를 바탕으로 각 토질별 대표적 전단파 속도 주상도에 대한 D/B 및 SPT-N 치의 상관관계를 D/B하여 제안된 연구결과도 있다(김동수 등, 2003).

이들 경험적 상관 관계의 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. 이런 D/B의 신뢰성 증대를 위해서는 우리나라에서 현장 및 실내 시험을 수행하는 기술진들에 있어서 시험법의 올바른 숙지 및 실험 결과 해석방법에 있어서의 통일성이 필요하다. 실제로 현재 국내에서 여러 기술진들이 다양한 현장 및 실내 실험들을 수행하

고 있지만 각 시험 장비 및 기법에 따라 차이가 있으므로 적절한 방법을 통한 검증이 필요하다. 동일한 시료를 사용하여 각 실내 시험 기법에서 얻는 차이를 분석하는 Round-Robbing Test를 수행하거나 Experimental site를 결정하여 다양한 현장 시험 기법의 결과를 검증하는 작업을 통해 각 기술진들이 실험 및 해석을 수행하는데 있어 결과의 상이함을 보완하여 실험 결과의 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다.

또한, 현장 및 실내시험 기법을 개선하고 신뢰성 있게 실험을 수행하며 얻은 결과의 적절한 D/B화를 통한 자료의 체계적 정리도 중요하지만 실제 지반 진동 및 내진 설계를 수행하는데 있어 설계 변수를 얼마나 올바르게 보다 신뢰성 있게 적용하는 것이 제일 중요하다. 그러므로 지반 공학자들에게 있어 각 시험을 수행하는데 있어 공학적 책임감뿐만 아니라 전체적인 내진 설계의 흐름을 바르게 이해하여 우리나라의 지반진동 분야의 기술적 발전이 이루어지기를 기대한다.

3. 설계지반운동 결정을 위한 국내 내진설계기준의 현황 및 전망

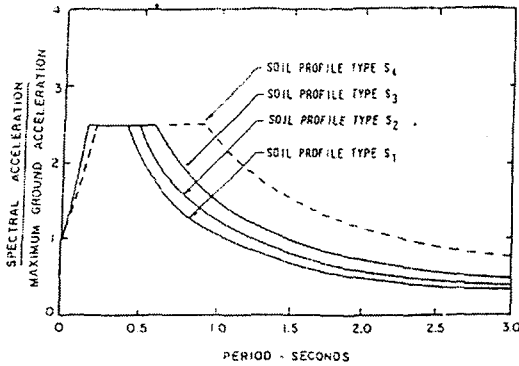
3.1 개요

내진설계시 구조물에 작용하는 하중은 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도 및 하부지반조건 등에 의해 결정되고, 지역 및 중요도는 구조물의 설계 이전에 모두 결정되는 요소이므로 결국 지반조건이 하중 결정에 가장 큰 영향을 주게 된다. 따라서, 지반분류를 정확히 하고 지반의 특성에 적합한 설계지반운동 수준을 결정하는 것은 내진설계의 기본이다. 지진시 지표면에 있는 구조물의 주기에 따른 설계가속도를 결정하기 위하여, 국내의 여러 내진설계기준에서는 지반종류에 따라 설계응답스펙트럼을 제시하고 있다. 그러나, 국내 내진설계기준은 대부분 미국의 내진설계기준을 따르고 있어 국내 지반의 일반적인 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서, 현재 국내 내진설계기준이 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있는 현황을 살펴보고, 국내 기준의 근간이 된 미국 UBC 기준의 특징과 국내 지반특성에 적합한 기준 또는 시방서의 개선을 위한 몇 가지 사항을 점검해 보기로 한다.

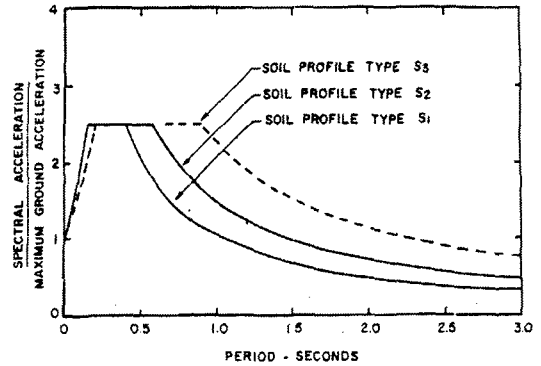
3.2 현황

현재 국내에는 여러 기관에서 제정한 내진설계기준 및 시방서가 있다. 그 중에서 현업에서 많이 쓰이는 대표적인 설계기준으로 「내진설계기준연구 II」(건설교통부, 1997), 「건축물 하중기준 및 해설」(대한건축학회, 2000), 「도로교표준시방서」(건설교통부, 1999) 등을 들 수 있다. 그러나 국내 내진설계기준을 이용하여 설계를 할 경우, 설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼과 지진 응답해석 결과에서 얻어진 응답스펙트럼을 비교해 보면 단주기와 장주기 영역에서 매우 다른 특성을 보인다. 이는 국내 내진설계기준이 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있다는 반증이다.

이러한 현상은, 국내 내진설계기준이 미국 UBC 기준 또는 ATC 기준의 설계지반운동 결정방법을 그대로 차용하고 있어, 응답스펙트럼을 작성하기 위한 증폭계수가 국내 지반특성과는 매우 다르기 때문이다. 미국 내진설계기준의 설계지반운동 변천과정을 살펴보면, 1985년 이전에는 지반을 세 종



(a) 1985년 이전



(b) 1985년 이후

그림 4. 미국 내진설계기준의 설계응답스펙트럼 변화과정

류로 분류하여 그림 4(a)와 같이 세 종류 지반에 대한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. 그러나, 1985년 멕시코시티 지진과 1989년 Loma Prieta 지진시 연약한 점토가 발달된 지역에서 큰 피해가 발생한 경험을 바탕으로 연약지반에 대한 지반분류를 추가하여 그림 4(b)와 같이 설계응답스펙트럼을 개정하였다. 그림 4의 두 가지 설계응답스펙트럼을 살펴보면, 주기 0.5초 이하의 단주기 영역에서는 지반 종류에 관계없이 증폭현상을 일정하게 고려함을 볼 수 있다. 반면, 장주기 영역의 경우 지반 조건에 따라서 응답스펙트럼의 증폭이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다.

1991년과 1992년에 미국의 지진공학자들은 Loma Prieta 지진기록을 이용한 지진응답해석결과, 장주기 뿐만 아니라 단주기 영역에서도 응답스펙트럼의 증폭이 크게 나타난다는 결론을 내렸다. 이러한 결과를 토대로 1994년 NEHRP 및 1997년 UBC에서는 설계응답스펙트럼을 그림 5와 같이 개정하게 되었고, 지반분류 방법도 표 1과 같이 상부 토층 30m의 평균 전단파속도를 이용하여 여섯 종류로 분류하도록 개선하였다. 그림 5의 응답스펙트럼을 살펴보면 이전의 응답스펙트럼과 달리 단주기 영역에서도 지반종류에 따라 응답스펙트럼이 증폭되는 모습을 볼 수 있고, 단주기 영역의 증폭계수 F_a 와 장주기 영역의 증폭계수 F_v 를 도입하여 주기를 고려한 응답스펙트럼을 작성하도록 되어 있다.

국내의 대표적인 설계기준인 「내진설계기준연구 II」의 응답스펙트럼은 그림 6에 나타나 있고, 이는 그림 5의 미국 UBC 기준을 근간으로 제정된 것이다. 「건축물 하중기준 및 해설」의 경우 그림 4(b)의 ATC 1987 기준을 일부 수정하여 사용하고 있으며, 「도로교표준시방서」의 경우 설계응답스펙트럼의 경우 그림 4(b)와 같고 지반분류 체계는 표 1의 UBC 기준을 약간 수정하여 사용하고 있는 실정이다. UBC 기준의 경우 기반암이 지하 100~300m 정도에 존재하는 미국 서부해안지역에서 기반암 깊이까지 지반조사를 일반적으로 할 수 없기 때문에 상부 토층 30m의 평균 물성치를 이용하여 지반을 분류하고 설계응답스펙트럼을 작성하고 있다. 미국 서부해안 지반의 고유주기는 표 1의 S_c 지반의 경우 평균이 대략 0.50초 정도이고, S_D 지반의 경우 1.20초 정도 된다. 그러나, 필자의 경험에 의하면 해성퇴적층과 같이 점토가 깊이 발달된 지반을 제외하면, 국내 지반의 일반적인 특성은 기반암이 지하 30m 이내의 얕은 깊이에 존재하고 지반의 고유주기는 S_c 지반의 경우 대략 0.25초 이하, S_D 지반의 경우 0.40초 이하의 단주기 영역에 해당한다. 따라서, 장주기 보다는 0.5초 미만의 단주기

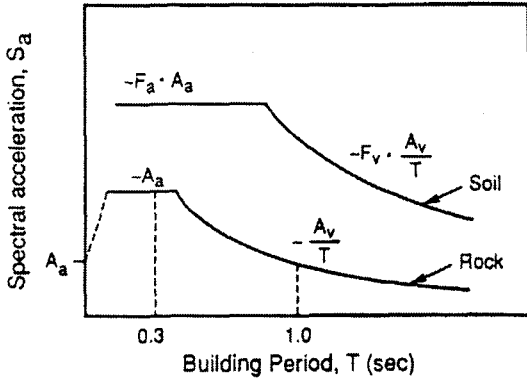


그림 5. 1997년 UBC의 응답스펙트럼

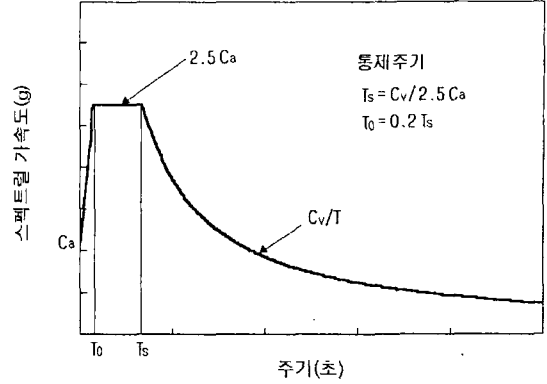


그림 6. 내진설계기준연구(II)의 응답스펙트럼

표 1. 미국 UBC 1997 기준의 지반분류방법 \bar{S}_u

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m 에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 \bar{N} (\bar{N}_{CH}) (blow/foot)	비배수전단강도 \bar{S}_u
S _A	경암지반	1,500초과	-	-
S _B	보통암지반	760에서 1,500		
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S _E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S _F	부지 교유의 특성평가가 요구되는 지반			

영역에서 구조물에 미치는 영향이 상대적으로 커지므로, 미국 내진설계기준을 그대로 사용하고 있는 현재 기준과 많은 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 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.

설계응답스펙트럼을 정확하게 작성하기 위하여는 선행되는 지반분류 체계를 먼저 개선해야 한다. 전술한 바와 같이, 국내 지반의 경우 기반암이 얇은 깊이에 존재하여 지반이 주로 단주기 거동을 한다. 따라서, 장주기 보다는 단주기 영역에서 구조물에 미치는 영향이 상대적으로 커지므로, 이러한 현상을 적절하게 반영할 수 있는 지반분류 방법의 개선이 필요하다. 또한, 지반분류 기준이 서술형식으로 되어 있는 일부 기준의 경우, 지반분류시 모호한 표현이 있어 이를 적용하는 현업 기술자에 따라 동일한 지반을 다르게 분류할 개연성이 있다. 국내 여러 설계기준의 지반분류 기준이 달라 일관성 있는 지반분류에 어려움이 있는 것도 현실이다. 따라서, 향후 지반분류 방법의 개선에 대하여도 많은 전문가들의 의견 수렴이 필요하다.

3.3 전망

국내 내진설계기준의 경우 미국 내진설계기준의 지반분류 및 설계지반운동 결정방법을 대부분 준용하고 있어, 국내 지반의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서, 국내 지반특성에 적합한 설계기준의 개선을 위한 연구가 수행되어야 할 것이다. 이를 위하여 먼저 지반분류 체계를 개선해야 한다. 「내진설계기준연구 II」의 경우 상부 토층 30m 평균 전단파속도를 이용하여 지반을 분류하고 있으나, 이는 국내 지반의 경우 대부분 30m 보다 훨씬 얇은 곳에 기반암이 존재하여 국내 지반특성에는 적합하지 않는 기준으로 판단된다. 이에 대한 많은 전문가들의 의견 수렴이 필요할 것으로 생각한다. 따라서, 설계응답스펙트럼을 재작성 하기 위하여 단주기·장주기 영역의 증폭계수 F_a 와 F_v 를 국내 지반에 적합하도록 재산정하는 연구를 조속히 수행해야 할 것이다. 이러한 연구가 진행되어야만 국내 지반특성을 제대로 반영할 수 있는 내진설계기준 및 시방서를 개선할 수 있고, 국내 내진설계기술의 신뢰성을 높일 수 있는 계기가 될 것이다.

4. 액상화 평가

4.1 개요

지진 발생시 지반이 경험하게 되는 가장 대표적인 파괴 현상이 액상화 현상이다. 최근 국내에서는 협소한 국토사정으로 공항, 공업단지 등의 대규모 건설부지 마련을 위해 연약지반이나 매립지에 대한 개발이 증가하고 있는 추세이다. 느슨한 사질토로 연약 지반을 개량할 경우, 작은 규모의 지진에 대해서도 액상화 현상이 발생하여 큰 지진피해가 발생할 수 있음을 많은 지진피해 자료에 의해 알 수 있다. 따라서 연약한 매립지반에 구조물을 축조할 경우 해당 지반의 지진 및 지역특성을 고려하여 액상화 현상을 예측하고 이에 대한 안정성을 검토하며 이러한 결과를 바탕으로 내진설계기준을 수립해야 한다. 우리나라는 발생 가능한 지진특성이 미국, 일본과는 크게 다름에도 불구하고 액상화 가능성 평가 시 미국 및 일본 규정을 수정 보완 없이 그대로 이용하는 경우가 많다. 이것은 구조물의 설계 및 시공에 있어서 매우 비효율적이고 비경제적인 결과를 초래하게 될 것이다. 그러므로 액상화 가능성을 평가 할 때는 우리나라의 지진특성에 맞는 해석을 하는 것이 중요하며 이를 바탕으로 액상화 현상에 대한 평가기준 및 개선방안을 마련해야 한다. 이러한 요구에 부응하여 국내에서도 내진기준의 제정 및 이에 따른 내진설계 시 심도 있게 다루어지고 있는 분야가 되었으며, 지난 수년 간 지진공학연구센터를 중심으로 많은 연구자들이 이에 대한 연구를 꾸준히 수행되어 왔으며 연구결과 의 상당부분이 현업에 적용되고 있다.

4.2 현황

국내에서 액상화를 평가하기 위한 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 지진시 액상화 발생 유무와 그 지역의 SPT N값과의 상관 Database를 이용하였으며 각 나라

별 SPT 장비별 차이점을 보정하기 위하여 $(N_1)_{60}$ 를 도입하였다. 이는 상재하중 $1 \text{ tonf/ft}^2 (100\text{kPa})$ 과 에너지 효율 60%에 보정된 N치를 의미한다. 표준관입시험은 장비가 비교적 간단하고 시험에서 결정되는 관입저항치(N값)로부터 지반의 강도정수를 추정하는 경험적 상관관계의 활용도가 높아 널리 사용되고 있다. 그러나, 표준관입시험은 명칭이 시사 해주는 것과는 상이하게 표준화되지 못하여 시험결과인 N치를 신뢰성 있게 이용하는 데에는 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 관입 시 타격하는 햄머의 순수 에너지에 대한 전달 에너지의 비(energy ratio)를 측정하여 적용하고 있다. 전달 에너지를 측정하는 방법으로는 로드셀을 통해 힘 성분만을 측정하는 힘-적분방법(F2)과 힘 성분 이외의 속도성분까지 측정하는 힘-속도 적분방법(FV)이 있다. 현재 국내에서는 한국도로공사의 주관으로 한국과학기술원, 고려대학교, SK건설연구소등의 협동연구를 통해 국내에서 사용되는 표준관입시험 장비의 에너지 효율 측정을 통한 표준화작업 연구가 수행된 바 있다.

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 유효 상재압에 대해 보정된 CPT의 선단지지력 값을 이용하여 액상화를 평가하는 방법을 제안하였다. 대상지반의 액상화에 대한 안전율이 $F < 1.5$ 인 경우 또는 중요구조물의 경우에는 지진응답해석과 실내 진동삼축시험으로 액상화를 평가하는 상세예측법을 시행한다. 진동 삼축 시험에 의해 구해지는 액상화저항강도는 상대밀도, 응력상태, 결합구조, 변형율이력등 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 고란 상태로 채취되며, 현장조건에 맞추어 재성형하는 것이 일반적이다. 시료의 재성형방법은 층다짐법, 진동다짐, 건조모래 침전법, 수중침강법, 습윤모래 성형법 등이 있으며, 진동삼축시험의 결과가 성형방법에 따라 상당히 다른 결과가 나타나므로 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, 순수전단변형과 K_0 조건을 비교적 제대로 재현할 수 있는 순수전단시험과의 비교 연구가 필요한 실정이다.

4.3 전망

지반공학 분야의 액상화 판정기법에 있어서 현재지반의 비선형 유효응력거동모델을 이용한 동적 지진응답 해석에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이러한 해석결과와 지역적인 부지특성 평가

작업 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 현시점에서 개발된 여러 액상화 예측기법을 종합적으로 검토하여 액상화가 예상되는 지역에 대하여, 액상화 대책공법을 수립하고 경제적이며 적절한 액상화방지 공법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

5. 지반-구조물 상호작용 해석

5.1 개요

지진에 의하여 발생된 지진파는 진원으로부터 지반을 매체로 하여 구조물의 기초에 도달하게 된다. 실험, 계측 및 경험 등에 의하면 댐이나 원자력 발전소의 격납구조물과 같은 거대 구조물의 경우의 지진응답은 지진자체의 특성과 구조물이 위치한 지반의 조건, 구조물의 동적 거동특성과 더불어 지반과 구조물의 동적 상호작용에 매우 큰 영향을 받는다. 지반-구조물 상호작용은 특히 강성이 크고 부피가 큰 구조물이 상대적으로 연약한 지반에 위치한 경우 큰 문제가 된다.

우리나라의 경우 전반적으로 지반의 조건이 양호함으로 인하여 구조물 해석시 일반적인 지진해석만을 수행했지만, 건설부지 선정이 점점 힘들어지는 현 상황을 고려할 때 좋지 않은 지반조건에서 건설이 필요함에 따라 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석이 필요하게 되었다. 실제로 원자로 격납구조물이나 고정식 해양항만구조물 등이 많이 건설되고 있는 현 상황에서, 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석은 필수적이라 할 수 있다.

5.2 현황

근래 들어 우리나라를 포함하여 전 세계적으로 빈발하는 지진 등으로 인해 지반과 구조체의 동적 메카니즘에 대한 관심이 높아지면서 이 분야에서 여러 이론의 개발 및 재해석과 평가가 이루어지고 있다. 또한, 실무에서는 지금까지 사용해온 여러 해석 프로그램들의 적용방법과 적용한계, 바른 사용방법에 대한 개선이 요구되어 보다 나은 해석프로그램들이 정력적으로 개발되고 있는 추세이다. 이와 같은 추세를 따라 국내에서도 지반-구조물 동적 상호작용 해석법에 대한 개념과 지반구조물의 동적해석을 위한 여러 가지 기법(정적 해석기법, 수정진도법, 동적해석기법)이 내진설계에서 활발히 적용되고 있다. 그럼에도 불구하고, 일반인은 물론 이 분야의 전문인조차 동적 해석에 대해 추상적으로 받아들이는 부분이 많은 것 또한 사실이다.

5.3 전망

현재까지는 동적해석 및 지반-구조물 상호작용 해석의 경우 대부분의 경우 지반의 정확한 비선형성(유효응력 개념)을 고려하지 못하는 주파수영역에서 선형 또는 등가선형 해석이 이루어 졌으나,

국내외적으로 지반의 비선형 거동특성과 동적하중에 의한 간극수압 유발문제 등과 같은 동적하중에 대한 지반의 다양한 거동 특성을 고려할 수 있는 거동모델의 개발 중에 있다. 또한, 이를 이용한 시간 영역에서의 비선형 지반-구조물 동적 상호작용에 대한 해석이 주류를 이루게 될 것으로 예상된다.

6. 지반 진동 평가, 방진대책 및 비파괴 시험법

6.1 개요

건설 기계 및 교통하중으로 발생한 과도한 지반진동의 전파는 인접 구조물의 손상 및 인근 주민의 생활 불편을 야기할 수 있다. 이에 대한 대책으로 현장진동 계측자료를 바탕으로 한 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 지반조건에 따른 진동 감쇠 특성을 예측하는 것이 효율적인 방법이다.

한편, 기 건설된 기초구조물의 내진성능 검토 및 안정성검토를 위해서는 기초구조물의 품질 및 상태 평가의 선행작업이 필요하다. 기초구조물의 내진성능 검토를 위해서는 기초구조물이 설계대로 지정된 깊이까지 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 건설 중 이거나 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 접촉상태를 파악할 수 있는 결함조사법에 대한 관심이 증대되고 있고, 이에 대한 보다 효율적인 방법의 검토가 필요하다.

6.2 현황 및 전망

지반진동 평가 및 방진대책에 대해서는 철도진동원을 중심으로 철도진동의 특성, 지반진동의 물리적 표현방법, 진동파의 전파 및 감쇠특성, 진동원의 특성 및 방진대책에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 지반진동은 그 수준이 어느 한계를 넘어서면 주위구조물이나 시설물에 피해를 유발하게 된다. 구조물이나 시설물의 종류가 다양하고 구조적 또는 성능상의 특성이 다양하므로 피해를 미치는 수준에 대하여 일반적으로 적용할 수 있는 기준을 설정한다는 것은 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.

일반적으로 진동의 전파 거리에 따른 감쇠는 기하학적 감쇠(Geometric Attenuation)와 재료감쇠(Material Attenuation)의 두 가지 원인으로 발생한다. 현재, 현업에서의 지반진동 계측은 지반 진동의 전파 경로를 고려하지 않고 지표면에서만 이루어지고 있으며, 감쇠 예측 또한 진동원에 따른 지반

진동의 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 대상지역별 지반진동 측정을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다. 또한, 지반진동의 거리별 감쇠 특성을 예측하기 위해서는 진동원의 기하감쇠 특성 및 주된 발생파를 파악하여 이를 이용한 기존에 제안된 감쇠식을 이용하여 진동의 감쇠정도를 예측하여야 한다. 지난 수년간 여러 지반진동원에 대한 계측결과를 바탕으로 제안된 진동원에 따른 기하감쇠특성 및 주된 발생파의 종류에 대한 연구가 수행된 바 있다(김동수,이진선,1999).

최근에는 유한요소법 및 경계요소법을 이용하여 지반진동의 전파 및 감쇠를 예측하는 방법이 국내외에서 연구가 진행되고 있으며, 이를 위해서는 신뢰성 있는 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 진동 차단벽 및 방진 재료를 이용한 진동 감쇠방법을 사용하여야 하며 이에 대한 연구 또한 진동원 및 지반조건에 따라 지속적인 연구가 필요하다.

한편, 기초구조물의 비파괴검사방법으로는 크게 검측공을 이용하는 방법과 검측공을 사용하지 않는 비검측공 시험법들의 적용성이 연구되어 왔으며 실무에 일부 적용되고 있다. 기 건설된 깊은 기초의 대표적인 검측공 시험에는 공내 탄성파시험(Parallel Seismic Test)이 있다. 이 방법은 기존 구조물의 결합 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 필요 없이 말뚝에 연결된 부분의 임의 지점에서 타격하여 시험할 수 있고, 시험 결과가 비교적 정확한 반면에 말뚝에서 가까운 위치에 검측공을 시공해야 하는 어려움이 있다.

기 건설된 깊은 기초의 두부에 접근이 가능할 경우, 말뚝 내부 혹은 말뚝 근접지반에 별도의 검측공설치 없이 응력파(stress wave)의 유발 및 감지가 모두 말뚝 두부에서 수행되는 완전한 비파괴 시험 방법을 사용할 수 있다. 대표적인 비검측공 시험방법에는 충격반향기법과 충격응답기법이 있다. 충격 반향 기법이란 말뚝의 머리부분이나 중간부에 감지기를 설치하고 말뚝의 머리부분을 햄머로 타격하면 발생된 탄성파가 말뚝을 따라 전파되다가 선단부 및 중간 결합부에서 반사하게 되는데, 이러한 신호를 측정하여 말뚝의 길이 및 품질상태를 파악하는 시험방법이다. 본 방법은 말뚝 두부에서 실험이 이루어지므로 말뚝두부에만 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.

1. BSSC (1997), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", Commentary, Building Seismic Safety Council. Washington, D.C.
2. BSSC (1997), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provisions", Building Seismic Safety Council. Washington, D.C.
3. 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.
4. FEMA, NEHRP (1997), "Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", Commentary.
5. FEMA, NEHRP, "Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Provisions".
6. I.PoLam, M.Kapuskar and D.Chaudhuri (1998).
7. Idriss, I.M. (1995), "Assessment of Site Response Analysis Procedures", National Institute of Standards and Technology, NIST GCR 95-667.
8. 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.
9. Meng, J., Rix, G. J. (2003), "Reduction of Equipment-generated Damping in Resonant Column Measurements", Geotechnique 53, No. 5, pp. 503-512.
10. Mok Young-Jin, Kim Jung-Han, Kang Byung-Soo (2003), "A Pilot Study of In-hole Seismic Method", Jour. of the KGS, Vol. 19, No. 3, pp. 23-31.
11. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B (1972), "SHAKE:a computer program forearthquake response analysis of horizontally lay-ered sites, Report EERC 72-12, EarthquakeEngineering Research Center, University of California, Berkeley.
12. 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.
13. Seon-Keun Hwang (1997), "Dynamic Properties of Natural Soils", Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
14. Unified Building Code, Administrative, Fire-andLife-Safety, and Field Inspection Provisions, Volume II. International Conference of BuildingOfficials, 1997.
15. 건설교통부 (1997), 내진설계 기준연구 (II).
16. 김동수, 방은석, 서원석 (2003), "표준관입시험을 이용한 압축시험에서 전단파 속도 주상도의 도출", 한국지반공학회논문집, 제19권, 2호, pp. 135-146.
17. 김동수, 이진선 (1999), "다양한 지반진동의 전파 및 감쇠특성", 대한토목학회논문집, Vol. 19, No. III-5, pp. 1021-1032.
18. 대한건축학회 (2000), 건축물 하중기준 및 해설.
19. 대한토목학회 (2000), 도로교 표준 시방서.
20. 해양수산부 (1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서.