

층상지반에 대한 액상화 평가방법 및 분석

Analysis and Evaluation of the Liquefaction on Layered Soil

이상훈* 유광훈**

Lee, Sang-Hoon Yoo, Kwang-Hoon

ABSTRACT

Liquefaction potential on the specific site of nuclear power plant is analyzed and reviewed. The layered site for this study consists of silt and sand. Based on the limited available soil data, maximum shear strength at critical locations using Seed & Idriss method and computer program SHAKE is calculated, and liquefaction potential is reviewed. Seismic input motion used for the assessment of liquefaction is the artificial time history compatible with the US NRC Regulatory Guide 1.60. Assessment results of the liquefaction are validated by analyzing to the other typical soil foundations which can show the effects of foundation depth and soil data.

1. 서론

지난 30 여년동안 지반의 액상화에 관한 연구가 상당히 많이 수행되었으며, 이러한 연구는 주로 지진이 많은 미국이나 일본을 비롯하여 여러 나라에서 수행되고 있다. 최근 1995 년에 일본 고베 지역에 발생한 지진으로 지반의 파괴 즉 지반 액상화로 인한 피해가 국제적으로 산업계에 큰 영향을 줌에 따라 더욱 지반의 액상화에 대한 관심이 고조되고 있는 추세이다.

액상화 현상은 지반에 가해진 진동하중으로 간극수압은 상승하고 지반의 유효응력은 감소하여 결국 포화사질토가 외력에 대해 전단저항을 잃게 되는 현상으로서 토목구조물에 상당한 피해를 주고 있다. 이러한 피해를 최소화하기 위해서는 사전에 지진동에 의한 액상화 예측을 철저히 필요로 하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 특정한 지반조건에서 이미 적용되고 있는 액상화 평가 기법들을 이용하여 액상화 발생에 대한 해석결과를 상호 비교하고, 예측에 대한 일관성이 확보될 경우 제한적인 지반조건에서 액상화 발생 가능성을 예측해보고자 한다. 지진동을 받는 지반의 액상화 포텐셜은 전단응력에 의한 방법과 전단변형률에 의한 방법으로 평가 할 수 있으며, 이 가운데 전단응력에 의한 방법이 흔히 사용되고 있다. 이 방법은 지반진동으로 지층에 발생될 것으로 예상되는 동적전단응력과 액상화 유발에 필요한 전단강도를 비교하여 안전여부를 평가하는 기법이다.

본 연구에서는 원자력 발전소내 도수로의 특정지역을 대상으로 현재의 층상지반에 대하여 평가 기법별로 상호결과를 비교분석 한 후, 조사된 지반의 해석결과에 영향을 주는 입력요소에 대한 영향평가를 수행함으로써 분석결과와 타당성을 확보하는데 목적이 있다. 적용되는 평가 기법으로는 첫번째, 등가선형해석을 기초로 지반응답해석을 수행하는 전산프로그램 SHAKE 를 이용하는 방법 두 번째, 경험에 의한 방법으로는 Seed 와 Idriss, Iwasaki 와 Tatsuka, Ishihara, Eurocode 등에 의한 방법 중 일반적으로 많이 적용하고 있는 Seed 와 Idriss 의 방법을 적용하였다. 전체적으로 본 연구의 진행과정은 2 장에서 대상지역에 대한 층상지반조건 특성치를 기술하고, 3 장에서는 제한적인 지반조건 특성치를 고려하여 두 가지 평가기법에 대한 절차와 계산과정을 기술하였다. 그리고 4 장과 5 장에서는 본 조사지반에 대한 액상화 평가결과와 평가결과의 타당성을 보이기 위한 별도의

* 한국전력기술(주) 책임연구원, 정회원, ** 한국전력기술(주) 책임연구원.

해석을 수행하고 상호 결과를 비교하였다.

2. 대상지역의 지반 특성치

본 연구에서 조사된 곳은 1 개 매립층(모래/자갈)과 8 개 퇴적층(모래/자갈/실트)과 1 개 풍화대 등 총 10 개의 층상으로 구성된 지반으로서 구체적 조사결과는 표 1 과 같다. 또한, 액상화 평가 단계에서 조사되어 액상화 평가에서 이용할 수 있는 자료는 표준관입시험값(N)이 유일한 상태였으며 그 밖의 다른 지반 입력 자료는 참고문헌의 대표적인 값들을 적용하였다. 표준관입시험값의 분포는 대체적으로 매립층은 N 값이 9~29 이고, 퇴적층 및 풍화대에서의 N 값은 10~39 인 것으로 조사되었다. 따라서, 보다 구체적인 지반 조사에 의한 다른 실험값이 제시된다면 본 연구에서 제시된 평가결과는 달라질 수도 있다.

표 1. 대상지역의 지반특성

구 분	토층	심도(m) (표고기준)	N 치		상대밀도 및 연경도	Sample No.
			분포	평균		
매립층	모래/자갈	+1.9 ~ -2.6	9~29	19	Loose ~ Medium	S1
퇴적층	실트질점토	-2.6 ~ -4.6	12	12	Stiff	S3
퇴적층	모래	-4.6 ~ -15.9	19~50	28	Medium ~ Very dense	S4
퇴적층	실트질점토	-15.9 ~ -18.6	22	22	Very stiff	S10
퇴적층	모래	-18.6 ~ -22.6	39~44	41	Dense	S11
퇴적층	실트/자갈	-22.6 ~ -30.8	10~32	20	Stiff ~ Hard	S13
퇴적층	모래/자갈	-30.8 ~ -35.6	20~50	32	Medium ~ Very dense	S17
퇴적층	실트질점토	-35.6 ~ -37.1	17	17	Very stiff	S20
퇴적층	모래/자갈	-37.1 ~ -45.5	14~48	30	Medium ~ Dense	S21
풍화대	풍화토	-45.5 ~ -48.0	26~28	27	Dense	

3. 평가방법

액상화 평가를 위하여 지반의 전단강도를 계산하게 되며, 전단강도는 크게 실험에 의한 방법, Seed & Idriss 방법과 같은 경험식에 의한 방법 그리고 자유장 해석에 의한 방법 등을 통해서 구할 수 있으며, 본 연구에서는 자유장 해석과 경험식에 의해 전단강도를 결정하여 액상화 가능성을 평가하였다.

가. 지반의 자유장 해석에 의한 방법

본 연구의 조사지반에 대한 자유장 해석은 전산프로그램 SHAKE 를 이용하여 수행하였다. SHAKE 는 지반과 표층지반을 지반특성별로 나누고, 기반암에서 지진파를 발생시켜 표층 및 하부 지반의 응답을 예측하는 것으로서, 실제적인 지반거동을 수치해석의 기법을 통해 사전에 분석하는 전산프로그램이다. 이를 이용하여 지반의 각층에 대한 가속도, 응력도 및 변형도를 전달합수 및 응답파형 등 다양한 형태로 결과를 도출시킬 수 있다. 본 연구에서는 실제 조사된 깊이만을 층상 지반으로 가정하여 해석에 고려하였으며, 그 이하의 깊이에 대해서는 기반암으로 가정하였다. 한편, 입력운동으로서 현재 원자력발전소 설계기준인 미국 원자력규제위원회 RG1.60 에 부합하며 최대지반가속도값이 0.2g 인 인공 지진파를 사용하였다. 입력운동이 결정되면 SHAKE 프로그램의 입력요소를 아래와 같은 절차에 따라 산정한 후 자유장 해석을 수행한다.

1) 전단파 속도(V_s) 계산[1]

$$\text{점성토의 경우 } V_i = 100N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \quad (1)$$

$$\text{사질토의 경우 } V_i = 80N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \quad (2)$$

- 2) 지반의 밀도(ρ)와 포아슨비
참고문헌에 제시된 밀도와 포아슨비를 이용한다[5].
- 3) 전단탄성계수(G_o)

$$G_o = \rho \cdot V_i^2 \quad (3)$$

- 4) 동적지반물성치 결정
참고문헌에 제시된 전단탄성계수비 및 감쇠비 곡선을 이용한다[2].
- 5) 기반암에서 지진동정의
원자력발전소 설계에 사용되는 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake)에 해당하는 크기의 가속도 시간이력운동(그림 1)을 각 방향별(동서, 남북)로 독립적으로 기반암에 정의한다.
- 6) SHAKE 입력자료 입력 및 해석[3]
- 7) 각 지층별 최대전단응력 산정

나. Seed 와 Idriss 방법

경험적인 방법으로 가장 많이 사용되는 Seed 와 Idriss 방법을 중심으로 다음과 같은 절차에 따라 액상화에 대한 최대전단응력(τ_r)과 지진동에 의한 진동 최대전단응력(τ_{av})을 산정 후 액상화에 대한 안전율을 사용하여 액상화 가능성을 평가한다.

- 1) 안전정지지진 결정: 0.2g
- 2) 대상지역의 최대 예상 지진규모(Earthquake Magnitude) 결정: 7.1
- 3) 진동재하횟수(Stress Cycles (N_c))적용: 지진의 크기가 액상화 강도에 미치는 영향을 N_c 값으로 표시하며, 본 연구에서는 10 을 적용[4].

표 2. 지진규모에 따른 진동재하횟수(N_c)

지진규모	진동재하횟수(N_c)
7	10
7.5	20
8	30

- 4) 액상화 발생가능성이 있는 사질토 구간을 결정.
- 5) 상대밀도의 범위결정
대상지역에 조사된 N 값에 따른 상대밀도의 범위를 표 3 에 따라 결정[5].

표 3. 사질토의 N 값과 상대밀도의 관계

N 값	상대밀도(D_r)
0 ~ 4	0 ~ 20
4 ~ 10	20 ~ 40
10 ~ 30	40 ~ 60
30 ~ 50	60 ~ 80
50 이상	80 ~ 100

- 6) 수정계수(C_r): 상대밀도의 변화에 따른 수정계수를 결정(그림 2)[4].
- 7) 대상지반의 평균입경(Mean Grain Size) D_{50} 과 그림 3 을 이용하여 응력비를 결정하고, 유효응력(σ_v)을 계산[6].
- 8) 액상화의 전단강도(τ_r): 식(4)를 이용하여 계산하며, 결과값은 표 4 에 제시.

$$\tau_i = \sigma_v \cdot C_r \cdot \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \right) \left(\frac{D_r}{D_{50}} \right) \quad (4)$$

- 9) 조사 대상지반에 대한 전응력(γh) 계산 및 그림 4로부터 응력감소계수(C_D) 결정[4].
 10) 지표면 최대가속도(a_{max}) 결정.
 11) 검토위치의 최대전단응력 산정: 구체적인 결과는 표 5에 제시.

$$\tau_{av} = (0.65)C_D \left[(\gamma h) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \right] \quad (5)$$

표 4. Seed 와 Idriss 의 방법에 의한 액상화 최대전단응력

EL.(m)	D_r (%)	γh	C_r	$\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \right)$	τ_i
0.0	40	3.42	0.54	0.23	0.340
	50	3.42	0.565	0.23	0.444
	60	3.42	0.61	0.23	0.576
4.6	60	8.02	0.61	0.26	1.526
	70	8.02	0.66	0.26	1.927
	80	8.02	0.7	0.26	2.335
10.0	60	13.42	0.61	0.26	2.554
	70	13.42	0.66	0.26	3.224
	80	13.42	0.7	0.26	3.908
18.6	50	22.02	0.565	0.22	2.737
	60	22.02	0.61	0.22	3.546
	70	22.02	0.66	0.22	4.476
37.1	60	40.52	0.61	0.235	6.970
	70	40.52	0.66	0.235	8.799
	80	40.52	0.7	0.235	10.665

표 5. Seed 와 Idriss 의 방법에 의한 심도별 최대전단응력

EL. (m)	DEPTH (m)	SAMPLE NO.	D_{50} (mm)	$\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \right)$	γ_t (t/m^2)	γ_{sat} (t/m^2)	γh	σ_v	$\left(\frac{a_{max}}{g} \right)$	C_D	τ_{av}
0.0	1.9	S1	0.21	0.23	1.8	2.0	3.42	3.42	0.2	0.98	0.436
4.6	6.5	S4	0.46	0.26	1.8	2.0	12.62	8.02	0.2	0.95	1.559
10.0	11.9	S4	0.46	0.26	1.8	2.0	23.42	13.42	0.2	0.86	2.618
18.6	20.5	S11	0.13	0.22	1.8	2.0	40.62	22.02	0.2	0.63	3.327
37.1	39.0	S21	0.21	0.235	1.8	2.0	77.62	40.52	0.2	0.50	5.045

4. 층상지반에 대한 해석결과

이상과 같이 기술한 절차들을 적용하여 표 6과 같은 액상화 평가결과를 얻었다. Seed & Idriss 방법에서는 심도 10m 이하에서 부분적으로 액상화가 발생하는 반면, SHAKE 를 이용한 자유장 해석방법에서는 지표면 근처의 동서방향에서만 액상화가 발생하는 것으로 나타났다. 정확한 상태밀도가 조사되지 않았으므로 두 방법에 의한 액상화 판단기준은 달라질 수 있다. 그러나 안전을 관점에서 볼 때 대체적으로 SHAKE 해석결과와 Seed & Idriss 방법 모두 비교적 일관성 있는 안전을 값을 나

타내고 있으며, 이 사실은 액상화 평가시 주어진 해석환경에 따라 두 방법이 상호 보완적으로 적용될 수 있음을 보여준다고 할 수 있다. 그러나, 본 평가작업에서 적용된 입력자료들은 이론 및 경험적으로 제시된 값을 그대로 사용한 경우가 많으므로 실제 조사된 값이 사용될 경우 그 평가 결과는 얼마든지 유동적이 될 수 있음을 다음의 검증작업들을 통해서 비교 제시하였다.

5. 단일지반을 이용한 액상화 평가

해석의 일반성을 강조하기 위하여 지진입력으로 건교부에서 제정한 내진설계 기준(단단한 토사 지반)에 부합하는 가속도 시간이력을 그림 5 와 같이 작성하였다. 지반 깊이는 앞의 해석과 동일하며, 표 7 과 같이 제한된 지반특성값(N)에 따라 극한적인 단일층상을 가정한 후 마찬가지로 SHAKE 해석방법과 Seed & Idriss 방법을 이용하여 액상화 가능성을 평가하였다.

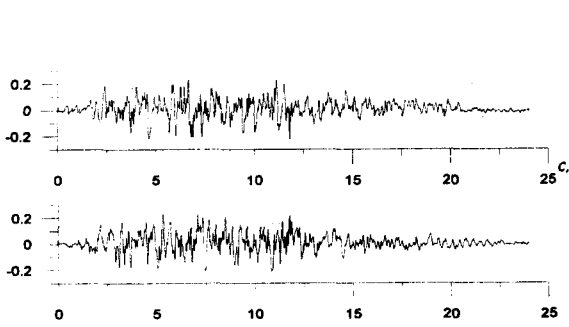


그림 1. 원자력발전소 설계가속도시간이력
(최대,EW : 0.226g, NS : 0.23g)

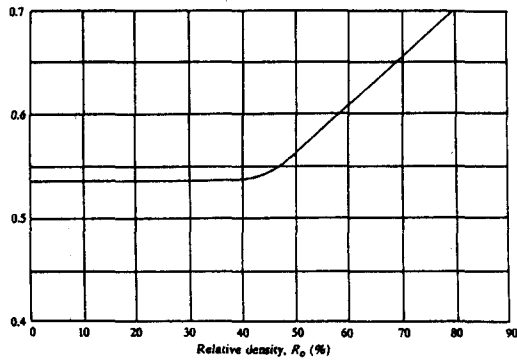


그림 2. 상대밀도에 따른 C_r 의 변화[6]

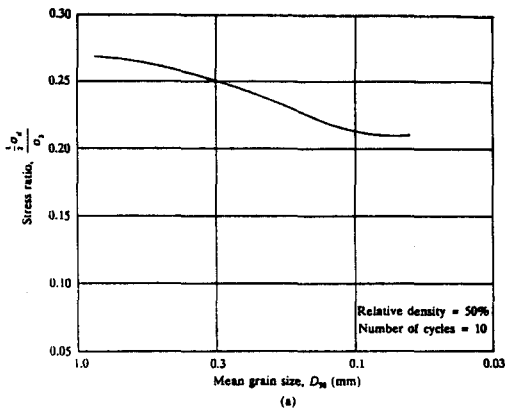


그림 3. 사질토의 액상화를 유발하는 응력비
($N_c=10$) [6]

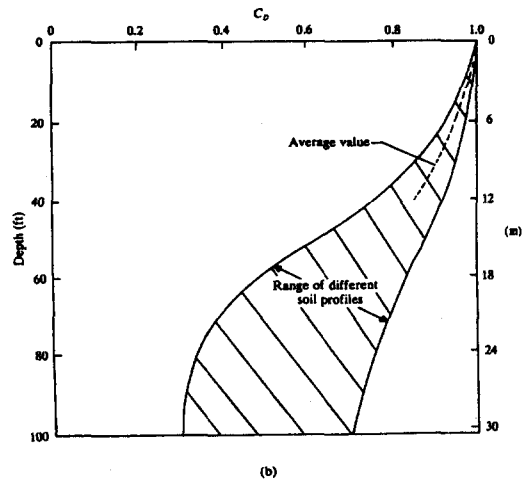


그림 4. 깊이에 따른 응력감소계수의 범위[6]

표 6. Seed 와 Idriss 의 방법과 SHAKE 해석결과 비교 및 액상화 안전율

EL.(m)	D_r (%)	τ_{av}			τ_1	Factor of Safety		
		Seed/Idriss	SHAKE (EW)	SHAKE (NS)		Seed/Idriss	SHAKE (EW)	SHAKE (NS)
0.0	40	0.436	0.426	0.333	0.340	0.780	0.797	1.020
	50	0.436	0.426	0.333	0.444	1.020	1.043	1.334
	60	0.436	0.426	0.333	0.576	1.322	1.351	1.728
-4.6	60	1.559	1.408	1.163	1.526	0.979	1.084	1.312
	70	1.559	1.408	1.163	1.927	1.236	1.369	1.656
	80	1.559	1.408	1.163	2.335	1.498	1.659	2.007
-10.0	60	2.618	2.509	2.274	2.554	0.975	1.018	1.123
	70	2.618	2.509	2.274	3.224	1.231	1.285	1.418
	80	2.618	2.509	2.274	3.908	1.493	1.557	1.719
-18.6	70	3.327	3.428	3.725	4.476	1.346	1.306	1.202
-37.1	60	5.045	5.340	4.832	6.970	1.382	1.305	1.442
	70	5.045	5.340	4.832	8.799	1.744	1.648	1.821
	80	5.045	5.340	4.832	10.665	2.114	1.997	2.207

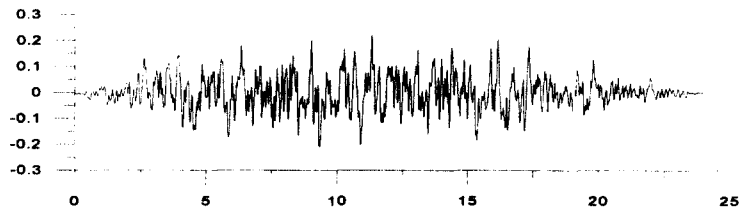


그림 5. 국내 내진기준을 만족하는 가속도 시간이력 (1000년 빈도, S_d 지반, 최대가속도: 0.221g)

가. 단일지반의 특성

표 7. 균질한 단일지반 특성

구 분	토층	심도(m) (표고기준)	N 치		상대밀도 및 연경도	Sample No.
			분포	평균		
매립층	모래/자갈	+1.9 ~ -48.0	9~29	19	Loose ~ Medium	S1
퇴적층	실트	+1.9 ~ -48.0	22	22	Very Stiff	S10

나. 단일지반의 해석결과

층상지반의 해석결과와 마찬가지로 단일지반의 해석결과도 그림 6, 7 과 같이 대체적으로 SHAKE 해석결과와 Seed & Idriss 방법에 의한 액상화 가능성이 비슷한 경향을 보여주었다. 상대적으로 퇴적층을 가정한 단일지반에서 안전율이 낮게 나타났으며, 층상지반의 최소 안전율과 비슷한 수준을 보였다. 또한, 매립층 보다 퇴적층을 가정한 단일지반에서 두 해석방법에 의한 안전율이 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 이 사실은 자유장 해석에 의한 최대전단응력의 예측이 경험식과 매우 잘 일치한다고 말할 수 있으며, 해석 결과의 신뢰도가 높다고 볼 수 있다. 상대적으로 그림 6

과 같이 안전율에 일정한 편차가 발생하거나 급격한 오차가 발견된다면 보다 추가적인 해석이 구된다고 볼 수 있다.

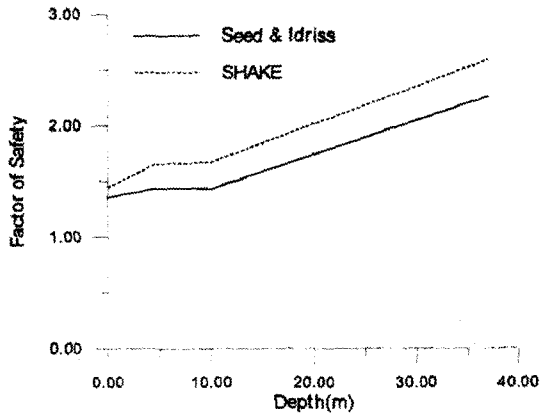


그림 6. 매립층으로 가정한 단일지반의 안전율 (상대밀도(Dr)=50%)

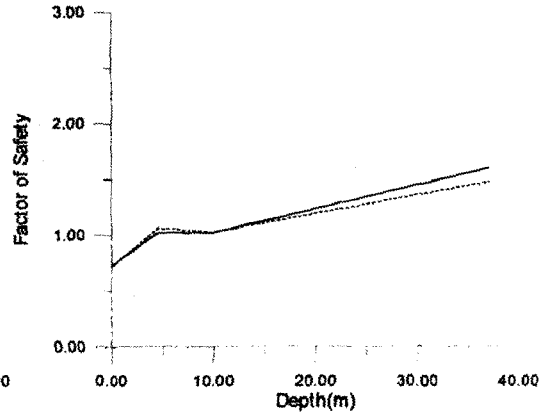


그림 7. 퇴적층으로 가정한 단일지반의 안전율 (상대밀도(Dr)=50%)

다. 지반 깊이변화에 따른 액상화 가능성

액상화의 발생에 영향을 주는 요소는 여러 가지가 있지만, 다른 입력요소를 일정하게 유지한 상태에서 지반의 깊이만을 변화시킬 때 액상화 가능성에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 지반 특성을 표 7의 퇴적층에 대한 지반 특성을 유지한 채 48m, 24m 및 14m 깊이의 서로 다른 단일지반을 비교대상으로 선정하였다. 입력지진운동은 마찬가지로 그림 5의 지진을 적용하였다. 세 종류의 단일지반에 대한 액상화 최소 안전율을 그림 8에 나타내었다. 얕은 단일지반으로 갈수록 액상화 가능성이 증가하는 현상을 알 수 있으며, 원자력 발전소의 특정지반과 같은 48m의 지반깊이는 상대적으로 안전율이 증가하여 액상화 발생 가능성이 감소함을 알 수 있다. 한편, 그림 8의 안전율 변화는 대체적으로 선형 관계를 보이고 있으므로, 이러한 상관관계를 이용하여 안전율이 1 이하로 변하는 지점을 32.35m로 추정할 수 있다. 그러나 이러한 추정방법이 모든 해석방법에서 일반적으로 적용될 수 있는 것은 아니다.

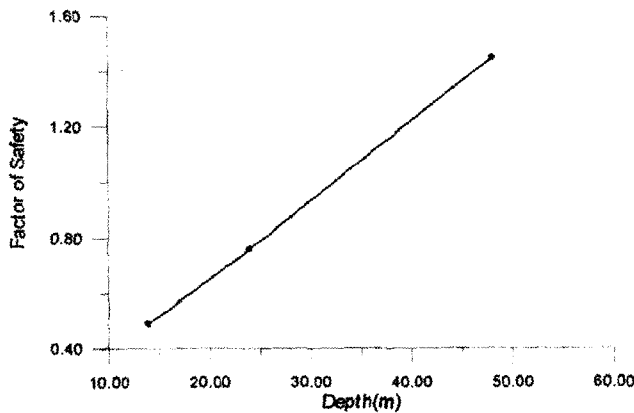


그림 8. 조사된 지반특성을 이용한 지반깊이 변화에 따른 안전율변화 (SHAKE 해석결과)

6. 결론 및 제언

원자력 발전소내 도수로 부지에 대한 특정지역을 대상으로 액상화 평가 가능성을 판단하였다. 이를 위하여 일반적으로 많이 이용되고 있는 자유장 해석과 경험식에 의한 해석방법을 적용하여 액상화 안전율을 산정하였다. 자유장 해석은 전산프로그램 SHAKE 를 사용하였으며, 경험식은 일반적으로 많이 사용되고 있는 Seed & Idriss 방법을 적용하였다. 층상지반을 해석한 결과 두 방법에 의한 안전율은 대체적으로 일관된 결과를 주고 있어, 두 방법에 의한 해석결과에 대한 신뢰도가 높음을 알 수 있다. 또한, 액상화 발생수준에 대한 예측을 위하여 단일지반으로 가정한 서로 다른 깊이의 지반을 해석한 결과 얇은 지반으로 갈수록 액상화 발생 가능성이 증가함을 알 수 있었다. 그 반대로 지반심도가 증가할수록 안전율은 증가하는데, 이는 심층으로 갈수록 지진에너지가 감쇠함으로써 안전율이 증가하는 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 제한적인 지반 자료만을 이용하여 액상화의 영향을 판단한 것이므로, 일반화된 액상화 발생 메커니즘을 유도하기 위해서는 보다 다양한 지반 입력자료를 대상으로 한 추가적인 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 일본 지하공동구조물의 내진설계 기준
2. Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1970, Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, EERC 70-0, Univ. of California, Berkeley, California
3. I. M. Idriss and J. I. Sun, 1991, User's Manual for SHAKE91
4. Braja M. Das, 1993, Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company
5. 해운항만청, 1993, 항만시설물 설계기준서
6. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(II), 제 1 권 내진설계성능기준", 한국지진공학회