

송도매립지역의 액상화분석

Analysis of Liquefaction in Son-do Reclaimed land

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 김성환²⁾, Sung-Hwan Kim, 오영인³⁾, Young-In Oh

¹⁾ 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Incheon

²⁾ 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Incheon

³⁾ 한국농촌공사 농어촌연구원 농촌자연환경연구소 선임연구원, Senior Researcher, Research Group on Rural natural Environment, Rural Research Institute, KRC

SYNOPSIS : This paper presents the mapping of liquefaction for the Incheon Song-do reclamation area using both the liquefaction potential index(LPI) and the equivalent liquefaction factor of safety(FE). As a result, the mapping of liquefaction based on LPI and FE shows similar distribution pattern. Therefore, the mapping of liquefaction presented in this study will be a convenient index for use when the mapping of liquefaction for the Incheon Song-do reclamation area is drawn up. It will make selection of area that needs specific estimation and areas with adaptation of liquefaction counteraction construction methods for the future reclaimed land with the economical soil investigation.

Key words : Liquefaction, Reclaimed land, Liquefaction potential index, Equivalent liquefaction factor of safety, Mapping of liquefaction

1. 서 론

국내의 경우 내륙지방은 대부분 화강 풍화토로 이루어져 지진시 액상화 발생 가능성이 적으나, 90년대 이후 협소한 국토사정으로 인하여 연안지역에 대한 개발을 통하여 대규모 시설을 건설하는 시공사례가 급증하였다. 특히, 매립을 통해 연약지반을 개량하는 경우가 대부분이므로 일정규모 이상의 지진이 발생할 경우 연안의 매립지에서의 액상화 피해가 발생할 수 있다고 판단된다. 이 논문에서는 한반도의 진양분포도에서, 단층대가 위치하고 지진 발생가능성이 높은 지역 가운데 인천 해안 매립지역을 선정하고 대표적인 경험적 액상화 평가방법인 수정 Seed and Idriss방법을 통하여 액상화 평가를 수행하였다. 또한, 국내에서의 액상화 가능성에 대한 구역도를 작성하는데 있어서 필요한 지수인 등가 액상화 안전율(강규진, 1999)를 제안하고 이것을 공인된 액상화 가능 지수(Liquefaction potential index, LPI)와 비교하여 등가 액상화 안전율의 합리성에 대하여 알아보려고 한다. 또한, 액상화 가능지수와 등가액상화 안전율을 이용하여 실제 인천 해안 매립 지역을 대상으로 액상화 가능성에 대한 구역도를 작성함으로써 앞으로 수행하게 될 국내의 구역도 작성의 가능성에 대하여 알아보았다.

2. 액상화 분석방법

2.1 액상화가능지수

표준관입저항치와 간편법을 이용하여 구한 액상화에 대한 안전율 값은 대상 지점에서 깊이에 따라

서 다르다. 따라서 대상 지역에서 조사 지점이 여러 개일 경우, 깊이마다 다르게 표현되는 안전율을 대상 지점을 대표할 수 있는 하나의 값으로 나타낼 수 없다면 대상 지역에 대한 구역도의 작성은 불가능하다.

Iwasaki가 제안한 액상화 가능지수(Iwasaki, 1978)는 표준관입저항치와 간편법을 이용하여 얻어진 액상화에 대한 안전율을 이용하여 액상화에 대한 구역도를 작성할 수 있도록 하였다. Iwasaki는 다음 식 (1)과 같이 액상화에 대한 안전율을 이용하여 대상 지점을 대표할 수 있는 값을 정량화하였다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (1)$$

여기서, $F(z)$ 는 액상화에 대한 안전율 FL 에 대한 함수로써 $F(z) = 1 - FL$ 의 식으로 표현되며, $FL > 1.0$ 인 경우에는 $F(z) = 0$ 이고 $w(z) = 10 - 0.5z$ 로 나타낸다. 위의 식으로 얻어지는 액상화 가능지수, LPI의 범위는 0에서 100이며 Iwasaki등이 63개의 액상화 발생 지역과 22개의 액상화 미발생지역을 대상으로 액상화 가능지수값을 조사하여 분석한 결과에 의한 액상화 피해의 구분 기준은 다음과 같다. $P_L = 0$ 은 액상화 피해 없음, $0 < P_L \leq 5$ 은 액상화 피해 거의 없음, $5 < P_L \leq 15$ 은 액상화 피해가 발생 $P_L > 15$ 은 액상화 피해가 매우 큰 경우이다. 다음 그림 1은 액상화 가능지수를 산정하는 모식도를 나타낸 것이다. 우선 표준관입시험과 콘관입시험을 통하여 구한 자료를 이용하여 깊이에 따른 액상화에 대한 안전율을 구한다. 여기에 구한 액상화에 대한 안전율에 깊이에 따른 보정계수를 곱하여 액상화 가능지수를 구하게 된다.

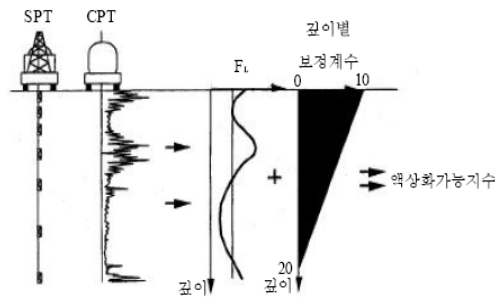


그림 1. 액상화 가능지수 모식도 (Pawan et al., 1998)

2.2 등가액상화안전율

앞절에서 말한 액상화 가능지수와 같은 액상화에 대한 구역도를 작성하는데 필요한 지표가 우리나라에는 아직 제안되어있지 않기 때문에 국내에서의 구역도 작성은 현 시점에서는 불가능하며, 외국에서의 구역도 지표들은 대부분 형식이 국내에서 사용하기에는 낯설기 때문에 국내 지반에 직접 적용할 경우 이용에 불편하다. 또한 국내 지반에 적합한지에 대한 연구가 수행되어있지 않다. 따라서, 국내 사정에 적합한 것으로 예상되는 수정 Seed and Idriss의 방법을 이용하여 구한 안전율과 깊이에 따른 보정계수를 곱하여 조사지점에서의 깊이별로 다른 액상화에 대한 안전율 값을 대표할 수 있는 하나의 값으로 나타내는 등가 액상화 안전율(Equivalent Liquefaction Factor of Safety, FE)을 제안되었다.

$$FE = \frac{\sum F_{s_i} \cdot WF_i \cdot H_i}{H_T} \quad (2)$$

위의 식(2)은 등가액상화 안전율을 구하는 식으로써 F_{s_i} 는 임의의 한 깊이에서의 액상화에 대한 안전

을, WF_i 는 깊이별 가중계수, H_i 는 F_{s_i} 를 구한 심도와 $F_{s_i} - 1$ 를 구한 심도의 차이를 나타내며 H_T 는 대상 지층의 총 두께를 말한다. WF_i 의 값은 지표면에서는 최대값 1.6 그리고 심도 15m에서는 0의 값을 가지도록 선형의 분포로 하여 심도가 깊어질수록 커지는 구속압으로 인해 전체적인 안전율에 기여도가 적은 것을 고려하고 있다. 국내에서 발생한 지진규모를 고려할 때 액상화가 발생할 수 있는 최대심도는 15m로 제안되었기 때문에 이를 이용하여 가중치의 적용범위를 15m 이내로 제한하였다. 그림 2는 등가 액상화 안전율(FE)을 구하는 과정을 그림으로 설명한 것이다. 깊이별 액상화에 대한 안전율을 구하고 여기에 안전율을 구한 깊이에서의 가중치를 곱하는 과정을 거쳐 등가 액상화 안전율을 구한다.

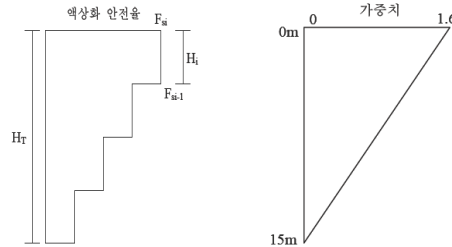


그림 2. 등가액상화 안전율 개념

위 식을 사용하면 대상 지점에서 깊이에 따라 다른 값을 가지는 안전율을 대상 지점을 대표할 수 있는 하나의 안전율의 형태로 표시할 수 있기 때문에 이용시 편리할 것으로 생각되며 국내에서의 액상화에 대한 구역도 작성시에도 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 등가 액상화 안전율의 범위를 해양연구소에서 제작한 내진설계시방서의 내용에 맞추어 1.0이하에서는 액상화에 의한 피해가 예상되는 지점이고, 1.0에서 1.5사이에서는 진동삼축시험과 같은 추가적인 조사가 필요한 지역, 1.5이상에서는 액상화에 대하여 안전한 것으로 하여 이용하기 쉬우면서도 알아보기 편하게 하였다.

2.3 액상화평가방법

지진 응답 해석시에는 지진계수를 바탕으로 산정된 설계지진가속도를 최대가속도로 갖는 인공지진 또는 실지진기록을 기반암에서의 입력자료로 사용한다. 일본의 경우 단주기의 Ofunato항 지진기록과 장주기의 Hachinohe항 지진기록을 주로 이용하고 있으며, 실지진기록이 부재한 우리나라에서도 지반응답해석시 입력지진파로 활용하고 있다. Ofunato, Hachinohe 항의 지진자료는 지반응답해석에 이용한 입력지진파로 그림 3에 나타낸 바와 같다.

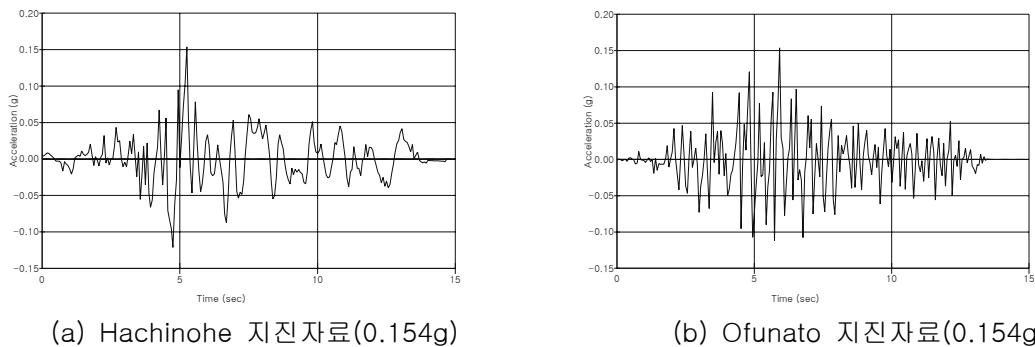


그림 3. 지진응답해석시 설계 지진 가속도 이력곡선

ProShake 프로그램을 사용하여 지반응답해석을 수행한 결과를 바탕으로 깊이에 따른 액상화 안전율을 산정하기 위하여 해양연구원에서 개발하고 사용되고 있는 액상화 평가 프로그램인 Kliq - V1.0을 사용하였다. 본 프로그램의 특징은 1차원 전응력 해석에 의한 지반응답해석을 실시하고 지반응답해석을 수행하지 않고 지반가속도를 직접 입력하여 액상화 간편 예측이 가능하다. 간편 예측에 의한 액상화 안전율 평가는 수정 Seed and Idriss 방법을 사용하며, 상세 예측에 의한 액상화 안전율 평가는 Ishihara 방법을 사용한다. 액상화 평가 프로그램인 Kliq-V1.0은 지반 응답해석을 수행하지 않고 설계지반 가속도를 직접 입력하여 지반의 액상화를 판단하는 옵션을 제공한다.

2.4 Kriging 보간법

Kriging 보간법에서 보간에 사용되는 경중률은 분포된 전체 기지점의 상호관계 즉, 상호간의 거리에 따른 기지점들의 semivariance에 따라, 기지점 분포구조의 함수에 따라 좌우된다. 기지점의 자료를 이용하여 실제계산에 의해 구해진 semivariance에 의해 semivariogram을 그리고, 그려진 semivariogram을 이용하여 여러 가지 수학적 함수모델중의 하나를 선택하고 sill과 range, nugget effect의 유무를 판단한 후, 선택된 수학적 모델을 이용하여 보간하고자 하는 미지점과 대상 지역안의 모든 다른 기지점들간의 공간적인 상호관계 즉 semivariance를 구한다. 다만, semivariogram을 작성하고, 작성된 semivariogram을 이용하여 여러 가지 수학적 함수모델중의 하나를 선택하거나 조합하는데 있어서 어떤 기준이나 방법이 존재하지 않기 때문에, 가장 적합하다고 생각되는 것을 선택하는 것이 중요하다고 할 수 있다(김용운, 1999).

3. 액상화 분석결과

3.1 평가대상지역 선정

이 논문에서는 액상화 평가 대상 지역은 액상화 현상의 발생 가능성이 있는 해안 매립지역 가운데 현재 매립이 진행중인 송도 신도시 매립지역으로 전체 매립지역 중 이미 매립이 완료되어 기반시설 및 구조물이 건설되고 있는 지역을 대상으로 하였다. 대상지역을 시추조사 지점을 고려하여 크게 3구역(A, B, C)으로 구분하였다. 시추조사 자료는 총 96공을 대상으로 액상화 평가를 실시하였다. A구역과 B구역은 지반응답해석시 지층 구분을 1.5m 간격으로 수행하였고, C구역은 지층 구분을 1.0m 간격으로 수행하였다. 구역별로 지층 구분 간격이 상이한 이유는 지반조사를 실시한 심도와 지반응답해석의 심도를 동일하게 반영하였기 때문이다. 그림 4는 연구대상 지역의 수치지도이며 그림 5는 시추조사 위치분포도



그림 4. 연구대상 지역수치지도

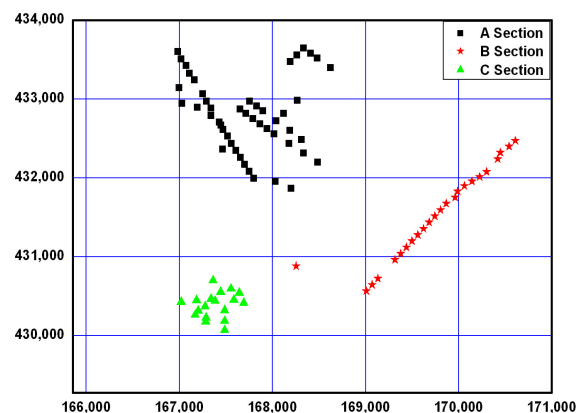


그림 5. 시추조사 지역 위치분포도

3.2 지반응답해석

지반응답해석시 이용될 지진과 기록으로는 1968년 일본의 Hachinohe항에서 발생한 지진기록과 1978년 일본의 Ofunato항에서 발생한 지진기록을 이용하였다. Hachinohe 지진기록의 경우 장주기에 속하는 지진 기록이며 Ofunato 지진기록은 단주기에 속하는 지진기록이므로 주기별 지반응답해석에 유용할 것으로 판단되어 적용하였다. 프로그램 해석시 필요한 흙의 단위중량(γ_t , t/m³)은 실내시험 결과가 있는 경우는 시험 결과값을 적용하였고 실내시험 결과값이 없는 경우는 한국도로공사 도로설계실무편람(1996)을 바탕으로 단위중량을 적용하였다. 또한, 지반조사 자료를 바탕으로 경험적인 방법으로 산정한 최대 전단 탄성계수(G_{max})는 기존 문헌자료를 바탕으로 제시된 관계식을 적용하여 산정하였다. Imai and Tonouchi는 N값으로 최대 전단 탄성계수 산정식을 식 (3)과 같이 제시하였다(선창국, 2007).

$$G_{max} = 325 N_{60}^{0.68} \quad (3)$$

본 논문에서 액상화 평가는 Kliq-V1.0을 사용하였다. 액상화 평가 입력치는 심도, N값, 단위중량과 지반가속도(gal)이다. 입력치 중 지반가속도는 지반응답해석을 실시한 후 심도별로 산정된 최대 지반가속도값을 적용하였다.

액상화 가능지수는 표준관입저항값과 간편 예측법을 이용하여 심도에 따른 액상화에 대한 안전율을 이용하였으며 등가액상화 안전율을 국내 사정에 적합한 것으로 예상되는 수정 Seed and Idriss의 방법을 이용하여 구한 안전율과 깊이에 따른 보정계수를 곱하여 산정하였다.

4. 액상화 분석결과

4.1 지반응답해석결과 및 액상화 평가 결과

Proshake에 의한 지반응답해석 결과와 수정 Seed and Idriss 방법에 의한 액상화 안전율 평가 결과, A구역은 심도별로 안전율의 변화가 있기는 하지만 전반적으로 안전율이 1.0~1.5의 범위에 있으므로 액상화 상세예측이 필요한 경우로 판단된다. B구역은 1개 지역의 경우 안전율이 1.0이하로 액상화 피해가 예상되는 지역으로 판단된다. C구역은 전체 지역 모두 안전율이 1.0~1.5의 범위이므로 상세예측이 필요한 지역으로 판단된다. 표 1은 A구역의 지반응답해석결과를 나타낸 것이고 표 2는 A구역의 액상화 평가결과를 나타낸 것이다.

표 1. 지반응답해석 결과 (A구역)

심도 (m)	(1)		(2)		(3)		(4)	
	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato
1.5	0.156	0.136	0.167	0.147	0.150	0.126	0.159	0.135
3.0	0.156	0.136	0.167	0.147	0.150	0.126	0.159	0.135
4.5	0.156	0.136	0.167	0.147	0.150	0.126	0.159	0.135
6.0	0.158	0.145	0.167	0.147	0.152	0.134	0.161	0.145
7.5	0.158	0.145	0.167	0.147	0.152	0.134	0.161	0.145
9.0	0.156	0.143	0.167	0.147	0.152	0.134	0.161	0.145
10.5	0.156	0.143	0.163	0.155	0.152	0.134	0.159	0.151
12.0	0.156	0.143	0.163	0.155	0.151	0.136	0.159	0.151
13.5	0.156	0.151	0.163	0.155	0.151	0.136	0.157	0.152
15.0	0.156	0.151	0.162	0.166	0.151	0.140	0.157	0.152

표 2. 액상화 평가 결과 (A구역)

심도 (m)	(1)		(2)		(3)		(4)	
	지하수위(m):0.5		지하수위(m):3.0		지하수위(m):4.6		지하수위(m):4.2	
	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato
1.5	2.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.0	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.5	1.3	1.5	0.9	1.0	0.0	0.0	2.4	2.8
6.0	1.6	1.7	0.8	0.9	1.6	1.8	1.8	2.0
7.5	1.4	1.6	1.3	1.4	2.1	2.4	1.7	1.9
9.0	1.7	1.8	1.2	1.4	2.4	2.7	1.3	1.5
10.5	1.4	1.6	1.3	1.4	2.1	2.3	1.7	1.8
12.0	1.0	1.1	1.4	1.5	1.6	1.8	1.7	1.8
13.5	1.1	1.1	1.3	1.4	1.7	1.9	1.6	1.7
15.0	1.4	1.5	1.3	1.2	1.8	2.0	1.6	1.6

4.3 액상화 가능지수 평가결과

대상지역 총 96지점에 대한 액상화 평가 결과를 적용하여 구역별로 액상화 가능지수를 산정하였다. 액상화 가능지수는 Iwasaki가 제안한 액상화 안전율의 함수와 지반심도에 대한 함수를 사용하여 산정하였다. 액상화 가능지수 산정에서 지하수위 상부에 위치하는 심도는 액상화 가능지수 계산에서 제외하였으며 장주기의 Hachinohe항 지진기록과 단주기의 Ofunato항 지진기록에 대하여 실시하였다. A구역은 A-(6), A-(8), A-(16), A-(25), A-(26), A-(49) 지역의 경우 액상화 피해 정도를 파악해 볼 때 액상화 피해가 발생하는 지역임을 알 수 있으며 이외의 45개 지역에서는 액상화 피해가 거의 없는 지역으로 판단된다. B구역은 B-(6) 지역은 액상화 피해가 매우 크므로 액상화에 대한 대책이 필요한 지역이며 B-(3) 지역은 액상화 피해가 발생 가능한 지역임을 알 수 있다. C구역은 C-(2), C-(3), C-(5), C-(8), C-(12), C-(13), C-(18) 지역은 액상화 피해가 예상되는 지역이며 이외의 지역에서는 액상화 피해가 거의 없는 지역임을 알 수 있다.

4.4 등가액상화안전율 평가결과

액상화 가능지수와 더불어 액상화 구역도 작성을 위한 지표로서 등가 액상화 안전율을 총 96 지역에 대하여 산정하였다. A구역은 A-(10), A-(11), A-(27), A-(42) 지역은 등가 액상화 안전율이 1.5 이상으로 액상화에 대하여 안전한 지역임을 알 수 있으며, A-(1), A-(6), A-(7), A-(14), A-(19), A-(20), A-(29), A-(44) 지역은 추가적인 조사가 필요한 지역으로 판단할 수 있다. 이외의 39개 지역은 등가 액상화 안전율이 1.0 이하이므로 액상화 피해가 예상된다. B구역은 15개 지역은 액상화에 대하여 안전한 지역이며 B-(13), B-(23), B-(26) 지역은 추가적인 조사가 필요한 지역이고 B-(3) 등 8개 지역은 등가 액상화 안전율이 1.0 이하이므로 액상화 피해가 예상되는 지역이다. C구역은 C-(15), C-(19) 지역은 추가적인 조사가 필요한 지역이며 이외의 17개 지역은 액상화 피해가 예상되는 지역이다. 또한, 지진기록에 의한 결과는 액상화 안전율 평가 결과와 동일한 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

4.5 액상화구역도 작성 결과

그림 6과 그림 7의 송도지역 액상화 구역도 작성 결과 구역도 작성 지표로 활용한 액상화 가능지수와 등가 액상화 안전율의 적합성을 분석하였다. 구역도 작성은 장주기의 Hachinohe항 지진기록과 단주기의 Ofunato항 지진기록에 대하여 작성하였다. 정확하게 유사하지는 않지만 액상화 가능지수가 높은 지역은 등가 액상화 안전율이 낮은 것으로 분석되어 이 논문에서 액상화 구역도 작성을 위한 작성 지표로서 액상화 가능지수와 등가 액상화 안전율은 적합한 것으로 판단된다.

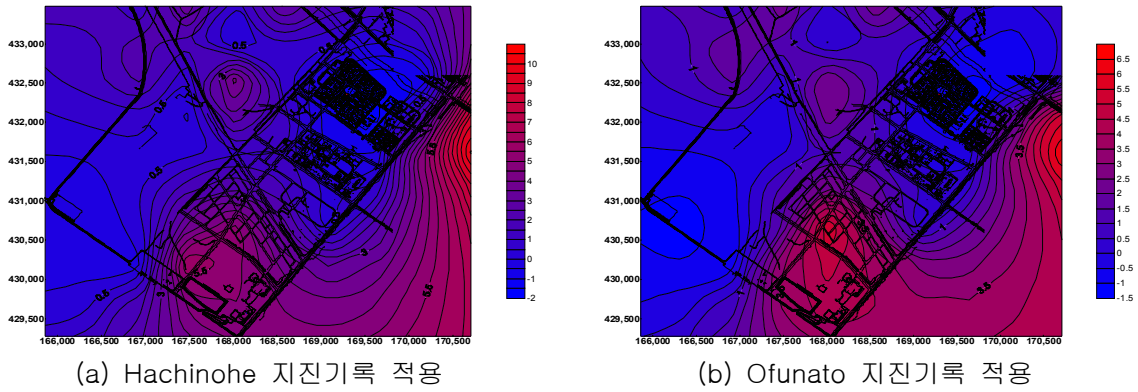


그림 6. 액상화 구역도 작성결과 (액상화 가능지수 적용)

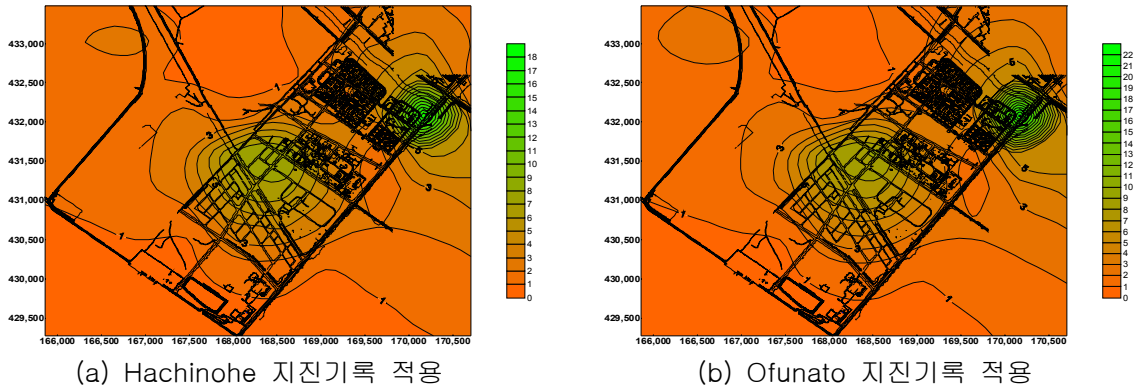


그림 7. 액상화 구역도 작성결과 (등가 액상화 안전율 적용)

5. 결론

이 논문에서는 인천 해안 매립지역을 대상으로 총 96개의 지역에 대한 지반조사 자료를 바탕으로 액상화 평가를 수행하였다. 대상 지반의 지반응답해석을 수행하고 그 결과를 이용한 수정 Seed and Idriss 방법을 적용하여 액상화 간편예측을 실시하고 액상화 안전율을 산정하였다. 액상화 평가 결과와 액상화 구역도 작성을 위한 액상화 가능지수와 등가 액상화 안전율을 산정하여 액상화 구역도를 작성하였다. 각각 해석 및 평가 결과에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 지반응답해석 결과와 액상화 안전율 평가 결과, A구역은 심도별로 안전율의 변화가 있기는 하지만 전반적으로 안전율이 1.0~1.5의 범위에 있으므로 액상화 상세예측이 필요한 경우로 판단된다. B구역은 1개 지역의 경우 안전율이 1.0이하로 액상화 피해가 예상되는 지역으로 판단된다. C구역은 전체 지역 모두 안전율이 1.0~1.5의 범위이므로 상세예측이 필요한 지역으로 판단된다.
2. 액상화 가능지수 산정결과와 등가액상화안전율 산정결과를 비교할 때 액상화 가능지수가 큰 지역은 등가액상화 안전율이 낮은값을 가진다. 액상화 가능지수와 등가액상화안전율 산정결과 상세예측이 필요한 경우에 대한 분석이 추가적으로 요구되나 전반적으로 구역별로 각각의 결과는 액상화 가능지수가 큰 지역은 등가액상화 안전율이 낮은값을 가진다.
3. 액상화 구역도 작성결과 액상화 가능지수로 작성된 구역도와 등가액상화 안전율로 작성된 구역도가 유사함에서 알 수 있듯이 이 논문에서 액상화 구역도의 지표로 제시한 액상화 가능지수와 등가액상화

화 안전율의 개념이 액상화 구역도 작성의 지표로서 적절하다고 판단되며 향후 인천 해안 매립지역의 구역도 작성에 활용될 것으로 기대한다.

(주) 이 논문은 현재 매립이 완료되고 기반시설이 시공중인 매립지반에 대한 지반응답해석 및 액상화 평가를 실시한 결과이다. 매립지반의 하부를 기반암으로 가정하였고 실제 지층 분포와는 상이할 가능성이 있다. 또한 동적물성치에 대한 연구는 현재 계속 진행중에 있다.

참고문헌

1. 강규진(1999), 국내 연안지역의 액상화 발생 가능성 구역도 작성에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
2. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II), pp. 29~41, pp. 257~273.
3. 김용운(1999), GIS 환경에서 Kriging 보간법을 이용한 이동 오염원 배출량 산정에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교 환경대학원.
4. 선창국, 한진태, 최정인(2007), "지반 응답 해석 Round Robin Test의 입력 지진파 및 물성에 관한 고찰", 2007 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 266~292.
5. 한국도로공사(1996), 도로설계실무편람(토질 및 기초), pp. 26~28.
6. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S.(1978), "A Practical Method For Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", Proceedings of the Second International Conference on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, sponsored by National Science Foundation UNESCO, San Francisco, California, Vol. 2, pp. 885 ~ 896.
7. Pawan, K. D., Hoyos, R. L. Jr, Macari, E. J.(1998), "Assessment of Liquefaction Potential of Western Puerto Rico", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE , Vol 1, Geotechnical Special Publication No.75, August, pp. 530~541.