

지리정보시스템 및 표준관입시험 결과를 이용한 비소성 실트질 지반의 액상화 평가

Assessment of Liquefaction Potential on Non-Plastic Silty Soil Layers Using Geographic Information System(GIS) and Standard Penetration Test Results

유시동* · 김홍택** · 송병웅*** · 이형규****

Yoo, Si-Dong · Kim, Hong-Taek · Song, Byung-Woong · Lee, Hyung-Kyu

Abstract

In the present study, the liquefaction potential in the area of the Incheon international airport was assessed by applying the data of both standard penetration tests and laboratory tests to the modified Seed & Idriss method. The analysis was performed against the non-plastic silty soil layer and silty sand soil layer existing within the depth of 20m and under the ground water level, having the standard penetration value(N) of below 20. Also, each set of data was mapped using the GIS(Geographic Information System) and the safety factor against the liquefaction potential ($FS_{liquefaction}$) was obtained by overlapping those layers.

Throughout the analysis, it was found that there exists a potential hazard zone for the liquefaction, showing partially that the safety factor against the liquefaction potential is 1.0 to 1.5 below the standard safety factor criterion. It is further thought to be necessary that the liquefaction potential for the corresponding hazard zone be additionally assessed in detail.

Keywords : GIS, Liquefaction, Standard penetration test, Modified Seed & Idriss method

요 지

본 연구에서는 인천국제공항 제2단계 부지조성공사에서 수행된 표준관입시험 및 실내역학시험 결과를 Seed & Idriss(2001)가 제안한 수정된 액상화 간편예측식에 적용하여 대상지반의 액상화에 대한 안전율을 평가하였다. 해석 대상 지층은 심도 20m 이내, 지하수위 이하에 존재하는 비소성 실트층 및 실트질 모래층을 대상으로 하였으며, 표준관입저항치(N)가 20 이상인 지층은 해석 대상에서 제외하였다. 또한 액상화 평가와 관련된 모든 data들을 GIS(geographic information system)에 적용하여 공간보간을 통해 지도화 하였으며, 생성된 지도들 간의 연산을 통하여 대상지반의 액상화에 대한 안전율을 산정하였다.

인천국제공항 제2단계부지조성공사지역의 액상화에 대한 안전율을 평가해 본 결과 대부분의 지역에서 기준안전율 ($FS_{liquefaction} > 1.5$)을 만족하는 것으로 나타났으나 제3활주로 북부지역 및 여객계류장 중앙지역 등의 일부지역에서 기준안전율을 만족하지 못하는 1~1.5사이의 안전율 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 해당지역에 대한 액상화 상세예측이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : GIS, 액상화, 표준관입시험, 수정 Seed & Idriss 간편법

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수

*** 정회원 · 다산컨설팅 지반공학부 차장

**** 정회원 · 서일대학 토목과 부교수

1. 서론

과거 지진재해지역에 관한 자료들을 검토하여 보면, 지진 재해는 흙의 종류에 상관없이 발생하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 1964년 미국 알래스카 지진의 경우에는 점성토의 지반에서 큰 피해가 일어난 예로 알려져 있다. 또한, 1964년 일본 니가타현에서 발생한 니가타지진의 경우는 모래지반에서 대규모의 액상화가 발생하여, 액상화 현상이 세상에 널리 알려지는 계기가 되었다. 1965년 일본 효고현 남부 지진의 경우에는 화강풍화토(일명 마사토) 및 자갈 등으로 구성된 지반에서 대규모의 액상화 및 측방유동이 발생하였다(Hamade et al., 1996). 그때까지는 화강풍화토 지반에서도 액상화가 발생한다는 것이 알려져 있지 않았기 때문에 많은 기술자와 연구자들이 이에 주목을 하였으며, 현재는 화강풍화토의 액상화에 대한 연구가 많이 진행되어 있는 상태이다. 한편, 최근 1999년 터키 Kocaeli 지진의 경우, Adapazari 지역에서 발생한 피해는 비소성 실트 및 실트질 모래지반에서 발생한 액상화 피해로 알려져 있고, 아파트가 집중되어 있는 주택단지에서 피해가 컸다고 보고되어 있다. 그 사례의 경우에는 상부구조물의 하중에 의해 기초의 흙은 조밀한 상태에 있다고 평가되었지만, 상부구조물의 하중에 의한 초기전단 응력을 받은 지반에서는 지진하중에 의한 강도와 강성의 저하에 따라 부분 액상화가 발생할 수 있다는 것이 피해의 원인으로 분석되었다. 더욱이, 2000년 일본 돗토리현 서부지진의 경우에는 타케노우찌(竹内) 공단지역의 넓은 범위에서 비소성 실트지반의 액상화가 보고되어 있다. 이상의 사례를 종합해 보면, 액상화에 의한 피해는 이미 알려진 사질토지반에서 뿐만아니라 비소성 실트지반을 비롯한 다양한 지반상태에서도 액상화에 의한 피해가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 이러한 지반위에 건설된 주요 구조물에 대해서도 액상화에 대한 검토가 요구된다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 인천공항 2단계 건설 예정지역의 실내 역학시험 및 표준관입시험 자료를 토대로 대상지반의 액상화 가능성을 평가하였다. 액상화의 평가는 대상 지반중 비소성 실트질 및 실트질 모래로 분류되어 있는 SM층 및 ML층을 대상으로 하였으며, Seed & Idriss(2001)가 제시한 간편법을 지리정보시스템(Geographic Information System, 이하 GIS)에 적용함으로써 평가를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 GIS

GIS는 컴퓨터를 이용하여 지형, 지질, 지리 및 토지 등과 관련된 3차원적인 다양한 공간 정보를 그들 특성에 맞추어 자료로 입력, 저장, 검색, 분석 및 출력하여 여러 목적에 맞게 활용할 수 있는 종합정보체계라 할 수 있다. 또한 GIS는 위치 및 형상과 관련이 있는 모든 분야에서 활용되고 있는 최신 기술로서 컴퓨터 화면을 통하여 사용자가 원하는 특정 위치 또는 대상물의 속성을 조회하고 새로운 정보를 생산하여 인터넷이나 랜 등의 네트워크를 통해 공간적인 제약이 없이 유통될 수 있는 특징이 있다. GIS 자료의 저장은 좌표 평면상의 레이어(layer) 형태로 저장된다. 일반적으로 숫자나 문자 정보를 처리하는 다른 정보 시스템과는 달리, GIS는 공간적으로 배열된 형태의 자료를 처리한다. 공간 자료의 집합은 지리자료(cartographic data)와 속성자료(attribute data)로 구성된다. 여기서 지리자료는 공간 좌표계 또는 시간-공간 좌표계 내에서 위치를 표현하는 자료를 의미하고, 속성자료는 공간적인 개념이 포함되지 않은 자료를 의미한다. 속성 자료에는 도로, 배수, 흙의 종류, 흙의 두께 및 토지이용상황 등의 정보들이 포함될 수 있으며, 이러한 정보의 양에 제한을 받지 않는다. 또한, data를 이용한 공학적 해석에 매우 편리할 뿐만아니라 사용자가 data를 효과적으로 활용할 수 있도록 고안되어 있다. GIS는 자료를 그 공간 좌표와 함께 저장, 분류, 갱신, 표시 등이 가능하다는 점에서 사용자가 data를 분석하고 이를 가시적으로 표현하는데 적합하다는 장점을 가지고 있다. GIS의 이점을 정리하면 다음과 같다.

1. 결과를 신속하게 얻을 수 있다.
2. 결과의 생성 과정에서 중간 결과물을 가시적으로 미리 볼 수 있다. 따라서, 임의의 결과에 대한 원인 분석이 쉽게 이루어질 수 있으며, 생성물들 사이의 상관성을 가시적으로 쉽게 알아볼 수 있다.
3. 분석할 data의 양에 제약을 받지 않는다.
4. 지리자료(cartographic data)와 속성 자료(attribute data)를 연계시켜서 연산을 수행함으로써 지리적인 상관성이 있는 속성 자료 예측을 정확하게 할 수 있다.
5. Digital 형태로 저장되어 있는 기존 data들과 호환성이 좋다.

2.2 액상화 간편예측법

액상화 간편예측법으로는 Seed & Idriss (1971)의 간편법, Iwasaki 등(1978)의 방법 및 Ishihara(1977)방법 등이 있으며, 「도로설계기준」(한국도로교통협회, 2000)에서는 Seed & Idriss의 평가법을 사용하고 있으나, 「항만 및 어항시설의 내진설계 표준서」(해양수산부, 1999) 등에서는 지진응답해석을 통해 액상화 평가를 수행하는 수정 Seed & Idriss 등(2001)의 평가법이 주로 사용되고 있는 실정이다. 이 평가법은 기존 Seed & Idriss의 방법과는 달리 Pro-shake 등의 지진응답해석 프로그램을 이용하여 대상지반의 깊이별 최대수평가속도를 구하고 이를 이용하여 깊이별 최대 전단응력을 직접 산정하는 것이 특징이다.

본 연구에서는 「항만 및 어항설계의 내진설계 표준서」의 기준을 따라서 표준관입시험 결과를 이용한 수정 Seed & Idriss 간편법을 사용하여 대상 지반의 액상화 평가를 수행하였다.

액상화의 평가 절차를 Flow-chart로 정리하면 다음 그림 1과 같다.

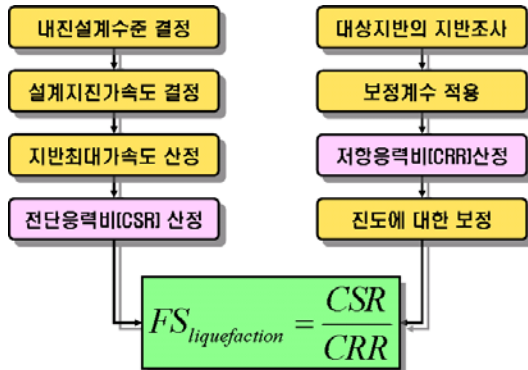


그림 1. 액상화의 평가 절차

모든 데이터는 GIS상에 각 시추공 별로 점의 형태로 입력된 다음 역거리 내삽법을 이용하여 전체 대상지반에 대하여 지도화 되었으며, 액상화에 대한 안전율은 이렇게 지도화 된 각각의 데이터들을 GIS상에서 중첩시킴으로써 산정되었다.

2.2.1 표준관입저항치(N)의 보정

표준관입저항치는 상재압, 해머의 에너지효율, 로드길이, 관입직경, 샘플링 방법 등에 의해 많은 영향을 받으므로 이에 대한 보정이 필요하다. 표 1은 Robertson 등(1998)에

의해 제안된 보정계수를 나타낸 것이며, 본 논문에서는 GIS를 이용하여 점 데이터형태로 존재하는 실측된 각 시추공의 표준관입저항치를 역거리 내삽법을 이용하여 전체 대상지역에 대한 공간보간을 실시하여 연속된 형태의 레이어를 도출하였으며, 이렇게 도출된 레이어를 표 1에서 제시된 각 보정계수들과의 연산을 통하여 보정된 표준관입저항치 레이어를 도출하고 이를 액상화발생가능성 평가에 적용하였다.

표 1. 표준관입저항치에 대한 보정계수
(Robertson et al., 1998)

계 수	이용 장치	항목	수 정
상재압	-	C _N	
에너지비	도넛 해머	C _E	0.5~1.0
관입직경	65mm~115m m	C _B	1.0
로드길이	≤ 3m	C _R	0.75
샘플링 방법	표준 샘플러	C _S	1.0

2.2.2 지반최대수평가속도(a_{max})의 산정

지반최대수평가속도(a_{max})는 SHAKE91을 이용한 지진응답 해석을 통해 산정되었다. SHAKE91을 이용한 지진응답 해석을 위하여 Hachinohe 지진기록(장주기파)과 Ofunato 지진기록(단주기파)을 인공지진파 생성프로그램인 SIMQUE-II에 적용하여 인공지진파를 도출하였으며, 이를 시간에 따른 가속도 이력으로 나타내면 그림 2와 같다.

적용된 지반최대가속도는 대상지역이 행정구역상으로 지진 I구역에 해당하는 인천광역시에 속하므로 지진구역계수 0.11을 사용하였으며, 대상 구조물이 국제공항으로서 주요 구조물에 해당하므로 평균재현주기 1000년에 해당하는 위험도계수 1.40을 적용하였다. 또한, 대상지역이 지진 I구역에 해당하며, 표준관입저항치가 전반적으로 10~20사이로 분포한다는 것을 고려하여 지반특성에 따른 지진계수를 1.45로 산정하였다. 산정된 계수들의 연산을 통하여 지상에 노출된 노두에서의 지반최대수평가속도를 0.2233g로 결정한 다음 이를 SHAKE91 프로그램에 이용하여 지진응답해석을 수행하여 액상화 발생 가능 심도에서의 지반최대수평가속도를 산정하였다.

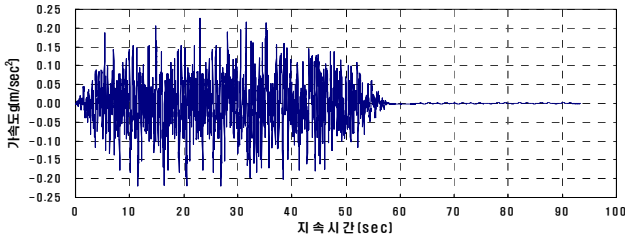


그림 2. 인공지진파의 시간-가속도 이력

표 2. 지진 규모에 따른 보정계수 $C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$

Magnitude (M)	Seed & Idriss(1982)	Idriss*
5.5	1.43	2.30
6.0	1.32	1.76
6.5	1.19	1.44
7.0	1.08	1.19
7.5	1.00	1.00
8.0	0.94	0.84

* 1995 Seed Memorial Lecture, University of California at Berkely(I. M. Idriss, personal communication to T. I. Yeud, 1977)

2.2.3 전단응력비(CSR)의 산정

지진시 발생하는 전단응력비(CSR)는 지진응답해석을 통하여 산정된 대상지반의 지반최대수평가속도와 유효상재압 등을 고려하여 다음 식(1)에 의해 산정한다.

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (1)$$

여기서, a_{max} : 액상화 발생 대상지반의 최대지반가속도
 g : 중력가속도
 σ_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압
 σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효상재압

2.2.4 액상화 저항능력비(CRR_{6.5})의 산정

보정된 표준관입저항치에 대하여 식(2)의 연산을 수행함으로써 규모 7.5에 대한 액상화 저항능력비(CRR_{7.5})를 산

정할 수 있으며, 이를 식(3) 및 표 2에 의하여 보정함으로써 국내 기준인 규모 6.5에 대한 액상화 저항능력비(CRR_{6.5})를 산정할 수 있다.

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

$$CRR_M = CRR_{7.5} \times MSF \quad (3)$$

여기서, CRR_M : 지진규모에 따른 액상화 저항능력비
 $CRR_{7.5}$: 지진규모 7.5인 경우에 대한 액상화 저항능력비
 MSF : 지진규모 보정계수

표 2에서 제시된 값에 의하면 규모 6.5에 대한 보정계수는 1.44~1.69 사이의 분포하고 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서는 지진규모에 대한 보정계수를 「폐기물 매립시설의 내진설계 기준연구」(환경부, 2001)에서 제시한 1.5로 적용하여 액상화발생가능성에 대한 안전율을 산정하였다.

2.2.5 액상화발생가능성에 대한 안전율 산정

지반의 액상화 저항능력비(CRR_{6.5})와 지진시 발생하는 전단응력비(CSR)에 대하여 식(4)의 연산을 수행함으로써 액상화발생가능성에 대한 안전율을 산정할 수 있다.

$$FS_{liquefaction} = \frac{CRR_{6.5}}{CSR} \quad (4)$$

여기서, $FS_{liquefaction}$: 지진규모 6.5로 보정된 액상화 저항능력비

3. GIS를 이용한 액상화발생가능성 평가

3.1 대상 지반의 개요

해석대상지역은 행정구역상 인천광역시 중구 영종도와 용유도 일원 인천공항 2단계 건설예정지역으로, 지진 I구역에 해당되며, 그림 3에 도시된 바와 같이, 제 3 활주로, 여객계류장 및 북측제방시설이 그 대상이다.

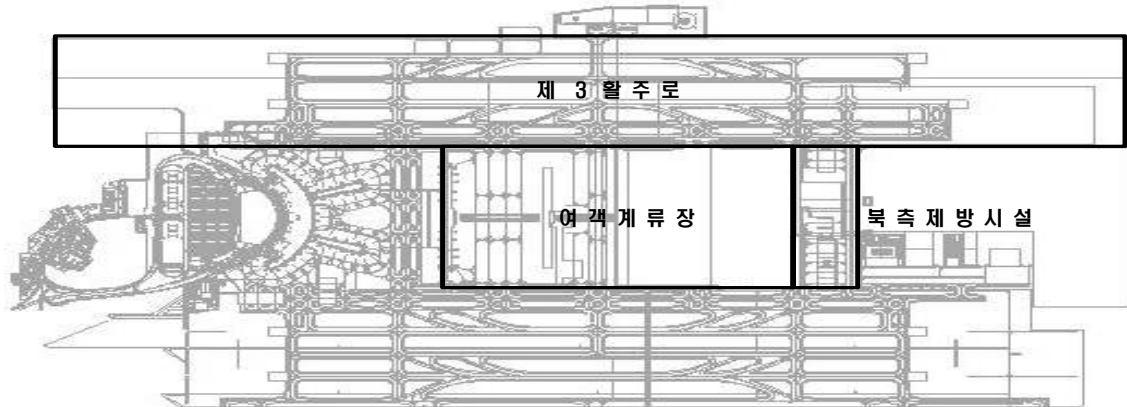


그림 3. 해석대상구역

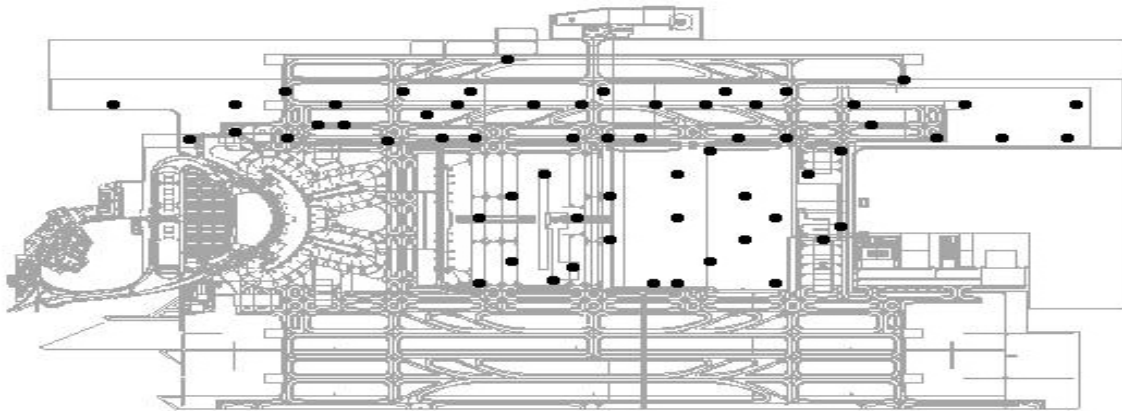


그림 4. 시추공 위치도

대상지역은 퇴적층이 3.0~5.0m에 걸쳐 분포하며, 토립자는 주로 실트, 점토, 실트질모래로 구성되어 있다. 전반적인 퇴적층의 분포는 활주로 중앙지역에서 남·북측으로 갈수록 깊어지는 경향이 있으며, 남측의 경우 주로 실트와 점토가 두껍게 분포하고, 북측의 경우 세사의 분포가 우세하다.

본 연구에서는 인천공항 2단계 건설예정지역에 대하여 표준관입시험 결과 및 실내역학시험 결과를 토대로 액상화 간편예측식을 GIS에 적용함으로써 광범위한 지역에 대한 액상화발생가능성을 평가하였다. 해석에 사용된 시추공의 수는 총 61공이며, 사용된 시추공의 위치분포도는 그림 4와 같다.

3.2 액상화 발생 가능 심도

대상지역의 액상화 발생여부를 판단하기 위하여 표준관입시험 결과 및 실내역학시험 결과를 분석하였으며, 심도

20m 이내에서 표준관입저항치가 20 이하인 실트질모래지반 및 실내역학시험 결과 비소성(NP)로 판단된 비소성 실트지반을 해석대상으로 선정하였다. 그림 5는 액상화 발생 가능한 층이 존재하는 심도를 나타낸 것으로, 액상화 발생 가능 심도는 최대 9.62m까지 분포하고 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 액상화 발생 가능 심도가 깊어지는 것을 알 수 있다.

3.3 지하수위 분포

그림 6은 대상지역의 지하수위의 분포를 나타내고 있다. 대상지역은 지하수위가 지표면으로부터 0.3m~4.6m 사이에 분포하고 있음을 알 수 있으며, 제 3 활주로 북단에서 지하수위가 가장 높음을 알 수 있다.

액상화의 경우 포화된 지반에서 발생하는 것을 전제로 하므로, 액상화발생가능성에 대한 평가에 있어서 지하수위의

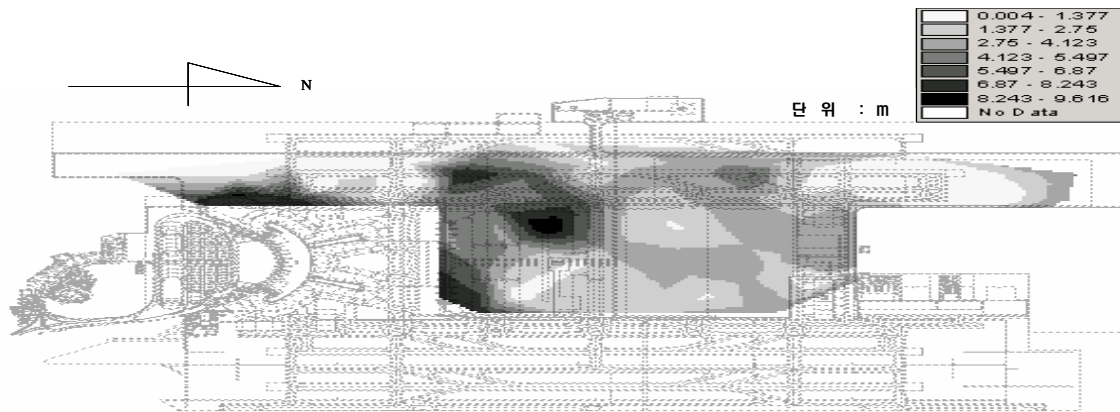


그림 5. 액상화 발생 가능 심도

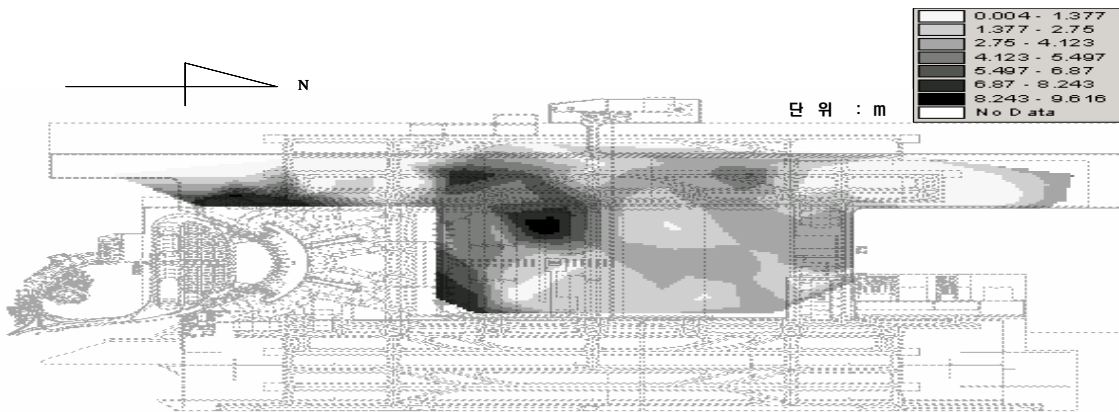


그림 6. 지하수위 분포

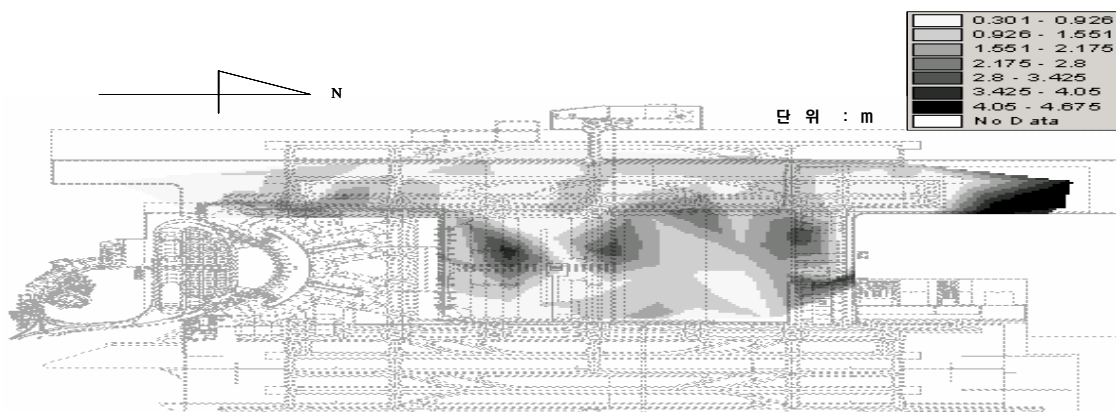


그림 7. 보정된 표준관입저항치의 분포

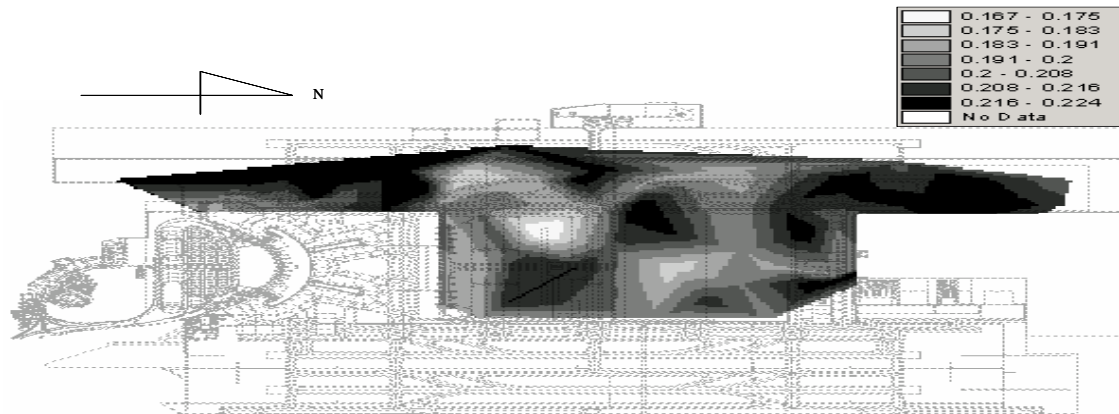


그림 8. 지반최대수평가속도(a_{max})의 분포

분포는 상당히 중요한 요소이며, 액상화 발생 지층에서의 유효상재압 및 총상재압 계산시 액상화 발생 가능 침도 레이어 및 지하수위 분포 레이어를 이용하여 연산을 수행하였다.

3.4 표준관입저항치의 분포

그림 7은 액상화 발생 가능 지층의 보정된 표준관입저항치의 분포를 나타낸 그림이다. 보정된 표준관입저항치는 전반적으로 10~20 사이의 값을 나타내고 있으나, 일부구간에서 보정된 표준관입저항치가 5 이하로 낮게 나타남을 알 수 있다. 특히 일부 지역에서 보정된 표준관입저항치가 5 이하인 영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며, 간편예측법을 통한 액상화발생가능성 평가시 이러한 지역에서는 액상화발생가능성에 대해서 낮은 안전율을 나타낼 것으로 사료된다.

3.5 지반최대수평가속도(a_{max})의 분포

그림 8은 액상화 발생 가능 침도에서의 지반최대수평가속도(a_{max})를 나타낸 지도이다. 2.2.2절에서 명기된 바와 같이 노두에서의 지반최대수평가속도는 지진 구역계수, 위험도계수, 지반특성계수 등을 고려하여 산정되었으며, 이를 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQUE-II를 이용하여 생성된 인공지진파와 함께 SHAKE91에 적용하여 지진응답해석을 수행함으로써 액상화 발생 가능 침도에서의 지반최대수평가속도 값을 산정하였다. 또한, 이렇게 산정된 각 시추공별 지반수평최대가속도값을 GIS에 적용하여 지도화하였다.

3.6 전단응력비(CSR)의 분포

그림 5에 나타난 액상화 발생 가능 침도에 대한 레이어와 그림 6에 나타난 지하수위분포에 대한 레이어를 토대로 총상재압 및 유효상재압을 산정하고, 이를 그림 8에 나타난 지반최대수평가속도 레이어와 함께 식(1)에 대입하여 대상지반의 전단응력비(CSR) 레이어를 도출할 수 있다. 그림 9는 각 시추공별 전단응력비(CSR) 값을 지도화한 것이다.

3.7 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$)의 분포

그림 7에 도시된 보정된 표준관입저항치 레이어에 대하여 식(2)의 연산을 수행함으로써 규모 7.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어를 도출할 수 있으며, 도출된 규모 7.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어 및 표 2에서 제시된 규모에 대한 보정계수를 식(3)에 적용함으로써 국내기준이 규모 6.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어를 도출할 수 있다. 그림 10은 대상 지역의 각 시추공별 규모 6.5에 대한 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$) GIS를 이용하여 지도화한 것이다.

3.8 액상화발생 위험도에 대한 안전율 분포

그림 9 및 그림 10에 도시된 전단응력비(CSR) 레이어 및 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$) 레이어를 식(4)에 대입함으로써 대상지역의 액상화발생가능성에 대한 안전율 레이어를 그림 11과 같이 도출할 수 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 대부분의 지역은 안전율 기준인 $FS_{liquefaction} > 1.5$ 를 만족하는 것으로 나타났으나, 일부지역에서 안전율의 분포가 1~

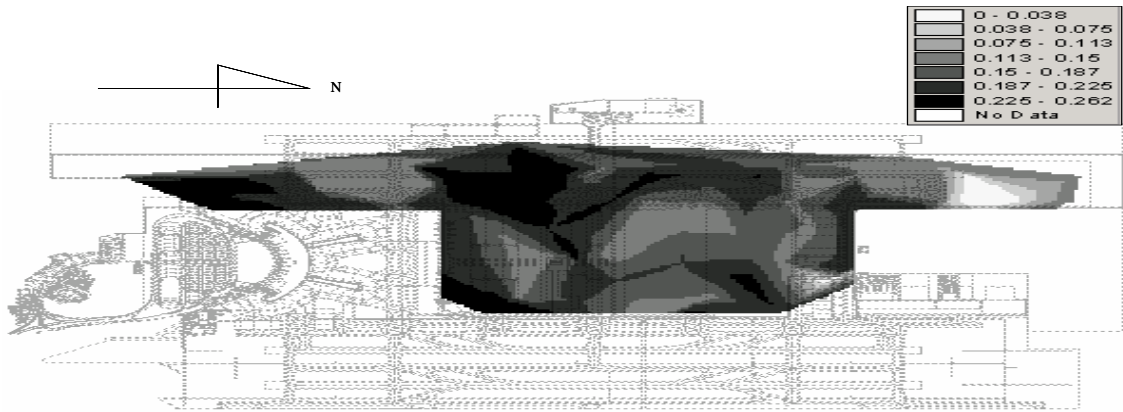


그림 9. 전단응력비(CSR)의 분포

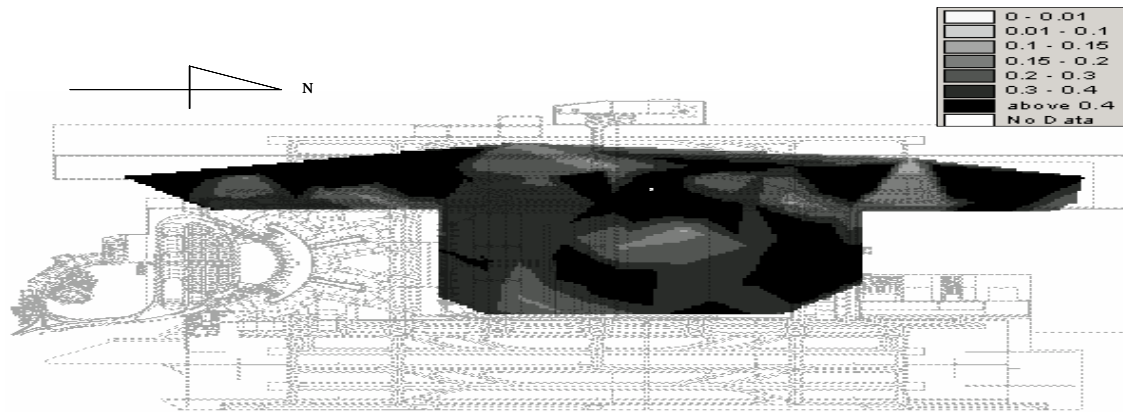


그림 10. 액상화 저항응력비(CRR_{6.5})의 분포

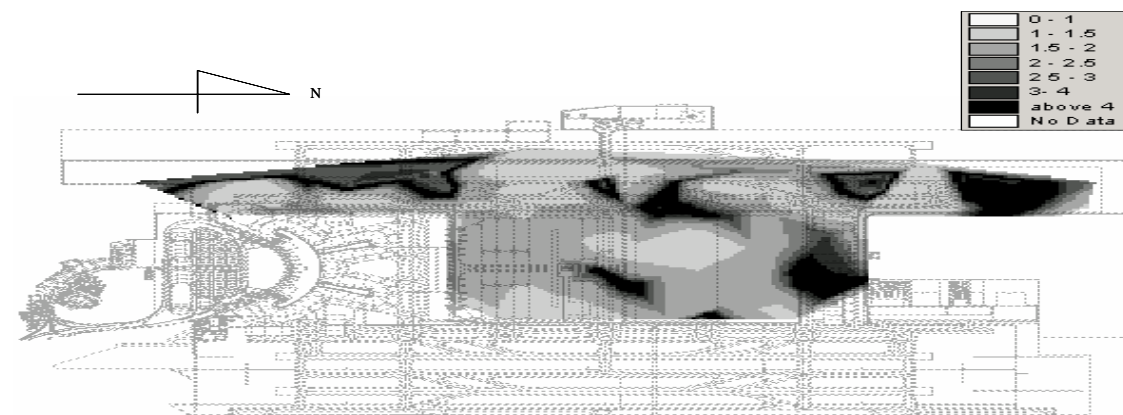


그림 11. 액상화발생가능성에 대한 안전율의 분포

리 및 관계자 여러분들께 깊이 감사드립니다.

(접수일자 : 2005년 1월 10일)

1.5 사이로 안전율 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 간편예측법에 의해 산출된 안전율이 최소 안전율 기준을 만족하지 못하는 지역을 대상으로 상세예측법을 적용하여 보다 정확한 액상화발생가능성에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 인천국제공항 2단계 건설예정지역을 대상으로 표준관입시험 및 실내 역학시험 데이터를 분석하고 이를 GIS에 적용하여 대상지역의 액상화의 간편예측을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 대상지역의 표준관입저항치(N)의 분포를 GIS에 적용해 본 결과 일부구간에서 표준관입저항치가 5 이하로 낮게 나타남을 알 수 있었으며, 특히 제 3 활주로 북부 지역에서 표준관입저항치가 5 이하인 영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 대상지역의 액상화발생가능성에 대한 안전율을 산정해 본 결과, 대부분의 지역은 액상화발생가능성에 대한 안전율 기준인 $FS_{liquefaction} > 1.5$ 를 만족하는 것으로 나타났다으나, 일부지역에서 안전율의 분포가 1~1.5로 안전율 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구를 통하여 도출된 대상지역의 액상화발생가능성에 대한 안전율 레이어를 토대로 기준 안전율 ($FS_{liquefaction} > 1.5$)를 만족하지 못하는 지역을 대상으로 공진주시험 및 진동삼축시험 등을 추가로 실시하여 액상화발생가능성에 대한 상세예측이 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- (4) 또한, 본 연구에서 적용한 대상지역의 표준관입시험 결과를 토대로 한 액상화의 간편예측법 이외에 콘관입시험(CPT) 결과를 토대로 한 액상화의 간편예측을 수행하여 이를 본 연구 결과와 비교, 검토한 후, 그 비교, 검토된 결과를 토대로 상세예측의 범위를 결정하는 것이 보다 합리적일 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 수행과정에서 자료제공에 적극 협조해 주신 (주)유신코퍼레이션 최인걸 상무와 인천공항공사 성기광 대

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II), 건설교통부.
2. 한국도로교통협회(2000), 도로설계기준, 한국도로교통협회.
3. 해양수산부(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서, 해양수산부
4. 환경부(2001), 폐기물 매립시설의 내진설계 기준연구, 환경부.
5. Ambraseys, N. N. (1988), Engineering Seismology, Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 17, pp. 1~105.
6. Hamada, M., Isoyama, R., and Wakamatsu, K. (1996), Liquefaction-induced Ground Displacement and Its Related Damage to Lifeline Facilities, Soils and Foundations. Special Issue on Geotechnical Aspects of the Jan. 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp. 81-97.
7. Ishihara, K. (1977), Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes, Soil and Foundations, JSSMFE, Vol. 17 No. 3, pp. 1~8.
8. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. (1978), A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various site in Japan, Proceedings of 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 641~648.
9. Robertson, P. K. and Wride, C. E. (1996), 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 Rreport NCEER.
10. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM9, September 1971.
11. 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 Division, ASCE, Vol. III, No. 12, pp. 1425~1448.
12. SHAKE91 User's Manual
13. SIMQUE-II User's Manual
14. Yound T. I., Idriss I. M., Ronald D. Andrus, Ignacio Arango, Gonzalo Casrtro, Christian John T., Richardo Dobry, Liam Finn W. D., Leslie F. Harder Jr., Mary Ellen Hynes, Kenji Ishihara, Joseph P. Koester, Sam S. C. Liao, William F. Marcuson III, Geoffry R. Martin, James K. Mitchell, Yoshiharu Moriwaki, Maurice S. Power, Peter K. Robertson, Raymond B. Seeda and Kenneth H. Stokoe II (2001), Liquefaction Resistance of Soil : Summery Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 10, pp. 817~833.