

지반 응답 해석 Round Robin Test의 입력 지진파 및 물성에 관한 고찰 Investigation into the Input Earthquake Motions and Properties for Round Robin Test on Ground Response Analysis

선창국¹⁾, Chang-Guk Sun, 한진태²⁾, Jin-Tae Han, 최정인³⁾, Jung-In Choi,
김기석⁴⁾, Ki-Seog Kim, 김명모⁵⁾, Myoung-Mo Kim,

- 1) 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원, Senior Researcher, Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
- 2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후연구원, Postdoctoral Researcher, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University
- 3) 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University
- 4) (주)희송지오테크 대표이사, Representative Director, Heesong Geotek, Co., Ltd.
- 5) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Round Robin Test (RRT) on ground response analyses was conducted for three sites in Korea based on several site investigation data, which include borehole logs with the N values from standard penetration test (SPT) for all three sites and additionally cone tip resistance profiles for two sites. Three input earthquake motions together with the site investigation data were provided for the RRT. A total of 12 teams participating in this RRT presented the results of ground response analyses using equivalent-linear and/or nonlinear method. Each team determined input geotechnical properties by using empirical relationships and literatures based on own judgment, with the exception of the input motions. Herein, the characteristics of input motions were compared in terms of the frequency and period, and the selection of the depth to bedrock, on which the motions is impinged, was discussed considering geologic conditions in Korea. Furthermore, a variety of geotechnical properties such as shear wave velocity profiles and soil nonlinear curves were investigated with the input properties used in this RRT.

Keywords : ground response analysis, site effects, earthquake motion, shear wave velocity, shear modulus, damping ratio

1. 서론

지난 20 세기 후반부터 우리나라는 사회적 필요성에 따라 내진 설계나 내진 성능 평가 및 보강에 관한 체계화 목적의 연구 개발을 진행해 왔으며, 최근에도 다각적인 합리화 연구가 수행되고 있다. 공학적 개념의 다양한 내진 분야들 중에서도 지반공학은 가장 근본적인 지표를 제공해야 한다. 즉, 기초 구조물의 내진 성능 확보 뿐만 아니라 상부 구조물의 내진 설계 및 내진 성능 평가를 위해서도 대상 부지에 대해 정량화된 지반 운동을 제시해야 한다. 국내에서는 본격적으로 내진 관련 연구 개발이 진행됐던 지난 1997년 즈음부터 이미 지반 운동을 평가할 수 있는 기법들을 적용하여 실질적으로 시설물의 내진

설계나 내진 성능 평가에 활용해 왔다. 우리나라의 경우 상당한 피해 사례로서 과거 다양한 역사 지진들이 기록되어 있다 할지라도 해외의 강진 지역들과는 달리 실제 계기 지진 관측 및 피해 기록에 근거한 경험적 연구 가능 사례가 거의 전무한 상황이었다. 이에 따라 부지 고유 지반 조건에 따라 다양한 크기와 주기 특성으로 나타날 수 있는 지반 운동의 평가는 지반 응답 해석(ground response analysis)과 같은 해석적 방법을 통해 이루어져 왔고(선창국 등, 2005a), 현재는 실무에서도 반무한 자유장 부지를 대상으로 하는 일차원 지반 응답 해석이 매우 폭 넓게 수행되고 있다.

일차원 지반 응답 해석은 해석 과정의 정의역(주파수 영역 또는 시간 영역) 및 대상 부지 특성의 고려 방법에 따라 전응력을 고려할 수 있는 등가선형 해석 기법이나 비선형 해석 기법 그리고 유효응력을 고려할 수 있는 비선형 해석 기법으로 구분될 수 있다. 물론, 경우에 따라 선형 해석 기법이 활용되기도 하지만, 대부분의 경우 지반 운동 평가 목적으로 등가선형이나 비선형 해석을 수행해 오고 있다. 부지 고유의 지반 조건에 따른 지반 운동의 증폭 차이 효과를 부지 효과(site effects)라고 하며, 부지 효과의 정량적 변화나 그 크기는 가장 우선적으로 대상 부지의 국부적 지반 특성에 따라 큰 영향을 받는다. 뿐만 아니라 지반 조사를 통해 동일한 지반 특성이 제시된다 할지라도 지반 응답 해석을 통해 지반 운동을 평가하고자 할 경우, 적용 기법의 차이, 해석자의 입력 지반 특성에 관한 최종 정량적 반영상의 차이, 해석 절차상의 선택 사항 차이 등에 따라 도출되는 결과는 매우 상이하게 나타날 수 있다. 특히, 지반 조사가 지반 응답 해석을 목적으로 철저히 준비되지 않고 기존의 일반적인 상황으로 진행되어 그 결과만이 제시되면, 실제 지반 응답 해석을 실시하는 해석자는 다양한 가정과 경험적 추정을 하게 되므로 여러 측면의 불확실성이 해석 과정에 여과 없이 투영되어 해석자간 결과가 크게 달라질 수 있다. 이러한 다각적 측면의 불확실성 또는 문제점을 이해하기 위하여, 한국지반공학회 지반진동위원회에서는 지반 응답 해석 기법들에 대한 Round Robin Test(RRT)를 실시하였으며, RRT의 결과를 상세하게 비교함으로써 지반 응답 해석에 있어서 문제가 될 수 있는 기존의 불확실성을 해결하거나 개선하기 위한 분석 연구를 수행하였다. 본 고찰에서는 금번 RRT를 위해 제시된 입력 지진파들 및 대상 부지의 일반적인 특성에 대해 토의하고 더불어 참여한 기관들의 지반 응답 해석 조건 및 입력 물성들에 대해서 비교·토의하고자 한다.

2. 지반 응답 해석 Round Robin Test 수행을 위한 입력 지진파

지반 응답 해석 수행은 대상 부지 고유의 지진 응답을 예측·평가하기 위함이 일반적이며, 대개 해당 부지의 시설물에 대한 내진 설계나 내진 성능 평가를 위해 이루어진다. 현재 우리나라에서는 보통암 노두(지반 분류 B)에 대해서 등고선 형태의 지진재해도나 행정구역에 따른 구역계수를 토대로 설계 지반 운동 결정 목적의 지반 응답 해석을 위한 입력 지진파의 최대 가속도를 설정하도록 제시하고 있다(건설교통부, 1997). 이에 따라 본 RRT에서는 입력 지진파를 0.07과 0.11로 양분화된 국내 구역계수 중 0.11의 큰 값을 선택하고 추가 가정된 I 등급 붕괴 방지 수준(재현주기 1,000년 지진 수준)의 내진 성능 목표에 대한 위험도 계수인 1.4를 고려하여 최종적으로 최대 가속도를 0.154g로 결정하였다. 현행 내진 설계 기준을 고려한다면, 지반 응답 해석 시 최대 가속도 0.154g로 제시된 지진파는 그림 1의 B 점과 같은 암반 노두 운동(rock outcropping motion)의 입력 조건으로 반영되어야 한다. 즉, 실제 지진은 A 점과 같은 암반 내의 원거리 운동으로부터 출발하고 실제 지진 시 피해가 집중될 수 있는 대부분의 주거 산업 부지가 E 점과 같은 토사로 구

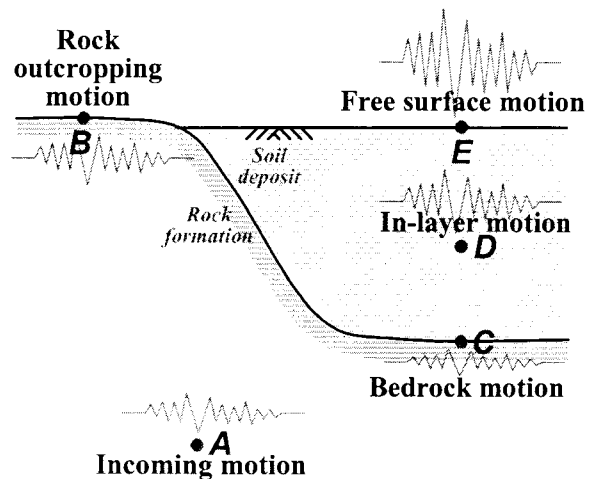
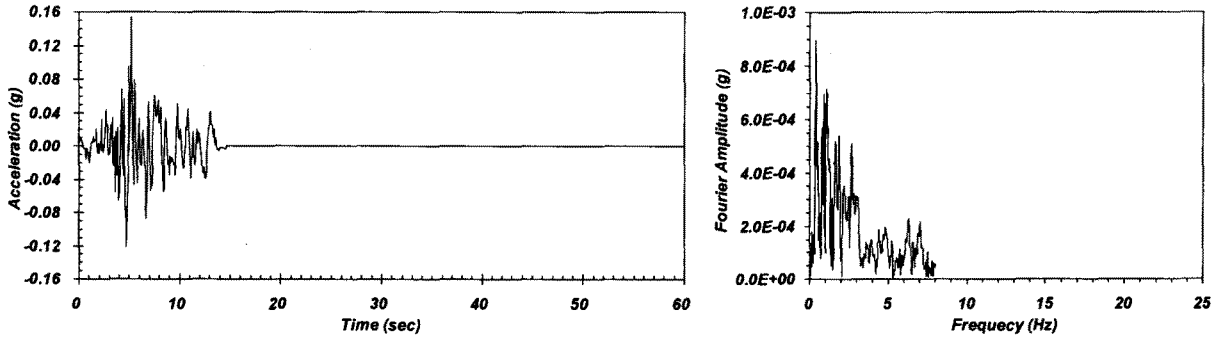
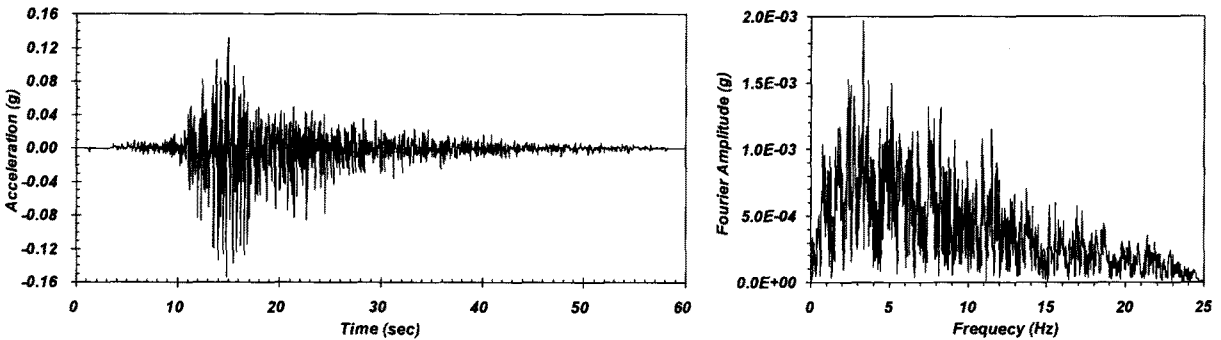


그림 1. 부지 고유 지진 응답의 위치별 정의

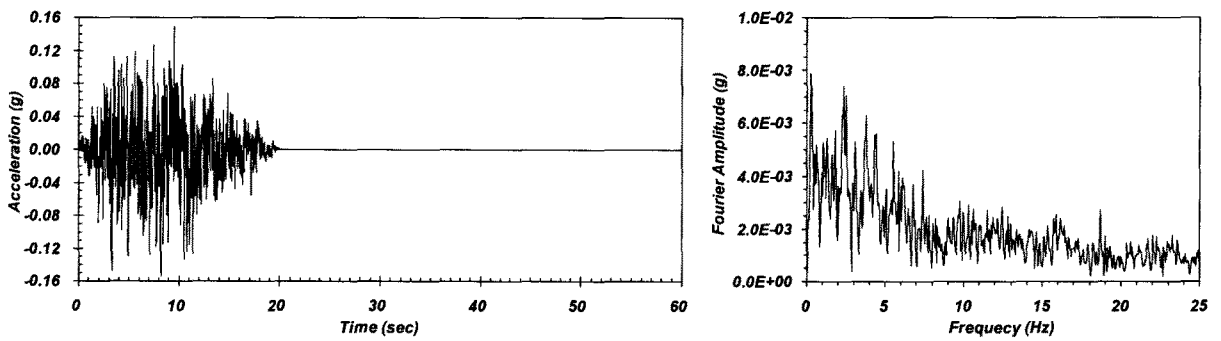
성되어 있지만, 현재 지진재해도나 지진구역으로부터 얻는 지진계수는 국내 모든 부지를 지반 분류 B에 해당되는 보통암 조건으로 가정하여 제시되어 있다. 따라서 지반 응답 해석의 일반적 지향 목적이 바로 B 점의 입력 지진 운동으로부터 E 점(일부 목적의 경우 D 점)의 지반 운동을 예측하는 것이다. 물론, 일반적 사항이 아니고 특별히 확인된 경우나 필요 목적이 있는 경우는 입력 지진파의 최대 가속도 크기를 조정하여 C 점에서 입력 조건으로 설정하여 부지에 대한 응답 해석을 수행하기도 한다.



(a) Hachinohe 지진



(b) Ofunato 지진



(c) 인공합성 지진

그림 2. 입력 지진파의 시간-가속도 이력 및 푸리에 스펙트럼

본 RRT에서는 단일 부지 해석시 지진파의 다양한 주파수(주기) 특성을 반영하기 위하여 그림 2에 도시한 바와 같이 총 3 종류의 지진파에 대한 가속도-시간 이력을 입력 지진파로 선정·제시하였다. 그림 2에는 또한 입력 지진파별 주파수 성분 분포를 파악할 수 있는 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)도 도시하였다. 선정된 지진파는 장주기(저주파수) 성분이 우세한 Hachinohe 지진 및 그에 비해 상대적으로 단주기(고주파수) 성분이 우세한 Ofunato 지진과 같은 강진 지역 계속 지진, 그리고 지반 분류 B(보통암 노두) 조건을 고려하여 표준 설계 응답 스펙트럼에 근사적으로 합성된 인공합성 지진으로 구성된

다. 각 지진은 주파수 성분 뿐만 아니라 지속 시간(duration)과 자료 간격(sampling rate)에 있어서도 큰 차이를 보이는데, 지속 시간 및 자료 간격에 있어서 Hachinohe 지진은 각각 약 14.6초 및 0.063초, Ofunato 지진은 약 58.2초 및 0.02초, 그리고 인공합성 지진은 20.4초 및 0.005초를 보인다. 비록 더욱 많은 지진파들의 입력을 통한 지진 응답 해석 수행이 보다 광범위하고 일반화된 결과 도출을 가능케 할 수 있지만, 선정된 3 종류 입력 지진파들의 특성이 비교적 다양하므로 제한된 상황의 RRT 실시를 위한 입력 지진의 다양성이 확보된 것으로 볼 수 있다.

지진파의 주파수 특성을 파악하기 위해 유용한 정보를 제공하는 푸리에 스펙트럼과 더불어 지진파에 따른 지표면 상부 구조물의 지진 응답 특성을 파악할 수 있는 응답 스펙트럼은 공학적 관점에서 매우 보편적인 지표로 활용되어 왔다. 내진 설계를 위한 표준 설계 응답 스펙트럼도 이러한 지표면 응답 스펙트럼의 형상을 반영하여 이상화한 것이며, 지반 및 지진공학 관점에서는 가속도 응답 스펙트럼이 주로 비교분석되어 진다(Sun 등, 2005). 그림 3은 본 RRT의 3 종류 지진파에 대한 가속도 응답 스펙트럼들을 지반 분류 B 조건의 표준 설계 응답 스펙트럼과 비교 도시한 것이다. 그림 2에서 이미 파악할 수 있었던 바와 같이 Hachinohe 지진의 주기 1초 부근에서의 장주기 우세 특성, Ofunato 지진의 0.2초 부근의 단주기 우세 특성, 그리고 인공합성 지진의 표준 스펙트럼과의 대체적인 유사 특성을 확인할 수 있다. 이와 같은 응답은 암반 노두 조건에 대한 특성이며, 지반 응답 해석 수행을 통해 토사 지층 전파 과정 중에 변화된 지표면 가속도 응답 스펙트럼과의 비교를 통해 부지 고유 지진 응답 특성을 평가해 볼 수 있다.

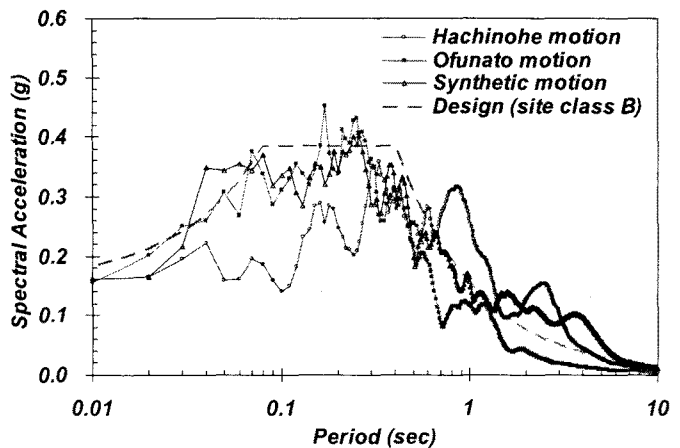


그림 3. 입력 지진파의 보통암 노두 가속도 응답 스펙트럼

3. 지반 응답 해석 Round Robin Test의 대상 부지 현황

지반 응답 해석 RRT 수행을 위해 선정된 부지는 총 3 종류로서, 그림 4, 그림 5 및 그림 6에 지층 구성을 포함한 현장 시험 결과를 제시하였다. 선정 부지들이 국내 내륙이나 해안 지역의 대표적인 부지 조건이라고 보기에는 다소 제한적 일 수 있다(선창국 등, 2005a; 2006a). 그렇다 할지라도, 제 1 부지 및 제 2 부지의 경우 국내 해안 매립 지역들에서 나타날 수 있는 지층 구성을 보이고 있으며(선창국 등, 2006a; 2007a), 제 3 부지의 경우 해안 인접 지역이나 내륙의 하천 인접 지역에서 조사될 수 있는 지층 구성으로 추정된다. 제시된 지반 조사 자료는 부지고유 지진 응답 해석을 수행하기 위한 입력 자료가 아닌 전통적인 자료로 구성되어 있는데, 세 부지들 모두에 대해서 표준 관입 시험(standard penetration test; SPT)의 N 값이 풍화암까지 제시되었고 제 1 및 제 2 부지에 대해서는 콘 관입 시험(cone penetration test; CPT)으로부터 획득했을 것으로 보이는 수정 콘 관입 저항값(cone tip resistance, q_t)이 풍화암 상부의 교호되는 일부 퇴적 지층까지 제시되었다.

지반 응답 해석 또는 부지 응답 해석, 경우에 따라서는 지진 응답 해석이라고 일컬어지는 부지고유 지진 응답 예측을 위한 일차원 해석을 위해서는 각 부지별로 제시된 것과 같은 지층 구성이 우선적으로 파악되어야 한다. 이를 위해서 대상 부지에 대한 시추 조사를 수행하게 되며, 통상적으로 국내 지질 조건의 연암 층까지 확인하게 된다(Sun 등, 2005). 그러나 선정 부지는 지표면부터 풍화암까지의 지층만이 제시되어 있고 풍화암의 경우도 조사 종료 심도 아래에 바로 연암이 분포하는지의 여부가 파악되어 있지 않다. 따라서 이와 같은 조사 자료가 제시된 부지의 경우 지반 응답 해석 과정에 있어서 기반암 심도의 결정 과정 상에서 매우 다양한 가정 또는 추측이 발생할 수 있다. 뿐만 아니라 지질 조건 만에 근거한 부지 응답 해석의 기반암 선정과 관련된 체계적인 고찰이나 기준 제시가 부족한 상황에서는 해석 수행자에

따라 임의 조건으로 기반암 심도를 가정하게 된다. 따라서 대상 부지 시추 조사 자료가 지반 응답 해석 목적의 지반 조사로서는 적절하지 않을 수 있으나, 실제 실무에서 지반 조사 및 지반지진 공학에 대한 이해가 부족할 경우 종종 발생할 수 있는 상황으로 파악해 볼 수 있다. 시추 조사와 일반적으로 병행되는 SPT는 N 값 조사와 더불어 교란 시료 채취가 목적이며, 세 부지에 대해 제시된 N 값의 깊이 분포는 대체로 1.5 m 간격으로 수행된 결과를 제시하고 있으므로 다른 지반 특성 정보가 존재치 않는 상황에서는 차선책으로서 깊이별 특성 결정을 위한 매우 유용한 자료로 활용될 수 있다.

제 1 및 제 2 부지에 대해서만 제시된 30 m 이상 깊이까지의 q_t 분포는 지표면 부근의 연약 지반에만 이용 가능한 휴대용 콘 관입 시험의 결과로 보기는 어려우며, 기계식 콘 관입 시험(CPT) 또는 전기/전자식 피에조콘 관입 시험(piezocone penetration test, CPTu)의 결과로 파악된다. CPT의 경우 최소한 q_t 뿐만 아니라 주면 마찰력(sleeve friction, f_s) 분포도 함께 제시되며, CPTu의 경우 이와 더불어 과잉간극 수압(excess pore pressure, u) 분포도 함께 측정하여 제시된다. 특히, 근래에는 대부분 CPTu 결과를 포괄적으로 이용하는 방법들이 제안되어 흙의 분류를 포함한 지반 특성의 경험적 산정에 활용되고 있다(김홍중 등, 2005). 이와 같은 측면을 감안해 볼

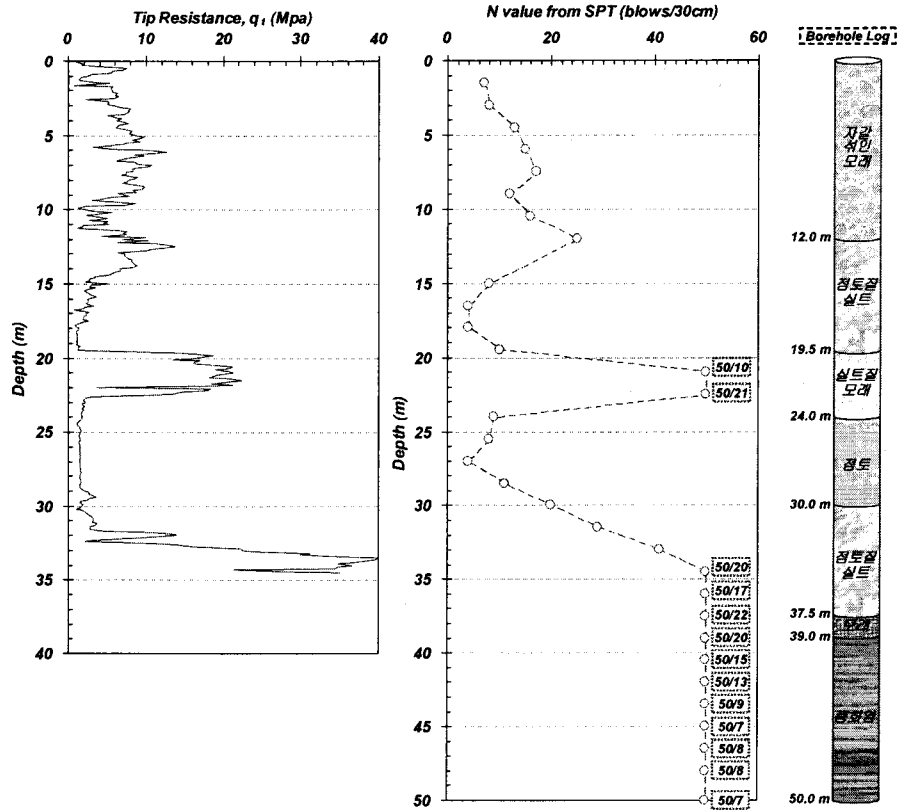


그림 4. 제 1 부지의 깊이별 지층 구성 및 지반 조사 자료

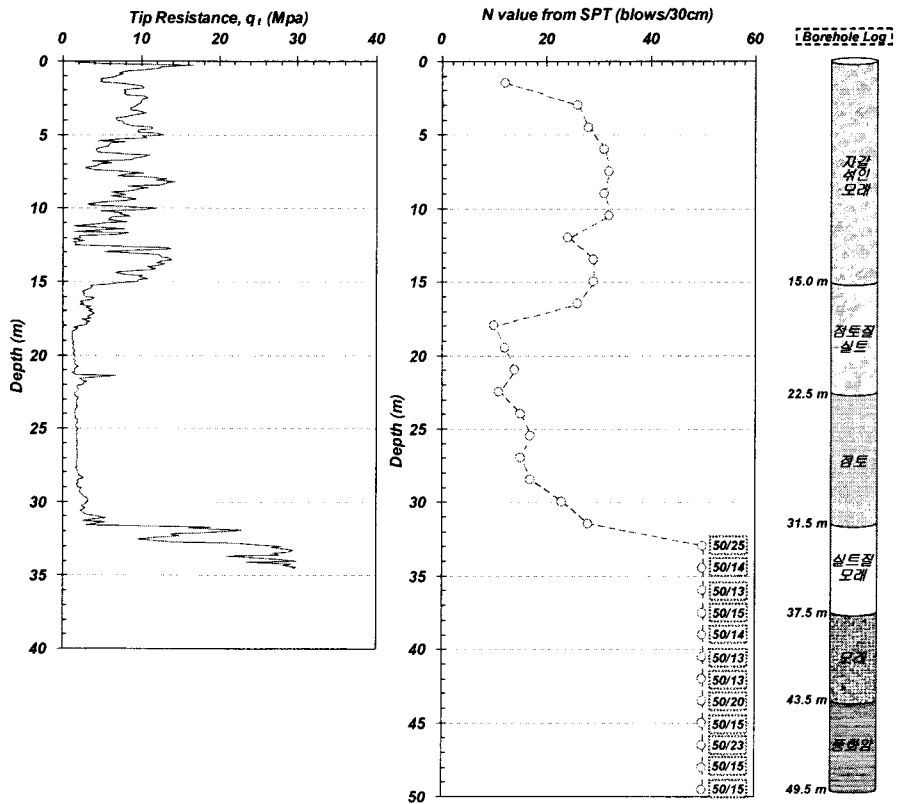


그림 5. 제 2 부지의 깊이별 지층 구성 및 지반 조사 자료

때, 제 1 및 제 2 부지에 대해 q_t 분포만이 제시된 상황은 실제 실무 상황을 반영했다기 보다는 지반 조사에 대한 이해 부족으로 인해 발생할 수 있는 실무의 오류 상황을 반영했다고 파악해 볼 수 있다. CPTu 결과로서 q_t 분포만이 지반 특성의 경험적 결정에 이용될 경우 그 활용성은 매우 제한될 수 있고, 흙의 종류에 따라서는 그 신뢰도가 현저히 낮아지게 된다. 이번 지반 응답 해석 RRT에서는 대상 부지의 지반 자료에 대해서는 정보 측면에서 매우 불리한 여건으로 제시하여 그에 따른 참여진별 자체 판단 적용을 기본 방향으로 설정하였다. 뿐만 아니라 본 RRT에서는 지반 응답 해석을 위해 구성 지층별로 공진주 시험과 같은 실내 시험으로부터 결정되어야 하는 전단계수(shear modulus, G) 및 감쇠비(damping ratio, D)의 전단변형률(shear strain, γ)에 따른 비선형 곡선도 제시하지 않고 참여진별로 다양한 문헌들을 통해 자체적으로 도입 적용하도록 하였다.

4. 지반 응답 해석 Round Robin Test의 참여 해석 조건 및 물성 고찰

지반 응답 해석 RRT는 총 12 개 국내 팀의 참여에 의해 진행되었다. 제시된 세 종류의 입력 지진을 이용한 지표면에서의 부지고유 지진 응답 예측 목적의 해석 및 결과 제시가 과업으로 주어짐에 따라 해석을 위한 기법 및 소프트웨어의 선정 적용과 각 부지별 해석 지층 구성 및 그에 따른 입력 물성은 제한적으로 주어진 지반 조사 자료만을 이용하여 각 참여팀 별로 결정하였다. 본 절에서는 RRT 참여팀에 의해 자체적으로 판단 적용된 해석 조건과 물성에 대해 파악하고 고찰해 본다.

4.1 해석 조건

내진 설계나 내진 성능 평가의 대상 부지가 선정된 경우, 무엇보다도 필요한 사항은 철저한 계획을 통한 현장 조사 및 실내 시험 대상 선정과 그에 따른 내용 및 절차일 것이다. 금번 RRT에서는 열악한 형태의 지반 조사 자료를 제시했으므로, 그 이후 상황인 지반 응답 해석 절차에 대해서 고려해 봐야 한다. 그림 4 ~ 그림 6과 같은 결과에 근거한 지표면 지진 응답 평가를 위해서는 무엇보다도 평가 목적에 따른 해석 기법 및 소프트웨어 선정이 필요하다. 본 고찰 내용에서는 기법적 측면은 제외하고 그 다음 단계인 해석 수행을 위한 입력 상황들에 대해서 고찰해 본다. 입력 상황은 크게 기반암 심도 및 입력 지진파 조건 결정 적용, 지층 구성 적용, 그리고 전단파속도(shear wave velocity, V_s) 및 단위중량(unit weight, γ) 또는 그에 따른 최대 전단계수(G_{max}), 그리고 흙의 비선형 곡선과 같은 입력 물성 산정 적용으로 구분해 볼 수 있으며, 그 다음 단계에서 비로소 해석 수행을 통한 결과 도출이 이루어진다.

해석 조건으로 파악해 볼 수 있는 기반암 심도 및 입력 지진파 조건 결정은 대상 세 곳 부지들에 대해서 참여진별로 다르게 적용될 수 있으며, 각 참여진별로 기존에 수행해 온 일반적인 개념적 절차에 의해 결정된 현황이라고 파악해 볼 수 있다. 표 1은 주어진 지반 조사 자료에 근거하여 결정 적용한 12 개 팀(A ~ L)의 입력 조건을 정리한 것이며, 매우 다양한 해석 조건이 적용되었음을 확인할 수 있다. 우선, 기반암 심도를 살펴보면 주어진 지반 조사 자료가 불완전함에 따라 조사된 풍화암 하부, 풍화암 시점, 그리고 풍화암 상부의 퇴적층 내부(주로 CPT 종료 심도)로 다양하게 가정하고 있다. 뿐만 아니라 입력 지진파의 기반암 적용 조건에서는 현행 국내 내진 설계 기준(건설교통부, 1997)에서 보통암 노두(outcrop)에 대한 지역별 지진계수 또는 지진재해도를 제시하고 있고 이에 따라 특수한 상황이 아닌 일

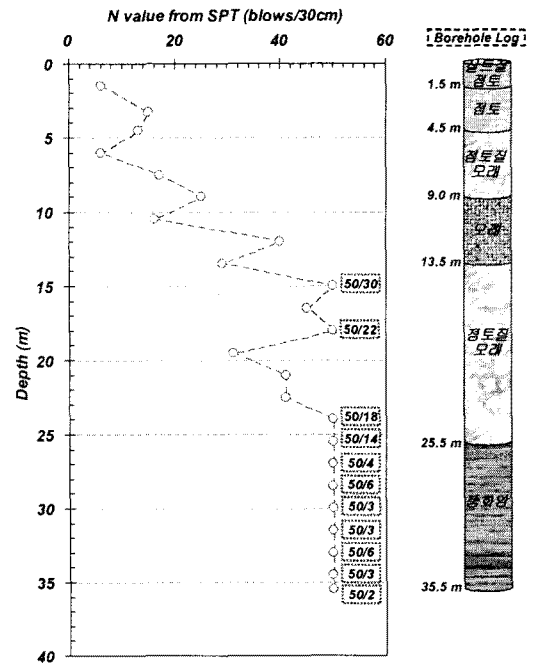


그림 6. 제 3 부지의 깊이별 지층 구성 및 지반 조사 자료

반적인 지표면 지진 응답 예측의 경우 제시된 입력 지진파를 기반암 노두 조건에 대해 적용해야 됨에도 불구하고, 토사 지층 아래의 기반암 상부인 내부(inside)에 적용한 참여진도 두 팀이 존재하였다. 이러한 상황은 RRT 진행시 특별히 이에 대한 기준 방향을 주지 않아서 발생한 것으로 보이지만, 경우에 따라서는 실제 해석자가 등안시 할 수도 있는 조건이므로 항상 주의해야 할 사항이다.

표 1. 기반암 심도 및 전단파속도(전단계수) 구분 입력 층 현황

부지명	기반암 심도 (m)	지진파 입력 조건	V_s 구분 입력 층 수 (기반암 포함)	기관	기관 수	비고
제 1 부지	50.0 (풍화암 하부)	Outcrop	33 ~ 34	A, D, G, H, I	4	SPT 수행 심도로 (중간에서; D) 구분
			22	F	1	SPT 수행 심도로 구분
	40.5 (풍화암 시점)	Outcrop	21	K	1	2 m 간격으로 구분 (일부 Inside)
			28	L	1	SPT 수행 중간에서 구분 (일부 Inside)
		Inside	26	B	1	SPT 수행 심도로 구분
			40	J	1	1 m 간격으로 구분
	34.5 (CPT 종료)	Outcrop	16	C	1	V_s 분포를 고려 대표 층으로 자체 구분
48.0 (풍화암 내부)	Outcrop	22	E	1	SPT 수행 심도로 구분	
제 2 부지	49.5 (풍화암 하부)	Outcrop	34 ~ 35	A, D, G, H, I	4	SPT 수행 심도로 (중간에서; D) 구분
			23	E, F	2	SPT 수행 심도로 구분
	45.0 (풍화암 시점)	Outcrop	20	K	1	2~4 m 간격으로 구분 (일부 Inside)
			31	L	1	SPT 수행 중간에서 구분 (일부 Inside)
		Inside	30	B	1	SPT 수행 심도로 구분
			44	J	1	1 m 간격으로 구분
	37.5 (CPT 종료)	Outcrop	9	C	1	V_s 분포를 고려 대표 층으로 자체 구분
제 3 부지	35.5 (풍화암 하부)	Outcrop	24 ~ 25	A, D, G, H, I	4	SPT 수행 심도로 (중간에서; D) 구분
			16	E, F	2	SPT 수행 심도로 구분
	27.0 (풍화암 시점)	Outcrop	14	K	1	2~3 m 간격으로 구분 (일부 Inside)
			19	L	1	SPT 수행 중간에서 구분 (일부 Inside)
		Inside	18	B	1	SPT 수행 심도로 구분
			27	J	1	1 m 간격으로 구분
	25.5 (점토질 모래)	Outcrop	8	C	1	V_s 분포를 고려 대표 층으로 자체 구분

기반암 심도는 약 반 수 정도의 참여진이 조사된 풍화암 하부에 기반암이 분포하는 것으로 가정하였으며, 그 다음은 4 개의 참여진이 풍화암 시작 심도를 기반암으로 보았는데 이는 풍화암을 기반암으로 고려한 것이다. 현재까지 지질 조건만으로 국내에서 어느 상태의 암반을 기반암으로 고려해야 할 것인지에 대한 체계적 연구가 미흡한 상황이므로 기반암 결정에 대해서는 보다 객관적이고 종합적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

지반 응답 해석을 위해서는 지표면부터 기반암까지의 토사 지층에 대한 구분 입력이 필요하며, 금 번 RRT에서는 제시된 부지 특성 자료 중에서 지층 분포와 N 값이 그 구분 지층으로 활용될 수 있다. 대개의 경우 동일한 지층 내에서도 지진 응답에 영향을 미치는 강성(stiffness)은 크게 변화할 수 있으므로 현장에서 조사된 깊이에 따른 지반 특성을 토대로 해석 시에는 동일 지층 내에서도 세부 지층을 구분하여 V_s 와 γ_v (또는 G_{max})를 다른 값으로 입력하게 된다. 이번 RRT에 참여한 세부 지층 구분을 살펴보면, 일부 1 m 또는 2 m의 등간격 지층 구분을 제외하고는 대부분의 참여진들이 N 값 획득 심도(SPT 수행(시작) 심도)를 구분 기준으로 설정하였다. 반면, 2 개의 참여진은 N 값 획득을 위한 SPT 수행 심도의 중간 깊이를 기준으로 세부 지층을 구분하였다. 세부 지층 구분 근거가 미약한 등간격 참여진의 경우 해석적 편의를 위해 구분한 것으로 파악되는데, 이러한 경우 보다 적극적인 현장 조건 반영을 위한 노력이 필요하다.

본 절에서는 세부 지층 구분에 대해서 보다 상세하게 고찰해 보고자 한다. 그 대상은 N 값 획득의 SPT 수행 심도를 이용하여 자체적인 판단을 통해 지층 구분을 실시한 두 경우이다. 물론, 현장 탄성과 시험(seismic test)을 통해 V_s 분포를 정량적으로 획득한 경우는 그를 토대로 보다 개관적인 세부 지층 구분이 가능하지만, 이번 경우와 같이 N 값만이 이용되는 상황에 대해서는 보다 현실적인 고찰이 필요하다. 그림 7은 SPT 수행 절차를 모식적으로 도시한 것으로서(Mayne 등, 2001), 50 회의 타격 이전에 30 cm 두께가 관입 가능한 일반적인 토사에서 N 값은 SPT 수행 심도부터 그 아래 45 cm 두께 중 하부측 30 cm 토사에 대한 평균적인 특성 값을 확인할 수 있다. 이러한 상황은 50 타수 이상의 단단한 토사나 풍화암에서는 동일하게 적용되지는 않으나 SPT 수행 심도 아래 지반의 특성으로 N 값이 제시된다는 측면에서는 개념이 같다. 그러므로 SPT 수행 심도를 기준으로 세부 지층을 구분할 경우, 해당 세부 지층의 지반 특성으로 이용되는 N 값은 구분 심도에서 수행된 N 값이 적용될 수 없고 바로 위 심도에서 획득된 N 값이 적용되어야 한다.

간단한 예로서 제 1 부지의 지표면 부근 3 개의 N 값 분포와 같이 깊이 1.5 m, 3.0 m, 그리고 4.5 m 에서 SPT가 수행된 경우, 세부 지층을 각각 지표면부터 1.5 m, 1.5 m부터 3.0 m, 그리고 3.0 m부터 4.5 m의 상부, 중부, 그리고 하부의 3개 지층 구분 상황에 대해서, 상부 지층에서는 적용할 수 있는 N 값이 존재치 않고 중부 지층은 1.5 m에서 획득한 N 값을 그리고 하부 지층은 3.0 m에서 획득한 N 값을 이용하는 방법이 SPT 수행 개념에 근거해 볼 때 적합하다. 이러한 구분 조건과는 달리 이번 RRT에서 두 참여진이 적용한 SPT

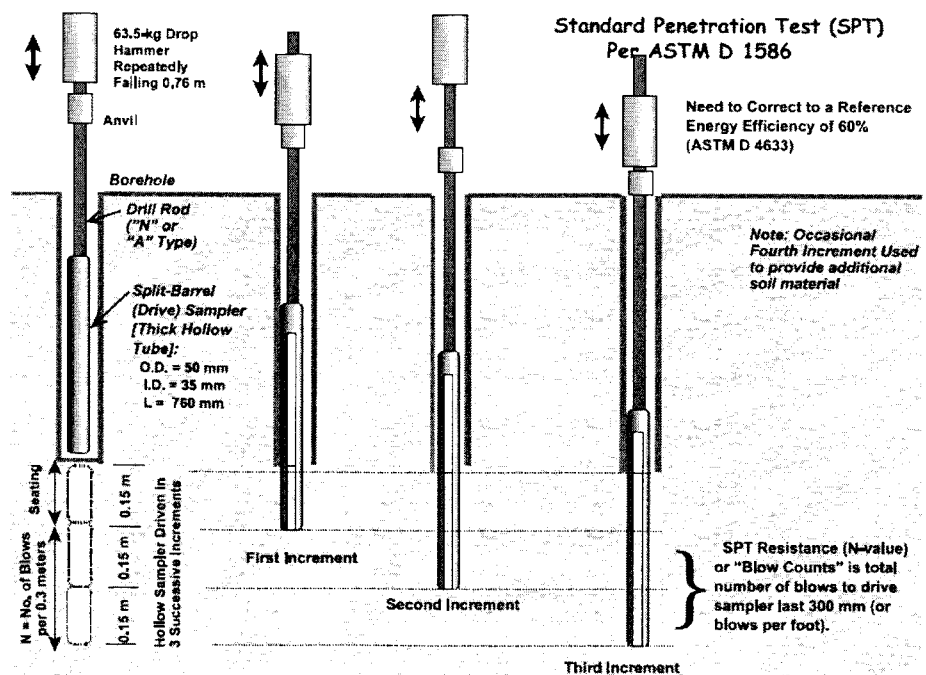


그림 7. SPT 수행을 통한 N 값 획득 모식도(Mayne 등, 2001)

수행 심도 중간에서의 세부 지층 구분 방법에서는, 상부, 중부, 그리고 하부 지층을 각각 지표면부터 2.2 m, 2.2 m부터 3.7 m, 그리고 3.7 m부터 5.2 m (4.5 m와 6.0 m의 중간 깊이)로 구분하게 된다. 더불어 각 지층에 대해 적용 가능한 N 값은 각 구분 지층 내에서 수행된 SPT 결과인 1.5 m, 3.0 m, 그리고 4.5 m의 N 값을 이용하면 된다. CPT나 CPTu 결과 분포와 같이 지반 특성이 연속적으로 획득되지 못한 경우, 세부 지층의 구분 및 활용 지반 특성 지표 선정은 반드시 지반 조사 기법의 실무적 개념에 대한 이해가 우선되어야 한다. 여기서 비교된 두 방법 중 첫 번째 SPT 수행 심도 구분 방법에서는 지표면 인접 세부 지층에 대한 지반 특성 부여가 개념적으로 불가능하거나 그 아래 지층의 특성과 동일하다고 가정해야 한다. 반면, 두 번째 SPT 수행 중간 심도 구분 방법은 개념 및 지반 특성 부여 과정에서 큰 무리가 수반되지 않는다. 첫 번째 구분 방법에서도 구분 경계 심도의 SPT로부터 획득한 N 값이 그 경계 상부 지층에 이용되지 않고 경계 하부 지층에 이용된 경우는 지표면 인접 지층을 제외하고는 비교적 유효할 것이다. 그러나 입력 자료 확인 결과, SPT 수행 심도로 지층을 구분한 거의 모든 참여진들이 q_t 분포를 복합 활용한 경우의 대상 지층들을 제외하고는 구분 심도 SPT의 N 값을 이용하여 경계 상부 지층에 대한 지반 동적 특성(V_S 또는 G_{max})을 경험적으로 결정하였다. 따라서 이와 같은 세부 지층 구분 및 그에 따른 지반 특성 활용에 관한 개념적 이해 부족을 충분히 확인하고 개선해야 한다.

4.2 일반적 지반 조사 자료를 이용한 전단파속도 분포의 도출 적용

국내에서 내진 설계가 활성화되기 이전에 수행된 대부분의 부지들에 대한 지반 조사는 대부분 금번 RRT 대상 부지들과 같이 전통적인 시추 조사 및 SPT, 그리고 경우에 따라서 CPTu가 수행되어 왔다. 그러나 최근에는 내진 설계나 내진 성능 평가 대상 부지들에서 현장 탄성과 시험과 같은 V_S (또는 압축 파속도(compressional wave velocity, V_p))의 깊이 분포를 획득하기도 한다(선창국 등, 2005c; 한국지반공학회, 2006). SPT나 CPTu와 같은 시험 자료만이 제공되는 부지에서는 현실적인 V_S (또는 G_{max})분포 결정 방법으로서 경험적인 상관관계식들이 이용되는데, 이번 RRT에서도 표 2 및 표 3에 정리한 바와 같이 각 참여진들이 자체적인 판단을 통해 적용할 경험적 관계식들을 선정하였다. 대부분 우리나라보다는 해외의 경험적 관계식을 선정 적용하였으며, 이는 국내의 관계식들의 근거 자료의 수가 해외에 비해 부족한 상황임을 고려한 것으로 판단된다. 순수하게 국내 경험식만을 적용한 참여진은 총 2 팀뿐이며, 제 1 부지에서는 추가적으로 1 팀만이, 그리고 제 2 부지에서는 추가적으로 2 팀만이 국내 지반에 대한 경험적 상관관계식을 활용하였다. 적용된 국내 상관관계식들에 대해서 살펴보면, N 값을 이용한 경험식은 국내 두 연구진의 연구 결과이고 CPTu를 이용한 경험식은 참여진에서 활용된 관계식은 다르지만 국내 한 연구진이 다양한 관계식들로 제시한 연구 결과로서, 지극히 그 연구 성과들이 제한적으로 제시되고 활용되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 측면에서 V_S 의 경험적 결정을 위한 국내 고유의 상관관계식의 도출을 위한 연구가 폭 넓게 필요할 것으로 보인다.

제 1 및 제 2 부지(표 2)에서는 총 12 팀중 반 수의 참여진이 N 값만을 이용하여 경험적으로 V_S (또는 G_{max})의 깊이 분포를 결정하여 입력 자료로 활용하였고, 나머지 6 개 팀은 V_S (또는 G_{max})와 q_t 분포 및 N 값의 경험적 상관관계식들을 자체적인 판단 기준에 따라 복합적으로 도입하여 적용하였다. 경험적 관계식의 적용을 통한 V_S 도출 과정의 참여진별 주요 가정 및 판단 사항들은 표의 비교에서 확인할 수 있다. 지역적 지반 특성이 상이할 수 있다 하더라도 국내 지반에 대한 V_S 도출의 상관관계식들에 관한 연구들이 아직 미진한 상태에서 국내 경험식을 활용하는 방법만이 합리적이라고 할 수는 없으나, 현재까지의 국내 부지고유 지진 응답 해석을 위해 주로 적용되는 경험식들은 국내보다는 지반 고유의 특성이 다른 미국이나 일본의 식들이 주류를 이루고 있음을 알 수 있다.

제 1 및 제 2 부지에 대해 q_t 분포와 N 값을 복합적으로 활용한 참여진들의 적용 현황을 살펴보면, 대부분의 팀들이 N 값의 점도에서의 제한적 신뢰성을 고려하여 사질토뿐만 아니라 점도에서도 신뢰성이 확보될 수 있는 CPTu 결과로서의 q_t 를 우선적으로 이용하였다. 그러나 CPTu(또는 CPT)의 관입 한계로 인해 깊은 심도의 퇴적토나 단단한 풍화잔류토 및 풍화암에 대한 q_t 분포가 확보되지 않은 지반에 대해서는 N 값을 경험적으로 이용하여 V_S 를 도출하였다. 한 참여진(I)은 q_t 와 V_S 의 상관관계만을 적용

하기 위하여 q_t 가 확보되지 않은 하부 심도에 대해서 N 값을 경험적으로 q_t 로 환산하기도 하였다. 본 RRT의 지반 조사 자료중 q_t 는 현장에서 측정된 콘 관입 저항력(q_c)과는 구분되는 과잉 간극 수압에 따른 보정이 이루어진 콘 관입 저항력으로 제시되었다. 이런 경우 대부분 과잉 간극 수압(u ; 대부분 $u2$)의 분포도 함께 제시됨이 일반적이나 RRT 자료에서는 제시되지 않았다. 이에 기존의 q_c 를 이용하는 경험식들과 q_t 를 이용하는 경험식들의 적용에 있어서 참여진별로 자체적인 가정을 하는 상황들이 발생하였다. 따라서 정적인 현장 시험 자료로서 CPT 또는 CPTu 결과를 입력 자료로 주고자 할 경우 가능한 모든 현장 시험 결과(q_c (또는 q_t) 뿐만 아니라 f_s 및 u)를 제시함이 바람직할 것이다.

표 2. 제 1 및 제 2 부지에 대한 전단파속도의 깊이 분포 도출 적용 현황

참여 기관	경험적 관계식	제안자	비고
A	$G_{\max} = 12N^{0.8}$	Ohsaki & Iwasaki (1973)	N 값은 선형 환산, 각 관계식 도출 V_s 값의 평균 활용, 심도 13.5m의 N 값을 40으로 가정
	$G_{\max} = 12.5N^{0.611}$	Imai & Tonouchi (1982)	
	$G_{\max} = 12.51(q_t/0.45)^{0.611}$	Crespellani & Vannuchi (1991)	
	$V_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma'_{t0})^{0.27}$	Baldi et al. (1989)	
B	$V_s = 98.38N^{0.29}$	건설교통부 (김동수, 1998)	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_s = 760$ m/s)
C	사질토: $V_s = 6.046 q_t^{0.387}$	선창국 등 (2006)	q_t 활용하여 대표 분포 도출
	점성토: $V_s = 24.289 q_t^{0.273}$	선창국 등 (2006)	
D	$V_s = 65.64N^{0.407}$	Sun et al. (2006)	N 값은 선형 환산, 두 관계식 도출 V_s 값의 평균 활용 (N 값만 활용한 결과도 제시; 기반암의 $V_s = 1,000$ m/s)
	$V_s = 15.140(q_t)^{0.131}(\sigma'_{t0})^{0.280}$	선창국 등 (2006)	
E	$G_{\max} = 325 N_{60}^{0.68}$	Imai & Tonouchi (1982)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, 실측 N 값을 N_{60} 으로 가정
F	$V_s = 80N^{0.333}$ [제 1 부지]	일본 도로 시방서	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_s = 760$ m/s)
	$V_s = 98.38N^{0.29}$ [제 2 부지]	건설교통부 (김동수, 1998)	
G	$V_s = 89.1N^{0.34}$	Umehara	N 값은 선형 환산 (기반암의 $V_s = 1,000$ m/s)
H	사질토: $V_s = \sqrt{6370/\rho} N^{0.47}$	Ohsaki & Iwasaki (1989)	N 값은 선형 환산, 각 관계식 도출 V_s 값을 토대로 대표 V_s 산정 활용 (기반암의 $V_s = 760$ m/s)
	중립토: $V_s = \sqrt{11584/\rho} N^{0.38}$	Ohsaki & Iwasaki (1989)	
	점성토: $V_s = \sqrt{13720/\rho} N^{0.305}$	Ohsaki & Iwasaki (1989)	
	사질토: $V_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma'_{t0})^{0.27}$	Baldi et al. (1989)	
	점성토: $V_s = 14.13(q_t)^{0.359}(e_0)^{-0.473}$	Hagazy & Mayne (1995)	
I	사질토: $G_{\max} = 1634(q_c)^{0.25}(\sigma'_{t0})^{0.375}$	Rix & Stokoe (1991)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, q_t 이용 V_s 도출, N 값을 q_t 로 환산 (풍화암의 $V_s = 760$ m/s)
	사질토: $G_{\max} = 20,000(N_1)_{60}^{0.333}(\sigma'_m)^{0.5}$	Ohta & Goto (1976)	
	점성토: $G_{\max} = 406(q_c)^{0.695}e_0^{-1.130}$	Mayne & Rix (1993)	
J	$G_{\max} = 21.7 \cdot 20(N_1)_{60}^{1/3} P_a(\sigma'_m/P_a)^{0.5}$	Seed et al. (1986)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, 실측 N 값을 N_{60} 으로 가정
K	사질토: $V_s = 37\sqrt{N}$	니시가키 (1992)	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_s = 762$ m/s)
	점성토: $V_s = 38.3\sqrt{N}$	니시가키 (1992)	
L	사질토: $G_{\max} = 20,000(N_1)_{60}^{0.333}(\sigma'_m)^{0.5}$	Ohta & Goto (1976)	각 관계식 적용 대상별 V_s 도출, 50타 이상 N 값은 약 50으로 가정 (기반암의 $V_s = 800$ m/s)
	점성토: $V_s = 1.75(q_c)^{0.627}$	Mayne & Rix (1995)	

표 3. 제 3 부지에 대한 전단파속도의 깊이 분포 도출 적용 현황

참여 기관	경험적 관계식	제안자	비고
A	$G_{\max} = 12N^{0.8}$ $G_{\max} = 12.5N^{0.611}$	Ohsaki & Iwasaki (1973) Imai & Tonouchi (1982)	N 값은 선형 환산, 두 관계식 도출 V_S 값의 평균 활용
B	$V_S = 98.38N^{0.29}$	건설교통부 (김동수, 1998)	50타 이상 N 값은 50으로 가정
C	$V_S = 97N^{0.314}$	Imai (1982)	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_S = 760$ m/s)
D	$V_S = 65.64N^{0.407}$	Sun et al. (2006)	N 값은 선형 환산, 각 관계식 도출 V_S 값을 토대로 대표 V_S 산정 활용 (기반암의 $V_S = 760$ m/s)
E	$G_{\max} = 325 N_{60}^{0.68}$	Imai & Tonouchi (1982)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, 실측 N 값을 N_{60} 으로 가정
F	$V_S = 80N^{0.333}$	일본 도로 시방서	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_S = 762$ m/s)
G	$V_S = 89.1N^{0.34}$	Umehara	N 값은 선형 환산 (기반암의 $V_S = 1,000$ m/s)
H	사질토: $V_s = \sqrt{6370/\rho} N^{0.47}$ 중립토: $V_s = \sqrt{11584/\rho} N^{0.38}$ 점성토: $V_s = \sqrt{13720/\rho} N^{0.305}$	Ohsaki & Iwasaki (1989) Ohsaki & Iwasaki (1989) Ohsaki & Iwasaki (1989)	N 값은 선형 환산, 각 관계식 도출 V_S 값을 토대로 대표 V_S 산정 활용 (기반암의 $V_S = 760$ m/s)
I	사질토: $G_{\max} = 20,000 (N_1)_{60}^{0.333} (\sigma'_m)^{0.5}$ 점성토: $G_{\max} = 406(q_c)^{0.695} e_0^{-1.130}$	Ohta & Goto (1976) Mayne & Rix (1993)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, q_t 이용 V_S 도출, N 값을 q_t 로 환산 (풍화암의 $V_S = 760$ m/s)
J	$G_{\max} = 21.7 \cdot 20 (N_1)_{60}^{1/3} P_a (\sigma'_m/P_a)^{0.5}$	Seed et al. (1986)	50타 이상 N 값은 50으로 가정, 실측 N 값을 N_{60} 으로 가정
K	사질토: $V_s = 37\sqrt{N}$ 점성토: $V_s = 38.3\sqrt{N}$	니시가키 (1992) 니시가키 (1992)	50타 이상 N 값은 50으로 가정 (기반암의 $V_S = 762$ m/s)
L	사질토: $G_{\max} = 20,000 (N_1)_{60}^{0.333} (\sigma'_m)^{0.5}$ 점성토: $G_{\max} = 170 q_u; q_u = N/8$	Ohta & Goto (1976) PHRI (1997)	각 관계식 적용 대상별 V_S 도출, 50타 이상 N 값은 약 50으로 가정 (기반암의 $V_S = 800$ m/s)

SPT의 N 값에 근거하여 경험적으로 V_S 를 결정하기 위한 상관관계식들의 이용 현황을 고찰해 보면, 단단한 퇴적토나 자갈질 퇴적토, 그리고 풍화잔류토나 풍화암에서는 N 값이 50 타수 이상이 되는 상황이 일반적이다. 이런 경우 현장에서는 50 타수 일 때의 관입 두께(T)의 표현 방식($50/T$)으로 기록하여 제출한다(Oh와 Sun, 2007). 이런 N 값을 경험식을 통해 활용하고자 할 경우, 30 cm 관입 상황을 반영하여 이용함이 바람직할 것이다(선창국 등, 2005b). 그러나 금번 RRT 참여진들 중 단 4 팀을 제외하고는 나머지 모든 팀들이 50 이상의 N 값에 대해서 50 또는 50 정도(심도 증가 등에 따른 영향을 임의로 설정하여 반영)로 고려하여 V_S 를 경험식으로부터 결정하였다. 30 cm 관입 상황을 반영한 4 팀의 경우 모두 측정된 N 값을 선형 비례 관계로 보고 N 값을 재산출한 후 경험적 상관관계식에 적용하여 V_S 를 결정하였다. 이와 같은 선형 비례 관계 적용을 통한 N 값의 재산출에 대한 적합성에 대해서는 SPT 수행 상의 문제점, 현장 구속압에 따른 효과, 대상 지질 조건별 차이 등의 여러 의문이 있을 수 있으나, 단순히 50을 이용하는 방법보다는 합리적이라는 관점에는 크게 무리가 없을 것이다.

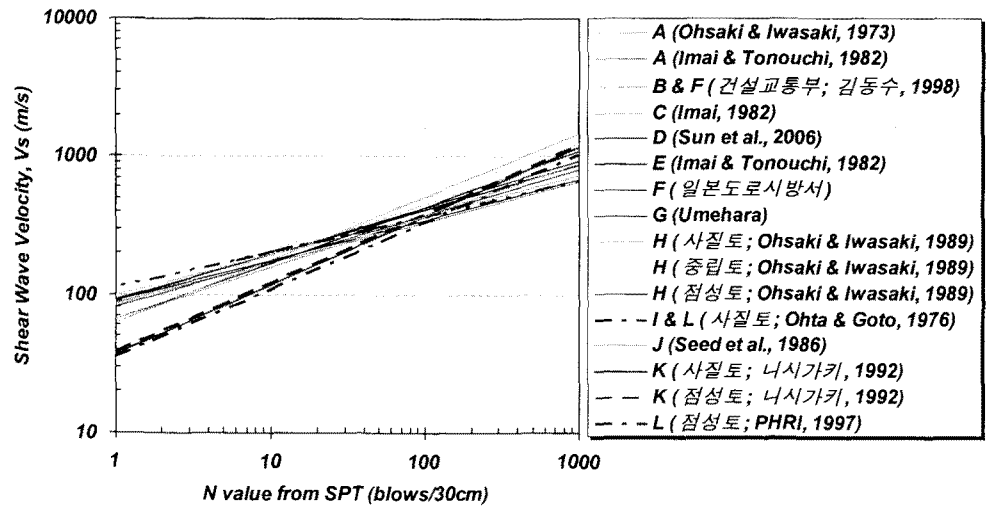
기반암의 V_S 는 그 상부 토사와의 임피던스 비(impedance ratio)가 부지고유 지진 응답에 매우 큰 영향을 미친다는 측면에서 지반 응답 해석의 중요한 요인 중의 하나이다(선창국 등, 2006b). 특히, 기반암으로 보고자 하는 지층에 대한 정보가 없는 경우는 가정된 기반암의 V_S 에 따른 지표면 지진 응답의 차

이가 커질 수 있다. 공학적 기반암(engineering bedrock)에 대한 V_s 의 기준 하한 값을 750 m/s 또는 760 m/s로 보고 있는 국내외 연구 결과들에 근거해 볼 때(ANSS, 2001; Sun 등, 2005; 선창국 등, 2005a), 기반암 입력 정보를 제시한 대부분의 참여진들의 V_s 적용 상황은 크게 어긋나지 않은 것으로 보인다. 다만, 일부 팀들에서는 해석 시 기반암의 경계만을 설정했을 뿐 V_s 분포는 상부 토사층과 동일하게 적용한 경우가 있으며, 이에 대해서는 기반암 깊이를 재설정하거나 기반암의 V_s 를 재확인하고 적절하게 입력해야 할 것으로 보인다.

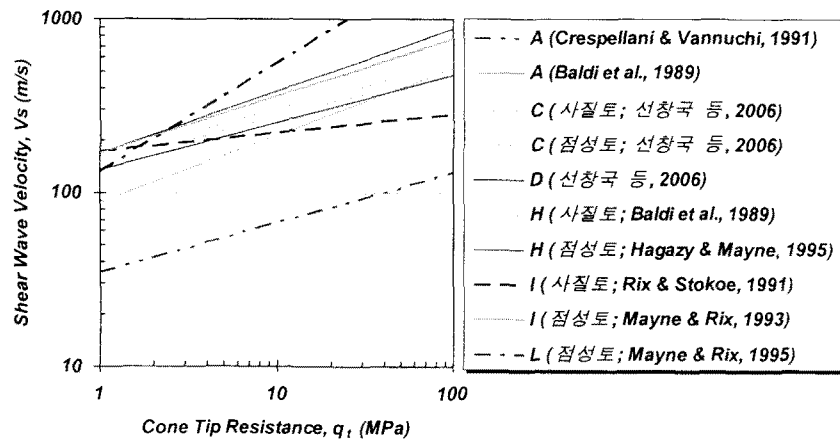
본 절에서는 RRT 참여진들의 V_s 도출 경험식들에 대한 고찰로서, 그림 8과 같이 적용된 국내외 상관관계식들을 비교해 보았다. 경험적 관계식들을 도출했던 연구자들에 의한 N 값이나 q_t 의 적용 제한 조건은 보정 여부, 토사 조건, 다른 지반 정수와의 관계 등에 차이가 있고 이에 따라 그래프로 도시할 때에 다소 차이가 발생할 수 있으나, 본 비교에서는 실제 참여진들이 적용하여 도출한 값들을 최대한 반영하여 비교 도시하였다.

그림 8(a)에서는 N 값과 V_s 의 상관관계식들을 확인할 수 있으며, 관계식들의 비교에서 가장 두드러진 것은 3 개의 관계식(K 기관의 사질토 및 점성토, L 기관의 점성토)들이 다른 관계식들과 N 값의 범위 1에서 50 사이에서 V_s 를 과소 결정하게 된다는 것이다. 또한, 그 차이는 다소 작을 수 있으나 다른 한 관계식(I와 L 기관의 사질토)의 경우 N 값이 10 이하인 경우 V_s 를 다른 관계식들에 비해 과대 결정하게 된다. 현장에서

실제로 측정된 V_s 분포와 정량적 비교를 수행하지는 못했지만, 이러한 관계식들의 일반적인 경향에서의 편향은 해당 경험식들의 활용에 있어서 재고의 여지를 줄 것으로 보인다. q_t 토대의 상관관계식들을 비교 도시한 그림 8(b)에서는 관계식별 산포(scattering) 경향이 N 값 토대의 관계식(그림 8(a))에 비해 더욱 심하게 나타났다. 특히, 한 기관의 관계식(A 기관의 G_{max} 도출 관계식; 표 2 참조)의 경우 모든 q_t 값의 범위에서 다른 관계식들에 비해 V_s 를 과소 산정하게 된다. 또한, 큰 범위의 q_t 에서 한 관계



(a) 표준관입시험 N 값과의 상관관계



(b) 콘관입 선단저항력(q_c 는 q_t 로 가정)과의 상관관계

그림 8. 깊이에 따른 선단파속도(최대전단계수)의 분포 도출에 활용된 경험적 상관관계 비교

식(I 기관의 사질토)은 V_S 를 과소 산정하는 반면, 또 다른 관계식(L 기관의 점성토)은 V_S 를 과대 산정하게 된다. 정량적으로는 그 차이가 다소 작지만 있지만, 한 관계식(C 기관의 사질토)은 q_c 값의 1 MPa부터 20 MPa의 범위에서 다른 관계식들보다 V_S 를 과소 결정할 수 있는 아래 쪽에 분포하고 있다. 이와 같은 상관관계식들의 비교 고찰은, 현장에서의 V_S 획득 비교가 없는 상태에서 특정 관계식들을 이용한 경험적 V_S 결정에서의 오류를 확인한 것은 아니며, 적용된 관계식들의 일반적인 분포 경향과의 상호 비교를 통한 경향 분석이다.

국내외의 경험적 상관관계식들을 이용하여 각 참여진동에서는 깊이 증가에 따른 V_S 분포를 결정하여 실제 지반 응답 해석의 입력 자료로 적용하였다. 그림 9, 그림 10 및 그림 11에는 각각 제 1 부지, 제 2 부지 및 제 3 부지에서 각 참여진별 V_S 분포를 기반암 심도와 함께 도시하였다. 각 그림의 우측 범례에는 각 팀별 V_S 도출 방법(N 값만을 이용했는지 N 값과 $q_c(N & q_c)$ 를 복합 활용했는지 구분)과 설정한 기반암 심도를 표현하였다. 대체로 심도가 증가하고 기반암에 가까워질수록 V_S 분포의 산포 경향이 심해지는데, 이는 대상 부지들의 깊은 심도에 분포하는 단단한 퇴적토 및 풍화암에서의 N 값이 50 회 이상인 경우의 선형 환산 적용과 50 타의 단순 적용간의 차이로 인한 것이다. 기관별 V_S 분포를 살펴보면, 모든 부지에서 K 기관의 V_S 가 다른 기관들에 비해 현저히 작은 V_S 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. K 기관의 경우 위에서 모든 부지들에 대해서 니시가키의 N 값과 V_S 의 상관관계식(표 2 및 표 3 참조)을 이용하여 V_S 를 산출하였으며, 이 관계식은 이미 위에서 분석된 바와 같이 다른 관계식들에

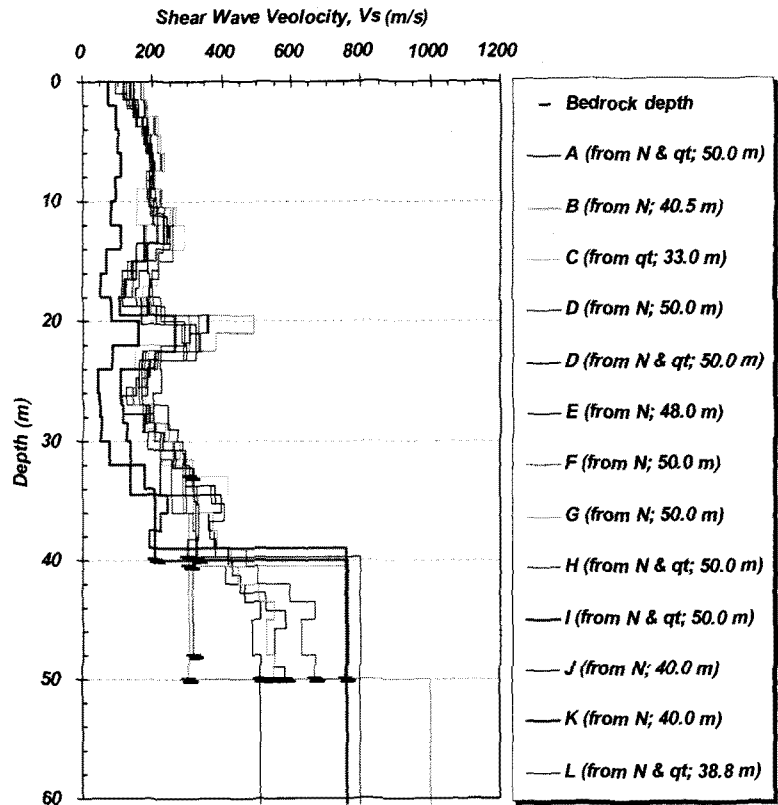


그림 9. 제 1 부지의 깊이별 전단파속도 분포

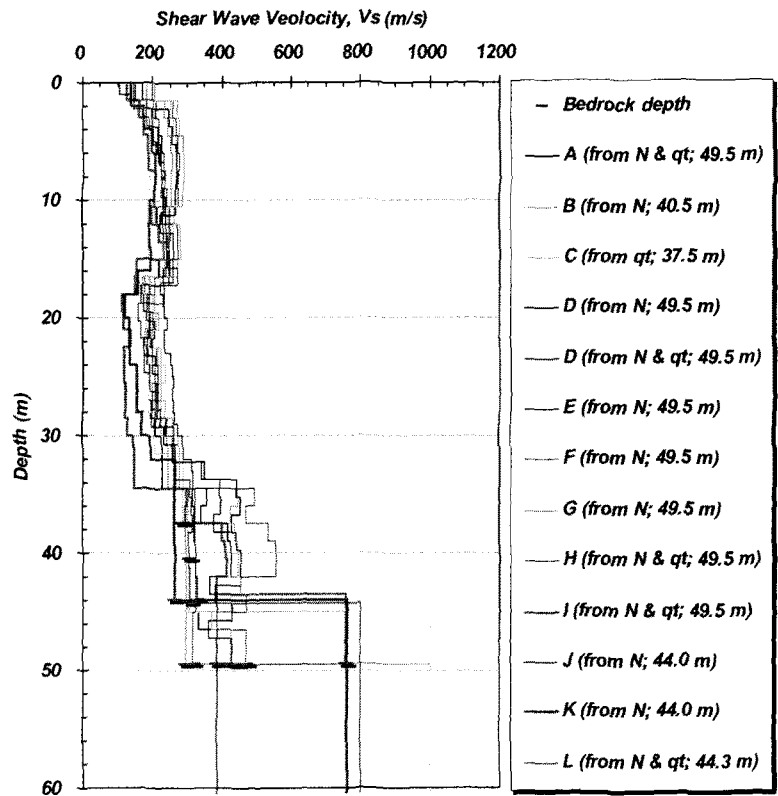


그림 10. 제 2 부지의 깊이별 전단파속도 분포

비해 V_S 를 과소 결정(그림 8(a) 참조) 하게 된다. 또한, I 기관의 V_S 분포를 확인해 보면, 제 2 부지의 일부 심도에서는 K 기관보다 더 작은 V_S 분포를 보이고 있고 제 1 부지에서도 다른 팀들의 V_S 분포에 비해 다소 작은 V_S 를 나타내고 있다. I 기관은 자체적인 판단에 따라 제 1 및 제 2 부지에서 N 값을 경험적으로 q_t 로 환산하고 q_t 와 V_S 의 상관관계식만을 활용하여 V_S 를 산출하였다. 또한, N 값의 경우 50 이상의 심도에 대해서도 단순히 50 정도로 고려하였으며, 적용된 q_t 와 V_S 의 경험식에 있어서도 q_t 값이 커질수록 다른 관계식들에 비해 V_S 를 과소 산출하게 된다. 이런 적용 과정의 상황들이 I 기관이 상대적으로 다른 기관들에 비해 작은 V_S 분포를 결정하여 적용한 이유라고 할 수 있다.

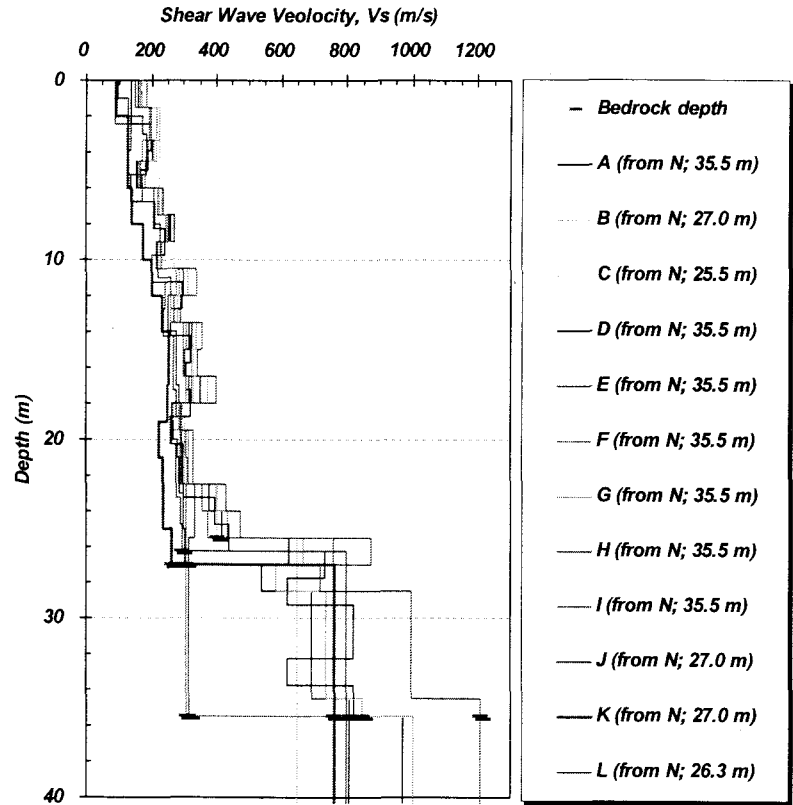


그림 11. 제 3 부지의 깊이별 전단파속도 분포

4.3 단위중량의 적용

일반적인 일차원 지반 응답 해석 과정 중에 V_S 와 함께 깊이에 따른 분포로 입력되어야 하는 지반 특성은 전체 단위 중량(total unit weight,)이다. 실제 해석 과정 중에는 V_S 와 γ_t 가 각각 고려된다기 보다는 식 (1)과 같이 V_S 와 밀도(density, ρ ; $\gamma_t = \rho g$; g 는 중력가속도)의 관계에 따라 최대전단계수(G_{max})의 깊이 분포로부터 전단변형률(shear strain, γ)에 따른 전단계수(G)의 감소를 고려한 해석이 수행된다.

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (1)$$

위 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이, V_S 에 비해 γ_t (또는 ρ)는 G_{max} 및 G 의 변화에 영향을 작게 미칠 수 있다. 또한, V_S 와는 달리 값의 변화 또는 크지 않으므로, 일반적으로 부지고유 지진 응답 해석의 주요 영향 요소로 고려되지는 않고 대개 V_S 가 주요 영향 정수로 여겨진다. 이런 이유로 상당수의 참여진들이 금번 RRT에서 깊이에 따른 단위중량의 분포를 제시하지 않았을 뿐만 아니라 단위중량의 결정 근거에 대해서도 언급하지 않았다. 그러나 단위중량은 지하수위(ground water level)와 함께 고려되어 다른 지반 정수의 결정에 중요한 기저 정수로서 이용 된다는 측면에서 그 결정에 대한 명확한 근거 또는 현장 및 실내 시험을 통한 정량적 결정이 요구된다.

표 4는 참여진별 단위중량의 깊이별 분포 제시여부와 결정 근거 문헌을 정리한 것이다. 단지 5 팀에 의해 제시된 단위 중량 값의 결정 근거가 되는 문헌들을 살펴보면, 국내 주요 도로관련 기관의 지침 및 실제 최근 설계 적용 사례, 그리고 해외 도로관련 기관의 지침 및 해외의 지반공학관련 주요 문헌들이 이용되었다. 총 3 개의 참여진이 국내 문헌을 근거로 단위중량을 결정하였고 다른 2 팀은 해외의 문헌을 근거로 결정하였다. 그렇다 할지라도 이러한 문헌들 내에서도 대개 단위 중량은 지반 조건별로 특정 범위로 제시되고 있으며, 일반적인 참여자들은 이런 범위의 평균값을 활용하였다.

전체 12 참여진들 중 7개 팀이 단위중량의 확인이 가능하도록 입력 자료의 깊이 분포를 제시하였다.

그림 12, 그림 13 및 그림 14는 입력 자료들로부터 추출한 단위중량과 V_s 와의 관계로부터 계산된 G_{max} 을 깊이 분포의 형태로 제 1 부지, 제 2 부지 및 제 3 부지에 대해서 각각 도시한 것이다. 단위중량을 제시한 모든 팀들이 V_s 와는 달리 단위중량은 세부 지층이 아닌 시추 조사로부터 구분된 지층 분포(그림 4 ~ 그림 6 참조)를 고려하여 대단위 지층에 동일 값으로 결정하였다.

표 4. 단위 중량의 깊이 분포 도출 적용 현황

참여 기관	깊이별 분포 제시 여부	도출 근거	비고
A	○	No information	
B	○	· 도로설계실무편람(한국도로공사) · 인천대교 연결도로 건설공사 실시설계(3공구)	국내
C	×	· FHWA-HI-96-033 · Bowles (1977)	
D	○	· Bowles (1979) · Hunt (2005)	
E	○	No information	
F	×	No information	
G	×	No information	
H	○	No information	
I	×	No information	
J	○	No information	
K	×	· 도로설계요령(한국도로공사)	국내
L	○	· 한국도로공사 (2001)	국내

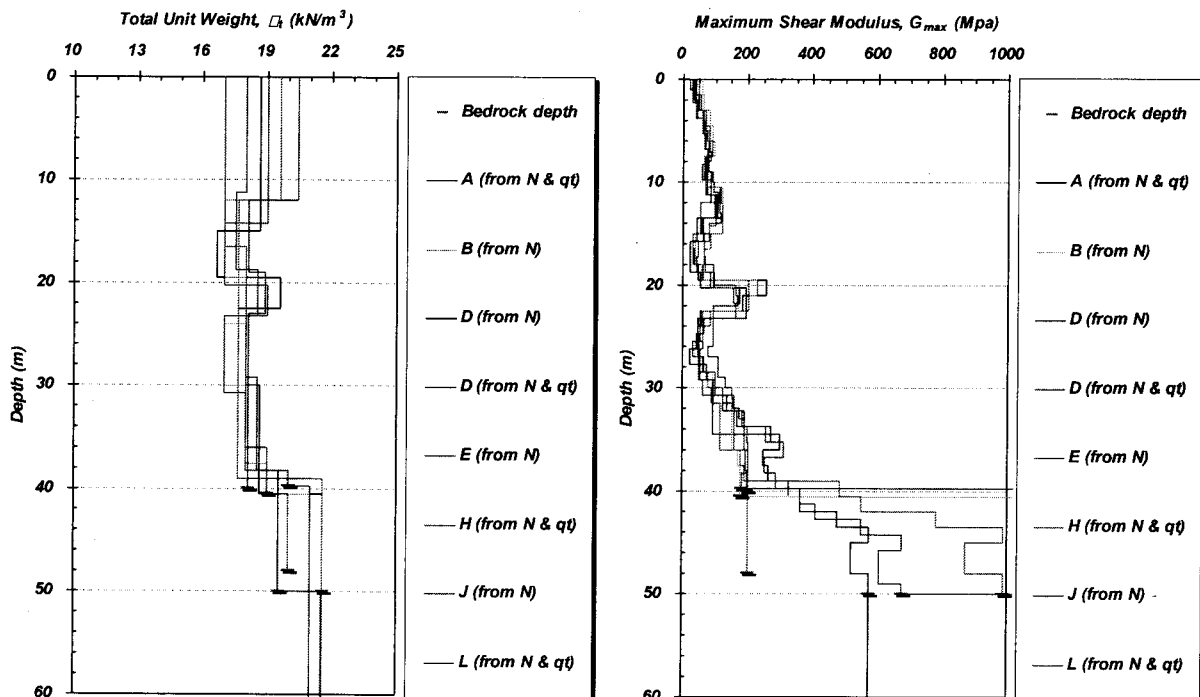


그림 12. 제 1 부지의 깊이별 단위중량 및 전단계수 분포

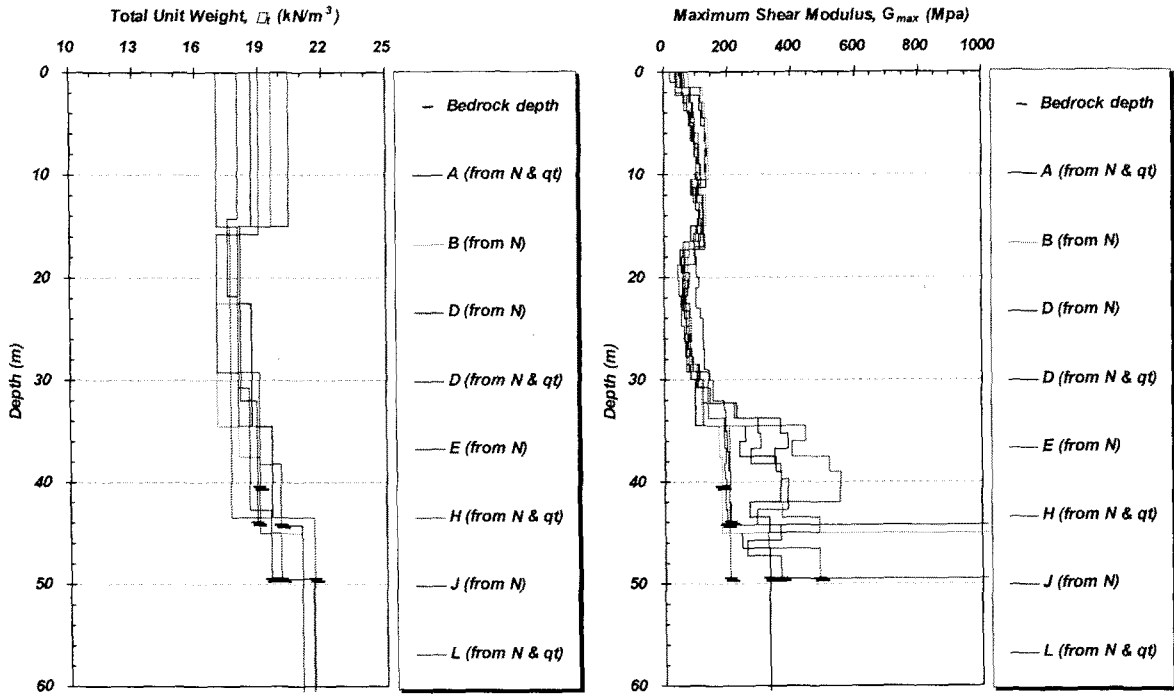


그림 13. 제 2 부지의 깊이별 단위중량 및 전단계수 분포

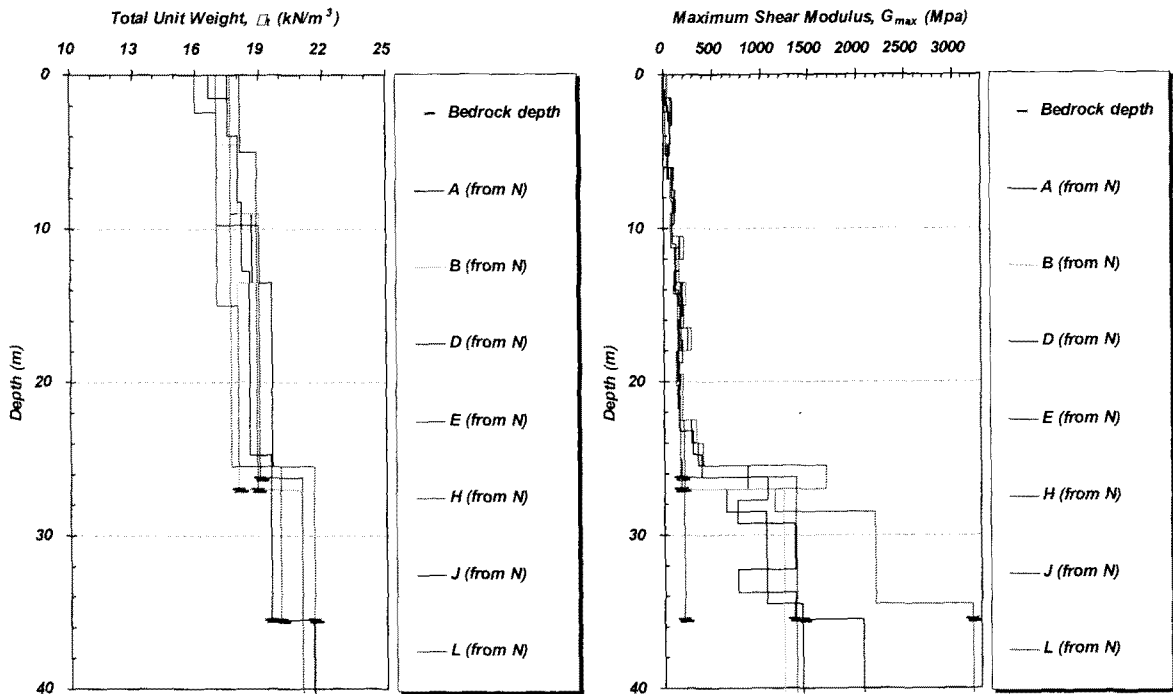


그림 14. 제 3 부지의 깊이별 단위중량 및 전단계수 분포

단위중량의 경우 V_s 와는 달리 지반 종류별로 크게 달라지지 않는 일반적인 지반 특성을 인지한 상황 이므로, 그 값의 깊이 분포는 크게 분산되지는 않았다. 그렇다 할지라도 제 1 및 제 2 부지의 지표면 인접 지층인 자갈섞인 모래의 경우 단위중량의 범위가 넓게 분포하고 있다. 이런 분포 경향에 대해 고 찰해 보면, 일부 팀은 단위중량이 큰 자갈을 고려하여 그 값을 크게 결정하고 일부 팀은 지표면 부근

토사로 고려하여 단위중량을 작게 결정했기 때문이다. 자갈섞인 모래 지층 단위중량의 최대값은 20 kN/m³을 넘고 있는데, 국내의 내륙 지역이나 매립 지역에서 흔히 발견되는 이러한 자갈질 토사의 단위중량에 대한 보다 체계적인 조사와 정량적 평가가 필요할 것으로 보인다. 단위중량이 일부 지층에서 다소 분산되어 있다할지라도 각 부지별 G_{max} 분포를 살펴보면, 단위중량에 따른 G_{max} 깊이 분포에 있어서의 지배적 영향을 확인하기는 어렵고 이미 확인된 V_S 깊이 분포와 대체로 유사한 경향을 보이고 있고, G_{max} 계산에서 V_S 가 제곱 항이므로 V_S 가 커질수록 G_{max} 은 더욱 커지는 일반적인 분포 현황을 확인할 수 있다.

4.4 지층별 비선형 곡선의 적용

전단계수(G)와 감쇠비(D)의 전단변형률에 따른 비선형적 변화 곡선은 V_S (또는 G_{max})와 함께 부지고유 지진 응답에 가장 큰 영향을 주는 지반 고유 특성들로 알려져 있다. 이런 비선형 곡선들의 지반 조건별 형상 차이에 관한 심도 있는 고찰은 여러 지반 특성을 체계적으로 수집·분석하는 과정을 수반하므로 본 내용에서는 다루지 않으며, 단지 적용된 비선형 곡선들의 현황에 대해서 파악하고자 한다. 총 12 참여진들이 각자 자체적인 판단 기준에 따라 주로 시추 조사로부터 구분된 지층(단위중량의 구분 입력 지층)들에 대해서 적합한 비선형 곡선들을 기존 문헌들을 토대로 선정하여 적용하였다. 본 절에서는 다양하게 적용된 지반 비선형 곡선들에 대한 현황 파악의 효율성을 확보하고자, 표 5에 정리한 바와 같이 적용된 비선형 곡선들의 명칭을 기호화 하였다. 비선형 곡선들의 그룹화를 위한 지반 특성은 본 내용에서 비교를 위해 제안 곡선들의 지배적인 지반 특성을 고려하여 임의적으로 5 개로 분류하였는데, 자갈 또는 자갈질 토사, 사질토, 풍화(잔류)토, 점성토, 그리고 암반으로 분류하였다.

곡선 명칭에서 처음 나오는 영문(e.g., Gravel, Sand, W Soil 등)은 지반 특성을 대표적으로 표현하며, 그 다음의 기호 ‘#’과 함께 나오는 두 개 한 쌍의 숫자는 RRT 결과 자료 취합시 무작위로 수집된 순서에서 정한 고유 숫자로서 첫 번째 숫자는 정규화 전단계수(G/G_{max}) 그리고 두 번째 숫자는 감쇠비(D) 곡선의 고유 숫자이다. 단, 자료 취합 과정에서 이미 취합된 문헌(제안자) 자료가 반복되는 경우 G/G_{max} 와 D 를 구분하여 기존 고유 숫자를 재 할당하였다. 전체적으로는 기존 지반 응답 해석 소프트웨어(ProShake)에서 기본 선택 자료로 제공하는 곡선들이 많이 활용되었고, 전체 26 개의 곡선(G/G_{max} 와 D 의 한 쌍) 중 10 개의 곡선이 국내 지반을 대상으로 평가된 곡선이다. 그 중에서도 풍화(잔류)토로 구체적으로 명칭된 곡선들은 모두 국내 자료였다. 이는 국내의 지배적인 지층 중의 하나로서(선창국 등, 2006b), 화강암 또는 편마암 계열의 풍화잔류토 관련 연구가 비교적 체계적으로 진행되어 왔기 때문일 것으로 보인다.

국내의 대표 지층 중의 하나로서 풍화잔류토에 대한 기존 연구 성과라고 할 수 있다. 또한, V_S 도출 경험식들과는 달리 해외의 자료 중에서는 일본의 자료가 활용되지 않고 미국의 자료들만이 이용되었다. 또한, 다른 지층들과는 달리 암반의 경우는 실제 실내 시험을 수행하거나 다른 자료의 확보가 어렵기 때문에 기존에 보편적으로 적용되어온 Schnabel(또는 Idriss)의 비선형 곡선만이 유일하게 적용되었다.

대상 세 곳 부지에 대한 각 참여진들의 비선형 곡선 적용 현황은 표 6, 표 7, 그리고 표 8에 각각 정리 제시하였다. 각 표에서는 구분 지층별로 적용된 곡선 및 참여진(기관)의 기호, 그리고 전체 적용 참여진 수를 기록하였다. 가장 많이 보편적으로 도입 적용된 곡선은 이미 언급한 암반에 대한 Schnabel의 곡선(Rock #11)이며, 모래질 토사에서는 Sand #22로서 Seed와 Idriss의 평균(Average) 분포 곡선이 특별한 공학적 판단을 수반하지 않을 수 있으므로 많은 팀들이 적용한 것으로 보인다. 점토질 토사는 사질토와는 달리 비교적 다양한 곡선들이 큰 집중 적용 없이 활용되었는데, 그 중에서도 Seed와 Sun의 G/G_{max} 및 Idriss의 D 를 도입하고 있는 Clay #23이 가장 많이 도입 적용되었다. 부분적으로는 구분된 지층의 주요 토사 특성을 오인하여 점토와 사질토의 곡선을 바꾸어 입력하는 사례들도 있었으며, 점토질 실트 지층에서는 팀별로 지층을 모래가 우세하거나 점토가 우세한 것으로 판단하여 각각 사질토나 점성토의 비선형 곡선을 따로 적용하였다. 제 1 및 제 2 부지의 지표면 인접 자갈섞인 모래 지층은 비선형 곡선의 적용 과정에서 참여진별로 매우 다양한 지반 특성으로 파악되고 있음을 알 수 있다. 즉, 참여기관별로 사질토, 자갈, 풍화토로 나누어 비선형 곡선을 도입 적용하고 있는데, 위에서 필요성을 언급

한 단위중량과 함께 국내 자갈질 토사에 대한 비선형 거동 평가 연구들이 보다 구체적이고 다각적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

표 5. 지반 특성별 비선형 곡선 명칭 제안

지반 특성	곡선 명칭	제안자		비고
		정규화전단계수 (G/G_{max})	감쇠비 (D)	
자갈 또는 자갈질 토사	Gravel #11	Seed et al. (1986)	Seed et al. (1986)	
	Gravel #22	Sun et al. (2005)	Sun et al. (2005)	국내
	Gravel #33	서원석 등 (2007)	서원석 등 (2007)	국내 (Gravel #33과 동일)
사질토	Sand #11	Seed & Idriss (Upper bound)	Seed & Idriss (Lower bound의 60 %)	
	Sand #22	Seed & Idriss (Average)	Seed & Idriss (Average)	
	Sand #33	Seed & Idriss (1970)	Idriss (1990)	
	Sand #14	Seed & Idriss (Upper bound)	Seed & Idriss (Upper bound)	
	Sand #15	Seed & Idriss (Upper bound)	Seed & Idriss (Lower bound)	
	Sand #66	김동수와 추연옥 (2001)	김동수와 추연옥 (2001)	국내 (실트질 모래)
	Sand #77	김동수와 추연옥 (2001)	김동수와 추연옥 (2001)	국내 (조립 모래)
	Sand #88	한국과학기술원 (2005)	한국과학기술원 (2005)	국내 (주문진표준사)
풍화 (잔류)토	W Soil #11	Sun et al. (2005)	Sun et al. (2005)	국내 (심도 38m 구속압)
	W Soil #11	Sun et al. (2005)	Sun et al. (2005)	국내 (심도 28m 구속압)
	W Soil #11	김동수와 추연옥 (2001)	김동수와 추연옥 (2001)	국내
점성토	Clay #11	Sun et al. (1988; PI=20 ~ 40)	Sun et al. (1988; Lower bound)	
	Clay #12	Sun et al. (1988; PI=20 ~ 40)	Seed & Idriss (1970)	
	Clay #22	Seed & Sun (1989)	Seed & Idriss (1970)	
	Clay #23	Seed & Sun (1989)	Idriss (1990)	
	Clay #29	Seed & Sun (1989)	Sun et al. (1988; Average)	
	Clay #44	Vucetic & Dobri (1991; PI=15)	Vucetic & Dobri (1991; PI=15)	
	Clay #55	Vucetic & Dobri (1991; PI=30)	Vucetic & Dobri (1991; PI=30)	
	Clay #66	Vucetic & Dobri (1991; PI=0)	Vucetic & Dobri (1991; PI=0)	
	Clay #77	한국과학기술원 (2006)	한국과학기술원 (2006)	국내 (점토질 실트)
	Clay #88	한국과학기술원 (2006)	한국과학기술원 (2006)	국내 (점토)
암반	Rock #11	Schnabel (1973)	Schnabel (1973)	

표 6. 제 1 부지에 대한 지반 비선형 곡선 적용 현황

지층 구성	적용 곡선	기관 현황	기관 수	비고
자갈섞인 모래 (0.0m ~ 12.0m)	Sand #11	A, L	2	※ 기관 J는 정보 없음
	Gravel #11	B	1	
	Sand #33	C	1	
	Gravel #22	D	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #15	F	1	
	W Soil #33	G	1	
	Gravel #33	H	1	
	Sand #22	I, K	2	
점토질 실트 (12.0m ~ 19.5m)	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, I	2	
	Clay #12	D	1	
	Clay #55	E, F	2	
	Clay #66	G	1	
	Clay #77	H	1	
	Sand #22	K	1	
	Sand #11	L	1	
실트질 모래 (19.5m ~ 24.0m)	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, F, I, K	5	
	Sand #33	C	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #66	G, H	2	
점토 (24.0m ~ 30.0m)	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B, K	2	
	Clay #23	C, D, I, L	4	
	Clay #44	F	1	
	Clay #55	E, G	2	
	Clay #88	H	1	
	Clay #29	K	1	
점토질 실트 (30.0m ~ 37.5m)	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, I	2	
	Clay #12	D	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #22	F, K	2	
	Clay #66	G	1	
	Clay #77	H	1	
	Sand #11	L	1	
모래 (37.5m ~ 39.0m)	Clay #11	A	1	
	Sand #22	B	1	
	Clay #23	D, I	2	
	Sand #14	E	1	
	Clay #44	F	1	
	Clay #55	G	1	
	Clay #88	H	1	
	Clay #22	K	1	
	No information	C	1	34.5m 기반암
풍화암 (39.0m ~ 50.0m)	Rock #11	A, B, E, H, I, K, L	7	
	W Soil #11	D	1	
	Sand #22	F, G	2	
Bedrock (50.0m ~ Infinite) (적용된 경우)	Rock #11	D, H	2	
	Rigid rock	F	1	Critical damping 3%
	No information	A, G, I	3	

표 7. 제 2 부지에 대한 지반 비선형 곡선 적용 현황

지층 구성	적용 곡선	기관 현황	기관 수	비고
자갈섞인 모래 (0.0m ~ 15.0m)	Sand #11	A, L	2	※ 기관 J는 정보 없음
	Gravel #11	B, E	2	
	Sand #33	C	1	
	Gravel #22	D	1	
	Sand #15	F	1	
	W Soil #33	G	1	
	Gravel #33	H	1	
	Sand #22	I, K	2	
점토질 실트 (15.0m ~ 22.5m)	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, I	2	
	Clay #12	D	1	
	상부: Sand #14	E	1	
	하부: Clay #55	E	1	
	Clay #44	F	1	
	Clay #66	G	1	
	Clay #77	H	1	
	Clay #29	K	1	
점토 (22.5m ~ 31.5m)	Sand #11	L	1	
	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, D, I, L	4	
	Clay #55	E, F, G	3	
	Clay #88	H	1	
실트질 모래 (31.50m ~ 37.5m)	Clay #29	K	1	
	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, I, K	4	
	Sand #33	C	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #22	F	1	
	Sand #66	G, H	2	
모래 (37.5m ~ 43.5m)	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, I, K	4	
	Sand #14	E	1	
	Sand #22	F	1	
	Sand #77	G	1	
	Sand #88	H	1	
	No information	C	1	37.5m 기반암
풍화암 (43.5m ~ 49.5m)	Rock #11	A, B, E, H, I, K, L	7	
	W Soil #11	D	1	
	Sand #22	F, G	2	
Bedrock (49.5m ~ Infinite) (적용된 경우)	Rock #11	D, H	2	
	Rigid rock	F	1	Critical damping 3%
	No information	A, E, G, I	4	

표 8. 제 3 부지에 대한 지반 비선형 곡선 적용 현황

지층 구성	적용 곡선	기관 현황	기관 수	비고
실트질 점토 (0.0m ~ 1.5m)	Clay #11	A	1	※ 기관 J는 정보 없음
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, I, K, L	4	
	Clay #12	D	1	
	Clay #55	E, F	2	
	Clay #44	G	1	
	Clay #88	H	1	
점토 (1.5m ~ 4.5m)	Clay #11	A	1	
	Clay #22	B	1	
	Clay #23	C, I, L	3	
	Clay #12	D	1	
	Clay #44	F	1	
	Clay #55	E, G	2	
	Clay #88	H	1	
	Clay #29	K	1	
점토질 모래 (4.5m ~ 9.0m)	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, I, K	4	
	Sand #33	C	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #15	F	1	
	Sand #66	G, H	2	
모래 (9.0m ~ 13.5m)	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, I, K	3	
	Sand #33	C	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #15	F	1	
	Sand #77	G	1	
	Sand #88	H	1	
점토질 모래 (13.5m ~ 25.5m)	Sand #11	A, L	2	
	Sand #22	B, D, F, I, K	5	
	Sand #33	C	1	
	Sand #14	E	1	
	Sand #66	G, H	2	
풍화암 (25.5m ~ 35.5m)	Rock #11	A, B, C, E, H, I, K, L	8	
	W Soil #22	D	1	
	Sand #22	F, G	2	
Bedrock (35.5m ~ Infinite) (적용된 경우)	Rock #11	D, H	2	
	Rigid rock	F	1	Critical damping 3%
	No information	A, E, G, I	4	

세 곳의 대상 부지에서 참여기관별 지반 비선형 곡선의 적용 현황을 위의 표 5를 토대로 표 6에서 표 8에 걸쳐 확인해 보았다. 그림 15, 그림 16, 그림 17, 그리고 그림 18은 표 5에서 구분한 지반 특성에 따라 각각 갈 또는 자갈질 토사, 사질토, 풍화토, 그리고 점성토로 분류하여 G/G_{max} 와 D 의 전단변형률에 따른 변화 곡선을 이번 RRT에서 적용된 곡선들을 종합적으로 도시한 것이다. 또한, 그림 19에는

Schnabel의 압반 비선형 곡선을 동일 전단변형률에 대해서 함께 도시하였다. 도시된 그래프들로부터 2번 RRT의 적용 비선형 곡선들의 전단변형률에 따른 형상을 쉽게 파악할 수 있다.

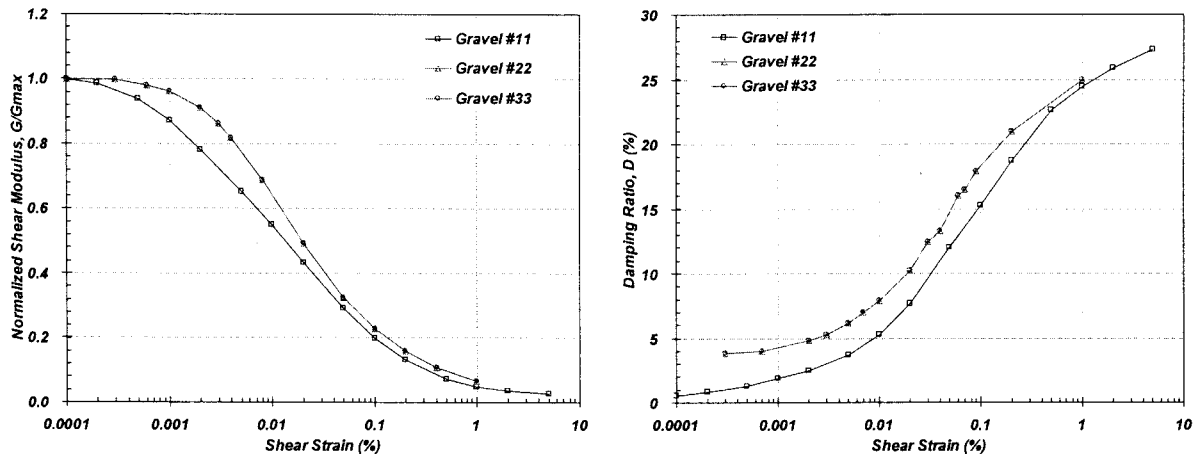


그림 15. 자갈질 토사 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

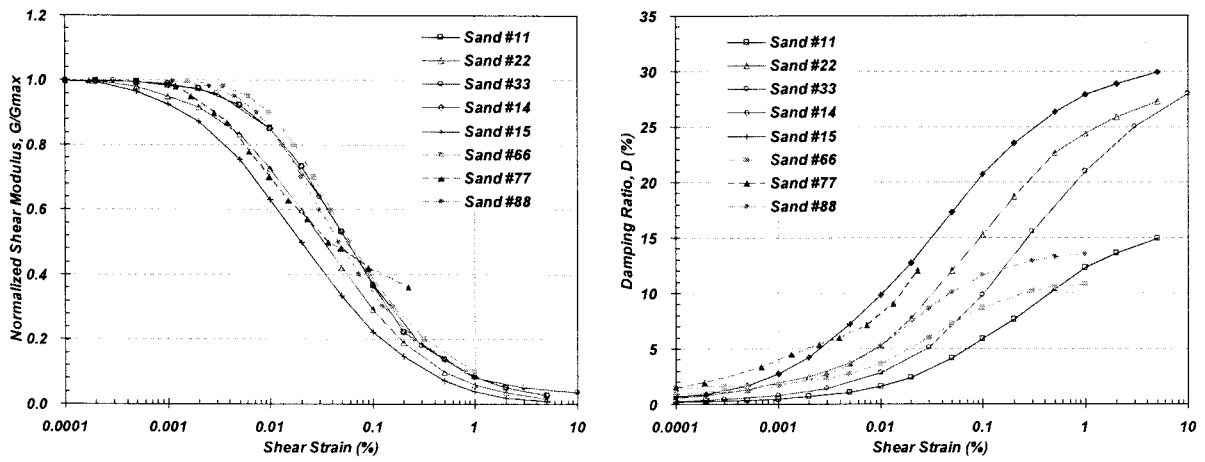


그림 16. 사질토 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

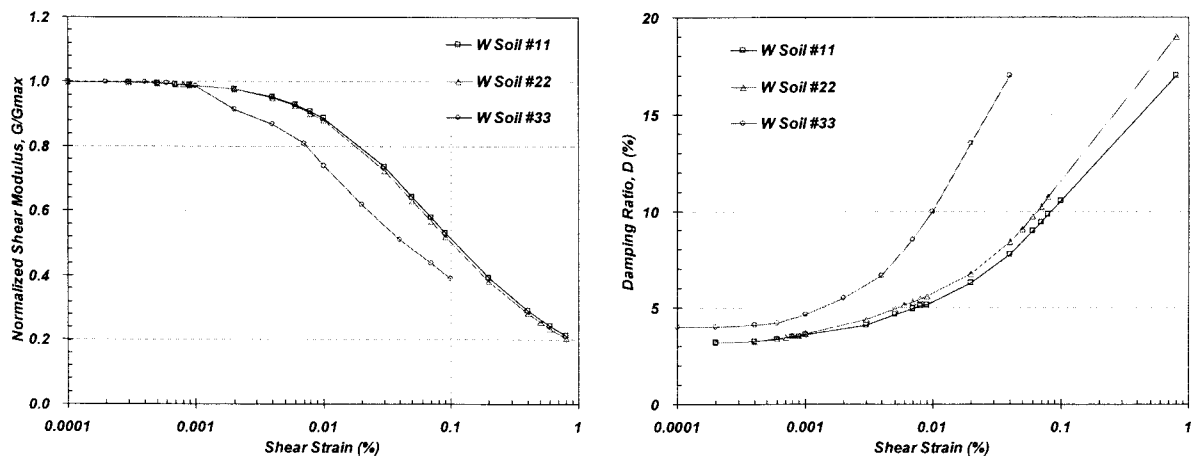


그림 17. 풍화토 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

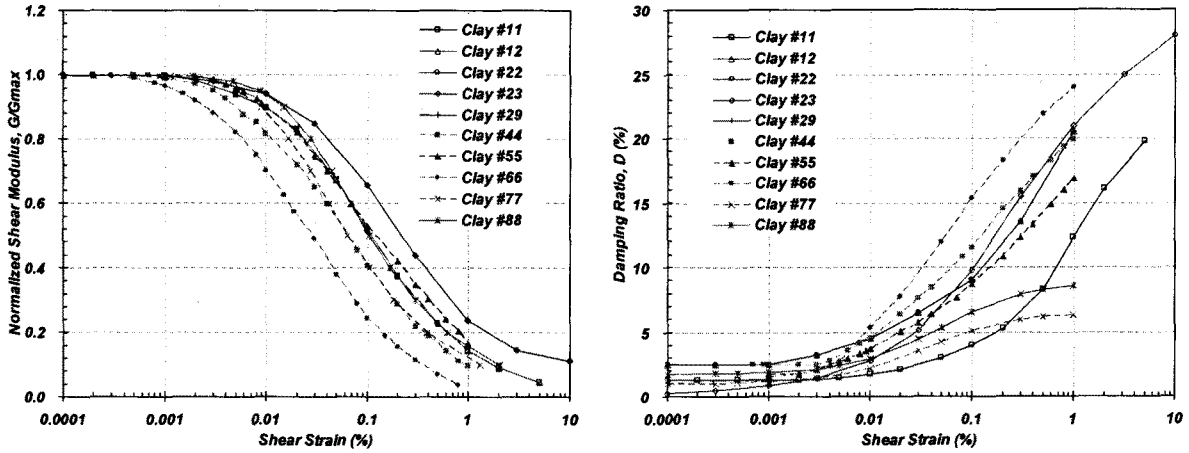


그림 18. 점성토 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

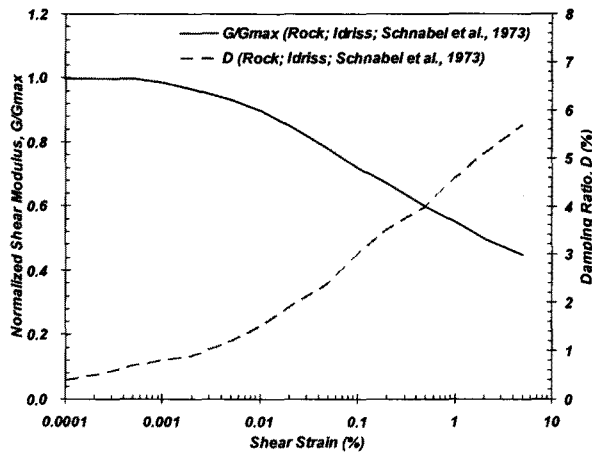


그림 19. 암반 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

5. 전단파속도 도출 상관관계 및 기반암 선정에 관한 토론

제한적인 부지 조건이지만 금번 RRT에서는 국내 지반 응답 해석 과정에 있어서의 일차원 지층 구분, 입력 지반 특성의 경험적 결정 등에 관련된 일반적인 현안들에 대해서 파악하고 고찰할 수 있었다. 이로부터 다양하고 세부적인 현안 토론이 가능할 것으로 보이지만, 본 토론에서는 그 중에서도 N 값과 V_s 의 상관관계에 근거한 V_s 의 경험적 결정 및 지질 조건에 따른 기반암 심도의 결정에 대해 고찰해 보자 한다.

참여한 12 개 팀 중 일부(4 팀)만이 50 타수 이상의 N 값을 선형적인 비례 관계를 토대로 30 cm 두께 관입 시의 N 값으로 환산하여 N 값과 V_s 의 기존 상관관계로부터 V_s 를 경험적으로 산출하였다. 이러한 N 값의 환산 과정은 공학적으로 보수적이라고 보기 어려울 수도 있으나 단순히 50으로 적용하는 방법에 비해서는 합리성을 갖는 것으로 판단할 수 있다. 경우에 따라서는 기반암 상부 토사의 강성이 과소하게 결정되고 이로 인해 토사층 대 기반암의 임피던스 비가 작아져서 지진파에 따라서는 부지에서의 지진 증폭이 더욱 커지는 결과를 가져올 수도 있다(선창국 등, 2005b). 따라서 N 값의 현실적 반영을 통한 지반 특성의 합리적 결정이 공학적으로 타당하다는 견지에서 N 값을 이용한 V_s 의 경험적 산출 과정에서는 반드시 50 타수 이상의 N 값을 30 cm 두께 관입 조건으로 환산하여 적용해야 할 것이다. 그렇다면 실제 N 값을 선형적으로 환산하는 방법이 공학적으로 비보수적인지 그리고 그 방법이 적절한지에 대해서 살펴볼 필요가 있다. 그림 20은 단단한 지반 내에서 수행한 SPT의 N 값 50 타수 이상의

한 가지 상황을 가정하여 N 값의 30 cm 관입 조건으로의 환산 과정에 대한 개념적 모식도를 나타낸다. 가정한 상황은 흔히 지반 조사 결과에서 '50/10'으로 기록(A 점)되는 사례이며, 자갈질 토사, 매우 단단한 퇴적토, 풍화잔류토의 하한 경계, 또는 풍화암의 상한 경계에 해당되는 지층들에서 조사될 수 있다. 현장에서 실측된 N 값을 50이 아닌 30 cm 관입 두께로 환산하고자 할 경우, 금번 RRT의 4개 팀들에서 적용한 방법대로 환산하게 되면 그림의 B 점에 해당되는 '150'의 N 값으로 결정된다. 그러나 실제 현장에서 해당 위치에서 30 cm 관입될 때까지 SPT를 수행하게 되면 현장에서의 여러 조건으로 인해 그 때의 N 값은 '150'보다

더 크게 조사될 수 있다. 즉, 그림에서 예시적으로 도시한 바와 같이 '150'보다 큰 '180'으로 측정(C 점)될 수 있다. 이런 상황은 실제 N 값이 큰 지반의 경우 대부분 국내에서 비교적 깊은 심도에 해당되므로 주변 구속압, SPT의 기계적 조건, 실무 수행자 관련 변수 등의 요인들에 의해 선형 관계와는 다른 비선형적 관계를 보이게 된다. 물론, 자갈질 토사와 같이 SPT 타격이 반복됨으로 인해 조립질 자갈이 파괴되거나 기하학적 재구성이 될 수 있는 지반 조건의 경우 오히려 선형 환산된 N 값보다 실측 N 값이 작아질 수도 있다. 이런 자갈질 토사 조건이나 현장 실무 수행자 변수를 제외하더라도 대부분 현장 실측 N 값은 선형 환산된 N 값보다 크게 나타날 수 있다. 따라서 금번 RRT 참여진중 일부 팀들이 적용한 N 값의 선형 환산 방법은 항상 비보수적이라고만 단정 지을 수 없으며, 이에 대한 명확한 이해와 체계화를 위해서는 국내 대표 지반들을 대상으로 N 값의 환산 방법에 대한 보다 실무적이고 포괄적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

우리나라의 기반암 심도는 지반 분류 및 지진계수(지반증폭계수)를 포함한 현행 국내 설계 지반 운동 결정 방법의 근간이 되는 미국 서부 지역에 비해서 상대적으로 얇은 것으로 분석되었다(Sun 등, 2005; 선창국 등, 2007a). 이런 비교 연구들의 기반암 기준에 대해 살펴보면, 실제 현장 탄성과 시험을 통해 획득한 V_s 를 토대로 구분하였고 그 기준이 되는 V_s 의 최소값은 750 m/s이다(ANSS, 2001; Sun 등, 2005; 선창국 등, 2005a). 더불어 현장에서 V_s 획득하다 보면 깊이에 따라 750 m/s 이상의 V_s 값이 측정되고 그 아래 심도에서 그 이상의 값이 측정되지 않고 오히려 작아지는 풍화암 또는 연암 지층이 종종 확인된다. 따라서 실제 기반암으로 고려할 수 있는 암반은 깊이 증가에 따라 750 m/s 이상의 V_s 값을 보이는 지층이어야 한다. 이런 암반의 경우 대부분 상부층의 V_s 만 확인해 보아도 대부분 평균적으로 750 또는 760 m/s를 훨씬 상회하게 된다(선창국 등, 2005b; 2006a). 일반적으로 기

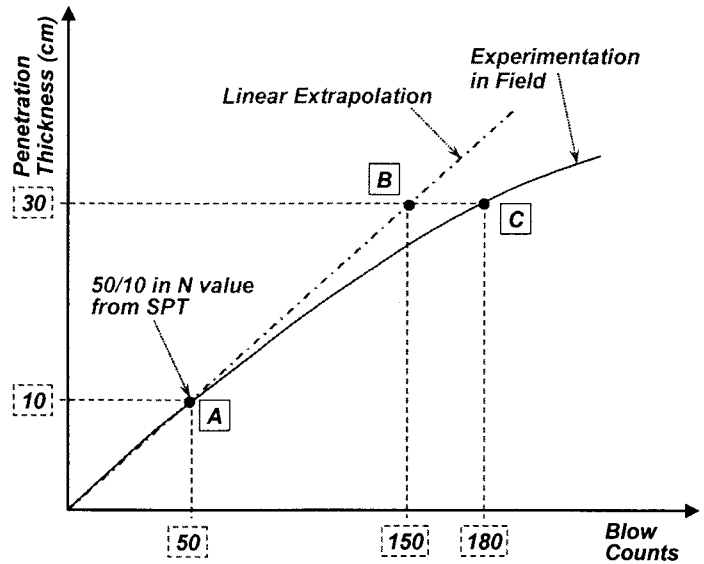


그림 20. 표준관입시험의 50 타수 이상 N 값의 결정 사례

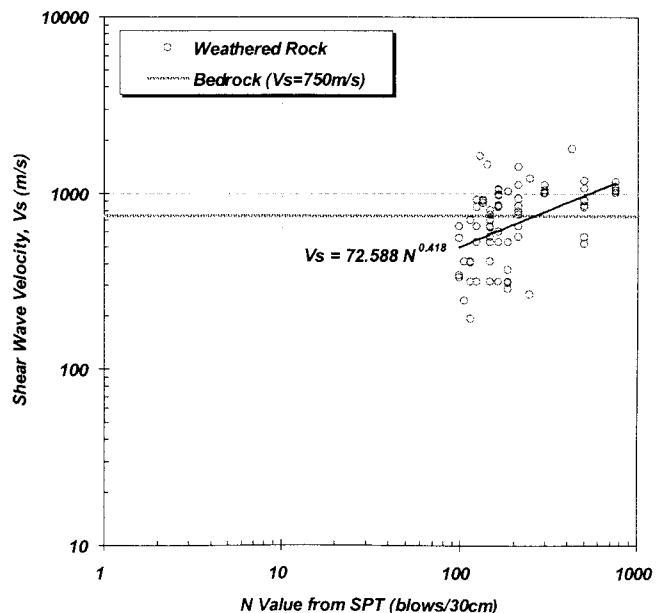


그림 21. 국내 일부 풍화암에 대한 N 값과 전단파속도의 상관관계

반암에서 토사가 발달되는 과정은, 기반암 상부에 외부 매립이나 퇴적 현상이 최근에 발달하지 않은 상황이라면, 대부분 우리가 구분하는 지층과 같이 확연하게 분리된다기 보다는 오랫동안 물리 및 화학적 풍화 작용에 의해서 지반 강성이나 구조 변화가 점진적이거나 교호하는 분포를 보인다(선창국 등, 2006b). 이러한 측면에서 국내 기반암에 대한 일반적 V_s 값이 1,000 m/s(800 m/s ~ 1,200 m/s) 정도로 제시된 바 있다(선창국 등, 2005a; Sun 등, 2005) 할지라도 이에 대한 체계적인 연구가 수반된다고 할 수 있으며, 실제 금번 RRT에서 기반암의 V_s 값을 760 m/s 정도로 부여한 경우에 대한 향후 비교 고찰도 필요할 것으로 보인다.

지질(지층) 구분 기준은 국가와 같은 지역별로 다소의 차이를 보이게 된다. 우리나라의 경우 풍화토와 풍화암의 구분은 N 값을 기준으로 '50/15'에서 '50/10' 정도를 기준으로 하며, 풍화암과 연암의 구분은 굴진 정도 및 암편 상태를 기준으로 한다(Kim 등, 2002). 특히, 이번 RRT와 같이 지층 구분 및 N 값만이 기초 자료로 제공된 경우에 대해서 기반암을 풍화암으로 선정할 것인지 그 아래에 분포할 것으로 예상되는 보다 경질의 암반(연암, 보통암 등)으로 선정할 것인지에 대해 제한적이거나 부분적일지라도 정립할 필요가 있을 것이다. 그림 21은 국내 여러 부지들(선창국 등, 2005a; 2006a; 2006b; 2007a; 2007b)의 풍화암 지층을 대상으로 시추공 탄성과 시험을 통해 V_s 를 획득하고 N 값(50 타수 이상의 경우 선형 환산)과의 상관관계를 도출하기 위한 분포 및 관계를 도시한 것이다. 그림에 함께 도시한 제한된 기반암 V_s 의 최소값인 750 m/s와 비교해 볼 때, 풍화암의 경우 상당 수의 자료가 750 m/s를 상회하지 못한다. 뿐만 아니라 대부분의 풍화암 자료가 국내 기반암의 일반적인 V_s 값인 1,000 m/s에는 절대적으로 미치지 못한다. 이런 정량적 V_s 분포와 풍화암에서의 지반 강성이 깊이 증가에 따라 충분히 증가하지 못하고 풍화 특성의 불연속성으로 인해 강성이 교호할 수 있음(선창국 등, 2006b)을 고려해 볼 때, 국내 풍화암의 경우 확실한 기반암으로 선정하기 어려울 것으로 판단된다. 그림 22는 국내 여러 부지들(선창국 등, 2005a; 2006a; 2006b; 2007a; 2007b)의 연암 및 보통암 지층에 대해 현장에서 획득한 V_s 분포를 TCR(total core recovery) 및 RQD(rock quality designation)에 따라 도시한 것으로서, 일부 자료를 제외하고는 750 m/s 뿐만 아니라 1,000 m/s 이상의 V_s 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 비록 국내 획득 비교 자료가 다소 부족하지만, 분석 도시된 자료들에 근거해 볼 때 지반 응답 해석을 위한 기반암으로서의 지질(지층) 조건은 연암 또는 그 이상의 경도를 갖는 암반으로 선정해야 할 것으로 판단된다.

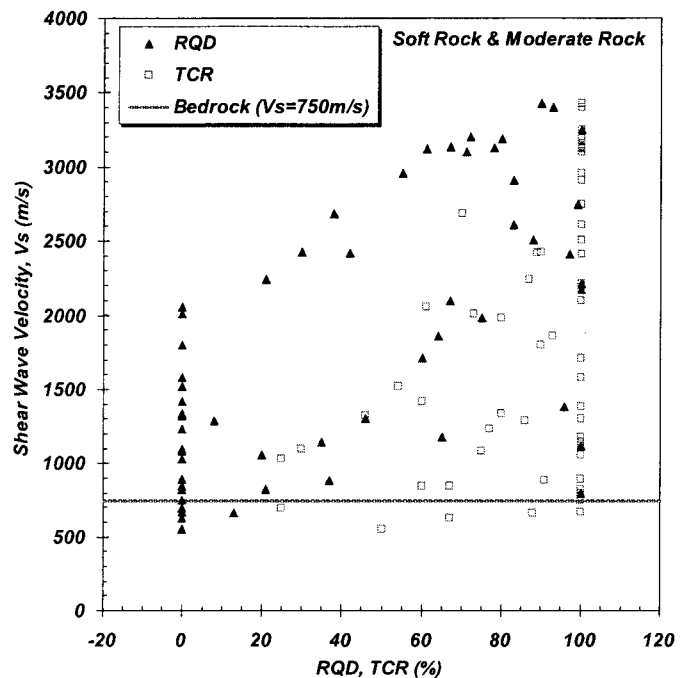


그림 21. 국내 일부 연암 및 보통암의 TCR과 RQD에 따른 전단파속도 분포

6. 요약 및 결론

시추 조사 및 N 값 분포 자료와 제한적으로 q_t 분포가 제시된 국내 세 곳의 부지들에 대해서 세 종류의 입력 지진파를 이용하는 지반 응답 해석 Round Robin Test(RRT)에 총 12개의 국내 팀들이 참여하여 해석을 위한 입력 자료와 해석 결과를 제시하였다. 입력 지진파와 다양하게 산출된 입력 물성들에 대한 현황을 고찰하였으며, 분석 고찰 및 토의된 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 해석을 위해 선정된 입력 지진파는 세 종류로서, 장주기(저주파수) 성분이 우세한 Hachinohe 지진,

단주기(고주파수) 성분이 우세한 Ofunato 지진, 그리고 보통암 노두 조건에 대해 생성된 인공합성 지진이며, 각각 지속시간 및 자료 간격은 14.6초 및 0.063초, 58.2초 및 0.02초, 그리고 20.4초 및 0.005초로 차이를 보였다. 입력 지진파를 푸리에 스펙트럼과 가속도 응답 스펙트럼으로 비교해 본 결과, 각각 비교적 다른 주파수 및 주기에서 차별적인 지배 특성을 보임에 따라 제한된 상황의 RRT 수행을 위한 다양성이 확보된 것으로 볼 수 있었다.

- (2) RRT를 위해 선정된 세 부지의 경우, 국내 내륙 및 해안 지역의 대표적인 부지 조건이라고 보기는 어려웠으나, 제 1 부지 및 제 2 부지의 경우 국내 해안 매립 지역들에서 나타날 수 있는 지층 구성을 보이고 있으며, 제 3 부지의 경우 해안 인접 지역이나 내륙의 하천 인접 지역에서 조사될 수 있는 지층 구성으로 보인다. 각 부지별 지반 조사 자료로는 모든 부지에 대해서 시추 조사를 통한 지층 구성과 N 값이 일부 풍화암까지 제시되었고 제 1 및 제 2 부지에서는 완벽하지는 않지만 제한적인 CPTu 자료로 추정되는 q_t 분포가 풍화암 상부의 일부 퇴적토까지 제시되었다. 특히, N 값의 경우 30 cm 두께가 관입되지 못한 50 타수 이상의 조사 자료가 많이 분포하였다.
- (3) 해석을 위한 기반암은 총 12 개의 참여진들 중에서 반 수가 제시된 풍화암의 인접 하부를 기반암 심도로 가정된 반면, 나머지 반 수는 그 상부의 풍화암 내부, 풍화암 시점 또는 퇴적토 내를 기반암 심도 선정하였다. 해석 시 지진파는 2 팀이 기반암과 토사의 경계면인 내부에 입력하였으며, 그 외에도 일부 해석 조건에서 내부에 오류 입력한 팀들이 존재하였으나, 대부분은 암반 노두에 대한 입력 조건으로 해석을 수행하였다. 또한, 지반 강성을 SPT 수행 심도를 기준으로 구분 입력할 경우 대부분의 참여진들이 개념적 이해 부족으로 인해 다른 구분 지층의 N 값을 이용하고 있었으며, 이에 대한 충분한 이해와 개선이 필요할 것으로 보인다.
- (4) 전통적인 지반 조사 자료인 N 값이나 q_t 분포를 토대로 지반 응답 해석의 입력 특성인 V_s (또는 G_{max})를 경험적으로 도출하기 위해 국내와 미국 및 일본의 여러 상관관계식들이 도입 적용되었다. 일부 참여진들이 적용한 상관관계식들은 다른 참여진들의 관계식들에 비해 상대적으로 V_s 를 경험적으로 과소 또는 과대 산출하고 있었으며, 이에 따라 V_s 분포도 다르게 결정되었다. 비록 상대적인 결과일지라도 이런 관계식들에 대한 재고가 필요할 것으로 판단된다. 더불어 50 이상의 N 값을 이용하여 V_s 를 산출하는 과정에서 많은 참여진들이 30 cm 관입 조건으로의 환산없이 단순히 50 정도의 N 값을 직접 활용했으며, 이에 대한 보완도 필요할 것으로 보인다.
- (5) 단위중량의 경우 V_s 에 비해 지반 응답 해석의 영향 요소로서의 가중이 다소 떨어지거나 그 값의 변화 폭이 작을 지라도 자갈질 토사와 같은 경우에는 적용 범위가 넓고 모호하였으며, 국내 자갈질 토사에 대한 단위중량 관련 조사가 요구된다.
- (6) 지반 비선형 곡선인 전단변형률에 따른 G/G_{max} 감소 및 D 증가 곡선들은 주로 국내와 미국의 기존 곡선들이 도입 적용되었다. 암반에 대한 곡선은 일반적으로 잘 알려진 단일 곡선만이 입력 자료로 이용되었고 지반 조건별로 비교적 잘 알려진 곡선들이 주류를 이루었으며, 일부 국내 곡선들을 제외하고는 대부분 상용화된 지반 응답 해석 소프트웨어에서 기본 선택 자료로 제공되는 곡선들이 적용되었다.
- (7) 제한적인 지반 조사 자료로서 N 값이 제시된 경우 50 타수 이상의 관입 자료에 대해서는 최소한 선형 환산을 통한 30 cm 두께 관입 조건에서의 N 값으로 조정하여 경험적인 V_s 산출을 수행해야 할 것으로 보인다. 또한, 현장 조건에 따른 비선형적 N 값 환산에 대한 체계적인 조사 연구가 필요할 것으로 보인다. 국내의 경우 지질(지층) 조건에 따른 기반암을 기존 V_s 의 경계 기준 및 국내 암반층에서의 V_s 획득 자료들에 근거해 구분해 볼 때, 풍화암 보다는 그 이상의 경도를 보이는 연암 및 그 하부의 지층이 적합할 것으로 판단된다.

감사의 글

금번 지반 응답 해석 Round Robin Test에 참여하여 결과 자료를 제공해 주신 참여진분들께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(Ⅲ), 한국지진공학회.
2. 김홍중, 조성민, 선창국(2005), "SCPT_U에 의한 지반의 전단파 속도와 콘 관입 특성값의 상관관계 분석", 대한토목학회 논문집, 제 25권, 제 3C호, pp.215~226.
3. 선창국, 정충기, 김동수(2005a), "국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안", 한국지반공학학회 논문집, 제 21권, 제 6호, pp.101~115.
4. 선창국, 양대성, 정충기(2005b), "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", 한국지진공학학회 논문집, 제 9권, 제 4호, pp.29~42.
5. 선창국, 강병수, 김영수, 목영진(2005c), "인홀 탄성과 시험을 이용한 암반의 동적 강성 평가", 지질공학, 제 15권, 제 3호, pp.309~323.
6. 선창국, 목영진, 정충기, 김명모(2006a), "스프링식 횡방향 발전 크로스홀 탄성과 시험을 통한 지반 동적 특성의 합리적 산정", 한국지진공학학회 논문집, 제 10권, 제 4호, pp.1~13.
7. 선창국, 김보현, 정충기(2006b), "홍성 지역 화강 풍화 지층의 풍화도 및 전단파 속도에 관한 고찰", 대한토목학회 논문집, 제 26권, 제 6C호, pp.431~443.
8. 선창국, 정충기, 김동수(2007a), "얕은 심도 전단파속도 분포를 이용한 30m 심도 평균 전단파속도의 결정", 한국지진공학학회 논문집, 제 11권, 제 1호, pp.45~57.
9. 선창국, 정충기, 김동수, 김재관(2007b), "역사 지진 피해 발생 음성 지역에 대한 부지 고유의 지진 응답 특성 평가", 지질공학, 제 17권, 제 1호, pp.1~13.
10. 한국지반공학학회(2006), 지반구조물의 내진설계, 지반공학시리즈 8, 구미서관.
11. ANSS(2001), *Technical guideline for the implementation of an advanced national seismic system*, Advanced National Seismic System Technical Integration Committee.
12. Kim, D. S., Chung, C. K., Sun, C. G., and Bang, E. S.(2002), "Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp.371~387.
13. Mayne, P. W., Christopher, B. R., and DeJong, J.(2001), *Manual on Subsurface Investigations: Geotechnical Site Characterization*, National Highway Institute.
14. Oh, S., and Sun, C. G.(2007), "Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam," *Environmental Geology*, Published Online First.
15. Sun, C. G., Kim, D. S., and Chung, C. K.(2005), "Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea," *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 4, pp.446~469.