

액상화 관련 최근 연구결과 (1)

김경환^{*1}, 박영호^{*2}

1. 서론

최근 액상화에 대한 관심이 고조되는 가운데 액상화에 대한 기초 연구 및 평가 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 국내 여진상 강진기록이나 액상화 피해사례가 전무한 실정이므로 국내 고유의 액상화 평가법이 설계기준에 반영되지 않고 있으며, 실제 설계시 해외의 연구결과 및 평가기준들을 준용하고 있는 실정이다. 국내에서 사용되고 있는 액상화 평가기법은 Seed-Idriss법(Seed 등, 1984), Iwasaki-Tatsuoka법, Ishihara법, Eurocode, Tokimatsu-Yoshimi법 등이 있으며, 그 중에서 우리나라에 가장 널리 적용되고 있는 방법은 Seed-Idriss의 평가법(1985)이다. Seed-Idriss법은 필수지반조사 항목 중의 하나인 표준관입저항치(N_c)를 이용하여 손쉽게 액상화 평가를 수행할 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되고 있으며, 오랜 기간에 걸쳐 지속적인 후속 연구를 통해 발전을 거듭하고 있다. 최근 Seed-Idriss법(1985)을 연구했던 EERC(Earthquake Engineering Research

Center ; 미국 UC Berkeley 대학 소재)에서 2003년 6월에 "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering : A Unified and Consistent Framework"(Seed 등 (2003))라는 제목으로 지난 수십년 간 수행해온 액상화 관련 연구 결과를 종합 정리하고, 최근 연구결과물을 더하여 연구보고서를 발간하였다. EERC에서는 최근 발생한 지진기록을 반영하고 통계확률기법을 적용하여 새로운 액상화 평가곡선을 제안했으며, 지진규모에 따른 보정곡선, 표준관입저항치의 상재압에 대한 보정 등에 있어 새로운 연구결과를 적용하여 소개하고 있다. 또한 액상화와 관련된 연구를 Liquefaction Engineering이라고 통칭하여 그림 1과 같이 액상화 연구의 핵심요소를 정의하고 각 요소에 대해 상세한 해설을 다루고 있다. 상기 연구보고서의 내용이 액상화 연구에 좋은 참고자료가 될 것으로 사료되어 2회에 걸쳐 소개하고자 한다. 금번에는 액상화 가능성 평가방법으로 우리나라에서 가장 널리 사용되는 Seed-Idriss법의 최신 개정내용 중 SPT시험 결과를 토대로 하는 액상화 평가 방법을 간략하게 소개하고자 하며, 액상화 후 거동 및 지반 변형에 관한 내용을 차후에 소개하고자 한다.

^{*1} 비회원, 현대건설 기술연구소(kkhwan@hdec.co.kr)

^{*2} 현대건설 기술연구소(yhpark@hdec.co.kr)

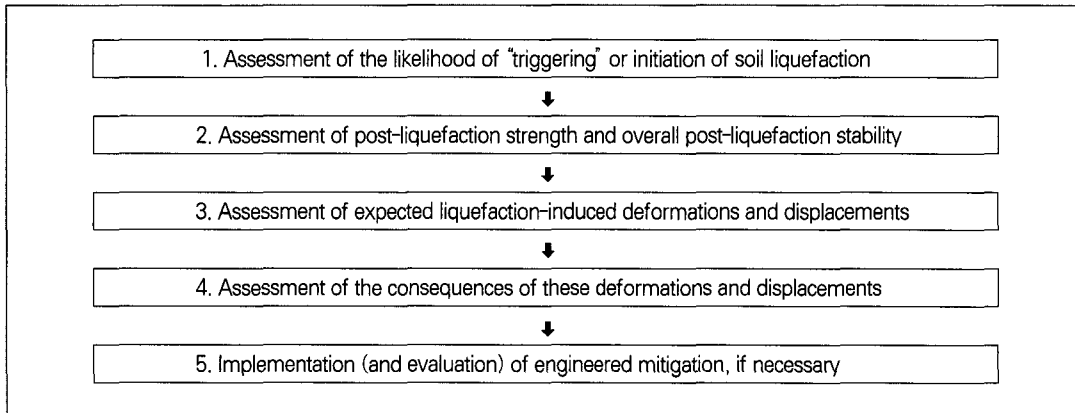


그림 1. 액상화 연구의 핵심 요소

2. 액상화 가능성 평가를 위한 흙 분류

2.1 액상화 가능한 흙의 종류

액상화 가능성 평가의 첫 번째 단계는 대상 지반이 액상화 가능성이 있는 지반인지 아닌지를 판단하는 것이다. 세립분 함유량이 적은 모래질 지반이 액상화 발생 가능성이 높다는 점은 공통된 의견으로 받아들여지고 있으나 세립질 지반(silty/clayey soil)과 조립질 또는 자갈질 지반에 대해서는 아직 많은 논란이 있다.

2.1.1 조립질, 자갈질 지반의 액상화 가능성

첫 번째로 조립질, 자갈질 지반의 경우 지진시 거동에 있어 세립분 함유량이 적은 모래질 지반의 경우와 유사한 것으로 인식되고 있으며 이에 대한 많은 연구결과(Evans, 1987; Harder, 1988; Hynes, 1988; Andrus, 1994)들이 보고 되고 있다. 하지만 여전히 이에 대한 논란이 많이 있으며 조립질, 자갈질 지반의 액상화 가능성이 모래질에 비

해 상대적으로 낮다는 주장에 대한 근거는 아래와 같다.

- (1) 투수성이 높으므로 발생된 과잉간극수압이 빠르게 소산될 수 있다.
- (2) 모래질 지반에 비해 조립질, 자갈질 지반의 경우 입자의 중량이 상대적으로 커서 느슨한 상태로 존재하는 경우가 드물고 일반적으로 조밀한 상태로 존재한다.

하지만, 아래와 같은 경우에는 액상화 가능성이 충분히 고려되어야 한다.

- (1) 조립질, 자갈질 지반이 투수성이 낮은 지반에 둘러 싸여 있을 경우
- (2) 조립질의 간극을 세립분이 채우고 있는 경우
- (3) 조립질 지반의 층후가 두터워 배수길이가 길어서 짧은 시간 내에 배수가 이루어지지 않을 경우

2.1.2 세립질 지반의 액상화 가능성

다음 그림 2는 현재까지 널리 사용되고 있는 Modified Chinese Criteria (Wang(1979), and Seed and Idriss(1982)) 이다. 그림 2에 따른 액상

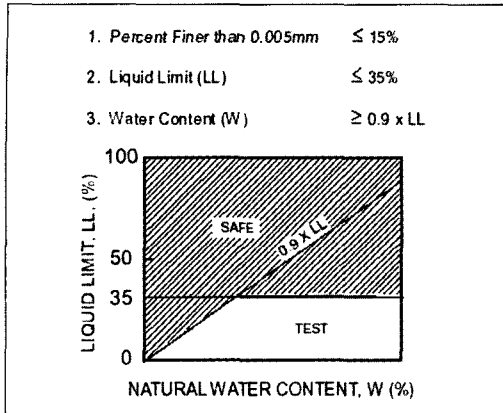


그림 2. Modified Chinese Criteria(Wang(1979), and Seed and Idriss(1982))

화 발생가능한 지반은 (1)점토 함유량 15%이하(중국의 점토 기준인 0.005mm에 의거), (2)액성한계 35% 미만, (3)액성한계의 90%이상의 현장함수비를 조건으로 하고 있다.

비록 널리 사용되기는 했지만 Modified Chinese Criteria(Wang, 1979)의 타당성에 대해 그동안 많은 의문이 제기됐으며 1994년에서 1999년 동안 액상화 가능성 평가방법에 대해 많은 연구를 주도한 NCEER Working Group(1997)에서도 Modified Chinese Criteria의 수정 필요성에 대해 동의 했으나 적절한 수정방향에 대해 일치된 결론을 도출해내지는 못하였다.

특히, 1999년 터키에서 발생한 Kocaeli 지진과 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진사례를 보면 Modified Chinese Criteria의 액상화 안전으로 분류되는 세립질 지반에서 큰 액상화 피해를 보여 이에 대한 수정이 요구되었다.

2000년도에 Andrews 와 Martin은 Modified Chinese Criteria(Wang, 1979)에 적용된 지진기록을 재평가하고 새로운 지진기록을 더하여 아래의 표 1을 제시하였다. 이 연구결과에서 Andrews와 Martin은 다음을 제안하였다.

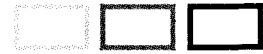
- (1) 점토질($<0.002\text{mm}$) 함유량이 10%이하이며, #40체를 통과한 입자에 대한 액성한계(Liquid Limit : LL)가 32%미만인 흙은 액상화 발생가능성이 있는 흙으로 분류
- (2) 점토 함유량이 10%이상이고 $LL \geq 32\%$ 인 흙은 액상화 발생가능성이 낮은 흙으로 분류
- (3) 상기의 영역에 속하지 않는 흙에 대해서는 시료를 채취를 통한 실험적 평가가 요구됨

액상화 가능한 흙 분류에 있어 액상화라는 용어의 정의를 명확히 할 필요가 있다. 액상화를 크게 두 가지로 구분하면 첫번째로 고전적인 의미의 액상화("classic" cyclic liquefaction)는 반복하중에 따른 과잉간극수압의 증가에 따른 강도와 강성의 급격한 소실을 의미한다. 두번째로 대규모의 일방향 전단

표 1. Liquefaction Susceptibility of Silty and Clayey Sands (after Andrews and Martin, 2000)

		Liquid Limit ≥ 32
Clay Content ² < 10%	Susceptible	Further Studies Required (Considering plastic non-clay sized grains-such as mica)
Clay Content ² $\geq 10\%$	Further Studies Required (Considering non-plastic clay sized grains-such as mine and quarry tailings)	Not Susceptible

Notes 1. Liquid limit determined by Casagrande-type percussion apparatus
2. Clay defined as grains finer than 0.002 mm.



변형 (monotonic or unidirectional shear displacements)에 의한 재성형 (remolding) 또는 강도 감소 또는 변형을 연화 (strain softening)를 의미하는 액상화를 들 수 있다.

고전적인 의미의 액상화 가능성이 높은 흙은 저소성의 모래질 흙으로 상대적으로 낮은 변형을 범위 (3~6%)에서 액상화 및 강도감소의 가능성이 높다. 반면 일방향 전단변형에 의한 강도감소의 경우 고소성의 흙이 이에 해당되며 과잉간극수압의 증가에 따라 강도감소를 보일 수는 있으나 상대적으로 과잉간극수압비가 낮고, 보다 높은 전단변형율이 요구된다.

EERC에서는 위에 언급한 바와 같이 액상화의 의미를 고전적인 의미로 국한하지 않고 최근 발생한 지진을 반영하여 연구를 수행하였으며, 아래의 수정된 그림 3의 도표를 제시하였다.

그림 3에 도시된 각 영역에 대한 설명은 아래와 같다.

- (1) Zone A : 고전적인 의미의 액상화 발생 가능성이 높은 지반
- (2) Zone B (Transition range, 천이영역) : 액상화 발생가능 지반, 현장함수비가 액성한계의 85% 이상인 경우 액상화 발생가능, Zone A에

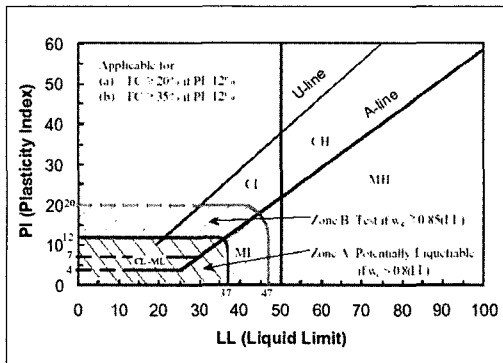


그림 3. Recommendations Regarding Assessment of "Liquefaction" Soil Types

비해 상대적으로 액상화 발생가능성이 낮으며 연성거동을 보임. SPT를 이용한 액상화 평가법 등을 통한 평가는 다소 부적합할 수 있으며, 불교란 시료 또는 양질의 시료에 대한 실험적인 검증이 요구됨. 강도감소나 전단 변형 가능성은 존재함

- (3) Zone C : Zone A와 Zone B에 속하지 않는 지반으로 고전적인 의미의 액상화 발생가능성은 거의 없으며 변형을 연화거동 가능성은 존재함.

3. 액상화 발생 가능성 평가 : SPT를 이용한 평가법

액상화와 관련된 해석에 있어 첫번째 단계가 되는 액상화 발생 가능성 평가는 주로 (1)불교란 시료에 대한 실내시험과 (2)현장지반조사 결과를 통한 경험적 방법으로 이루어진다.

전자의 경우 비용 및 시간, 복잡한 시험절차 등으로 일반적으로 사용되기에는 무리가 따르며 대부분의 경우 후자의 방법을 통해 액상화 발생 가능성 평가를 수행한다. 대상지반의 액상화 저항성을 나타내는 현장지반조사결과는 (1)Standard Penetration Test, (2)Cone Penetration Test, (3)Shear Wave Velocity, (4)Becker Penetration Test(BPT) 등의 결과를 이용할 수 있다. 본 고에서는 가장 널리 사용되고 있는 표준관입저항치(SPT)를 이용하는 방법에 대해서 소개하고자 한다.

3.1 기존의 액상화 평가법

1964년 Great Alaskan 지진(M = 8) 이후 SPT

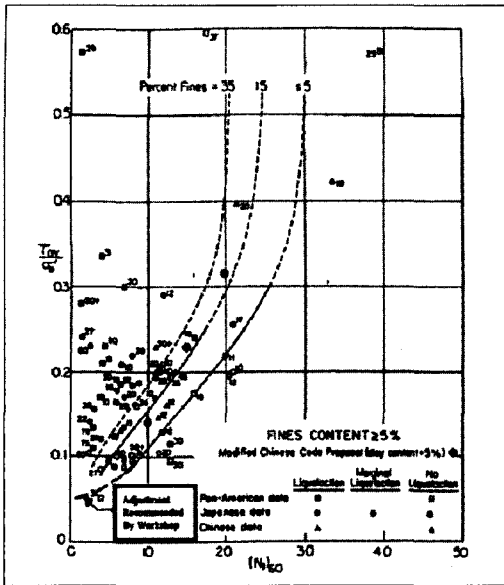


그림 4. between Equivalent Cyclic Stress Ratio and SPT $N_{1.60}$ (Modified from Seed et al., 1984)

시험결과를 이용한 액상화 가능성 평가 연구가 많이 이루어졌다. 아래의 그림 4는 국내에서 현재 가장 널리 사용되고 있는 액상화가능성 평가그래프(이하 SPT-Based Correlations)로써 1984년 Seed 등에 의해 제안됐으며 NCEER Working Group이 일부 수정을 한 바 있다. 이 관계도표는 지반의 액상화 저항성을 나타내는 X축을 상재하중과 에너지 효율 등에 대해 보정한 N치인 $N_{1.60}$ 으로, 지진력을 대변하는 Y축을 지진규모를 고려한 등가 전단응력비(Equivalent Cyclic Stress Ratio : CSR)로 하여 도시하고 있다.

상기의 방법이 가장 널리 사용되고 있기는 하지만, 이미 만들어진지 20년이 지나 (1)1984년 이후 지진기록이 반영되어 있지 않으며, (2)CSR > 0.25인 영역에서의 데이터의 수가 현저히 적어 최근 강진에 대한 고려가 많이 이루어지고 있다는 점에서 다소 부적합하다는 측면을 부인할 수 없다.

3.2 SPT값을 이용한 새로운 제안법 (Seed 등(2003))

최근 확률통계기법의 적용과 최신 지진데이터를 반영하여 기존의 관계식에 대한 수정 연구가 많이 이루어지고 있으며, 대표적인 연구자들로는 Liao 등(1988, 1998), Youd 와 Noble(1997), Toprak 등(1999) 이 있다. 본 고에서 소개하고자 하는 EERC의 연구결과(Seed 등 (2003))를 그림 5에 도시하였다. 그림 5의 곡선은 액상화 발생확률(probability of triggering of liquefaction, PL)을 나타내는 것으로 기존의 상관관계(Seed 등(1984), Yoshimi 등(1994))과 새로이 제안된 상관관계를 비교하여 도시하였다.

새로이 제안된 SPT를 기초로 한 상관관계식(SPT-Based Correlations)은 기존의 지진사례에 최근 발생한 지진사례를 추가하여 총 450여회의 액상화 사례를 토대로 기록의 신뢰성 및 정확성을 바탕으로 203개의 액상화 사례를 선별하여 이용하였다. 새로운 상관관계식의 특징은 아래와 같다.

- (1) 최근의 지진기록을 포함하는 보다 많은 현장 사례를 적용
- (2) SPT결과와 해석에 영향을 주는 요인에 대한 보다 심층적인 분석
- (3) 부지고유 지반운동의 영향 요소에 대한 이해 및 고려
- (4) 현장 반복 전단응력비(CSR)에 대한 향상된 평가법 적용
- (5) 불확실성과 quality를 고려한 현장사례 데이터의 선별
- (6) Bayesian법을 이용한 확률통계기법 적용

새로이 제안된 방법의 보다 향상된 부분 중의 하

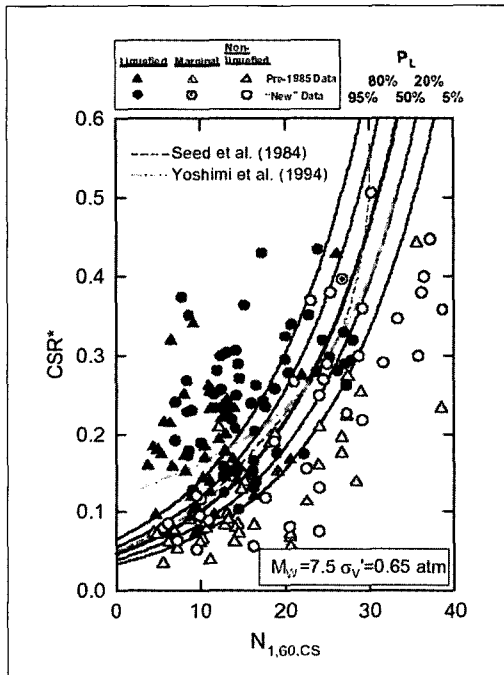


그림 5. Recommended Probabilistic SPT-Based Liquefaction Triggering Correlation (for Mw=7.5 and $\sigma_v'=0.65$ atm), and the Relationship for "Clean Sands" Proposed by Seed et al.(1984)

나는 현장 반복응력비(in-situ Cyclic Stress Ratio(CSR))의 평가이다. 기존의 평가법에서 깊이에 따른 CSR은 아래의 식 (1)을 통해 산정한다.

$$CSR_{peak} = \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) \cdot (r_d) \quad (1)$$

여기서, a_{max} = 최대 수평지표가속도

g = 중력가속도

σ_v = 전응력

σ_v' = 유효구속응력

r_d = 지반심도에 따른 보정계수

이 중에서 r_d 의 경우 Seed와 Idriss(1971)가 제안한 곡선을 이용할 수 있으나, 부지특성을 고려하기 위해서는 Shake91 등의 1차원 지진응답해석을 통해 구하는 방법이 일반적이며, 지진응답해석을 수행하지 않을 경우, 간이적으로 아래의 식 (2)를 통해 산정할 수 있도록 제안하였다. 아래의 식은 2,153개의 응답해석결과를 바탕으로 회귀분석을 통해 산정된 것이다.

$d < 65$ ft:

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(-d + 0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]} \pm \sigma_{\epsilon_{r_d}}$$

$d \geq 65$ ft:

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(-65 + 0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.016 \cdot V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.104(0.0785 \cdot V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]} - 0.0014 \cdot (d - 65) \pm \sigma_{\epsilon_{r_d}} \quad (2)$$

3.2.1 SPT N치의 보정

표준관입시험을 통해 얻어진 표준관입저항치(N치)는 대상지반의 상재압, 해머의 에너지 효율 및 기타 여러 가지 조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 액상화 평가시 지반의 액상화 저항성을 나타내는 N치의 일관성 있는 평가를 위해 이에 대한 일련의 보정작업을 반드시 거쳐야만 한다. 유효상재압에 대한 보정은 아래의 식 (3)과 같다.

$$N_1 = N \cdot C_N \quad (3)$$

여기서, C_N 은 아래의 식 (4)와 같다(Liao and Whitman, 1986).

$$C_N = \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \quad (4)$$

여기서, σ'_v 는 SPT시험 위치의 유효상재압

SPT시험과 관련된 일련의 보정작업(NCEER Working Group, 1997; Youd et al., 2001)은 아래의 식 (5)와 같으며 이를 통해 표준화된 N치를 산정할 수 있다.

$$N_{1,60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (5)$$

여기서, C_R = rod 길이에 대한 보정

C_S = 샘플러 종류에 대한 보정

C_B = 시추공 직경에 대한 보정

C_E = 해머 에너지 효율에 대한 보정

식 (5)에 나타난 보정계수에 대한 내용을 표 2에 요약하였다. 아래의 보정계수중 국내 적용시 문제가

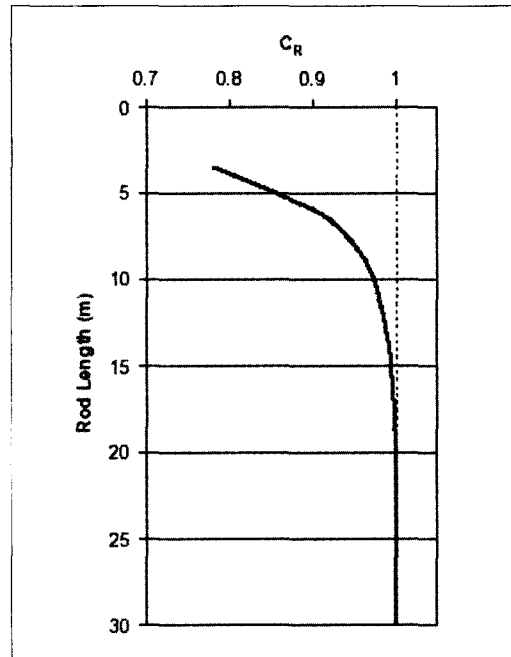


그림 6. Recommended CR values(rod length from point of hammer impact to tip of sampler)

되는 유의해야 할 부분 중의 한 부분은 SPT에너지 효율에 해당되는 CE의 적용이다. 최근 들어 국내에서도 SPT 에너지 효율에 대한 중요성이 대두되면서 이에 대한 많은 연구(박용원 등(1993, 1994), 이호춘 등(1996), 이우진 등(1998), 조성민 등(2000, 2001, 2002))가 이루어지고 있다. 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 로프-풀리식 도넛해머(rope-pulley type donut hammer)를 예로 들면 연구자에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 전반적으로 50%이하의 에너지효율을 가지는 것으로 보고 되고 있다. 정확한 에너지 효율의 보정을 위해서는 이에 대한 보다 많은 연구들이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 액상화 평가시 SPT 에너지 효율을 60%로 가정할 경우, 국내의 연구결과(박용원 등(1993, 1994), 이호춘 등(1996), 이우진 등(1998), 조성민



표 2. Recommended Corrections for SPT Equipment Energy and Procedures

C_R	그림 6. rod 길이에 대한 보정 참조	
C_S	For samplers with an indented space for interior liners, but with liners omitted during sampling	
	$C_S = 1 + \frac{N_{1.60}}{100}$	
	With limits as $1.10 \leq C_S \leq 1.30$	
C_B	Borehole diameter	Correction(CB)
	65 to 115mm	1.00
	150mm	1.05
	200mm	1.15
C_E	$C_S = 1 + \frac{N_{1.60}}{100}$	
	where ER(efficiency ratio) is the fraction or percentage of the theoretical SPT impact hammer energy actually transmitted to the sampler, expressed as %	
	<ul style="list-style-type: none"> The best approach is to directly measure the impact energy transmitted with each blow. When available, direct energy measurements were employed The next best approach is to use a hammer and mechanical hammer release system that has been previously calibrated based on direct energy measurements. Otherwise, ER must be estimated. For good field procedure, equipment and monitoring, the following guidelines are suggested: 	
	Equipment	Approximate ER(see Note 3)
	- Safety hammer ¹	0.4 to 0.75
	- Donut hammer ¹	0.3 to 0.6
	- Donut hammer ²	0.7 to 0.85
	- Automatic-Trip Hammer (Donut or Safety Type)	0.5 to 0.8
		C_E (see Note 3)
		0.7 to 1.2
		0.5 to 1.0
		1.1 to 1.4
		0.8 to 1.4
	<ul style="list-style-type: none"> For lesser quality fieldwork(e.g. : irregular hammer drop distance, excessive sliding friction of hammer on rods, wet or worn rope on caught, etc.) further judgemental adjustments are needed. 	

- Notes : (1) Based on rope and cathead system, two turns of rope around caught, "normal" release(not the Japanese "throw"), and rope not wet or excessively worn.
 (2) Rope and cathead with special Japanese "throw" release.(see also Note 4.)
 (3) For the ranges shown, values roughly central to the mid-third of the range are more common than outlying values, but ER and CE can be even more highly variable than the ranges shown if equipment and/ or monitoring and procedures are not good.
 (4) Common Japanese SPT practice requires additional corrections for borehole diameter and for frequency of SPT hammer blows. For "typical" Japanese practice with rope and cathead, donut hammer, and the Japanese "throw" release, the overall product of $CB \times CE$ is typically in the range of 1.0 to 1.3.

등(2000, 2001, 2002))로 미루어볼 때 N치를 과대 평가하여 위험측의 해석을 하게 될 우려가 있다.

3.2.2 세립분에 대한 보정

다음의 식 (6)과 식 (7)은 각각 세립분에 대한 기존의 보정식과 새로이 제안된 보정식을 나타낸 것이다. 세립분에 대한 보정은 액상화저항성을 대변하는 N치에 곱하여 사용하는 것으로 세립분의 함유량 5%이하까지는 순수한 모래와 동일한 것으로 가정하고, 그 이상의 세립분을 함유하는 지반에 대해서는 소정의 액상화 저항성 증가분을 고려하도록 하고 있다. 새로이 제안된 세립분에 대한 보정식은 기존의 보정식에 비해 상대적으로 세립분의 증가에 따른 액상화 저항성의 증가효과를 낮게 평가하였다. 예를 들어, 세립분 함유량이 10%인 경우, 기존의 보정식 (Seed 등, 1984)에 의하면 액상화 저항성의 증가는 1.25배이나, 새로이 제안된 보정식에 의하면 1.09 배로 기존의 방법이 세립분에 대한 액상화 저항성 증가를 다소 과대하게 평가했다고 판단하고 있다.

$$C_{FINES} = 1 + 0.025 \cdot (FC - 5) \quad (6)$$

$$C_{FINES} = (1 + 0.004 \cdot FC) + 0.05 \left(\frac{FC}{N_{1.60}} \right) \quad (7)$$

여기서, FC : 세립분 함유량(5% ≤ FC ≤ 35%)

3.2.3 지진규모를 고려한 수정계수

N치에 기초한 액상화 저항곡선은 지진규모 7.5를 기준으로 작성된 것으로 설계지진규모가 이와 다르다면 아래의 식 (8)과 같이 지진규모를 고려한 수정계수(Magnitude Correlated Duration Weighting factor : DWF_M)를 적용하여 사용하여야 한다.

$$CSR_N = CSR_{eq, M=7.5} = CSR_{eq, M=M} / DWF_M \quad (8)$$

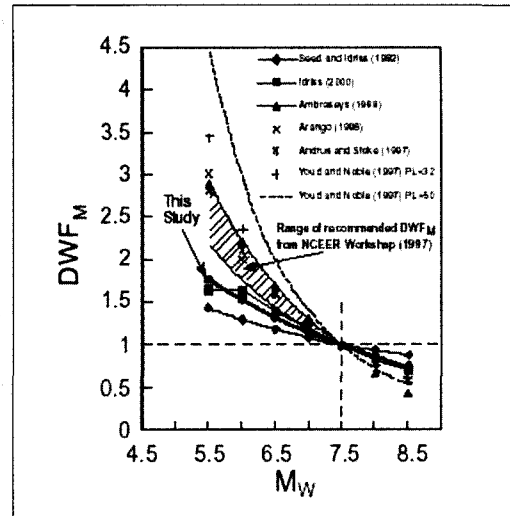


그림 7. 지진규모 수정계수

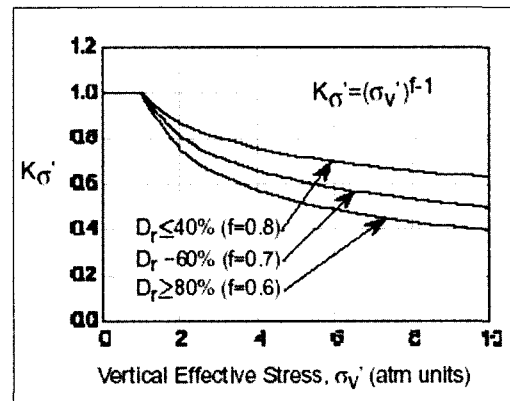


그림 8. Recommended $K_{\sigma'}$ values for $\sigma'_v > 2$ atm

그림 7은 여러 연구자들이 제안한 지진규모 수정계수를 도시한 것으로 그림을 통해 알 수 있듯이 상당한 차이를 보이고 있다. 현재까지도 지진규모 수정계수는 논란이 되고 있으며 현장사례 데이터를 통한 접근법과 실내시험을 통한 접근법 등을 통해 연구가 진행되고 있다. 국내에서 주로 사용하고 있는 지진규모 수정계수는 그림 7에 도시된 것 중 Seed

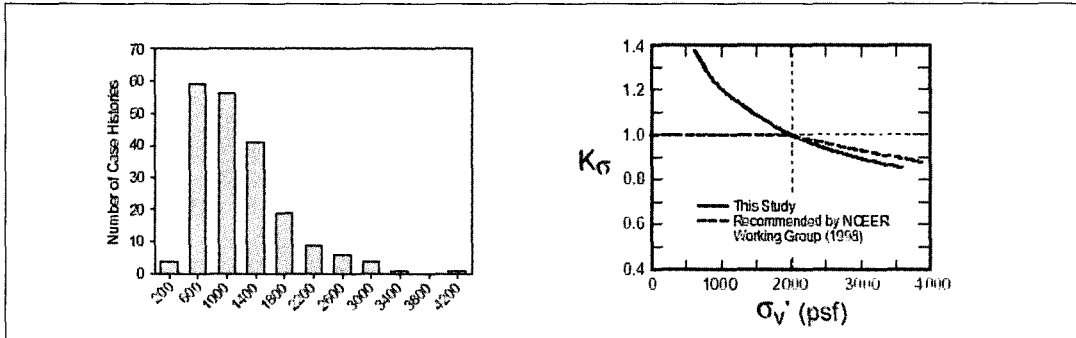


그림 9. Values of K, Developed and Used in These studies, NCEER Working Group Recommendations(for n=0.7, ≈ 60%) for Comparison

and Idriss(1982)이며, 새로이 제안된 지진규모 수정계수는 기존의 수정계수에 비해 지진규모의 영향을 높게 평가하고 있다. 국내의 내진설계에 적용되는 지진규모 6.5를 예로 들면, 기존의 Seed and Idriss(1982)의 지진규모 수정계수를 적용할 경우 DWFm은 1.19이며 새로이 제안된 지진규모 수정계수를 적용할 경우 DWFm은 약 1.40이 된다. 새로이 제안된 지진규모 수정계수는 Idriss(2000)의 지진규모 수정계수와 상당히 근사하며, Idriss(2000)는 반복단순전단시험(cyclic simple shear test)결과와 현장사례분석을 토대로 작성된 것으로 지진규모 수정계수로 실험적 접근법과 현장사례분석이 상호보완적으로 적용되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.4 유효상재압에 대한 보정

유효상재압에 대한 N치의 보정과 별도로 유효상재압의 CSR에 대한 영향을 고려해야 하며 이는 실험적 연구를 통해 NCEER Working Group(Youd et al., 2001)에서 아래의 식 (9)와 그림 8을 제안한 바 있다.

$$CSR_{liq} = CSR_{liq, 1atm} \cdot K_{\sigma} \quad (9)$$

상기의 보정계수 산정에 적용된 액상화 사례들은 유효상재압 600~2,600lb/ft²의 범위에 있으며, EERC에서는 Bayesian 기법을 적용하고 유효상재압 600~3,600lb/ft²의 범위로 하여 상재압에 대한 보정을 새로이 제안하였으며 이를 그림 9에 도시하였다. 이를 식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$K_{\sigma} = (\sigma'_{v0})^{f-1} \quad (10)$$

여기서, f = 0.6 ~ 0.8

기존에 널리 사용되고 있는 Seed 등(1984)을 비롯하여, Liao 등(1988, 1989), Youd와 Noble(1997) 그리고 Toprak 등(1999)의 연구는 모두 유효상재압 1 atm(2000 lb/ft²)을 기준으로 정규화되어 있다. 하지만 실제로 이용된 데이터의 평균(1,300 lb/ft², 0.65 atm)은 이보다 다소 낮으며, 이는 기존의 1 atm으로 정규화 하는 방식이 다소 불안전측이라는 것을 시사한다. 이와 같은 불안전측 해석은 낮은 깊이에서 적용할 경우에 최소화 된다. 기존식과의 통일성을 위해 유효상재압 1 atm에 대하여 정규화한 결과를 그림 9에 도시하였으며, EERC에서는

$$P_L(N_{1.60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC) = \Phi \left[\frac{\left(N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 \right)}{2.70} \right] \quad (11)$$

where

P_L = the probability of liquefaction in decimals (i.e. 0.3, 0.4, etc.), and
 Φ = the standard cumulative normal distribution.

Also the cyclic resistance ratio, CRR, for a given probability of liquefaction can be expressed as:

$$CRR(N_{1.60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC, P_L) = \exp \left[\frac{\left(N_{1.60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 + 2.70 \cdot \Phi^{-1}(P_L) \right)}{13.32} \right] \quad (12)$$

where

$\Phi^{-1}(P_L)$ = the inverse of the standard cumulative normal distribution (i.e. mean=0, and standard deviation=1)

note: for spreadsheet purposes, the command in Microsoft Excel for this specific function is "NORMINV($P_L, 0, 1$)"

지반의 지향성에 대한 보정	CSR에 대한 보정
유효상재압 보정, 에너지 효율 및 장비 등에 대한 보정 $C_N = \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5}$ $N_{1.60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E$	지진규모에 대한 보정 $CSR_N = CSR_{eq, M=7.5} = CSR_{eq, M=N} / DWF_M$
세립분 함유량에 대한 보정 $C_{FINES} = (1 + 0.004 \cdot FC) + 0.05 \left(\frac{FC}{N_{1.60}} \right)$	유효상재압에 대한 보정 $CSR^* = CSR_{eq, M=7.5, 1atm} = CSR_{eq, M=7.5} / K_\sigma$

그림 10. 보정계수 요약

모든 지반조건 및 보정계수를 입력치로 하는 관계식

을 식 (11)과 식 (12)로 도출하였다.

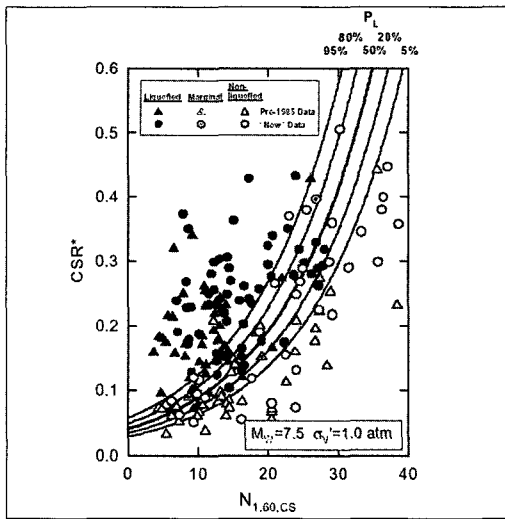


그림 11. Recommended "Probabilistic" SPT-Based Liquefaction

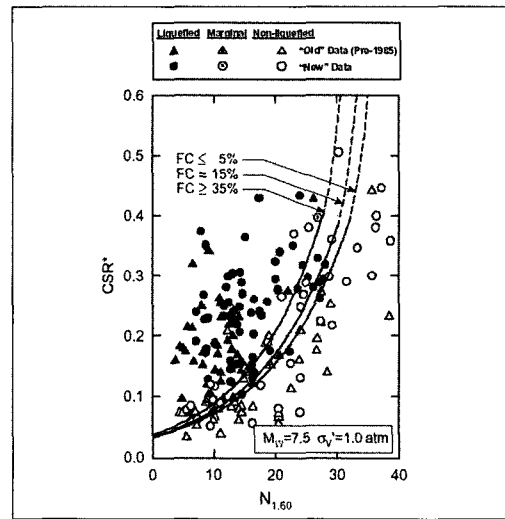


그림 12. Recommended "Deterministic" SPT-Based Liquefaction Triggering Correlation (For MW=7.5 and sv'=1.0 atm) Triggering Correlation (For MW=7.5 and sv'=1.0 atm) with Adjustments for Fines Content Shown

3.2.5 SPT값을 이용한 새로운 제안법의 요약

앞 절에서 설명한 바와 같이 새로이 제안된 액상화 평가법은 식 (11)과 식 (12)를 통해 직접 산정할 수 있으며, 또한 아래의 그림 10과 같이 N치와 CSR에 대한 보정을 통해 적용할 수 있다. 새로이 제안된 방법을 액상화 발생확률 및 세립분 함유량에 따라 도시하면 각각 그림 11, 그림 12와 같다.

4. 결론

본 고에서는 EERC에 최근 발표한 액상화연구 결과 중 국내에서 가장 널리 사용되는 간이 액상화 평가방법인 Seed-Idriss법에 대한 후속 연구 결과를 소개하였다. 새로이 제안된 액상화 평가법은 최근 강진기록을 대한 요구를 수렴하여 기존의 지진 기록

및 최신 강진기록의 포함시켜 통계확률기법을 통해 신뢰성있는 상관관계를 도출, 액상화 해석에 있어 의미있는 발전을 이루어 낸 것으로 생각된다. 최근 국내에서도 국내 고유의 액상화 평가법에 대한 많은 연구들이 진행되고 있으며 기존 데이터에 대한 통계 확률통계기법을 통한 재해석이 활발히 이루어지고 있는 시점에서 본 고에 소개된 내용이 의미있는 참고자료가 될 것으로 판단된다. 액상화 평가법은 각각의 방법에 따라 결과에 있어 큰 차이를 보여 공학적인 판단이 크게 요구되는 해석기법이므로, 이를 올바르게 사용하기 위해서는 적용하는 방법에 대한 충분한 이해와 검토가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 본 고에서 소개한 EERC의 연구결과와 같이 국내에서도 향후 액상화에 대한 지속적인 연구가 이루어진다면 실무에 적용될 수 있는 국내실정에 적합한 설계기준이 정립될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박용원 등(1994), "표준관입시험의 해머에너지 측정", 학술발표회 개요집-1, 대한토목학회, pp.821-824
2. 이우진 등(1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", 1998년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학학회, pp.75-84
3. 이호춘, 김병일, 박용원(1997), "표준관입시험의 동적효율 측정", 한국지반공학회지, 제 13권 1호, pp.169-180
4. 한국도로공사(2000, 2001, 2002), 표준관입시험 활용법 개선 연구, 도로연구소(도로교통기술원) 연구보고서
5. Andrews, D. C. A. and Martin, G. R.(2000). "Criteria for Liquefaction of Silty Soils." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand.
6. Andrus, R. D. (1994). "In situ characterization of gravelly soils that liquefied in the 1983 Borah Peak Earthquake." Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
7. Andrus, R.D. and Stokoe, K.H.(1997). "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity." Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER-97-0022.
8. Andrus, R.D. and Stokoe, K.H.,(2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, No. 11, pp. 1015-1025
9. Arango, I.(1996). "Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 11, pp. 929-936
10. Boulanger, R. W. and Seed, R. B.(1995). "Liquefaction of Sand Under Bi-directional Monotonic and Cyclic Loading." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 12, pp. 870-878
11. Boulanger, R. W. (2003). "High Overburden Stress Effects in Liquefaction Analyses." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, accepted in press.
12. Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, H. T., Onalp, A., Seed, R. B., Stewart, J. P., Youd, T. L., Baturay, M. L., Cetin, K. O., Christensen, C., Karadayilar, T., and Emrem, C. (2001). "Ground Failure In Adapazari, Turkey." Proceedings of Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, August 24-25.
13. Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R. B., Cetin, K. O., Bol, E., Baturay, M. B., and Christensen, C. (2003). "Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari, Turkey." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, submitted.
14. Cetin, K. O.(2000). "Reliability-Based Assessment of Seismic Soil Liquefaction



- Initiation Hazard." Dissertation in partial fulfillment for the degree of doctor of philosophy, University of California, Berkeley.
15. Cetin, K.O. & Seed, R.B. (2000). "Earthquake-Induced Nonlinear Shear Mass Participation Factor (rd)." Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT-2000/08, University of California, Berkeley.
 16. Cetin, K. O. and Seed, R. B. (2001). "Nonlinear Shear Mass Participation Factor (Rd) For Cyclic Shear Stress Ratio Evaluation." Research Report No. UCB/GT-2000/08, University of California, Berkeley.
 17. Cetin, K.O., Der Kiureghian, A., & Seed, R.B. (2002).
 18. "Probabilistic Models for the Initiation of Seismic Soil Liquefaction." Structural Safety, Vol. 24, pp. 67-82
 19. Geyskens, P., Der Kiureghian, A., Monteiro, P.(1993), "Bayesian Updating of Model Parameters", Structural Engineering Mechanics and Materials Report No. UCB/SEMM-93/06, University of California at Berkeley.
 20. Harder, L. F. Jr. and Boulanger, R. (1997). "Application of K_s and K_α Correction Factors." Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER-97-0022.
 21. Idriss, I. M., Sun, J. I., (1992). "Users Manual for SHAKE91, A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits", Program Modified Based on the Original SHAKE Program Published in December 1972, by Schnabel, Lysmer and Seed, August.
 22. Liao, S. S. C., and Whitman, R. V. (1986). "Overburden Correction Factor for SPT in Sand." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 3, March 1986, pp. 373-377
 23. Liao, S. S. C., Veneziano, D., and Whitman, R.V. (1988). "Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 4, pp. 389-409
 24. Liao, S. S. C., and Lum, K. Y. (1998). "Statistical Analysis and Application of the Magnitude Scaling Factor in Liquefaction Analysis." Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Vol. 1, 410-421
 25. NCEER (1997). "Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." Edited by Youd, T. L., Idriss, I. M., Technical Report No. NCEER-97-0022, December 31, 1997.
 26. Sancio, R. B., Bray, J. D., Riemer, M. F., and Durgunoglu, H. T. (2003). "An Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Adapazari Silt." Paper 172, Pacific Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, New Zealand
 27. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No SM9, Proc. Paper 8371,

- September 1971, pp. 1249-1273
28. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982). "Ground motion and soil liquefaction during earthquakes", Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Ca.
 29. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M. (1984). "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-84/15, University of California at Berkeley, October, 1984.
 30. 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 Engineering*, ASCE, 111(12), 1425-1445.
 31. Seed, R. B. and Harder, L. F. (1990). "SPT-Based Analysis of Cyclic Pore Pressure Generation And Undrained Residual Strength." H.B. Seed Memorial Symposium, Berkeley, Ca., BiTech Publishing, Ltd., v. 2, p. 351-376
 32. Seed, R. B., Chang, S. W., Dickenson, S. E., and Bray, J. D. (1997). "Site-Dependent Seismic Response Including Recent Strong Motion Data." Proc., Special Session on Earthquake Geotechnical Engineering, XIV International Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, A. A. Balkema Publ., Sept. 6-12, pp. 125-134
 33. Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., and Riemer, M. F. (2001). "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation." 4th Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, March.
 34. Seed, R. B., Cetin, K. O., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F. Jr., Kayen, R. E., and Moss, R. E. S. (2002). "SPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, accepted, in-press.
 35. Toprak, S., Holzer, T. L., Bennett, M. J., Tinsley, J. C. (1999). "CPT - and SPT - based Probabilistic Assessment of Liquefaction Potential, Proceedings of Seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction.
 36. Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Ohara, J. (1994). "In-situ Liquefaction Resistance of Clean Sands Over a Wide Density Range", *Geotechnique*, Vol. 44, No. 3, pp. 479-494
 37. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. III., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki.
 38. Youd, T. L., Noble, S. K. (1997). "Liquefaction Criteria Based on Statistical and



Probabilistic Analyses”, Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, December 31, 1997, pp. 201-205

39. Youd, T.L., I. M. Idriss, Ronald D. Andrus, Ignacio Arango, Gonzalo Castro, John T. Christian, Richardo Dobry, W. D. Liam Finn, 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. Seed, and Kenneth H. Stokoe II. (2001). “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(10).

일본 지반공학회 회장 초청 특별 세미나

1. 일 시 : 2월 9일(월) 16:00 ~ 18:00
2. 장 소 : 한국과학기술단체총연합회 제2회의실(강남구 역삼동 국기원 옆)
3. 회 비 : 일반회원 20,000원, 학생회원 10,000원
4. 주 최 : 한국지반공학회
5. 발 표 : 1) “Tunnel Failure Experience in Japan”
Dr.Toshihisa Adachi / President of Japan Geotechnical Societg
2) “ISO in Geotechnical Engineering at Present”
Dr.Yoshinori Iwasaki / Managing Director of Geo-Research Institute