

GIS를 이용한 대규모 매립지반의 액상화발생가능성 평가 Assessment of Potential for Liquefaction in the Large Reclamation Site Using GIS

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 유시동²⁾, Si-Dong Yoo, 박사원³⁾, Sa-Won Park, 이형규⁴⁾, Hyung-Kyu Lee

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

²⁾ 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

³⁾ (주)에스코켈설턴트 과장, Senior Engineer, Esco Engineers & Consultant Co., Ltd.

⁴⁾ 서일대학교 토목과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoil College

개요(SYNOPSIS) : In this study, the potential for liquefaction in the Incheon international airport was calculated by applying the standard penetration test data and laboratory test data to the modified Seed & Idriss(2001) method. The analysis was performed on the non-plastic silty layer and silty sand layer which within the depth of 20m, below 20 of the standard penetration value(N), and the ground water level. Also, each set of data was mapped by using GIS(geographic information systems) and the factor of safety for the potential for liquefaction was obtained by overlapping those layers.

As a result, it was found that there exist potential hazard zone for the liquefaction partially. So, the additional detailed assessments for those are thought to be necessary.

주요어(Key words) : GIS, Liquefaction, Standard penetration test, Modified Seed & Idriss method

1. 서 론

최근 들어 우리나라는 대단위 물류기지의 확보 및 물류비용의 감소를 위해 영종도 신공항, 새만금 간척사업 및 부산 신항만 등과 같은 대규모 매립지 조성사업이 늘어가고 있는 추세에 있다. 그러나 이와 같은 대규모 매립지는 대부분 해성점토 및 준설토 등으로 조성되기 때문에 매립층 및 매립층 하부지반에 대한 내진설계 및 액상화에 의한 피해가 주요한 관심 대상이 되고 있으며, 이를 사전에 예측하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, 1965년 일본 효고현 남부 지진, 1999년 터키 Kocaeli 지진 및 2000년 일본 토토리현 서부 지진 등의 과거 지진기록을 살펴보면, 지진에 의한 액상화의 피해는 사질토지반에만 국한된 것이 아니라 비소성 실트지반을 비롯한 다양한 지반상태에서도 발생할 가능성이 있는 것을 알 수 있으며, 다양한 지반상태에서의 액상화 피해에 대한 중요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 인천국제공항 제 2단계 부지조성공사에서 수행된 표준관입시험 및 실내역학시험 결과를 Seed & Idriss(2001)의 액상화 간편예측식에 적용하여 대상지반의 액상화발생가능성에 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 대상지역에서 제외하였다. 또한 액상화발생가능성에 대한 평가와 관련된 모든 data들을 GIS(geographic information systems)에 적용하여 공간보간을 통해 지도화하였으며, 이렇게 생성된 레이어들간의 연산을 통하여 대상지반의 액상화 발생가능성에 대한 안전율을 지도화하였다. 그러나, 이렇게 도출된 결과는 현장 지반에 대한 동다짐 공법 등과 같은 연약지반처리

공법의 적용이 이루어지기 전의 지반 조사를 통하여 얻은 결론이라는 점을 밝혀 둔다.

2. 액상화 간편예측법

액상화 간편예측법으로는 Seed & Idriss(1971)의 평가법, Iwasaki 등(1978)의 방법 및 Ishihara(1977) 방법 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 「도로설계기준」(한국도로교통협회, 2000)의 경우는 Seed & Idriss(1971)의 평가법을 채택하고 있고, 「항만 및 어항시설의 내진설계 표준서」(해양수산부, 1999)에서는 지진응답해석을 통해 액상화발생가능성 평가를 수행하는 수정 Seed & Idriss(2001)의 평가법이 채택되어 있다. 수정 Seed & Idriss(2001)의 평가법은 기존 Seed & Idriss(1971)의 평가법과는 달리 Pro-shake 등의 지진응답해석 프로그램을 이용하여 대상지반의 깊이별 최대가속도를 산출하고 이를 이용하여 깊이별 최대 전단응력을 직접 산정하는 것이 특징이며, 본 연구에서는 「항만 및 어항설계의 내진설계 표준서」의 기준에서 제시된, 액상화발생가능성을 평가하는데 가장 많이 사용되고 있는 수정 Seed & Idriss(2001)의 평가법을 이용하여 대상 지반의 액상화 평가작업을 수행하였다.

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 표준관입저항치를 역거리내삽법을 이용하여 연속된 레이어(layer) 형태로 도출시켰으며, 이렇게 도출된 레이어를 표 1에서 제시된 각 보정계수들과의 연산을 통하여 보정된 표준관입저항치 레이어를 도출하고 이를 액상화발생가능성 평가에 적용하였다.

표 1. 표준관입저항치에 대한 보정계수(Robertson 등, 1998)

계 수	이용 장치	항 목	수 정
상재압	-	C_N	$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$
에너지비	도넛 해머	C_E	0.5~1.0
관입직경	65mm~115mm	C_B	1.0
로드길이	≤ 3m	C_R	0.75
샘플링 방법	표준 샘플러	C_S	1.0

2.2 지반최대수평가속도(a_{max})의 산정

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 1과 같다.

지반최대수평가속도(a_{max})는 대상지역이 행정구역상으로 지진 I구역에 해당하는 인천광역시에 속하므로 지진구역계수 0.11을 사용하였으며, 대상 구조물이 국제공항으로서 주요구조물에 해당하므로 평균재현주기 1000년에 해당하는 위험도계수 1.40을 적용하였다. 또한, 대상지역이 지진 I구역에 해당하며, 표준관입저항치가 전반적으로 10~20사이인 분포한다는 것을 고려하여 지반특성에 따른 지진계수를 1.45로 산정하였다. 산정된 계수들을 이용하여 해당지역 노두에서의 지반최대수평가속도값을 산정하고, 이를 SHAKE91 프로그램에 이용하여 지진응답해석을 수행하여 액상화 발생 가능 심도에서의 지반최대수평가속도를 산정하였다.

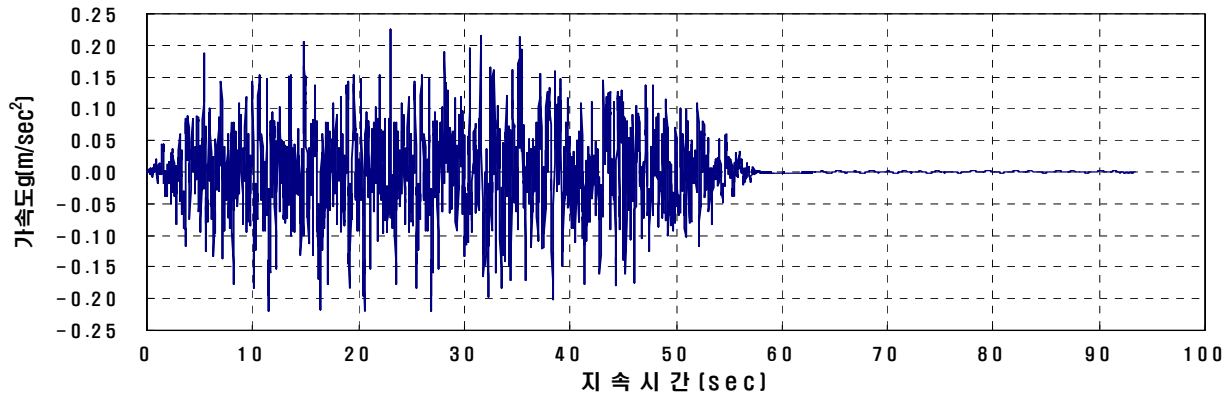


그림 1. 인공지진파의 시간-가속도 이력

2.3 전단응력비(CSR)의 산정

지진시 발생하는 전단응력비(CSR)는 지진응답해석으로 산정한 대상지반의 지반최대수평가속도와 유효상재압 등을 고려하여 다음 식 1에 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 총상재압

σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효상재압

2.4 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$)의 산정

보정된 표준관입저항치에 대하여 식 2의 연산을 수행함으로써 진도 7.5에 대한 액상화 저항응력비($CRR_{7.5}$)를 산정할 수 있으며, 이를 식 3 및 표 2에 의하여 보정함으로써 국내 기준인 진도 6.5에 대한 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$)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 저항응력비

$CRR_{7.5}$: 지진규모 7.5 ! 경우에 대한 액상화 저항응력비

MSF : 지진규모 보정계수

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

표 2. 지진규모에 따른 보정계수

Magnitude (M)	Seed & Idriss(1982)	Idriss*	Ambraseys(1988)
5.5	1.43	2.30	2.86
6.0	1.32	1.76	2.20
6.5	1.19	1.44	1.69
7.0	1.08	1.19	1.30
7.5	1.00	1.00	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67

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

2.5 액상화발생가능성에 대한 안전을 산정

지반의 액상화 저항능력비(CRR)와 지진시 발생하는 전단응력비(CSR)에 대하여 식 4의 연산을 수행함으로써 액상화발생가능성에 대한 안전을 산정할 수 있다.

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

여기서, $CRR_{6.5}$: 지진규모 6.5로 보정된 액상화 저항능력비
 CSR : 지진시 발생하는 전단응력비

3. GIS를 이용한 액상화발생가능성 평가

3.1 대상 지반의 개요

해석대상지역은 행정구역상 인천광역시 중구 영종도와 용유도 일원 인천공항 2단계 건설예정지역으로, 지진 I구역에 해당되며, 그림 2에 도시된 바와 같이, 제 3 활주로, 여객계류장 및 북측제방시설이 그 대상이다. 대상지역은 퇴적층이 5.0~3.0m에 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.

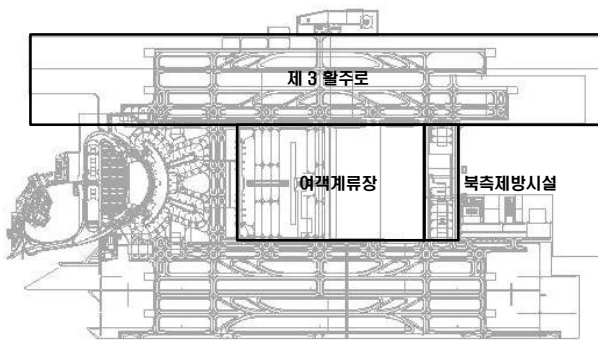


그림 2. 해석대상구역

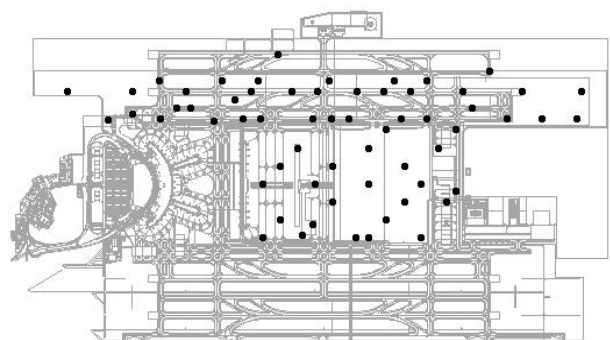


그림 3. 시추공 위치도

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 3과 같다.

3.2 액상화 발생 가능 심도

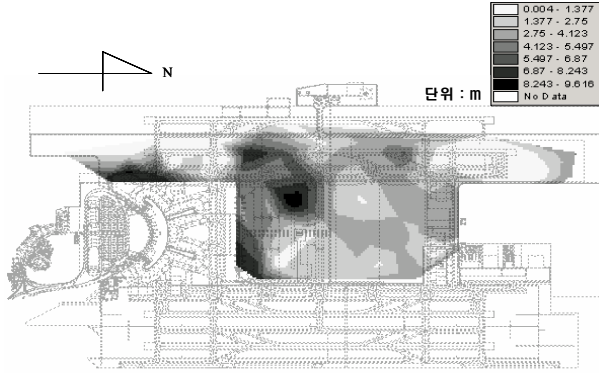


그림 4. 액상화 발생 가능 심도

대상지역의 액상화 발생여부를 판단하기 위하여 표준관입시험 결과 및 실내역학시험 결과를 분석하였으며, 심도 20m 이내에서 표준관입저항치가 20 이하인 실트질모래지반 및 비소성 실트질지반을 해석대상으로 선정하였다. 그림 4는 액상화가 발생 가능한 층이 존재하는 심도를 나타낸 것으로, 액상화 발생 가능 심도는 최대 9.62m까지 분포하고 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 북쪽으로 남쪽으로 갈수록 액상화 발생 가능 심도가 깊어지는 것을 알 수 있다.

3.3 지하수위 분포

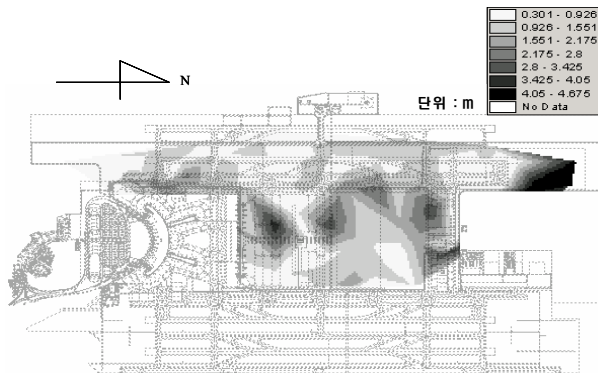


그림 5. 지하수위 분포

그림 5는 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 분포는 상당히 중요한 요소이며, 액상화 발생 지층에서의 유효상재압 및 총상재압 계산시 액상화 발생 가능 심도 레이어 및 지하수위 분포 레이어를 이용하여 연산을 수행하였다.

3.4 표준관입저항치의 분포

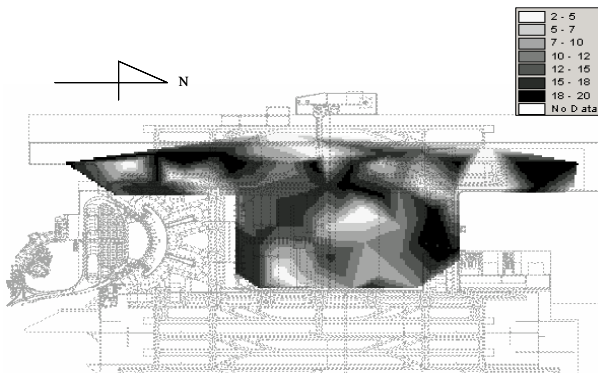


그림 6. 보정된 표준관입저항치의 분포

그림 6은 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

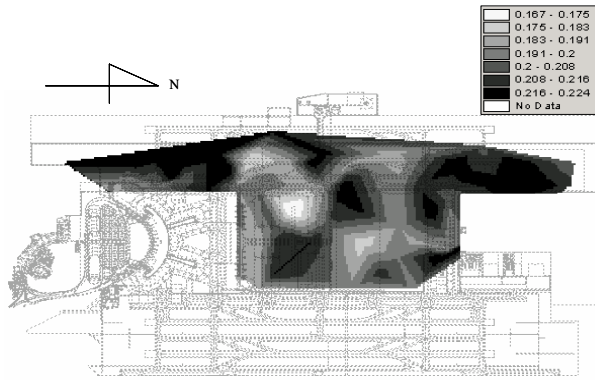


그림 7. 지반최대수평가속도(a_{max})의 분포

그림 7은 액상화 발생 가능 심도에서의 지반최대수평가속도(a_{max})를 나타낸 지도이다. 2.2절에서 명기된 바와 같이 노두에서의 지반최대수평가속도는 지진 구역계수, 위험도계수, 지반특성계수 등을 고려하여 산정되었으며, 이를 인공지진과 생성 프로그램인 *SIMQUE-II*를 이용하여 생성된 인공지진과 함께 *SHAKE91*에 적용하여 지진응답해석을 수행함으로써 액상화 발생 가능 심도에서의 지반최대수평가속도 값을 산정하였다. 또한 이렇게 산정된 각 공별 지반수평최대가속도값을 GIS에 적용하여 지도화하였다.

3.6 전단응력비(CSR) 및 액상화저항응력비($CRR_{6.5}$)의 산정

그림 4에 나타낸 액상화 발생 가능 심도에 대한 레이어나 그림 5에 나타낸 지하수위분포에 대한 레이어를 토대로 총상재압 및 유효상재압을 산정하고, 이를 그림 7에 나타낸 지반최대수평가속도 레이어나 함께 식 1에 대입하여 대상지반의 전단응력비(CSR) 레이어나 도출할 수 있다. 그림 6에 도시된 보정된 표준관입저항치 레이어나 대하여 식 2의 연산을 수행함으로써 진도 7.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어나 도출할 수 있으며, 도출된 진도 7.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어나를 식 3에 적용함으로써 국내기준이 진도 6.5에 대한 액상화 저항응력비 레이어나를 도출할 수 있다. 그림 8은 전단응력비(CSR) 레이어나를 나타낸 것이며, 그림 9는 대상 지역의 진도 6.5에 대한 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$)를 나타낸 지도이다.

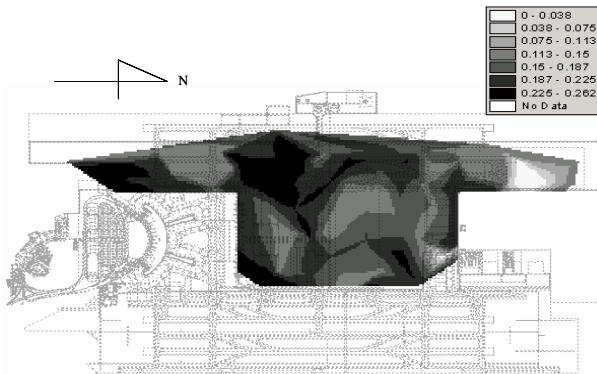


그림 8. 전단응력비(CSR)의 분포

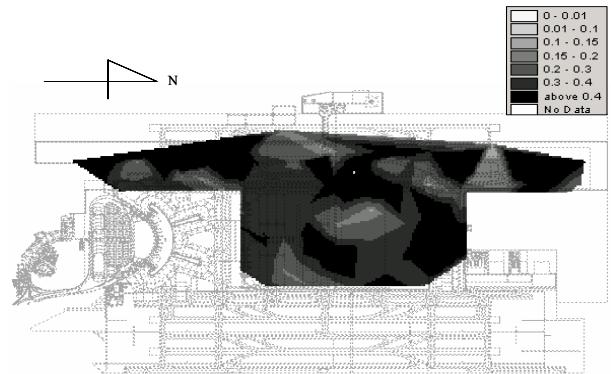


그림 9. 액상화 저항응력비($CRR_{6.5}$)의 분포

3.3 액상화발생 위험도에 대한 안전을 산정

그림 8 및 그림 9에 도시된 전단응력비 레이어나 및 액상화 저항응력비 레이어나를 식 4에 대입함으로써 대상지역의 액상화발생가능성에 대한 안전을 레이어나를 그림 10과 같이 도출할 수 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이 대부분의 지역은 액상화발생가능성에 대한 안전을 기준인 $FS_{liquefaction} > 1.5$ 를 만족하는 것으로 나타났으나, 일부지역에서 안전율의 분포가 1~1.5로 안전을 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.

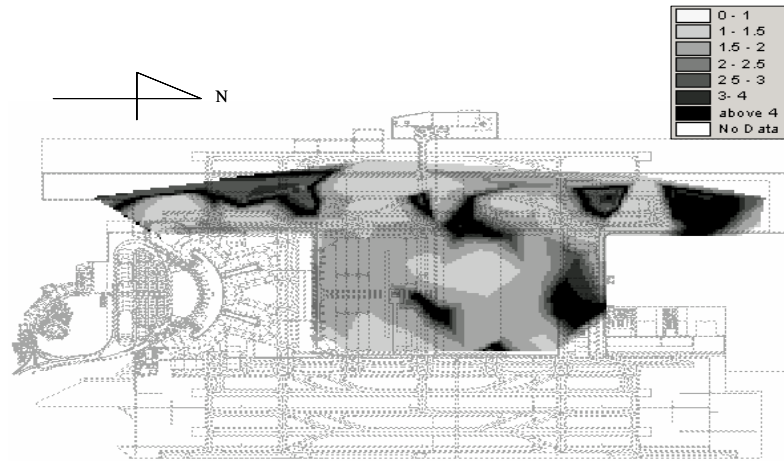


그림 10. 액상화발생가능성에 대한 안전율의 분포

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 표준관입저항치의 분포를 GIS에 적용해 본 결과 일부구간에서 표준관입저항치가 5 이하로 낮게 나타남을 알 수 있었으며, 특히 제 3 활주로 북부지역에서 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 나타났으나, 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. 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 결과를 토대로 상세예측의 범위를 결정하는 것이 보다 합리적일 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 수행과정에서 자료제공에 적극 협조해 주신 유신코퍼레이션 최인걸 전무와 인천공항공사 성기광 대리, 또한 관계자 여러분들께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II).
2. 해양수산부(1999), 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서.
3. 환경부(2001), 폐기물 매립시설의 내진설계 기준연구.
4. Ambraseys, N. N. (1988), "Engineering Seismology," Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 17, pp. 1~105.
5. 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.
6. 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.
 7. 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.
 8. Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, H. 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 of 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake-Resistance Des. of Life-Line Fac. and Countermeasure for Soil Liquefaction*, Vol. 1, pp. 177~204.
 9. Liao, S. and Whitman, R. V. (1996), "Overburden Correction Factors for SPT in sand," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 3, pp. 373~377.
 10. 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 Report NCEER.
 11. 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.
 12. Seed, H. B. and Idriss I. M. (1982), "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes," *Earthquake Engineering Research Institute Monograph*, Oakland, California.
 13. 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.
 14. Yound T. L., 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, Geoffrey 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.