공 학 석 사 학 위 논 문

모래층의 액상화 가능성 평가방법에 관한 비교연구

2002년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

윤 용 준

공학석사 학위논문

모래층의 액상화 가능성 평가방법에 관한 비교연구

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2002년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

윤 용 준

윤용준의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 정 진 호 인
위 원 농공학박사 이 영 대 인
위 원 공학박사 정 두 회 인

목 차

목 차 (계 속)

표 목 차

그 림 목 차

그 림 목 차 (계 속)

page

기 호

a_{depth} ....: 평가대상깊이에서의 최대가속도

a_{max} ....: 지표면 최대가속도

α_{max} ....: 국가별 지진가속도계수

C_N ....: 표준관입저항치 보정계수

CRR ....: 반복저항비

$CRR_{7.5}$ ....: 지진규모 M=7.5에 대한 반복저항비

CSR ....: 반복응력비

D_{50} ....: 평균입경

γ_d ....: 응력감소계수

ER ....: 에너지 효율

FC ....: 세립분 함유량

F.S ....: 안전율

g ....: 중력가속도

M ....: 지진규모

MSF ....: 지진규모 수정계수

N ....: 표준관입저항치

$(N_1)_{60}$ ....: 수정 표준관입저항치

$(N_1)_{60cs}$ ....: 등가 환산 수정 표준관입저항치

q_c ....: 콘선단저항치

q_{c1N} ....: 수정 콘선단저항치

S ....: 지반계수

σ_{vo} .... : 전연직상재응력

σ'_{vo} .... : 유효연직상재응력

τ .... : 전단응력

τ_{max} .... : 최대전단응력

τ_{av} .... : 평균전단응력

V_s .... : 전단파 속도

V_{s1} .... : 수정 전단파속도

z .... : 깊이

A Comparative Study on the Evaluation Methodologies of Liquefaction Potential

Yong-Jun Yoon

Department of Civil Engineering, Graduate School
Pukyong National University

Abstract

The term liquefaction has been applied to the process by which a saturated cohesionless soil under external forces suddenly looses its shear strength and behaves like a fluid. Various kinds of liquefaction-induced damage including slope failures, bridge and building foundation failures, and flotation of buried structures have been reported to occur during the earthquake.

Several methods to evaluate the liquefaction potential of saturated cohesionless soils have been proposed in the literature. The existing methods largely depend on the field test such as the standard penetration test, the cone penetration test, or the stress wave test. The objective of this study is to investigate differences depending on evaluation methodologies for the evaluation of liquefaction potential. Factors of safety against liquefaction were evaluated based on Seed and Idriss method, the modified Seed and Idriss method, Eurocode, the CPT method, and the shear wave velocity method. The results were compared and analysed.

Ten different earthquake records were selected for the input earthquake and the cyclic stress ratios of soil deposits were evaluated through the earthquake response analysis by using the SHAKE91. The cyclic resistance ratios were evaluated based on the above mentioned methods and then the factors of safety against liquefaction were estimated. The acceleration of base rock motion was chosen as 0.154g and the design earthquake magnitude was chosen as 6.5 based on the domestic standard.

According to the results obtained in the study, the earthquake response to the given rock motion was appeared to be different depending on the input seismic characteristic and the stratigraphy of the soil layer. In case of the factor of safety against liquefaction, the Eurocode method generally provided higher values than Seed and Idriss method. The modified Seed and Idriss method resulted in inconsistent values depending on the earthquake response. The CPT method and the shear wave velocity method may require additional data to verify their effectiveness.

Finally, a standard input earthquake suitable for the domestic earthquake environment should be provided to obtain a consistent factor of safety against liquefaction of saturated cohesionless soils.

Key words : Liquefaction, liquefaction potential, earthquake response analysis, cyclic stress ratio, cyclic resistance ratio

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

지구는 내부에너지로 인해 끊임없이 변화를 계속하는 동적시스템이다. 판구조론(Plate Tectonics)에 의하면 활성단층의 작용으로 인해 암반 파쇄와 함께 막대한 변형에너지가 방출되면서 발생하는 지진현상은 예측하기가 어렵고 자연재해 중에서 가장 큰 피해가 발생한다.

1964년 일본에서 발생한 Niigata 지진에 의해 발생한 지반의 침하, 건물의 전도, 그리고 교량의 파괴 등과 같은 지진피해는 모래지반의 액상화가 원인이 되었다는 것이 규명되었다. 같은 해에 미국의 Alaska에서 발생한 Good Friday 지진에서도 액상화로 인한 구조물의 치명적인 피해가 발생하였다. Niigata 지진과 Good Friday 지진으로 인한 구조물 피해의 원인이 모래지반의 액상화인 것으로 밝혀지면서 액상화에 대한 연구 활동이 활발하게 전개되었다. 이후에도 Togachioki 지진(1968), San Fernando 지진(1971), Miyagikenoki 지진(1978), Loma Prieta 지진(1989), 필리핀 지진(1990), 그리고 Hyogo-Ken Nanbu 지진(1995) 등에서 대규모의 액상화 현상이 발생하여 지진시 발생하는 액상화의 피해에 대한 관심이 증대되었다.

우리나라의 경우 지진발생 메커니즘을 설명하는 판구조론으로 볼 때, 판경계부에 위치하고 판들 사이의 상호작용이 활발하게 진행되어 지진의 크기도 크고 빈도도 높은 일본과는 달리 판의 경계에서 멀리 떨어진 판 내에 위치하고 있어 지진활동이 활발하지 않은 편이다.

우리나라는 지진에 대한 연구가 최근에 활발하게 진행 중에 있지만 축적된 연구와 자료는 많지 않은 실정이다. 한반도에 대한 비교적 자세한 지진자료는 1978년 이후 기상청에서 발표한 것으로 약 20년 동안의 기록뿐이다. 그러나 판내지진의 경우 큰 지진의 발생 주기가 천년 내외이므로 한반도 주변의

지진특성을 이해하기에는 자료가 매우 부족한 실정이다. 그러나 역사기록과 1905년 지진계가 설치된 이후 계측된 지진발생빈도를 보면 19세기에 들어서 면서 남부 및 서부지역에서 지진활동이 활발해지고 있음을 관측할 수 있다. 또한 1978년 이후 계측된 자료에 의하면 1987년부터 1982년까지는 중규모의 지진이 비교적 자주 발생하여 활성기라 할 수 있으며, 그 후 몇 년은 평년수준을 나타내었고 1986년부터 1991년까지는 규모나 발생 횟수 면에서 조용했던 시기로 나타났다. 그러다가 1993년부터 지진발생횟수가 점차 늘어나는 추세를 나타내고 있다.

이러한 지진발생 증가추세는 지진관측망이 조밀해지고 장비의 성능이 개선된 것에도 영향이 있을 것으로 보이나, 1978년부터 2000년까지 연평균 발생횟수가 20.4회인데 반해서 1990년대 평균은 25.5회이고 1996년 39회, 1999년 37회, 2000년 29회, 그리고 2001년 12월 현재 기상청의 지진관측 이래 가장 많은 43회의 지진이 관측되고 있다.

한반도에서는 1978년 이후 현재까지 규모 5이상의 지진이 3차례 발생하였으며 1978년 홍성에서 발생한 피해지진과 같이 규모 5 정도의 지진은 항상 발생할 가능성이 있으며 한반도가 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 깨닫게 해주었고, 1995년 일본에서 발생한 Hyogo-Ken Nanbu 지진, 일명 고베 지진은 지진 활동성이 매우 낮다고 알려진 지역에서 발생하였기 때문에 우리나라에서 지진에 대한 대비를 국가적 차원에서 본격적으로 시작하게 하는 계기가 되었으며 지진에 대한 공학자들의 관심이 증대되고 있다.

최근에 들어 국내 여러 연안지역에서는 매립과 성토에 의한 대규모의 항만시설, 공항, 농지, 그리고 공업단지의 조성이 이루어지고 있으며 활성 여부로 논란이 되고 있는 양산단층대에 속하는 낙동강 유역의 서부 경남 일대에는 액상화에 취약한 모래 퇴적층이 다수 존재하고 있다. 인명과 사회-경제 시스템에 큰 피해를 초래할 수 있는 대규모 지진이 가까운 장래에 발생할 가능성이 상존하는 상태에서 현재까지는 지진대책에 소홀히 해 왔다. 만약, 이러한

지진이 발생하게 된다면 모래 퇴적층과 성토 및 매립지반에서 지진증폭과 함께 액상화가 발생하여 지진피해가 가중될 가능성이 매우 높다. 따라서 지진에 대비해서 지역성을 고려한 지반의 동적특성연구와 그에 따른 액상화 현상 예측, 그리고 액상화 현상에 영향을 미치는 변수들에 대한 연구를 통해 근본적으로 지진피해를 경감시키는 노력이 절실히 요구되고 있다.

1.2 연구목적

현재 국내에는 협소한 토지사정과 함께 지역개발목적으로 인하여 대규모 부지를 조성하는 것이 어려워지고 있으며 이에 대한 대책으로 연약지반이나 매립지를 개발하여 이를 이용하고 있는 추세이다. 연약지반이나 매립지는 기반암에 비해 강도가 낮고 지진시 큰 피해가 발생할 수 있으므로 구조물을 축조할 경우 해당지반에 지진 및 지역특성을 고려하여 지진피해에 대한 대책을 마련해야 한다. 또한 지진시 발생하는 액상화 현상에 대한 연구를 통해 지진시 지반의 액상화 발생 가능성에 대해서 예측하고 이에 대한 대책을 마련하는 것이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 액상화 현상 및 예측방법에 대해 논의하고 모래층의 액상화 가능성 여부를 지진특성의 영향을 고려하여 기존의 각종 현장시험 결과를 이용하는 예측방법들을 이용해서 평가하고 각 예측방법들의 차이점을 비교 · 분석하고자 한다.

1.3 연구동향

사질토에서의 액상화 현상을 규명하기 위한 연구는 Casagrande(1936)의 한계간극비 이론에 의해 처음 시도되었다. 그는 한계간극비로 액상화 현상을

설명하고자 했는데 한계간극비 이상의 간극비를 가지는 포화모래층의 경우 진동하중이 가해질 때 진동효과(seismic effect)에 의해 모래의 체적이 감소하여 과잉간극수압이 발생하고 결국 모래는 전단강도를 상실하고 액상화 현상이 발생한다고 하였다. 액상화 현상에 대한 본격적인 연구는 1964년 Niigata 지진과 Good Friday 지진에 의해 발생한 피해의 원인이 대부분 액상화인 것으로 밝혀지면서 시작되었다. Seed 등(1966)은 포화사질토에 대한 비배수 반복삼축시험을 수행하여 액상화 현상이 지진하중에 의한 포화 비배수상태에서 반복전단에 의한 것으로 발표하였고, Seed 등(1971)은 다양한 모래에 대해 수행된 진동삼축시험결과를 이용해서 하중반복횟수에 따른 초기액상화와 관련된 평가곡선을 통해 간편화된 액상화 예측법을 제안하였다. Seed 등(1977)과 DeAlba 등(1975)은 반복단순전단시험을 통해 포화사질토에서 액상화가 일어나는 동안 과잉간극수압의 증가율을 측정하였다. Seed 등(1977)은 사질토층의 표준관입저항치를 기초로 하여 액상화 조건에 관한 영향인자와 수집된 구체적인 현장자료를 바탕으로 액상화 반복저항비와 표준관입저항치의 관계를 그래프 형태로 나타내었다. Seed 등(1983)은 지진피해 사례분석 및 등가전단응력개념을 토대로 지진피해사례를 분석한 결과, 여러 지진들의 전단응력을 등가하중 및 진동재하횟수로 표현하고 이를 통해 지진규모별 진동재하횟수를 제안하였다. Seed 등(1988)은 정하중 상태에서의 초기 액상화와 유동흐름 파괴에 대하여 연구하였고, Koester(1994)는 지진시 지반의 표면파괴를 액상화와 관련하여 설명하였다.

Stark 등(1995)은 여러 지역을 대상으로 콘관입저항치를 이용한 액상화 평가결과를 발표하였으며 Robertson 등(1992), Kayen 등(1992), 그리고 Anurus 등(1992, 1997)은 전단파 속도를 이용한 액상화 평가법을 제안하였다.

최근 우리나라에서도 지진에 대한 관심이 높아가고 있고 국내 지진특성에 맞는 액상화 평가방법에 관한 연구가 진행 중이다. 1997년 건설교통부의 위탁 하에 한국지진공학회와 한국건설기술연구원에서는 내진설계 성능기준과

경제성 평가를 위한 연구를 수행하였다. 신윤섭(1999)은 기존의 경험적인 액상화 평가방법과 진동삼축시험에 의한 상세 예측법을 비교하여 우리나라 지진특성을 고려한 액상화 평가방법의 개선방안에 관한 연구를 수행하였다. 1999년 한국해양연구소에서는 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서를 작성하고 우리나라의 지진특성에 맞는 액상화 가능성 해석방법으로 기존의 Seed와 Idriss 방법을 수정하고 보완한 수정 Seed와 Idriss 방법을 제안하였다.

1.4 연구방법 및 범위

액상화에 취약한 지반에 대한 액상화 가능성 평가는 일반적으로 현장시험 결과를 이용한 방법이 주로 이용된다. 이 방법은 지진시 지반에 발생하는 반복응력비(Cyclic Stress Ratio ; CSR)와 지반의 액상화에 대한 반복저항비(Cyclic Resistance Ratio ; CRR)를 비교하여 안전율을 평가하는 것으로 지진에 의해 지반에 발생하는 반복응력비는 각 나라에서 규정된 지반계수와 위험도 계수를 이용하거나 계측된 실지진의 가속도 시간이력을 입력자료로 하여 지진응답해석프로그램을 이용해서 평가한다. 또한, 지반의 액상화에 대한 저항응력은 현장지반에 대한 입도분포 및 표준관입저항치와 같은 자료를 토대로 제안된 평가곡선 또는 평가식을 이용해서 평가한다.

이러한 방법으로 수행하게 되는 현장시험 결과를 이용한 액상화 가능성 평가방법은 지반의 정확한 동적거동을 표현하기에는 많은 어려움이 있지만 넓은 지역을 대상으로 비교적 간편하게 평가가 가능하다는 장점으로 인해 여러 나라의 내진설계기준에 이용되고 있다. 대표적인 방법으로는 Seed와 Idriss 방법, 수정 Seed와 Idriss 방법, 그리고 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법과 같이 표준관입시험저항치를 이용하는 방법, 콘관입저항치를 이용하는 방법, 그리고 전단파 속도를 이용하는 방법을 들 수 있다. Seed와 Idriss의 방법은 많은 지진기록분석을 토대로 연구되어 일본의 건축물 시방서, Eurocode 등에

이용되고 있으며 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법은 많은 실내시험을 토대로 연구되어 일본 도로교 시방서에 이용되고 있다. 최근에 들어 콘관입저항치를 이용하는 방법과 전단파 속도를 이용하는 방법도 많은 지진기록분석과 액상화 피해지역 조사를 토대로 제안되고 있다.

본 연구에서는 표준관입시험을 이용한 Seed와 Idriss 방법, Eurocode, 수정 Seed와 Idriss 방법과, 콘관입시험 결과를 이용한 방법, 그리고 전단파 속도를 이용하는 방법으로 액상화 가능성 여부를 판단하고 그 결과를 비교 분석하고자 한다.

본 연구에서 액상화 가능성 여부를 평가하기 위한 대상지반은 활성여부로 논란이 되고 있는 양산단층계 내에 위치한 ○○지하철 ○호선 ○단계 ○○선의 ○공구 중 A, B, C, D지역을 평가 대상지반으로 선정하였고, 지진에 의한 반복응력비 평가에서 설계가속도는 1997년 건설교통부 주관으로 제정된 상위개념의 “내진설계기준(II)”에 따라 결정하였으며, 다층반사모델을 적용하여 1차원등가선형해석을 수행하는 SHAKE91을 이용해서 지진응답해석을 수행하였다. 액상화 가능성 평가시 설계지진규모는 우리나라 역사지진과 계기지진을 고려하고 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서 규정에 따라 6.5의 경우에 대해서만 평가하였다.

제 2 장 액상화 가능성 평가방법

2.1 액상화 현상

포화 사질토의 경우, 외력이 작용하기 전에 토립자들은 상호접촉상태에 있으며 입자간의 상호접촉을 통해 외력이 전달된다. 사질토 지반은 이와 같은 원리로 전단저항력을 가지게 된다. 지진과 같은 급속으로 재하되는 하중에 의해 발생된 전단응력은 사질토체에 전단변형을 일으킨다. 그러면 수직방향으로 지지하던 접촉점들이 분리되며 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 액상화라 한다. 이 상태가 되면 전단저항을 잃은 사질토는 포화사질토의 단위중량을 가지는 액체와 같이 거동하게 된다. 액상화가 발생한 이후, 토립자는 재구성되고 과잉간극수압은 감소하여 토체는 다시 안정화(post-liquefaction)를 이룬다. 토체의 이와 같은 변화과정을 그림 2.1에 나타내었다.

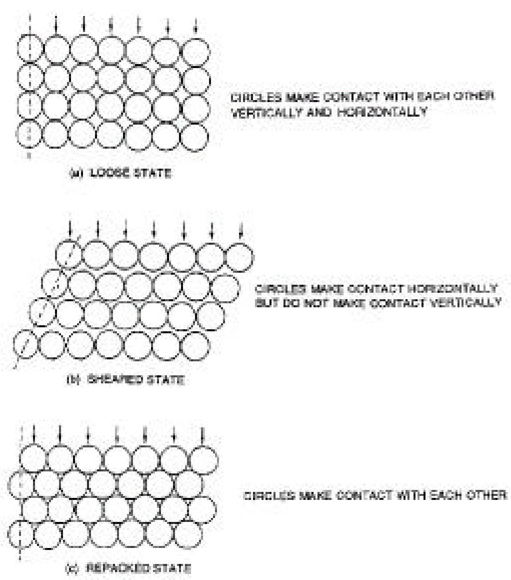


그림 2.1의 (a)는 지진력이 가해지기 전의 느슨한 사질토지반을 나타내고

있으며, (b)는 지진력이 가해졌을 때 지반에 전단변형이 일어나며 과잉간극수압이 발생하는 순간, 즉 액상화가 발생한 순간의 모습을 나타낸 그림이다. (C)는 액상화발생 후 과잉간극수압이 소산되고 토립자는 조밀한 상태로 재배열되어 다시 강도를 회복한 상태를 나타내고 있다.

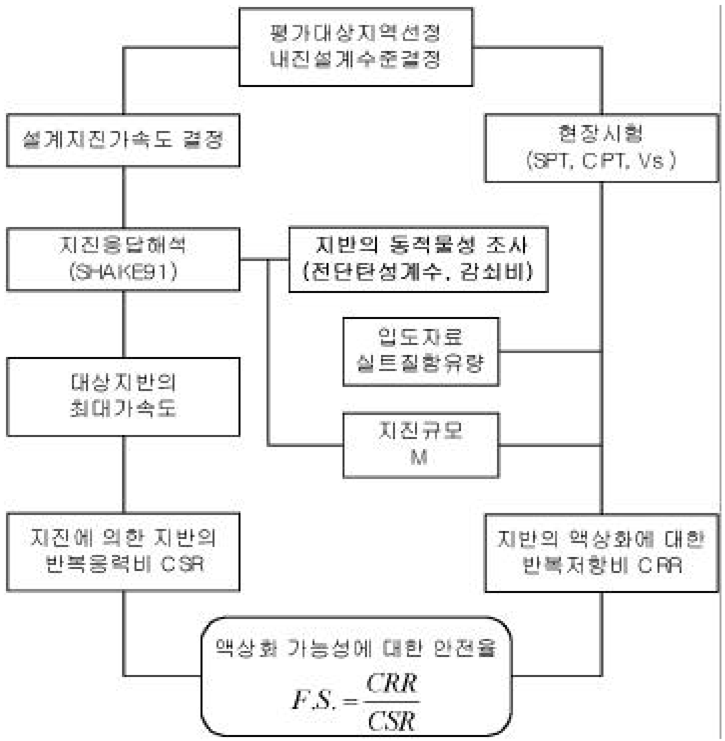
이와 같이 액상화 현상이란 느슨한 사질토지반에 지진 등과 같은 동적하중이 급속히 재하될 때 발생하는 과잉간극수압으로 인해 지반이 유효응력을 잃고 액체화되는 현상이라고 할 수 있다.

2.2 액상화 평가방법

액상화 가능성을 평가하고 분석하는 방법은 지반의 액상화 반복저항비 평가방법에 따라 표준관입시험, 콘관입시험, 그리고 전단파 속도를 이용한 방법과 같이 현장시험결과를 이용한 경험적인 방법과 진동전단시험, 진동삼축시험과 같은 실내시험을 통한 방법으로 나눌 수 있다. 액상화 반복저항비는 불교란 시료에 대한 실내시험을 이용한 방법을 통해 평가하는 것이 바람직하지만 실내시험을 통해서도 현장응력상태를 재현할 수 없고, 기존의 시료 채취방법으로는 시료의 교란이 크게 발생하게 된다. 시료의 교란을 피하기 위해서는 지반을 동결시켜 시료를 채취하는 방법이 있지만 비용이 과다하게 소요된다. 또한 대규모 지역에 대한 액상화 평가시 비용과 해석시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점 때문에 일반적으로 현장시험의 결과를 이용한 방법이 주로 이용되고 있다.

현장시험 결과를 이용한 액상화 가능성 평가는 그림 2.2에 나타낸 바와 같이 지진에 의한 반복응력비는 국가별로 규정하고 있는 지반계수와 위험도계수를 이용하여 평가하거나 계측된 실지진 기록이나 인공지진을 입력하여 SHAKE91과 같은 지진응답해석 프로그램의 수행을 통해 평가하게 되는데 최근에 와서는 지진응답해석 프로그램을 이용하는 방법이 주로 이용되고 있다.

지반의 액상화 반복저항비는 평가대상 지층의 실트질 함유량과 지진규모에 따른 현장시험 결과와 반복저항비의 관계곡선이나 평가식을 이용해서 평가하게 된다.

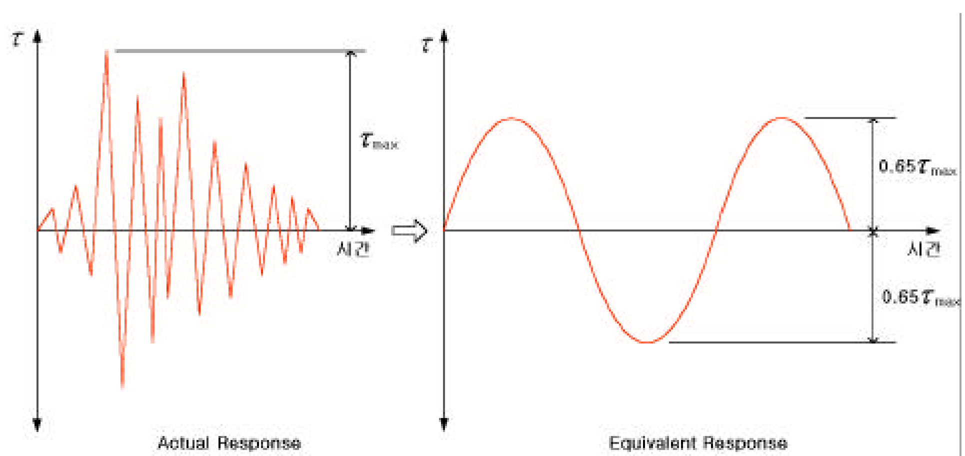


2.3 지진에 의한 반복응력비

액상화 가능성을 평가하기 위해서 우선적으로 평가해야할 내용은 지진력을 어느 정도 수준의 지반에서 발생하는 전단응력으로 평가해서 고려할 것인가에 관한 사항이다. 지진에 의해 지반에 발생하는 전단응력은 일반적으로 지진에 의한 반복응력비로 표현하는데 대상지반에 작용하는 지진에 의한 반복응력비는 지반의 최대가속도 결정 방법에 따라 크게 두 가지 방법으로 나눌

수 있다. 첫 번째 방법은 지반계수와 위험도계수를 적용하는 간편화된 식을 이용하는 방법이며, 두 번째 방법은 지진응답해석에 의한 방법으로 상용화된 지진응답해석 프로그램을 이용하여 계측된 실지진의 가속도 시간이력이나 인공지진의 가속도 시간이력을 입력자료로 하여 지진응답해석을 수행하는 방법이다. 최근에는 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기위해서 지진응답해석을 통해 반복응력비를 평가하는 방법을 사용하는 경우가 증가하고 있는 추세이다.

Seed 등(1971)은 많은 지진기록의 분석과 실험을 통해 전단응력과 지속시간으로 표현되는 지진력을 최대전단응력의 65% 수준의 전단응력으로 표현하는 등가전단응력개념을 제안하였고, 이러한 등가전단응력개념을 도식적으로 표현하면 그림 2.3과 같다.



±x림 2.3은 불규칙한 지진파를 규칙적인 정현파로 변환시키는 과정을 나타내고 있는데 지진에 의한 최대전단응력의 65%에 해당하는 값을 지진시 발생하는 전단응력으로 평가한다.

Seed 등은 이러한 등가전단응력개념을 토대로 지표면 최대가속도와 지반의 연직응력을 고려한 지진에 의한 반복응력비를 식 (2.1)을 이용하여 계산할 것을 제안하였다.

$$\mathrm{CSR} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \times \gamma_d$$

(2.1)

식 (2.1)에서 τ_{av} 는 지진시 지반에 발생하는 평균전단응력, a_{max} 는 지진에 의한 지표면 최대 수평가속도($m/\sec^2$), g는 중력가속도(9.81 $m/\sec^2$), σ_{vo} 는 평가대상지층의 전연직상재응력, σ'_{vo} 는 유효상재응력, 그리고 γ_d 는 지반심도에 따른 응력감소계수이다. 응력감소계수 γ_d 는 흙의 연성에 대한 보정을 하기위한 계수로 그림 2.4를 이용해서 평가한다.

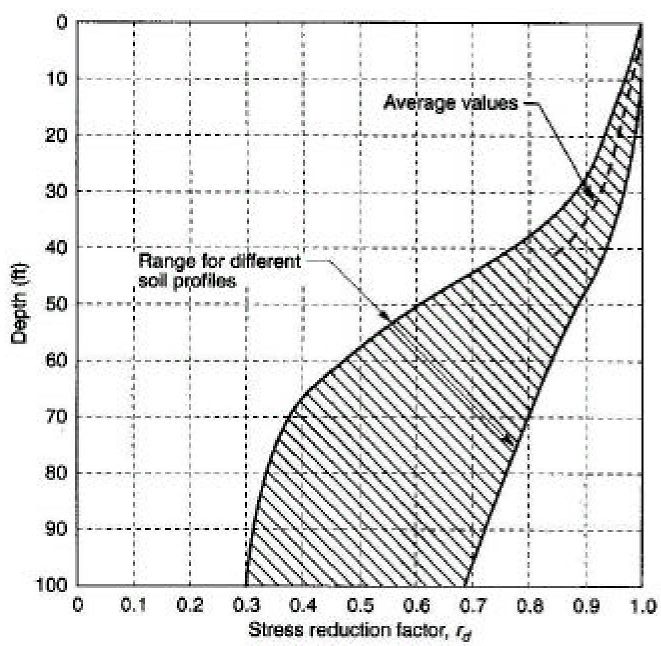


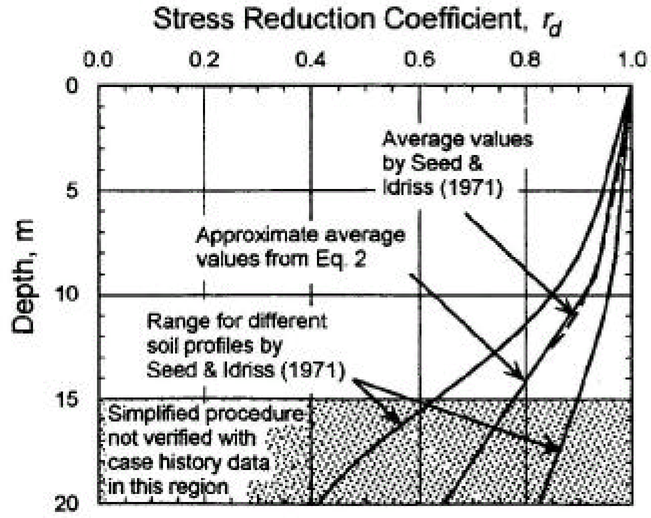
그림 2.4는 지반심도 따라 응력감소계수가 변화하는 양상을 보여주고 있는

데 응력감소계수는 대상깊이에 대한 상한값과 하한값의 평균값을 적용한다. 그림 2.4를 통해서 대상깊이에 대한 상한값과 하한값의 평균값을 응력감소계수로 결정하는 방법은 대상 지층에 대해서 각각 계산해야하기 때문에 많은 시간이 소요되고 불편한 점이 있고 각 연구자들에 따라 그 범위가 다소 차이가 있다. 대상깊이에 대한 평균값에 대해서도 여러 연구자들에 의해 응력감소계수를 계산하는 식이 제안되었고, 제안된 응력감소계수 평가식은 표 2.1과 같다. 이와 같이 지진시 발생하는 지반운동을 평가하기위해서는 지반의 층상구조, 기반암까지의 깊이, 각 층의 단위중량, 전단파 속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성, 지하수위, 그리고 지반응력상태 등의 평가가 필요하다.

표 2.1 깊이에 따른 응력감소계수 평가식 (Youd 등, 1997)

응력감소계수 γ_d	깊이 z	제안자
$1.000 - 0.00765z$	$z < 9.15\,m$	Liao & Whitman (1986)
$1.174 - 0.0267z$	$9.15\,m \le z \le 23\,m$	
$0.744 - 0.008z$	$23\,m \le z \le 30\,m$	Robertson & Wride (1997)
0.50	$z > 30\,m$	Willian F. Marcuson

하지만 액상화 평가시 Liao 등(1986)이 제안한 깊이보다 깊은 경우 응력감소계수의 범위가 넓고 신뢰성도 떨어지며 지반심도가 20m보다 깊은 지층에서는 액상화가 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 일반적으로 현장시험 결과를 이용한 간편화된 방법을 통해 액상화 가능성을 평가할 경우 20m 이하의 깊이에 대해서 액상화 가능성 평가를 하고 있다. Seed 등(1971)이 제안한 깊이에 따른 응력감소계수의 범위와 Liao 등(1986)이 제안한 응력감소계수의 평균값을 도시하면 그림 2.5와 같다.



±x림 2.5는 Seed 등(1971)이 제안한 응력감소계수 평가곡선에 Liao 등(1986)이 제안한 평가식을 이용해서 깊이에 따른 응력감소계수의 평균값을 추가한 것이다. Blake(1996)는 보다 간편하고 쉽게 평가하기 위해 Liao 등(1986)이 제안한 평가식을 이용해서 구한 응력감소계수의 평균값에 근사시킨 계산식을 식 (2.2)과 같이 제안하였다.

$$\gamma_d = \frac{1.0 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.0 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2}$$

식 (2.2)에서 z 는 지표면으로부터의 깊이로 단위는 m이다.

Eurocode에서는 Seed와 Idriss의 등가전단응력개념을 기초로 지진에 의한 반복응력비를 식 (2.3)을 이용해서 계산하도록 규정하고 있다. (2.2)

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \times S \times \alpha_{max} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$$

(2.3)

식(2.3)에서 S는 지반계수이며 α_{max} 는 유럽의 국가별 지진가속도계수이다.

Eurocode에서는 Seed와 Idriss의 방법을 따르고 있지만 흙의 연성에 대해 보정하기위한 깊이에 따른 응력감소계수를 적용하지 않는 차이점이 있다.

최근 김수일 등(2000a)에 의해 제안된 수정 Seed와 Idriss 방법은 액상화 반복저항비를 구하는 방법에 있어서는 Seed와 Idriss 방법과 동일하지만 지진에 의한 반복응력비를 구하는 방법에서 차이점이 있다. Seed와 Idriss 방법은 지표면 최대가속도와 깊이에 따른 응력감소계수를 이용하여 대상의 깊이에서의 지진에 의한 반복응력비를 구하도록 하고 있다. 이때 응력감소계수의 값은 상한값과 하한값의 평균값을 이용하도록 하고 있지만 심도가 깊어질수록 응력감소계수의 범위가 넓어져서 신뢰도가 떨어지기 때문에 응력감소계수를 사용하지 않고 지진응답해석을 통해 평가 대상 깊이에서의 지진가속도를 구하여 이를 이용해서 지진에 의한 반복응력비를 계산하도록 하고 있다. 지진응답해석을 통해 계산된 평가대상 깊이에서의 최대가속도 a_{depth} 을 이용한 평가식은 식 (2.4)과 같다.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \times \frac{a_{depth}}{g} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \tag{2.4}$$

식 (2.4)을 이용하여 구한 반복응력비와 액상화 반복저항비를 이용해서 액상화에 대한 안전율을 구하며 안전율의 값이 1.5보다 클 때에는 액상화에 대하여 안전한 것으로 판단한다. 그러나 안전율의 값이 1.5보다 작은 경우에는 진동삼축시험 등과 같은 실내시험을 이용한 엄밀해석을 실시할 것을 추천하고 있다.

등가전단응력 개념을 이용한 Seed와 Idriss의 방법과 다르게 Iwasaki와

Tatsuoka는 최대전단응력 개념을 이용해서 지진에 의한 반복응력비를 평가할 것을 제안하였고, 이 방법은 현재 일본 도로교 시방서에서 적용하고 있다. 일본도로교 시방서의 내용을 살펴보면, 지진에 의한 반복응력비를 최대전단응력으로 평가하기위해 등가전단응력개념에서 적용한 계수 0.65를 사용하지 않고 있고 식 (2.5)과 같은 계산식을 이용하여 평가하도록 규정하고 있다.

$$CSR = L_{max} = a_{max} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \times \gamma_d \tag{2.5}$$

2.4 지반의 액상화 반복저항비

일반적으로 국내외 내진설계기준에서는 현장시험 결과를 이용해서 액상화 반복저항비를 평가하는 방법을 주로 이용한다. 현장시험 결과를 이용한 방법에는 Seed와 Idriss 방법, Eurocode과 같이 표준관입시험결과를 이용하는 방법, 콘관입시험결과를 이용한 방법, 그리고 전단파 속도를 이용한 방법들이 제안되고 있고, 표준관입저항치와 진동삼축시험 결과분석을 토대로 한 일본 도로교 시방서 규정을 들 수 있다.

2.4.1 표준관입시험결과를 이용한 방법

Seed 등(1985)은 많은 지진기록 및 피해사례에 대한 분석을 통해 보편적으로 획득하기 용이한 표준관입시험을 통해 획득한 N값과 액상화 반복저항비와의 관계를 도시함으로써 간편하게 액상화 반복저항비를 평가하는 방법을 제안하였다.

액상화 반복저항비 계산방법을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 우선 표준

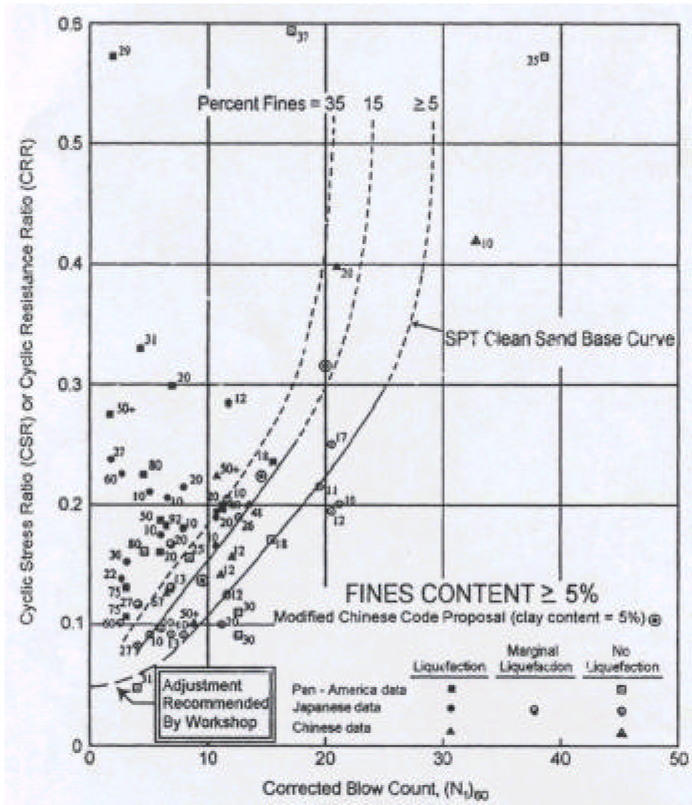
관입저항치를 식 (2.6)을 통해 보정하여 에너지 효율 60%를 기준으로 환산한 N값을 계산한다.

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N \tag{2.6}$$

식 (2.6)에서 $(N_1)_{60}$ 은 환산 N값이고, C_N 은 유효연직상재응력에 따른 수정계수로 식 (2.7)과 같다(Liao 등, 1986).

$$C_N = \sqrt{\frac{10}{\sigma_v'}} \qquad (C_N \leq 2) \tag{2.7}$$

식 (2.7)에서 σ_v' 은 평가대상지층의 유효연직응력이며 단위는 ton/m^2 이다. Seed 등(1985)은 수정 N값을 이용하여 지진피해기록을 분석한 결과, 그림 2.6과 같은 액상화 반복저항비를 평가하는 도표를 제안하였다.



일반적으로 세립분 함유량이 높을수록 액상화 반복저항비가 증가하는 경향이 있다. 그림 2.6은 Seed 등(1985)에 의해 제안된 도표를 1996년 미국 국립지진연구소(National Center for Earthquake Engineering Research ; NCEER)의 Workshop에서 낮은 $(N_1)_{60}$ 에 대해서 수정한 것으로 지진규모

7.5를 기준으로 세립분 함유량 5%, 15%, 30%에 대해 제안된 실트질 모래지반의 액상화 반복저항비 평가곡선이며 다른 지진규모에 대해 액상화 반복저항비를 평가하는 경우에는 지진규모 수정계수를 곱하여 평가한다. Rauch(1998)는 그림 2.6의 세립분 함유량이 5%이하인 순수한 모래에 대한 곡선을 식 (2.8)과 같이 나타내어 보다 간편하게 순수한 모래에 대한 반복저항비를 평가할 것을 제안하였다.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

액상화 반복저항비를 계산하기 위해서는 그림 2.6**을 이용해야하지만 각기 다른 세립분 함유량에 대해서 액상화 반복저항비를 구하는 것은 번거롭고 불편한 점이 있다**. Idriss**는 세립분 함유량** 5%**미만의 사질토에 대한 등가 환산** (2.8) **표준관입저항치** $(N_1)_{60cs}$ **을 계산하는 식** (2.9) (2.11)**를 통해서 세립분 함유량** 5%**미만의 사질토에 대한 값으로 변환하여 액상화 반복저항비를 평가할 것을 제안하였다**(Youd **등**, 1997).

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

$\alpha = 0$	$FC \le 5\%$
$\alpha = \exp(1.76 - (190/FC^2)]$	$5\% < FC \le 35\%$
$\alpha = 5.0$	$FC \ge 35\%$ (2.9)
$\beta = 1.0$	$FC \le 5\%$
$\beta = (0.99 - (FC^{1.5}/1000)]$	$5\% < FC \le 35\%$
$\beta = 1.2$	$FC \ge 35\%$

(2.10)

(2.11)

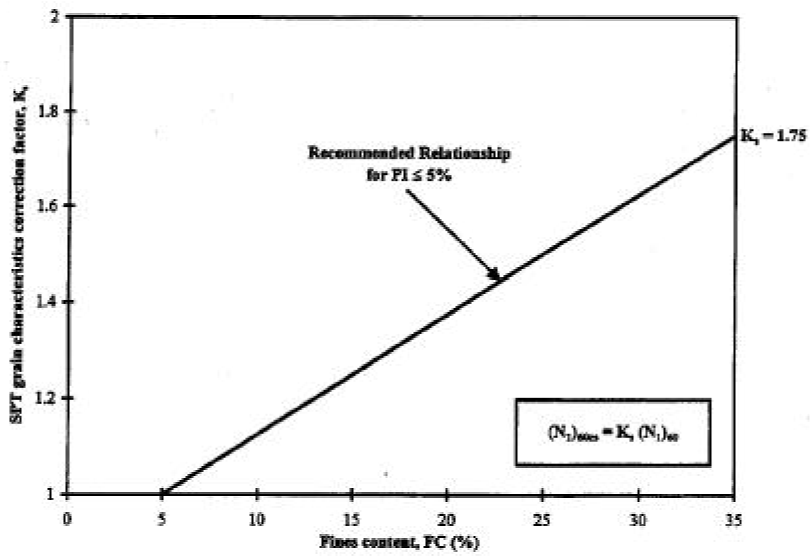
식 (2.9) (2.11)**에서** FC **는 세립분 함유량이고**, α **와** β **는 세립분 함유량** 5%**미만의 사질토에 대한 등가 환산계수이다**. Robertson **등**(1997)**은 소성지**

수가 5% 미만인 비소성의 사질토에 대해 세립분의 소성도와 함유량을 고려한 계수 K_s 을 적용하여 $(N_1)_{60}$ 을 세립분 함유량 5%미만의 사질토에 대한 값으로 변환하는 식을 식 (2.12)과 같이 제안하였다.

$$(N_1)_{60cs} = K_s (N_1)_{60}$$

식 (2.12)에서 K_s 는 흙입자의 소성도와 세립분의 함유량을 고려한 계수이고, 그림 2.7을 이용해서 구한다.

(2.12)



이와 같이 각 세립분 함유량에 대한 액상화 반복저항비를 세립분 5%에 대한 $(N_1)_{60}$ 으로 환산하더라도 그림 2.6을 이용해서 액상화 반복저항비를 평

가해야한다. Blake(1996)는 그림 2.6의 세립분 5%에 대한 곡선을 식 (2.13)과 같이 나타낼 수 있음을 제안하였다.

$$CRR_{7.5} = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4} \quad (2.13)$$

식(2.13)에서 $x = (N_1)_{60cs}$는 등가환산 N값이고, $a = 4.844E-02$, $b = -1.248E-01$, $c = -4.721E-03$, $d = 9.578E-03$, $e = 6.136E-0.4$, $f = -3.285E-04$, $g = -0.1673E-05$, 그리고 $h = 3.714E-06$이다.

Eurocode에서 규정하고 있는 액상화 평가방법은 Seed와 Idriss의 방법을 기초로 하고 있는데 Seed와 Idriss 방법과 마찬가지로 지반의 액상화 반복저항비 평가는 해당 지층의 표준관입저항치를 이용한다. 하지만 조건에 따라 표준관입저항치의 평가가 어려운 경우, 전단파속도를 이용하여 액상화 반복저항비를 평가할 수 있도록 하고 있다.

Eurocode에서는 에너지 효율 60%와 유효상재압 100kPa을 기준으로 N값을 보정하는 경우, 지반심도가 3m이하일 때에는 N값을 25% 감소시켜 적용하고, 3m이상일 경우에는 식 (2.14)을 이용하여 N값을 보정할 것을 제안하고 있고, 식 (2.14)과 평가곡선을 이용할 때에는 20m이내의 지층에 대해서만 액상화 평가를 수행할 것을 제안하고 있다.

$$(N_1)_{60} = N \times \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \times \frac{ER}{60} \quad (2.14)$$

식 (2.14)에서 σ_v' 은 평가대상지층의 유효연직응력이며 단위는 kPa이고 ER은 에너지 효율(%)이다.

액상화 반복저항비는 Seed와 Idriss 방법에서 이용하는 표준관입저항치와 액상화 반복저항비 관계 평가곡선을 통해서 평가하도록 하고 있다. 또한 Eurocode는 허용안전율을 1.5로 제한하고 있으며 안전율이 1.5이하인 경우, 액상화 가능성이 있다고 판단하여 진동삼축시험 등을 통한 추가적인 조사를

수행할 것을 추천하고 있다.

2.4.2 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법

일본 도로교 시방서에서 이용하고 있는 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에서는 진동삼축시험과 간편식을 통해 액상화 반복저항비를 계산하도록 하고 있는데 액상화 반복저항비는 식 (2.15)을 이용해서 계산한다.

$$R = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot R_L \tag{2.15}$$

식 (2.15)은 Iwasaki와 Tatsuoka가 진동삼축시험 결과를 토대로 제안하였으며 식에서 C_1, C_2, C_3, C_4, 그리고 C_5는 보정계수로 각각의 내용은 다음과 같다. C_1은 실내삼축압축시험과 현장에서의 구속압의 차이에 대한 보정계수이고, C_2는 지진시 현장에서의 지진력 재하형태와 삼축시험에 적용되는 sine파 형상의 재하형태의 차이에 대한 보정계수이다. C_1은 $(1 + 2K_0)/3$의 식을 이용하고, 이때 그 범위는 1/0.07 1/0.55의 값을 주로 사용한다. C_2는 1.62의 값을 주로 사용한다. C_3는 시료의 채취와 취급 시에 발생하는 교란에 대한 보정계수이고 C_4는 시료의 채취와 취급 중에 발생하는 시료의 밀도화에 대한 보정계수이다. 일반적으로 시료가 느슨하므로 밀도화에 의하여 강도의 증가가 일어나고 시료의 채취와 취급 중에 발생하는 교란에 의하여 밀도화가 일어나기 때문에 C_3와 C_4의 곱은 일반적으로 1의 값을 사용한다. 지진의 다방향성을 고려한 보정계수 C_5는 실내시험에서 일방향으로 진동하중이 재하되는 것을 보정하는 것으로 0.9의 값을 사용한다.

식 (2.15)에서 R_L은 표준관입저항치, 평균입경, 그리고 세립분 함유량을 고

려해서 식 (2.16) 식 (2.19)을 이용해서 계산한다.

$$R_L = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = 0.0882\sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} \quad (2.16)$$

$$R_2 = 0.19 \qquad (0.02\,mm \le D_{50} \le 0.05\,mm)$$

$$R_2 = 0.25\log_{10}(0.35/D_{50}) \qquad (0.05\,mm \le D_{50} \le 0.6\,mm)$$

$$R_2 = -0.05 \qquad (0.6\,mm \le D_{50} \le 2.0\,mm) \quad (2.17)$$

$$R_3 = 0.0 \qquad (0\% \le FC \le 40\%)$$

$$R_3 = 0.044\,FC - 0.16 \qquad (40\% \le FC \le 100\%) \quad (2.18)$$

식 (2.18)에서 D_{50}은 입도분포곡선을 토대로 평가된 평균입경으로 단위는 mm이고, 유효연직상재응력의 단위는 ton/m^2이며, FC는 200체를 통과한 세립분 함유량의 백분율이다. (2.19)

일본 도로교 시방서에서 제시한 액상화 평가방법도 Seed와 Idriss의 경험적 액상화 평가방법과 크게 다르지 않다. 단지 일본 도로교 시방서의 액상화 평가방법은 지진에 의한 반복응력비를 평가시 최대전단응력비 개념을 도입하고 있으며 액상화 반복저항비를 구할 때는 입도분포에 대한 영향을 비중 있게 고려하고 있다.

2.4.3 콘관입시험결과를 이용한 평가방법

콘관입시험(Cone Penetration Test ; CPT)**은 표준관입시험에 비해 상대적으로 경제적이고 빠른 시간 내에 대상지반에 대해 신뢰할 만한 정밀도를 가지는 연속적인 결과를 얻을 수 있기 때문에 그 사용이 증가하는 추세에 있고, 콘관입저항치를 이용한 모래층의 액상화 반복저항비의 평가에 대한 많은 연구가 수행되고 있다**(Robertson 등, 1985; Seed 등, 1986; Olsen, 1988; Olsen 등, 1988; Shibata 등, 1988; Mitchell 등, 1990; Olsen 등, 1995; Suzuki 등, 1995; Stark 등, 1995; Robertson 등, 1995).

CPT**를 이용한 액상화 평가는 과거에는 주로** CPT **값을** SPT **값으로 변환시킨 후에 사용되어졌는데 이것은 풍부한** SPT **자료를 충분히 이용할 수 있는 이점이 있기 때문이다. 하지만 최근에는 많은 현장에서** CPT**를 이용한 지반조사가 이루어져 많은 자료가 축적되어 평가곡선이 제안되었고 이것을 이용하여** SPT **값으로의 변환 없이도 액상화 반복저항비 값을 평가할 수 있게 되었다.**

액상화를 예측하기 위해서는 식 (2.20)**을 이용해서 콘선단저항치를 보정해 주어야 한다.**

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}}\right) C_q = \frac{q_{c1}}{P_{a2}} \quad (2.20)$$

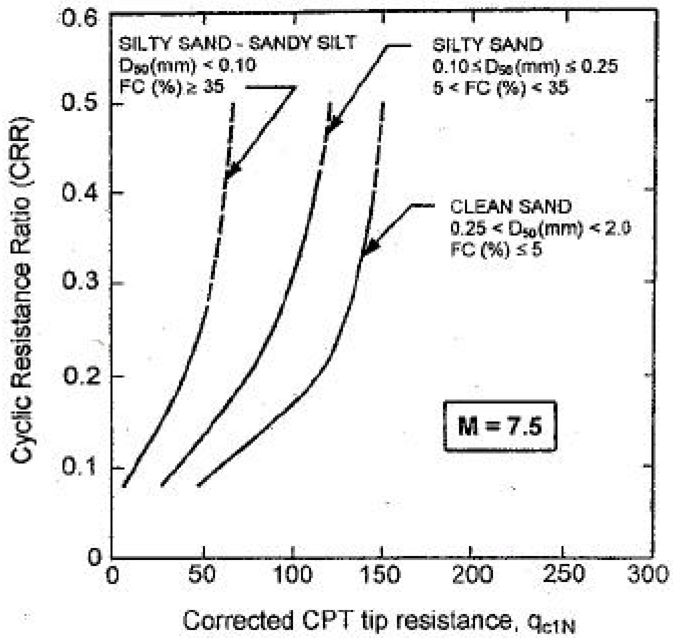
식 (2.20)**에서** q_c**는** CPT **선단저항치,** q_{c1N}**은 수정된** CPT **선단저항치를 나타낸다.** C_q**는 유효연직응력** σ'_v **에 따른 수정계수로 식** (2.21)**과 같이 나타낼 수 있다.**

$$C_q = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}} \quad (2.21)$$

식 (2.21)에서 P_a는 σ'_v에 대해 같은 단위로 만들어 주기 위한 것으로 σ'_v

의 단위가 kPa일 경우에 P_a = 100 kPa이고, P_{a2}는 q_c에 대해 같은 단위로 만들어 주기 위한 것으로 q_c의 단위가 MPa일 경우 P_{a2} = 0.1MPa이다. 수정된 CPT 선단저항치 q_{c1N}은 단위가 없는 무차원양이 된다.

Stark 등(1995)은 180개 지역의 자료를 기초로 하여 평균유효입경과 세립분 함유율에 따른 다양한 모래질 지반에서의 q_{c1N}에 대한 액상화 반복저항비의 관계를 나타내는 평가곡선인 그림 2.8을 제안하였다.



이러한 CPT에 의한 액상화 평가방법은 SPT에 의한 방법에 비해 경제적이고 단시간에 신뢰할만한 정밀도와 연속적인 결과를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 CPT를 최근에 들어 많이 실시하고 있기는 하지만 현장의 액상화를 평가하기 위한 CPT 자료가 아직은 부족하고 액상화 반복저항비를 평가하기 위해서는 그림 2.8에서 나타낸 바와 같이 평균입경과 세립분 함유량이 필요하지만 CPT로는 직접 이러한 토질 특성을 구할 수 없고 추가적인 시료 채취를 통한 실내시험이 필요한 단점이 있다. 이러한 이유 때문에 현재까지 CPT를 이용한 방법이 많이 쓰이고 있지는 않지만 콘주변마찰력이나 간극수압측정을 통해 이러한 단점을 해결하기위한 방법이 연구되고 있다.

2.4.4 전단파 속도를 이용한 평가방법

액상화 저항을 평가하기 위한 또 하나의 방법으로 전단파 속도를 이용하는

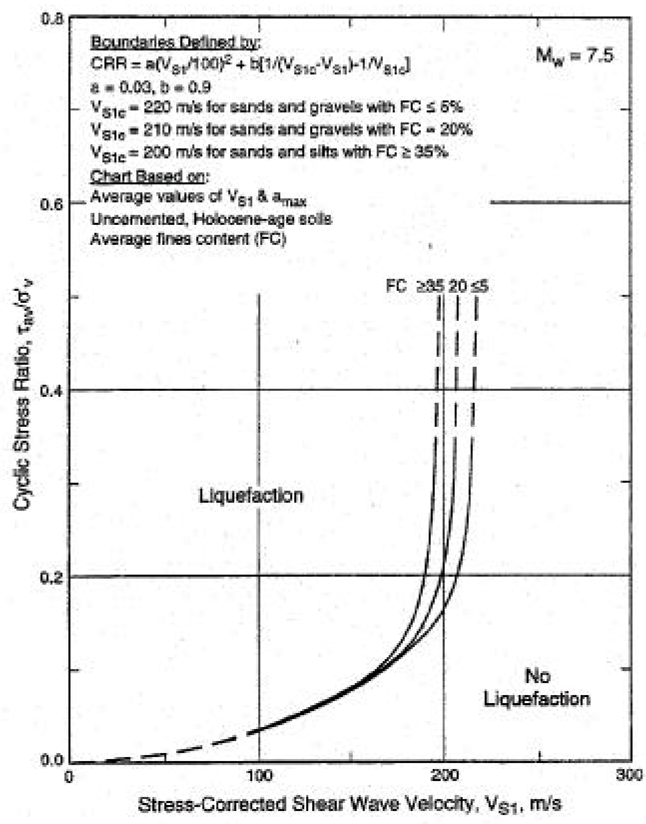
방법이 있다. 현장에서 전단파 속도 V_S는 Crosshole Seismic Test, Seismic Cone Penetration Test(SCPT), 또는 Spectral Analysis of Surface Wave(SASW) Test와 같은 여러 가지 현장시험법에 의해 측정된다. 이와 같은 시험을 통해 구한 현장의 전단파 속도 V_S로 액상화를 평가하기 위해서는 식 (2.22)과 같이 유효응력에 대한 보정이 필요하다(Robertson 등, 1992).

$$V_{S1} = V_S \left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^{0.25}$$

식 (2.22)에서 V_{S1}는 수정 전단파속도로 단위는 m/s 이고, P_a는 100 kPa, σ_v'는 유효연직응력이고 단위는 kPa이다. Robertson 등(1997)은 SPT, CPT 결과를 이용한 방법과 같은 전통적인 과정을 따르기 위해 σ_v'의 항으로 (2.22) 수정 V_S을 선택하고 액상화 반복저항비를 식 (2.23)과 같이 제안하였다.

$$CRR = \frac{\tau_1}{\sigma'_v} = a\left(\frac{V_{S1}}{100}\right)^2 + b\left[\frac{1}{(V_{S1c} - V_{S1})} - \frac{1}{V_{S1c}}\right]$$

식 (2.23)에 의해 표현되는 액상화 반복저항비와 수정전단파속도 V_{s1} 사이의 관계를 사용하여 액상화 가능성 여부를 구분하는 곡선을 그릴 수 있다. 그림 2.9는 지진규모 7.5에 대해서 세립분 함유량을 고려한 전단파속도와 액상화 반복저항비의 관계를 나타내는 곡선이다. (2.23)



전단파속도를 이용해서 액상화 저항을 평가하는 방법은 사질토와 같이 시료 채취가 어려운 토질, 쓰레기 매립장과 같이 시료 채취가 어렵고 SPT와 CPT과 같은 현장시험이 어려운 지반에 대해서 액상화 가능성을 평가할 수 있는 장점이 있다.

2.5 지진규모 수정계수

액상화 반복저항비를 구하는 그림 2.6, 그림 2.8, 그리고 그림 2.9는 지진규모 7.5를 기준으로 만들어진 것이고 지진규모 7.5보다 더 크거나 작은 지진규

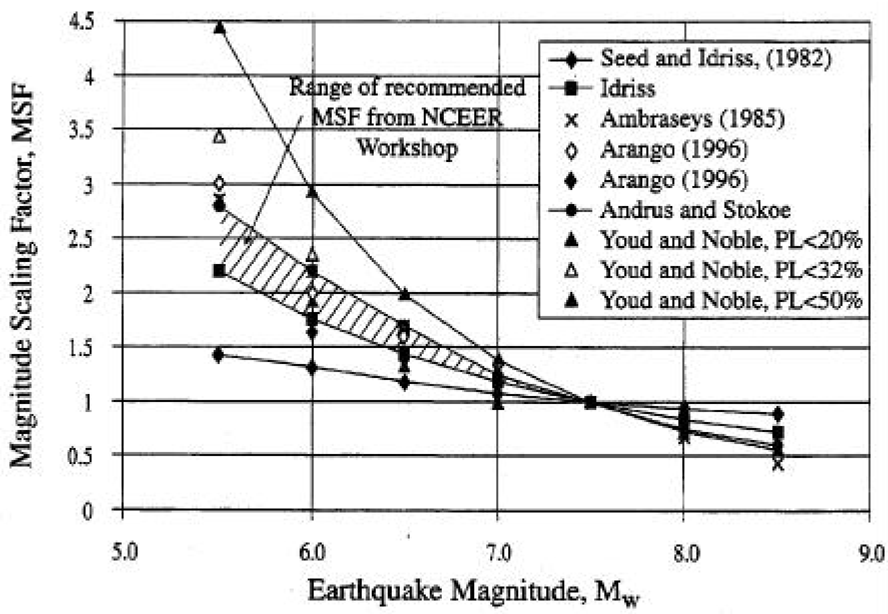
모에 대해서는 지진규모 수정계수(Magnitude Scaling Factors ; MSF)를 이용해서 보정해 주어야 한다. 지진규모 수정계수는 표 2.2와 그림 2.10에 나타낸 바와 같이 각 연구자에 따라서 제안한 값이 다소 차이가 나고, Eurocode에서 규정하고 있는 지진규모 수정계수는 Ambraseys(1988)가 제안한 값과 같다. 그리고 NCEER에서는 그림 2.10에 별도로 표시된 부분의 값을 적용할 것을 추천하고 있다.

표 2.2 지진규모 수정계수 (Youd 등, 1997)

지진규모 M	Seed and Idriss (1982)	Idriss (1996)	Ambraseys (1988)	Arango (1996)	Andrus and Stokoe (1996)	Youd and Noble (1997)		
						$P_L<20\%$	$P_L<32\%$	$P_L<50\%$
5.5	1.43	2.20	2.86	3.00 2.20	2.80	2.86	3.45	4.44
6.0	1.32	1.76	2.20	2.00 1.65	2.10	1.93	2.35	2.92
6.5	1.19	1.44	1.69	1.60 1.40	1.60	1.34	1.65	1.99
7.0	1.08	1.19	1.30	1.25 1.10	1.25	0.96	1.19	1.39
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00 1.00	1.00	0.70	0.88	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67	0.75 0.85	0.8?			0.73?
8.5	0.89	0.72	0.44		0.65?			0.56?

※ PL : 액상화가 발생할 수 있는 확률

? : 아주 불확실한 값



이와 같이 구한 지진규모 수정계수는 지진규모가 7.5가 아닌 지진에 대해 액상화 반복저항비를 계산하는 경우에 곱하여 계산하면 된다. 따라서 대상으로 하는 지진규모에 대한 액상화 안전율은 지진규모 7.5에 대한 액상화 반복저항비 $CRR_{7.5}$과 지진에 의한 반복응력비 CSR 그리고 지진규모 수정계수 MSF를 이용하여 식 (2.24)과 같이 평가하게 된다.

$$F.S. = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR}\right)MSF \qquad (2.24)$$

제 3 장 지반의 지진응답해석

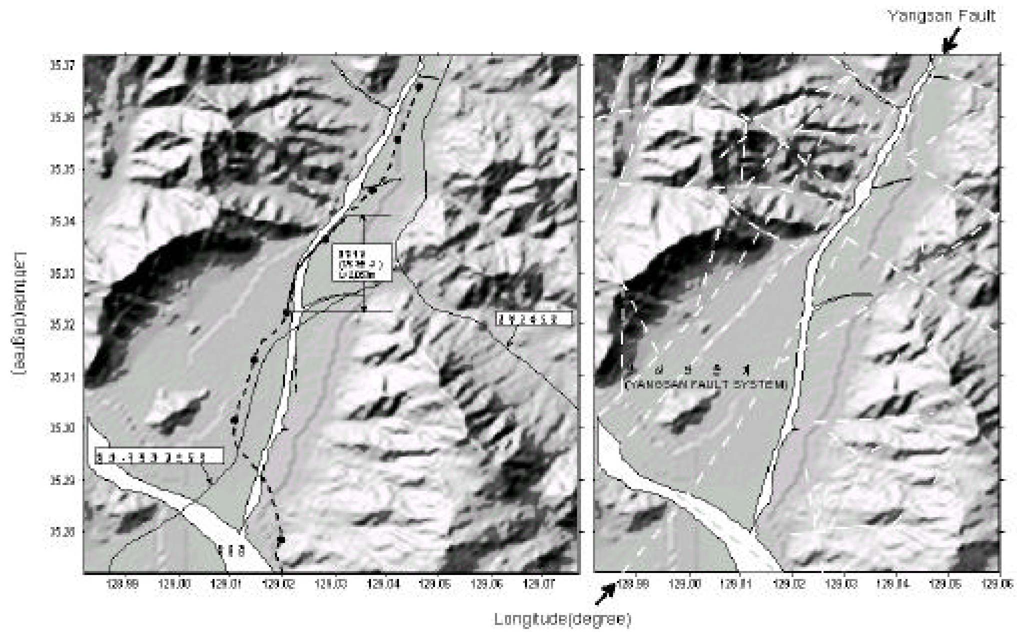
3.1 대상지반의 선정

액상화 가능성 평가는 ○○지하철 ○호선 ○단계 ○○선의 ○공구의 일부 지반을 평가대상지반으로 선정하였다.

대상지역 주변의 지형 양상은 대규모 단층인 양산단층계에 규제를 받아 특징적인 산계 및 수계를 나타내고 있다. 산계는 대상지역을 중심으로 양측에 해발고도 300m 600m 전후의 봉우리들이 북북동-남남서 방향으로 발달되어 있으며, 그 사이에 폭 약 1km 3km 규모를 갖는 단층곡 상에 형성된 충적평야를 이루고 있다. 수계는 이들 양측 산계에서 유래된 소지류들이 합류되어 양산천을 이루고 이 양산천은 다시 낙동강으로 유입되고 있다.

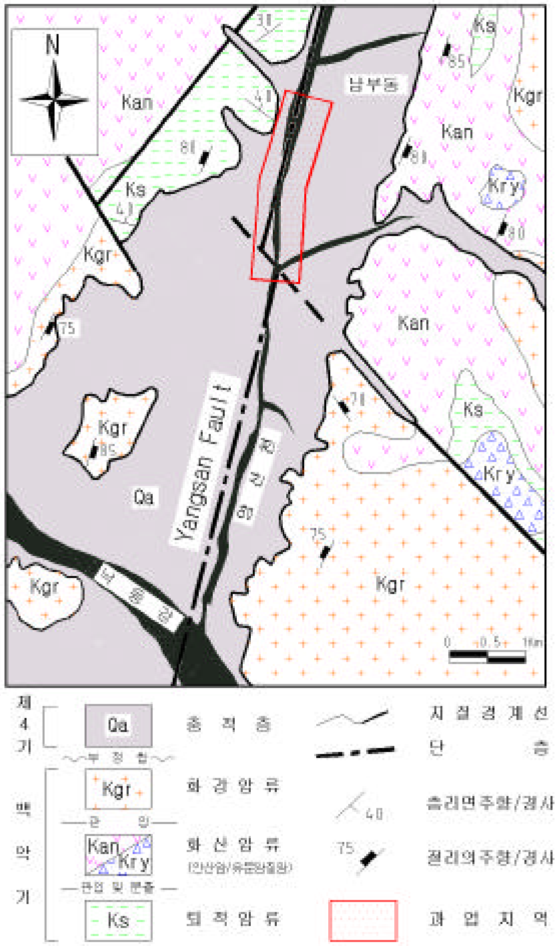
대상지역 일원의 수계의 특성은 계곡의 일반경사 방향을 따라 흐르는 필종하천(Consequent stream)의 성격을 갖고 있으며, 그 형태는 단층작용에 의해 규제를 받았음을 지시하는 아각상형(Subangular Pattern)의 특징을 보여주고 있다. 조사지역 일원의 지형은 지형발달 윤회상 만장년기에 속한다.

대상지역의 지형에 대한 지형에 대하여 음영효과(shade effect)의 인위적인 유도가 가능하고 인공위성영상이 갖는 태양광선 조사방향의 편중에 따른 제반 문제점을 보완할 수 있고 또한 출력도면 또는 컴퓨터 모니터 상에서 사용 자료의 축척을 다양화 할 수 있는 장점이 있는 전산음영기복도를 이용하여 대상지역 일원서 나타나는 선구조를 육안 판독하여 축출하여 그림 3.1에 나타내었다. 그 결과, 대상지역에 발달하고 있는 불연속면은 N10 40E, N60 80W로 대표될 수 있는 2개의 주방향성을 확연히 나타내고 나머지 이들 방향에 직교 내지 사교하는 부차적인 불연속면이 발달되어 있으며, 이들 불연속면들의 경사각은 대부분 70° 이상의 고각도를 나타내고 있다. 한편 불연속면 N10 40E의 특성은 고각도의 경사각을 갖는 것은 전단절리계(Shear Joint System) 내지는 소단층(Minor Fault)이며, 불연속면 N60 80W는 인장절리계(Tensional Joint System)로 특징져진다.



대상지역과 그 주변 일원의 지질은 그림 3.2에 나타낸 바와 같이 하위로부터 중생대 백악기 하양층군의 퇴적암류, 유천층군의 주산 안산암질암 및 유문암질암의 화산암류, 그리고 불국사관입암류에 속하는 화강암류 및 맥암류 드리고 이들 제 지층을 부정합으로 피복하고 있는 제 4기 퇴적층으로 구성되어 있다. 제 4기 퇴적층은 양산천과 그 지류에 충적평야 형태로 넓고 두껍게 분포하고 있으며, 주로 유기물을 많이 포함하고 있는 자갈, 뻘, 세립질 모래와 실트로 구성되어 있는 홍수범람 퇴적기원 퇴적물로 구성되어 있다.

대상지역과 그 주변 일원의 지질구조는 한반도 동남부의 대표적인 지질구조인 소위 “양산단층”의 인접부에 위치한다. 따라서 조사지역의 지질구조 요소로는 대규모 단층인 양산단층과 이에 사교하는 2nd와 3rd order 소단층계, 그리고 이들 단층계에 수반되는 다수의 절리계가 발달되어 있을 것으로 예상된다.



지금까지의 연구 결과에 의하면, 양산단층은 백악기 이후 몇 차례 다중변형의 이력을 갖는 주향이동단층으로 알려져 있으며, 단층운동의 활성 여부가 논란이 되고 있는 단층이다. 이 양산단층은 낙동강 하구언에서부터 북북동방향으로 양산-언양-경주-영해읍을 거쳐 동해까지 육상에서만도 약 180km의 연장성을 갖는 대단층으로 보고 되어 있으며, 특히 양산-경주 구간에서는 다른 구간에 비해 넓은 충적층이 발달되어 있는 것이 특징이다.

이들 지역에서 나타나는 지질구조는 단층, 절리 및 세맥들과 같은 불연속면

들로 특징져지며, 특히 단층들은 주향이동단층 및 정단층의 성격을 갖는 것들이고, 일부 지점에서 폭 3m 이상의 규모와 단층가우지(Fault Gouage), 단층경면(Slickensides), Groove를 포함하는 단층대(Fault Zone)가 있음이 관찰된다. 인접지역에서 관찰한 기반암에는 화성활동과 후기 단층운동에 의해 수반되는 파쇄대가 특정한 방향성을 갖고 빈번하게 발달되어 있으며, 이들 파쇄대에는 대부분 점토물질로 coating 내지는 협재되어 있는 전단절리(Shear Joint) 들이 발달되어 있다.

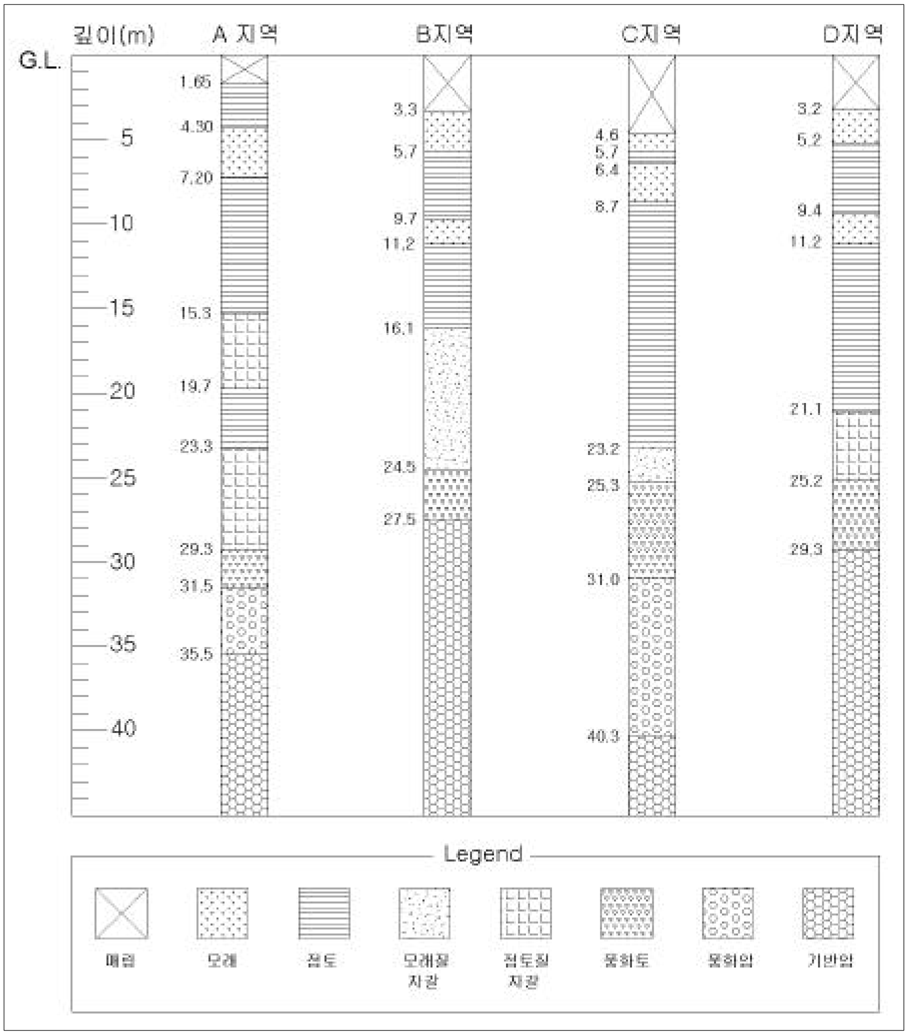
이와 같이 액상화 가능성 평가대상지반으로 선정한 지역은 활성 여부로 논란이 되고 있는 양단단층계 내에 위치하고 있고 지층의 상부에는 매립층과 모래층으로 이루어져 있어 액상화가 발생할 가능성이 높은 지반조건을 가지고 있다. ○○지하철 ○호선 ○단계 ○○선의 ○공구 중 A지역, B지역, C지역, 그리고 D지역을 액상화 평가 대상지역으로 선정하였고 대상지반은 그림 3.3에 나타낸 바와 같이 상부에는 매립층 및 충적층이 존재하고 그 아래로 모래층과 점토층이 교대로 층을 이루고 있다.

A와 B지역의 매립층은 최상부층을 이루고 있는 혼합매립층으로 점토, 모래, 자갈, 호박돌, 전석 등으로 구성되어 있으며 N값은 1 30회, 50/0(SPT 불가)으로 층내 구성성분에 따라 그 차이가 심하게 나타나며, 색조는 담갈색을 띤다. 매립층 아래의 충적층은 해수면 상승이전에 형성된 육상기원의 퇴적층 및 해수면 상승이후 형성된 해성퇴적층이 두터운 심도로 분포하고 있다. B지역의 상부모래층은 세-중립질의 모래로 구성된 해성퇴적층으로 표준관입시험 결과 N값은 1 14회의 범위로써 대단히 느슨함 보통의 상대밀도를 가지는 것으로 나타난다. A지역의 상부점토층은 해성퇴적층으로 흙의 공학적 분류에 의하면 주로 CH, CL로 분류되며 점토층 내에는 부분적으로 패각, 유기물, 실트, 세립질 모래 및 잔자갈을 함유하기도 한다. N값은 0 7회로 전반적으로 대단히 연약함 연약한 연경도를 보이며, 시추로드 및 표준관입시험용 해머 자중으로도 30cm 50cm까지 근입되기도 한다. 하부 모래층은 세-중립

질의 모래로 구성된 해성퇴적층으로 A지역에서는 점토가 부분적으로 함유되어 나타난다. N값은 A지역에서는 0 3회의 범위로 대단히 느슨한 상대밀도를 보이며, B지역에서는 9 23회의 범위로써 느슨함 보통의 상대밀도를 가지는 것으로 나타난다. 하부 점토층 또한 해성퇴적층으로 흙의 공학적 분류에 의하면 CH, CL로 분류되며, 층 내에는 패각, 유기물 및 세-중립질의 모래 seam이 협재되어 나타난다. N값은 전반적으로 0 3회로 전반적으로 대단히 연약한 연경도를 보이며, 시추로드 및 표준관입시험용 햄머 자중으로도 30cm 50cm까지 근입되기도 한다. A 지역의 자갈(지름 10 100mm)로 구성된 점토질자갈층은 해수면 상승에 따라 생성된 해성퇴적층 상위에 지각변동 또는 홍수 등의 원인에 기인하여 생성된 육성기원 퇴적층으로 판단된다. N값은 4, 50/18 50/21의 범위로 층 내의 자갈의 함유상태에 따라 N값의 차이가 심하게 나타나며, 느슨함 대단히 조밀한 경연상태를 나타낸다. 자갈(지름 10 300mm)로 구성된 하부 점토질자갈층은 직하부에 풍화대층이 분포하는 것과 상부 해성 퇴적층의 색조 및 성분과는 상이한 상태를 보이므로 해수면 상승이전에 형성된 육상기원 퇴적층으로 판단된다. N값은 6 50/0의 범위로 층내의 자갈의 함유상태에 따라 N값의 차이가 심하게 나타나며, 느슨함 대단히 조밀한 지층 경연상태를 나타낸다.

C지역과 D지역의 매립층은 최상부층을 이루고 있는 혼합매립층으로 점토, 모래, 자갈, 호박돌 등으로 구성되어 있다. N값은 2 32회로 층내 구성성분에 따라 그 차이가 심하게 나타난다. 상부 모래층은 세-중립질의 모래의 해성퇴적층으로 층에 따라 소량의 잔자갈이 함유되어 있고, N값은 1 7회의 범위로써 대단히 느슨함 느슨한 상대밀도를 가지는 것으로 나타난다. 상부점토층은 흙의 공학적인 분류에 의하면 CH, CL로 분류되며 점토층내에는 패각, 유기물 및 세립질 모래를 함유하기도 한다. N값은 0 3회로 전반적으로 대단히 연약함 연약한 연경도를 보이고 시추로드 및 표준관입시험용 햄머 자중으로도 30cm까지 근입되기도 한다. 하부 모래층은 세-중립질 모래의 해성

퇴적층으로 부분적으로 소량의 잔자갈이 함유되어 나타난다. N값은 2 8회의 범위로써 대단히 느슨함 느슨한 상대밀도를 가지는 것으로 나타난다. 하부 점토층은 흙의 공학적 분류에 의하면 CH, CL로 분류되며 층내에는 패각, 유기물 및 세-중립질 모래 seam이 협재되어 나타나기도 한다. N값은 0 2회로 전반적으로 대단히 연약한 연경도를 보이며, 시추로드 및 표준관입시험용 햄머 자중으로도 30cm까지 근입되기도 한다. C지역의 모래질자갈층은 세-중립질 모래를 함유하는 자갈(지름 10 200)의 해성퇴적층으로 N값은 13 32회, 50/26 50/0(SPT 불가)으로 보통 대단히 조밀한 상대밀도를 가진다. D지역의 점토질자갈층은 점토를 함유한 자갈(지름 10 300)층으로 상부에 흑색의 유기질 점토가 협재되어 나타난다. 이 층은 직하부에 풍화대층이 분포하는 것과 상부 해성퇴적층의 색조 및 성분과는 상이한 상태를 보이므로 해수면 상승이전에 형성된 육상기원 퇴적층으로 판단된다. N값은 2 37회, 50/28 50/0(SPT 불가)의 범위로 층내의 자갈의 함유상태에 따라 N값의 차이가 심하게 나타나며, 대단히 느슨함 대단히 조밀한 지층 경연상태를 나타낸다.



3.2 설계지진가속도

지반의 지진응답해석을 통해 지진에 의한 반복응력비를 구하기 위해 필요한 설계지진가속도는 1997년 건설교통부 주관으로 마련된 상위개념의 내진설계기준연구(II)에 마련된 지진가속도에 관한 규정을 이용한다. 우리나라의 상위개념 내진설계기준에서는 지진구역과 구조물의 성능수준 및 중요도를 고려하여 평균재현주기별로 기반암에서의 지진가속도를 기본가속도로 규정하고

있다.

내진설계에 있어서 지진에 대하여 얼마나 안전하게 설계 건설할 것인가 하는 설계수준 성능목표를 결정하는 문제는 아주 중요하다. 시설물의 그 중요도에 따라서 내진설계수준에 차등을 두고 있는데 내진성능목표는 분류된 시설물의 등급별로 지진시 발휘하여야 하는 성능의 수준을 규정하는 것으로 정의할 수 있다. 내진설계기준에서는 시설물을 내진Ⅱ등급, 내진Ⅰ등급, 내진 특등급의 3가지로 분류하고 있다. 내진Ⅱ등급은 일반 시설을 의미하고 내진Ⅰ등급은 중요시설, 내진 특등급은 파괴시 큰 재난이 초래될 수 있는 시설 및 기능이 마비될 경우 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설이 이에 속한다. 각 시설물은 표 3.1에 나타낸 바와 같이 내진등급별로 차등을 둔 재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 기능수행과 붕괴방지라는 두 가지 성능수준을 만족하도록 요구되고 있다. 기능수행수준은 구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진시나 지진경과 후에도 시설과 구조물의 기능은 정상적으로 유지할 수 있는 성능수준을 의미한다. 붕괴방지 수준은 구조물에 상당한 정도의 손상이 발생하는 것은 허용하나 구조물이 붕괴되어 대규모의 인명손실이나 재산피해가 초래되는 것을 방지할 수 있는 수준을 의미한다.

표 3.1 내진성능 목표

설계지진	재현주기 \ 성능수준	기능수행	붕괴방지
	50년	내진 Ⅱ등급	
	100년	내진 Ⅰ등급	
	200년	내진 특등급	
	500년		내진 Ⅱ등급
	1000년		내진 Ⅰ등급
	2400년		내진 특등급

설계지진의 수준을 결정할 때는 평균 재현 주기별로 계산된 등고선 형태의

지진재해도를 사용하는 것이 가장 이상적이지만 현실적으로는 극히 세분화된 등고선 형태의 지진재해도를 각 지진수준별로 작성하여 설계에 적용한다는 것은 설계자에게 지나친 부담이 될 가능성이 있다. 이러한 점을 고려하여 내진설계기준에서는 우리나라를 지진재해도 해석결과에 근거하여 표 3.2와 같이 구분하여 각 구역별로 지반가속도를 다르게 정의하고 있다. 재현주기 500년인 경우는 표 3.3에 나타낸 바와 같이 각각 0.11g와 0.07g이다. 표 3.4에는 재현주기별 위험도계수를 나타내었는데 각 경우의 지반가속도는 표 3.3과 구역별 지반가속도에 이 위험도 계수를 곱하여 결정한다. 또한 지진응답해석 수행시에는 실제 지진기록을 이용하여 정해진 설계지진가속도를 바탕으로 지진가속도의 증폭현상을 분석한다.

표 3.2 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

※ 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
전라남도 북부(군, 시) : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
전라남도 남부(군, 시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

표 3.3 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수, Z(g값)	0.11	0.07

표 3.4 위험도계수

재현주기 (년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

지반운동의 특성은 지반의 특성에 의하여 크게 영향을 받는다. 일반적으로 외국의 규정에서는 지반종별 지반계수를 통해 지표면 최대가속도를 간편하게 평가하도록 하고 있다. 반면, 국내 규정에서는 지반계수에 관한 규정을 별도로 두지 않고 다만 표준 설계응답 스펙트럼 상에 지반 종별 지진계수를 제시하고 있다. 표 3.5는 지반종별 분류 규정을 나타내고 있다.

표 3.5 지반종별 분류기준

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}$ ($\overline{N_{ch}}$) (blow/foot)	비배수전단강도 $\overline{S_u}$ (kPa)
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760 1500		
S_C	매우조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 760	$>$ 50	$>$ 100
S_D	단단한 토사지반	180 360	15 50	50 100
S_E	연약한 토사지반	180미만	$<$ 15	$<$ 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 표 3.5와 같이 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F의 6종으로 분류한다. 표 3.5에서 액상화 발생 가능성이 있는 지반은 S_E 및 S_F에 해당된다.

지표면 최대가속도를 표현하는 지진계수는 표 3.5에 따라 지반을 분류한 후 이에 해당하는 값을 찾아야 한다. 상위개념 내진설계기준(II)에서 규정하고 있는 설계표준 응답스펙트럼 상의 지진계수는 표 3.6과 같다.

표 3.6 지진계수 (재현주기 500년 기준)

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.99	0.55
S_B	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08
S_D	0.16	0.11
S_E	0.22	0.17

표 3.6을 보면, 표 3.5에서 분류한 재현주기 500년의 지진구역별 가속도 0.11g와 0.07g는 S_B(보통암) 지층에서의 지진구역별 지진계수와 동일하며 이를 기준으로 지반에 따른 지진증폭현상을 고려한 값을 각 지반종류별로 제안하였다.

이와 같은 방법을 통해서 대상지역에 따른 성능수준별 기반암에서의 설계가속도를 정리하면 표 3.7과 같다.

표 3.7 우리나라 상위개념 내진설계기준

구분 / 재현주기	성능수준별 구조물 분류		기반암에서의 지진가속도	
	기능수행	붕괴방지	지역 I	지역 II
50년	내진 II등급		0.044g	0.028g
100년	내진 I등급		0.063g	0.040g
200년	내진 특등급		0.080g	0.051g
500년		내진 II등급	0.110g	0.070g
1000년		내진 I등급	0.154g	0.119g
2400년		내진 특등급	0.220g	0.140g

3.3 지진응답해석

액상화 평가를 수행하기에 앞서 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석은 설계응답스펙트럼의 작성, 액상화 가능성 평가를 위한 동적 응력-변형률 관계의 정립 및 지진시 지반구조물에 작용하는 지진하중을 결정하기 위하여 수행되어진다.

지반의 지진응답해석은 역사 지진기록을 기초로 한 기반암 운동특성을 예측하기 위해 지진재해해석과 연계되어 사용되며, 지진응답해석 문제는 기반암 운동에 따른 지표면 운동을 예측하는 문제가 된다. 국지적 지반 효과는 내진설계에 있어 매우 중요한 요소이며 지역적 특성을 고려하여 부지 고유의 지반증폭 현상을 고려하여야 할 사항이다.

지반응답해석은 입력된 지반의 동적물성(변형률 수준별 전단계수 및 감쇠비)을 토대로 지진파의 전파특성을 해석하는 것으로 지진응답해석을 통해서 구한 심도별 최대가속도는 액상화 가능성 평가시 지진에 의한 반복응력비를 계산하는데 이용된다.

Seed와 Idriss가 1차원 등가선형해석기법을 이용한 SHAKE 프로그램을 개발·배포한 후 지반의 지진응답에 대한 본격적인 예측 및 해석이 시작되었으며, 이후 더욱 정확한 해석 및 액상화 현상 예측을 위한 동적비선형모델과 구성모델을 이용한 비선형 지진해석 프로그램이 개발되고 있다. 현재 사용 중인 여러 지반응답특성 중 가장 널리 사용되어지는 방법은 1차원 등가선형해석을 이용한 지반응답특성 평가방법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층이 반무한-수평으로 이루어져 있고, 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 대표적인 1차원 지반응답특성 평가 프로그램으로는 SHAKE91이 있고, 이 프로그램에서는 지반의 비선형 거동을 등가선형으로 모델링 하여 해석을 수행한다.

본 연구에서 수행한 지진응답해석은 1차원 등가선형해석기법을 바탕으로

하여 제작된 SHAKE91을 이용하였으며 지진응답해석에 사용된 해석조건과 실지진 기록은 표 3.8 표 3.9와 같다.

표 3.8 지진응답해석 조건

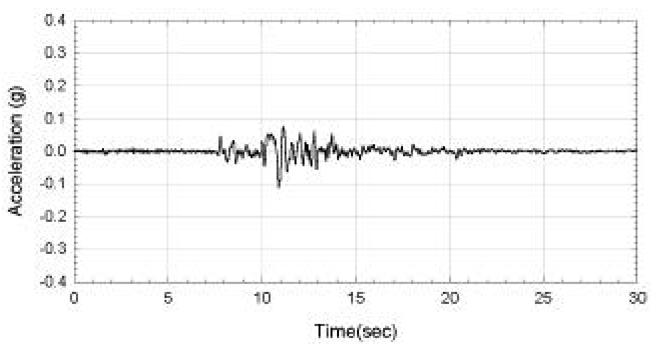
해석 조건		비고
설계지진가속도(기반암)	0.154g	내진 I등급 붕괴방지수준 지역 I
설계지진규모	6.5	

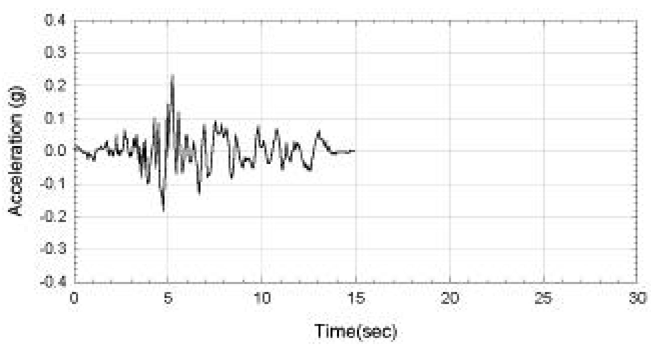
표 3.9 지진응답해석에 적용된 실지진 기록

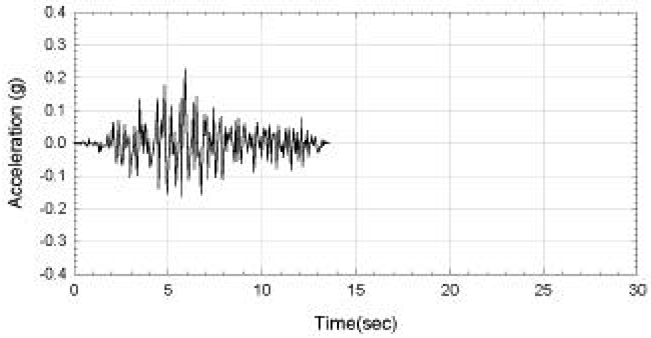
No.	적용 지진			
	지진	지진규모 M	최대가속도 a_{max}(g)	탁월 주기 T_p(sec)
1	Loma Prieta(1989.10.18)	7.1	0.11	0.39
2	Tokachi-Oki(1968.5.16)	7.9	0.23	0.34
3	Miyagi-Oki(1978.6.12)	7.4	0.23	0.39
4	San Francisco(1957.3.22)	5.3	0.11	0.22
5	Park Field(1966.6.27)	5.6	0.27	0.25
6	San Fernando(1971.2.9)	6.5	0.32	0.33
7	Coyote Lake(1979.8.6)	5.8	0.11	0.09
8	El Centro(1981.4.26)	5.6	0.10	0.14
9	Morgan Hill(1984.4.24)	6.2	0.10	0.09
10	Alaska(1972.7.30)	7.5	0.09	0.13

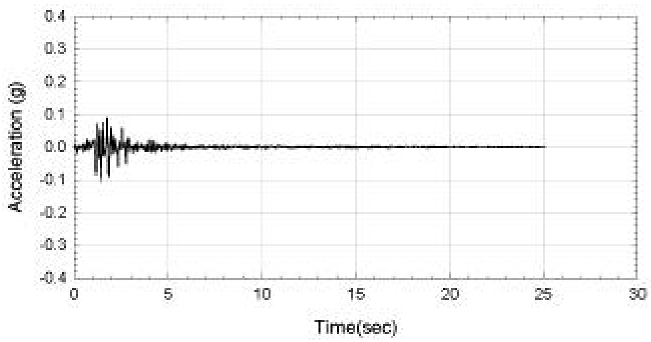
기반암에서의 설계지진가속도는 건설교통부의 내진설계기준안에 따라 평가대상지역이 “지역 I”에 위치하고, 붕괴방지수준의 내진 I등급에 해당하므로 0.154g로 하였고 설계지진규모의 경우 큰 지진이 발생하지 않은 국내의 여건과 항만내진시방서 기준을 고려하여 6.5로 결정하였다. 지진응답해석시 이용

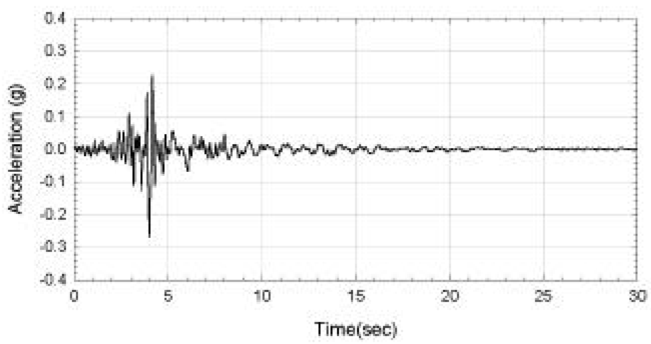
될 입력지진은 국내 지반 또는 암반에서 계측된 지진기록을 이용하는 것이 이상적이나, 국내 계기지진의 경우 소규모이고 국내 내진설계 기준에 부합되지 않아 지진응답해석에 사용하기에 부적절하다. 본 연구에서는 국내 내진설계기준에 따라 기반암에서 계측되고 지진응답해석에 널리 이용되고 있는 미국과 일본의 실지진기록을 선택하여 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석에 이용된 실지진의 시간영역에서 가속도의 이력곡선은 그림 3.4에 나타내었고 응답스펙트럼 성분은 그림 3.5에 나타내었다.

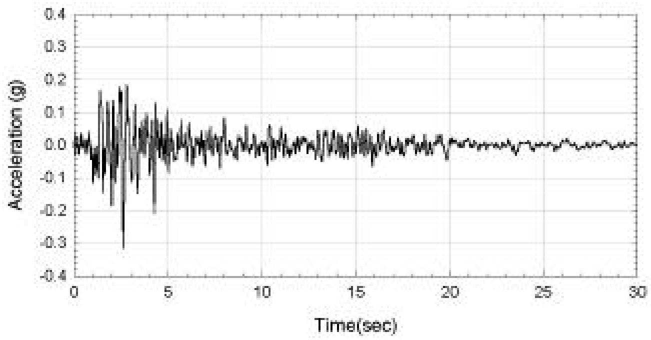


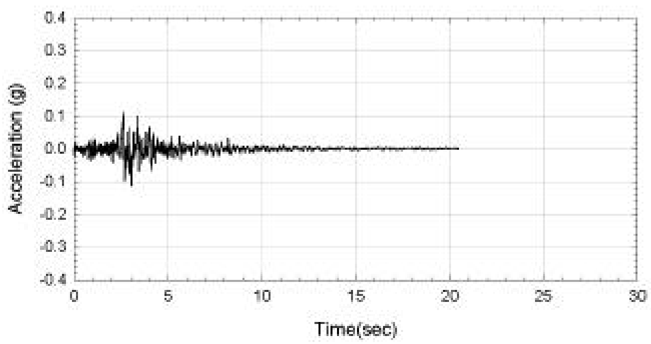


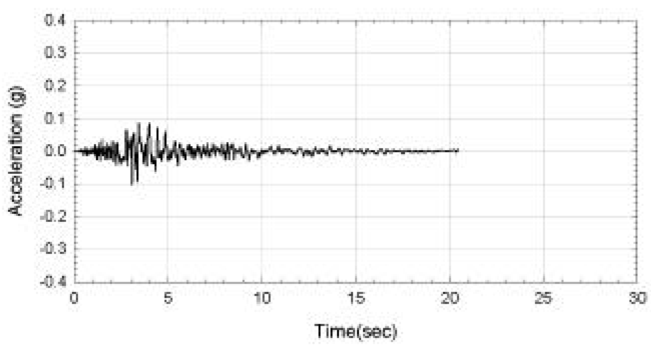

Acceleration (g)
Time(sec)

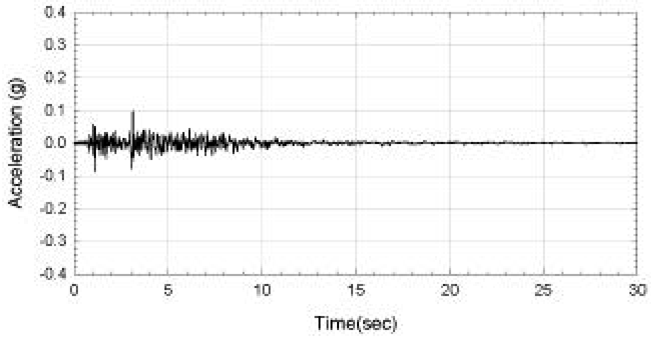

Acceleration (g)
Time(sec)

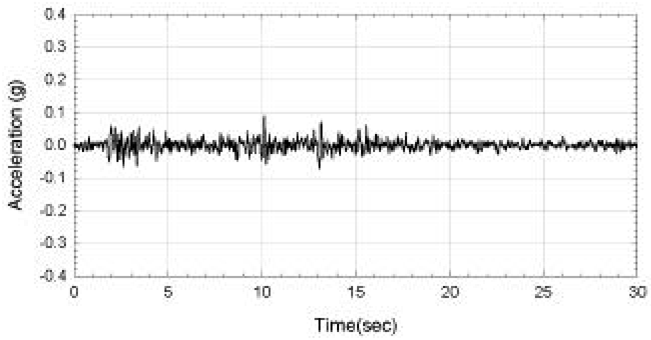

Acceleration (g)
Time(sec)


0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
Acceleration (g)
0
5
10
15
20
25
30
Time(sec)

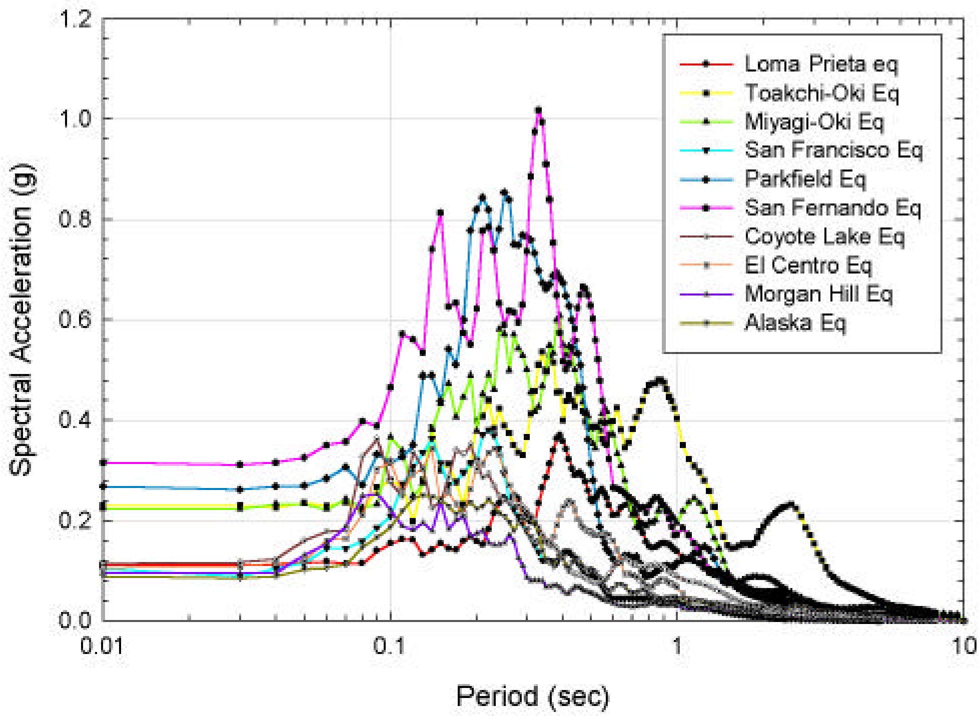

0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
Acceleration (g)
0
5
10
15
20
25
30
Time(sec)


0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
Acceleration (g)
0
5
10
15
20
25
30
Time(sec)





지진응답해석시 지반에 관한 입력자료로는 동적 물성치인 전단탄성계수와 감쇠비가 있다. 특히, 등가선형해석에서는 지반의 비선형 거동을 평가하기 위하여 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화곡선 및 감쇠비 곡선을 필요로 한다. 따라서 해석지반에 대한 현장 및 실내시험 결과를 이용해서 도시한 전단탄성계수 변화곡선을 해석에 이용하는 것이 바람직하다. 하지만 이러한 평가 대상지반에서 동적물성시험이 이루어지지 않았으므로 본 연구에서는 SHAKE91에서 제공되는 대표곡선을 이용하였다.



1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Spectral Acceleration (g)
0.01
0.1
1
10
Period (sec)
Loma Prieta eq
Toakchi-Oki Eq
Miyagi-Oki Eq
San Francisco Eq
Parkfield Eq
San Fernando Eq
Coyote Lake Eq
El Centro Eq
Morgan Hill Eq
Alaska Eq

제 4 장 액상화 가능성 평가 및 비교 분석

액상화 반복저항비를 평가하는 방법으로는 현장시험법을 이용한 방법과 실내시험을 통한 방법으로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 대상지반을 선정하고 주어진 조건과 여건을 고려하여 현장시험법을 이용한 방법에 한해서 액상화 반복저항비를 평가하였다. 또한 현장시험법을 이용한 방법 중에서 대상지반에서 SPT, CPT, Suspension PS 검층시험, 그리고 표면파탐사(SASW)시험이 실시되었기 때문에 Seed와 Idriss 방법, Eurocode, 수정 Seed와 Idriss 방법, CPT를 이용한 방법, 그리고 전단파 속도를 이용하는 방법을 적용하여 액상화 반복저항비를 계산하였고, 지진에 의한 반복응력비를 계산하는데 필요한 지진 최대가속도는 설계지진가속도와 SHAKE91을 이용한 지진응답해석을 통해서 계산하였다.

이와 같은 방법으로 구한 액상화 반복저항비와 지진에 의한 반복응력비를 비교하여 액상화에 대한 안전율을 평가하고 각 방법의 결과 및 특징들을 비교분석하였다.

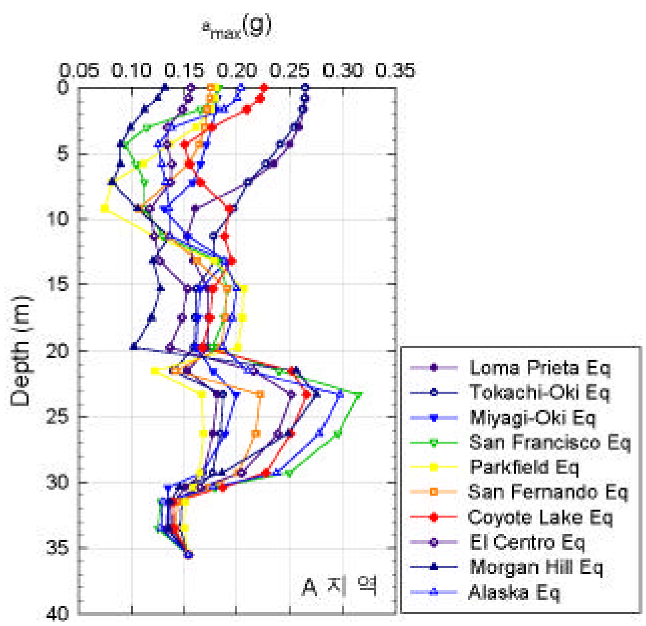
4.1 지진응답해석 결과

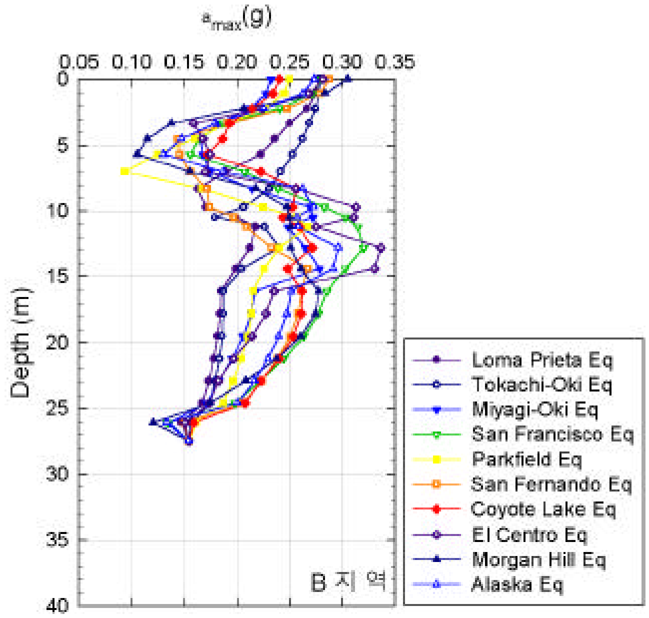
지진시 지반의 응답 특성은 지반의 전단파 속도, 지반과 암반의 강성도 차이, 지층의 두께와 같은 지반의 기하학적 특성, 입력지진의 세기, 연약 지반층의 존재여부, 지반과 암반의 밀도, 지진의 주파수 대역, 그리고 전단탄성계수와 감쇠비 같은 지반의 동적 변형특성에 따라 크게 영향을 받게 된다.

이러한 영향요소 중에서 기하학적 형상과 지반의 전단파 속도는 지층의 공진주파를 결정하며 이는 주파수 영역에서 특정 주파수 대역의 에너지가 크게 증폭이 일어나는 현상을 야기 시킨다. 지반이 갖는 감쇠비는 지진시 지반에

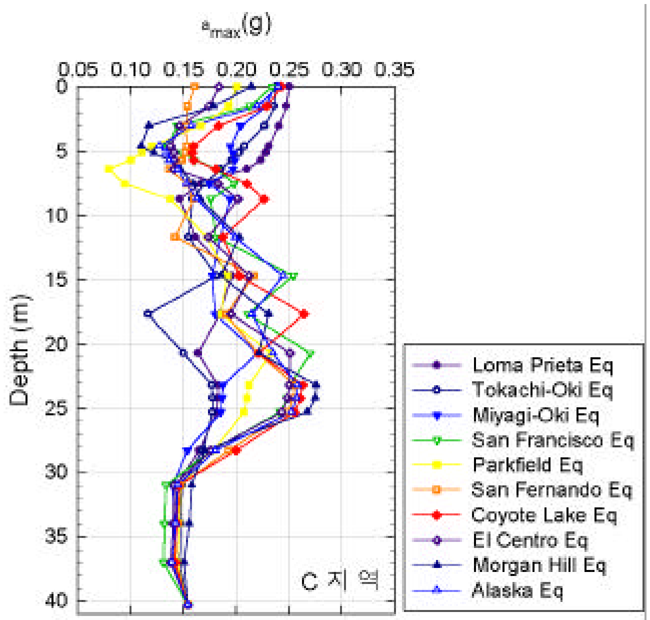
의한 증폭현상을 감소시키는 역할을 하며 주파수 대역이 높아짐에 따라 그 영향정도가 커지게 된다. 반무한 탄성 암반위에 지반이 존재하는 경우 강체 암반위에 지반이 존재하는 경우에 비하여 지표면 자유장에서의 지반운동의 크기는 작게 나타나며 따라서 기반암과 그 상부에 위치하는 지반과의 강성도 차이가 커짐에 따라 지반증폭현상이 크게 발생하게 된다. 또한 지반이 가지는 변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 특성에 따라 지반증폭현상 역시 큰 영향을 받게 된다.

대상지반인 A지역, B지역, C지역, 그리고 D지역에서 SHAKE91을 사용한 지진응답해석 결과는 그림 4.1 그림 4.4에 나타내었다.





amax(g)
0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35
Depth (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Loma Prieta Eq
Tokachi-Oki Eq
Miyagi-Oki Eq
San Francisco Eq
Parkfield Eq
San Fernando Eq
Coyote Lake Eq
El Centro Eq
Morgan Hill Eq
Alaska Eq
B 지 역



amax(g)
0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35
Depth (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Loma Prieta Eq
Tokachi-Oki Eq
Miyagi-Oki Eq
San Francisco Eq
Parkfield Eq
San Fernando Eq
Coyote Lake Eq
El Centro Eq
Morgan Hill Eq
Alaska Eq
C 지 역

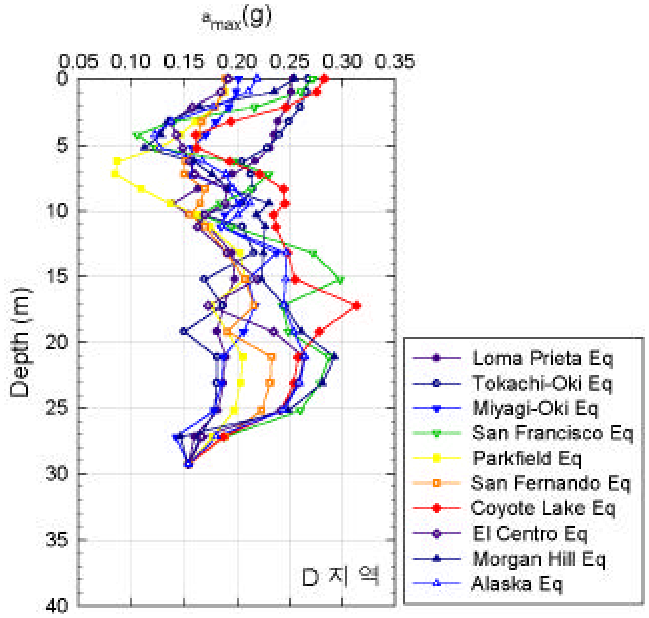


그림 4.1 그림 4.4에 나타낸 응답해석결과에 의하면 입력지진에 따른 가속도의 증폭형태가 지반조건과 각 지진의 특성에 따라 각각 다르게 나타났다. 기반암에서의 설계가속도 0.154g에 비하여 지표면 최대가속도는 작게는 0.132g에서 크게는 0.305g까지 감쇠 또는 증폭됨을 볼 수 있으며, 지진의 주파수 대역 에너지 분포에 따라 그 증폭정도가 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 대략적으로 연약한 지반에서는 가속도가 감소하고 비교적 단단한 토사지반에서는 증가하지만 그 정도는 층의 두께나 상하부 층의 종류에 따라 그 감쇠 또는 증폭의 정도가 다르게 나타나고, 기반암까지의 깊이가 깊을수록 지표면 최대가속도의 증폭량은 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 최상부의 연약한 매립층과 모래층의 깊이가 깊을수록 최상부층에서의 증폭량이 크고 지표면의 최대가속도가 상대적으로 크게 나타났다.

4.2 액상화 가능성 평가 결과

미국 및 일본의 내진시방서에서는 액상화 가능성 평가법을 적용하기 전에 대략적인 예비평가 기준을 우선적으로 제시함으로써 합리적인 내진설계 절차를 정립하고 있다. 각 내용을 종합 분석하여 국내여건 및 발생지진규모에 적합하도록 액상화 평가를 하지 않아도 되는 경우를 정리하면 표 4.1과 같다.

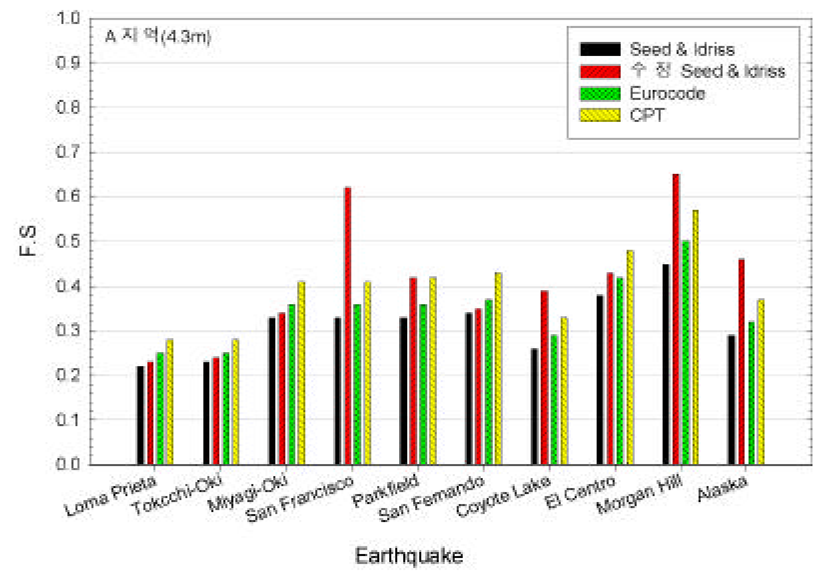
표 4.1 액상화 평가를 하지 않아도 되는 경우(김수일 등, 2000b)

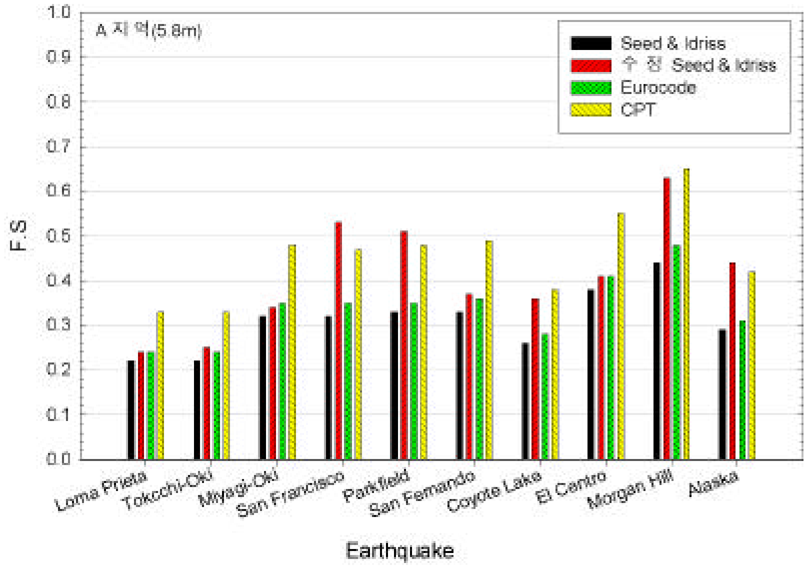
액상화 평가를 하지 않아도 되는 경우	비고
▪ 지진구역 II에서의 내진2등급 구조물 ▪ 표준관입저항치(N)가 15이상인 지반 (신윤섭 등, 1999) ▪ 평가대상지반심도가 20m 이상인 지반 ▪ 지하수위 위의 지반 ▪ 소성지구(PI)가 10이상이고 점토성분이 20%이상인 지반 ▪ 세립분 함유량이 35% 이상인 경우 ▪ 현장상대밀도가 80%이상인 지반 ▪ 경암, 연암, 보통암 또는 조밀한 사질토 지반	

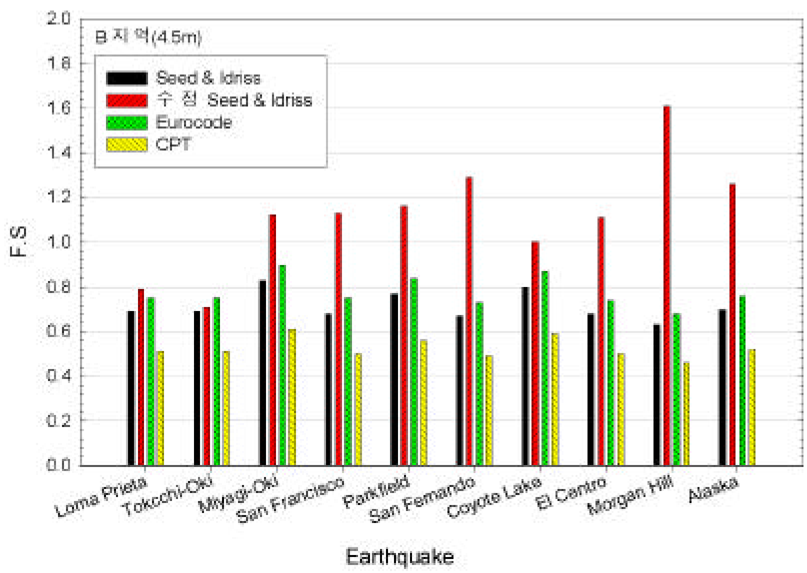
지진응답해석 결과와 현장시험 결과를 이용하여 모래층에 대해서는 액상화 가능성을 평가하고 표 4.1의 내용을 참고하여 자갈질 모래층은 평가 대상심도가 20m 이상에 위치하므로 평가대상에서 제외하였다.

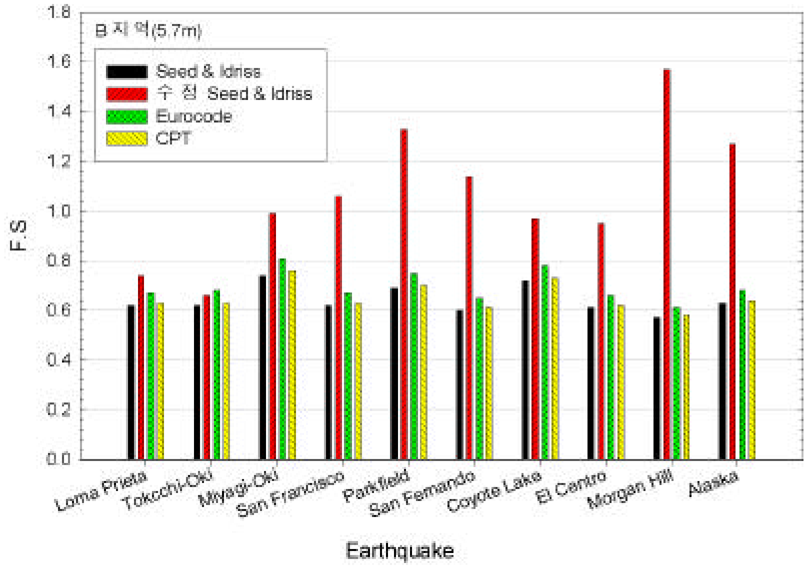
액상화 평가에 이용된 방법은 앞서 기술한 바와 같이 지진응답해석을 통하여 구한 가속도값을 이용하여 Seed와 Idriss 방법, Eurocode, 그리고 수정 Seed와 Idriss 방법을 통해서 지진에 의한 반복응력비를 계산하였고, 액상화 반복저항비는 Seed와 Idriss 방법, Eurocode, CPT를 이용한 방법, 그리고 전단파 속도를 이용하는 방법을 적용하였다. 액상화 반복저항비 계산시 모래층에 세립분 함유량은 10%에서 20%까지 조사되었어나 연속적인 대표 값이 없으므로 실내시험이 실시된 지층에 대해서는 그 값을 사용하고 실시되지 않은

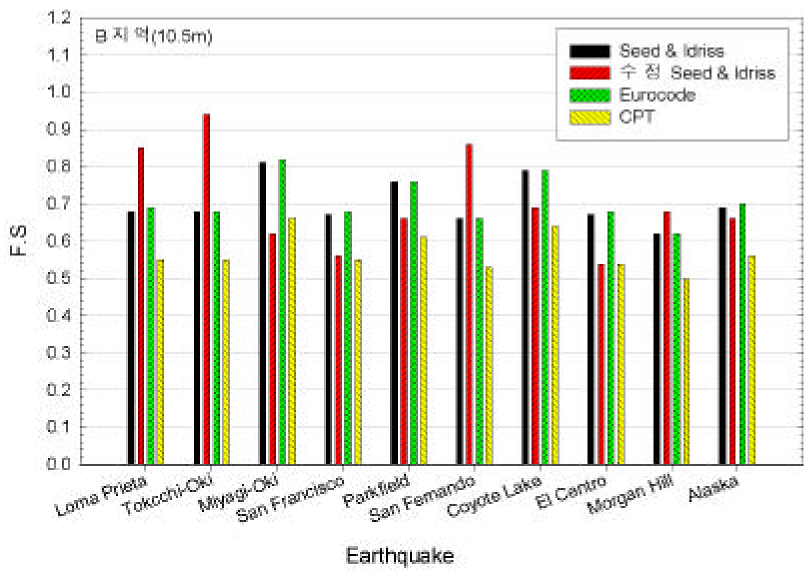
지층에 대해서는 인접지층의 값을 적용하였다. 2.4에서 기술한 방법으로 구한 액상화 반복저항비는 지진규모 7.5를 기준으로 작성한 것이므로 지진규모 6.5에 해당하도록 지진규모 수정계수는 그림 2.10에서 NCEER에서 추천하고 있는 범위의 평균값인 1.6을 적용하였다. 이와 같은 방법으로 액상화 가능성을 평가하고 그 결과를 그림 4.5 그림 4.15와 표 4.2에 안전율로 나타내었다.

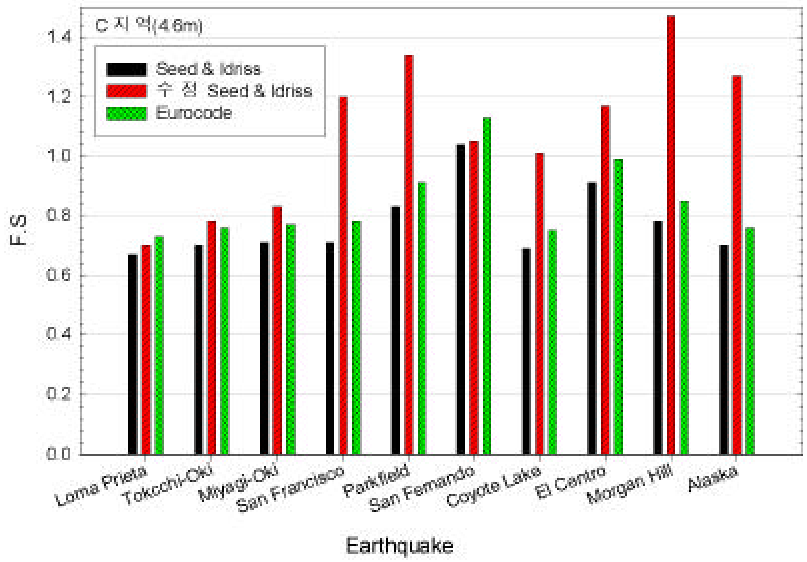


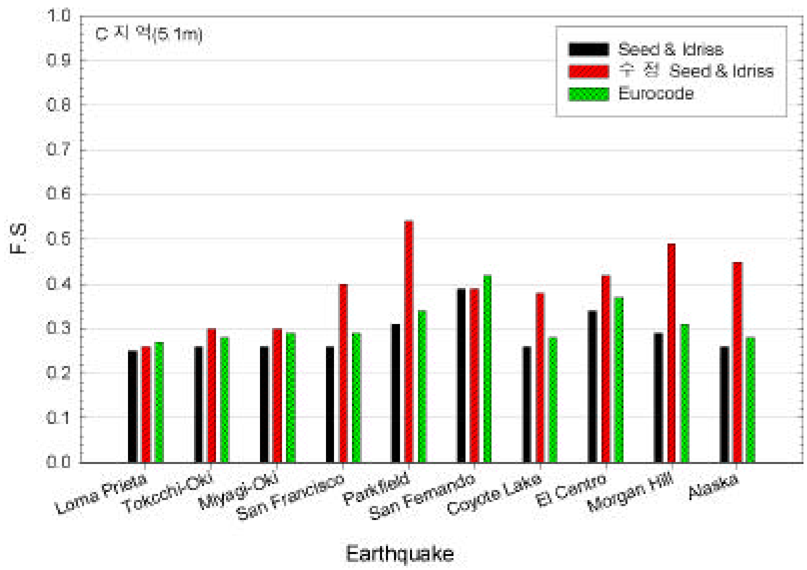

A 지 역(5.8m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
CPT
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake

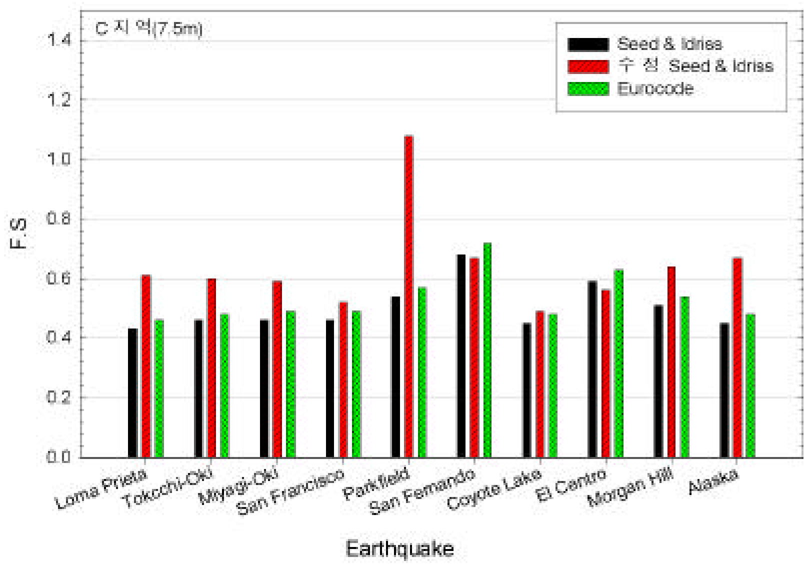

B 지 역(4.5m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
CPT
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake

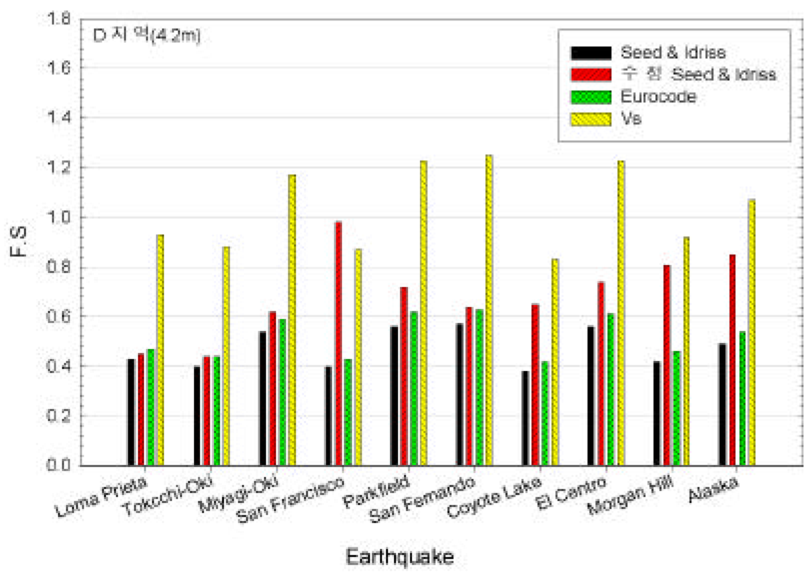

B 지 역(5.7m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
CPT
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake

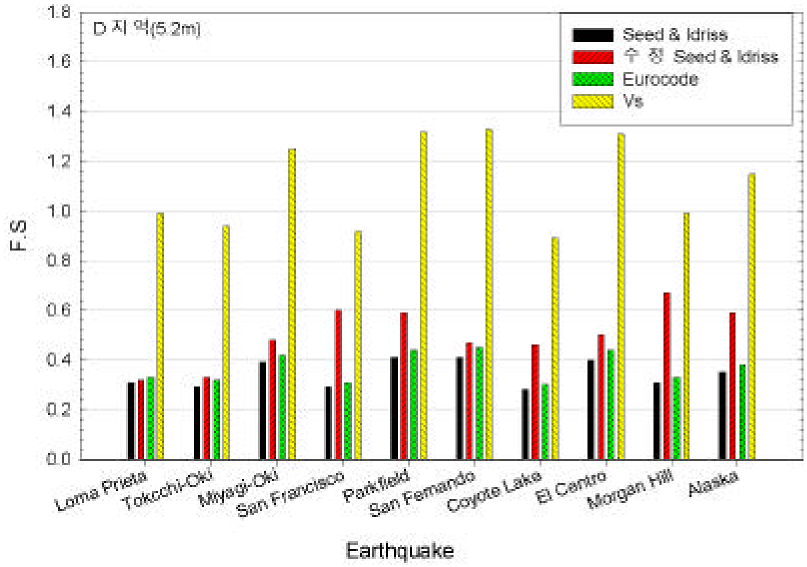

B 지 역(10.5m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
CPT
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake


C 지 역(4.6m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Cantro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake


C 지 역(5.1m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Cantro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake


C 지 역(7.5m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake


D 지 역(4.2m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
Vs
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake


D 지 역(5.2m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
Vs
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake

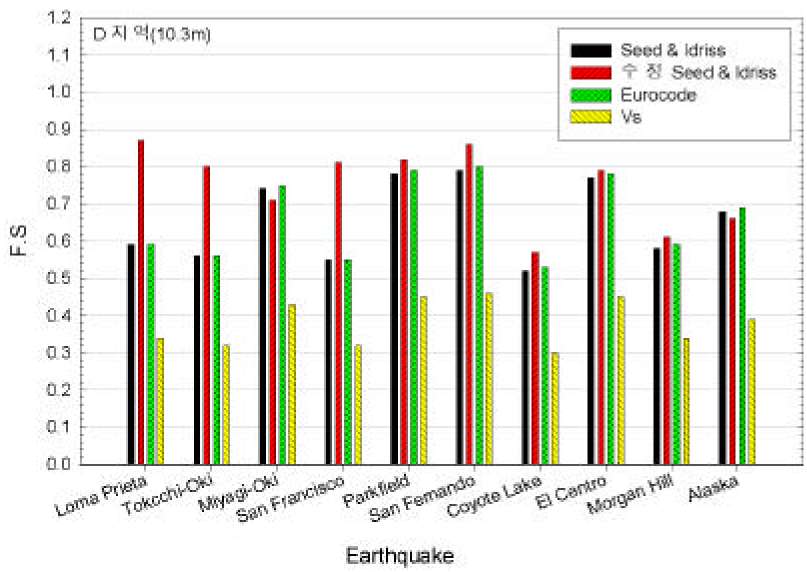

D 지 역(10.3m)
Seed & Idriss
수 정 Seed & Idriss
Eurocode
Vs
F.S
Loma Prieta
Tokcchi-Oki
Miyagi-Oki
San Francisco
Parkfield
San Fernando
Coyote Lake
El Centro
Morgan Hill
Alaska
Earthquake

표 4.2 대상지반의 액상화에 대한 안전율

대상지반	평가방법	깊이 (m)	Earthquake No.									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A 지역	Seed & Idriss	4.3	0.22	0.23	0.33	0.33	0.33	0.34	0.26	0.38	0.45	0.29
		5.8	0.22	0.22	0.32	0.32	0.33	0.33	0.26	0.38	0.44	0.29
	수정 Seed	4.3	0.23	0.24	0.34	0.62	0.42	0.35	0.39	0.43	0.65	0.46
		5.8	0.24	0.25	0.34	0.53	0.51	0.37	0.36	0.41	0.63	0.44
	Eurocode	4.3	0.25	0.25	0.36	0.36	0.36	0.37	0.29	0.42	0.50	0.32
		5.8	0.24	0.24	0.35	0.35	0.35	0.36	0.28	0.41	0.48	0.31
	CPT	4.3	0.28	0.28	0.41	0.41	0.42	0.43	0.33	0.48	0.57	0.37
		5.8	0.33	0.33	0.48	0.47	0.48	0.49	0.38	0.55	0.65	0.42
B 지역	Seed & Idriss	4.5	0.69	0.69	0.83	0.68	0.77	0.67	0.80	0.68	0.63	0.70
		5.7	0.62	0.62	0.74	0.62	0.69	0.60	0.72	0.61	0.57	0.63
		10.5	0.68	0.68	0.81	0.67	0.76	0.66	0.79	0.67	0.62	0.69
	수정 Seed	4.5	0.79	0.71	1.12	1.13	1.16	1.29	1.00	1.11	1.61	1.26
		5.7	0.74	0.66	0.99	1.06	1.33	1.14	0.97	0.95	1.57	1.27
		10.5	0.85	0.94	0.62	0.56	0.66	0.86	0.69	0.54	0.68	0.66
	Eurocode	4.5	0.75	0.75	0.90	0.75	0.84	0.73	0.87	0.74	0.68	0.76
		5.7	0.67	0.68	0.81	0.67	0.75	0.65	0.78	0.66	0.61	0.68
		10.5	0.69	0.68	0.82	0.68	0.76	0.66	0.79	0.68	0.62	0.70
	CPT	4.5	0.51	0.51	0.61	0.50	0.56	0.49	0.59	0.50	0.46	0.52
		5.7	0.63	0.63	0.76	0.63	0.70	0.61	0.73	0.62	0.58	0.64
		10.5	0.55	0.55	0.66	0.55	0.61	0.53	0.64	0.54	0.50	0.56
C 지역	Seed & Idriss	4.6	0.67	0.70	0.71	0.71	0.83	1.04	0.69	0.91	0.78	0.70
		5.1	0.25	0.26	0.26	0.26	0.31	0.39	0.26	0.34	0.29	0.26
		7.5	0.43	0.46	0.46	0.46	0.54	0.68	0.45	0.59	0.51	0.45
	수정 Seed	4.6	0.70	0.78	0.83	1.20	1.34	1.05	1.01	1.17	1.47	1.27
		5.1	0.26	0.30	0.30	0.40	0.54	0.39	0.38	0.42	0.49	0.45
		7.5	0.61	0.60	0.59	0.52	1.08	0.67	0.49	0.56	0.64	0.67
	Eurocode	4.6	0.73	0.76	0.77	0.78	0.91	1.13	0.75	0.99	0.85	0.76
		5.1	0.27	0.28	0.29	0.29	0.34	0.42	0.28	0.37	0.31	0.28
		7.5	0.46	0.48	0.49	0.49	0.57	0.72	0.48	0.63	0.54	0.48
D 지역	Seed & Idriss	4.2	0.43	0.40	0.54	0.40	0.56	0.57	0.38	0.56	0.42	0.49
		5.2	0.31	0.29	0.39	0.29	0.41	0.41	0.28	0.40	0.31	0.35
		10.3	0.59	0.56	0.74	0.55	0.78	0.79	0.52	0.77	0.58	0.68
	수정 Seed	4.2	0.45	0.44	0.62	0.98	0.72	0.64	0.65	0.74	0.81	0.85
		5.2	0.32	0.33	0.48	0.60	0.59	0.47	0.46	0.50	0.67	0.59
		10.3	0.87	0.80	0.71	0.81	0.82	0.86	0.57	0.79	0.61	0.66
	Eurocode	4.2	0.47	0.44	0.59	0.43	0.62	0.63	0.42	0.61	0.46	0.54
		5.2	0.33	0.32	0.42	0.31	0.44	0.45	0.30	0.44	0.33	0.38
		10.3	0.59	0.56	0.75	0.55	0.79	0.80	0.53	0.78	0.59	0.69
	전단파 속도	4.2	0.93	0.88	1.17	0.87	1.23	1.25	0.83	1.23	0.92	1.07
		5.2	0.99	0.94	1.25	0.92	1.32	1.33	0.89	1.31	0.99	1.15
		10.3	0.34	0.32	0.43	0.32	0.45	0.46	0.30	0.45	0.34	0.39

평가결과 대상지반은 여러 입력지진과 방법에 대한 안전율이 일부 지층 및 방법을 제외하면 대부분 안전율이 1이하의 값을 가지는 지진 발생시 액상화에 취약한 지반특성을 가지고 있고 액상화 발생 가능성도 높은 것으로 나타났다.

4.3 비교분석

각각의 평가방법에 따른 결과를 비교하면 안전율은 각 방법들 간에 다소 차이가 발생하였다. 입력지진에 따라 차이는 있지만 A지역에서는 일부지진에 대해서 수정 Seed와 Idriss 방법이 안전율이 크게 평가된 것을 제외하면 대부분 CPT, Eurocode, Seed와 Idriss 방법 순으로 평가되었고, B지역에서는 상부에서 수정 Seed와 Idriss, Eurocode, Seed와 Idriss, CPT를 이용한 방법 순으로 평가되었고 하부에서는 부분적으로 수정 Seed와 Idriss 방법이 크게 평가되었다. C지역에서도 수정 Seed와 Idriss, Eurocode, Seed와 Idriss 방법 순으로 평가되었고, D지역에서는 상부에서는 전단파 속도를 이용한 방법이 가장 크게 나타났으며 하부에서는 가장 작게 평가되었다.

이러한 결과를 볼 때 수정 Seed와 Idriss 방법은 지진에 의한 반복응력비 평가시 깊이에 따른 가속도를 적용하기 때문에 지층별 응답해석결과에 따라 다른 방법들과 다소 차이가 발생하는 것으로 보이고, Eurocode가 Seed와 Idriss 방법에 비해 크게 평가되는 것은 지진규모별 수정계수가 상대적으로 크기 때문인 것으로 보인다. CPT를 이용한 방법은 A지역에서는 다른 방법에 비해 크게 평가되었지만 B지역에서는 작거나 유사하게 평가되었고, 전단파 속도를 이용한 방법은 D지역에서 상부에서는 다른 방법에 비해 크게 나타났지만 하부에서는 작게 평가되었다. CPT와 전단파 속도를 이용한 방법에 대해서는 추가적인 자료의 수집과 평가가 이루어져야 할 것으로 보인다.

입력지진에 따른 결과를 비교하면 A지역에서는 안전율이 각 방법에서

Morgan Hill 지진이 가장 크게 Loma Prieta 지진이 가장 작게 평가되었고, B 지역에서 수정 Seed와 Idriss 방법을 제외하면 Miyagi-Oki 지진이 가장 크게 Morgan Hill 지진이 가장 작게 평가되었고, 수정 Seed와 Idriss 방법에서는 상부에서는 Morgan Hill 지진이 가장 크게 Tokashi-Oki 지진이 가장 작게 나타났으며, 하부에서는 Tokashi-Oki 지진이 가장 크게 El Centro 지진이 가장 작게 평가되었다. C지역에서는 수정 Seed와 Idriss 방법을 제외하면 San Fernando 지진과 Parkfield 지진이 가장 크게 Loma Prieta 지진과 Coyote Lake 지진이 가장 작게 평가되었다. D지역에서는 수정 Seed와 Idriss 방법을 제외하면 San Fernando 지진이 가장 크게 Coyote Lake 지진이 가장 작게 평가되었고 수정 Seed와 Idriss 방법에서는 San Fernando 지진, Morgan Hill 지진, San Francisco 지진이 가장 크게 Miyagi-Oki 지진, Coyote Lake 지진이 가장 작게 평가되었다. 수정 Seed와 Idriss 방법은 지진별 결과에서도 다른 방법에 비해 경향성이 부족하게 나타나는데 이러한 결과는 다른 방법과 다르게 지진에 의한 반복응력비 평가시 깊이에 따른 가속도를 적용하기 때문에 지층별 응답해석결과에 따라 다른 방법들과 다소 차이가 발생하는 것으로 보인다.

본 연구에 적용된 지진의 응답해석결과를 지층조건과 각 지진의 특성에 따른 관계를 알아보기 위해 응답스펙트럼을 통해서 비교해 보았지만 현재의 과정과 결과로는 상관관계가 미약한 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통해서 지층조건이 같더라도 입력지진에 따라 그 응답해석결과가 서로 상이하게 나타나고 입력지진이 동일하더라도 지층조건에 따라 결과가 상이하게 나타남을 알 수 있다.

제 5 장 결 론 및 향후과제

본 연구에서 선정한 대상지반에 대하여 지진특성별, 평가방법별로 액상화 가능성을 평가하여 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 입력지진의 특성과 대상지반의 지층 특성에 따라 지진응답해석결과가 다르게 나타났다. 따라서 대상지반 고유의 지반증폭 현상을 고려하기 위해서는 지진응답해석을 통해서 액상화 가능성을 평가하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

2. 지진응답해석결과는 입력지진의 특성보다는 지층의 구조, 두께 등의 기하학적 특성 및 지반과 암반의 동적변형특성에 따른 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3. 액상화 가능성에 대한 안전율은 Eurocode가 Seed와 Idriss 방법에 비해 크게 평가되고, 수정 Seed와 Idriss 방법은 응답해석결과에 따라 달라지고, CPT와 전단파 속도를 이용한 방법은 추가적인 자료의 수집과 해석이 필요할 것으로 보인다.

4. 국내 지반에 대한 동적변형특성 연구와 다양한 조건에서의 액상화 평가를 통해서 자료를 축적함으로써 국내 지반조건에 적합한 평가법을 보완하고 개발해야 할 것으로 보인다.

5. 동일한 지층 조건일지라도 입력지진의 특성에 따라 지진응답해석결과가 다르게 나타나므로 액상화 평가에 대한 표준화를 위해서는 국내의 실정에 적합한 입력지진의 모델이 선정되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

강규진(2000). *국내 연안지역의 액상화 발생 가능성 구역도 작성에 관한 연구*, 석사학위논문, 연세대학교

기상청(2001). *1978 2000 지진관측보고*, 기상청, pp. 1-25

김동수, 윤종구, 박덕근(2000). "등가선형해석을 이용한 지반증폭 영향 요소 연구", *한국지진공학회 2000년도 추계학술대회 논문집*, 한국지진공학회, pp. 98-107

김수일(1998). "국내의 액상화 현상 평가 및 대책; 초청강연", *한국지반공학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 3-30

김수일, 박인준, 최재순(2000a). "국내 여건에 적합한 액상화 평가기법 연구", *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, Vol. 20, No. 2-C, pp. 129-139

김수일, 황대진, 박인준(2000b). "지반진동과 내진설계(vi)", *한국지반공학회지*, 한국지반공학회, Vol. 16, No. 12, pp. 25-37

김종열(1993). "양산단층의 단층계와 파쇄대", *한국지구과학회지*, 한국지구과학회, Vol. 14, No. 3, pp. 281-299

대한지질학회(1999). *한국의 지질*. 시그마프레스

박종관, Towhata, I. (1998). "지표면 스펙트럼 강도를 통한 지반의 액상화 평가에 대한 연구", *한국지반공학회지*, 한국지반공학회, Vol. 14, No. 2, pp. 9-20

신윤섭(1999). *우리나라 지진특성을 고려한 액상화 평가방법의 개선방안에 관한 연구*, 석사학위논문, 연세대학교

이기화(1985). "양산단층의 활성문제에 관하여", *대한지질학회지*, 대한지질학회, Vol. 21, No. 1, pp. 38-44

한국지반공학회(1997). *진동 및 내진설계*, 구미서관, pp. 451-498

한국지진공학회, **한국건설기술연구원**(1997). ***내진설계기준연구(II)***, **건설교통부**, pp. 3-41

한국지진공학회(1999). ***지중구조물의 내진설계***, **한국지진공학회**, pp. 1-56, 105-159

한국해양연구소(1999). ***항만 및 어항시설의 내진설계표준서***, **해양수산부**

Andrus, R. D., Stokoe, K. H., II, Bay, J. A., and Youd, T. L. (1992). "In Situ Vs of Gravelly Soils Which Liquefied," *Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, held in Madrid, Spain, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherland, pp. 1447-1452

Andrus, R. D., Stokoe, K. H. (1997). "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity," *In Proceedings of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report NCEER-97-0022, pp. 89-128

Blake, T. F. (1996). Personal Communication from T. L. Youd

Casagrande, A. (1940). "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fill," *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, reprinted in Contributions of Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, pp. 257-276

Das, B. M. (1993). *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT, pp. 397-458

DeAlba, P., Chan, C. K., and Seed, H. B. (1975). "Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large Scale Laboratory Tests," *Report No. EERC 75-14*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

European Committee for Standardization(1998). *Eurocode 8*

Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1992). *USER'S FOR SHAKE91: a computer program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses* *of Horizontally Layered Soil Deposits*, University of California, Davis

Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S., and Coutinho, R. (1992). "Evaluation of SPT-, CPT-, and Shear Wave_Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data," *Proceedings, Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Technical Report NCEER-92-0019, Vol. 1, pp. 177-204

Koester, J. P. (1994). "The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength, Ground Failure under Seismic Condition," *Geotechnical Special Report*, No. 44, ASCE, New York, pp. 17-33

Kramer, S. L. and Seed, H. B. (1988). "Initiation of Soil Liquefaction Under Static Loading Condition," *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 412-430

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, pp. 348-422

Liao, S. and Whitman, R. V. (1988). "Overburden Correction Factors for SPT in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 3, pp. 373-377

Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell J. J. M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Chapman & Hall, pp. 164-171

Port and Harbour Research Institute(1997). *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema

Robertson, P. K., Woeller, D. J. and Finn, W. D. L. (1992). "Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading," *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, Vol. 29, pp.

686-695

Robertson, P. K., and Wride (Fear), C. E. (1997). "Cyclic Liquefaction and its Evaluation Based on the SPT and CPT," *In Proceedings of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report NCEER-97-0022, pp. 41-87

Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966). "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105-134

Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273

Seed, H. B. and Booker, J. R. (1977a). "Stabilization of Potential Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT7, pp.757-768

Seed, H. B., Mori, K., and Chan, C. K. (1977b). "Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 246-270

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1985). "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1016-1032

Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I. (1983). "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data," *Journal of the Geotechnical Engineering* , ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482

Stark, T. D., and Olson, S. M. (1995). "Liquefaction Resistance using CPT and Field Case Histories," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121 No. 12, pp. 856-869

Youd, T. L., Idriss. I. M. (1997). "Summary Report from the 1996 NCEER Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," *In Proceedings of the 1996 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report NCEER-97-0022, pp. 1-40

Youd, T. L. and Seed, I. M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soil: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 4, pp. 297-313

감사의 글

책상 옆 창기에 걸린 달빛사이로 저 멀리서 하루의 시작을 알리는 범종 소리가 세상을 깨우고 있는 이 시간 연구실은 이제 잠자리를 펴는 소리로 시끌벅적 하다. 이제는 소중한 추억으로 기억될 연구실 생활을 회상하면 알 수 없는 웃음이 나온다. 연구실에 들어오기 전 대연캠퍼스 도서관과 동아리 생활, 이곳으로 과 전체가 이사를 하게 되면서 멀고 높게만 느껴지던 달동네 8공학관과 1공학관, 연구실 생활 시작 첫날 종이박스로 잠자리를 만들어 자고난 뒤 심한 몸살이 나고 말았던 일, 휴학, 그리고 새로운 연구실 생활, 겨울마다 말로 형언할 수 없을 정도의 고통스런 아픔을 참아야했던 머리감기, 그 유명한 테이블 뛰어넘기 사건, 새우깡 사건, 그리고 지금 생각하면 아무것도 아니만 그땐 정말 힘들었던 대학원 입학 전 겨울 세미나, 꼭 한 명은 밤새워 데이터를 기록해야했던 투수시험, 흉한 모습으로 생을 마감한 내 스쿠터, 여자라고는 눈 씻고 찾아봐도 없는 이곳에서 그나마 우리의 눈과 맘을 즐겁게 해주었던 수협의 ★, ■頭, 소비조합의 ■사슴, 다행스럽게 나는 피할 수 있었지만 연구실 사림들을 병원으로 보내버리고만 전어, 바다건너 말로만 듣던 대평원, 네바다의 삭막한 사막의 신기루, 자연의 경이로움을 느낄 수밖에 없었던 Yosemite 공원, 5년 동안이나 가해진 하중으로 이제는 얇아졌지만 아직은 쓸만한 스티로폼....... 5년이라는 시간동안 겪었던 크고 작은 일들이 아쉬움을 남기며 아주 천천히 기억 속을 스쳐지나간다. 뭔가를 표현 할 때는 알게 모르게 꼭 전공의 어떤 현상과 연관지으며 대화를 나누고, 비 오는 날이면 생각나는 먹거리(?), 마우스 덕에 생긴 손목의 굳은 살, 밤이면 밤마다 꼭 해결해야할 밤참, 그 덕에 나와 버렸지만 아니라고 극구 부인하고픈 뱃살...... 이 모든 것이 지금까지의 생활을 이야기 해주고 있다. 짧았지만 긴 시간, 긴 시간이지만 짧았던 시간. 무료하게 하릴없이 지나던 하루와 뭔가 했다는 느낌을 가지고 행복한 미소를 지우며 잠자리

에 들던 하루가 모이고 모여서 그 긴 시간들을 채워나갔다. 그리고 오늘이다. 어제 오늘을 지내면서 뭔가를 이루어 나가고 있다는 느낌이 든다. 하지만 이런 느낌 뒤에는 아쉬움과 미련이 남기 마련인 모양이다. 하지만 이제는 이곳에서의 생활은 여기서 마무리 지어야 할 것 같다.

지금이 뭔가를 완성하고 마무리하는 단계가 아니라 미지의 새로운 세상을 시작하는 도약의 첫걸음이라 생각하며 지금까지 생활을 지켜주고 도와주신 분들께 감사의 뜻을 전하고자 한다.

하고 있던 일이 잘되지 않아 중심을 잃은 상태에서 방황하던 5년 전 겨울 어느 날 정두회 교수님과의 만남은 저에게 새로운 길을 열어주었습니다. 학문에 대해서는 부족한 저 자신에 대한 실망과 번뇌로 우울하게 만들기도 하시고, 면담이라도 하는 날이나 회식자리에선 형이라 부르고 싶은 마음이 생길정도로 친근하게 대해 주시고, 미국이라는 넓고 새로운 세상을 보여주시고 많은 것을 느끼게 해주시신 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁜 연구 활동 중에서도 제 논문을 심사하여 주신 정진호 교수님과, 이영대 교수님께 감사드립니다. 또한 새로운 학문을 접하고 힘들어하는 저에게 따뜻한 관심을 보여주시고 가르침을 주신 이상호 교수님께 감사드리며 토목이라는 단어를 소중하게 느낄 수 있도록 해주신 토목공학과 교수님들께도 감사드립니다.

항상 든든해 보이는 준명, 종철 형, 대학생활부터 함께 어려움과 즐거움을 함께 했던 유돈, 잘 따라주고 열심히 해지만 가끔씩 노려보는 눈이 무서운(?) 태효, 마음이 여려서 싫다는 말하지 못하고 가끔씩은 ㄲㅊ한(?) 태환, "특이하다"라는 단어로 표현 가능한 멋쟁이 훈규, 2% 부족하다고들 하지만 보기보단 정도 많고 순진한 도희, 이제 시작이고 앞으로 연구실을 이끌어 나가야하고 365일 불이 꺼지지 않는 연구실로 만들어 달라고 부탁하고픈 재환, 도영, 종태를 조금은 닮은 아기 곰 같은 대식, 그리고 '소와 사자이야기'를

한 번 더 이야기 해주고픈 경은, 모두들에게 감사드리고 늘 함께한 시간들을 소중하게 간직하겠습니다. 박균서 회장님이하 지반공학연구회 회원님들에게 감사의 마음을 전합니다. 언제나 밝은 모습으로 격려해주시고 물심양면 도와주신 김우식 원장님께도 감사드립니다. 제가 연구실과 대학원에 들어오는데 도움을 주었고 신세진 게 너무 많고 앞으로도 신세를 질 것 같은 종태, 대학생활부터 여러 가지로 많은 도움을 주고 외롭고 힘들 때 함께 해준 신욱, 나보다 취직도 먼저하고 장가까지 먼저 갈 것 같은(그럼 알지!) 신사동 그 사람 태완에게도 감사드립니다. 그리고 언제나 옆에 있어 줄 것 같은 해양학과 91학번 동기들, 볼링이라는 매개체로 만나 10년이라는 시간을 함께한 Gutter 선후배들에게도 감사의 마음을 전합니다.

오늘의 결실을 맺기까지 부족한 자식을 언제나 믿고 지켜봐 주시고 어떠한 상황에서도 저의 버팀목이자 마지막 보루가 되어주신 부모님께 진심으로 감사드립니다. 멀리 있지만 계절마다 동생의 옷가지를 챙겨주는 자상한 누나와 매형, 형보다 먼저 힘든 사회생활을 하고 있는 믿음직한 동생에게 이 논문이 조그마한 선물이 되었으면 합니다. 특히 30여 년간 삶의 모든 부분을 가능하게 해주시고 저 자신보다도 저를 더 믿어주시는 어머님께 절절한 감사의 마음을 전합니다. 그리고 ‘강한 사람’ 되라는 아버님의 말씀 영원토록 기억하겠습니다.