

# 액상화 가능 지수를 이용한 국내 서해안 지역의 액상화 평가

## LPI-based Assessment of Liquefaction Potential on the West Coastal Region of Korea

서민우<sup>1)</sup> · 선창국<sup>2)</sup> · 오명학<sup>3)</sup>

Seo, Min-Woo · Sun, Chang-Guk · Oh, Myoung-Hak

**국문 요약** >> 느슨한 포화 사질토 층에 위치한 구조물은 지진 시 액상화로 인해 막대한 인적 경제적 피해가 발생하기 때문에 액상화 발생 가능 지반으로 분류된 지역은 구조물의 설계 및 운영 시 액상화 발생 가능성에 주의를 기울여야 한다. 한반도의 경우 중진 지역에 해당되고 역사 문헌의 발생 기록을 제외한 어떤 액상화 피해도 보고되지 않음에 따라 오랫동안 액상화에 대해서는 안전지대로 여겨져 왔다. 하지만, 최근 해외 지진 사례에 의하면 국내 서해안 지역 지반과 유사한 비소성 실트질 흙에서의 액상화 발생과 이로 인한 피해 사례가 종종 보고되고 있다. 본 연구에서는 국내에서의 액상화 가능성 평가 기법 합리화의 일환으로 서해안 두 부지를 대상으로 피에조콘관입시험(CPTu)과 표준관입시험(SPT) 결과를 이용하여 액상화가능지수(LPI)를 산정하였다. LPI는 심도 20m까지의 액상화 가능성을 통합 적분하여 액상화로 인한 지표면 피해 발생 정도를 지수로 제시한다. 먼저 대상 현장에 대해 시나리오별 액상화 발생 가능성을 평가한 후, CPTu와 SPT로부터 산정된 LPI 값을 비교하였다. 액상화 저항 강도를 의미하는 진동저항응력비(CRR) 값에 의하면, CPTu로부터 구한 보정 콘 선단저항력 ( $q_{e1N}$ )<sub>CS</sub>가 40에서 120 사이인 경우 또는 CRR이 0.23 이하인 경우에 SPT로부터의 산정된 값보다 작게 평가되었다. 또한 CRR 차이는 세립질 함유량이 큰 흙에서 두 방법 간의 차이가 더 크게 나타났다.

**주요어** 액상화가능지수, 액상화, 표준관입시험, 피에조콘관입시험, 진동전단응력비

**ABSTRACT** >> Liquefaction is a significant threat to structures on loose saturated sandy soil deposits in the event of an earthquake, and can often cause catastrophic damage, economic loss, and loss of life. Nevertheless, the Korean peninsula has for a long time been recognized as a safe region with respect to the hazard of liquefaction, as the peninsula is located in a moderate seismicity region, and there have been no reports of liquefaction, with the exception of references in some historical documents. However, some earthquakes that have recently occurred in different parts of the world have led to liquefaction in non-plastic silty soils, a soil type that can be found in many of the western coastal areas of Korea. In this study, we first present procedures for evaluating the liquefaction potential, and calculate the liquefaction potential index (LPI) distribution at two western coastal sites using both piezocone penetration test (CPTu) data and standard penetration test (SPT) data. The LPI is computed by integrating liquefaction potential over a depth of 20m, and provides an estimate of liquefaction-related surface damage. In addition, we compared the LPI values obtained from CPTu and SPT, respectively. Our research found that the CRR values from CPTu were lower than those from the SPT, particularly in the range between 40 and 120 for the corrected tip resistance, ( $q_{e1N}$ )<sub>CS</sub>, from the CPTu, or in the range of CRR less than 0.23, resulting in relatively high LPI values. Moreover, it was observed that the differences in the CRR between the two methods were relatively higher for soils with high fine contents.

**Key words** Liquefaction potential index, Liquefaction, Standard penetration test, Piezocone penetration test, Cyclic stress ratio

## 1. 서론

액상화란 느슨한 사질토 지반이 진동 하중을 받아 순간적으로 과잉간극수압이 증가하여 전단강도를 잃게 되는 현상으로, 1995년 일본에서 발생한 Kobe 지진을 통해 액상화가 경제 사회적으로 얼마나 큰 피해를 가져올 수 있는지를 경험한 바 있다. 일반적으로 액상화는 사질토에서 주로 일어난다고 알려져 있는데, 최근 들어 세계적

<sup>1)</sup> 일리노이주립대학교 토목환경공학과, 박사후연구원

<sup>2)</sup> 정회원·한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원  
(교신저자: pungsun@kigam.re.kr)

<sup>3)</sup> 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부, 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 4. 6 / 수정일 1차 : 2009. 5. 25, 2차 : 2009. 6. 9 / 게재확정일 : 2009. 6. 9)

으로 발생한 액상화 피해 사례를 살펴보면 이미 알려진 사실도 지반뿐만 아니라 비소성 실트지반에서도 액상화가 발생하여 큰 피해가 있었음이 보고되었다.<sup>(1)</sup> 특히, 1999년 터키에서 발생한 Kocaeli 지진과 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진은 기존 개념에서는 액상화에 안전하다고 분류되는 세립질 지반에서도 액상화가 발생할 수 있음을 보여준 바 있다.<sup>(2)</sup>

국내의 경우 최근 들어 서해안을 중심으로 대규모 개발이 이루어짐에 따라 서해안 지역의 액상화 발생 가능성이 제시되고 있다.<sup>(3)</sup> 연약지반이 많은 서해안 지역을 개발하기 위해서 해안을 매립하여 부지를 조성하고, 이곳에 신도시, 항만, 공항 등을 건설하게 되는데, 이렇게 준설을 통해 부지를 조성하는 경우 상부에는 불균질하고 느슨한 비소성 실트질 혹은 모래질 토사층으로 구성되며, 그 하부에는 느슨한 실트질 모래로 구성된 퇴적층이 존재하게 된다. 이런 지반 특성을 가진 서해안 지역은 최근 액상화 피해 사례에 근거해 볼 때 비록 실트질이 다수 포함되어 있다 하더라도 지진시 액상화가 일어날 수 있는 특성적 개연성을 가지고 있으며<sup>(1),(4)</sup>, 액상화 발생 가능성을 간과해서는 안 되는 지역이라고 할 수 있다.

잘 알려진 바와 같이 지반의 액상화 평가는 표준관입 시험(Standard Penetration Test, SPT) 혹은 피에조콘관입 시험(Piezocene Penetration Test, CPTu 또는 CPT)과 같은 현장 시험의 결과를 이용하거나 진동삼축시험과 같은 실내 시험의 결과를 토대로 이루어지게 된다. 이 때 각 위치에서의 액상화 발생 가능성은 액상화에 가장 취약한 것으로 판단되는 깊이에서 산정된 액상화 안전율로 표현되는데<sup>(5)</sup>, 이렇게 산정된 액상화 안전율은 실제 구조물 설계자의 주요 관심사라고 할 수 있는 액상화가 지상에 위치한 구조물의 정량적 피해 정도를 파악하기에는 여러 제약이 따른다. 이에 최근 들어 많은 연구자들이 액상화 가능 지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 도입하여 액상화로 인한 구조물의 피해 예측을 보다 체계적으로 수행하고 있다.<sup>(6-8)</sup> 이외에도 LPI는 광범위한 지역의 액상화 발생 가능성을 파악하기 위한 액상화 취약지도(Hazard Map) 작성에도 이용되고 있는데, 이러한 가시적 지도는 최근 들어 비약적 발전을 보이고 있는 GIS 기법의 융합을 통해 활용도가 지속적으로 확대되고 있다.<sup>(9)</sup> 국내에서도 강규진 등<sup>(10)</sup>은 광범위한 지역의 액상화 발생 가능성을 평가하기 위해서 등가 액상화 안전율을 산정하여 그 유용성을 확인한 바 있지만, 국내의 경우 아직은 LPI의 지역적 효용성 확보나 실질적 적용 관련 연구가

그리 활발하지는 못한 실정이다.

현장 시험을 통한 액상화 평가의 경우, CPTu 결과를 이용하여 액상화 발생 가능성을 산정하는 방법은 깊이별로 연속적인 지층의 자료를 취득할 수 있는 이점으로 인해 현재 세계적으로 그 활용도가 매우 높다고 할 수 있다.<sup>(5),(11),(12)</sup> 하지만 국내의 경우 고전적 현장 시험인 SPT에 비해 상대적으로 최근부터 CPTu가 활용됨에 따라 그간 실질적 CPTu 적용 액상화 평가 연구가 체계적으로 이루어지지 못했으며, 이러한 이유로 국내 지반에서의 합리적 액상화 평가 기법 정립을 위해 SPT와 CPTu 결과를 체계적으로 비교 분석한 실무적 연구 역시 매우 제한적인 상황이다. 본 연구에서는 LPI를 통해 액상화로 인한 피해 정도를 산정하는 절차를 제시하고 그 절차에 따라 실제 국내 부지에 대해 LPI를 산정하여 액상화 평가를 수행하였다. 연구 대상은 서해안의 두 지역 현장이며, 수행된 CPTu와 SPT 시험 결과를 이용하여 준설 매립이 이루어진 후 일정 기간이 지난 지반과 준설 매립이 이루어지기 이전 자연 상태에 대해 액상화 발생 가능성을 평가하였다. 지진 시나리오별로 산정된 LPI 값을 통해 각 위치별 및 깊이별 액상화 안전율을 산정하고, 각 시험 방법에 따른 액상화 저항 특성을 비교하였다.

## 2. 액상화 가능 지수

액상화 가능 지수(LPI)는 Iwasaki, et al.<sup>(13)</sup>이 액상화로 인한 피해 정도를 판단하기 위해서 처음으로 제시한 지수로서, 액상화의 발생 깊이와 발생 가능 지층 두께가 액상화 정도(Severity)에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 즉, LPI는 액상화가 발생할 경우 지표에 영향을 미치는 깊이로 판단되는 지하 20m까지의 액상화에 대한 취약성을 누적한 값이므로 액상화로 인한 지표면 피해 정도와 큰 상관관계를 보인다. LPI의 결정은 현재에도 Iwasaki, et al.<sup>(13)</sup>이 처음으로 제안한 식 (1)에 따라 주로 이루어진다.

$$LPI = \int_0^{20} F(z) W(z) dz \quad (1)$$

여기서,  $z$ 는 지표면에서부터의 깊이를 나타내며,  $F(z)$ 는 각 깊이에서 액상화에 대한 안전율(Factor of Safety, FS)의 함수로써 안전율이 1보다 작은 경우에 한해서  $F(z) = 1 - FS$ 로 정의된다. 그리고  $W(z)$ 는 액상화 발생 깊이를 고려하기 위한 가중치 함수( $W(z) = 10 - 0.5z$ )이다. LPI는 식 (1)의 정의에 따라 이론적으로 0부터 100사이 값은

가지게 된다. LPI는 지표면부터 심도 20m까지 F(z)와 W(z)를 곱한 값을 누적하는 적분 형태의 계산 값이므로 본질적으로 해당 부지에 대해 단일 값으로 결정될 수 있으나, 적분 대상 심도를 다르게 고려할 경우에 그 심도에 서의 LPI 값으로도 제시될 수 있다. 특히, 기반암과 같은 액상화 발생 가능성이 전혀 없는 지층이 20m 깊이 위에 분포할 경우 대상 부지의 LPI는 액상화가 발생할 수 있는 지층 분포 심도까지의 적분 값으로 계산할 수 있다. LPI를 산정하기 위해서는 식 (1)에서 제시된 바와 같이 각 지층에서 액상화 안전율을 먼저 구하게 된다. 이를 위해서 일반적으로 Youd, et al.<sup>(5)</sup>이 제시한 방법이 널리 이용되고 있으며, 본 연구에서도 이 방법을 따라 액상화 안전율을 산정하였다.

액상화 안전율 산정을 위해서는 먼저 진동전단응력비 (Cyclic Stress Ratio, CSR)를 Seed and Idriss<sup>(14)</sup>가 제시한 식 (2)를 이용하여 결정해야 한다.

$$CSR = \frac{\tau_{avg}}{\sigma'_{vo}} \approx 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} \approx 0.65 \frac{PGA}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \gamma_d \quad (2)$$

여기서,  $\tau_{avg}$ 는 평균 전단응력,  $\sigma'_{vo}$ 는 유효 수직응력,  $\sigma_{vo}$ 는 총 수직응력,  $\tau_{max}$ 는 최대 전단응력, PGA는 지표면에서의 최대지반가속도(g), 그리고  $\gamma_d$ 는 응력감소계수(Stress Reduction Factor)이다. 그리고 액상화에 대한 지반의 저항력을 의미하는 진동저항응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 SPT와 CPTu 결과로부터 각각 산정해야 하며, 이 때 SPT는 식 (3)을 이용하여 계산하고 CPTu는 식 (4)를 통해 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{10[(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

여기서,  $(N_1)_{60}$ 은 상재압과 해머 효율 60%로 정규화한 N 값으로서, 세립분 함량(Fine Content, FC)이 5% 이상인 경우,  $(N_1)_{60}$ 을 세립분 함량으로 보정하여 구한  $(N_1)_{60CS}$ 를 이용하여 CRR을 구한다.<sup>(6),(11)</sup>

$$(q_{CLN})_{CS} < 50, \quad CRR_{7.5} = 0.833 [(q_{CLN})_{CS}/1,000] + 0.05 \quad (4a)$$

$$50 \leq (q_{CLN})_{CS} < 160, \quad CRR_{7.5} = 93 [(q_{CLN})_{CS}/1,000]^3 + 0.08 \quad (4b)$$

식 (4)는 CPTu 결과로부터  $CRR_{7.5}$ (지진규모 7.5에서 CRR)를 구하는 식이며, 식 (4)에 포함된  $(q_{CLN})_{CS}$ 는 식 (5)에 따라 구한다.

$$(q_{CLN})_{CS} = K_s \times q_{CLN} \quad (5)$$

여기서,  $K_s$ 는 입자 특성 보정 계수이고,  $(q_{CLN})$ 은 식 (6)로부터 계산할 수 있다.

$$q_{CLN} = C_Q \left( \frac{q_c}{P_a} \right) = \left( \frac{P_a}{\sigma_{vo}} \right)^n \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \quad (6)$$

여기서,  $C_Q$ 는 정규화 계수 (<1.7),  $q_c$ 는 콘 선단저항력 (kPa),  $P_a$ 는 대기압(100kPa), 그리고  $n$ 은 반복 계산에 의해 산정되는 지수(0.5~1.0 범위)이다. 한편, 본 연구에서는  $q_c$  대신 간극수압 측정치와 콘 면적비를 고려하는  $q_t$ (Corrected Total Cone Tip Resistance)를 이용하여 CRR을 산정하였으며,  $q_t$ 의 산정식은 다음과 같다.

$$q_t = q_c + (1 - a)u \quad (7)$$

여기서,  $a$ 는 콘 면적비, 그리고  $u$ 는 콘 관입시 측정되는 간극수압이다.

CPTu 결과를 이용하는 경우 흙 거동에 따른 분류 지수(Soil Behavior Type Classification Index,  $I_C$ )를 도입하여 기본적인 분류 지표로 이용하게 된다.  $I_C$ 가 2.6 이상인 경우 액상화가 발생하기에는 너무 점토를 많이 포함하는 흙으로 판단하여 액상화가 발생하지 않는 것으로 간주하는데, 이 때  $I_C$ 는 식 (8)을 이용하여 구한다.  $Q$ 와 백분율 (%) 단위인  $F$ 는 Robertson and Wride<sup>(11)</sup> 및 Youd, et al.<sup>(5)</sup>에 의해 제시된 절차를 따라 계산한다.

$$I_C = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (8a)$$

$$Q = \left( \frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a} \right) \times \left( \frac{P_a}{\sigma_{vo}} \right)^n \quad (8b)$$

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} \times 100 (\%) \quad (8c)$$

여기서,  $q_c$ 는 콘 선단저항력(kPa),  $\sigma_{vo}$  및  $\sigma'_{vo}$ 는 전체 수직응력 및 유효 수직응력,  $P_a$ 는 대기압(kPa),  $n$ 은 흙 특성 계수(점토질 흙은 1.0 그리고 모래질 흙은 0.5), 그리고  $f_s$ 는 CPTu에서 측정되는 주면 마찰력이다. 이렇게 각 시험에 따른 CRR을 산정한 후, 식 (9)와 같이 CRR과 CSR의 비로부터 액상화 안전율(FS)을 구하게 된다.

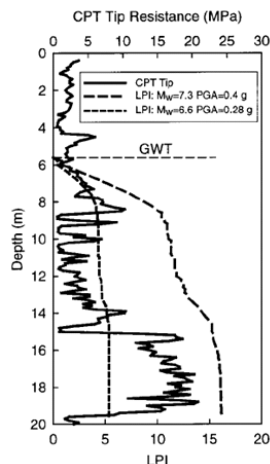
$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} MSF \quad (9)$$

여기서,  $CRR_{7.5}$ 는 규모 7.5에서의 반복저항응력비,  $CSR$ 은 반복전단응력비, 그리고  $MSF$ 는 지진규모 보정 계수 (Magnitude Scaling Factor)이며,  $MSF$ 는 식 (10)에 제시된 바와 같이 지진 규모( $M$ )에 따른 관계를 통해 결정하게 된다.<sup>(5)</sup>

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}} \quad (10)$$

순차적 절차로 제시된 위의 과정에 따라 현장 시험 결과를 이용하면 LPI를 용이하게 산정할 수 있으며, 그림 1은 LPI 산정의 예로서 지진 규모와 지표면의 최대지반 가속도(PGA)가 다른 두 종류의 지진 시나리오에 대하여 깊이에 따른 콘 저항 값의 변화와 LPI 값을 보여주고 있다.<sup>(6)</sup> 그림에서 각 심도의 LPI는 식 (1)의 적분 구간을 0m에서 20m까지 적용하는 대신 0m부터 해당 심도까지 적용하여 계산한 개념적 값이다. 따라서 그림 1의 액상화 평가 대상 부지에서의 최종 LPI는 심도 20m에서의 LPI 값이 된다. 이렇게 각 지진 시나리오에 따라 LPI가 구해지면, 이를 통해 해당 지진 시나리오별 액상화로 인한 피해 정도를 예측할 수 있다.

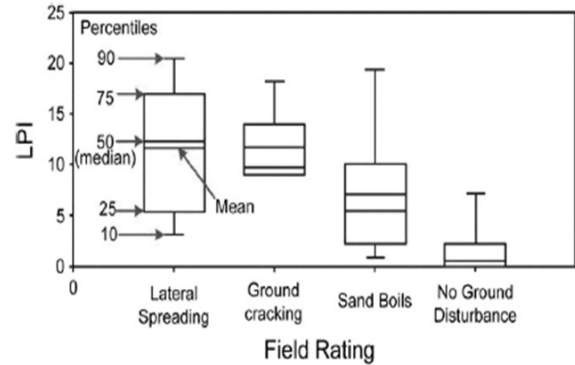
Iwasaki, et al.<sup>(13)</sup>은 LPI가 5보다 작은 경우 액상화로 인한 피해가 미미하지만, 15보다 큰 경우 큰 피해가 예상된다고 표 1과 같이 제시한 바 있다. 이 기준은 현재에도 LPI를 이용한 액상화 평가시 기준으로 널리 적용되고 있다. 또한, 그림 2(a)에 제시한 상자 그림(Box-Whisker Plots)과 같이, Toprak and Holzer<sup>(6)</sup>는 액상화가 발생한 지역에서 LPI를 산정한 후 이를 각 피해 유형별로 구분



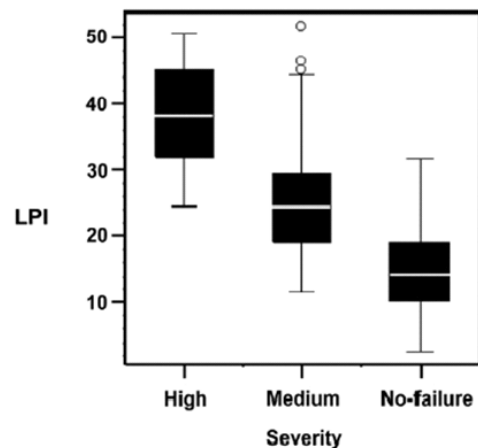
〈그림 1〉 깊이에 따른 LPI의 분포 제시 사례<sup>(6)</sup>

〈표 1〉 LPI에 따른 액상화 정도<sup>(13)</sup>

LPI 범위	액상화로 인한 피해 정도(severity)
0	매우 낮음
$LPI \leq 5$	낮음
$5 < LPI \leq 15$	높음
$LPI > 15$	매우 높음



(a) Toprak과 Holzer의 제시 분포<sup>(6)</sup>



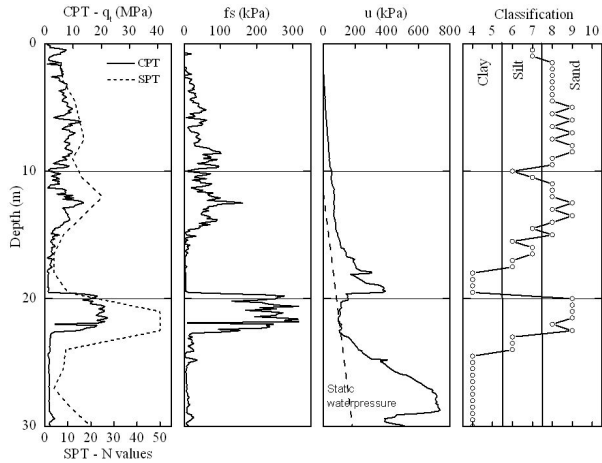
(b) Papathanassiou의 제시 분포<sup>(8)</sup>

〈그림 2〉 액상화 정도와 유형에 따른 LPI 분포

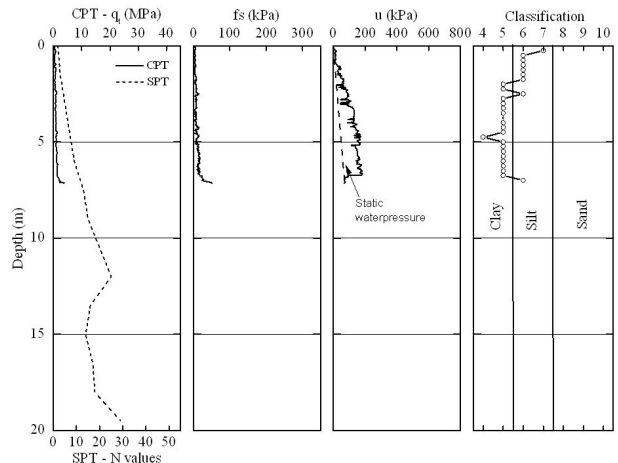
하여 LPI에 따른 각 피해 가능성을 도출하였다. 또한, Papathanassiou<sup>(8)</sup>도 액상화로 인한 피해 강도 기준으로 그림 2(b)와 같은 LPI 분포를 제시한 바 있다. LPI는 제한적 단일 부지 뿐만 아니라 넓은 구역의 액상화 발생 가능 정도를 예측하는 분포도 작성에도 널리 활용되고 있으며, 특히 지진 최대 가속도에 따른 액상화 피해 지역 범위의 예비적 확인에 도입되어 효율적으로 적용되고 있다.<sup>(15)</sup>

### 3. 현장 및 실내 시험

본 연구에서는 서해안에 위치한 두 현장 영역을 대상으로 액상화 평가를 수행하였다. 준설 매립 후 10년 이상 경과한 A 현장과 현재 개발이 이루어지지 않는 자연 상태



〈그림 3〉 현장 시험 결과 및 지층 분류(A 현장)



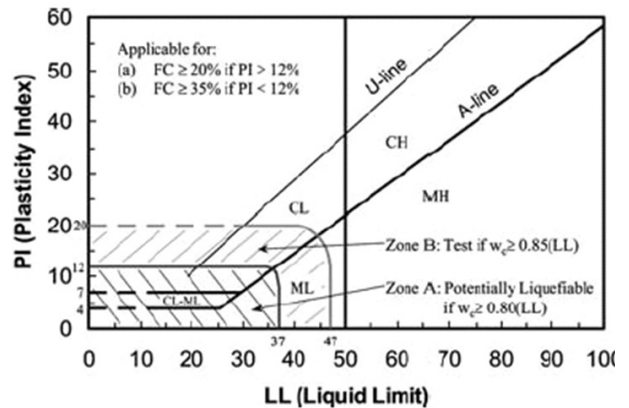
〈그림 4〉 현장 시험 결과 및 지층 분류(B 현장)

의 B 현장에서 각각 시추조사를 수반한 표준관입시험(SPT) 및 인접 위치에서의 피에조관입시험(CPTu)을 수행하였으며, 이들 자료로부터 액상화 저항 특성을 평가하였다.

A 현장은 인천 송도 근해에 위치한 해상 준설 매립 지반 조건으로 실트와 모래가 다양한 두께로 교차하여 분포하고 있는 상부 매립층과 느슨한 실트질 모래 및 점토로 이루어진 퇴적층으로 구성되어 있었다. 대상 부지의 기반암은 지표면에서 약 35m 깊이에 존재하였다. A 현장에서 채취된 시료의 입도분석시험 결과 주로 모래와 실트로 구성된 것으로 나타나며, 액소성 한계는 주로 20~30%의 범위에 존재하였고 함수비는 30~40%의 값을 보였다.

그림 3은 A 현장의 심도에 따른 CPTu 결과( $q_t$ ,  $f_s$  및  $u$ ) 및 이에 따른 흙의 분류를 SPT 결과인  $N$  값과 함께 도시한 것이다. 흙의 분류는 Robertson, et al.<sup>(16)</sup>이 제시한 분류 기준을 이용하여 수행하였는데, 분석 결과 상부 매립층은 대부분이 실트질 모래(분류 기준 7) 또는 모래(분류 기준 8)로 분류되었고 하부로 갈수록 점토층이 우세하였다. 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 A 현장은 심도 15m 까지 대부분 모래로 이루어져 있으며, 심도 15m 하부에서는 일반적인 서해안 지역 자연 상태의 지반 특성과 같이 모래, 실트 및 점토층이 복잡하게 교차하고 있었다.

한편, B 현장의 경우 매립이나 지반 개량이 이루어지지 않은 자연 상태의 해안지역 지반으로 대체로 점토질 실트(ML)와 실트질 모래(SM)가 혼재되어 있었다. 대부분이 비해성 기원의 실트층이 주를 이루는 퇴적층으로서 실트층과 더불어 모래층으로 구성되어 있었다. 그림 4에 B 현장의 심도에 따른 CPTu 결과 및 이에 따른 흙의 분



〈그림 5〉 액상화 판단 수정 액소성 한계 도표<sup>(17)</sup>

류와 SPT의  $N$  값을 도시하였다. B 현장에서는 액상화 발생 가능 심도인 20m까지 수행된 SPT와는 달리 지층 내 자갈 혼재와 여러 내외부적 현장 요인으로 인해 불행히도 CPTu를 비교적 얇은 심도인 7m 정도까지만 수행할 수 있었으며, 이에 따라 두 현장 시험법의 정량적 비교는 얇은 심도인 CPTu 수행 심도까지를 비교 대상으로 하였다. Robertson, et al.<sup>(16)</sup>이 제시한 지층 분류 결과 대부분이 점토질 실트(분류 기준 5) 또는 실트(분류 기준 6)로 분류되었다. 심도에 따른 간극수압은 대체로 증가하는 경향을 보이나, 2.0m와 3.0m 부근에 소구간 감소하는 경향을 나타내어 세립사가 일부 협재되어 있는 것으로 판단된다. 지하 2.0~4.0m 부근의 지반은 함수비 31~34%, 소성지수 PI는 7.2 (깊이 2.4m), 세립분( $2\mu\text{m}$  이하)은 3~7% 사이에서 분포하고 있었으며, 토질은 주로 저압축성실트(ML)로 분류되었다.

본 연구에서는 그림 5의 소성 도표<sup>(17)</sup>를 적용한 액상화 가능 지반 분류를 이용하여 일차적으로 액상화 가능 지반을 분류하였다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 액소성 한계 37이하이고, 소성지수가 12이하인 흙은 액상화

발생 가능성이 매우 높은 흙으로 분류된다.

그림 6은 두 현장에서 취득한 5개 시료의 체분석 결과(그림 6(a)) 및 액소성 한계 도표 내에서의 위치 현황(그림 6(b))을 보여주고 있다. B 현장의 경우 대체로 일반적인 액상화 가능 입도 분포의 범위보다 세립분이 많이 포함되어 있어 액상화가 발생 가능성이 낮아 보였지만, 일부 소성성을 보이는 시료의 소성지수(PI)가 소성도표 기준 상에서 액상화 가능 흙으로 분류되어, 본 연구에서는 B 현장의 지반도 액상화 가능 층으로 분류하여 액상화 평가를 수행하였다. 이들 이 외의 심도에서 채취된 대부분의 흙은 비소성(Nonplastic)으로 분류되었다.

액상화 가능 지반은 Wang<sup>(18)</sup>이 제안한 분류기준을 따라 0.005mm(점토 입자 크기) 이상의 세립분 함량이 15~20% 이하이고 함수비가 액성한계(LL)의 90% 이상인 조건을 액상화 가능 지반으로 분류하여 액상화 평가를 수행하여 왔다. 하지만 최근 발생한 지진들(1994년 Northridge 지진, 1999년 Kocaeli 지진, 1999년 Chi-Chi

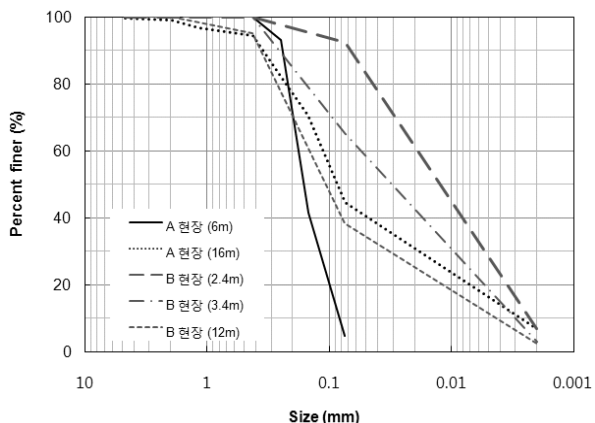
지진)의 액상화 피해지역에 대한 현장 조사 결과로부터 이러한 기준에 부합하지 않은 많은 지반에서 액상화로 인한 큰 피해가 발생했음이 보고된 바 있다.<sup>(19)</sup> Bray and Sancio<sup>(19)</sup>는 Kocaeli 지진으로 큰 액상화 피해가 발생한 Adapazari 지역에서 시료를 채취하여 진동시험을 수행한 결과, 기존의 입도분포 기준에 의하면 액상화가 발생하지 않은 지반으로 분류된 위치에서도 PI가 12보다 작고 함수비가 LL의 85% 이상인 흙인 경우 액상화가 발생함을 확인하였다. 이로부터 신뢰성 있는 액상화 지반의 분류기준으로 입자 분포나 크기보다 PI 수치를 적용할 것을 제시하였으며, 이러한 측면의 고려에 따라 본 연구 대상 현장의 액상화 평가를 위한 액상화 가능 지수를 산정하였다.

#### 4. 국내 서해안 지역의 액상화 가능 지수

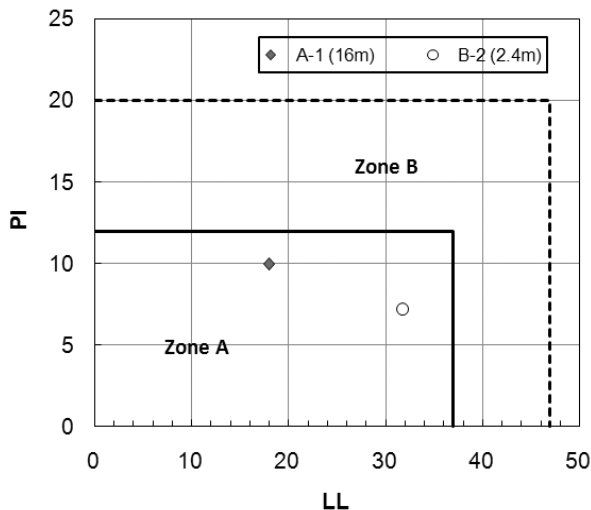
##### 4.1 진동전단응력비 산정

두 곳의 현장(A 및 B 현장)에 대하여 앞서 제시한 식 (1)을 이용하여 진동전단응력비(CSR)를 산정하였다. 식 (1)의 적용을 위한 지표면 최대지반가속도(PGA)의 경우, 각 현장별로 다양한 조건에 대한 부지고유 지진 응답 해석을 통하여 결정하는 방법이 추천될 수 있다. 그러나 본 연구는 주어진 설계 기준에서의 LPI 분포를 예측하는 것이 목적일 뿐만 아니라 CPTu나 SPT 자료에 따라 경험적으로 전단계수(Shear Modulus) 분포를 설정하여 부지 응답 해석을 수행할 경우 잠재적 가정이 필요하고 이로 인한 분석적 모호성을 내제될 수 있으므로, 설계시 간편하게 사용할 수 있는 내진 설계 기준 상의 설계 가속도를 이용하여 CSR을 산정하였다.<sup>(20)</sup> 그렇다 할지라도 신뢰성 높은 액상화 평가를 위해서는 현장 탄성과 시험과 같은 지반 동적 특성 측정 기법을 병행한 체계적 부지 조사 우선 고려되어야 하며, 본 연구 대상 지역들에 대해서도 향후 깊이에 따른 전단파속도(Shear Wave Velocity)의 추가 획득을 통한 체계적 부지 응답 해석 수행 및 이의 결과를 적용한 액상화 평가가 고려되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서는 우선 각 현장별로 재현주기 100년과 1,000년의 두 가지 시나리오를 가정하였으며, 이 조건별 최대지반가속도는 표 2에 정리된 바와 같이 일차적으로 내진 설계 기준<sup>(21),(22)</sup>에 따라 암반노두 최대가속도를 결정하고, 여기에 지반 특성에 따른 단주기 구간의 증폭 계수<sup>(21),(22)</sup>를 곱하여 최종적으로 결정하였다. 증폭계수의 경우, SPT의 N 값에 따라 A 현장은 지반 분류 D, 그리고



(a) 입도 분포



(b) 액소성 한계

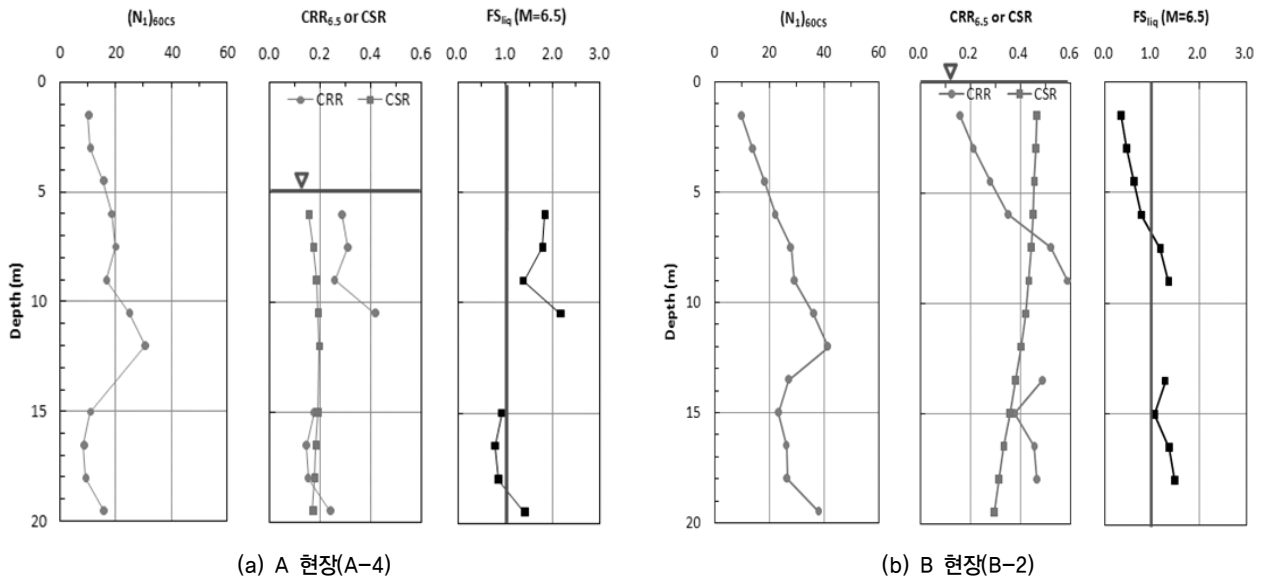
〈그림 6〉 실내 시험을 통한 흙의 기본 물성

〈표 2〉 현장별 CSR 산정 시나리오

위치	시나리오 분류	암반노두 최대가속도 (g)	재현주기 (년)	지반 분류 <sup>1)</sup>	증폭계수	최대지반가속도 <sup>2)</sup> (g)	규모 (M)	지하수위 (m)
A 현장	A-1	0.063	100	D	1.45	0.091	6.5	11.7
	A-2	0.154	1,000	D	1.45	0.223	6.5	11.7
	A-3	0.063	100	D	1.45	0.091	6.5	5.0
	A-4	0.154	1,000	D	1.45	0.223	6.5	5.0
B 현장	B-1	0.063	100	E	2.00	0.126	6.5	0.0
	B-2	0.154	1,000	E	2.00	0.308	6.5	0.0

1) 지반 분류 D = stiff soil (15<N<50), 지반 분류 E = soft soil (N<15)

2) 최대지반가속도 = 암반노두 최대가속도 × 증폭계수



〈그림 7〉 SPT 결과를 이용하여 산정한 깊이별 액상화 안전율

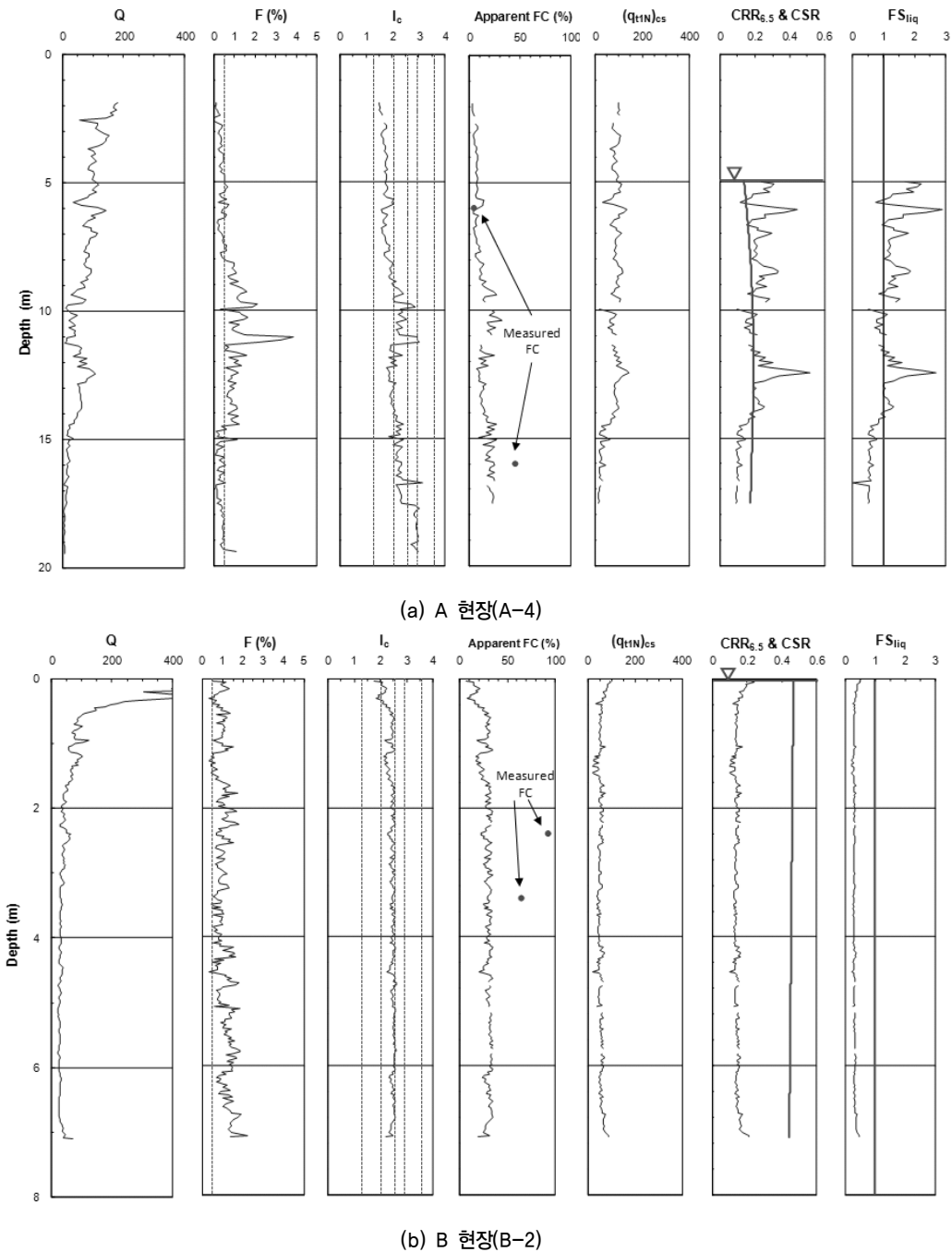
B 현장은 지반 분류 E에 해당되었고, 이에 따른 증폭계수를 결정하였다.<sup>(21),(22)</sup> 지진 규모는 국내 내진 설계시 일반적으로 최대 발생 가능 지진으로 고려되는 6.5를 적용하였으며, 지하수위의 경우 현장 시험 결과에 근거하여 A 현장은 11.7m, B 현장은 0.0m를 적용하였다. 다만, A 현장에서는 지표면 아래 5.0m에서부터 비교적 정수압에 가까운 간극수압이 측정(그림 3 참조)됨에 따라 이 위치도 가능 지하수위로 가정하여, 추가적인 지하수 조건을 시나리오로 적용함에 따라 총 네 가지 시나리오를 설정하였다. 따라서 A 현장의 네 가지 그리고 B 현장의 두 가지로 구성되는 총 6 가지 시나리오에 대해 LPI를 산정하였다.

#### 4.2 SPT 결과를 이용한 액상화 안전율

SPT 결과를 이용한 CRR 산정 과정에서는 상재압, 룯드(Rod) 길이, 해머 효율 및 세립분 함량에 대한 보정을 거친 세립분 정규화 N 값, 즉  $(N_1)_{60cs}$ 이 적용되었다. 현장

여건과 시료채취의 어려움 등의 이유로 인해 모든 시험에서 세립분 함량을 구할 수는 없었으나, 이 경우 Robertson and Wride<sup>(11)</sup> 및 Suzuki, et al.<sup>(23)</sup>이 제안한 경험식과 각 지층(lithology)에 대한 대표 값을 종합하여 세립분 함량을 예측하여 사용하였다. 세립분 예측 경험식의 경우, 함유량이 50%를 넘어서면 예측 정확도가 떨어지지만, 세립분 함량에 대한 보정 값이 세립분 35% 이상에서는 일정한 값을 가지기 때문에 본 예측식의 오차가 정규화 N 값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

그림 7은 재현주기 1,000년의 지진 발생시 각 현장에서 구한 깊이에 따른  $(N_1)_{60cs}$ ,  $CRR_{6.5}$ , CSR, 안전율(FS)의 대표적 경우에 관한 분포를 보여주고 있다. 그림에서 CRR 값이 표시되지 않은 부분은 지반이 액상화가 발생하기에는 너무 조밀(Dense)하여 CRR 계산을 수행하지 않은 범위이다. A 현장의 경우, 깊이 15m까지는 비교적 액상화에 안전한 것으로 파악할 수 있으며, B 현장의 경우 깊이 약 7m 까지는 CRR이 작게 평가되어 액상화가 발생하는 것으로 나타났다.



〈그림 8〉 CPTu 결과를 이용하여 산정한 깊이별 액상화 안전율

### 4.3 CPTu 결과를 이용한 액상화 안전율

CPTu 자료 토대의 액상화 안전율 결정 결과로서, 그림 8은 Q, F(%),  $I_c$ , 예측된 세립분 함량,  $(q_{t1N})_{cs}$ ,  $CRR_{6.5}$ , CSR, 그리고 액상화 안전율을 보여주고 있다. 그림 8의 액상화 안전율은 재현주기 1,000년의 지진이 발생했을 경우에 해당하는 것이다. CRR 분포에서 일부 값이 보이지 않는 구간은  $I_c$  값이 2.6 이상의 값을 보여 CRR 계산이 생략된 부분을 나타낸다. 그림 8(a)를 보면 CPTu로부터 산정된 액상화 안전율 역시 SPT와 유사하게 15m 전

후에서 액상화가 발생하기 시작하는 것으로 나타났다. CPTu는 SPT와는 달리 깊이에 따른 연속적 결과를 구할 수 있기 때문에 SPT 보다는 깊이별로 훨씬 세밀한 CRR 분포를 얻을 수 있다. 그림 8(a)의 액상화 안전율(FS) 분포를 보면 CPTu에서는 SPT와 다르게 추가로 약 10m 전후로 하여 액상화 발생 층을 확인할 수 있었다. 한편 B 현장에서는 SPT 결과와 동일하게 7m까지는 시험이 수행된 전 구간에서 액상화가 발생하는 것으로 나타났다(그림 8(b)).

또한, 그림 8에 표시된 세립분 함량(FC) 예측은  $I_c$ 로부



터 산정한 것으로, 구체적으로 아래와 같은 식 (11)을 통해 계산하였다.<sup>(5),(11)</sup>

$$I_c < 1.26, \quad FC(\%) = 0 \quad (11a)$$

$$1.26 \leq I_c \leq 3.5, \quad FC(\%) = 1.75 I_c^{3.25} - 3.7 \quad (11b)$$

$$I_c > 3.5, \quad FC(\%) = 100 \quad (11c)$$

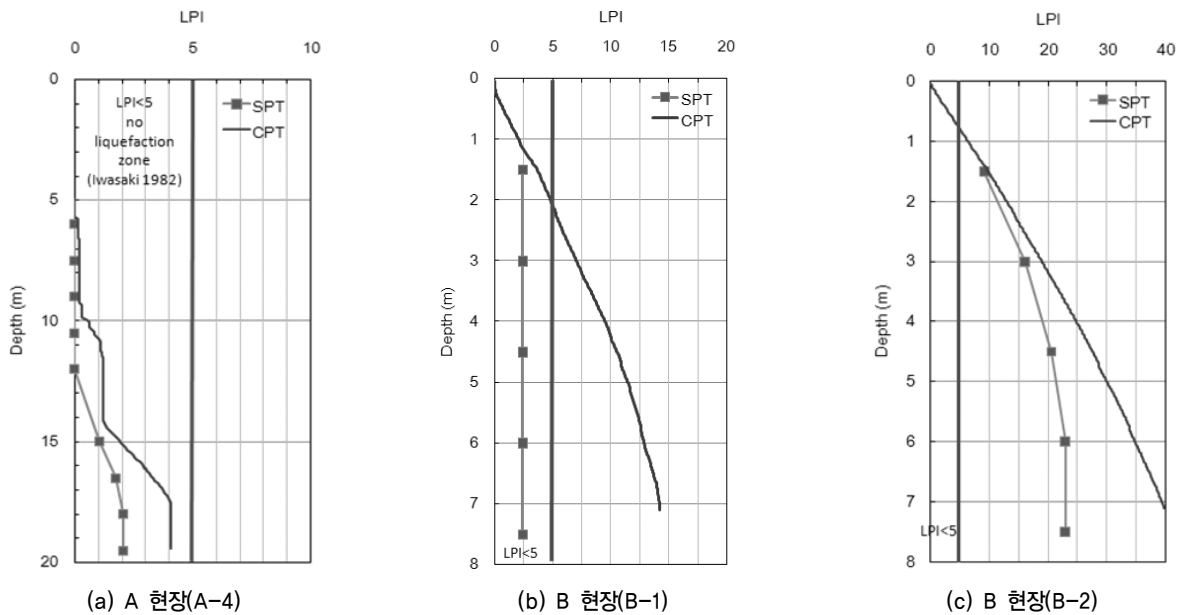
$I_c$ 와 세립분 함량 관계식은 CPTu가 SPT와 비교하여 흙의 물성치를 얻을 수 없는 단점을 보완하기 위해 Robertson and Wride<sup>(11)</sup>가 제안한 방법으로서, 이를 통해 대략적인 입자분포를 파악할 수 있다. 그러나 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 본 현장에서는 세립분 함량이 작은 위치에서는 비교적 정확도가 높았지만 세립분 함량이 증가할수록 측정치와 예측치 사이에 오차가 증가함을 알 수 있다.

#### 4.4 액상화 가능 지수 산정

현장 시험 결과로부터 깊이별 액상화 안전율을 산정한

후(그림 7 및 그림 8), 식 (1)을 통해 액상화 가능 지수 (LPI)를 산정하였다. 각 시나리오별 LPI 값은 표 3과 같으며, 이 중 A 현장의 A-4 시나리오와 B 현장의 B-1 및 B-2 시나리오를 그림 9에 도시하였다. 표 3과 그림 9에서 확인할 수 있는 바와 같이, A 현장에서는 SPT 및 CPTu로부터 구한 LPI 값은 A-4에서 각각 2.1 및 4.1로서 기존의 결과와 비교해 보았을 때 거의 액상화가 발생하지 않는 구간으로 분류되는  $LPI < 5$ 에 속하였다. 즉, 지하수위 5m인 A 현장은 LPI 값을 통해 국내 내진 설계 기준<sup>(21)</sup>에서 재현주기 2,400년 다음으로 높은 수준(재현주기 1,000년)에서도 지진으로 인한 액상화 피해가 거의 발생하지 않을 것으로 예측되었다.

반면에 B 현장에서는 SPT 및 CPTu로부터 구한 LPI 값은 B-1 시나리오의 경우, 2.4 및 14.2, 그리고 B-2에서는 각각 23.0 및 39.7로 나타났다. Iwasaki, et al.<sup>(24)</sup>(표 1 참조)에 의하면 LPI가 15이상인 경우 액상화 발생 가능성이 아주 높다고 할 수 있는데, B 현장 B-2의 경우 SPT와 CPTu 모두 액상화로 인한 피해 발생 가능성이 매우



〈그림 9〉 주요 시나리오의 LPI 분포

〈표 3〉 시나리오별 LPI

위치	시나리오	LPI			
		SPT (깊이, m)		CPTu (깊이, m)	
A 현장	A-1	0	19.5	0	19.5
	A-2	0		0	
	A-3	0		0	
	A-4	2.1		4.1	
B 현장	B-1	2.4	7.5	14.2	7.1
	B-2	23.0	39.7		

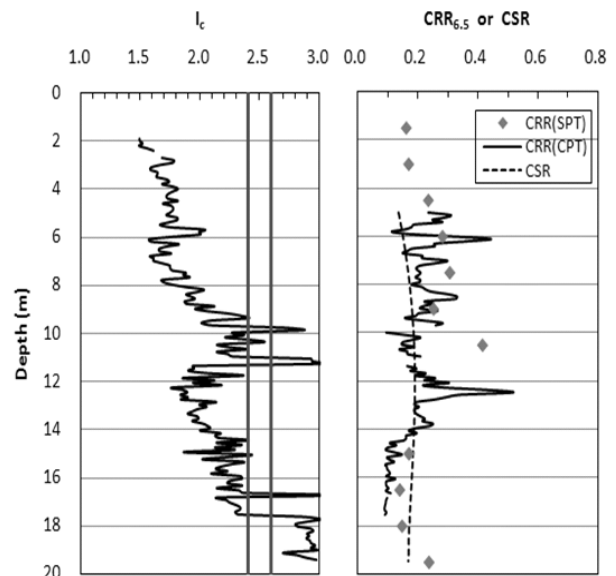
높은 것으로 파악할 수 있다. 단, B-1에서는 SPT와 CPTu가 약간 상이한 결과를 보여주고 있는데, SPT 결과만을 보면 액상화로 인한 피해 가능성이 매우 낮지만 CPTu 결과는 그 가능성이 결코 작지 않음을 보여주고 있다. 이로부터 B 현장처럼 실트질 성분이 많이 포함되어 있고, 예상되는 CSR이  $CRR_{CPT}$ 과 유사한 범위에 분포하는 경우(본 연구에서는 B-1의 경우 지표면 CSR = 0.19이고  $CRR_{CPT} < 0.2$ 임) CPTu로부터 구한 LPI가 SPT에 비해 매우 크게 산정될 수 있음을 알 수 있으나, 이에 대해서는 향후 보다 다양한 조건에 대한 체계적 심층 연구가 필요하다.

이렇듯 본 연구에서는 대부분의 경우 CPTu가 SPT에 비해 비교적 큰 LPI 값을 보여주고 있었다. 이러한 경향은 그간 많은 연구에서도 유사한 분석 결과로 제시된 바 있으며<sup>(25)</sup>, 이러한 이유로 인해 Juang, et al.<sup>(26)</sup>은 SPT와 CPTu가 같은 액상화 안전율을 가진다고 해도 이 때 각 안전율에 해당하는 액상화 발생 가능성(Probability of Liquefaction)은 차이를 보이므로 각 시험 결과를 적용하여 설계를 수행할 때 보다 세심한 주의를 기울여야 한다고 제시하였다. 두 기법간 차이는 기본적으로 상이한 시험 방법 및 지반 특성이 달라질 수 있는 지리적 위치의 차이와 CRR 산정방식에서 기인한 것이라고 할 수 있으며, 각 기법이 액상화 발생에 관한 경험적 분석에 근거하므로 분석 근거 사례와 대상 지반 및 이에 대한 시험 결과 획득 정밀도의 차이가 상존했음이 기법적 도출 결과 차이의 근본적 원인이라고 할 수 있다. 즉, 연속적 자료 획득이 가능한 CPTu가 SPT에 비해 액상화 가능 지층을 보다 세밀하게 찾아낼 수 있다는 점과 기존 연구<sup>(19)</sup> 고찰로 확인한 바와 같이 CPTu의 경우 SPT 자료 적용 기법에서는 액상화가 발생하지 않는 지층으로 분류되는 조건에서도 액상화 가능 지층을 확인하여 LPI 값에 반영시킬 수 있다는 점이 이런 차이를 가져왔다고 할 수 있다. 하지만 이러한 상관관계는 모든 지반 유형에 포함되는 것은 아니며, 이에 대해서는 향후 보다 면밀한 분석이 요구된다.

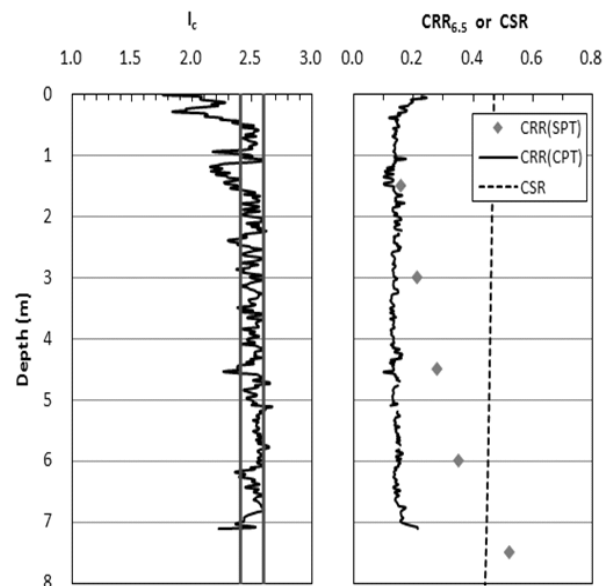
### 5. 시험 방법에 따른 진동저항능력비 비교

본 연구에서는 LPI의 기법적 산정 비교 뿐만 아니라 변수적 영향 분석을 목적으로, 진동저항능력비(CRR)가 SPT와 CPTu에서 각각 다른 LPI 값을 보이는 이유를 몇 가지 측면에서 고찰해 보았다. 먼저 시험 방법에 따른

CRR 값을 비교하기 위하여 그림 10처럼 각 시험에서 구한 CRR을 현장별로 함께 도시하여 그 값을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 위치에서 SPT가 CPTu에 비해 더 큰 CRR 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 CPTu가 SPT에 비해 지층의 액상화 저항능력을 과소평가하게 됨(액상화 가능성을 과대 평가)을 보여주는 것으로, 결과적으로 CPTu 자료를 기초로 액상화 평가를 수행하면 SPT에 비해 다소 보수적인 설계가 될 수 있음을 의미한다. 한편 그림 10(b)를 보면 B 현장이 A 현장에 비해 두 시험 간의 차이가 훨씬 크게 나타나고 있었다. 이러한 차이는 일차적으로 두 시험이 수행된 위치 차이에서 기인한 것으로 볼 수 있으나, B 현장에서는 대부



(a) A 현장(A-4)



(b) B 현장(B-2)

〈그림 10〉 시험 방법에 따른 CRR 비교

본의  $I_c$  값이 2.4에서 2.6 사이에 존재하는 것도 주목할 필요가 있다. 이런 경우 Bray, et al.<sup>(2)</sup>이 지적한 바와 같이 CPTu에 의한 CRR 값의 적용에 상당히 주의를 할 필요가 있다. Bray, et al.<sup>(2)</sup>은 세립분의 함량이 큰 이 범위 ( $2.4 < I_c < 2.6$ )의 지반에서는 지중 교란시료 채취가 수반되는 SPT 시험이 우선적으로 고려되어야 한다고 제안한 바 있다.

이러한 경향에 대하여 Andrus et al.<sup>(27)</sup>은  $(q_{c1N})_{CS}$ 이 40에서 120 사이에 위치하는 경우 SPT에 비해 액상화 저항능력을 보수적으로(작게) 평가하는 경향이 있다고 제시하였다. 또한 Baez 등<sup>(28)</sup>도 SPT의 정규화  $N$  값인  $(N_1)_{60CS}$ 가 21이거나 CRR이 0.23인 경우를 기준으로 해서 이보다 작은 경우는 CPTu가 더 낮은 액상화 안전율을 보임을 확인하였다. 이들의 연구에 의하면 CPTu로부터 산정된 CRR이 0.23이하에서는 SPT로부터 산정된 CRR보다 최대 25% 작게, 그리고 이보다 큰 범위에서는 30% 이상 크게 산정될 수 있다고 제시하였다.

그림 10을 통해 본 연구의 두 현장 모두 기존 연구자들이 발표한 자료와 유사하게 CRR이 0.23 이하의 범위에서는 CPTu로부터 산정한 CRR이 훨씬 작음을 발견할 수 있다. 특히 지반의 대부분이  $2.4 < I_c < 2.6$  범위에 있는 B 현장에서는 정규화 큰 저항치인  $(q_{c1N})_{CS}$ 는 50 전후의 값(그림 8(b) 참조)을, 그리고 CRR은 대체로 0.20 값(그림 11(b) 참조)을 보이고 있으며, 따라서 CPTu로부터 산정된 CRR이 SPT의 값보다 매우 작음을 확인할 수 있다. 이렇듯 액상화 평가 지반이  $2.4 < I_c < 2.6$  사이에 많은 흙이 존재하는 경우 CPTu는 액상화 가능성을 SPT보다 상대적으로 크게 평가할 수 있음을 주의할 필요가 있다. 이런 경우 인접 위치에서 시료를 채취하여 보다 면밀하게 액상화 저항 강도를 평가할 필요가 있으며, 그렇지 않으면 액상화로 인한 피해 정도 예측이 실제와 큰 차이를 보일 수 있다.

반대로 이러한 지반에 SPT 시험에 의해서만 액상화 안전율을 산정하게 되면 SPT는 CPTu에 비해 액상화로 인한 피해 정도를 매우 낮게 평가할 수 있으며, CPTu와 같이 깊이별 연속적인 액상화 발생 가능 분포를 볼 수 없으므로 액상화에 대한 보다 상세한 대책을 세울 수 없게 된다. 본 연구는 진동삼축압축 시험과 같은 정량적 조건 고려의 실내 시험이 수행되지 않았으므로 향후 이의 병행을 통한 보다 체계적 비교 분석 연구가 필요할 것이다. 그렇다 할지라도 현장 원위치에서의 액상화 평가를 위해서는 우선적으로 CPTu나 SPT가 고려될 수 있으며,

본 고찰로 볼 때 단일 현장 시험 방법의 적용보다는 두 현장 시험의 복합 적용을 통한 상호 보완적 액상화 가능성 평가가 합리적일 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 서해안 지역의 두 현장에서 수행된 SPT와 CPTu 시험 결과를 이용하여 액상화 가능성을 평가하였다. 기존 액상화 평가법은 대상 지층 중 가장 액상화에 취약한 위치에서만 액상화 평가를 수행해 온 반면, 본 연구에서는 LPI를 통해 20m 내에 위치한 지반의 액상화 가능성을 종합적으로 산정할 수 있었다. LPI 산정 결과 준설 매립 후 일정 기간(10년 이상)이 지난 A 현장의 경우 액상화로 인한 피해 가능성이 매우 낮게 평가된 반면, 현재 자연 상태로 놓여 있는 B 현장은 액상화로 인한 피해 가능성이 매우 높게 산정되었다.

SPT와 CPTu로부터 산정된 LPI를 비교한 결과, 두 현장 모두 CPTu로부터 산정된 LPI 훨씬 큼을 확인하였다. 이러한 차이는 기본적으로 두 시험 사이에 존재하는 시험 방법의 차이와 시험 위치의 상이함에서 기인하는 것으로 볼 수 있지만, 특히 CPTu가 SPT에 비해 훨씬 상세하게 액상화 가능 지층을 찾을 수 있고 이러한 효과가 LPI에 포함된 것이 기법간 차이를 가져온 주요 원인으로 보인다. 이외에도 CPTu로부터 계산된 CRR이 SPT에 비해 작게 평가된 것도 두 시험간 CRR 차이를 유발시켰음을 확인하였다. 본 연구에서도 기존 해외 연구의 제시 결과와 동일하게  $(q_{c1N})_{CS}$ 가 40에서 120 사이 값을 가지는 경우, 혹은 CRR이 0.23 이하의 값을 가지는 경우 CPTu가 SPT에 비해 액상화 저항을 보수적으로 평가하는 경향을 보였다.

한편, 두시험 사이의 CRR 혹은 LPI 차이는  $I_c$ 와도 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 특히  $2.4 < I_c < 2.6$  범위에서는 두 시험간 차이가 크게 나타남을 확인하였으며, 따라서 액상화 평가 지반이  $2.4 < I_c < 2.6$  사이에 많은 흙이 위치하는 경우 CPTu는 액상화 가능성을 SPT보다 상대적으로 크게, 반대로 SPT는 CPTu보다 액상화로 인한 피해 정도를 낮게 평가하는 경향이 있음을 주의할 필요가 있다. 이러한 경우 채취된 시료를 대상으로 실내 시험을 수행하여 액상화 강도를 보다 주의 깊게 검토할 필요가 있다. 본 논문은 액상화 취약도 작성의 기초가 되는 절차 혹은 방안을 제시하기 위한 연구로서, 향후 더 많은 현장 시험 자료가 축적되면 지역별로 지진 시나리

오에 따른 액상화 취약도 작성에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문의 내용은 2007년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(과제번호 : KRF-2007-357-D00252)을 받아 수행되었고, 더불어 국토해양부 지원의 항만 지진 응답 예측시스템 구축 및 활용기술 개발 사업 결과의 일부입니다. 이에 저자들은 깊이 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 유시동, 김홍택, 송병웅, 이형규, “지리정보시스템 및 표준관 입시험 결과를 이용한 비소성 실트질 지반의 액상화 평가,” 한국지반환경공학회 논문집, 제6권, 제2호, 5-14, 2005.
2. Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T.L., Stewart, J.P., Seed, R.B., Cetin, O.K., Bol, E., Baturay, M.B., Christensen, C., and Karadayilar, T., “Sub-surface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, 673-685, 2004.
3. 정민형, 김주현, 정상국, 이송, “준설매립지반의 액상화 간 편예측 개선에 관한 연구,” 한국지반공학회 논문집, 제23권, 제8호, 47-57, 2007.
4. 양재혁, “정적 및 동적 하중에서 모래의 액상화 발생,” 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제6호, 235-244, 2001.
5. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D. L., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S. C., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe II, K.H., “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*, ASCE, Vol. 1271, 817-833, 2001.
6. Toprak, S. and Holzer, T.L., “Liquefaction potential index: field assessment,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, 315-322, 2003.
7. Juang, C.H., Yuan, H., Li, D.K., Yang, S.H., and Christopher, R.A., “Estimating severity of liquefaction-induced damage near foundation,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, 403-411, 2005.
8. Pappathanassiou, G., “LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence,” *Engineering Geology*, Vol. 96, 94-104, 2008.
9. Holzer, T.L., Bennett, M.J., Noce, T.E., Padovani, A.C., and Tinsley, J.C., “Liquefaction hazard mapping with LPI in the Greater Oakland, California, Area,” *Earthquake Spectra*, Vol. 22, 693-708, 2006.
10. 강규진, 박인준, 김수일, “국내 연안지역의 액상화 구역도 작성에 관한 연구,” 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제2호, 57-64, 2000.
11. Robertson, P.K. and Wride, C.E., “Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, 442-459, 1998.
12. Juang, C.H., Liu, C.N., Chen, C.H., Hwang, J.H., and Lu, C.C., “Calibration of liquefaction potential index: A re-visit focusing on a new CPTU model,” *Engineering Geology*, Vol. 102, 19-30, 2008.
13. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K.-I., and Yasuda, S., “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan,” *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation*, San Francisco, 1978, pp. 885-896.
14. Seed, H.B. and Idriss, I.M., “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential,” *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 97, 1249-1273, 1971.
15. Pawan, K.D., Hoyos Jr., R.I., and Macari, E. J., “Assessment of liquefaction potential of western Puerto Rico,” *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, Vol. 1, Geotechnical Special Publication No. 75, 1998.
16. Robertson, P.K., Campanellar, R.G., Gillespie, D., and Gerig, J., “Use of piezometer cone data,” *Proceedings of ASCE Specialty Conference In-Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blackburg, ASCE, 1263-80, 1986.
17. Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E. S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., and Faris, A., “Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework,” *Proceedings of the 26th Annual ASCE L.A. Geotechnical Spring Seminar*, Long Beach, CA., 2003.
18. Wang, W., *Some Findings in Soil Liquefaction*, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1979.
19. Bray, J.D. and Sancio, R.B., “Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, 1165-1177, 2006.
20. 한국지반공학회, 지반구조물의 내진설계, 지반공학시리즈 8(개정판), 구미서관, 2006.
21. 한국지진공학회, 내진설계기준연구(II), 건설교통부, 1997.
22. ICBO, *1997 Uniform Building Code, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions*, International

- Conference of Building Officials, 1997.
23. Suzuki, Y., Koyamada, K., and Tokimatsu, K., "Prediction of liquefaction resistance based on CPT tip resistance and sleeve friction," *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol. 1, 1997.
  24. Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H., "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods," *Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation*, Seattle, Vol. 3, 1319-1330, 1982.
  25. Lenz, J.A. and Baise, L.G., "Spatial variability of liquefaction potential in regional mapping using CPT and SPT data," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, 690-702, 2007.
  26. Juang, C.H., Jiang, T., and Andrus, R.D., "Assessing probability-based methods for liquefaction potential evaluation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, 580-589, 2002.
  27. Andrus, R.D., Piratheepan, P., Ellis, B.S., Zhang, J., and Juang, C.H., "Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-Vs relationship," *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, 713-721, 2004.
  28. Baez, J.I., Martin, G.R., and Youd, T.L., "Comparison of SPT-CPT liquefaction evaluation and CPT interpretations," *Innovations applications in geotechnical site characterization*, P. Mayne and R. Hryciw, eds., Geotechnical Special Publication No. 97, ASCE, New York, 17-32, 2000.