

반복단순전단시험에 기반한 조립토의 설계 액상화 저항 곡선 개발

Cyclic Simple Shear Test Based Design Liquefaction Resistance Curve of Granular Soil

만도카일 사이둘라¹ Saeed-ullah Jan Mandokhail 박 두 희² Park, Duhee

김 한 섭³ Kim, Hansup 박 기 천⁴ Park, Ki-Chun

Abstract

We develop liquefaction resistance curves, which represent the correlation between cyclic resistance ratio (CRR) and number of cycles (N) to estimate the build-up of residual excess pore pressure from simple shear tests performed for this study and also from published literature. The liquefaction curve is calculated from two models. The comparisons show that one of the models is not reliable because it underestimates CRR . The scatter of the data is shown to be significantly reduced when CRR is normalized to the resistance ratio at $N = 15$ ($CRR_{N=15}$). Use of the normalization is particularly useful because CRR can be easily estimated from field tests. From normalization, we propose mean, upper, and lower curves. The corresponding design equation and its parameters are also proposed. We believe that the proposed curves can be used for effective stress site response analyses and evaluation of the seismic performance of port structures.

요 지

본 논문에서는 지진 시 작용하는 반복적 하중에 의하여 발생하는 잔류 과잉간극수압 예측에 필요한 반복저항응력비 (CRR)와 재하횟수 N 간의 관계를 나타내는 액상화 저항 곡선을 반복단순전단시험과 문헌조사를 통하여 도출하였다. CRR 과 N 자료는 두 가지 모델을 이용하여 최적 곡선을 계산하였으며 계측된 자료와 비교한 결과, 이중 한 가지 모델은 CRR 이 다소 작게 산정되어 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 다양한 액상화 저항 곡선을 살펴본 결과, 반복저항응력비(CRR)는 재하횟수 $N = 15$ 에서의 $CRR(CRR_{N=15})$ 로 정규화할 경우, 분산이 크게 감소하는 것을 확인하였다. 이와 같은 정규화가 특별히 유용한 이유는 $CRR_{N=15}$ 은 실내시험이 아니라 현장시험으로부터 쉽게 산정 가능하기 때문이다. 정규화를 통하여 평균과 상한 및 하한 곡선을 도출하였으며, 각각에 상응하는 설계식과 변수 또한 제시하였다. 제안된 곡선은 추후 부지 고유의 지반응답해석과 항만 구조물의 안정성 평가 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Liquefaction resistance curve, Cyclic resistance ratio, Number of cycles, Cyclic simple shear, Normalization

1 비회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사후연구원 (Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

4 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

지진 하중에 의해 사질토 지반에 발생하는 잔류간극수압의 정확한 예측은 지반 구조물의 성능기반설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 이를 위해 다양한 실험적, 이론적 간극수압 모델이 개발 및 적용되고 있다(Booker et al., 1976; Derakhshandi et al., 2008; Lee and Albaisa, 1974; Polito et al., 2008; Xenaki and Athanasopoulos, 2003). 잔류간극수압의 예측에 있어서 가장 중요한 요소 중 하나는 반복하중과 액상화를 유발하는 재하횟수 간의 실험적 관계를 파악하는 것이다. 반복하중은 일반적으로 유효상재하중(단순전단시험의 경우 유효수직응력, 삼축시험의 경우 유효평균응력)으로 정규화되며 이를 반복전단응력비(cyclic stress ratio, *CSR*)라 한다. 액상화를 유발하는 재하횟수 *N*에서의 *CSR*을 반복강도(cyclic strength), 반복저항강도, 또는 반복저항응력비(cyclic resistance ratio, *CRR*)라 한다. 다양한 *CRR*과 재하횟수 *N* 간의 관계를 곡선 형태로 나타낸 것을 반복저항곡선(Ishihara, 1996; Kramer, 1996), 액상화 저항 곡선(Towhata, 2008), 또는 액상화 저항 응력비 곡선이라 한다.

액상화 저항 곡선은 실무에서 내진설계에 널리 사용되고 있다. MOF(1999)에서는 진동삼축시험으로부터 도출된 액상화 저항 곡선을 이용하여 액상화에 대한 안전율을 산정한다. 하지만 진동삼축시험의 응력장(stress field)은 지진 시 실제 지반에 발생하는 응력장과 상이하어 진동삼축시험의 결과를 그대로 사용하는 것은 부적절하다고 알려져 있다(Kramer, 1996). 이를 보정하기 위한 다양한 설계식이 제안되었지만 그 정확성은 아직 명확하게 검증되지 않았다(Castro, 1975; Finn et al., 1971; Seed and Peacock, 1971). 수직 방향으로 전파되는 전단파에 의한 응력장을 가장 정확하게 모사하는 시험 방법은 반복단순전단시험인 것으로 보고되었다(Kramer, 1996). 국외에서는 이미 반복단순전단시험이 널리 사용되고 있지만 국내에서는 장비 제작의 어려움으로 인해 제한적으로 수행되고 있다. 또한, 장비가 보급되었다고 해도 실무에서 모든 설계에 현장의 시료를 채취하여 단순전단시험을 수행하는 것은 어려운 상황이다. Shim(2001)은 인천 지역의 해사를 시료로 사용하여 단순전단시험과 삼축시험에 의해 측정된 액상화 저항 곡선을 비교, 분석하였다. Yoon et al.(2007)은 패각질 모래에 대한 단순전단시험을 수행하여 액상화 저항 곡선을 도출하였다. 하지만 이러한 연구는 특정 시료에 대한 제한적 결

과로 일반 사질토에 적용하기에는 어려운 측면이 있다.

본 연구의 목적은 설계에 활용할 수 있는 일반화된 액상화 저항 곡선을 개발하는 것이다. 이를 위하여 두 가지 표준사에 대한 반복단순전단시험을 수행하여 액상화 저항 곡선을 측정하였다. 더불어 포괄적인 문헌조사를 통해 다양한 표준사에 대한 액상화 곡선을 수집 및 분석하였다. 액상화 저항 곡선의 비교를 통하여 상대 밀도, 구속압, 시료조성 방법 등이 액상화 곡선의 형태에 미치는 영향을 조사하였다. 나아가 조사된 액상화 저항 곡선의 정규화를 통하여 설계 곡선을 도출하였다. 제안된 곡선은 기존의 연구 결과와 비교하여 이의 적절성을 평가하였다.

2. 액상화 저항 곡선

액상화 저항 곡선은 응력 제어 반복삼축시험이나 반복단순전단시험으로부터 얻을 수 있다. 응력 제어 시험에서는 잔류간극수압과 최대전단변형률 등을 포함한 액상화의 정의에 사용하는 몇 가지 기준이 있다. 반복삼축시험과 반복단순전단시험에서 구한 각각의 *CRR*은 일치하지 않는 것으로 알려져 있다. 반복삼축시험의 결과는 단순전단시험에 비해 액상화에 더욱 큰 저항을 보이며, 액상화 곡선의 기울기는 작아서 보다 평탄한 형상을 나타낸다. 반복단순전단시험에서 가해지는 응력장이 연속적으로 전파하는 전단파에 의한 실제 지반 상태를 잘 나타낸다고 알려져 있으므로, 삼축시험으로부터 구한 진동저항응력비, (*CRR*)_{TX}는 적절한 보정을 거쳐 단순전단시험으로부터 구한 (*CRR*)_{DSS}로 변환할 수 있다.

*CRR*과 *N* 간의 관계식으로는 다음의 경험식이 널리 사용된다(Idriss and Boulanger, 2008).

$$CRR = aN^{-b} \quad (1)$$

여기서 *a*와 *b*는 각각 곡선 적합 매개변수이다. 식 (1)은

Table 1. Correction factors used to adjust *CRR* - *N* curve from cyclic triaxial tests

Correction factor	Reference
$c_r = \frac{(1+2K_o)}{3}$	Seed and Peacock (1971)
$c_r = \frac{(1+K_o)}{2}$	Finn et al. (1971)
$c_r = \frac{2(1+2K_o)}{3\sqrt{3}}$	Castro (1975)

측정된 CRR 과 N 자료에 의한 곡선 적합에 사용된다. Ziotopoulou and Boulanger(2012)는 b 의 범위로 0.25~0.37을 제시하였다. Boulanger and Ziotopoulou(2015)는 b 의 실용적 범위로 0.24~0.27을 제안하였다. Liu et al. (2001)은 b 의 상하한값으로 각각 0.37과 0.325를 사용하였다. 전술한 연구에서는 b 의 결정에 삼축시험이나 단순전단시험 등의 시험 방법, 상대밀도 등의 지반 특성에 의한 영향은 고려하지 않았다. 또한, 실무에 적용하기 위해서는 a 의 대표적인 값이 정의되어야 한다.

액상화 저항 곡선은 손상 변수 D 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다(Park et al., 2014).

$$D = (\eta/CSR)(CSR - CSR_t)^\alpha \quad (2)$$

여기서 CSR_t 는 잔류간극수압이 발생하지 않는 한계 전단응력비이며, η 는 반복시험의 경우 $4N(CSR - CSR_t)$ 로 계산되는 전단응력 경로의 길이이고, α 는 보정 변수이다. CSR_t 와 α 는 주어진 액상화 저항 곡선에 대해서 손상 변수 D 가 일정한 값을 가지도록 결정한다. Park et al.(2014)이 제시한 CSR_t 와 α 의 최적화 과정은 다음과 같다. 먼저 CSR_t 를 적절히 가정한 후 이를 이용하여 다음의 식으로 α 를 계산한다.

$$\alpha_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \left\{ \frac{\log\left(\frac{N_i}{N_{i+1}}\right)}{\log(CSR_{i+1} - CSR_t) - \log(CSR_i - CSR_t)} \right\}}{M} \quad (3)$$

α_{avg} 는 액상화 저항 곡선을 구성하는 모든 $CRR-N$ 자료에 대한 평균 보정 변수이다. 위의 과정을 일정 범위의 CSR_t 에 대해 반복하여, 계산된 α 의 변동계수(coefficient of variation)가 최소화되었을 때의 CSR_t 와 α 가 최적값이 된다. 다음 과정으로, 결정된 최적값을 적용하여 평균 손상 변수 D_{avg} 를 식 (2)로부터 구한다. 마지막으로 일정 범위의 CSR 에 대하여 D_{avg} 에 상응하는 N 을 식 (2)로부터 계산하고 전체 $CRR-N$ 관계를 정의하여 액상화 저항 곡선을 결정한다. 즉, 식 (2)는 액상화 저항 곡선을 표현하는 또 하나의 방법이다. 하지만 CSR_t , α 의 값을 산정하기 위해서는 위와 같이 복잡한 과정을 거쳐야 하기에 식 (1)의 Idriss and Boulanger(2008) 모델에 비해 적용이 어렵다는 단점이 있다. 다음 절에서는 단순전단시험을 통해 Idriss and Boulanger(2008) 모델과 Park et al.(2014)

모델의 정확성을 비교, 평가하였다.

3. 반복단순전단시험

본 연구에서는 사질토에 대한 액상화 저항 곡선 자료를 확보하기 위해 반복단순전단 시험을 수행하였다. 시료로는 오타와 및 주문진 표준사를 사용하였다. 각각의 최대 및 최소 간극비, e_{max} 와 e_{min} 은 ASTM D 4254과 ASTM D 4253에 의거하여 산정하였다. 표준사의 물성은 Table 2에 정리하였다. 상대밀도는 40, 60, 80%, 구속 압은 100kPa을 적용하였다. 시험에 사용된 반복단순전단시험기는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 미국 Geocomp사가 제작한 Shear trace-II이다. Fig. 2에는 시험 방법의 개략도를 도시하였다. 단순전단시험의 1 단계에서는 수직 방향 응력을 재하하여 시료를 압밀하며, 2 단계에서는 시료의 상단에 수평 변위를 가하여 시료 전체에 균일한 전단 변형을 유발한다. 수직응력이 작용하는 1 단계에서는 압밀시험과 동일하게 반경 방향 변위가 구속되는 K_0 응력장을 만들어 내고, 2 단계에서는 전단 변형을 허용하기 위하여 삼축시험에서 사용되는 고무 멤브레인과는 다른 유형의 측면 구속 조건이 사용된다. 측면 구속에는 와이어로 강화된 고무 멤브레인(NGI type), 또는 스틸로 제작된 원형 링을 쌓아 올린 형식이 일반적으로 사용된다. Geocomp사에서 제공하는 원형 링으로는 시료의 상대밀도를 정밀하게 맞추는 것이 불가능하여 와이어 멤브레인을 특수 제작하여 시험에 사용하였다. 반복단순전단 시험에서는 배수 및 비배수 시험이 모두 가능하다. 비배수 시험을 수행하는 경우, 삼축시험과 같이 실제 시료를 포화시킨 후 밸브를 닫아서 물의 흐름을 제한하는 것이 아니라 마른 흙으로 시험을 수행하되 유효수직응력을 조절하여 체적의 변화를 제한하게 된다. 이때 유효수직응력의 변화 크기는 잔류과잉간극수압과 동일하다고 가정한다. 시험 시 0.1Hz 주파수의 정현 하중을 가하였다.

Fig. 3과 4에 각각 주문진과 오타와 표준사 시료에 대한 대표적 시험결과를 도시하였다. 상대밀도는 모두 60%이며, $CSR = 0.2$ 이다. 두 시험결과 모두 전단변형률은 거의 대칭에 가까운 것을 확인할 수 있다. 삼축시험을 수행할 경우, 이와 같은 대칭적인 결과를 얻을 수 없다. Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에는 전단응력-전단변형률 관계, Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에는 과잉간극수압, Fig. 3(d)와 Fig. 4(d)에는 응력 경로를 도시하였다. CSR 은 모든 주기에서 목표값에 정밀하게 도달하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Summary of soil properties of liquefaction resistance curves used in this study

Soil	Type of test	D_r (%)	Confining pressure (kPa)	G_s	D_{50} (mm)	C_u	e_{max}	e_{min}	Sample preparation method	Reference
Jumunjin sand	SS	40, 61, 80	100	2.65	0.53	1.49	0.98	0.61	Moist tamping	This study
Ottawa sand	SS	40, 60, 80	100	2.65	0.31	1.89	0.78	0.48		This study
Monterey No.0 sand	Large scale SS	54, 68, 82	55	2.65	0.36	1.5	0.85	0.56	Dry pluviial deposition	De Alba et al. (1976)
Fraser river sand	SS	40, 59, 72	50, 100, 200, 400	2.72	0.30	-	1.00	0.68	Water pluviation	Sivathayalan (1994)
Fraser river sand	SS	40	100	2.72	0.26	1.6	0.94	0.62	Air pluviation	Sriskandakumar (2004)
Nevada sand	SS	64		-	-	-	0.94	0.55	Low density: Air pluviation High density: Tamping	Brandes and Seidman (2008)
Maui dune sand	SS	37,51		-	-	-	0.83	0.61		
Kawaihae Harbor sand	SS	24,67		-	-	-	1.05	0.64		
Algeria sand	SS	15, 55, 75	100	2.69	0.31	1.76	0.89	0.53	Moist tamping with 5% water	Da Fonseca et al. (2015)
Coimbra sand	SS	15, 45, 65	100	2.66	0.36	2.13	0.81	0.48		
Modified Sacramento river sand	Bidirectional SS	35, 45, 55	207	2.68		1.3	1.01	0.64	Moist tamping	Boulanger and Seed (1995)

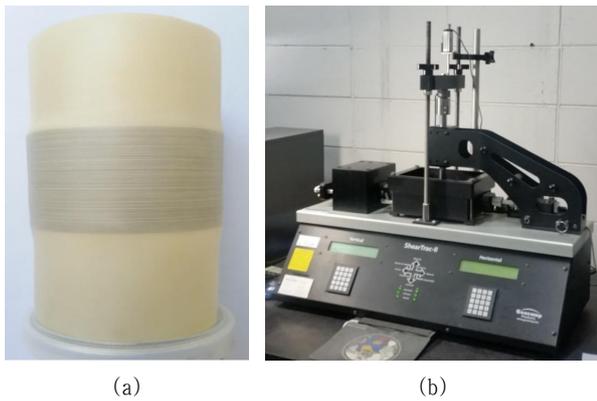


Fig. 1. Simple shear test device: (a) Wire reinforced membrane, and (b) Geocomp shear trace-II device

재하횟수에 따른 전단변형률의 크기와 간극수압은 동일한 상대밀도에서 측정되었음에도 불구하고 큰 차이가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5 에는 $CRR-N$ 자료를 도시하였다. $CRR-N$ 자료는 각각 Park et al.(2014)과 Idriss and Boulanger(2008)의 모델을 이용하여 최적의 액상화 저항 곡선을 도출하였으며 계측자료와 비교하였다. 실선으로 표시된 Park et al.(2014) 모델로부터 도출된 액상화 저항 곡선이 측정값에 보다 잘 일치함을 알 수 있다. Idriss and Boulanger (2008) 모델은 N 이 30 이상인 경우 CRR 이 다소 작게 산정되는 것으로 나타났다. 또한, Park et al.(2014)의 모

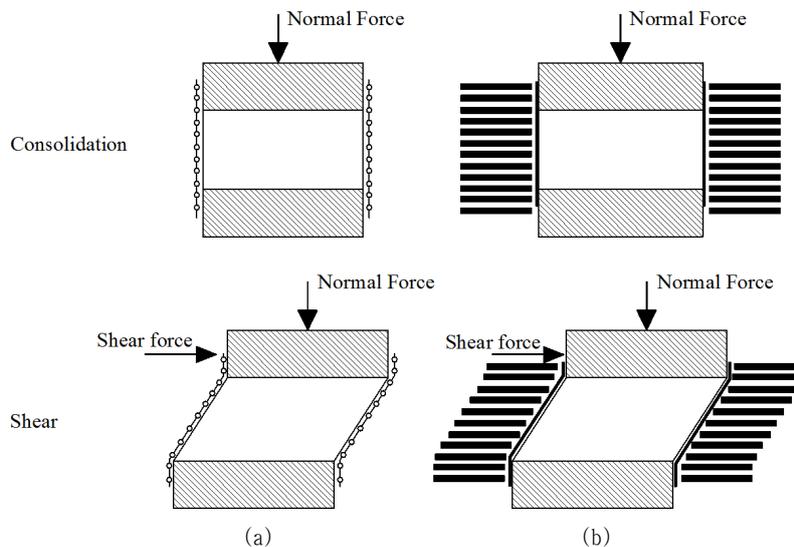


Fig. 2. Schematic of DSS test procedure showing the (a) wire-reinforced membrane and (b) stacked rings

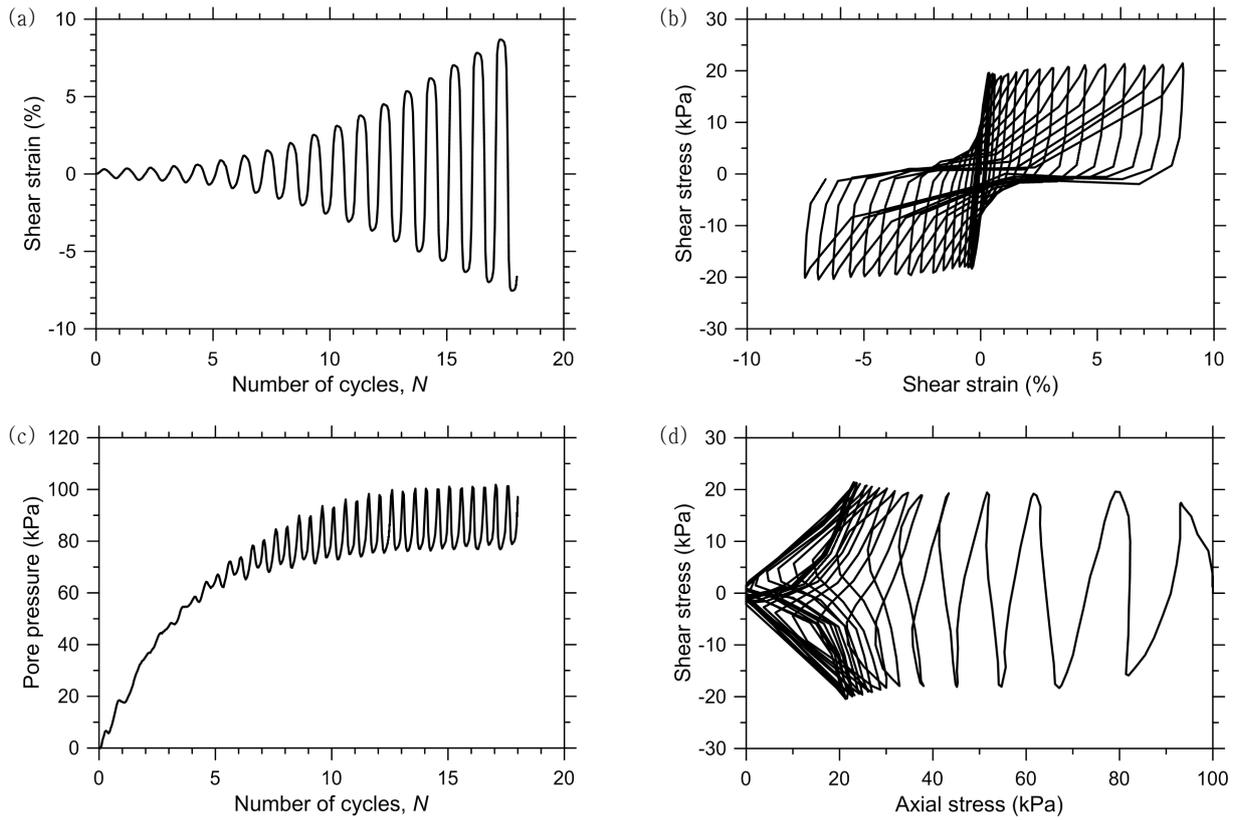


Fig. 3. Typical undrained cyclic response of Jumunjin sand ($D_r = 60\%$, $\sigma'_v = 100$ kPa, $CSR = 0.2$): (a) Shear strain versus number of cycles; (b) Stress-strain response; (c) Residual excess pore-water pressure versus number of cycles; (d) Undrained stress path

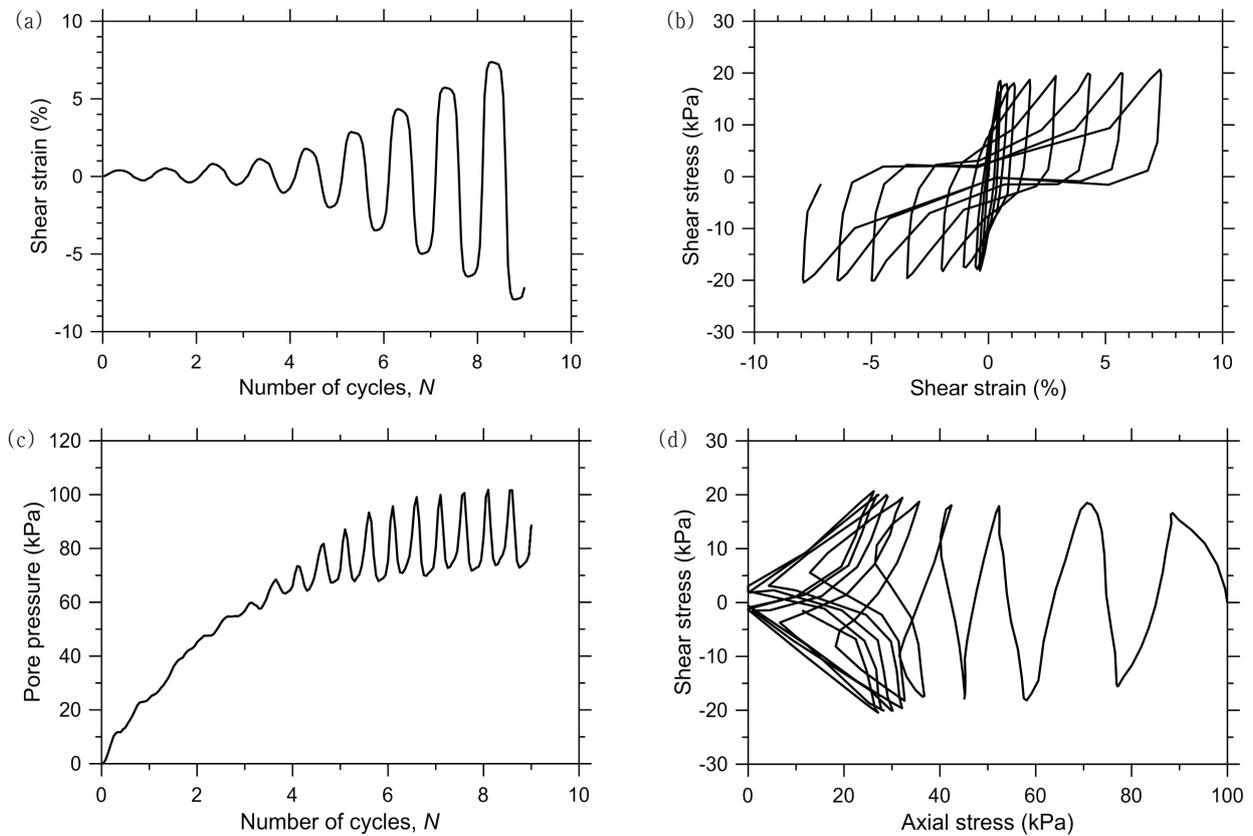


Fig. 4. Typical undrained cyclic response of Ottawa sand ($D_r = 60\%$, $\sigma'_v = 100$ kPa, $CSR = 0.2$): (a) Shear strain versus number of cycles; (b) Stress-strain response; (c) Residual excess pore-water pressure versus number of cycles; (d) Undrained stress path

델에 기반한 곡선이 Idriss and Boulanger(2008) 모델로부터 계산된 곡선에 비하여 경사의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다. 두 모델에 의한 결과를 전반적으로 살펴보면, Park et al.(2014)의 모델은 일반적으로 사용되는 Idriss and Boulanger(2008) 모델에 비하여 사용하기에는 상대적으로 어렵지만 정확도는 개선되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이후 모든 자료에 Park et al.(2014)의 모델을 적용하여 액상화 저항 곡선을 계산하였다.

4. 액상화 저항 곡선 문헌 조사

본 절에서는 전절에서 설명한 계측자료에 추가적으

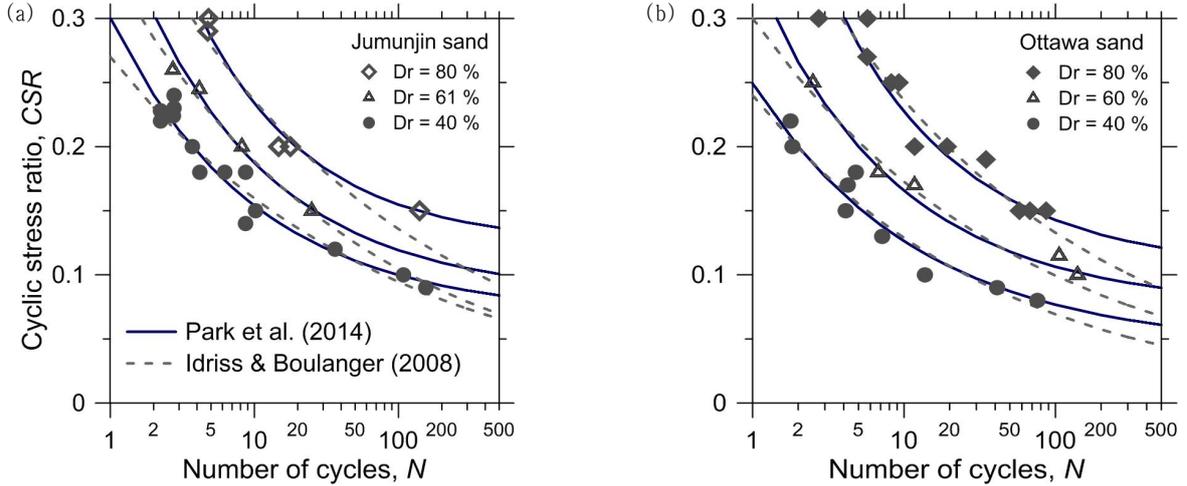


Fig. 5. Relationship between CRR versus N for (a) Jumunjin sand, and (b) Ottawa sand measured from stress-controlled cyclic simple shear tests. Solid lines and dashed lines represent fitted liquefaction resistance curves constructed by models of Park et al.(2014) and Idriss and Boulanger (2008), respectively

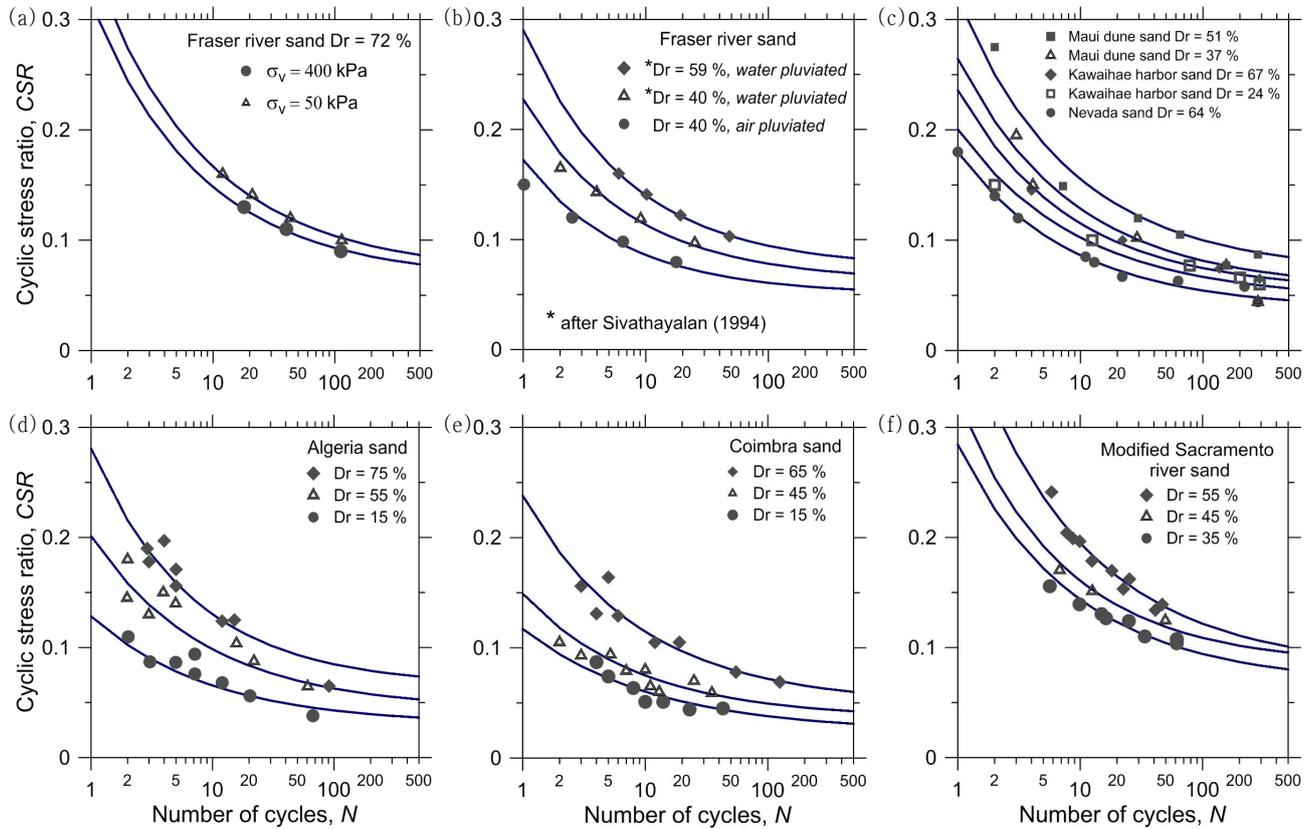


Fig. 6. Relationship between CRR versus N for clean sands measured from stress-controlled cyclic simple shear tests. Solid lines represent fitted liquefaction resistance curves constructed by models of Park et al. (2014)

로 기존의 여러 문헌들에 보고된 반복단순전단시험으로부터 측정된 액상화 저항 곡선을 분석하였다. 참조한 문헌과 지반 물성, 시험 조건 등의 상세한 내용은 Table 2에 정리하였으며, $CRR-N$ 측정 자료는 Fig. 6에 도시하였다. 시료의 종류, 상대밀도, 구속압, 시료 조성 방법은 모두 CRR 에 영향을 미치는 것으로 나타났다. CRR 은 상대밀도의 증가 또는 공극비의 감소에 따라 증가한다. 또한, Fig. 6(a)와 같이 구속압이 증가하면 CRR 은 감소하는데, 이는 밀도가 높은 모래에서 더욱 두드러지게 나타난다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 건조낙사법에 비해 수중낙사법에 의해 조성된 시료가 더 큰 액상화 저항 특성을 보이고 있다. CRR 의 최대값은 0.6에서 0.15의 범위로 나타났다.

5. 정규화된 액상화 저항 곡선

전절에서 살펴 본 바와 같이, 사질토의 액상화 저항 곡선은 지반 물성, 구속압, 시료 조성 방법 등에 큰 영향을 받기에 곡선의 분포에 큰 편차가 있는 것을 확인하였다. 각각의 조건을 모두 고려한 설계 액상화 저항 곡선을 도출하기에는 활용 가능한 자료의 수가 부족하며 불확실성이 크다. 또한, 실내시험의 결과를 설계에 활용하기 위해서는 현장 조건과 동일한 상태의 시료 조성이 필요한데, 사질토에서 불교란 시료를 채취하는 것은 매우 어렵기에 이 또한 쉽지 않다. 이러한 어려움으로 인하여, 간편예측법에서는 표준관입시험, 콘관입시험 또는 전단파속도 등의 결과를 이용하여 CRR 을 산정한다.

대부분의 현장시험결과와 CRR 의 관계는 등가재하횟수 15에 상응하는 규모 7.5 지진에 대해서 제안되어 있으며 이를 $CRR_{N=15}$ ($N=15$ 에서의 CRR)라 한다(Andrus et al., 2009; Andrus and Stokoe II, 2000; Boulanger and Idriss, 2014, 2016; Cetin et al., 2004; Idriss and Boulanger, 2012; Kayen et al., 2013; Moss et al., 2006; Seed et al., 1985). 만약에 $N=15$ 에서의 CRR 은 현장시험결과로부터 예측하되, 나머지 N 에서의 CRR 을 $CRR_{N=15}$ 에 대한 비율로써 산정할 수 있다면 유효응력해석에 활용할 수 있는 의미 있는 자료가 될 것이다. 본 연구에서는 Fig. 5와 6에 도시한 모든 액상화 저항 곡선을 $CRR_{N=15}$ 로 정규화하였으며, 이에 따른 곡선의 형상 및 분산 정도를 평가하였다. Fig. 7과 8에 정규화된 액상화 저항 곡선을 도시하였다. 액상화 저항 곡선은 전술한 바와 같이 측정값과 보다 잘 일치하는 Park et al.(2014) 모델을 사용하여 계산하였다. Fig. 5~6과 비교하면 정규화 이후 CRR 의 분산이 현저하게 감소함을 알 수 있다. CRR 의 최대값은 2.0에서 2.5의 범위로 나타나며, 상대밀도의 증가에 따라 정규 곡선 역시 위로 이동하는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 구속압과 시료 조성방법은 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 본 연구에서 사용한 모든 자료에 의한 정규화된 액상화 저항 곡선을 한 그래프에 도시하였다. 또한 비교를 위하여 Liu et al.(2001)과 Boulanger and Ziotopoulou(2015)가 제안한 액상화 곡선 범위와 Seed and Idriss(1982)의 환산계수 곡선을 마찬가지로 정규화하여 함께 도시하였다. Seed and Idriss(1982)이

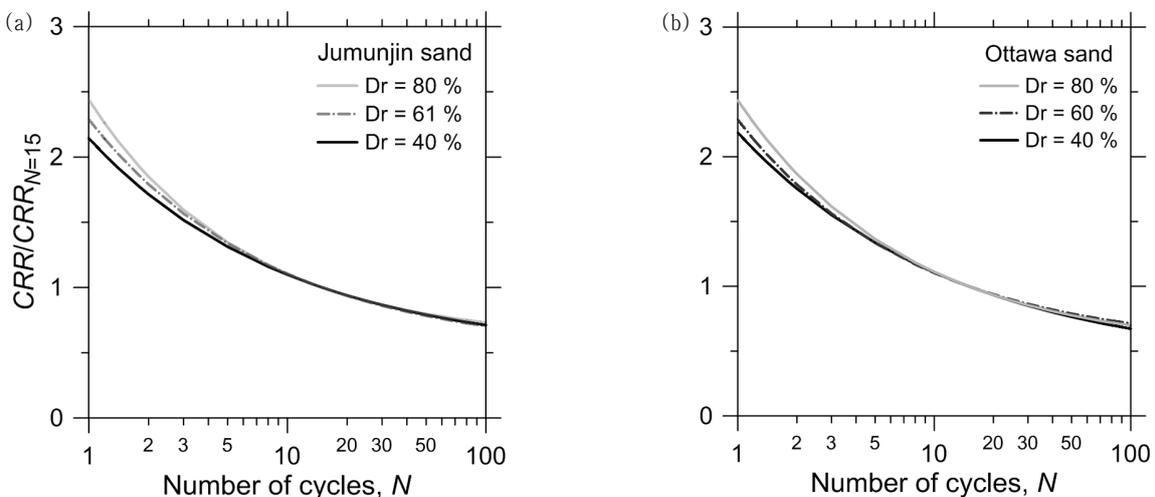


Fig. 7. Normalized liquefaction resistance ($CRR/CRR_{N=15} - N$) curves for (a) Jumunjin sand, and (b) Ottawa sand fitted with Park et al. (2014) model to data from simple shear tests

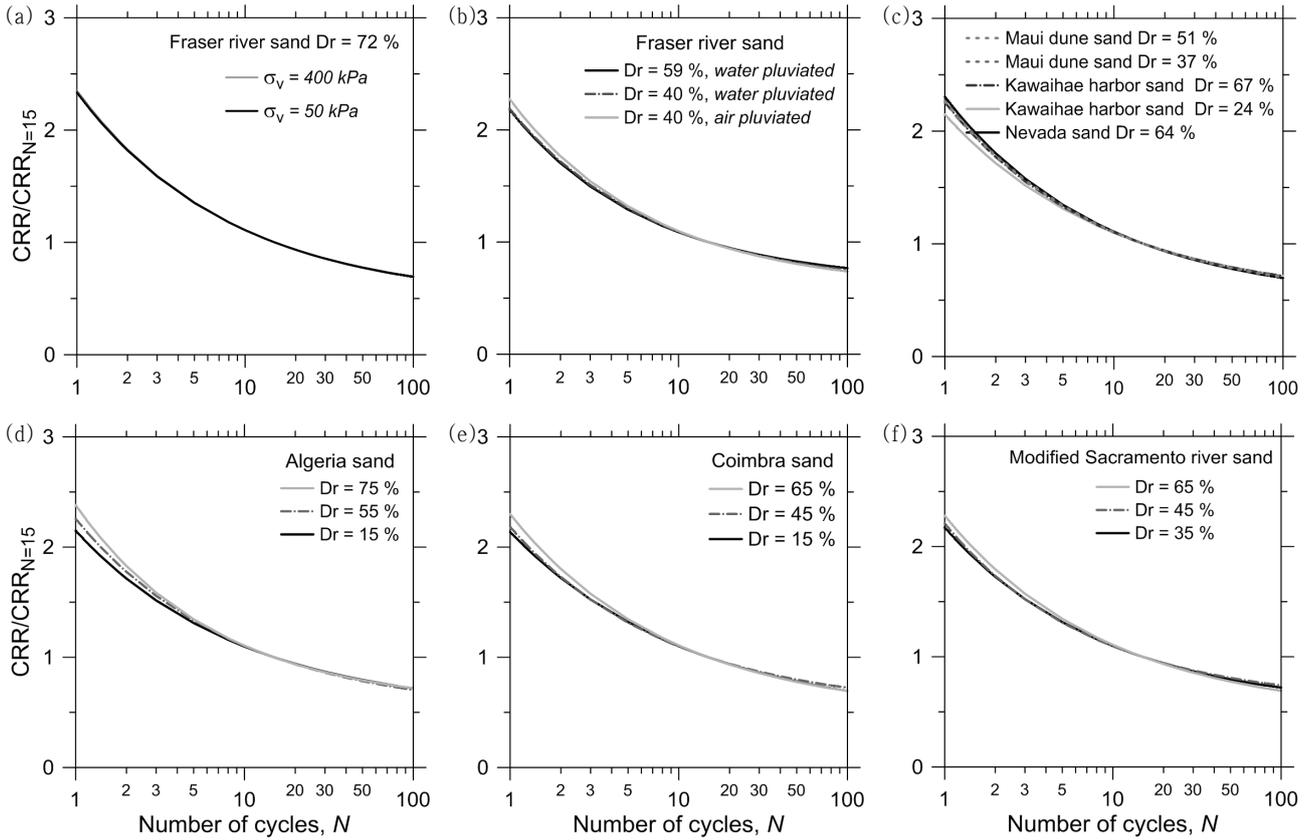


Fig. 8. Normalized liquefaction resistance ($CRR/CRR_{N=15} - N$) curves fitted with Park et al. (2014) model to data from simple shear tests

의 환산계수(Ambraseys, 1988; Andrus and Stokoe, 1997; Arango, 1996; Youd and Noble, 1997)는 비교하지 않았는데, 이는 Seed and Idriss(1982)의 환산계수만이 실험 측정 자료에 기초한 것이기 때문이다. Liu et al.(2001)이 제안한 범위는 본 연구의 결과보다 크게 나타나는데, 하한 곡선이 본 연구의 상한 곡선과 거의 일치하는 결과를 보인다. Boulanger and Ziotopoulou(2015)가 제안한 범위는 Liu et al.(2001)의 범위에 비해 현저히 작은 값을 나타내는데, 곡선의 상한($b = 0.27$)이 Park et al.(2014) 모형의 하한과 유사함을 보인다. Boulanger and Ziotopoulou(2015) 제안 범위가 본 연구의 곡선에 비하여 작은 이유는 이들이 Idriss and Boulanger(2008)의 곡선을 사용하였기 때문이다. Idriss and Boulanger (2008)의 곡선을 사용할 경우, CRR 이 다소 작게 예측되는 것은 Fig. 5에서 이미 확인하였다. Seed and Idriss (1982)의 환산계수는 $N < 15$ 일 때 본 연구의 하한과 거의 일치하며, $N > 15$ 일 때는 본 연구의 평균 곡선과 유사하다. 위에서 살펴 본 바와 같이 본 연구에서 제안된 곡선의 범위가 여러 기존 연구의 결과 이내에 포함된다 것은 매우 고무적이며, 제안된 곡선의 적절성을 입증

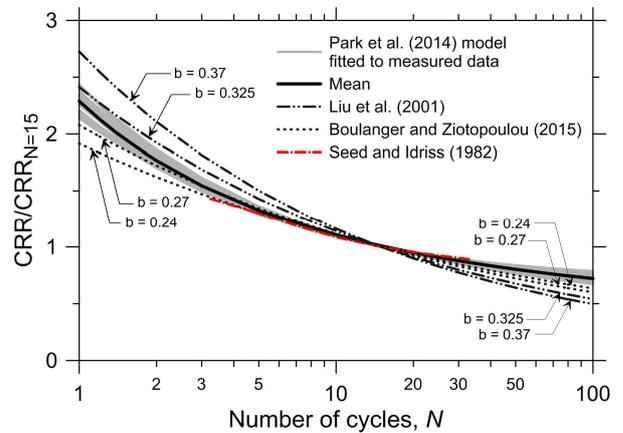


Fig. 9. Comparison of normalized liquefaction resistance curves

하는 중요한 근거라고 할 수 있을 것이다.

Fig. 9에 도시된 결과로부터 다음과 같은 $CRR-N$ 곡선의 새로운 실험식을 제안하였다.

$$\frac{CRR}{CRR_{N=15}} = \frac{e^{(15/N)^b}}{e^{(1)^b}} \quad (4)$$

여기서 b 는 곡선적합계수이다. 평균, 상한, 하한 곡선

에 대한 b 값을 Table 3 에 정리하였다. Table 3 에서 볼 수 있듯이 $N=15$ 를 기준으로 b 의 값은 달라진다. Fig. 10 에서 확인할 수 있듯이 식 (4)에 의해 제안된 곡선과 Park et al.(2014) 모델에 의한 곡선이 매우 잘 일치하는 결과를 보여준다. 제안된 식은 간편할 뿐만 아니라, 계측 결과와 매우 잘 일치하므로 설계 시 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

액상화 저항 곡선을 국내 설계기준에서 적용하는 재하횟수 10 회가 아니라 15 회에 대해서 정규화한 이유는 국외에서 지속적으로 업그레이드되고 있는 현장시험결과와 CRR 관계 곡선이 모두 재하횟수 15 회에 대하여

Table 3. Proposed values for b of Eq. (4)

	$N \leq 15$	$N > 15$
Mean	0.22	0.22
Upper bound	0.24	0.27
Lower bound	0.21	0.16

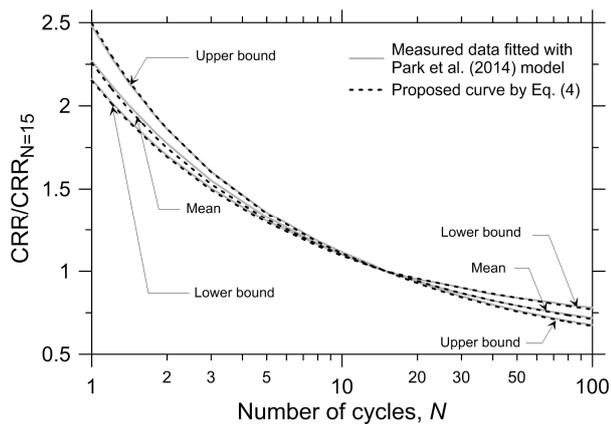


Fig. 10. Comparison of measured data from simple shear tests fitted with Park et al. (2014) model and proposed curves from Eq. (4)

제시되고 있기 때문이다. 따라서 국내에서 액상화 평가를 위한 내진설계를 할 때에는 본 연구에서 제시한 정규화된 액상화 저항 곡선으로부터 재하횟수 15 회가 아니라 10 회 시의 CRR 을 산정하여 적용 가능할 것이라 판단된다. 현장시험결과와 본 연구에서 제시한 정규화된 액상화 저항 곡선으로부터 부지 고유의 액상화 저항 곡선을 도출하는 과정은 Fig. 11 에 도시하였다. Fig. 11(a) 와 같이 특정 부지의 표준관입시험, 콘관입시험, 전단파 속도 시험 등의 자료로부터 $CRR_{N=15}$ 를 구하여 식 (4)의 양변에 곱하면 Fig. 11(c)와 같이 특정 부지 고유의 액상화 저항 곡선을 얻을 수 있다. 전술한 바와 같이 국내 기준에서는 Fig. 11(c)로부터 $CRR_{N=10}$ 을 구하여 액상화 평가의 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

6. 결론

지진 시 작용하는 반복 하중에 의하여 발생하는 잔류 과잉간극수압 예측에 필요한 액상화 저항 곡선을 반복 단순전단시험과 문헌조사를 통하여 도출하였다. 나아가 액상화 저항 곡선이 실무에 활용될 수 있도록 실내시험 결과를 현장시험결과와 결합할 수 있는 새로운 정규화 방안을 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 주문진 표준사와 오타와 표준사를 시료로 하여 반복단순전단시험을 수행하고 다양한 표준사에 대한 기존 연구 자료를 수집하여 액상화 저항 곡선에 영향을 주는 인자를 분석하였다. 이 때 액상화 저항 곡선은 Park et al.(2014)과 Idriss and Boulanger(2008)의 모델을 사용하여 계산하였다. 실무에서 널리 사

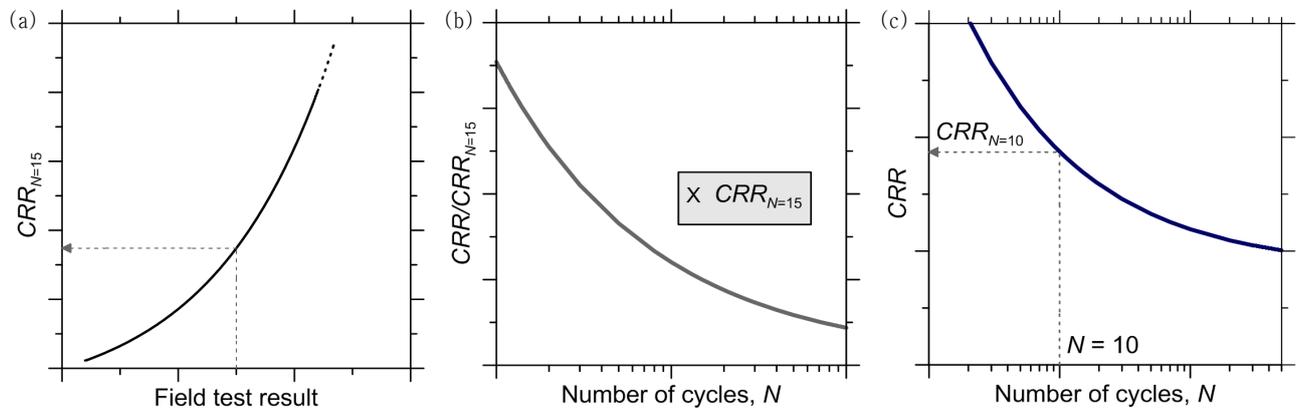


Fig. 11. Schematic procedure of deriving site specific liquefaction resistance curve: (a) Field test result; (b) Normalized $CRR-N$ curve; (c) Site specific $CRR-N$ curve

용하고 있는 Idriss and Boulanger(2008) 모델에 비해 Park et al.(2014) 모델이 전반적으로 실측 자료와 보다 잘 일치하는 결과를 보였다.

- (2) 액상화 저항 곡선은 상대밀도, 구속압, 시료 조성방법 등의 영향을 받는 것을 확인하였다. 하지만, 곡선의 CRR 을 재하횟수 $N=15$ 에서의 $CRR(CRR_{N=15})$ 로 정규화할 경우, 그 영향이 크게 감소하였다. 따라서 정규화 곡선을 사용하는 경우에는 위 변수의 영향을 개별적으로 고려할 필요가 없는 것으로 나타났다.
- (3) 재하횟수 $N=15$ 에서의 $CRR(CRR_{N=15})$ 로 액상화 저항 곡선을 정규화한 이유는 $CRR_{N=15}$ 는 표준관입시험, 콘관입시험 또는 전단파 속도로부터 쉽게 산정할 수 있기 때문이다. 또한, 국내 설계기준에서 적용하는 재하횟수 $N=10$ 을 사용하지 않은 것은 국외에서 지속적으로 업그레이드되고 있는 현장시험결과와 CRR 관계 곡선이 모두 재하횟수 $N=15$ 를 기준으로 하기 때문이다. 현장 고유의 $CRR_{N=15}$ 와 본 연구에서 제안한 정규화된 액상화 저항 곡선을 사용할 경우, 쉽게 부지 고유의 액상화 저항 곡선을 산정할 수 있다.
- (4) 정규화된 액상화 저항 곡선은 분산을 크게 감소시키지만 완벽하게 제거하는 것은 아니다. 토양 특성에 따른 액상화 저항 곡선의 변동성을 고려하기 위해 평균 곡선과 더불어 상한 및 하한 곡선을 제시하였다. 제안된 곡선은 추후 부지 고유의 지반응답해석과 항만 구조물의 안정성 평가 등에 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업(13IFIP-B06700801)에 의해 수행한 연구 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ambraseys, N.N. (1988), "Engineering Seismology", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.17, No.1, pp.51-105.
2. Andrus, R.D., Hayati, H., and Mohanan, N.P. (2009), "Correcting Liquefaction Resistance for Aged Sands Using Measured to Estimated Velocity Ratio", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.6, pp.735-744.
3. Andrus, R.D. and Stokoe II, K.H. (2000), "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity", *Journal of Geotechnical and*

- Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.11, pp.1015-1025.
4. Andrus, R.D. and Stokoe, K.H. (1997), *Liquefaction resistance based on shear wave velocity*, 1088-3800, US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), pp.89-128.
5. Arango, I. (1996), "Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations", *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, Vol.122, No.11, pp.929-936.
6. Booker, J.R., Rahman, M.S., and Seed, H.B. (1976), *GADFLEA: A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading*, California Univ., Berkeley (USA). Earthquake Engineering Research Center.
7. Boulanger, R. and Idriss, I. (2014), *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis.
8. Boulanger, R. and Idriss, I. (2016), "CPT-Based Liquefaction Triggering Procedure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.2, pp.1-11.
9. Boulanger, R. and Ziotopoulou, K. (2015), *PM4Sand (Version 3): a sand plasticity model for earthquake engineering applications*, UCD/CGM-15/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis.
10. Boulanger, R.W. and Seed, R.B. (1995), "Liquefaction of Sand under Bidirectional Monotonic and Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, Vol.121, No.12, pp.870-878.
11. Brandes, H.G. and Seidman, J. (2008), "Dynamic and Static behavior of Calcareous Sands", *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*: International Society of Offshore and Polar Engineers, pp.573-578.
12. Castro, G. (1975), "Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.101, No.6, pp.551-569.
13. Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr, L.F., Kayen, R.E., and Moss, R.E. (2004), "Standard Penetration Test-based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.12, pp.1314-1340.
14. Da Fonseca, A.V., Soares, M., and Fourie, A.B. (2015), "Cyclic DSS Tests for the Evaluation of Stress Densification Effects in Liquefaction Assessment", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.75, pp.98-111.
15. De Alba, P.A., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1976), "Sand Liquefaction in Large-scale Simple Shear Tests", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.102, No.9, pp.909-927.
16. Derakhshandi, M., Rathje, E.M., Hazirbaba, K., and Mirhosseini, S. (2008), "The Effect of Plastic Fines on the Pore Pressure Generation Characteristics of Saturated Sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.28, No.5, pp.376-386.
17. Finn, W., Pickering, D.J., and Bransby, P.L. (1971), "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, No.4, pp.639-659.
18. Idriss, I. and Boulanger, R.W. (2008), *Soil liquefaction during earthquakes*, Earthquake engineering research institute.
19. Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2012), "Examination of SPT-Based Liquefaction Triggering Correlations", *Earthquake Spectra*, Vol.28, No.3, pp.989-1018.

20. Ishihara, K. (1996), *Soil behaviour in earthquake geotechnics*, The Oxford engineering science series.
21. Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A.D., Tanaka, Y., and Tokimatsu, K. (2013), "Shear-wave Velocity-based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.3, pp.407-419.
22. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall.
23. Lee, K.L. and Albaisa, A. (1974), "Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.100, No.1, pp.387-406.
24. Liu, A.H., Stewart, J.P., Abrahamson, N.A., and Moriwaki, Y. (2001), "Equivalent Number of Uniform Stress Cycles for Soil Liquefaction Analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.12, pp.1017-1026.
25. MOF (1999), *Standard of Seismic design for fishing port and harbor facilities*, Ministry of Oceans and Fisheries.
26. Moss, R., Seed, R.B., Kayen, R.E., Stewart, J.P., Der Kiureghian, A., and Cetin, K.O. (2006), "CPT-based Probabilistic and Deterministic Assessment of in Situ Seismic Soil Liquefaction Potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.8, pp.1033-1051.
27. Park, T., Park, D., and Ahn, J.K. (2014), "Pore Pressure Model based on Accumulated Stress", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.13, No.7, pp.1913-1926.
28. Polito, C.P., Green, R.A., and Lee, J. (2008), "Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.134, No.10, pp.1490-1500.
29. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982), *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute.
30. Seed, H.B. and Peacock, W.H. (1971), "Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, No.8, pp.1099-1119.
31. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L., and Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.12, pp.1425-1445.
32. Shim, H. (2001), *The comparison of undrained behavior of sand between simple shear condition and triaxial compression condition*, Master Thesis, Inha University.
33. Sivathayalan, S. (1994), *Static, cyclic and post liquefaction simple shear response of sands*, Master thesis, University of British Columbia.
34. Sriskandakumar, S. (2004), *Cyclic loading response of Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests*, Master thesis, University of British Columbia.
35. Towhata, I. (2008), *Geotechnical earthquake engineering*, Springer Science and Business Media.
36. Xenaki, V.C. and Athanasopoulos, G.A. (2003), "Liquefaction Resistance of Sand-silt mixtures: An Experimental Investigation of the Effect of Fines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.23, No.3, pp.183-194.
37. Yoon, Y., Yoon, G., and Choi, J. (2007), "Liquefaction Strength of Shelly Sand in Cyclic Simple Shear Test", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.8, No.6, pp.69-76.
38. Youd, T.L. and Noble, S.K. (1997), *Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses*, US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER).
39. Ziotopoulou, K. and Boulanger, R.W. (2012), "Constitutive Modeling of Duration and Overburden Effects in Liquefaction Evaluations", *Proceedings of second international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering. Taormina, Italy, May*, pp.28-30.

Received : May 17th, 2016

Revised : June 1st, 2016

Accepted : June 3rd, 2016