

국내의 액상화 구역도 작성 기법에 관한 연구 Study on Mapping Method of Liquefaction Hazard Potential in Korea

강규진* 박인준** 최재순*** 김수일***
Kang, Gyu-Jin Park, Inn-Joon Choi, Jae-Soon Kim, Soo-Il

ABSTRACT

In this study, liquefaction hazard potential was assessed by modified Seed and Idriss method and maps of liquefaction hazard potential utilized by LPI(Liquefaction Potential Index) and FE(Equivalent Liquefaction Factor of Safety) were constructed in two dimensional space. Comparisons of liquefaction hazard maps assessed by LPI and FE are represented to verify the FE method proposed in this study. Based on the results of comparing liquefaction hazard map using LPI and FE, there is similar distribution trend of zonation indices. From the result of comparison of liquefaction hazard maps of FE base using Hachinohe and Ofunato PGA(Peak Ground Acceleration) data at one site of port and harbor in Korea, the values of FE in liquefaction hazard map using Hachinohe data are underestimated. And in the view of quantitative analysis, FE is more convenient than LPI, because types of results from FE are factor of safety that widely used in geotechnical practice and aseismic design standard for port and harbor in Korea.

1. 서 론

90년대 들어 빈발하고 있는 지진으로 인하여 전세계적으로 상당한 인명 및 재산상의 피해가 증가되었다. 그로 인한 지진에 대한 국내의 관심이 고조되고 있는 사정이다. 또한 지진에 의한 연약 사질토 지반에 빈번히 발생하는 액상화에 대한 안정성 수행 평가도 함께 증가되고 있다. 그러나 국내 액상화 평가방법들은 표준관입시험이나 콘관입시험이 이루어지는 시추공에 대하여 깊이별로 액상화에 대한 안전율을 산정하고 있기 때문에 이보다 광범위한 지역에 대하여 전체적인 액상화에 대한 안정성 검토에는 어려움이 많다. 광범위한 지역의 액상화 발생 가능성을 알아보는 방법으로는 구역도를 작성하는 방법이 있으며 대표적인 방법으로는 Youd의 액상화 강도지수(Liquefaction Severity Index)와 Iwasaki는 구역도 작성 수행 지표인 액상화 가능지수, Liquefaction Potential Index(LPI)가 있다.

본 연구에서는 광범위한 지역에 대하여 액상화에 대한 안정성을 알아볼 수 있는 구역도에 대하여 알아보고 국내 지형에 알맞는 구역도 작성 방법을 제안하고자 한다. 그리고 이것을

* 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사후과정
*** 연세대학교 토목공학과 박사과정
**** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사

Iwasaki가 제안한 구역도 작성방법인 액상화 가능지수(LPI)와 비교하여 국내 지반에 대한 적합성을 알아보았다.

2. 액상화 구역도 작성

현재까지 제안된 여러 액상화 간편해석법들은 특정 지점에서 깊이별 액상화에 대한 안전율을 구할 수 있다는 점에서 유용하게 쓰일 수 있으나 이를 광범위한 지역으로 확대 적용하는 데에는 사용에 어려움이 많다. 따라서 이를 보완하여 광범위한 지역에 대한 액상화 발생 가능성을 알아보는 방법으로는 구역도를 작성하는 방법이 있으며 Iwasaki는 액상화에 대한 안전율을 이용하여 구역도를 작성하는 방법³⁾을 제안하였다.

2.1 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index, LPI)

Iwasaki는 1982년 액상화에 대한 피해가 어느 정도 가능한지를 식 (1)을 이용하여 정량적으로 나타냈다.

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

여기서, z 는 지표면에서의 깊이(m)를 나타내고 $F(z)$ 는 액상화에 대한 안전율(F_L)의 함수로써 안전율이 1보다 작은 경우에는 $1-F_L$ 로 나타내지만 1보다 큰 경우에는 0이다. 그리고 $w(z)$ 는 깊이에 따른 가중치로써 $10-0.5z$ 의 식으로 나타낸다.

식 (1)에서 P_L 의 값은 1에서 100사이의 범위를 가지며 P_L 의 범위에 따른 액상화에 대한 피해정도는 표 1과 같다.

표 1 P_L 의 범위에 따른 액상화 피해정도

LPI 범위	액상화 피해정도
0	피해 없음
$0 < P_L \leq 5$	피해정도가 적음
$5 < P_L \leq 15$	중간정도의 피해
$P_L > 15$	피해정도가 큼

2.2 등가 액상화 안전율(Equivalent Liquefaction Factor of Safety, FE)

국내에서 수정보완없이 P_L 을 이용하여 액상화 구역도를 작성하는 것은 다소 무리가 있다고 판단하여 국내 사정을 고려한 수정 Seed와 Idriss의 방법을 이용하여 안전율을 구한다. 이때 안전율은 깊이에 따른 보정계수를 곱하여 조사지점에서의 깊이별로 다른 액상화에 대한 안전율 값을 대표할 수 있는 하나의 값으로 나타내는 등가 액상화 안전율(FE)을 제안하였다.⁶⁾

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

식 (2)는 등가 액상화 안전율을 구하는 식으로써 F_{s_i} 는 임의의 한 깊이에서의 액상화에 대한 안전율, 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 그림 2에서 나타낸 바와 같이 지표면에서는 1.6 그리고 심도 15m에서는 0의 값을 가지도록 선형의 분포로 하여 심도가 깊어

질수록 커지는 구속압으로 인하여 전체적인 안전율에 기여도가 적은 것을 고려하고 있다. 또한 20세기 들어 국내에서 발생한 지진기록을 토대로 하여 산정한 국내 액상화 저항강도를 근거로 하여 액상화가 발생할 수 있는 최대심도는 15m로 제안되었기 때문에 이를 이용하여 가중치의 적용범위를 15m 이내로 제한하였다.

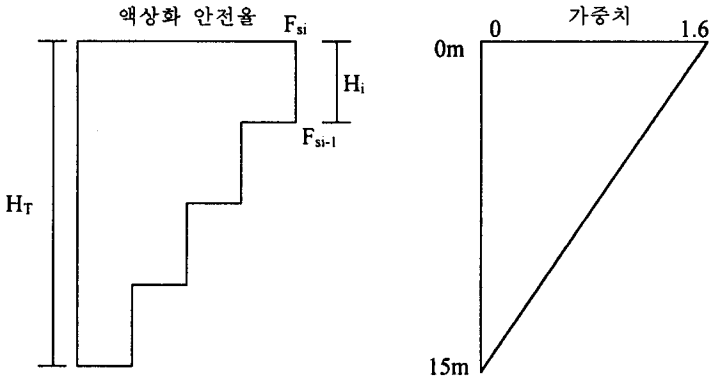


그림 2 등가 액상화 안전율의 개념

또한 등가 액상화 안전율의 범위를 해양연구소에서 제작한 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서의 내용에 근거하여 안전율 1.0이하에서는 액상화에 의한 피해가 예상되는 지점이고, 1.0에서 1.5사이에서는 진동삼축시험 또는 진동대 시험과 같은 추가적인 시험이 필요한 지역, 1.5이상에서는 액상화에 대하여 안전한 것으로 규정하여 이용의 편의를 도모하였다.

3. 액상화 구역도 작성

본 연구에서는 국내 연안지역중 광양만 일대와 부산의 가덕도 지역 일부를 선정하여 액상화 구역도를 작성하였다. 우선 선정하여 지진 재해도상에서 구한 설계지진가속도와 Shake91을 이용하여 지진응답해석을 수행하였다. 또한 이 결과를 이용하여 수정 Seed와 Idriss방법을 이용한 액상화 평가를 수행하고 이 결과를 이용하여 액상화 구역도를 작성하였다. 또한 P_L 과 FE에 의한 결과를 비교하여 FE의 적합성을 검증하고 나머지 한 곳에 대하여 FE를 이용하여 구역도를 작성하였다.

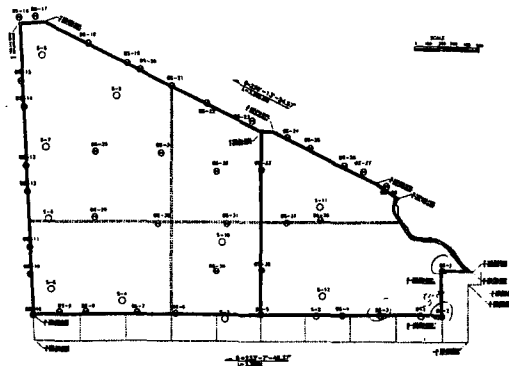
3.1 P_L 과 FE의 비교

그림 3은 국내 연안의 광양만 지역을 대상으로 작성한 시추위치도이며 A지역으로 명명하였다. 이 지역은 퇴적층, 풍화대, 그리고 기반암으로 구성되어 있으며 퇴적층은 실트에서 자갈까지 다양하게 구성되어 있다. 퇴적층의 두께는 1.3m에서 21.0m까지 다양하며 표준관 입저항치는 0에서 5가량으로 매우 연약한 것으로 나타났다. 풍화대는 0.3m~3.9m에 분포하며 기반암의 경우 2.7m~22.3m에 위치하고 있다. 그림 3 (a)는 원시추위치도이며 그림 3 (b)는 A지역에 대하여 구역도를 작성하기 위하여 구성한 구역도망이다. 구역도를 작성하기 위하여 시추공별로 지진응답해석과 함께 액상화 평가를 수행하였으며 이 때 이용된 시추공의 수는 총 40개이다. 다음의 표 2는 지진응답해석에 이용된 조건을 나타내고 있다.

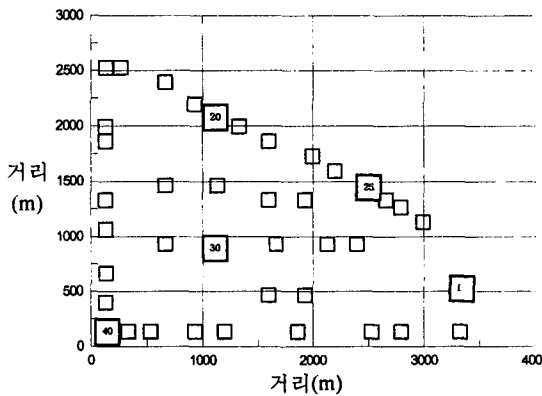
표 2 지진응답해석 수행 조건

설계지진가속도	0.12g
설계지진규모	6.5
해석에 이용된 지진기록	Hachinohe, Ofunato
지하수위 위치	0m(지표면)

표 2에서의 설계지진가속도는 붕괴방지 1등급에 해당하는 평균재현주기 1000년의 지진 재해도상에서 A지역의 가속도를 읽은 값이며 지진규모 6.5는 국내에서 발생한 지진 규모를 일시적으로 6.5로 산정한 값이다. 지진응답해석에서는 장주기와 단주기 특성을 대표하는 Hachinohe지진기록과 Ofunato지진기록을 이용하여 지진응답해석을 수행하였다. 따라서 이 두 지진기록을 이용함으로써 지반의 주기에 따른 특성을 알아낼 수 있다. 구역도 작성시 대상지역은 지반구조물이 위치하게 되는 연안지역을 대상으로 하며 이들 지역은 대부분 매립을 통해 조성된다. 따라서 이를 고려하기 위하여 A지역에 깊이 10m지점까지 매립치환한 것으로 가정하였다. 이 때, 지하수위의 위치를 원지반의 지표면으로 하여 대상지반이 완전 포화된 것으로 가정하였다.



(a)



(b)

그림 3 A지역의 시추위치도

표 3 A지역 액상화 구역도 지표 결과

지역	P _L		FE	
	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato
1	11.56	13.44	1.24	0.96
13	8.91	4.94	0.88	1.29
14	10.74	11.69	0.87	0.86
16	6.60	4.20	1.00	1.22
17	1.89	2.52	1.34	1.15
18	0	0	2.94	3.88
20	7.22	9.82	1.35	1.15
22	8.94	11.55	1.39	1.01
23	15.24	12.63	0.62	0.75
25	6.18	5.61	2.35	1.72
27	6.08	5.60	1.47	1.76
28	6.37	6.08	1.71	1.95
30	13.08	16.16	0.82	0.87
31	15.33	17.09	0.78	0.76
33	12.52	14.20	1.03	1.07
34	10.40	11.34	1.18	0.84
36	14.61	17.51	0.80	0.84
37	11.49	12.69	0.88	0.85
39	9.87	9.81	0.90	0.89
40	6.42	9.77	1.01	0.95

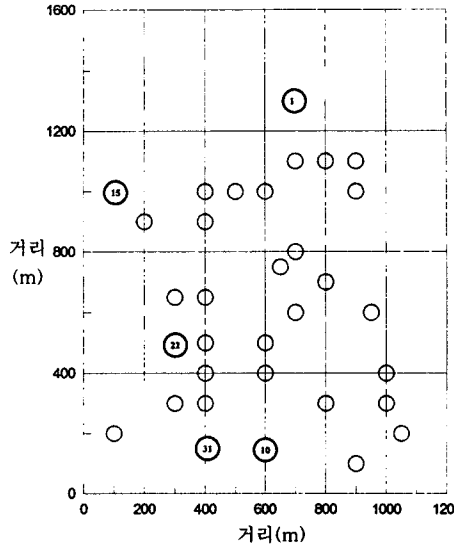
표 4 A지역의 FE 정확도 분석

	Hachinohe 지진기록	Ofunato 지진기록
일치(①)	29개소	22개소
과소평가(②)	9개소	14개소
과대평가(③)	2개소	4개소
①+② (%)	95%	90%

표 3은 A지역에서 구역도를 작성하는데 필요한 두 지표인 P_L과 FE의 값을 구하여 비교한 것이다. 그리고 표 4는 표 3의 결과를 이용하여 P_L을 기준으로 하여 FE의 정확도를 분석한 것이다. 즉 P_L의 결과와 일치하는 지역, P_L보다 과소평가하는 지역, P_L보다 과대평가하는 지역으로 나누어 각각 백분율로 나타내었다. 그리고 일치하는 지역과 과소평가하는 지역을 안전측의 결과를 나타내는 것으로 보고 두 부분의 결과를 P_L에 대한 FE의 정확도로 산정하였다. 표 3의 결과를 보면 지진기록에 상관없이 P_L의 결과와 FE의 결과가 대체로 일치하거나 과소평가하는 경향을 보임으로써 안전측의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 FE를 P_L대신에 이용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.2 액상화 구역도 작성

그림 4는 액상화 구역도를 작성한 국내 연안 지역중에서 부산에 위치한 B지역의 시추위치를 나타낸 것이다. B지역의 대략적인 지질상태를 살펴보면 시추위치는 모두 33개이고, 두께 1.4m에서 48m의 퇴적층이 존재하며 2.7m에서 41.7m 깊이에 풍화암층이 존재하고 있다. B지역에 대하여 3.1절의 표 2의 조건을 이용하여 지진응답해석을 수행하였으며 항만 내진설계표준서에 의거하여 액상화 평가를 수행한 후 FE를 이용하여 액상화에 대한 구역도를 작성하였다.



(a) B지역의 시추위치
그림 4 대상지역의 시추위치도

표 5는 B지역을 대상으로 하여 지진응답해석과 액상화 평가를 수행하고 이를 이용하여 구역도 작성에 필요한 FE의 값을 구한 것이다.

표 5 B지역의 액상화 구역도 지표 결과

지역	B지역	
	Hachinohe	Ofunato
1	1.07	1.00
2	1.15	1.13
9	1.38	1.48
10	1.08	1.12
11	1.19	1.34
13	1.14	1.07
15	0.85	1.13
16	0.89	0.85
17	2.83	3.39
18	0.81	1.18
21	1.67	1.59
22	1.04	1.06
23	0.89	0.90
26	1.07	1.07
27	1.09	1.11
30	0.87	0.89
31	0.98	0.91
32	0.82	1.01
33	1.03	0.91
34	1.05	0.93

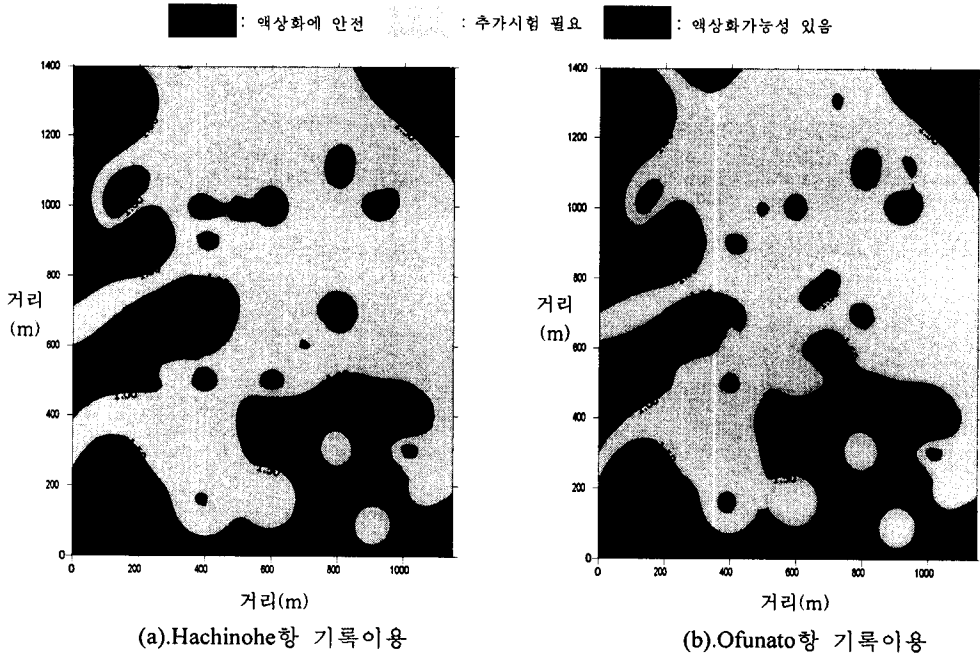


그림 5 B지역에 대한 액상화 구역도

그림 5를 보면 지진기록에 따른 두 구역도의 전체적인 형상은 서로 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 Hachinohe 지진기록을 이용했을 때 Ofunato 지진기록을 이용한 구역도보다 불안정한 구역인 붉은색 지역이 부분적으로 넓게 존재하고 있는 것을 알 수 있으며 상대적으로 안정지역인 파란색 부분이 적은 것을 알 수 있다. 따라서 장주기 특성을 대표하는 Hachinohe지진기록에 의한 구역도 결과가 더 불안정한 것으로 나타남으로써 장주기파에 의한 피해가 더 클 것이라는 것을 예상할 수 있으며 장주기파를 이용한 해석이 안전측의 결과를 보이는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

국내 광양지역의 한 지역을 대상으로 하여 P_L 과 FE를 비교하여 FE의 적합성을 알아보았고 이 결과를 바탕으로 국내 연안의 부산 가덕지역에 대해 FE를 이용한 액상화구역도를 작성하였다.

광양지역을 대상으로 하여 P_L 과 FE를 비교한 결과, P_L 을 기준으로 하였을 때 FE의 값이 일치하거나 과소 평가하는 경향을 보임으로써 FE를 이용하는데 적합성을 확인하였다. FE를 이용하여 부산의 가덕지역을 선정하여 지진응답해석, 액상화 평가를 수행한 후 이 결과를 이용하여 구역도를 작성한 결과 Hachinohe지진기록을 이용하였을 때 Ofunato지진기록에 의한 결과보다 과소평가하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 특히 두 지진기록에 의한 구역도의 전체적인 형상은 비슷하게 나왔으나 부분적으로 불안정한 지역과 추가시험이 필요한 지역이 단주기인 Ofunato 지진기록에 의한 결과보다 장주기인 Hachinohe지진기록에 의한 결과가 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 주기특성이 다른 두 지진기록에 따라서 다른 경향을 보임으로써 지반이 장주기파에 의한 피해를 더 많이 받음을 확인할 수 있었고 이 지역에 대하여 장주기파를 이용한 해석을 수행할 경우, 안전측의 결과를 이끌어 낼 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로 FE는 P_L 과 유사한 결과를 이끌어내면서 안전율의 형태

로써 이용에도 편리하기 때문에 국내에서의 액상화에 대한 구역도 작성에 이용할 경우 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP(N2-01-01-A-01) "지진재해 대응기술 개발사업"과 KEERC(97K3-1301-02-01-3) "기초와 지반의 지진응답특성 규명연구"의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Youd, T. L. and Perkins, D. M.(1987), "Mapping of Liquefaction Severity Index", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No.11
2. The Japanese Geotechnical Society(1999), "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards",
3. Pawan, K. D., Hoyos, R. L. Jr, and 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
4. 한국해양연구소(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계표준서, 해양수산부
5. 강규진(2000), "국내 연안지역의 액상화 발생 가능성 구역도 작성에 관한 연구", 연세대학교 대학원 석사학위 논문
6. 신윤섭, 박인준, 최재순, 김수일(1999), "국내 발생 지진규모를 고려한 액상화저항강도 산정", 한국지반공학회 논문집, 제15권 제 6호, pp.307-317.