원위치 시험 성과에 의한 액상화 발생가능성 평가에 관한 연구
A Study on Evaluation of Liquefaction Potential Using in Situ Test Data

허정우[1]Jung-Woo Huh, 김찬홍[2]Chan-Hong Kim, 박성재[3]Sung-Zae Park, 정경환[4]Gyeong- Hwan Jeong

[1] 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
[2] 부산대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
[3] 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University
[4] (주) 동아지질 상무이사, Managing Director, Dong-A Geological Eng., Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this paper shows the evaluation of the liquefaction potential of soils using in situ test. There are different types of in situ test used in the evaluation the liquefaction potential. In the particular study the Standard penetration test(SPT), Cone penetration test(CPT), and Seismic cone penetration test (SCPT) were used.
The SPT N value has been used all over for a very long time. The evaluation of the liquefaction of soil was preformed using the worldwide renowned CPT and SCPT. Shake 91 program was used to evaluate the results obtained by different in situ test and were later analyzed.

Key words : liquefaction potential, silty sand, SPT, CPT, SCPT, Shear-Wave Velocity

1. 서론

최근 세계 곳곳에 강진이 발생하여 수많은 인명과 재산 피해를 입고 있다. 지진은 발생의 원인 및 예측이 매우 어려울 뿐 만 아니라 피해상황도 단시간 내에 발생하므로 예보시스템 및 대책 마련도 다른 자연재해에 비교해서 어렵다. 지진에 의한 구조물의 파괴에는 여러 종류가 있다. 1964년 일본 Niigata 현에 발생한 지진(규모 7.5)시 많은 토목 구조물이 파괴되었는데, 특히 구조물 기초의 파괴가 두드러졌다. 이 원인을 조사하면서 액상화가 대두되었고, 액상화 현상에 대한 관심과 많은 연구가 지금까지 이루어지고 있다. 국토가 협소한 우리나라는 해안지역의 연약지반 개발이나 매립지 개발이 많이 되고 있는데, 이때에 액상화에 대한 검토가 필요하며 이에 대한 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

액상화를 평가하는 방법은 크게 실내 시험과 원위치 시험을 이용하는 것으로 분류된다. 실내 시험 방법으로는 불교란 시료에 대해 단순 전단 시험 혹은 진동 삼축 시험을 이용해서 액상화 저항을 구한다. 원위치 시험을 이용한 액상화 평가법 중에 대표적으로 SPT의 N치를 이용하는 Seed과 Idriss 방법이 많이 쓰여지고 있으며, CPT, SCPT를 이용한 원위치 시험을 이용한 방법이 있다. 국내를 비롯한 미국, 일본에서는 주로 SPT의 N치를 이용한 방법을 사용해 왔는데, 최근은 지금은 CPT가 도입되어 현장 조사와 지반 설계를 위한 현장 시험으로 더 각광을 받고 있다. 따라서 본논문에서는 CPT를 이용한 액상화 평가를 하고, 사이즈믹 콘 관입 시험에서 구한 전단파 속도를 이용해서 액상화 평가를 하여, 각 방법에서 구한 결과를 비교 분석하고자 한다.

2. 액상화 평가법

2.1 표준 관입 시험(SPT)을 이용하는 방법

Seed와 Idriss (1971)가 제안한 표준 관입 시험(SPT)의 N치를 이용한 흙의 액상화 저항을 평가하는 방법이 미국을 비롯한 전 세계에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 이 방법은 Seed등 다른 연구자들에 의해서 수정, 보완되어 유사한 평가법이 제안되었다. M=7.5에 대해 액상화가 일어나는 곳과 일어나지 않은 곳의 N치와 반복응력비를 조사해서 세립분 함유율에 따른 액상화 한계 곡선을 만들어 그림 1과 같이 나타내었다.

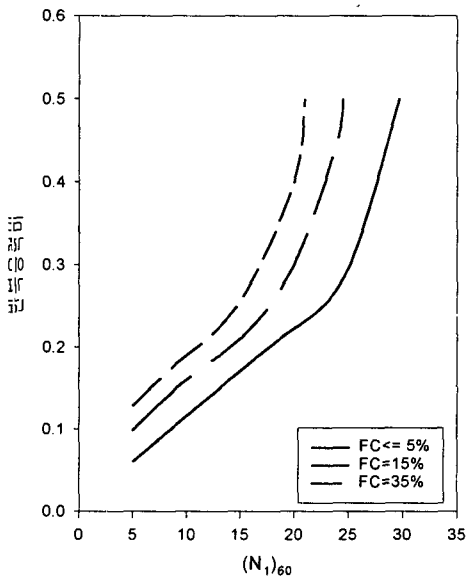

그림 1 반복응력비와 $(N_1)_{60}$의 관계 곡선

(Seed 등, 1984)

반복 액상화 저항비(CRR)는 그림 1에서 구하고 CSR는 다음 식에서 구한다.

$$CSR = 0.65 \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{a_{\max}}{g} r_d \tag{1}$$

여기서 $a_{\max}$: 최대 지반 가속도(여기서는 $0.14g$)

g : 중력 가속도

r_d : 응력 감소 계수

γ : 흙의 단위 중량

z : 깊이

이렇게 구한 반복 액상화 저항비와 지진 시 발생하는 반복응력비를 비교하여 안전율을 구한다.

표. 1. 액상화 저항력에 대한 지진규모 영향에 대한 보정계수 (Seed 등I, 1983)

지진 규모(M)	반복횟수 (N_l)	지진규모 M=7.5를 기준으로 한 보정계수
5.25	2~3	1.50
6.00	5~6	1.32
6.75	10	1.13
7.50	15	1.00
8.50	26	0.89

표.1.을 기준으로 지진 규모 (M = 6.5), (M = 7.0)에 대해서 보정계수를 구하면, 그 계수 값은 각각 1.20과 1.10이고, 안전율은 다음과 같이 구한다.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \tag{2}$$

2.2 피에조콘(CPT)을 이용하는 방법

피에조콘 관입 시험(CPT)을 이용한 액상화 평가법은 1980년대 중반 Robertson과 Campanella에 의해서 도입된 후 Seed와 Olsen(1986), T. Shibata, W. Teparaksa (1988), Robertson과 Wride(1998) 등의 연구자들에 의해서 여러 방법이 제안되었다. CPT의 가장 중요한 장점은 간편성, 재생성, 정확성과 연속적인 기록이다. 반면에 CPT의 주요한 단점의 하나로 현장의 액상화 퍼텐셜을 예측하는데 있어서 CPT값과 흙의 액상화 특성간의 상관 관계를 만드는 CPT 데이터가 한정되어 있다는 것이다. 또, 시료를 채취하기 어려우므로, CPT 데이터에서 흙의 종류를 추정해야 한다.

2.2.1 Robertson과 Wride가 제안한 방법

세립분 함유율을 고려한 방법으로 흙의 거동에 따른 종류별 지수, 즉 흙의 거동지수(Soil behavior type index), I_c를 사용한다.

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5} \tag{3}$$

여기서, $Q = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_v'}$, $F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100$

I_c를 이용해서 토층의 세립분 함유율 FC을 구한다.

$$FC = 1.375 I_c^{\,5} - 3.5 \tag{4}$$

계산에 의해 구해진 흙 거동 종류 지수의 크기에 따라 콘 관입 저항치를 보정한다.

$$q_{c1N} = Q \qquad (I_c > 2.6) \tag{5}$$

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}}\right)\left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}'}\right)^{0.5} \qquad (I_c < 2.6) \tag{6}$$

$$I_{c1} = [(3.47 - \log q_{c1N})^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5} \tag{6}$$

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}}\right)\left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}'}\right)^{0.75} \qquad (I_{c1} > 2.6) \tag{7}$$

(8)

$$\begin{aligned} K_c &= 1.0 && (I_c \le 1.64) \\ K_c &= -0.403 I_c^{\,4} + 5.581 I_c^{\,3} - 21.63 I_c^{\,2} + 33.75 I_c - 17.88 && (I_c > 1.64) \end{aligned} \tag{9}$$

$$(q_{c1N})_{cs} = (K_c)(q_{c1N}) \tag{10}$$

실험과 현장 계측을 근거로 하고 지진 규모(M=7.5)에 대한 액상화 저항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} CRR &= 93\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{100}\right]^3 + 0.08 && (50 \le (q_{c1N})_{cs} < 160) \\ CRR &= 0.833\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{100}\right] + 0.05 && ((q_{c1N})_{cs} < 50) \quad (\text{단위: MPa}) \end{aligned} \tag{11}$$

지진 시 발생하는 현장의 반복응력비 (CSR)는 다음과 같이 구한다.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_0'} = 0.65 \frac{M^{2.56}}{173} \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} r_d \tag{12}$$

여기서 M : 지진 규모

$a_{\max}$: 최대 지반 가속도(여기서는 $0.14g$)

g : 중력 가속도

σ_0 : 연직응력

σ_0' : 유효 연직응력

r_d : 응력 감소 계수

2.2.2 Shibata와 Teparaksa 방법

T. Shibata, W. Teparaksa(1988)가 제안한 방법으로 SPT와 CPT에 근거해서 액상화 퍼텐셜을 평가한다. 즉, CPT 시험에서 나온 q_c를 다음의 환산식에 넣는다.

$$q_{c1} = \left(\frac{0.17}{0.07+\sigma_0'}\right) q_c \qquad (\text{단위 : MPa}) \tag{13}$$

원위치 액상화 강도 $(\tau/\sigma_0')_l$를 다음 식에서 구한다.

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_0'}\right)_l = 0.1+0.2\left[\frac{(q_{c1}/C_2)-5.0}{25-(q_{c1}/C_2)}\right] \tag{14}$$

여기서 C_2 : (평균) 입경 D_{50}의 영향을 고려한 보정계수 (즉, 세립분 함유정도를 고려하는 것이다.)

$D_{50} \geq 0.25$㎜ 모래 $C_2 = 1$

$D_{50} < 0.25$㎜ 세립토 $C_2 = D_{50}/0.25$(㎜)

지진시 발생하는 현장의 전단응력비는 다음 식으로 구한다.

$$\frac{\tau}{\sigma_0'} = 0.1(M-1)\frac{a_{\max}}{g}\frac{\sigma_0}{\sigma_0'}(1-0.015\cdot z) \tag{15}$$

2.3 사이즈믹 콘 관입 시험(SCPT)을 이용하는 방법

최근 사이즈믹 콘 관입 시험(SCPT)를 이용한 액상화 저항 평가에 관한 연구가 이루어지고 있다. SCPT의 장점으로 샘플링 하기 어려운 자갈질 흙뿐만 아니라 작은 실내 시험 시료에 대해서도 측정할 수 있으므로 실내와 현장 거동의 직접적인 비교가 가능하다.

Ronald D. Andrus와 Kenneth H. Stokoe(2000)가 제안한 방법에 따라서 액상화 저항을 평가하였다. SCPT에서 구한 전단파 속도, V_s를 상재압력에 대해 보정한다.

$$V_{s1} = V_s C_v = V_s\left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^{0.25} \tag{16}$$

여기서 C_v는 보정계수, P_a는 대기압이다.

전단파 속도를 이용한 반복 액상화 저항은 다음 식으로 구한다.

$$CRR = \left\{a\left(\frac{K_c V_{s1}}{100}\right)^2 + b\left(\frac{1}{V_{s1}^* - K_c V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*}\right)\right\} MSF \tag{17}$$

여기서 V_{s1}^*는 반복 액상화 발생에 대한 상한 한계값으로 지반의 세립분 함유율에 따라 구한다.

$$\begin{aligned} V_{s1}^* &= 215 \text{ m/s}, && FC \leq 5\% \\ V_{s1}^* &= 215-0.5(FC-5) \text{ m/s}, && 5\% < FC < 35\% \\ V_{s1}^* &= 200 \text{ m/s}, && FC \geq 35\% \end{aligned} \tag{18}$$

K_c는 고결 상태나 지질 연대를 고려한 계수이며 흙이 비고결 상태이고 지질연대가 10000년 이하이면 1이고, 흙 조건이 알려지지 않는 경우에는 0.6으로 가정한다.

a, b는 변수로서 각각 0.022와 2.8로 제안되었다.

MSF는 지진규모에 따른 스케일링 요소이고, n은 -2.56으로 제안되었다.

$$MSF = \left(\frac{M}{7.5}\right)^n \tag{19}$$

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v'} = 0.65\left(\frac{a_{\max}}{g}\right)\left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\right) r_d \tag{20}$$

3. 연구 대상지역 및 액상화 평가 결과 분석

3.1 연구 대상 지역

검토 대상 지역은 경남 양산 일대로 낙동강 하구 퇴적토와 양산천 퇴적토 등이 분포되어 있는 대표적인 연약 점성토 지반이다. 단지 조성을 위한 성토고와 원지반의 모래층이 약 3m 정도 피복되어 있으며, 그 아래로 실트와 점토가 대략 20~25m 정도 분포하고 있다.

본 연구 대상 지역에 피에조콘 관입 시험(CPT), 사이즈믹 콘 관입 시험(SCPT)이 수행되었고 특히 피에조콘 관입 시험은 미국 Hogentogler사 제품과 일본 기초지반사의 2가지에 대해서 실시하였다. 각각 BH-1, BH-2 지점이다.

3.1.1 검토 대상

층분류는 피에조콘 관입 시험(CPT) 자료에 근거하였다. 지하 수위는 GL(-) 1.5m에 존재하고 있으며, 지하 수위 아래부터 약 2.7m 까지 액상화 검토 대상 지층으로 결정했다. 검토 지층의 두께는 약 1.2m 이고, 이 층을 세 개의 층으로 분류하였다.

3.1.2 검토 조건

액상화 발생 사례를 살펴보면 일반적으로 액상화는 지진 규모(M=6) 이상에서 발생한다. 지진 규모 M = 6.5, 7.0, 7.5에 대해서 액상화 평가를 실시하였고, 지표면 최대가속도(a_{max})는 0.14g로 하였다.

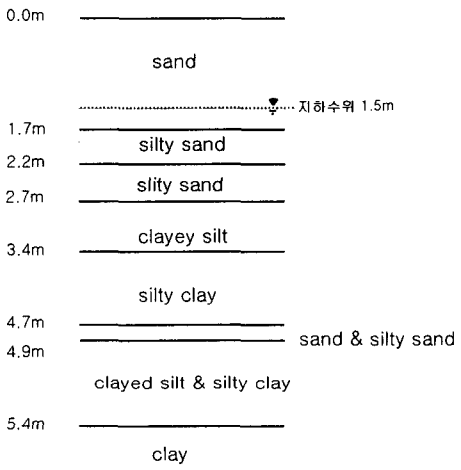

그림 2 검토지반의 주상도

표. 2. 검토지반의 물성치

검토 지층	깊이	세립분함유율(FC) (%)	단위중량 (tf/m³)
1	1.5~1.7m	5 이하	1.8
2	1.7~2.2m	15	1.8
3	2.2~2.7m	35	1.8

3.1.2 CPT, 환산 N치, SCPT 시험 결과 데이터

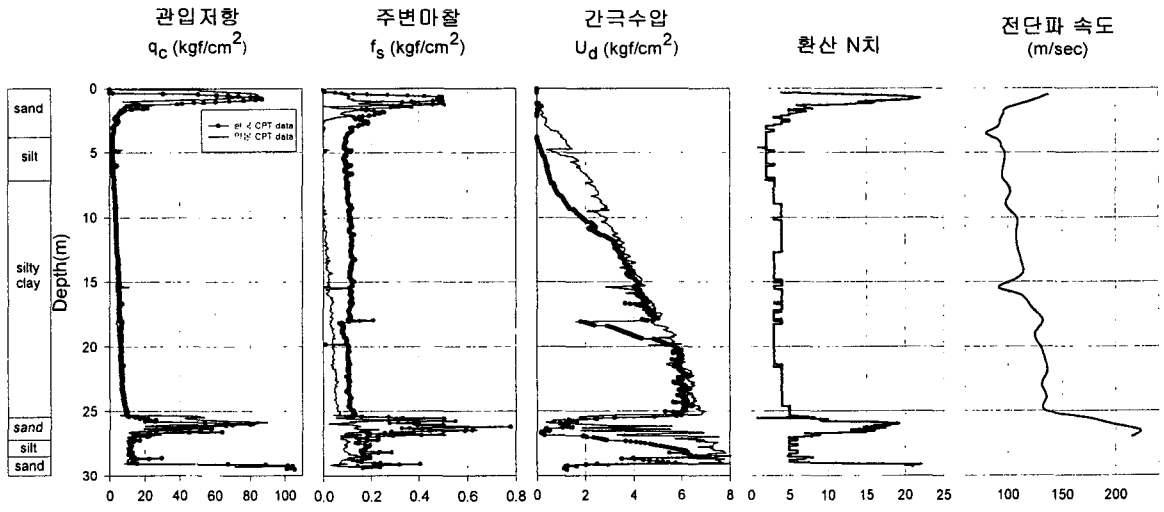

그림 3 원위치 시험 결과 CPT, 환산 N치, 전단파 속도

환산 N치는 피에조콘 콘(CPT) 시험에서 나온 선단 저항을 환산하여 구한 값이다. 환산 N치와 콘 선단 저항 (q_t)는 다음과 같은 관계가 있다. $\frac{q_t}{N}=3.5\sim5$ 여기서 $\frac{q_t}{N}=4.0$으로 가정하였다.

3.2 각 평가법의 비교

3.2.1 지진 규모별 액상화 안전율 평가

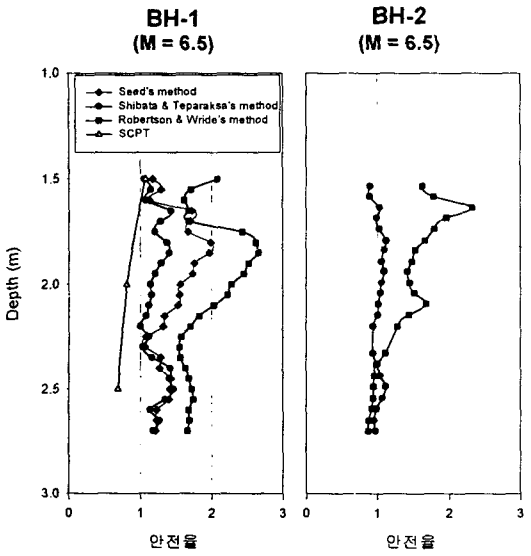

그림 4 지진 규모 6.5일 때 액상화에 대한 안전율 곡선

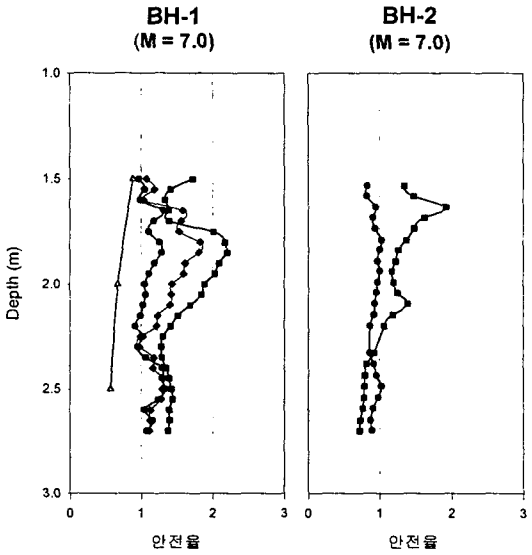

그림 5 지진 규모 7.0일 때 액상화에 대한 안전율 곡선

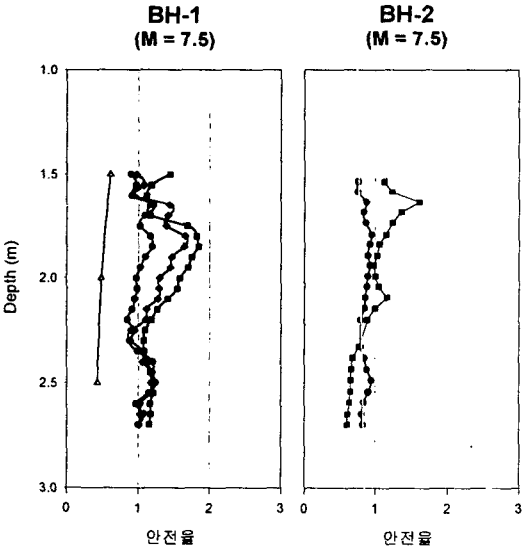

그림 6 지진 규모 7.5일 때 액상화에 대한 안전율 곡선

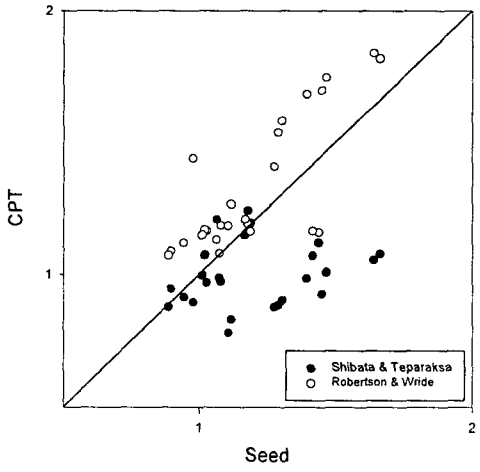

그림 7 각 방법에서 구한 안전율 비교

3.2.2 각 방법의 비교

각 방법 별로 액상화 안전율을 평가한 결과를 살펴보면 Shibata와 Teparaksa 방법이 Seed 방법에 비해서 다소 과소 평가되고 Robertson과 Wride 방법이 Seed 방법에 비해서 과대 평가됨을 알 수 있다. 그리고 Robertson과 Wride 방법은 콘 관입 시험 기계에 따라 다소 차이가 있었는데 이는 관측한 데이터 중 주변 마찰에 대한 차이로 인한 것으로 판단된다. 주변 마찰을 작게 평가한 일본 기계가 액상화

안전율을 낮게 평가한다. 따라서 Robertson과 Wride 방법을 사용해서 액상화 저항을 평가할 때에는 주변 마찰에 대한 검증이 필요하다고 생각된다. 사이즈믹 콘 관입 시험 데이터를 이용해서 액상화 안전율을 평가한 결과 다른 방법에 비해 안전율이 낮게 나타나는데 이 원인으로는 검토 지층이 그다지 두껍지 않아서라고 판단된다.

4. Shake 91 프로그램 해석

대표적인 액상화 퍼텐셜을 평가하는 수치 해석 프로그램으로 1972년 Schnabel, Lysmer과 Seed에 의한 Shake 프로그램을 1992년 Idriss와 Sun에 의해 수정한 것이다.
이 프로그램은 다층반사모델을 이용한 1차원 등가선형해석을 통해 지반내 증폭현상을 해석하는 특징을 갖고 있다. 또한 해석시 변형률 수준에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 이용함으로써 지반의 동적 특성을 충분히 고려할 수 있는 점과 시간 영역 및 주파수 영역에서의 해석이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 해석시 주의사항은 지층분할을 너무 크게 할 경우, 심도에 따른 지반 강성 변화를 충분히 고려하지 못하게 되어 증폭현상을 정확히 표현할 수 없다는 점이다.

4.1 원위치 시험에 의한 액상화 평가와 Shake 91 해석 결과 비교

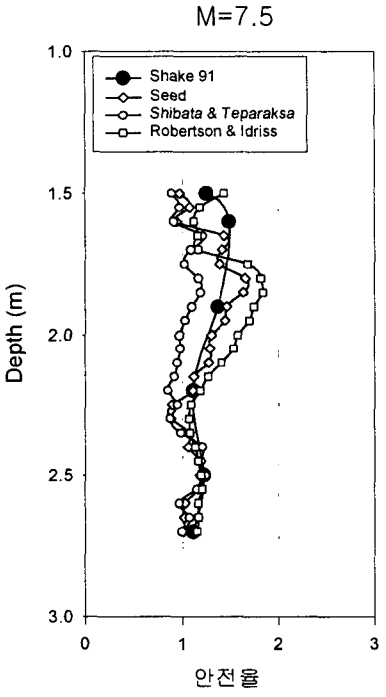

그림 8 수치해석 결과 각 방법의
안전율 비교 곡선

그림 8의 수치해석 결과 같이 각 평가방법을 상호 비교하면, 본 연구에서 검토한 수치해석 결과는 여러 평가방법 중 Seed 방법과 경향이 가장 유사하게 나타났다.

5. 결론

1) 본 검토 지반에 대해 원위치 시험을 이용한 액상화 평가한 결과 지진에 의한 액상화 가능성은 낮다고 평가되었다.
2) 피에조콘(CPT)를 이용해서 액상화 저항 강도를 평가하는 여러 기법 중에서 Robertson과 Wride 방법이 다소 과대 평가되지만 Seed 방법을 이용해서 구한 액상화 저항 강도와 비교하면 약 1.1배

정도 크다.

3) Shibata와 Teparaksa 방법은 Seed 방법에 비해 액상화 저항 강도를 약 0.89배정도 과소 평가하였다.
4) 본 연구대상 지반에 대해 전단파 속도로 액상화 저항을 평가한 결과 안전율이 과소 평가되었다. 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.
5) 낙동강 지역의 상부 실트층에 대해서 액상화 평가에 관한 계속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 참고문헌

1) 김수일 (1998), 국내 액상화 현상의 평가 및 대책, 지반공학회 가을 학술발표회.
2) 박종관, 김상규, 한성길 (1997), 진동삼축시험을 통한 실트질 모래의 액상화 강도에 관한 연구. 한국지반공학회지 pp. 59-70, 1998. 2
3) 임종철 (1999), 부산지하철 3호선 대저차량기지 현장 주공장 지역의 액상화 발생 가능성과 액상화 발생시 말뚝기초에 미치는 영향에 대한 의견서
4) 황대진 (1993), 실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화 강도에 관한 연구, 대한토목학회 논문집 제 13권 제 2호 pp.243-252, 1993. 5.
5) (주)동아지질, (1999), 부산지하철 3호선 313공구 지반관련 검토용역에 따른 지반 조사 보고서.
6) 한국지반공학회, (1998. 12.), 양산 물금지구 연약지반 관련 학술연구 용역 보고서.
7) 吉見吉昭 (1980), 모래지반의 액상화, 원기술.
8) H. B. Seed, I. M. Idriss (1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM9, September, 1971
9) H. B. Seed, I. M. Idriss, I. Arango (1983), Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 3, March, 1983
10) K. Tokimatsu, Y. Yoshmi (1983), Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations Vol.23, No.4, Dec. 1983
11) P.K. Robertson and C.E. (Fear) Wride (1998), Evaluation cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Can. Geotechnical Journal 35: 442-459, 1998
12) Ronald D. Andrus, Kenneth H. Stokoe II (2000) Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 11, November, 2000
13) T. Shibata, W. Teparaksa (1988), Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests, Soils and Foundations Vol.28, No.2, 49-60, June 1988